



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

## Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics

Direction de la Post-Graduation & de la Recherche Scientifique

# Mémoire de Magister

Option : Matériaux et Structures

**ADAFER SONIA**

Ingénieur d'Etat en Travaux Publics  
Diplômée de l'Ecole Nationale des Travaux Publics

Intitulé du mémoire

**EVALUATION DE LA VULNERABILITE SISMIQUE  
DES ROUTES**

Soutenu publiquement le 18 décembre 2014 devant le jury composé de :

M M.HADID	Professeur, ENSTP Alger	Président
M M.BENSAIBI	Professeur, ENSTP Alger	Rapporteur
Mme M.MORSLI	Professeur, ENP Alger	Examineur
M Y.MEHANI	Maître de recherche A, CGS	Examineur
Mme F.I BELHEOUANE	MCB, Université de Blida 1	Invitée

## **DEDICACES**

Je dédie ce travail

aux personnes chères à mon cœur,

à la mémoire des victimes des catastrophes naturelles.

## REMERCIEMENTS

Je tiens en premier à remercier vivement mon encadreur le Professeur Mahmoud Bensaïbi pour m'avoir proposé un sujet aussi passionnant et enrichissant. Je le remercie particulièrement pour sa confiance et sa motivation continuelle. Je lui exprime aussi mon immense gratitude pour sa disponibilité permanente et son investissement envers ce travail. Ses orientations et ses conseils avisés m'ont permis d'aller plus loin et de travailler dans des conditions très agréables.

Ce travail n'aurait pu être achevé sans le soutien de mes quatre trésors : l'aide, le réconfort indéfectibles et surtout l'immense patience de mon époux Farid. L'amour et l'encouragement de mes enfants chéris Sarah, Lydia et Racim qui chacun à sa manière m'a soutenu et encouragé. Je les remercie pour les moments de bonheur qu'ils m'offrent.

Une pensée particulière à toute ma famille et surtout à mes parents, qui ont toujours été présents en toutes circonstances.

Je remercie également l'ensemble des membres du jury pour l'attention qu'ils ont porté à mon travail et pour le temps consacré à l'évaluer. Je remercie le Professeur M. HADID pour avoir accepté de présider le jury, le Professeur M. MORSLI et le Maître de recherche Y. MEHANI pour avoir accepté d'examiner et de juger mon mémoire.

J'adresse également mes remerciements à mes collègues et amis du Ministère des Travaux Publics, du CTTP, du Secteur Privé et de la DTP des wilayas de Boumerdes, de Ain Temouchent, de Béjaïa pour m'avoir apporté toute leur aide, pris de leur temps pour faire des séances de travail et mis à ma disposition les données nécessaires à mon projet de recherche.

Je ne saurais oublier d'exprimer ma gratitude à mes collègues et ex-enseignants de l'ENSTP, Messieurs B. Remki et A. Adem pour leurs encouragements lors de ma première année d'inscription en Magister.

Ma reconnaissance sincère est exprimée aussi à mes amies Mme D. Bouakkaz et Melle Z. Mezzache pour leur aide précieuse, leur gentillesse et leur soutien permanent.

Un grand merci à mes collègues de la Direction de la Formation Continue, M. A. Khadraoui et Mme G. Ouhadda pour leurs encouragements, leur gentillesse et surtout leur bonne humeur.

Enfin un grand merci à tous ceux qui ont eu à mon égard un mot d'encouragement et de réconfort lors de ces deux dernières années.

## ملخص

تتعرض الطرق إلى عدة أضرار خاصة أثناء الأحداث الزلزالية و للحد من هذه الأضرار ينبغي إجراء دراسة هشاشتها. تندرج دراستنا هذه ضمن هذا الإطار، وتهدف إلى تطوير منهجية لتقييم الهشاشة الزلزالية للطرق باستعمال طريقة مؤشر الهشاشة. وقد تم تحديد العوامل المؤثرة على ضعف الطرق، كما استخدمت الطريقة المتعددة المعايير AHP (Analytical Hierarchy Process) للأخذ بعين الاعتبار الأهمية النسبية بين مختلف العوامل. كما اقترحت عبارة تحليلية لمؤشر الهشاشة. بعد ذلك تم التحقق من صحة هذا النموذج على عدة مقاطع من الطرق التي تضررت خلال زلزال عين تيموشنت سنة 1999. كما أجريت عدة سيناريوهات زلزالية لإظهار تطبيق هذه الطريقة المقترحة.

**كلمات أساسية:** الهشاشة الزلزالية، الطرق، مؤشر الهشاشة، طريقة متعددة المعايير MCDM ، طريقة AHP (Analytical Hierarchy Process)، سيناريوهات زلزالية.

## RESUME

Les routes subissent plusieurs dommages lors des évènements sismiques. Afin de les réduire une étude de vulnérabilité doit être menée. La présente étude entre dans ce cadre et a pour but de développer une méthode d'évaluation de la vulnérabilité sismique des routes en utilisant la méthode de l'indice de vulnérabilité. Les paramètres qui influencent la vulnérabilité des routes ont été identifiés et la méthode multicritère AHP (Analytical Hierarchy Process) a été utilisée pour tenir compte de l'importance relative entre ces paramètres. Une expression analytique de l'indice de vulnérabilité a été proposée. Le modèle développé a été validé sur plusieurs sections de routes endommagées par le séisme de Ain Temouchent du 22 décembre 1999. Des scénarii sismiques ont également été réalisés afin de montrer l'applicabilité de la méthode développée.

**Mots-clés :** vulnérabilité sismique, routes, indice de vulnérabilité, méthode multicritère MCDM (Multi-Criterion Decision Making), méthode AHP (Analytical Hierarchy Process), scénarii sismiques.

## **ABSTRACT**

Roads suffer several damages under seismic events. To reduce these damages a vulnerability study must be conducted. The framework of the present study aims to develop a methodology to assess the seismic vulnerability of roads using the vulnerability index method. The parameters influencing roads vulnerability were identified and the multi-criterion method AHP (Analytical Hierarchy Process) was used to derive the relative importance between parameters. An analytical expression of the vulnerability index was proposed. The developed model was validated on several sections road damaged by the Ain Temouchent earthquake (22/12/1999). Seismic scenarios were also achieved to show the efficiency of the developed method.

**Key-words :** seismic vulnerability, roads, vulnerability index, Multi-Criterion Decision Making MCDM, AHP method (Analytical Hierarchy Process), seismic scenarios.

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Impact d'un phénomène catastrophique sur un réseau de transport – Détail des dommages et des vulnérabilités impliqués (Gleyze, 2005).....	7
Figure 1.2 : Relation inter-vulnérabilités dans l'évaluation de la vulnérabilité d'un réseau routier (Gleyze, 2005).....	9
Figure 1.3 : Dommages sur autoroute dus à la rupture de faille en surface-Séisme de Kocaeli en 1999 (Turquie)/ (BRGM, 2006).....	12
Figure 1.4 : Endommagement d'une route par la rupture de faille (faille décrochante) - Séisme de Canterbury en 2010 (N.Zélande) /(ENZ,2010).....	13
Figure 1.5 : Endommagement de la chaussée due à la propagation latérale -Séisme de Niigata-Chuetsu Oki en 2007 (Japon) /(Syner-G D3.7, 2009).....	13
Figure 1.6 : Endommagement de la chaussée dû à la liquéfaction-Séisme de Lefkas en 2003 (Grèce)/ (BRGM, 2006).....	13
Figure 1.7 : Ondulation de la chaussée par les tassements différentiels - Séisme de Hokkaido-Nansei-OkI en 1993 (Japon)/ (FHWA, 2004).....	14
Figure 1.8 : Ondulation de la chaussée par les tassements différentiels - Séisme de Chrischurch en 2011 (N. Zélande)/(Chouw et al., 2011).....	14
Figure 1.9 : Chaussée endommagée par les tassements différentiels dus à la densification du sol support - Séisme de Boumerdes en 2003 (Algérie)/(CTTP, 2003)...	15
Figure 1.10 : Fissures sur la chaussée –Séisme de Boumerdes en 2003 (Algérie)/ (CTTP, 2003).....	15
Figure 1.11 : Rupture d'un remblai autoroutier dû au tassement et à la déformation du sol meuble /séisme de Hokkaido-Nansei-OkI en 1993 (Japon)/(FHWA, 2004).....	16
Figure 1.12 : Rupture d'un remblai routier dû au tassement provoqué par la densification du remblai - Séisme de Boumerdes en 2003 (Algérie) / (CTTP, 2003).....	16
Figure 1.13 : Rupture d'un remblai routier dû à la propagation latérale -Séisme de Kozani en 1995 (Grèce)/(Syner-G D3.7, 2009).....	17
Figure 1.14 : Rupture de remblai et de chaussée due à la propagation latérale –Séisme de Le Pesco (Pérou-2007)/(O'Connor et al., 2007).....	17
Figure 1.15 : Endommagement d'un remblai routier dû à un glissement latéral -Séisme de Iwate Miyagi-Nairiku en 2008 (Japon) /(Syner-G D3.7, 2009).....	17
Figure 1.16 : Tassement de près de 1 m dû au compactage sismique au droit du remblai d'accès à l'ouvrage - Séisme d'El Asnam de 1980 (Algérie ) (EERI/CTC, 1980).....	18

Figure 1.17 : Tassement différentiel dû au compactage sismique au droit du remblai d'accès à l'ouvrage, a) Séisme de Myanmar en 2001 (Burma)/ (Anbazhagan et al., 2011), b) Séisme de Niigata-Chuetsu Oki en 2007 (Japon)/ (Syner-G D3.7, 2009).....	18
Figure 1.18 : Blocage de route dû au glissement de terrain, a) Séisme de Lefkas en 2003 (Grèce)/(BRGM, 2006), b) Séisme de Kashmir en 2005 (Pakistan)/ (Anbazhagan et al., 2011).....	19
Figure 1.19: Destruction de routes due aux glissements de terrain-Séisme de Nigata-Ken Chuetsu en 2004 (Japon)/ (Syner-G D3.7, 2009).....	19
Figure 1.20 : Représentation schématique des méthodes classiques pour l'évaluation de la vulnérabilité.....	22
Figure 1.21 Organisation d'un modèle d'estimation de dommages sismiques (Chiroiu, 2004).....	26
Figure 1.22 : Schéma conceptuel de la méthode RADIUS (RADIUS 2002).....	27
Figure 1.23 : Courbes de vulnérabilités des réseaux (RADIUS, 1996).....	28
Figure 1.24 : Courbes de fragilité pour les routes par HAZUS (FEMA-NIBS, 2004).....	30
Figure 1.25: Organigramme de la méthodologie de RISK-UE (Pitilakis et al., 2006).....	32
Figure 2.1 : Etapes de la méthode AHP.....	39
Figure 2.2 : Structure hiérarchique générique de la méthode AHP (Adamcsek, 2008).....	40
Figure 3.1 : Principales étapes de la méthode développée.....	52
Figure 3.2 : Types de paramètres .....	54
Figure 3.3 : Facteurs du 'Paramètre Physique' .....	55
Figure 3.4 : Caractéristiques du facteur ' <i>Chaussée</i> ' .....	56
Figure 3.5 : Caractéristiques du facteur ' <i>Remblai</i> ' .....	56
Figure 3.6 : Caractéristiques du facteur ' <i>Conditions du sol</i> ' .....	57
Figure 3.7 : Caractéristiques du facteur ' <i>Conditions de de Maintenance</i> ' .....	58
Figure 3.8 : Attributs du 'Paramètre Physique' .....	59
Figure 3.9 : Courbes de fragilité des chaussées sujettes à la défaillance du sol (Syner-G D 3.7, 2009).....	60
Figure 3.10 : Endommagement d'une chaussée à plusieurs voies Pan Américan Highway (Perou) (O'Connor et al., 2007).....	60

Figure 3.11 : Influence de la hauteur de remblai sur l'évolution des dommages(Syner-G D 3.7, 2009), a) Hauteur =2m, b) Hauteur =4m.....	62
Figure 3.12 : Relation entre le pourcentage de dommages des pentes et l'angle d'inclinaison (Zhang et al., 2011).....	63
Figure 3.13 : Influence de la nature du sol sur les dommages du remblai (Syner-G D 3.7, 2009).....	65
Figure 3.14 : Relation entre le pourcentage de dommages et la hauteur de la pente (Zhang et al., 2011).....	68
Figure 3.15 : Facteurs du 'Paramètre Aléa' .....	69
Figure 4.1 : Organigramme du programme 'VSAT' .....	85
Figure 4.2 : Organigramme du programme 'RSVI' .....	85
Figure 4.3 : Sismotectonique et relief de la région de Ain Temouchent (Belabbès et al., 2008).....	88
Figure 4.4 : Carte Isoséiste du séisme (Yelles et al., 2004).....	88
Figure 4.5 : Réseau routier de la wilaya de Ain Temouchent (MTP, 2012).....	90
Figure 4.6 : Classement des sections de routes étudiées.....	97
Figure 4.7 : Plage de vulnérabilité.....	99
Figure 4.8 : Carte de la distribution de la sismicité dans la région des Babors (Machane et al., 2009).....	100
Figure 4.9 : Réseau routier de la wilaya de Béjaia (MTP, 2012).....	101
Figure 4.10 : Evolution de l'Indice de Vulnérabilité 'IV' .....	103

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Echelle d'intensité sismique (Chiroiu, 2004).....	20
Tableau 1.2 : Echelle des dommages physiques des routes (Anbazhagan et al., 2011)...	21
Tableau 1.3 : Etats de dommages pour les routes d'après Hazus (LESSLOSS, 2007)....	26
Tableau 1.4 : Classification des dommages des routes (RISK-UE, 2003).....	33
Tableau 1.5 : Définition des états de dommages pour les routes pour SYNER-G (Syner-G D3.7, 2009).....	34
Tableau 2.1: Terminologie de l'analyse multicritère (Ennaouri, 2010).....	37
Tableau 2.2 : Echelle de comparaisons binaires de Saaty (Guesdon, 2011).....	41
Tableau 2.3 : Exemple d'une matrice de comparaison.....	42
Tableau 2.4 : Valeurs de l'Indice de Cohérence Aléatoire (IA) (Saaty, 1980).....	44
Tableau 2.5 : Valeurs seuils des ICG (Aguarón and Moreno-Jiménez, 2003).....	46
Tableau 2.6 : Indices de cohérence aléatoires de Saaty (Saaty, 2001).....	47
Tableau 2.7 : Valeurs acceptables du Ratio de cohérence (Saaty, 2001).....	47
Tableau 2.8 : Résumé d'études de vulnérabilité.....	49
Tableau 3.1 : Attributs et catégories du facteur 'Chaussée' .....	61
Tableau 3.2 : Catégories de l'attribut 'Hauteur' .....	62
Tableau 3.3 : Catégories de l'attribut 'Qualité du compactage' .....	63
Tableau 3.4 : Catégories de l'attribut 'Pente' .....	63
Tableau 3.5 : Attributs et catégories du facteur 'Remblai' .....	64
Tableau 3.6 : Classification du sol selon le RPA 99(RPA-99, 2003).....	64
Tableau 3.7 : Catégories de l'attribut 'Nature de sol'.....	65
Tableau 3.8 : Catégories de l'attribut 'Potentiel de Glissement' .....	67
Tableau 3.9 : Catégories de l'attribut 'Etat de la chaussée '.....	67
Tableau 3.10 : Catégories de l'attribut 'Dispositifs de protection des pentes' .....	69

Tableau 3.11 : Catégories du facteur ‘Intensité du séisme’ .....	70
Tableau 3.12 : Catégories du facteur ‘Potentiel de Liquéfaction’ .....	71
Tableau 3.13 : Catégories du facteur ‘Intersection route-faille’ .....	72
Tableau 3.14 : Récapitulation de la hiérarchisation des paramètres.....	73
Tableau 3.15 : Matrice et Vecteurs Poids des ‘Paramètres’ .....	75
Tableau 3.16 : Matrice et Vecteurs Poids des ‘Facteurs’ du Paramètre Physique .....	76
Tableau 3.17 : Matrices et Vecteurs Poids des ‘Facteurs’ du Paramètre Aléa.....	77
Tableau 3.18 : Matrices et Vecteurs Poids du facteur ‘Chaussée’ .....	77
Tableau 3.19 : Matrices et Vecteurs Poids du facteur ‘Remblai’ .....	78
Tableau 3.20 : Matrices et Vecteurs Poids du facteur ‘Conditions du Sol ’ .....	79
Tableau 3.21 : Matrices et Vecteurs Poids du facteur ‘Conditions de Maintenance’ .....	79
Tableau 3.22 : Récapitulation des coefficients de pondération et des scores.....	81
Tableau 4.1 : Grille des caractéristiques à renseigner.....	86
Tableau 4.2 : Caractéristiques du cas d’étude 1 .....	91
Tableau 4.3 : Caractéristiques du cas d’étude 2 .....	92
Tableau 4.4 : Caractéristiques du cas d’étude 3 .....	93
Tableau 4.5 : Caractéristiques du cas d’étude 4 .....	94
Tableau 4.6 : Caractéristiques du cas d’étude 5 .....	95
Tableau 4.7 : Caractéristiques du cas d’étude 6 .....	96
Tableau 4.8 : Synthèse des Iv obtenus .....	97
Tableau 4.9 : Niveaux d’endommagement (CTTP, 1999).....	98
Tableau 4.10 : Ecart enregistrés pour les cas d’études .....	99
Tableau 4.11 : Caractéristiques du cas d’étude pour différents scénarii sismiques.....	102
Tableau 4.12 : Résultats de l’IV pour différents scénarii sismiques .....	102
Tableau 4.13 : Ecart enregistrés selon différents scénarii sismiques.....	103

# TABLE DES MATIERES

<b>DEDICACES</b> .....	II
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	III
<b>RESUMES</b> .....	IV
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	VI
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	IX
<b>TABLE DES MATIERES</b> .....	XI

<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	1
------------------------------------	---

## CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I. Introduction.....	4
II. Principales définitions .....	4
2.1 Notions de base : Risque, aléa et vulnérabilité.....	4
2.2. Vulnérabilité d'un réseau routier.....	5
III. Types de vulnérabilité des routes .....	7
3.1. Vulnérabilité physique (ou matérielle).....	8
3.2. Vulnérabilité fonctionnelle.....	8
3.3. Vulnérabilité structurelle.....	8
IV. Dommages dus aux séismes historiques.....	10
V. Types de dommages.....	12
5.1 Dommages dans les chaussées.....	12
5.2 Dommages dans les remblais.....	15
5.3 Dommages dans les pentes (routes en déblais).....	19
VI. Classification des dommages.....	19
VII. Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité physique.....	22
7.1. Approches empiriques/statistiques.....	22
7.1.1. Méthode basée sur le jugement d'experts.....	23
7.1.2. Méthode de l'indice de vulnérabilité.....	24
7.1.3. Méthode des courbes continues.....	24
7.2. Approches numériques/analytiques.....	25
7.3. Approches hybrides.....	25
7.4. Méthodes pour scénarii sismiques.....	25
7.4.1. Méthode ATC.....	26
7.4.2. Méthode RADIUS.....	27
7.4.3. Méthode HAZUS.....	29
7.4.4. Méthode JICA.....	31
7.4.5. Méthode RISK-UE.....	31
7.4.6. Méthode REDARS.....	33
7.4.7. Méthode SYNER-G.....	34
VIII. Conclusion.....	35

## CHAPITRE 2 : PROCESSUS D'ANALYSE HIERARCHIQUE 'AHP Analytical Hierarchy Process'

I. Introduction.....	36
II. Méthodes multicritères " MCDM".....	36
2.1. Terminologie.....	37
2.2. Méthodologie.....	37
2.3. Problématique de l'aide multicritère à la décision.....	37
2.4. Choix de la méthode.....	38
III. Processus d'analyse hiérarchique "AHP".....	38
3.1. Méthodologie.....	39
3.2. Modifications et développement.....	45
3.2.1. Modifications.....	45
3.2.2. Développement.....	47
3.3. Utilisation de la méthode.....	48
3.4. Limites et avantages de la méthode.....	50
3.4.1. Limites.....	50
3.4.2. Avantages.....	50
IV. Conclusion.....	51

## CHAPITRE 3 : METHODE DE L'INDICE DE VULNERABILITE

I. Introduction.....	52
II. Méthodologie.....	52
III. Identification des paramètres de vulnérabilité.....	52
3.1. Choix des paramètres.....	53
3.2. Caractéristiques des paramètres.....	54
IV. Caractéristiques du ' <i>Paramètre Physique</i> '.....	54
4.1. Définition des facteurs de vulnérabilité.....	55
4.1.1. Chaussée.....	55
4.1.2. Remblai.....	56
4.1.3. Conditions du Sol.....	57
4.1.4. Conditions de Maintenance.....	58
4.2. Définition des attributs.....	59
4.2.1. Nombres de voies.....	59
4.2.2. Type de chaussée.....	61
4.2.3. Hauteur.....	61
4.2.4. Qualité du compactage.....	62
4.2.5. Pente.....	63
4.2.6. Nature de sol.....	64
4.2.7. Potentiel de Glissement.....	66
4.2.8. Etat de la chaussée.....	67
4.2.9. Dispositifs de protection des pentes.....	68

V. Caractéristiques du ‘Paramètre Aléa’ .....	69
5.1. Définition du facteur ‘Intensité’ .....	70
5.2. Définition du facteur ‘Potentiel de liquéfaction’ .....	70
5.3. Définition du facteur ‘Intersection Route-Faille’ .....	71
VI. Calcul des coefficients de pondérations (AHP).....	72
6.1. Coefficients de pondération des Paramètres (Niveau 1).....	75
6.2. Coefficients de pondération des Facteurs (Niveau 2).....	75
6.3. Coefficients de pondération des Attributs (Niveau 3).....	77
6.4. Système de notation des Catégories .....	80
VII. Détermination de l’expression analytique de l’Indice de Vulnérabilité.....	82
VIII. Conclusion.....	83

## **CHAPITRE 4 : MISE EN ŒUVRE ET VALIDATION**

I. Introduction.....	84
II. Programmes développés.....	84
III. Stratégie de validation.....	86
IV. Description de la zone d’étude.....	87
4.1. Description de la sismicité .....	87
4.2. Caractéristiques géomorphologiques et géologiques.....	89
4.3. Description du réseau routier.....	89
V. Validation du modèle développé.....	90
5.1. Cas d’étude 1.....	90
5.2. Cas d’étude 2.....	92
5.3. Cas d’étude 3.....	93
5.4. Cas d’étude 4.....	94
5.5. Cas d’étude 5.....	95
5.6. Cas d’étude 6.....	96
VI. Classes de vulnérabilité.....	98
VII. Scénarii sismiques .....	99
VIII. Conclusion.....	104

<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>105</b>
---------------------------------	------------

<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>107</b>
---	------------

### **ANNEXES**

Annexe 1 : Echelle des dommages physiques des routes : Road Damage Scale (Anbazhagan et al., 2011). .....	113
Annexe 2 : Article paru dans : Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul Aug 25-29,2014.....	114

## **INTRODUCTION GENERALE**

Le réseau routier est essentiel pour le développement social et économique d'un pays. Il tient une place de choix parmi les différents modes de transports car il est accessible à toutes les classes sociales et couvre tous les besoins de mobilité des personnes et des biens. Il favorise les échanges et réduit l'isolement géographique des régions. En outre, son rôle est crucial lors d'évènements sismique car il facilite l'acheminement des secours vers les zones sinistrées, l'évacuation des victimes et des blessés. Il facilite également après une catastrophe les actions de réparation et de reconstruction. Malheureusement, lors de séismes destructeurs, il n'est pas rare de constater que des dommages importants ont été infligés aux routes les rendant difficilement praticables ou encore totalement fermées à la circulation.

Ainsi, les séismes passés ont mis en évidence la vulnérabilité sismique des routes ainsi que les conséquences socio-économiques dues à l'endommagement de ces infrastructures. Les aspects sociaux sont liés au bilan des victimes qui va s'alourdir en raison du retard de l'arrivée des secours et de l'évacuation des blessés. Les aspects économiques concernent la réparation et la reconstruction des routes suite à des dégradations matérielles. La défaillance de ces infrastructures engendre également la perturbation ou l'interruption des activités économiques pendant un laps de temps et l'augmentation du temps des trajets des usagers.

Par conséquent, depuis près de deux décennies, préserver et maintenir la fiabilité de ces infrastructures est un enjeu majeur pour les pays concernés par le risque sismique.

Aussi, dans la dynamique de la prévention et la réduction du risque sismique, plusieurs méthodes pour l'évaluation de la vulnérabilité des routes ont été développées. Ces méthodes basées pour la plus part sur des données spécifiques ou sur des modèles complexes sont applicables localement ou sont très difficiles d'utilisation.

Le travail entrepris dans ce mémoire vise à développer une méthode d'évaluation de la vulnérabilité sismique des routes permettant de trouver un compromis entre la simplicité, la rapidité d'exécution et la fiabilité des résultats.

Pour ce faire, une méthode de l'indice de vulnérabilité 'IV' a été développée. Une analyse multicritère utilisant la méthode AHP (Analytical Hierarchy Process) a été utilisée pour déterminer les coefficients de pondération des paramètres influençant la vulnérabilité sismique d'un tronçon de route.

Les principales étapes de la démarche sont :

- détermination des paramètres influant sur la vulnérabilité
- détermination des coefficients de pondération des paramètres
- détermination de l'expression analytique de l'indice de vulnérabilité
- validation de la méthode
- diagnostic de tronçons routiers

Pour présenter le travail effectué, un manuscrit composé de quatre chapitres a été rédigé. Ces derniers se présentent comme suit :

Après une introduction générale situant la problématique et les objectifs de l'étude, le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique relative à la définition de la vulnérabilité sismique et des différentes méthodes d'évaluation de cette dernière. Nous y avons également présenté une analyse de la diversité des dommages occasionnés aux routes, leurs causes et leur gravité, ce qui a permis d'identifier les différents paramètres qui ont un impact sur la vulnérabilité de celles-ci.

Le poids de chaque paramètre a été déterminé par une analyse multicritère en l'occurrence la méthode AHP. Cette méthode a donc fait l'objet du second chapitre. Les fondements, la méthodologie et l'application de cette méthode pour des études de vulnérabilité y sont présentées.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté la méthode développée. Celle-ci repose sur la définition et la caractérisation des paramètres qui ont une influence sur la vulnérabilité des routes. Cette caractérisation se fait par la définition d'attributs, de facteurs de vulnérabilité et de catégories. Tous ces éléments sont regroupés dans une structure hiérarchique qui constitue la base de la méthode AHP pour le calcul des coefficients de pondération. La structure hiérarchique construite, les poids obtenus et les scores attribués ont permis au final de développer l'expression analytique de l'Indice de Vulnérabilité (IV) des routes.

Le quatrième chapitre est consacré à la validation de la méthode développée sur des cas réels de routes endommagées lors d'un séisme survenu en Algérie.

Pour cela, un programme 'RSVI' (Road Seismic Vulnerability Index) a été élaboré sous Matlab et permet de calculer l'IV. Ce programme fait appel à un sous-programme 'VSAT' (Vecteurs de Saaty) développé également sous Matlab. Ce dernier est dédié à la méthode AHP et permet de calculer les coefficients de pondération.

Différents scénarii sismiques ont été aussi élaborés afin d'estimer le comportement d'un tronçon de route et montrer les champs d'application de la méthode.

Au terme de ce travail, une conclusion générale et les perspectives de développement de la méthode proposée sont présentées.

# CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

## I. Introduction

Au cours de séismes destructeurs, il n'est pas rare de constater que les infrastructures routières soient susceptibles d'être endommagées ou rendues inaccessibles. En outre, toutes les catégories de routes quel que soit leur importance, leur contexte et leur environnement sont vulnérables. La défaillance de ces infrastructures vitales, peut engendrer des conséquences économiques et sociales considérables. Par conséquent, depuis près de deux décennies, les actions initiées pour la réduction du risque sismique, ont mis l'accent sur la nécessité d'évaluer la vulnérabilité de ces réseaux. Aussi, un nombre croissant d'études sur la vulnérabilité des réseaux routiers a été entrepris. Cette multitude d'études est justifiée par la diversité des objectifs et des échelles concernées. Toutefois l'objectif principal de toutes les approches développées jusqu'à présent vise à réduire la vulnérabilité de ces infrastructures.

## II. Principales définitions

Dans le cadre de l'analyse de la vulnérabilité, il est d'usage d'utiliser un certain nombre de notions bien établies mais auxquelles correspondent souvent différentes définitions. Il nous a paru utile de préciser quelques-unes d'entre elles.

### 2.1 Notions de base : Risque, aléa et vulnérabilité

Les termes **risque, aléa et vulnérabilité** ne sont pas propre au domaine des tremblements de terre, ni même aux seuls phénomènes naturels.

Ainsi, le terme « **Risque** » est lié aux menaces induites par les catastrophes en tous genres sur les territoires et les sociétés. Il représente l'espérance mathématique de pertes en vies humaines, blessés, dommages aux biens et atteintes à l'activité économique au cours d'une période de référence et dans une région donnée, pour un aléa particulier (DIPCN, 1992).

Pour définir le risque, il faut combiner trois facteurs: l'aléa, la vulnérabilité et l'exposition, il peut être exprimé par l'équation (UNDRO, 1979) :

$$\text{Risque} = \text{Aléa} \otimes \text{Vulnérabilité} \otimes \text{Exposition}$$

Ces termes sont définis par l'Organisation des Nations Unies (DIPCN, 1992) comme suit :

**Aléa** : événement menaçant ou probabilité d'occurrence dans une région et au cours d'une période donnée, d'un phénomène pouvant engendrer des dommages. Dans ce qui suit nous nous intéresserons à l'aléa sismique.

**Vulnérabilité** : correspond à un degré de pertes (de 0 à 100%) d'un élément à risque résultant d'un phénomène susceptible d'engendrer des victimes et des dommages matériels.

**Exposition** (ou éléments à risque) : population, constructions et ouvrages de génie civil, activités économiques, services et infrastructures publiques, etc., exposés à un aléa. Un élément exposé ayant une valeur constitue un enjeu.

La connaissance du risque sismique permet de mettre en place des mesures de prévention réduction pour diminuer les dommages potentiels. Ces mesures portent essentiellement sur la prévention contre les effets d'un éventuel désastre sismique. La prévention a pour objectif de réduire le risque sismique, et d'empêcher l'impact négatif qu'aurait un tremblement de terre sur le développement économique d'une région. Afin de réduire le risque, il faut agir sur ses composantes. L'aléa étant ce qu'il est, nous ne pouvons agir que sur la vulnérabilité de l'élément à risque.

## **2.2. Vulnérabilité d'un réseau routier**

Au départ, la notion de vulnérabilité des infrastructures routières a été liée à la notion de fiabilité. Cette dernière a été évaluée dans un premier temps par la mesure de la connectivité, qui représente la probabilité qu'il y ait toujours une connexion dans le réseau lorsqu'une ou plusieurs sections de route sont fermées (Wakabayashi and Lida,1992 ; Bell and Lida, 1997). Ensuite par la mesure des temps de parcours, c'est à dire, la probabilité qu'un trajet puisse être effectué dans un intervalle de temps spécifié (Yang et al,2000; Clark et Watling, 2005), et enfin par la mesure des capacités, définie comme la probabilité qu'un réseau puisse accueillir un certain niveau de demandes (Yang et al,2000; Chen et al, 2002 ), (Jenelius, 2010).

La plupart de ces études reposent sur la disponibilité des informations, sur la probabilité de la dégradation ou la rupture d'un lien (segment de route). Toutefois, ces informations sont difficiles à obtenir avec précision dans la pratique. En outre, l'apparition d'une catastrophe, en dépit de sa faible probabilité, peut se traduire par un impact socio-économique vaste. Par conséquent, l'analyse de la fiabilité du réseau peut ne pas être appropriée pour l'évaluation des effets dus aux événements sporadiques (Taylor & D'Este, 2003).

Berdica fut le premier à donner la définition de la vulnérabilité des routes vis-à-vis d'incidents pouvant affecter la fonctionnalité de la route (Melis, 2007),(Yin, 2010),(Yang, 2012).

Il définit ainsi la vulnérabilité comme étant la sensibilité d'un réseau aux accidents. L'accident étant un événement pouvant entraîner, directement ou indirectement, une réduction de la fonctionnalité (Berdica, 2002).

Pour leur part, Taylor et D'Este relient le concept de vulnérabilité aux conséquences d'un événement (par exemple, la fermeture d'un tronçon de route). La vulnérabilité ainsi définie met l'accent sur la faiblesse du réseau et les conséquences induites par la fermeture d'une partie de ce dernier (Taylor & D'Este, 2003).

Husdal associe la vulnérabilité à la non-fonctionnalité du réseau sous certaines conditions. Il a défini trois (03) types de vulnérabilité :

- la vulnérabilité structurelle ‘‘structure-related vulnerability’’, inhérente à la structure même de la route, des caractéristiques géométriques notamment la largeur ainsi que la présence d'ouvrages d'art sur l'itinéraire (ponts, tunnels,...),
- la vulnérabilité du site ‘‘nature-related vulnerability’’ inhérente aux caractéristiques du territoire traversé ainsi qu'aux aléas susceptibles d'y survenir.
- La vulnérabilité due au trafic ‘‘traffic-related vulnerability’’ inhérente aux caractéristiques du trafic et aux conséquences induites par la variation du trafic sous certaines conditions (heures de pointe, certains jours de semaine, jours d'entretien, etc).

Il précise par ailleurs, qu'un réseau routier peut être soumis simultanément à ces trois types de vulnérabilité qui peuvent interagir les unes avec les autres et induire de fait une augmentation de la vulnérabilité globale (Husdal, 2004).

La notion de vulnérabilité a été définie ou rattachée à toute une série de termes des domaines connexes, tels la résilience (Berdica, 2002), l'accessibilité (Taylor & D'Este, 2003), (Berdica & Eliasson, 2004), (Taylor et al., 2006), la capacité (Bleukx et al., 2005), l'exposition et l'importance relatives à l'aléa (Jenelius et al., 2006).

Aussi, certains auteurs considèrent que la vulnérabilité peut être liée uniquement aux caractéristiques intrinsèques du réseau (Cafiso et al., 2001), (D'Andrea et al., 2006),(Jenelius, 2010). D'autres par contre considèrent que la vulnérabilité peut être évaluée par des mesures

de fiabilité qui sont directement liées à la notion de connectivité ou de fonctionnalité (Taylor & D'Este, 2003), (Berdica & Eliasson, 2004).

### III. Types de vulnérabilité des routes

A travers les définitions présentées précédemment, la vulnérabilité des routes peut se décliner en trois types de vulnérabilité : la vulnérabilité physique (ou matérielle), la vulnérabilité fonctionnelle et la vulnérabilité structurelle. Chaque vulnérabilité concerne un type de dommages et s'insère à un niveau précis de l'évaluation globale de la vulnérabilité du réseau routier. La figure 1.1 illustre les différents dommages pouvant affecter un réseau et les vulnérabilités impliquées.

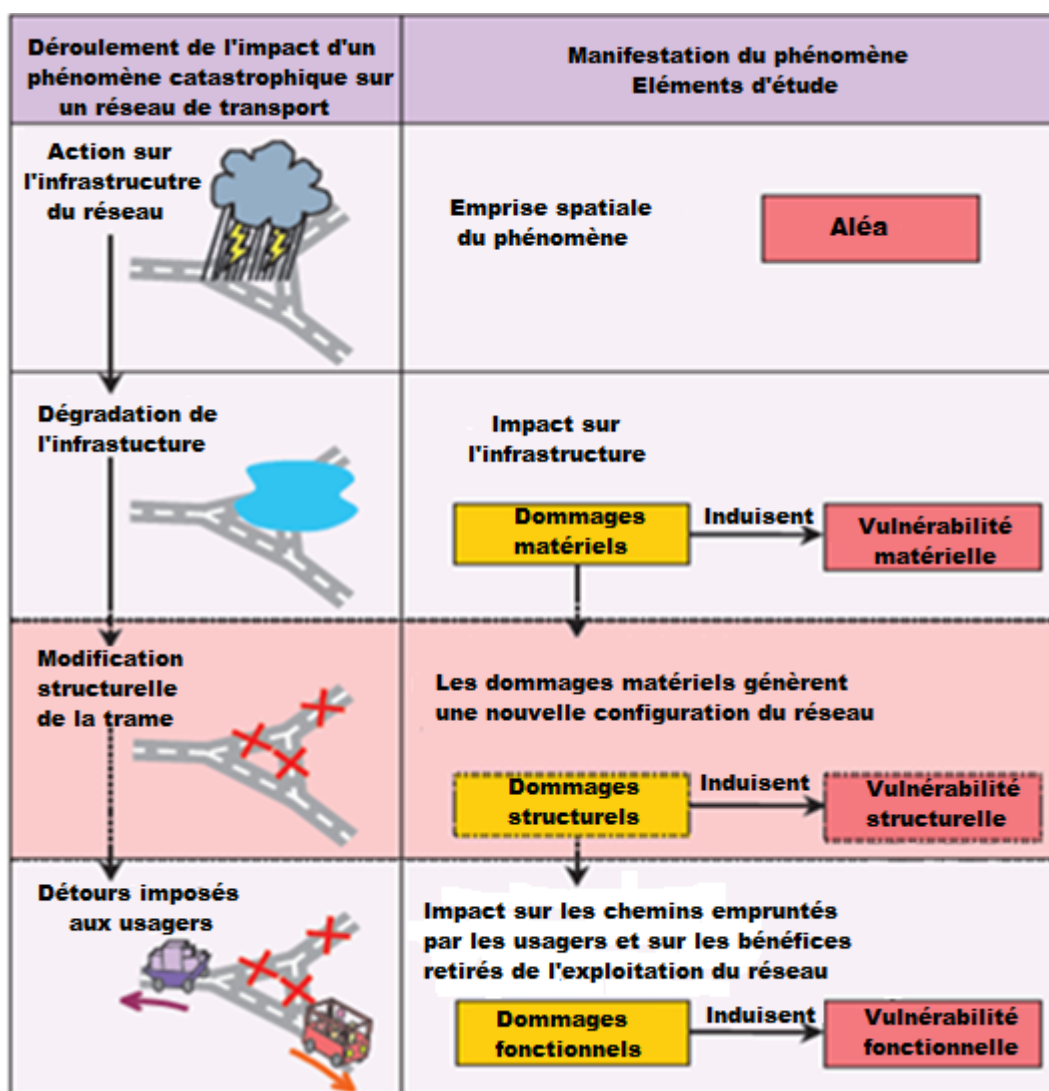


Figure 1.1: Impact d'un phénomène catastrophique sur un réseau de transport – Détail des dommages et des vulnérabilités impliqués (Gleyze, 2005).

Les dommages directs et indirects induisent les différentes vulnérabilités qui peuvent concerner le réseau routier.

### **3.1. Vulnérabilité physique (ou matérielle)**

Elle décrit le degré d'endommagement physique des infrastructures du réseau. Les dommages physiques (ou matériels) des routes sont provoqués directement par l'action physique de la catastrophe (il s'agit à ce titre de dommages tangibles directs) : ils correspondent aux dégâts matériels déplorés sur les voies et les ouvrages. De par leur nature, les dommages physiques peuvent être facilement chiffrés économiquement dans les bilans post-catastrophes. Certains auteurs, se sont intéressés à la vulnérabilité physique d'un réseau routier et ont développé des méthodes pour l'évaluer (Berdica, 2002), (Cafiso et al., 2001), (Husdal, 2004), (D'Andrea et al., 2005), (Werner et al., 2006). D'autres par contre ont utilisé des méthodes de simulation telles que HAZUS, RADIUS, RISK-UE, etc...(Tung, 2004), (Guerreiro, 2004), (Pitilakis et al., 2006). Ces méthodes seront présentées dans le paragraphe VII du présent chapitre.

### **3.2. Vulnérabilité fonctionnelle**

Elle mesure la dégradation des services assurée par le réseau, elle est liée aux bénéfices issus de l'exploitation du réseau. Ainsi les dommages fonctionnels au réseau routier regroupent les perturbations engendrées en chaîne par les détériorations des infrastructures suite à l'action physique de la catastrophe (il s'agit à ce titre de dommages indirects) : ils correspondent aux pertes de temps et aux manques à gagner induits par la dégradation du service offert par le réseau.

Outre les travaux de Cafiso (Cafiso et al., 2001), de D'Andrea (D'Andrea et al., 2006), plusieurs auteurs ont évalué la vulnérabilité fonctionnelle du réseau routier (Bleux et al., 2005), (Kiremidjian et al., 2007), (Tampère et al., 2007).

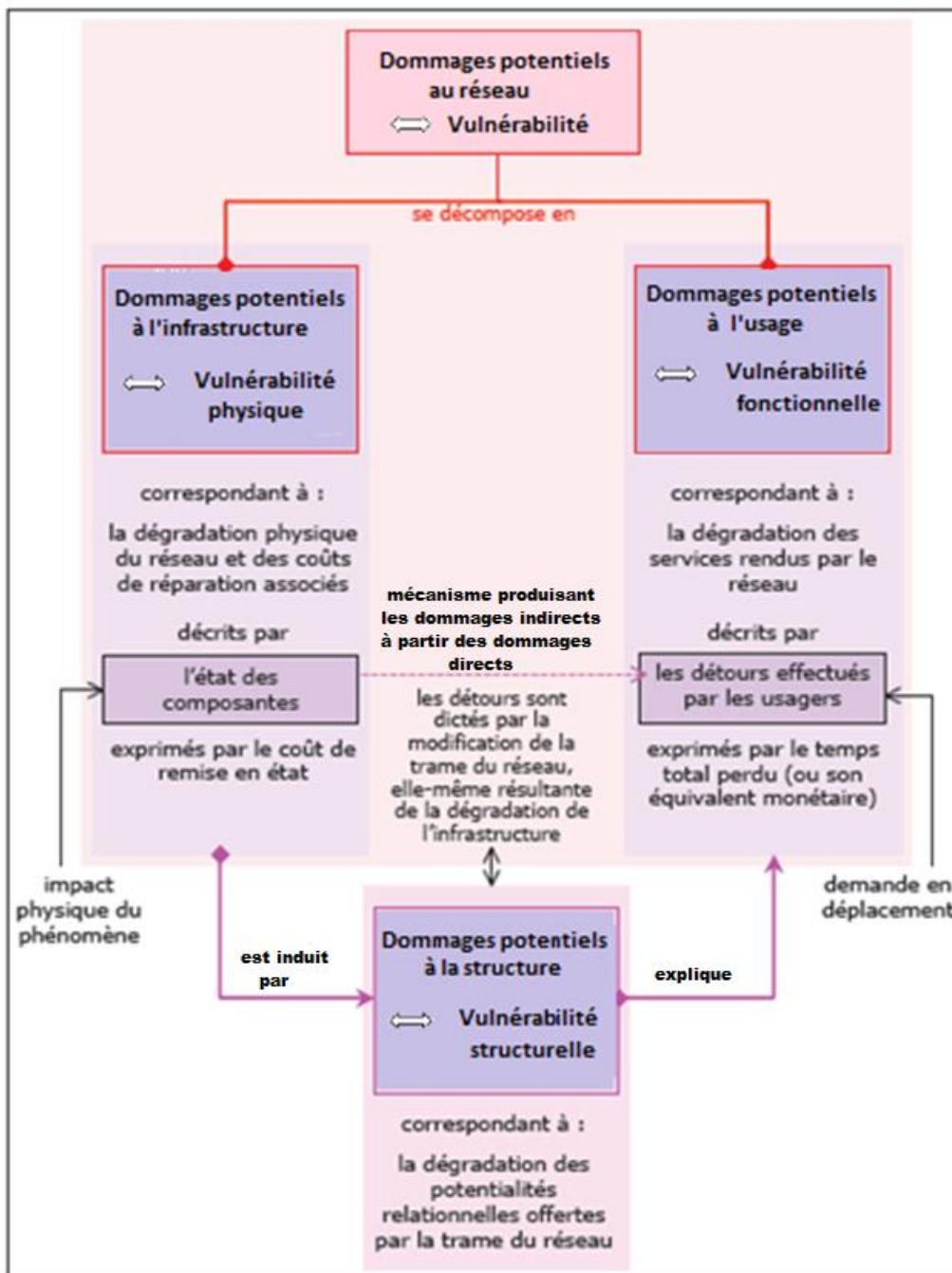
### **3.3. Vulnérabilité structurelle**

Les dommages matériels directs ont pour effet de modifier la structure du réseau (trame). Cette modification effective, à son tour est le point de départ des dommages indirects sur l'usage du réseau car elle génère des perturbations fonctionnelles sur le réseau et remet en cause l'organisation des déplacements et les flux affectés à chaque composante du réseau. La vulnérabilité structurelle a ainsi pour but d'étudier les dommages potentiels structurels.

La vulnérabilité structurelle n'intervient pas dans l'expression finale de la vulnérabilité du réseau mais elle est pertinente car elle fournit les éléments qui permettent la compréhension de la vulnérabilité globale en considérant les mécanismes intrinsèques produisant en chaîne les dommages fonctionnels à partir des dommages matériels.

Plusieurs auteurs ont développé des méthodes pour évaluer cette vulnérabilité structurelle du réseau routier (Gleyze, 2005), (Jenelius et al., 2006), (Yin, 2010), (Yang, 2012), (Arsik, 2013).

La figure 1.2 illustre la place occupée par les différentes vulnérabilités. Elle met en évidence les relations inter-vulnérabilités ainsi que les éléments d'analyse considérés pour chacune d'elle.



**Figure 1.2 : Relation inter-vulnérabilités dans l'évaluation de la vulnérabilité d'un réseau routier (Gleyze, 2005).**

En définitive, l'évaluation d'une vulnérabilité d'un réseau routier dépend de l'objectif visé et également de paramètres spécifiques. Par la suite, nous nous intéresserons uniquement à la vulnérabilité physique (ou matérielle) car elle représente la première et principale étape de

l'évaluation de la vulnérabilité globale d'un réseau routier. Cette vulnérabilité conditionne par ailleurs les vulnérabilités fonctionnelle et structurelle de ce dernier. Par conséquent, son évaluation et les solutions qui en découleront auront pour objet de diminuer chaque vulnérabilité ainsi que la vulnérabilité globale du réseau routier.

#### **IV. Dommages dus aux séismes historiques**

Lorsqu'il s'agit d'aborder la vulnérabilité physique d'un réseau routier, il apparaît évident de tirer les enseignements des séismes passés pour comprendre la nature des dommages, les mécanismes de rupture et les composantes vulnérables de ce type de réseau.

Rappelons à ce sujet ; quelques séismes historiques ayant eu des effets notables sur le réseau routier :

##### **Anchorage (Alaska), 27/03/1964, M = 8,5**

Ce séisme a fait 131 victimes et causé des dégâts considérables due à la redondance presque nulle du réseau routier dans cette région. Les routes ont été affectées par la vibration sismique et par les phénomènes induits (avalanches, glissement de terrains, tassements) : près de 300Km ont été endommagés dont 100Km ont été relocalisés complètement ; 92 ponts ont été gravement atteints (fissures importantes des piles, effondrement des travées, etc.) Pour certains tronçons, il a fallu attendre quinze jours avant que le trafic puisse reprendre (Durville, 1987).

##### **Loma Prieta (États-Unis), 18/10/1989, M = 7,1**

Le coût de réparation pour le réseau routier fut estimé à 1,8 milliards de dollars US, tandis que le coût de la restauration pour les ponts fut de 300 millions de dollars. Plus de 80 ponts ont subi des dommages mineurs, 10 furent fermés en raison de graves dommages, et 3 d'entre eux ont eu une ou plusieurs travées qui se sont effondrées. Au total, on a enregistré 65 routes bloquées en raison de dommages directs (secousses, glissements de terrains, liquéfaction, rupture de faille) et 82 routes bloquées en raison de dommages indirects effondrements de bâtiments, fuites de gaz, rupture des pipelines, etc. ) (Syner-G D3.7, 2009).

##### **Costa Rica (Costa Rica), 22/4/1991, M = 7,5**

Au moins 12 ponts ont subi des dommages complets. A plusieurs endroits, la chaussée a subi de larges fissures, tandis que les tronçons en remblai ont connu d'importants tassements. La perturbation de la fonctionnalité du réseau routier a entraîné des pertes quotidiennes de 250 000\$ US en raison de l'interruption des exportations (EERI, 1991).

### **Northridge (Etats-Unis), 17/01/1994, M = 6,7**

Le coût de la réparation de 230 ponts s'éleva à 190 millions de dollars US, et à 122.000,000\$ US pour les autoroutes. Plusieurs dommages ont été observés sur l'axe routier (local et régional), en raison de glissements de terrains et des tassements du sol. Au total, 63 axes routiers ont été bloqués en raison de dommages directs (secousses, glissements de terrain, liquéfaction, rupture de faille ) et 77 autres en raison de dommages indirects (effondrements de bâtiments, fuite de gaz, rupture de pipelines, etc.) (Basöz & Kiremidjian, 1998).

### **Kobe (Japon), 17/1/1995, M = 7,9**

On estime que 60 % des ponts dans la zone sinistrée ont subi quelques dommages, alors que 27 ponts ont été sérieusement endommagés. Les blocages de routes ont été observés dans de nombreuses régions.

Le coût de réparation pour l'autoroute Hansin Expressway fut estimé à près de 4,6 milliards de dollars US (Shinozuka, 1995), tandis que le coût total était en fait beaucoup plus élevé si les 3,4 millions de dollars des revenus quotidiens de péages et les pertes due à l'interruption des activités et les retards de circulation eut été pris en compte (Pitilakis et al., 2006), (Syner-G D3.7, 2009).

### **Algérie**

Parmi les séismes qui ont frappé l'Algérie, nous ne citerons que les plus marquants, notamment le séisme d'El Asnam (10/10/1980 ; M=7,2) qui a occasionné des dommages à de nombreuses routes et ponts (Ouyed, 1981), la coupure de la route nationale par la faille sismogène et l'endommagement des ponts (EERI/CTC, 1980), (Durville, 1987).

Le séisme de Ain Temouchent (22/12/1999, M=5,8) a endommagé plusieurs ponts et routes sans toutefois les fermer à la circulation (CTTP, 1999).

Par ailleurs, lors du séisme de Boumerdes (21/05/2003, M=7,3), les ponts et les routes ont généralement bien résisté aux sollicitations. Dix-huit (18) ponts ont subi des dommages mineurs à modérés, 3 seulement ont été fermés à la circulation car plus sérieusement endommagés. Les routes ont subi des tassements modérés et des fissures mineures qui ont été réparées en quelques jours (CTTP, 2003), (Edwards, 2004). Le coût des réparations du réseau routier endommagé s'est élevé à plus de 3 milliards de Dinars Algériens (750 millions \$ US) (Benouar, 2008).

A travers les quelques exemples présentés, l'expérience des tremblements de terre passés révèlent que chaque catastrophe sismique a ses propres caractéristiques et les dommages

occasionnés aux réseaux routiers sont très variés par leur cause, nature, étendue et gravité. Par ailleurs, l'endommagement des réseaux routiers ou leur défaillance peut engendrer des coûts de réparation considérables et des pertes économiques et sociales importantes pour la zone sinistrée.

## V. Types de dommages

Les observations post-sismiques des dégâts ont permis d'identifier et d'expliquer les modes et les causes d'endommagement des routes. Dans ce qui suit, nous allons en donner les principales.

### 5.1 Dommages dans les chaussées

Les mouvements forts des séismes peuvent provoquer des fissures plus ou moins importantes, localement le soulèvement ou l'enfoncement de la chaussée. Ces derniers, cependant, sont relativement rares (BRGM, 2006). Les dommages les plus communs qui peuvent affecter les chaussées sont des déplacements permanents du sol (PGD), des éboulements, des affaissements et des fissures.

Ces dommages correspondent généralement à :

- a) des déplacements de cisaillement dus à la rupture de faille (Figures 1.3 et 1.4).  
Ces déplacements se produisent le long d'une ligne de faille active et ont tendance à survenir brusquement. Ils peuvent varier de quelques centimètres à plusieurs mètres (FHWA, 2004).



**Figure 1.3 : Dommages sur autoroute dus à la rupture de faille en surface-Séisme de Kocaeli en 1999 (Turquie)/ (BRGM, 2006).**



**Figure 1.4 : Endommagement d'une route par la rupture de faille (faille décrochante) -Séisme de Canterbury en 2010 (N.Zélande) /(ENZ,2010).**

b) des déformations et défaillances dues à la liquéfaction des sols. Ces déplacements sont permanents et correspondent principalement :

- à la propagation latérale (lateral spread), associée à des glissements à proximité de morphologies marquées, tels que les talus (Figures 1.5 et 1.6).



**Figure 1.5 : Endommagement de la chaussée due à la propagation latérale -Séisme de Niigata-Chuetsu Oki en 2007 (Japon) /(Syner-G D3.7, 2009).**



**Figure 1.6 : Endommagement de la chaussée dû à la liquéfaction-Séisme de Lefkas en 2003 (Grèce)/ (BRGM, 2006).**

- aux tassements verticaux (settlements), conséquences du réarrangement et de la densification de formations lâches saturées. Ces tassements sont associés à la dissipation des pressions interstitielles induites par la liquéfaction (Figures 1.7 et 1.8) (BRGM, 2006).



**Figure 1.7 : Ondulation de la chaussée par les tassements différentiels - Séisme de Hokkaido-Nansei-Oki en 1993 (Japon)/ (FHWA, 2004).**



**Figure 1.8 : Ondulation de la chaussée par les tassements différentiels - Séisme de Chrischurch en 2011 (N. Zélande)/(Chouw et al., 2011).**

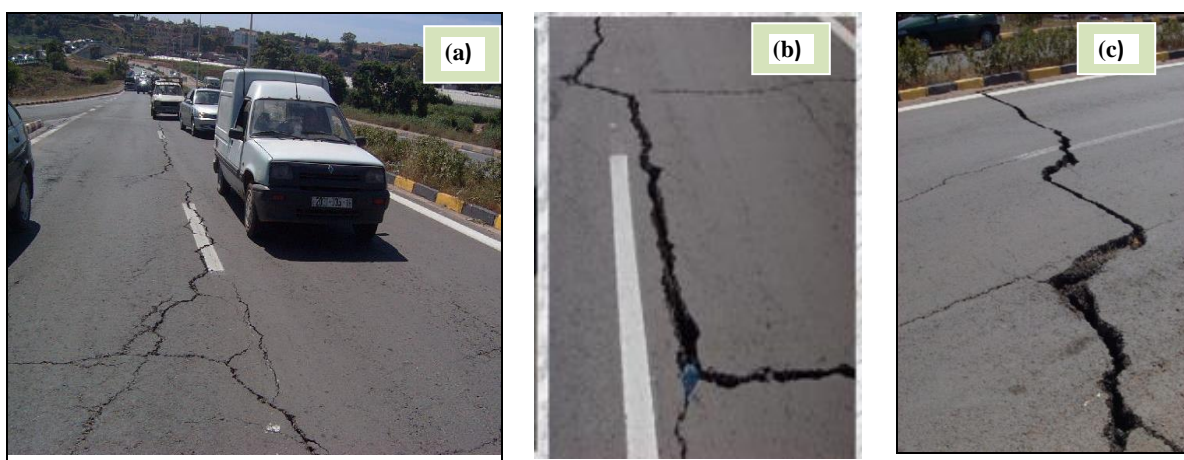
Les tassements peuvent également se produire dans les sols secs ou partiellement saturés situés au-dessus de la nappe phréatique et par conséquent ils ne sont pas associés au développement de la pression interstitielle et à la liquéfaction. Le mécanisme dans ce cas, peut s'expliquer par les contraintes de cisaillement

cyclique induites par le tremblement de terre qui provoquent le réarrangement des grains conduisant ainsi à une densification du sol (Figure 1.9) (FHWA, 2004).



**Figure 1.9 : Chaussée endommagée par les tassements différentiels dus à la densification du sol support - Séisme de Boumerdes en 2003 (Algérie)/(CTTP, 2003).**

c) des fissures dues à la densification du sol support par l'effet de la sollicitation sismique (figure 1.10).



**Figure 1.10 : Fissures sur la chaussée –Séisme de Boumerdes en 2003 (Algérie) /(CTTP, 2003), a) Fissuration en dents de scies (fissuration en blocs), b) Fissurations longitudinales et transversales, c) fissures transversales profondes.**

## 5.2 Dommages dans les remblais

Les dommages occasionnés aux remblais peuvent être des tassements dus à la densification par la sollicitation sismique des sols compressibles (figure 1.11). De plus, les dommages les plus fréquents sont observés dans les remblais dont les matériaux ont été mal compactés

lors de la réalisation (figure 1.12), ainsi que dans les remblais de grandes hauteurs et à pentes raides. L'âge, les conditions de réalisation, la maintenance influent de manière considérable sur la vulnérabilité de ces systèmes (FHWA, 2004).



**Figure 1.11 : Rupture d'un remblai autoroutier dû au tassement et à la déformation du sol meuble /séisme de Hokkaido-Nansei-Oki en 1993 (Japon)/(FHWA, 2004).**



**Figure 1.12 : Rupture d'un remblai routier dû au tassement provoqué par la densification du remblai - Séisme de Boumerdes en 2003 (Algérie)/(CTTP, 2003).**

Par ailleurs, les remblais routiers construits sur des dépôts de sable lâche sont susceptibles de se liquéfier. Quand la capacité portante de la fondation est perdue en raison de charges statiques et dynamiques, le remblai s'étend généralement latéralement et subit en même temps un tassement, entraînant ainsi le glissement du remblai (de quelques centimètres voire à plusieurs mètres) (Figures 1.13 et 1.14). Cela peut également occasionner l'ouverture de fissures dans la chaussée (Figure 1.15).



**Figure 1.13 : Rupture d'un remblai routier dû à la propagation latérale -Séisme de Kozani en 1995 (Grèce)/(Syner-G D3.7, 2009).**



**Figure 1.14 : Rupture de remblai et de chaussée due à la propagation latérale – Séisme de Le Pesco (Pérou-2007)/(O'Connor et al., 2007).**



**Figure 1.15 : Endommagement d'un remblai routier dû à un glissement latéral - Séisme de Iwate Miyagi-Nairiku en 2008 (Japon) /(Syner-G D3.7, 2009).**

Les remblais d'accès aux ouvrages d'art sont souvent sujets à des densifications occasionnées par les mouvements sismiques. Cette densification est la cause majeure de tassements différentiels dommageables (Figures 1.16 et 1.17). Ce phénomène peut être accompagné de propagation latérale du talus (FHWA, 2004).



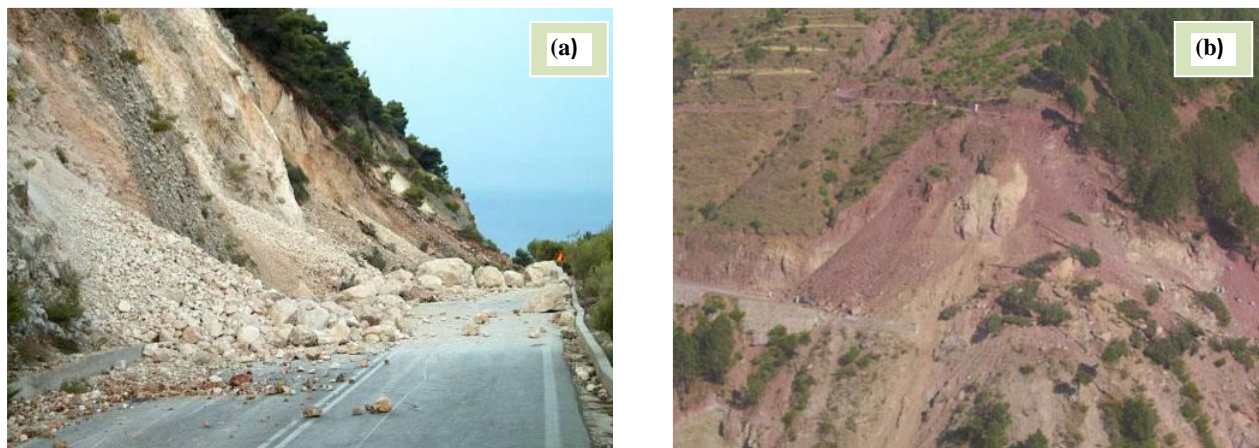
**Figure 1.16 : Tassement de près de 1 m dû au compactage sismique au droit du remblai d'accès à l'ouvrage - Séisme d'El Asnam de 1980 (Algérie) (EERI/CTC, 1980).**



**Figure 1.17 : Tassement différentiel dû au compactage sismique au droit du remblai d'accès à l'ouvrage, a) Séisme de Myanmar en 2001 (Burma)/ (Anbazhagan et al., 2011), b) Séisme de Niigata-Chuetsu Oki en 2007 (Japon)/ (Syner-G D3.7, 2009).**

### 5.3 Dommages dans les pentes (routes en déblais)

Les tremblements de terre induisent des glissements de terrain susceptibles de bloquer partiellement ou complètement les routes. Ces glissements peuvent également causer des dommages et des dégradations physiques à la chaussée (Figure 1.18). En outre, les routes en déblais peuvent subir des ruptures de pentes au niveau des bords de la route (Figure 1.19).



**Figure 1.18 : Blocage de route dû au glissement de terrain, a) Séisme de Lefkas en 2003 (Grèce)/(BRGM, 2006), Séisme de Kashmir en 2005 (Pakistan)/(Anbazhagan et al., 2011).**



**Figure 1.19: Destruction de routes due aux glissements de terrain Séisme de Niigata-Ken Chuetsu en 2004 (Japon)/(Syner-G D3.7, 2009).**

## VI. Classification des dommages

Les dommages occasionnés aux routes par les séismes peuvent globalement être regroupés en : (1) dégradations de la chaussée, (2) déformations de la plate-forme sans rupture, (3) obstruction de la chaussée, (4) rupture de la plate-forme. Ces dégradations sont interdépendantes et leurs causes souvent liées. En outre, la diversité des dommages occasionnés à la route et leur gravité sont fonction de l'aléa sismique (magnitude, distance à l'épicentre, etc.) et des caractéristiques

de la route. Aussi, les dommages susceptibles d'affecter les routes peuvent être classés selon une gravité croissante tant sur le plan économique (coûts de réparation) que sur le plan fonctionnel (durée d'interruption du trafic).

Tung (Tung, 2004) a donné une description sommaire de certains dommages et les a classés en :

- 1) dommages mineurs : fissures, craquelures longitudinales peu profondes et peu larges, tassements différentiels minimes, obstruction de chaussée (quelques blocs, volume de débris faible) ;
- 2) dommages sévères à majeurs : obstruction de chaussées (volume de débris important), rupture de plate-forme (liquéfaction, tassements majeurs, propagation latérale, glissement de pentes, etc.).

Il a par ailleurs, lié ces niveaux de dommages à un niveau d'usage de la route (fonctionnalité) : Tung, considère ainsi que pour les dégâts mineurs, la route peut être utilisée mais peut nécessiter des réparations, Contrairement aux dégâts majeurs, pour lesquels la route est impraticable d'où la nécessité de réaliser des travaux de réfection.

Pour sa part, Chiroiu (Chiroiu, 2004) a développé une échelle d'intensité sismique de 5 niveaux dans laquelle il donne une description des dommages affectant les routes (Tableau 1.1).

Cette échelle est basée sur un paramètre physique du séisme (la magnitude) et un paramètre d'intensité macrosismique (EMS 98).

Intensité EMS 98	Classe	Magnitude	Teinte graphique	Dommages potentiels sur les routes
V	1-Très faible	4 à 4.5	10%	Pas de dégâts
VI	2-Faible	4.5 à 5.5	20%	Sans dégâts structurels. Tassements très légers et/ou fissures mineures dans les voies routières.
VII	3-Moyenne	5.5 à 6.5	50%	Tassements et/ou fissures de voies routières ; difficultés de circulation par endroits.
VIII	4-Elevée	6.5 à 7.5	75%	Tassements et fissures importantes, menant à des interruptions ponctuelles de la circulation des voies routières.
≥IX	5-Exceptionnelle	>7.5	100%	Crevasse importantes possibles sur des routes, certaines peuvent être coupées.

**Tableau 1.1 : Echelle d'intensité sismique (Chiroiu, 2004).**

Cette échelle a été développée dans le cadre d'une étude financée par le MEDD (Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable/France) pour le développement d'une échelle d'intensité multi-aléas.

Plus récemment, Anbazhagan (Anbazhagan et al., 2011) a proposé une échelle des dommages avec une description détaillée des dégradations occasionnées aux routes. L'objectif de son travail était de définir une échelle des dégradations dédiées aux routes analogue à l'échelle d'intensité MMI.

L'échelle proposée comporte 5 niveaux de dommages (RDS: Road Damage Scale) calculés en fonction de la magnitude et de la distance à l'épicentre. Les dégradations décrites sont reliées à des possibilités d'usage et de fonctionnalité de la route ainsi qu'à une priorisation sommaire des travaux de réfection (une traduction de l'échelle est donnée au Tableau 1.2, la version originale est jointe en annexe 1).

<b>RDS</b>	<b>Description des dommages</b>
1	<p>Dommages sous forme de quelques fissures, une ou deux fissures modérées ne dépassant pas 20 mm de largeur, légers dégâts des accotements et de la voie. Très peu de travaux de réparation sont généralement nécessaires pour rétablir la circulation du trafic.</p> <p>Ces dommages sont observés lorsque les routes sont de bonne qualité et généralement situées loin de l'épicentre du séisme.</p>
2	<p>Dommages sous forme de tassements ou de fissures modérées, fissures ou séparation des couches de la chaussée sur une largeur de moins de 100mm. Rupture des accotements ou de la voie de circulation, ce qui réduit l'usage de la route. Des travaux de réparations mineures doivent être effectués pour une remise en état de la route.</p>
3	<p>Une partie de la route est endommagée. Formation de grandes fissures et de tassements. La largeur des fissures peut dépasser 100 mm. Beaucoup de larges fissures sur l'une et/ou l'autre des voies de la chaussée. Rupture ou fissures dues à : liquéfaction, glissements de terrain, rupture de faille, rupture du sol de fondation ou des sous couches de la chaussée. Un trafic limité peut circuler sur cette route. Des travaux de réparations considérables doivent être entrepris.</p>
4	<p>Une partie de la route est rendue totalement inutilisable. Des débris (sol, blocs, débris divers) s'y accumulent. Des couches de la route sont arrachées ou emportées. La route endommagée peut être utilisée seulement par les piétons ou les cyclistes. Les véhicules ne peuvent circuler et la portion de route endommagée doit être entièrement reconstruite.</p>
5	<p>Damage maximal, sur la largeur totale de la route, la route est totalement inaccessible et ne peut être circulée.</p> <p>Endommagement structurel de la route, les débris dus aux glissements de terrain rendent la route totalement inaccessible.</p> <p>Les travaux de reconstruction et la déviation du trafic sur un itinéraire de substitution sont indispensables.</p>

**Tableau 1.2 : Echelle des dommages physiques des routes (Anbazhagan et al., 2011).**

Il apparaît que les routes ne se comportent pas toutes de la même manière vis-à-vis des secousses sismiques. Certaines sont plus susceptibles à l'endommagement que d'autres et les niveaux de

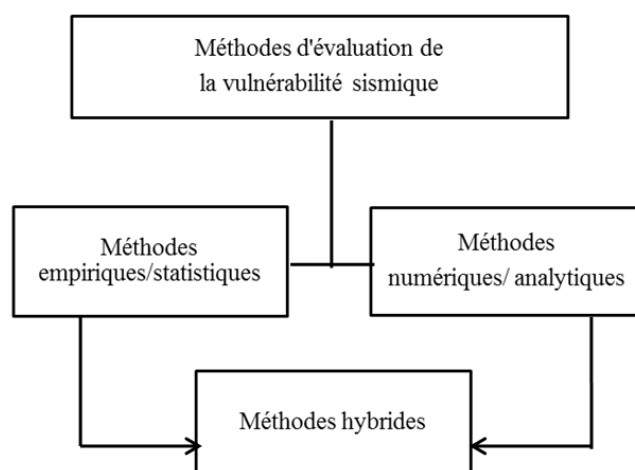
dommages peuvent varier considérablement entre elles. Cette tendance à l'endommagement se traduit par la vulnérabilité de ces systèmes qu'il s'agira d'évaluer.

## VII. Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité physique

Les méthodes qui ont été utilisées jusqu'à présent pour l'évaluation de la vulnérabilité physique et sismique sont nombreuses. Elles sont divisées en deux principales catégories, qui sont plus ou moins liées à l'échelle de l'espace considéré pour l'analyse.

A grande échelle, il y a les approches fondées sur *les méthodes empiriques (statistiques)* qui consistent à évaluer la vulnérabilité sur la base des observations de dommages (distributions statistiques) dus aux tremblements de terre passés ou des jugements d'experts. Au contraire, à l'échelle locale, l'évaluation de la vulnérabilité est effectuée sur une base mécanique en tenant compte des caractéristiques structurales individuelles, prenant en compte les caractéristiques du sol et en utilisant des *méthodes numériques (ou analytiques)* détaillées. Des méthodes *semi-empiriques* peuvent également être utilisées.

Nous avons représenté cette classification par le schéma de la figure 1.20 :



**Figure 1.20 : Représentation schématique des méthodes classiques pour l'évaluation de la vulnérabilité.**

### 7.1. Approches empiriques/ statistiques

Les méthodes empiriques/statistiques sont largement utilisées dans le monde pour évaluer rapidement le risque sismique sur une grande échelle ou à préciser quelles sont les routes devant faire l'objet d'études plus détaillées. Elles peuvent également être utilisées pour calibrer les études numériques. Elles donnent entre autre des courbes de vulnérabilité qui

expriment le taux des dommages qui peuvent être occasionnés à une route donnée pour un séisme d'intensité donnée.

Les courbes ainsi obtenues sont spécifiques à un site particulier, car elles sont basées sur les données sismotectoniques et géotechniques de celui-ci et aux caractéristiques des routes qui y sont situées. Ainsi, pour utiliser les courbes de vulnérabilité empiriques avec confiance, il est nécessaire que les données couvrent une large gamme de mouvements sismiques, de types de sols et de typologies d'éléments de structure en général et de route en particulier. (Syner-G D3.7, 2009).

Dans la pratique, ce n'est réalisable que grâce à la combinaison de données provenant de différents tremblements de terre et de différents sites.

Aussi, les principaux inconvénients de ces approches se trouvent dans le manque de données (en particulier pour les tremblements de terre de grande intensité) et l'hétérogénéité de celles-ci (à la fois dans le temps et dans l'espace), ainsi que leur incapacité à évaluer avec précision les conséquences physiques des différentes caractéristiques des routes. Ceci est une limitation sévère, en particulier, lorsque l'évaluation vise à orienter les actions de réhabilitation post – sismique (ENSURE, 2009).

Les principales méthodes empiriques (statistiques) utilisées pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique des routes sont décrites dans les sous-paragraphes suivants.

#### **7.1.1. Méthode basée sur le jugement d'experts**

Dans de nombreux cas, et notamment dans le début des années 1980, le manque de rigueur et de précision sur les données de dommages nécessita l'utilisation de l'avis d'experts pour l'évaluation du comportement sismique des composantes des réseaux vitaux (« lifelines ») avec différente typologie.

La méthode ATC-13 (ATC-13, 1985) largement utilisée ; a donné des matrices de probabilité de dommages (DPM : Damage Probability matrix ) et des courbes de fragilité sur la base de questionnaires, par lesquels les experts ont été interrogés sur la probabilité qu'une composante d'un « réseau vital » puisse atteindre un certain niveau de dommage pour une intensité MMI (Modified- Mercalli Intensity) donnée.

Ces évaluations d'experts sont toujours utilisées de nos jours, mais pour les raisons décrites précédemment, et vu le nombre important de données recueillies suite aux récents tremblements de terre, elles sont de moins en moins utilisées.

Néanmoins, plusieurs modèles sont basés sur cette approche, notamment le programme de l'ATC-13 et le modèle HAZUS (FEMA-NIBS, 2004) qui donnent des courbes de fragilité pour les routes.

### **7.1.2. Méthode de l'indice de vulnérabilité**

L'approche utilisant l'indice de vulnérabilité vise à évaluer la vulnérabilité des composantes d'un système sur la base de la définition d'un indice résultant dans la plupart des cas d'une expression analytique qui combine les principaux facteurs qui influent sur le comportement sismique de l'élément sujet au risque.

Des valeurs sont définies sur la base de jugement d'experts et du retour d'expérience des tremblements de terre passés, alors l'expression comprend généralement des facteurs de pondération afin de tenir compte de la contribution relative de chaque paramètre dans la vulnérabilité totale du système considéré.

Cette méthode initialement développée pour les bâtiments, a été utilisée par Kawashima et Unjoh (1990) et Kim (1993) pour les ponts ainsi que pour les routes dans le cadre du projet RISK-UE (Pitilakis et al., 2005).

L'approche de l'indice de vulnérabilité permet de faire un diagnostic préliminaire sur le comportement de la route vis à vis du séisme et de définir une classification selon une échelle proposée. L'indice de vulnérabilité ainsi défini permet de hiérarchiser et prioriser les opérations de réhabilitation des systèmes endommagés par le séisme. En outre, L'approche de l'indice de vulnérabilité peut être mise en œuvre au niveau d'un Système d'Informations Géographiques (SIG) qui est très utilisé pour établir des scénarii sismiques à partir de simulations de tremblements de terre.

### **7.1.3. Méthodes des courbes continues**

Les conditions de vulnérabilité physique d'une structure peuvent être décrites en utilisant les fonctions (ou courbes) de vulnérabilité et / ou des fonctions (ou courbes) de fragilité. Ces fonctions sont issues directement des dommages occasionnés par les séismes.

Les fonctions de vulnérabilité décrivent la probabilité de pertes (telles que les pertes sociales ou les pertes économiques) donnée pour une intensité du séisme, tandis que les fonctions de fragilité décrivent la probabilité de dépassement d'un certain niveau de dommages (c.-à-d. mineur, modéré, important ou complet) donné pour une intensité du séisme. La dérivation de ces fonctions représente un problème car l'intensité du séisme n'est pas continue (Calvi et al., 2006). En outre, ces courbes sont basées sur des données

spécifiques à la région étudiée ou à une typologie particulière, par conséquent leur transposition est certes possible mais ces courbes ne sont pas représentatives des cas réels à étudier dans d'autres régions (Tung, 2004).

Des courbes de fragilité basées sur cette approche ont été proposées pour les réseaux (ALA 2001), pour les tunnels (Corigliano, 2007) et pour les remblais (Maruyama et al., 2010).

## **7.2. Approches numériques/analytiques**

Les approches numériques/analytiques sont basées sur l'estimation des distributions des dommages obtenus par la simulation de la réponse structurelle d'un élément soumis à l'action sismique.

Les modèles numériques doivent être développés et un compromis doit être fait entre la précision de la représentation du comportement non linéaire et la robustesse et le rapport coût-efficacité du modèle.

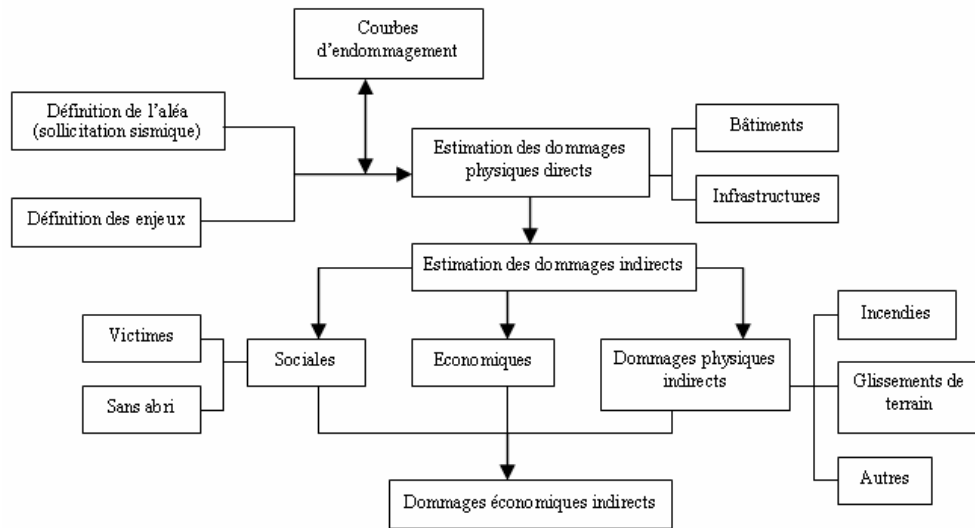
La méthode analytique a été utilisée pour développer des courbes de fragilité pour les remblais et les pentes (Syner-G D3.7, 2009).

## **7.3 Approches hybrides**

Ces méthodes sont basées sur une combinaison des méthodes statistiques et analytiques. Généralement, les méthodes hybrides sont introduites afin de compenser les inconvénients provenant d'une méthode. Elles combinent les données provenant de différentes sources afin de compenser la rareté des données d'observation, la subjectivité des données et les lacunes de la modélisation de certaines méthodes analytiques (Perrault, 2013).

## **7.4. Méthodes pour scénarii sismiques**

Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité qui visent, à planifier la prévention des risques, la préparation et l'organisation des secours sont des méthodes qui conduisent à la réalisation de scénarii. Les courbes continues développées par les différentes méthodes sont utilisées et des modèles d'estimation des dommages sont développés. La figure 1.21, illustre le diagramme de fonctionnement des modèles d'estimation de dommages sismiques et résume les principaux paramètres intervenants dans ce type de démarches.



**Figure 1.21 Organisation d'un modèle d'estimation de dommages sismiques (Chiroiu, 2004).**

Les différentes méthodes utilisées pour l'élaboration des modèles d'estimation des dommages et d'évaluation de la vulnérabilité sismique des infrastructures routières sont présentées dans les sous-paragraphes suivants.

#### 7.4.1. Méthode ATC

La FEMA (Federal Emergency Management Agency) en 1982 a financé le Centre de la Technologie Appliquée (ATC : Applied Technology Council) pour développer la première méthodologie pour l'évaluation des dégâts occasionnés par les séismes sur les installations de la Californie. En raison de l'absence de données relatives aux dommages des séismes passés, la méthode s'est basée sur l'opinion et le jugement de 58 experts et spécialistes des tremblements de terre. Cette méthode a porté sur l'élaboration d'un inventaire des structures et des infrastructures vulnérables vis à vis du séisme, puis l'estimation des dégâts engendrés, et enfin l'estimation des impacts économiques. Ainsi, sur la base des données recueillies, des Matrices de Probabilité de dommages et des courbes de vulnérabilité en fonction de l'échelle MMI ont été développées.

Plusieurs rapports ont été élaborés pour les différentes structures étudiées. Le rapport ATC 13 comprend des données pertinentes sur différentes structures, des descriptions détaillées de la méthodologie pour élaborer les estimations des dommages et les pertes engendrées par les tremblements de terre. La méthode donne également les estimations (de l'époque) pour restaurer les installations endommagées (ATC-13, 1985).

Par ailleurs le rapport ATC-25 a concerné l'évaluation de la vulnérabilité sismique des réseaux vitaux (« lifelines ») ainsi que les impacts induits par leur endommagement ou leur

défaillance. Le but de cette approche étant l'identification et la priorisation des mesures et dispositions à prendre pour la réduction du risque sismique (ATC-25, 1991).

L'inconvénient de la méthode ATC est en premier lieu, sa subjectivité car elle basée sur l'avis d'experts, et de l'incertitude de l'évaluation des dommages qui dépendent des caractéristiques propres et la difficulté d'insérer de nouvelles données technologiques (ENSURE, 2009). Toutefois cette méthode est demeurée la référence jusqu'aux années 90 et a servi de base pour le développement de la méthode HAZUS en 1997 (Chiroiu, 2004).

#### 7.4.2. Méthode RADIUS

Le projet RADIUS (Risk Assessment Tools for Diagnostic of Urban Areas against Seismic Disasters) a été lancé en 1996 par le Secrétariat de l'IDNDR (International Decade for Natural Disaster Reduction) pour la promotion des activités à travers le monde visant la réduction des catastrophes sismiques dans les zones urbaines, en particulier dans les pays en voie de développement. L'un des principaux objectifs du projet était de développer des outils pratiques de gestion des risques urbains (RADIUS, 1996).

Les objectifs principaux de RADIUS sont : la réalisation des scénarii de dommage et des plans d'action contre le risque sismique dans neuf villes choisies ; le développement d'un outil de gestion du risque sismique, applicable partout, de comparer le risque sismique urbain à travers le monde, et enfin promouvoir l'échange d'informations pour la réduction du risque au niveau d'une ville.

Ce modèle d'estimation de dommages est un outil indépendant, applicable à n'importe quelle ville. Réalisée sous l'interface Excel, il permet (sans pour autant être un SIG) de représenter spatialement, d'une manière simplifiée, la distribution des enjeux dans une ville, des types de sols et des estimations de dommages obtenus.

Les données de base sont, comme pour tous les modèles de ce type, les scénarii de séismes, les conditions locales du sol, l'inventaire des enjeux ainsi que les courbes d'endommagement (Chiroiu, 2004).

Le schéma ci-dessous présente l'organisation générale de la méthode (Figure. 1.22).

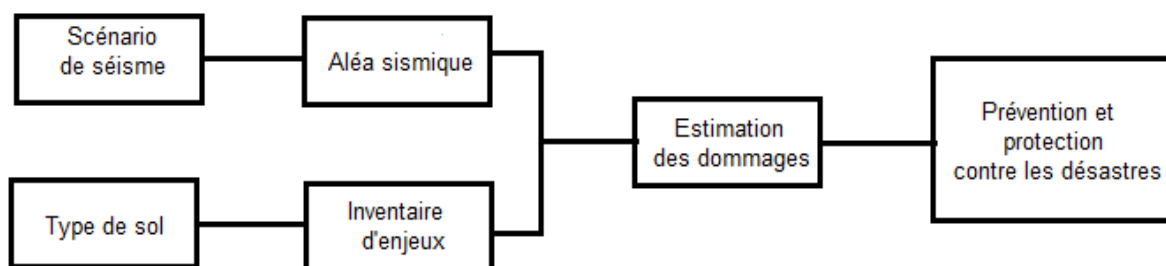
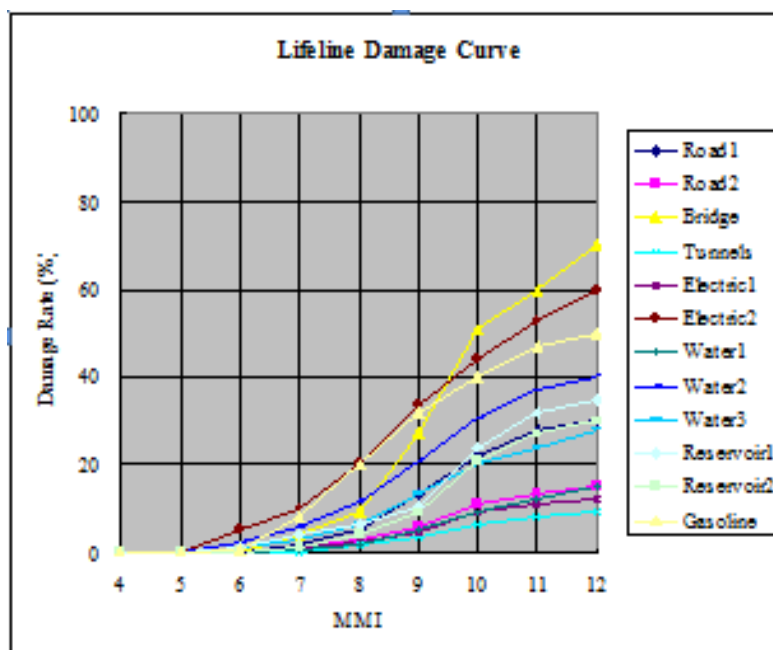


Figure 1.22 : Schéma conceptuel de la méthode RADIUS (RADIUS 2002).

L'une des étapes clés de la méthode est le recensement des enjeux. Ces derniers sont inventoriés et cartographiés. Le modèle définit ensuite une classification des enjeux en plusieurs classes, ainsi que leur inventaire. Les routes sont simplement classées en deux catégories : Routes locales (roads 1:local roads) et Routes principales (Roads 2 : major roads). Par ailleurs, l'estimation de dommages a été réalisée au moyen des courbes de fragilité basées sur l'ATC-13 (1985).

Les fonctions de vulnérabilité utilisées par RADIUS par exemple pour les réseaux intégrant les deux catégories de routes sont illustrées dans la figure 1.23.



**Figure 1.23 : Courbes de vulnérabilités des réseaux (RADIUS, 1996).**

Par ailleurs, pour une intensité MMI donnée, le pourcentage du linéaire de routes endommagées par rapport au linéaire total de routes est calculé à partir des courbes de dommages. Toutefois la méthode ne précise pas la localisation ni l'état des dommages mais seulement le linéaire de routes endommagées.

L'outil de modélisation de dommages développé par la méthode RADIUS représente une approche intéressante et simplifiée d'estimation du risque. Il permet l'analyse des scénarii de séismes en milieu urbain en considérant soit des séismes générés par des failles locales actives, soit certains séismes destructeurs historiques répertoriés par la méthode. Elle a l'avantage d'être aisément transposable mais reste basée sur des données spécifiques répertoriées par la méthode donc souvent non adaptées à d'autres villes.

### 7.4.3. Méthode HAZUS

HAZUS est une méthode complexe d'estimation de dommages sismiques, présentée sous la forme d'un logiciel, développé par l'Institut National pour les Sciences de la Construction des Etats Unis d'Amérique (NIBS) pour l'Agence américaine de gestion de crise (FEMA). Réalisée dans sa première version en 1997, l'approche a été revue en 1999. Le programme développé est basé sur l'avis et le jugement d'experts (FEMA-NIBS, 2004).

Le programme est organisé en plusieurs modules interdépendants, permettant l'insertion de nouvelles données complémentaires ou de nouveaux modules de calcul.

L'exploitation du modèle peut être divisée en six parties principales : l'inventaire des enjeux, l'analyse de l'aléa, l'estimation de dommages physiques directs, l'estimation de dommages physiques indirects, pertes économiques directes et indirectes. L'ensemble des modules, des informations ainsi que des résultats est présenté sous une forme cartographique et intégré dans un SIG.

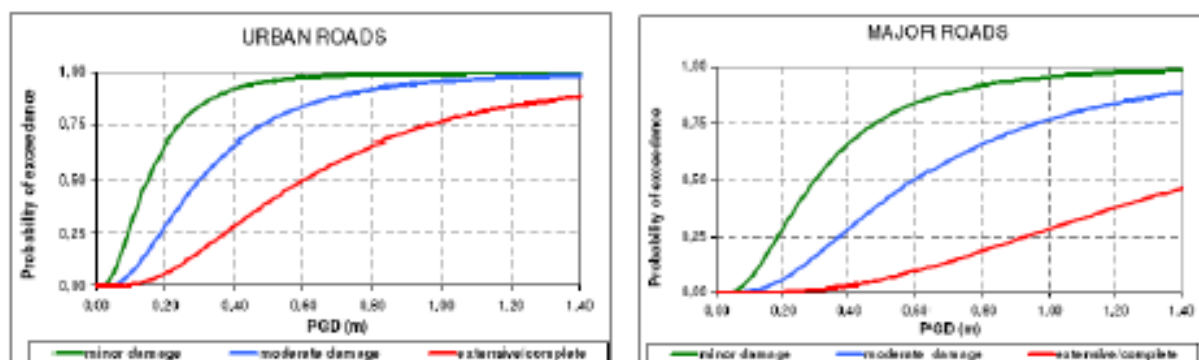
Pour le calcul de dommages des route, cette méthodologie définit quatre niveaux de dommages : Ds1, pour l'absence de dommages ; Ds2, pour les dommages légers ; Ds3, pour les dommages modérés ; Ds4, pour les dommages importants et destruction de la route. Ces niveaux de dommages sont présentés dans le tableau 1.3.

Damage State	Description	Serviceability level
No Damage	-	Fully open
Minor	Slight settlement (< 30cm) or offset of the ground	Open to traffic. Reduced speed during repairs.
Moderate	Moderate settlement or offset of the ground (30 to 60cm)	Fully closed due to temporary repairs for few days. Partially closed to traffic due to permanent repairs for few weeks. The duration of closure depends on the length and width of damaged roadway.
Extensive/Complete	Major settlement or offset of the ground (> 60cm)	Fully closed due to temporary repairs for few days to few weeks. Partially closed to traffic due to permanent repairs for few weeks to few months. The duration of closure depends on the length and width of damaged roadway.

**Tableau 1.3 : Etats de dommages pour les routes d'après HAZUS (LESSLOSS, 2007).**

Par ailleurs, les routes sont classées en 2 catégories : Les routes principales (les autoroutes et les routes principales à 4 voies et plus/Major roads) et les routes urbaines (les routes interurbaines et toutes les autres routes à 2 voies/Urban roads).

Des courbes de fragilité sont ainsi développées pour chacune de ces catégories. Elles sont données en fonction du PGD et non en fonction de l'intensité comme dans le cas de RADIUS. La figure 1.24 illustre des exemples de courbes de fragilité développée pour les deux catégories de routes.



**Figure 1.24 : Courbes de fragilité pour les routes par HAZUS (FEMA-NIBS, 2004).**

Signalons, que dans les segments de route, les effets dynamiques sont négligeables et les dommages ne dépendent que du déplacement permanent du sol PGD ; dû à la liquéfaction, aux glissements de terrain et à la rupture de faille (FEMA-NIBS, 2004).

De plus, la méthode donne les résultats des dommages en terme qualitatif qui permettent uniquement d'apprécier la sévérité. Par ailleurs, le programme HAZUS permet également l'évaluation de dommages indirects et le calcul des pertes économiques directes et indirectes.

Le modèle HAZUS connaît des limites, liées notamment à l'impossibilité de validation à partir d'un séisme réel. Les courbes de fragilité, qui incorporent des données liées aux incertitudes des estimations, ne peuvent par conséquent pas être vérifiées ou re-calibrées, sur la base des informations acquises lors des séismes antérieurs (Chiroiu, 2004). De plus, HAZUS a l'inconvénient d'être basée sur des données étasuniennes et sur la disponibilité de données sismiques instrumentées très souvent non disponibles dans tous les pays. De ce fait, les courbes de fragilité développées en fonction du PGD ne peuvent être utilisées surtout dans les pays en voie de développement (Tung, 2004).

Cependant, HAZUS représente une première approche d'estimation de dommages sismiques de cette envergure, et reste pour l'instant la seule. Initialement dédiée uniquement au risque sismique, HAZUS a fait l'objet de développements concernant d'autres risques naturels, notamment les inondations et les tempêtes (FEMA-NIBS, 2004).

#### **7.4.4. Méthode japonaise**

La méthode a été développée pour une étude sismique pour l'atténuation des catastrophes ( SEDM : Study on Earthquake Disaster Mitigation), et a été menée par l'Agence japonaise de coopération internationale (JICA : Japan International Cooperation Agency ) pour la vallée de Katmandou (Nepal) (JICA, 2002).

Les cartes d'inventaires des routes ont été produites pour la vallée entière de Katmandou, et numérisées pour un SIG (Système d'Informations Géographiques). La base de données comprend également quatre scénarii de tremblement de terre avec des cartes MMI, des cartes du PGD, des cartes de liquéfaction, etc.

L'étude a concerné les routes traversant des pentes de plus de 50 m de haut (hauteur relative au lit de la rivière). L'étude considère qu'un segment de route est susceptible d'être bloqué ou endommagé suite à des ruptures de talus (JICA, 2002).

Les routes ont été classées en différentes catégories notamment : Autoroute, route de desserte principale, route de desserte secondaire, Route de District en enrobé bitumineux, Route de District en gravier / en terre, Rocade, Route urbaine principale, Route urbaine secondaire, Route urbaine en gravier.

La méthode proposée par la JICA dans le SEDM est une étude spécifique à une ville. La vulnérabilité des routes est simplement basée sur une classification de routes. Cette classification est basée sur la fonction et l'importance de la route dans un scénario de tremblement de terre.

La vulnérabilité est évaluée en se basant simplement sur la probabilité de rupture de pentes instables (>50m), pas sur la structure physique de la route elle-même (Tung, 2004). Par ailleurs, l'étude ne peut être appliquée à des régions à pente douce. Pour ce faire il faut certainement la modifier pour l'adapter.

#### **7.4.5. Méthode RISK-UE**

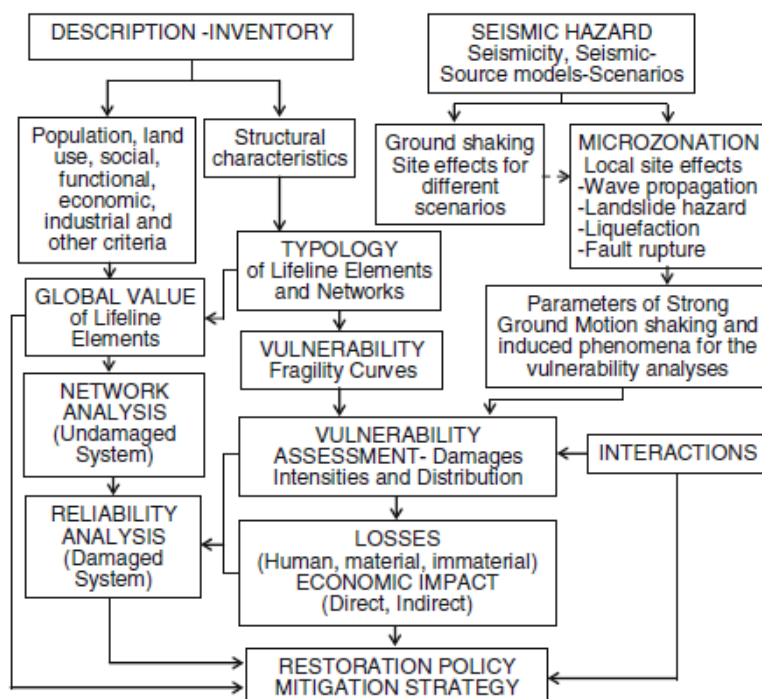
Le projet RISK-UE financé par la commission européenne; représente une étude de développement de scénarii de risque sismique appliqués à différentes villes européennes (Mouroux et al., 2004).

L'étude a pour objectif principal l'élaboration d'une méthodologie générale et modulaire d'analyse du risque sismique, considérant l'ensemble des caractéristiques urbaines spécifiques à l'Europe. Sept villes ont été considérées pour l'application de cette méthodologie : Nice (France), Barcelone (Espagne), Catania (Italie), Sofia (Bulgarie), Bucarest (Roumanie), Thessalonique (Grèce) et Bitola (Macédoine). Le projet consiste, en effet, à mettre au point un modèle d'estimation de dommages sismiques adapté au contexte européen. Les résultats

proposés sont des sorties habituelles de ce type de modélisation: des estimations de dommages physiques directs et indirects ainsi que des estimations des pertes économiques directes et indirectes (Chiroiu, 2004).

L'étude est structurée en quatre étapes principales : l'inventaire des enjeux, le développement de la méthodologie de l'étude de scénarii de séismes, l'application aux villes mentionnées ci-dessus et enfin l'analyse des résultats.

L'approche globale de la méthodologie RISK-UE pour les réseaux vitaux est présentée dans l'organigramme de la figure 1.25. Ce dernier met en évidence les différents modules et leurs interconnexions (Pitilakis et al., 2006)



**Figure 1.25: Organigramme de la méthodologie de RISK-UE (Pitilakis et al., 2006).**

Dans le cadre de ce projet, les routes sont classées selon 2 catégories : routes principales (autoroutes, routes principales /major roads) et routes urbaines (routes secondaires, routes locales /urban roads). L'inventaire du réseau routier comprend la description de la géométrie (largeur de voies, nombre de voies, largeur des trottoirs) ; la topographie (remblais, pentes) et les bâtiments environnants dans le cas des routes urbaines (hauteur, typologie).

Par ailleurs, quatre (04) niveaux de dommages sont définis notamment : (1) Pas de dommages, (2) Dommage mineur, (3) Dommage modéré, (4) Dommage important et /complet (Tableau 1.4). Le programme définit les courbes de fragilité pour les 2 catégories de routes exprimée en fonction du PGD. La méthode de l'indice de vulnérabilité a été utilisée dans le cadre de ce projet. D'autre part, pour les dommages indirects, une méthodologie est

développée pour le calcul du volume des débris issus des bâtiments effondrés et qui obturent les routes urbaines.

Serviceability	Damage States	Direct damages	Indirect damages
Fully closed due to temporary repairs for few days to few weeks. Partially closed to traffic due to permanent repairs for few weeks to few months*.	Extensive	Major settlement or offset of the ground (>60 cm).	Considerable debris of collapsed structures.
Fully closed due to temporary repairs for few days. Partially closed to traffic due to permanent repairs for few weeks*.	Moderate	Moderate settlement or offset of the ground (30 to 60cm).	Moderate amount of debris of collapsed structures.
Open to traffic. Reduced speed during repairs.	Minor	Slight settlement (<30cm) or offset of the ground.	Minor amount of debris of collapsed structures.
Fully open.	None	/	No damage/ Clean road.

\* The duration of closure depends on the length of damaged roadway

**Tableau 1.4 : Classification des dommages des routes (RISK-UE, 2003).**

Le projet RISK-UE représente une première approche de développement d'un modèle d'estimation de dommages au niveau européen, en considérant les caractéristiques sismiques et les enjeux spécifiques à ce contexte. Les objectifs proposés sont exceptionnels, permettant une analyse plus fine du risque et de la vulnérabilité suivant une méthode commune pour tous les pays participants au projet (Chiroiu, 2004). Par sa complexité, le projet RISK-UE représente une première alternative méthodologique au modèle HAZUS.

#### **7.4.6. Méthode REDARS**

La FHWA (the Federal Highway Administration) a développé une méthodologie nommée REDARS (Risks from Earthquake Damage to the Roadway System). Cette méthodologie a été programmée dans un logiciel et a été appliquée aux systèmes routiers dans la région de la baie de San Francisco et à Los Angeles et plus récemment, à des systèmes dans l'Oregon, l'Utah et la Californie du Sud (Werner et al., 2006).

REDARS est un outil multi-disciplinaire pour l'analyse du risque sismique (SRA Seismic Risk Analysis) des réseaux routiers. Pour toute donnée de tremblement de terre, REDARS est utilisé pour estimer: ( a ) les risques sismiques ( mouvements du sol, liquéfaction, et rupture de faille à la surface) pour l'ensemble du système; ( b ) l'état des dommages résultants (étendue des dommages, le type et l'emplacement ) pour chaque composante du système, et ( c ) la façon dont les dégâts de chaque composante seront réparés, y compris l'estimation des coûts de réparation, le temps d'arrêt, et les états de trafic en fonction du temps (Werner et al., 2008).

Le modèle considère les données d'entrée tels que : (a ) la structure du réseau routier (la géométrie, le nombre de voies, le trafic et les vitesses sur ce réseau) ; (b) un modèle de fragilité pour chaque composante du réseau ( pont , route , tunnel); ( c ) les conditions du sol à travers le réseau; (d) les matrices O-D, pour définir le nombre de trajets avant le séisme, et (e) les paramètres économiques nécessaires pour estimer les pertes économiques (Werner et al., 2000).

REDARS est un procédé techniquement avancé pour l'analyse du risque sismique inhérent aux voiries. Il peut être utilisé pour la planification (avant le séisme), par exemple pour l'évaluation des effets de diverses options de réduction des risques sismiques sur les performances et la résilience du réseau routier et également pour les évaluations post-sismique en temps réel après un tremblement de terre effectif afin de faciliter les interventions d'urgence (Werner et al., 2008).

#### 7.4.7. Méthode SYNER-G

SYNER-G est un projet européen de recherche collaborative financé par la Commission européenne en 2009. L'objectif principal de SYNER-G est de développer une méthodologie intégrée de la vulnérabilité sismique systémique et l'analyse des risques des bâtiments, des réseaux de transport et de services publics et des installations critiques, compte tenu des interactions entre les différentes composantes et systèmes. L'ensemble de la méthodologie est mise en œuvre dans un logiciel et validée dans les études de cas sélectionnés (Syner-G D2.1, 2009).

Des courbes de fragilité ont été développées pour les tunnels, les ponts, les remblais, et les routes. Pour ces dernières, 5 niveaux de dommages ont été définis en fonction du PGD : ds0: pas de dommages, ds1: dommages mineurs, ds2: dommages modérés, ds3: dommages importants et ds4 : destruction (Tableau 1.5) (Syner-G D3.7, 2009).

Damage State	Permanent Ground Displacement (m)		
	min	max	mean
ds0. None	0.00	0.03	0.015
ds1. Minor	0.03	0.15	0.090
ds2. Moderate	0.15	0.30	0.225
ds3. Extensive	0.30	0.60	0.450
ds4. Complete	0.60	1.50	1.050

**Tableau 1.5 : Définition des états de dommages pour les routes pour SYNER-G(Syner-G D3.7, 2009).**

Par ailleurs, pour les routes cette méthode se base sur les courbes de fragilité développées par HAZUS.

La méthodologie proposée par Syner-G représente une compilation des résultats des différentes approches développées jusque-là (ALA 2001), (Salmon et al., 2003), (FEMA-NIBS, 2004), (Corigliano, 2007), (Lagaros et al., 2009), (Maruyama et al., 2010).

En définitive, il existe plusieurs méthodes d'estimation de dommages sismiques à travers le monde. Ces méthodes ont des avantages non discutables car elles permettent pour la plus part, à l'aide de modélisations, une estimation des dommages et des dégâts sur les structures et les infrastructures ainsi que les pertes économiques indirectes face à des scénarii potentiels de catastrophes. Cependant, l'inconvénient majeur et commun à toutes ces méthodes, est que l'évaluation de la vulnérabilité physique des routes est basée sur une classification du réseau et de la défaillance du sol sans prise en compte des caractéristiques intrinsèques de l'infrastructure et des facteurs qui peuvent influencer cette vulnérabilité.

## **VIII. Conclusion**

L'intérêt d'évaluer la vulnérabilité physique des routes a été mis en évidence par les séismes destructeurs passés à travers le monde. Par conséquent, plusieurs méthodes ont été développées et appliquées pour évaluer cette vulnérabilité. Toutes ces méthodes ont des avantages et des inconvénients. Ces derniers résident principalement dans la disponibilité, la subjectivité et la représentativité des données pour les méthodes empiriques et par les lacunes de modélisation pour les approches analytiques. De plus, elles sont la base de méthodes plus complexes dédiées à la simulation des scénarii sismiques. Toutefois, faute de données et de moyens techniques homogènes, l'application des modèles de simulation développés reste souvent partielle car ils sont fondés sur des données sismotectoniques et géologiques spécifiques ou représentent des études orientées qui souvent, sont ni appropriées ni pertinentes à l'échelle internationale.

Ainsi, dans le but de trouver un compromis entre la précision, l'accessibilité et la fiabilité de l'évaluation de la vulnérabilité nous avons opté pour l'utilisation de la méthode de l'indice de vulnérabilité. Cette méthode a l'avantage d'être relativement aisée à mettre en œuvre et permet de prendre en compte les caractéristiques des routes et les paramètres cruciaux qui influent sur cette vulnérabilité.

Cette méthode basée sur le retour d'expérience et les observations post-sismique nous permettra d'avoir un indicateur chiffré fiable pour poser un diagnostic sur le comportement des routes vis-à-vis du séisme. Cet indicateur sera fonction de plusieurs paramètres de nature différente, ce qui nécessitera l'utilisation des MCDM (Multi-Criterion Decision Making) afin d'hierarchiser et de quantifier chacun d'eux.

## **CHAPITRE 2 :    PROCESSUS D'ANALYSE HIERARCHIQUE**

### **‘AHP Analytic Hierarchy Process ’**

#### **I.    Introduction**

L'évaluation de la vulnérabilité des routes vis-à-vis des tremblements de terre est un problème complexe qui implique de nombreux facteurs. Cette complexité réside dans la nécessité de disposer de données statistiques suffisantes et représentatives qui permettent d'identifier les paramètres cruciaux influant sur cette vulnérabilité. Ces données sont utilisées par les méthodes d'évaluation qui nécessitent des analyses et des outils souvent complexes, longs et onéreux. D'un autre côté, certains paramètres identifiés sont quantifiables contrairement à d'autres qui sont seulement qualifiables. Ces critères d'importance inégale influent différemment sur la vulnérabilité des systèmes considérés. Par conséquent leur prise en compte sur une même échelle pour les évaluer est souvent difficile. Aussi, il convient de traiter ce type de problème par des analyses multicritères.

Les méthodes d'analyse multicritère sont nombreuses. Toutefois, elles sont toutes utilisées pour agréger plusieurs paramètres et estimer leur importance relative. La méthode AHP ‘ Analytic Hierarchy Process’ est l'une de ces méthodes. Elle a été récemment utilisée par plusieurs chercheurs dans le cadre de l'évaluation de la vulnérabilité sismique notamment des infrastructures routières, des bâtiments et des réseaux. Elle est également souvent appliquée dans les études de risque.

#### **II. Méthodes multicritères "MCDM"**

L'analyse multicritère (ou les méthodes d'aide à la décision multicritères MCDM : Multi-Criterion Decision Making) désignent un ensemble de méthodes mathématiques développées vers la fin des années soixante pour résoudre des problèmes multicritères complexes.

L'idée de base est de considérer tous les critères entrant en compte, leur attribuer un poids lié à leur importance relative, de noter chaque élément de la solution par rapport à tous les critères et finalement d'agréger ces résultats.

Ces méthodes ont connu un développement considérable grâce au développement de l'outil informatique.

## 2.1. Terminologie de base

La terminologie utilisée dans la plupart des méthodes MCDM est essentiellement définie par les termes : actions potentielles, critères, unités et poids des critères (Tableau 2.1)

TERMINOLOGIE	DESCRIPTION
Actions potentielles (alternatives)	Choix disponibles
Critères (attributs)	Aspects suivant lesquels les alternatives sont examinées (qualitatifs ou quantitatifs)
Unités	Façon d'exprimer les critères
Poids des critères	Importance attribuée aux critères

**Tableau 2.1: Terminologie de l'analyse multicritère (Ennaouri, 2010).**

## 2.2. Méthodologie

La démarche commune aux MCDM peut être résumée par les étapes suivantes :

1. Identifier l'objectif général de la démarche et le type de décision ;
2. Dresser la liste des alternatives ou solutions potentielles ;
3. Identifier les critères qui orienteront les décideurs ;
4. Juger chacune des solutions par rapport à chacun des critères ;
5. Agréger ces jugements pour choisir la solution la plus satisfaisante.

L'analyse multicritère vise ainsi à fournir des outils qui permettront de progresser dans la résolution d'un problème de décision (Béranger, 2009).

## 2.3. Problématiques de l'aide multicritère à la décision

La formulation du problème décisionnel par les méthodes multicritères s'inscrit dans l'une des quatre problématiques d'aide à la décision (Rousval & Bouyssou, 2009) :

- *la problématique du choix  $P(\alpha)$* : mettre en avant la ou les meilleures alternatives pour aider à choisir l'action la plus intéressante aux yeux du décideur;
- *la problématique de rangement  $P(\beta)$* : établir un ordre de toutes les alternatives pour identifier autant les meilleures que les moins bonnes ;
- *la problématique de tri  $P(\gamma)$* : affecter chacune des alternatives à une des catégories prédéfinies, cela consiste à classer les alternatives en les affectant chacune à une catégorie, une classe;
- *la problématique de description  $P(\delta)$* : lister les performances des différentes alternatives (description) selon chaque point de vue jugé pertinent.

Quelle que soit la problématique retenue, pour résoudre un problème, il s'agit d'identifier l'ensemble des alternatives sur lesquelles va porter la décision ainsi que les critères pertinents qui permettront de résoudre le problème décisionnel. Par ailleurs dans le cadre de l'évaluation de la vulnérabilité sismique il n'est pas question de faire un choix mais plutôt de définir un ordre ou encore des classes de vulnérabilité.

#### **2.4. Choix d'une méthode**

Il existe une multitude de MCDM telles que : WSM (Weighted Sum Model), WPM (Weighted Product Model), ELECTRE (I,II, III : ELimination Et Choix Traduisant la REalité), AHP (Analytic Hierarchy Process), M-AHP (Modified AHP), PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations) , TOPSIS (Technique for Order by Similarity to Ideal Solution), MAUT (Multiple Attribute Utility Theory), AUT (Utility Theory Additive), SMART (Simple Multi-Attribute Rating technique), etc.(Caillet, 2003), (Bhushan & Rai, 2004), (Ennaouri, 2010), (Peng, 2012).

La majeure différence qui existe entre ces méthodes d'analyse multicritère réside dans la façon de distribuer l'importance relative des critères et d'agrèger les résultats de l'analyse.

De manière générale, il n'y a pas de procédure pour le choix d'une méthode. Chaque utilisateur choisit l'une ou l'autre des méthodes en fonction de la formulation de la problématique pour résoudre le problème décisionnel. Certains auteurs proposent de faire une analyse multicritère pour choisir la méthode à utiliser (Ennaouri, 2010).

Dans la présente étude, nous avons opté pour l'utilisation de la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) car elle permet de décomposer un problème complexe en une structure hiérarchique. L'avantage d'une telle hiérarchisation est d'offrir une visibilité claire sur l'ensemble des éléments qui entrent en compte. Par ailleurs, les MCDM ayant toute une part de subjectivité car elles sont basées sur le jugement des utilisateurs, la AHP est la seule qui dispose d'une méthode rigoureuse de vérification qui favorise une plus grande objectivité (Adamcsek, 2008).

### **III. Processus d'analyse hiérarchique "AHP"**

Le processus d'analyse hiérarchique (AHP) est une approche analytique multicritères d'aide à la décision développé par Saaty (Saaty, 1980)

La méthode AHP est construite à partir de différents niveaux de critères. Elle permet ainsi :

- de définir l'objectif et de décomposer un problème complexe en différents critères ;
- de modéliser ces critères sous la forme d'une structure hiérarchique ;

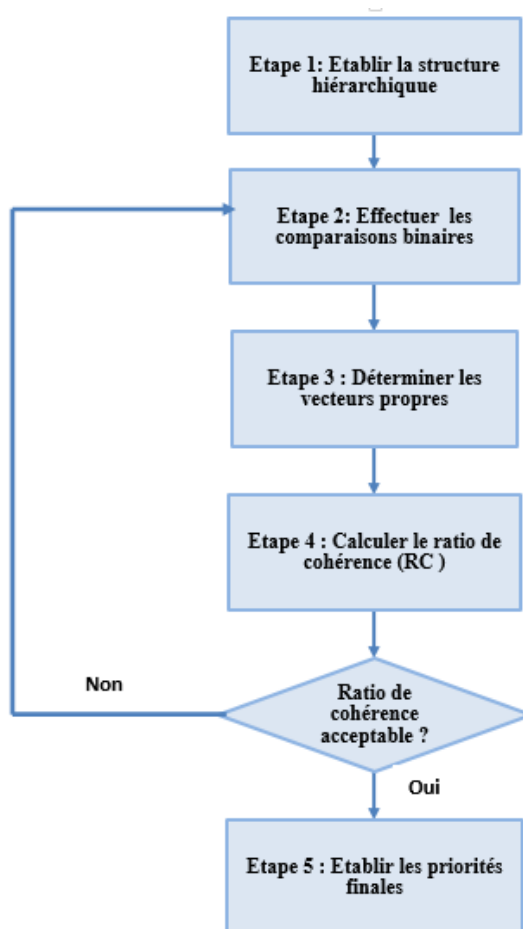
- de quantifier l'importance relative de chaque critère à partir de jugements ;
- et enfin, de synthétiser l'importance relative de chaque critères de la hiérarchie en une référence globale afin de déterminer des priorités parmi les alternatives potentielles.

La méthode AHP a été appliquée pour la résolution de nombreux problèmes et a été implantée dans plusieurs logiciels d'aide à la décision. Le logiciel ExpertChoice développé par Forman et Saaty (1980) se trouve au premier rang de ces logiciels.

### 3.1. Méthodologie

La méthode AHP utilise une structure hiérarchique à plusieurs niveaux d'objectifs, de critères, de sous-critères, et d'alternatives. Pour chaque niveau de la hiérarchie, des comparaisons par paires sont effectuées. Ces comparaisons binaires sont utilisées pour obtenir les poids d'importance des critères de décision (pondération) et les mesures de la performance relative des alternatives.

La méthodologie de l'AHP se déroule en cinq étapes (Bhushan & Rai, 2004). Nous les avons schématisées comme suit (figure 2.1).



**Figure 2.1 : Etapes de la méthode AHP.**

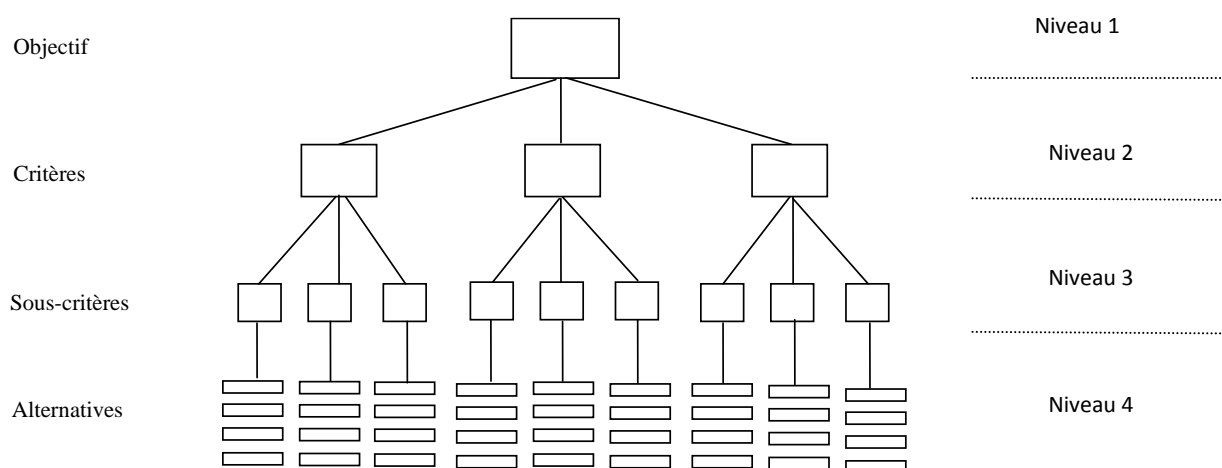
Les différentes étapes sont détaillées ci-dessous :

### ❑ Étape 1: Etablir la structure hiérarchique

Décomposer le problème en une hiérarchie de buts, de critères, de sous-critères et d'alternatives. C'est la partie la plus créative et la plus importante de la prise de décision.

- Le premier niveau de la structure hiérarchique correspond à l'objectif
- Le second niveau correspond aux différents critères d'analyse pouvant influencer la prise de décision. La méthode AHP permet d'inclure différents sous-niveaux dans le but de préciser davantage un critère en le divisant en sous-critères.
- Le dernier niveau correspond aux alternatives, c'est-à-dire aux différentes solutions possibles permettant d'atteindre l'objectif (Figure 2.2).

La Hiérarchie indique une relation entre les éléments d'un niveau et ceux du niveau immédiatement inférieur. Cette relation s'infiltrer aux plus bas niveaux de la hiérarchie et de cette manière chaque élément est relié à tous les autres, au moins de manière indirecte.



**Figure 2.2 : Structure hiérarchique générique de la méthode AHP (Adamcsek, 2008).**

En théorie, le nombre de niveaux d'une hiérarchie n'est pas limité. Il dépend de la complexité du problème et du degré de détails requis par le décideur. Dans de nombreuses situations, le nombre de niveaux peut être volontairement augmenté pour faciliter l'analyse des comparaisons et pour augmenter la cohérence et la précision des jugements formulés (Bhushan & Rai, 2004).

## □ Étape 2 : Effectuer les comparaisons binaires

Il s'agit de procéder à la comparaison par paire (ou comparaison binaire) des éléments de chaque niveau par rapport à un élément du niveau hiérarchique supérieur et construire les matrices de comparaison sur la base de la comparaison binaire effectuée.

Cette étape se déroule en deux phases :

**Phase 1** - Comparer deux par deux ; tous les critères d'un même niveau de la hiérarchie. Pour ce faire, on doit se poser la question suivante, dans quelle mesure le premier élément contribue-t-il davantage au critère que le second élément auquel il est comparé. L'intensité de la préférence peut alors être chiffrée en utilisant l'échelle numérique de Saaty (Saaty, 1980).

Cette échelle est graduée de 1 (indifférence) à 9 (préférence absolue) et comporte les réciproques (1/x) qui permettent d'évaluer les comparaisons inverses (Tableau 2.2)

Degrés d'importance	Définitions	Explications
1	importance égale des deux éléments	Deux éléments contribuent autant à la propriété
3	un élément est un peu plus important que l'autre	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent légèrement un élément par rapport à un autre
5	un élément est plus important que l'autre	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent fortement un élément par rapport à un autre
7	un élément est beaucoup plus important que l'autre	Un élément est fortement favorisé et sa dominance est attestée dans la pratique
9	un élément est absolument plus important que l'autre	Les preuves favorisant un élément par rapport à un autre sont aussi convaincantes que possible
2,4,6,8,	Valeurs intermédiaires entre deux appréciations voisines	Un compromis est nécessaire entre deux appréciations
Réciprocité	Si l'élément 'i' se voit attribué l'un des chiffres précédents lorsqu'il est comparé à l'élément 'j', on attribuera à 'j' la valeur inverse lorsqu'il est comparé à 'i'	

**Tableau 2.2 : Echelle de comparaisons binaires de Saaty (Guesdon, 2011).**

Sur la base de cette échelle, le nombre de comparaisons nécessaires pour permettre une analyse complète se calcule selon la formule suivante :

$$\text{Nombre de comparaisons} = n * (n - 1) / 2 \quad (2.1)$$

où  $n$  représente le nombre de facteurs à comparer pour un niveau donné.

**Phase 2**-Construire les matrices de comparaison à partir des valeurs obtenues à la phase précédente. Ces valeurs sont organisées en une matrice carrée ( $n \times n$ ). Les éléments diagonaux de la matrice sont égaux à 1. Le critère dans la  $i$ -ième ligne est meilleur que le critère dans la  $j$ -ième colonne si la valeur de l'élément ( $i, j$ ) est supérieure à 1, sinon le

critère dans la j-ième colonne est meilleur que celui dans la ligne i. L'élément (j, i) de la matrice est l'inverse de l'élément (i,j) par le principe de réciprocité (Tableau 2.3).

$$\text{Tel que :} \quad [A] = [a_{ij}] \quad (2.2)$$

$$a_{ii} = 1 \quad (2.3)$$

$$\text{Et} \quad a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} \quad (\text{valeur réciproque}) \quad (2.4)$$

Les indices i et j varient de 1 à n (n : nombre de critères = rang de la matrice).

Critères	C1	C2	C3
C1	1	3	6
C2	1/3	1	2
C3	1/6	1/2	1

**Tableau 2.3 : Exemple d'une matrice de comparaison.**

### □ Étape 3 : Déterminer les vecteurs propres

Calculer le vecteur propre (eigenvector) de chaque matrice de comparaison, afin d'obtenir une estimation des priorités relatives des critères étudiés. Les vecteurs propres normalisés des matrices sont appelés « les poids » selon le cas des critères ou des sous critères.

Le vecteur propre W est défini par :

$$A \cdot W = \lambda_{\max} \cdot W \quad (2.5)$$

où A est la matrice de comparaison.

et  $\lambda_{\max}$  est la valeur propre maximale de la matrice A

$$\text{Tel que :} \quad \sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (2.6)$$

Les vecteurs propres normalisés ou vecteurs « poids » sont calculés suivant les différentes phases explicitées ci-dessous :

**Phase 1**-Calcul de la somme de chaque colonne de la matrice de comparaison [A]:

$$S_j = \sum_{i=1}^n A_{ij} \quad (2.7)$$

Où : j indique l'indice de la colonne et varie de 1 à n.

**Phase 2-**Calcul de la matrice normalisée  $[A_N]$  en divisant chaque élément  $a_{ij}$  de la matrice  $[A]$  par la somme de chaque colonne  $[S_j]$  à laquelle il appartient :

$$a'_{ij} = \frac{a_{ij}}{S_j} \quad (2.8)$$

Ainsi :  $[A_N] = [a'_{ij}] \quad (2.9)$

**Phase 3-** Calcul du vecteur poids  $\{W\}$  à partir de la moyenne des colonnes de la matrice normalisée  $[A_N]$  :

$$w_i = \sum_{j=1}^n \frac{a'_{ij}}{n} \quad (2.10)$$

□ **Etape 4: Calculer le ratio de cohérence (RC)**

Evaluer la consistance de la matrice de comparaison en vérifiant la cohérence des jugements pour s'assurer que les poids relatifs ou priorités ne sont pas dictés arbitrairement ou aléatoirement par le décideur.

La matrice de comparaison est dite cohérente si elle satisfait la propriété de transitivité suivante (Saaty, 1980):

$$a_{ij} = a_{ik} \cdot a_{kj} \quad \text{avec } i,j,k=1,\dots,n \quad (2.11)$$

Cette étape de vérification se déroule en deux phases :

**Phase1- Calcul de l'indice de cohérence (IC)**

L'indice de cohérence IC (Consistency index : CI) concerne la cohérence des jugements qui ont permis de construire la matrice de comparaison dans sa globalité. Il est calculé par la formule suivante :

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n - 1)} \quad (2.12)$$

Rappelons que  $\lambda_{\max}$  est la valeur propre maximale de la matrice de comparaison  $[A]$ .

Pour calculer  $\lambda_{\max}$ , il faut calculer les vecteurs  $[B]$  et  $[D]$  tel que :

$$b_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot w_j \quad (2.13)$$

et

$$d_i = \frac{b_i}{w_i} \quad (2.14)$$

ainsi :

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (2.15)$$

### Phase 2- Calcul du Ratio de Cohérence (RC)

Le ratio de cohérence (Consistency Ratio : CR) est défini par le rapport de l'indice de cohérence IC pour une matrice de jugement donnée à l'indice de cohérence moyen pour des comparaisons aléatoires d'une matrice de même rang. Il est calculé par l'équation (2.16) :

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad (2.16)$$

Où : IA est un indice aléatoire défini par Saaty (Tableau 2.4).

Cet indice IA aléatoire (Random Index : RI) représente l'indice de cohérence IC moyen calculé par Saaty à partir de 500 matrices remplies au hasard dont le rang n varie de 3 à 15.

<b>Nombre de critères</b>	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>IA</b>	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41
<b>Nombre de critères</b>	9	10	11	12	13	14	15	
<b>IA</b>	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59	

**Tableau 2.4 : Valeurs de l'Indice de Cohérence Aléatoire (IA) (Saaty, 1980).**

Selon Saaty le ratio de cohérence RC doit être inférieur à 0.1 (ou 10%).

Ainsi 3 possibilités peuvent se présenter :

\*Si  $RC > 0.10$ , l'ajustement des jugements est nécessaire et la matrice de comparaison doit être reconstruite ;

\* Si  $0 < RC \leq 0.10$ , les ajustements qui devront être apportés aux jugements sont faibles par rapport aux composants réels du vecteur propre  $\{W\}$ . Dans ce cas, il est conclu que la valeur obtenue est valide ;

\*Si  $RC = 0$  car  $IC = 0$  et  $\lambda_{\max} = n$ . Les jugements sont totalement compatibles et l'estimation peut être adoptée.

Une fois la cohérence des jugements vérifiée, les poids obtenus sont considérés comme validés.

## □ Etape 5 : Etablir les priorités finales

Distribuer les poids relatifs pour chacun des niveaux de la hiérarchie afin de pouvoir calculer les priorités d'ensemble.

Le score de chaque alternative est multiplié par les coefficients de pondération des sous-critères et agrégé pour obtenir des scores locaux par rapport à chaque critère.

Les scores locaux sont alors multipliés par les coefficients de pondération des critères du niveau considéré puis agrégés pour obtenir une note globale.

L'AHP permet ainsi d'obtenir les valeurs de poids  $P_i$  pour chaque alternative

$$P_i = \sum_{j=1}^k w_i v_j c_{ji} \quad (2.17)$$

Avec  $w_i$  le poids des critères ( $i=1, \dots, n$ ), et  $v_j$  le poids des sous-critères ( $j=1, \dots, k$ ) et  $c_{ji}$  les scores attribués à l'alternative du sous-critère  $j$  du critère  $i$ .

Le score global pour chaque alternative est donné par :

$$W = \sum_{i=1}^n P_i \quad (2.18)$$

## 3.2. Modifications et développement

Le processus analytique AHP classique utilise la méthode du vecteur propre pour déterminer les poids ( $w_i$ ) de la matrice de comparaison binaire  $[A]$  tel que présenté à l'étape 3 de la méthodologie de l'AHP (voir § 3.1). Pour cela, Saaty utilise des calculs complexes reposant sur l'algèbre matricielle, qui sont généralement effectués par des logiciels dédiés.

D'autres méthodes pour l'estimation de ces poids ont été proposées par d'autres chercheurs mais l'inconvénient de la majorité d'entre elles est qu'elles ne définissent pas de méthodes ou de valeurs pour vérifier la cohérence (Aguarón, Juan & Moreno-Jiménez, José María, 2003), (Alonso & Lamata, 2006).

### 3.2.1. Modifications

Crawford et Williams (1985) ont développé une méthode pour calculer les « poids » sur la base de la méthode de la moyenne géométrique (RGMM : Row Geometric Mean Method). Elle a l'avantage d'être très simple et rapide d'utilisation. De plus Crawford et Williams ont proposé une méthode pour vérifier la cohérence (Aguarón, Juan & Moreno-Jiménez, José María, 2003), (Alonso & Lamata, 2006).

La moyenne géométrique est une fonction statistique calculée par de nombreux tableurs.

Elle est donnée par l'équation :

$$w_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \quad (2.19)$$

Les moyennes géométriques normalisées des lignes de la matrice [A] sont très proches du vecteur propre (poids) calculé par la méthode AHP classique.

Ainsi les facteurs de pondération sont :

$$w_i = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}}{\sum_{k=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{kj}}} \quad (2.20)$$

La vérification de la cohérence se fait par le calcul de l'indice de cohérence géométrique ICG (Geometric Consistency Index GCI). Il est donné par l'équation (Aguarón, Juan & Moreno-Jiménez, José María, 2003) :

$$ICG = \frac{2}{(n-1)(n-2)} \sum_{i < j} \left( \log \frac{a_{ij} w_j}{w_i} \right)^2 \quad (2.21)$$

Pour considérer que les valeurs des poids  $w_i$  obtenues sont acceptables et pouvoir juger la cohérence de la matrice de comparaison, Crawford et Williams ont défini pour l'indice ICG des valeurs seuils (Tableau 2.5).

Rang de la matrice	Indice de cohérence géométrique acceptable
3	0.3147
4	0.3526
>4	0.3700

**Tableau 2.5 : Valeurs seuils des ICG (Aguarón, Juan & Moreno-Jiménez, José María, 2003).**

Lorsque l'indice ICG est inférieur au seuil correspondant, la matrice de comparaison peut être considérée totalement cohérente. Par contre s'il est supérieur alors la matrice doit être révisée pour respecter l'exigence de cohérence (Aguarón, Juan & Moreno-Jiménez, José María, 2003), (Alonso & Lamata, 2006).

### 3.2.2. Développement

En 2001, Saaty a apporté des modifications et a développé sa méthode notamment pour le calcul du ratio de cohérence.

- 1- Il a recalculé l'indice de cohérence aléatoire et a proposé un autre tableau pour les valeurs de l'indice aléatoire IA (Tableau 2.6)

Nombre de critères	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IA	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49

**Tableau 2.6 : Indices de cohérence aléatoires de Saaty (Saaty, 2001).**

La comparaison des deux tableaux de Saaty permet de constater que :

- Les valeurs de l'indice IA de 2001, sont légèrement plus faibles pour les matrices d'ordre  $n=3,4,5$  ou 8, ce qui donnera un taux de cohérence RC ( $RC=IC/IA$ ) plus élevé (de l'ordre de 1%). Ces valeurs de IA sont plus contraignantes par rapport à la cohérence (RC devant être inférieur à 10%).
- Par contre pour les matrices d'ordre  $n=6$  ou 7, les valeurs de IA sont légèrement plus élevées, ce qui donnera un taux de cohérence RC plus faible (de l'ordre de 1%). Ces valeurs de RI sont moins contraignantes par rapport à la cohérence.
- Quant aux matrices d'ordre  $n \geq 9$ , les valeurs de IA sont identiques.

La modification de la valeur de l'indice aléatoire IA implique une très légère modification du taux de cohérence RC (de l'ordre de 1%). Cette différence étant négligeable, il est d'ailleurs toujours d'usage d'utiliser le tableau des valeurs de Saaty de 1980 (Bhushan & Rai, 2004), (Adamcsek, 2008), (Daneshvar et al., 2013).

- 2- Pour juger de la cohérence des jugements; Saaty a proposé trois (03) seuils pour les valeurs du ratio de cohérence en fonction du rang  $n$  de la matrice de comparaison traitée (Saaty, 2001) (Tableau 2.7).

Rang de la matrice	Ratio de cohérence acceptable
3	0.05
4	0.08
$\geq 5$	0.1

**Tableau 2.7 : Valeurs acceptables du Ratio de cohérence (Saaty, 2001).**

Le développement de la méthode par Saaty et la définition de différents seuils en fonction du rang de la matrice s'avère plus logiques et plus rigoureux pour la vérification de la cohérence.

En effet, pour une matrice (3x3) la condition de  $RC \leq 5$  est plus sévère en terme de cohérence et plus logique que la condition de  $RC \leq 10$  car la construction de la matrice est basée sur seulement 3 comparaisons binaires. Par conséquent, une cohérence parfaite peut être facilement approchée. Par contre, la condition de  $RC \leq 10$  est donc plus adaptée pour les matrices de rang supérieur à 5 car le nombre de comparaisons est plus important. En outre, la condition de  $RC \leq 8$  pour une matrice de rang 4, est une valeur intermédiaire qui suit la même logique et rigueur pour vérifier la cohérence.

### **3.3. Utilisation de la méthode**

La méthode AHP fut initialement développée par Saaty au début des années soixante-dix afin d'étudier les différentes options possibles pour répondre aux besoins d'armement des États-Unis (Yanga & Shia, 2002), (Bhushan & Rai, 2004). Les premières applications ont été pratiquées dans le domaine de la prise de décision environnementale (gestion des déchets, traitement des eaux, installation de décharges...) (Ennaouri, 2010).

Par ailleurs les domaines qui ont très largement appliqué l'AHP sont : la santé, la défense, la planification, les prévisions technologiques, la gestion de risques, le management, le marketing, l'économie, les sciences sociales, etc (Bagchi et Rao, 1992), (Triantaphyllou & Mann, 1995), (Al-Harbi, 2001), (Yanga & Shia, 2002), (Gagné & Gharbi, 2003), (Bhushan & Rai, 2004), (DeVecchio, 2006). Ce ne sont là que quelques exemples de l'utilisation de la méthode AHP. En effet, le nombre d'utilisations de la méthode AHP est fort impressionnant dans la littérature scientifique (Fumey, 2001).

Dans le cadre de l'évaluation de la vulnérabilité sismique, plusieurs chercheurs ont récemment utilisé la méthode AHP pour l'évaluation de la vulnérabilité : des ponts, des tunnels, des réseaux, des bâtiments, et à une plus grande échelle des zones urbaines.

Le tableau 2.8 résume quelque unes de ces études.

Problématique		Référence	Objectif
<b>Evaluation de la vulnérabilité des bâtiments</b>	Evaluation de la vulnérabilité des bâtiments d'une ville	(Ishita & Khandaker, 2010)/Bengladesh	Définition d'un Indice de vulnérabilité par l'AHP et utilisation d'un SIG pour représenter une carte de vulnérabilité de la ville de Dhaka
	Evaluation de la vulnérabilité des écoles de Téhéran	(Panahi et al., 2013)/Iran	Définition de classes de vulnérabilité et utilisation d'un SIG pour représenter la carte de vulnérabilité des écoles la ville de Téhéran
<b>Evaluation de la vulnérabilité des chantiers d réalisation</b>	Evaluation de la vulnérabilité des bâtiments en cours de construction	(Zahaf & Bensaibi, 2014)/Algérie	Définition d'une classification des chantiers de réalisation sur la base de deux indices de vulnérabilité l'un partiel et l'autre global ('PVI' Partial Vulnerability Index et 'GVI' Global Vulnerability Index)
<b>Evaluation de la vulnérabilité des infrastructures</b>	Evaluation de la vulnérabilité des ponts et des tunnels	(Mohammadreza et al., 2012) /Malaisie	Définition d'une classification des infrastructures sur la base d'un indice de vulnérabilité SVI l'un pour les ponts et l'autre pour les tunnels
	Evaluation de la vulnérabilité des tunnels	(Wang & Zhang, 2013)/Chine	Définition des poids pour des paramètres de vulnérabilité identifiés.
<b>Evaluation de la vulnérabilité des réseaux</b>	vulnérabilité des réseaux d'une ville	(Qunlin et al., 2013)/Chine	Définition de classes de vulnérabilité pour différents réseaux urbains.
<b>Evaluation de la vulnérabilité d'une zone urbaine</b>	Evaluation de la vulnérabilité d'une zone urbaine	(Sarvar et al., 2011)/Iran	Définition d'une classification de 10 districts de la ville de Téhéran en combinant 2 MCDM (AHP et TOPSIS) et utilisation d'un SIG pour 3 scénarios sismiques.
	Evaluation de la vulnérabilité d'une ville	(Gheitarani et al., 2013)/ Iran	Définition d'une classification de huit (08) zones de la ville de Téhéran
	vulnérabilité d'un tissu urbain	(Daneshvar et al., 2013)/Iran	Définition d'une classification de 12 districts

**Tableau 2.8 : Résumé d'études de vulnérabilité.**

Ainsi, les résultats de cette méthode sont variés et dépendent de la définition de la problématique. Dans le cas de la définition d'indices ou de classe de vulnérabilité, il est question de la problématique de tri. Par contre dans le cas de la classification des zones (ou districts) d'une ville vis à vis de leur vulnérabilité, il s'agit alors d'une problématique de rangement. De plus, les résultats obtenus sont souvent intégrés dans un SIG (Système

d'Information Géographique), qui constitue un outil très appréciable pour la gestion des risques.

D'autres MCDM pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique sont utilisées. La méthode MacBeth a été utilisée pour l'évaluation de la vulnérabilité des ponts (Majid & Yousefi, 2012), la méthode Fuzzy Logic approach pour l'évaluation de la vulnérabilité des réseaux d'AEP (Roozbahani et al., 2013) et une combinaison de 6 MCDM pour l'évaluation de la vulnérabilité d'une région (Peng, 2012).

### **3.4. Limites et avantages de la méthode**

De par sa formulation, la méthode AHP présente des avantages et quelques limites que nous allons présenter.

#### **3.4.1. Limites**

Les principales critiques formulées à l'utilisation de la méthode AHP concerne le renversement du rang des options dit « rank reversal » lors de l'ajout ou la suppression de critères. En d'autres termes, si un critère est ajouté (ou supprimé) de l'analyse, les critères existants perdraient (ou gagneraient) de la priorité (Bhushan & Rai, 2004), (DelVecchio, 2006), (Ishizaka & Labib, 2009). Malgré cette critique majeure, il est très important de noter qu'un renversement du rang n'invalide en rien la méthode AHP. Par exemple, l'addition d'un choix très intéressant pour le décideur peut avoir pour effet de changer la répartition des critères de préférences et ainsi de modifier l'ordre des options préalablement établi. On parle alors du mode *distributif* de la méthode AHP (DelVecchio, 2006). De plus un grand nombre d'éléments dans le problème de décision fait exploser le nombre de comparaisons par paires. De plus, le choix d'une échelle de 1 à 9 n'est pas justifié mathématiquement (Ishizaka & Labib, 2009).

#### **3.4.2. Avantages**

Les points forts de la méthode AHP sont la modélisation du problème de décision par une structure hiérarchique qui facilite la compréhension et l'analyse du problème. Elle permet de comparer des critères de différentes natures et d'intégrer plus facilement des critères tant objectifs que subjectifs, tant qualitatifs que quantitatifs, tangibles et intangibles.

Elle peut être utilisée par un seul décideur ou un groupe de décideur qui peuvent construire chacun de son côté les matrices de comparaison nécessaires. Une moyenne géométrique sera calculée pour trouver les matrices définitives (DelVecchio, 2006).

En outre, l'avantage incontestable de l'AHP sur toutes les autres méthodes multicritères repose sur le fait que c'est l'unique méthode qui comporte une procédure pour évaluer systématiquement la cohérence des choix. Cette vérification de la cohérence permet de s'assurer que l'analyse menée n'est pas arbitraire ou erronée (Aguarón, Juan & Moreno-Jiménez, José María, 2003), (Bhushan & Rai, 2004), (Adamcsek, 2008).

Le logiciel ExpertChoice a largement contribué au succès de la méthode (Ishizaka & Labib, 2009). Toutefois, malgré les calculs complexes sur lesquels elle est basée, cette méthode peut être programmée et les modifications et développements qu'elle connaît peuvent l'être également.

Enfin, malgré les controverses et les problèmes rencontrés par la technique de la AHP, elle fait partie de la vaste gamme de méthodes d'analyses multicritères qui continuent à être développées. Par ailleurs, depuis quelques années, son application dans divers domaines revient en force et son utilisation dans les études de risque est de plus en plus fréquente.

#### **IV. Conclusion**

Les méthodes multicritères sont souvent appliquées dans les études de risques naturels (avalanches, glissements des terrains, sécheresse, inondations, séismes ...). L'AHP comme toutes les MCDM présente des avantages et des inconvénients et son application est très appréciée pour résoudre des problèmes complexes de prise de décision.

La méthode AHP a été appliquée ces dernières années par plusieurs chercheurs dans le domaine du risque sismique et plus particulièrement pour l'évaluation de la vulnérabilité physique des infrastructures routières tels que les ponts et les tunnels.

L'AHP présente l'intérêt incontestable de proposer un modèle facilement compréhensible d'organisation des données. Elle est également très flexible et peut être aisément programmée. Ainsi, à partir des critères pertinents influant sur la vulnérabilité des routes, la méthode AHP sera appliquée pour hiérarchiser le problème, prendre en compte tous les critères et estimer leur importance relative par le calcul de leur poids respectifs suivant les procédures rigoureuses de la méthode.

Le logiciel dédié ExpertChoice n'étant pas disponible, cette méthode sera programmée sous Matlab. La méthode classique de Saaty sera utilisée pour déterminer le vecteur « poids ». La méthode proposée par Crawford sera également programmée pour vérifier et comparer les résultats obtenus.

Au final, sur la base des critères de vulnérabilité définis et des facteurs de pondération qui leur seront assignés, l'indice de vulnérabilité sismique des routes pourra être calculé.

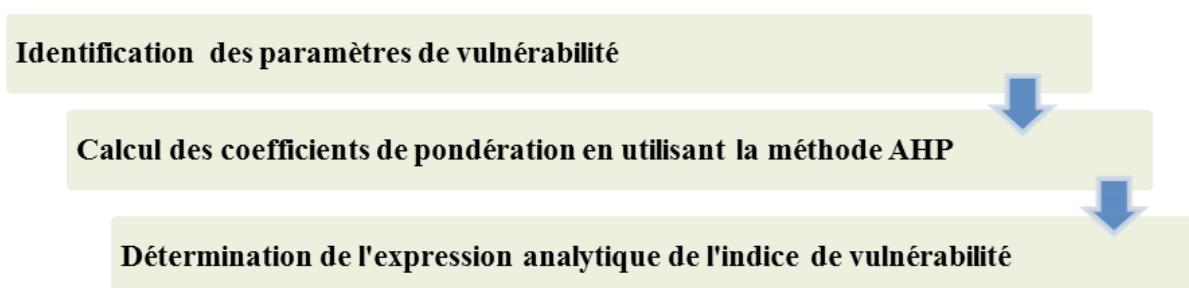
## CHAPITRE 3 : METHODE DE L'INDICE DE VULNERABILITE

### I. Introduction

Le retour d'expérience des séismes passés à travers le monde a permis de mettre en évidence les paramètres qui ont une influence effective sur la vulnérabilité sismique des routes. La méthode de l'indice de vulnérabilité a été choisie pour étudier cette vulnérabilité. Dans cette optique, l'analyse multicritère AHP a été utilisée pour hiérarchiser les différents paramètres. La vulnérabilité d'une route ou d'une section de route peut alors être ainsi estimée.

### II. Méthodologie

Dans l'objectif de déterminer un indice de vulnérabilité sismique d'une route (ou section de route) la méthodologie développée dans le cadre de cette étude comporte trois étapes principales représentées sur l'organigramme de la figure 3.1 :



**Figure 3.1 : Principales étapes de la méthode développée.**

Chacune de ces étapes est présentée dans ce qui suit.

### III. Identification des paramètres de vulnérabilité

Les observations post-sismiques, l'analyse des expertises, des rapports et des publications à travers le monde ont permis d'identifier plusieurs paramètres qui ont un impact sur la vulnérabilité des routes (EERI/CTC, 1980), (EERI, 1991), (CTTP, 1999), (Erdik, 2000), (Duran & Miyajima, 2001), (McDonough, 2001), (JICA, 2002), (CTTP, 2003), (FHWA, 2004), (Tung, 2004), (Ritter, 2004), (D'Andrea et al., 2005), (D'Andrea et al., 2006), (O'Connor et al., 2007), (Syner-G D3.7, 2009), (Anbazhagan et al., 2011), (Chouw et al., 2011), (Rosyidi et al., 2011) et (Tang, 2013).

### 3.1. Choix des paramètres

L'analyse des causes, des modes d'endommagement, des dommages occasionnés et leur sévérité a permis de déterminer les facteurs qui influencent la vulnérabilité des routes.

Les facteurs les plus fréquemment rencontrés sont :

- Aléa sismique
  - Intensité du séisme
  - Potentiel de liquéfaction
  - Intersection route-faille
- Conditions du sol
  - Nature de sol
  - Potentiel de glissement
- Remblai
  - Hauteur
  - Pente
  - Qualité du compactage
- Chaussée
  - Nombre de voies
  - Type de chaussée
- Conditions de maintenance
  - Etat de la chaussée
  - Dispositifs de protection des pentes

D'autres facteurs tels que : la qualité des travaux de réalisation, la qualité des matériaux, le facteur de sécurité (pour la stabilité des pentes), l'interaction avec d'autres structures, l'interaction avec les réseaux, la classification des routes, la réglementation et normes utilisées ont été cités par quelques auteurs, cependant ils n'ont pas été pris en compte car ils dépendent des facteurs que nous avons retenus ou ne sont pas directement liés à la vulnérabilité physique de la route.

Les facteurs identifiés ont été regroupé en deux catégories :

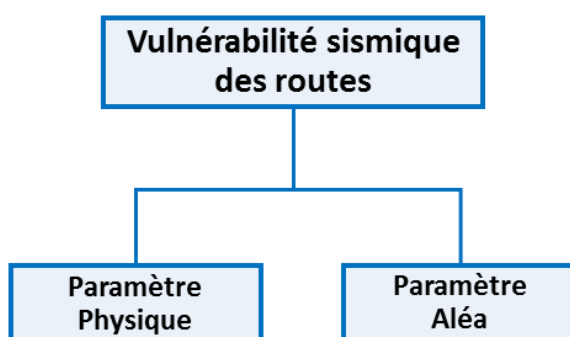
**Catégorie1** : regroupe les facteurs relatifs aux caractéristiques de la route notamment : nature du sol, potentiel de glissement, hauteur du remblai, pente de remblai, qualité du compactage des remblais, type de chaussée, nombre de voies, état de la chaussée et

dispositifs de protection des pentes. Ces facteurs influencent le comportement des différentes composantes de la route vis à vis du séisme. Cette catégorie sera intitulée '*Paramètre Physique*'.

- **Catégorie 2** : regroupe les facteurs relatifs à l'aléa sismique notamment : l'intensité du séisme, le potentiel de liquéfaction et l'intersection avec la faille. Ces facteurs quant à eux, influent sur la vulnérabilité sismique du site. Cette catégorie sera intitulée '*Paramètre Aléa*'

La vulnérabilité sismique des routes est donc influencée par deux paramètres :

1) Paramètre Physique et 2) Paramètre Aléa (Figure 3.2).



**Figure 3.2 : Types de paramètres.**

### **3.2. Caractéristiques des paramètres**

Chaque paramètre de la vulnérabilité sismiques 'Physique' et 'Aléa' a été défini et caractérisé par des facteurs. Ces derniers représentent les composantes ou propriétés intrinsèques des paramètres. Chaque facteur est subdivisé en attribut. Chaque attribut à son tour est caractérisé par des catégories. Les catégories représentent au final les différentes valeurs quantitatives ou qualitatives que peut avoir l'attribut de vulnérabilité défini.

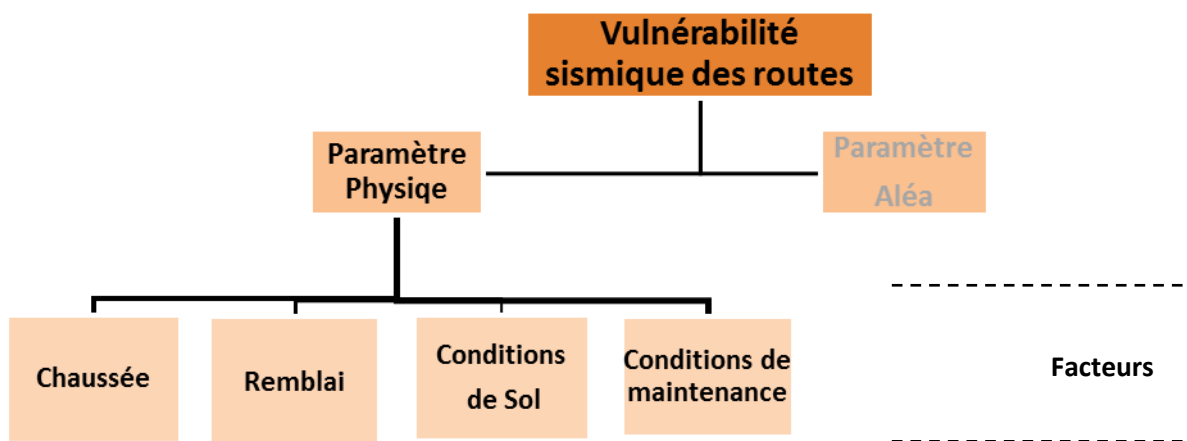
Cette structure hiérarchique sera la base de l'analyse multicritère AHP qui permettra de déterminer les coefficients de pondération des paramètres, des attributs et des facteurs de vulnérabilité qui ont un impact sur la performance des routes lors d'un événement sismique.

## **IV. Caractéristiques du '*Paramètre Physique*'**

Le '*Paramètre Physique*' est caractérisé par quatre facteurs de vulnérabilité. Trois (03) d'entre eux concernent les composantes structurales de la route. Il s'agit notamment de : la chaussée, le remblai et le sol support (FHWA, 2004), (Syner-G D3.7, 2009).

Le quatrième facteur quant à lui concerne le comportement mécanique de la route. Il a été défini par l'état de maintenance (ou d'entretien) de l'infrastructure (Tung, 2004).

Le 'Paramètre Physique' et ses facteurs sont schématisés dans la structure hiérarchique du problème d'évaluation de la vulnérabilité (Figure 3.3).



**Figure 3.3 : Facteurs du 'Paramètre Physique'.**

#### **4.1. Définition des facteurs de vulnérabilité**

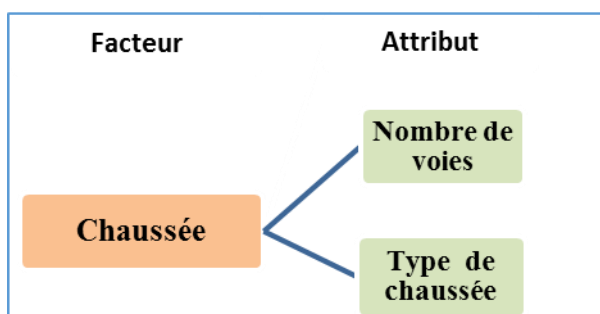
Les facteurs de vulnérabilité retenus pour le 'Paramètre Physique' sont définis dans les sous paragraphes suivants.

##### **4.1.1. Chaussée**

La chaussée est susceptible de subir des dégradations diverses, de gravité variée et dont les causes sont généralement multiples : défaillance du sol support ou du remblai, rupture de talus, glissements de terrains, vibrations sismiques, etc...(voir § 1). Ainsi, l'attribut 'Chaussée' concerne l'assise de chaussée qui désigne les couches situées au-dessus du sol support. Les assises de chaussée comprennent en général une couche de surface, une couche de base et une couche de fondation et parfois une couche de forme, le tout reposant sur un sol support. Dans la présente étude, le corps de chaussée est considéré comme un ensemble homogène. Les différentes couches ne seront pas considérées individuellement. Il n'est pas question d'étudier le comportement ou la performance des matériaux de chaque couche.

Ce facteur est caractérisé par deux (02) attributs importants qui contribuent à la vulnérabilité de ce facteur. Le premier inhérent à la géométrie est défini par le nombre

de voies (Syner-G D3.7, 2009), le second relatif à la nature du revêtement, est défini par le type de chaussée (FHWA, 2004) (Figure 3.4).



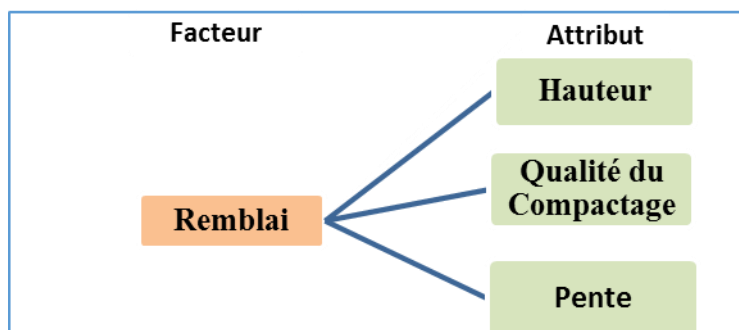
**Figure 3.4 : Caractéristiques du facteur ‘Chaussée’.**

L’attribut ‘Catégorie’ (ou classification) de la route considéré dans la méthode utilisée par la JICA (JICA, 2002) n’est pas pris en compte dans cette étude car il est directement lié au nombre de voies.

La définition des attributs de vulnérabilité de ce facteur est donnée au paragraphe 4.2.1.

#### **4.1.2. Remblai**

Le remblai constitue une composante essentielle de la route. Les dommages observés sur ce dernier sont d’autant plus importants que le mouvement sismique est fort et long. En outre, ces dommages dépendent également des caractéristiques du remblai qui influent sur sa performance sismique (FHWA, 2004). Le facteur remblai sera caractérisé par trois (03) attributs fondamentaux qui ont été retenus pour évaluer sa vulnérabilité : 1) la Hauteur du remblai , 2) la Qualité du compactage et 3) la Pente du remblai (FHWA, 2004), (D’Andrea et al., 2005), (D’Andrea et al., 2006), (Syner-G D3.7, 2009), (Rosyidi et al., 2011) (Figure 3.5).



**Figure 3.5 : Caractéristiques du facteur ‘Remblai’.**

D'autres attributs tels que la nature et la qualité des matériaux utilisés, l'état de maintenance, la qualité des travaux de réalisation, les propriétés du sol support ont été répertoriés (FHWA, 2004), (D'Andrea et al., 2005), (D'Andrea et al., 2006). Toutefois, dans le cadre de notre étude, certains attributs n'ont pas été retenus car ils sont difficilement caractérisables. A titre d'exemple, il est difficile d'apprécier la qualité des travaux de réalisation d'une route qui est en exploitation depuis plusieurs années.

Par contre, d'autres attributs, tel que la nature du sol et l'état de maintenance seront pris en compte dans la définition d'autres facteurs.

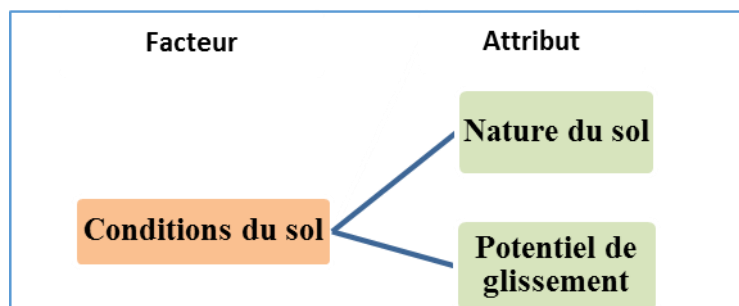
La définition des attributs de vulnérabilité de ce facteur est donnée au paragraphe 4.2.2.

#### 4.1.3. Conditions du Sol

Le sol support a une influence importante sur la stabilité et la résistance des composantes de la route. La défaillance du sol en raison de ses caractéristiques médiocres et/ou des manifestations géotechniques dues aux séismes est à l'origine de dégradations parfois spectaculaires par leur étendue et le changement du relief qu'elles peuvent occasionner. Il est donc essentiel de déterminer ses caractéristiques et la possibilité que se produise le phénomène de liquéfaction, des tassements différentiels par densification, des glissements de terrain ou encore une amplification des ondes sismiques (effets de site).

Pour prendre en compte les défaillances suscitées, ce facteur fondamental est caractérisé par deux attributs : 1) Nature du sol et 2) Potentiel de glissement (Wang & Zhang, 2013) (Figure 3.6).

L'attribut 'Tassements différentiels' n'est pas pris en compte car il est lié à la nature du sol ou au phénomène de liquéfaction. Par ailleurs, le potentiel de liquéfaction étant directement lié au mouvement sismique, il sera pris en compte par les facteurs relatifs au '*Paramètre Aléa*'.

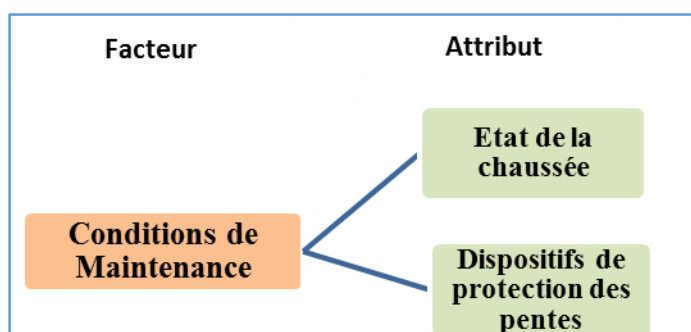


**Figure 3.6 : Caractéristiques du facteur '*Conditions du sol*'.**

La définition des attributs de vulnérabilité de ce facteur est donnée au paragraphe 4.2.3.

#### 4.1.4. Conditions de Maintenance

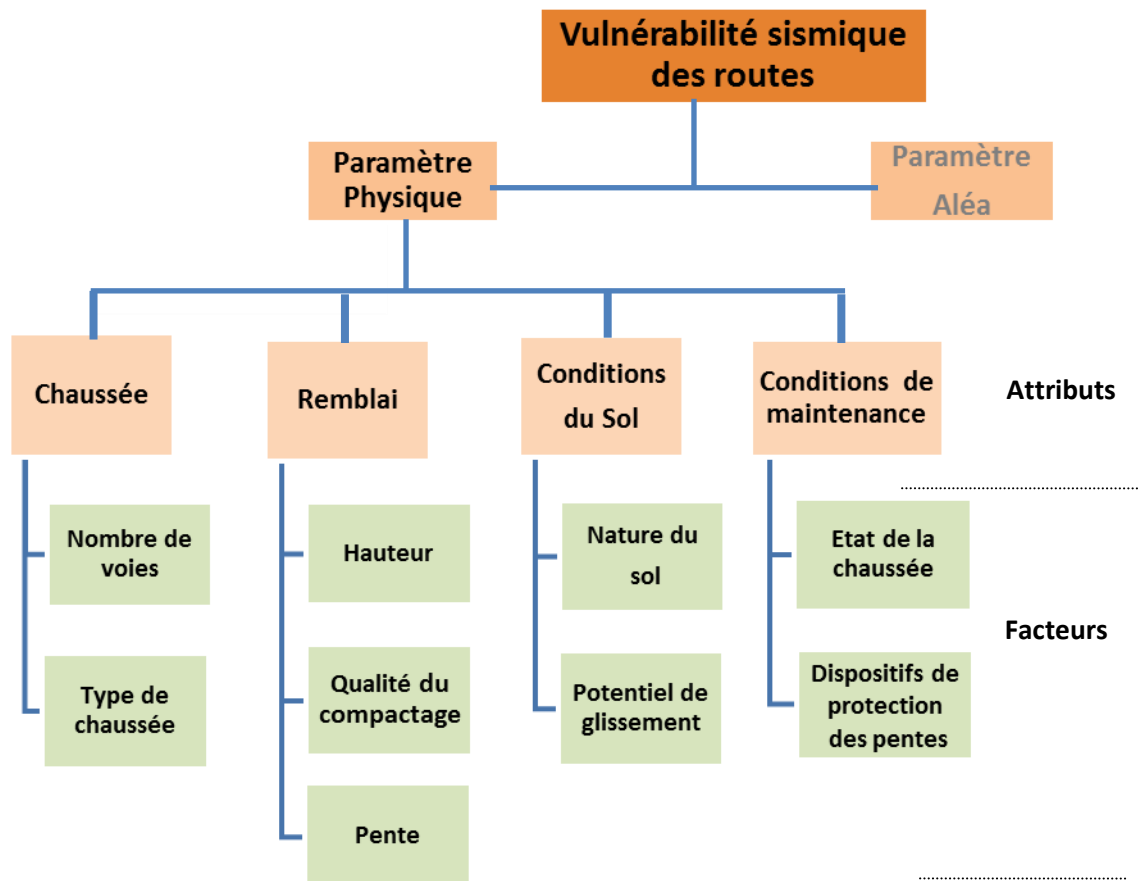
La performance de la route sous l'effet des contraintes d'exploitation ou des ondes sismiques évènementielles dépend directement de son état de maintenance. Les dégradations subies par la route durant son exploitation sont souvent accentuées ou aggravées lors de l'avènement d'un tremblement de terre (Tung, 2004). Le facteur '*Conditions de maintenance*' est généralement lié à l'état de la chaussée et à ses dépendances. Parmi les dépendances les dispositifs de protection des pentes revêtent une importance considérable. Par conséquent le facteur en question sera caractérisé par deux attributs de vulnérabilité : 1) Etat de la chaussée (Tung, 2004), (FHWA, 2004) et 2) Dispositifs de protection des pentes (Rosyidi et al., 2011) (Figure 3.7).



**Figure 3.7 : Caractéristiques du facteur '*Conditions de Maintenance*'.**

La définition des attributs de vulnérabilité de ce facteur est donnée au paragraphe 4.2.4.

Les différents attributs définis pour les facteurs de vulnérabilité précédemment cités sont récapitulés dans la figure 3.8 ci-dessous :



**Figure 3.8 : Attributs du ‘Paramètre Physique’.**

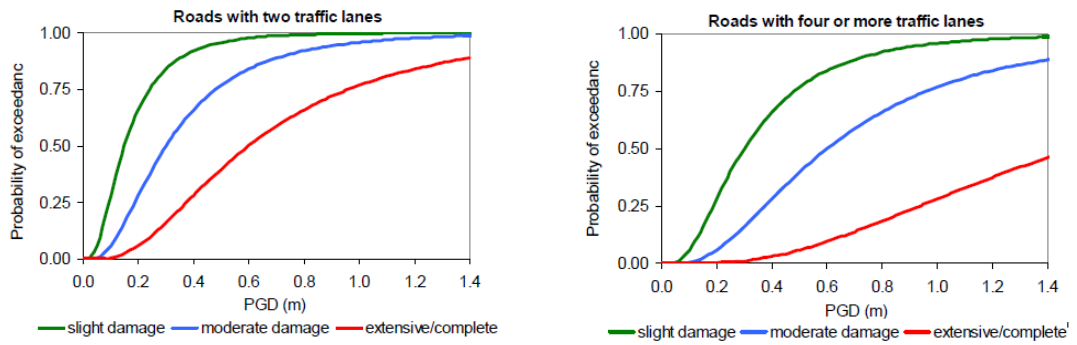
## 4.2. Définition des attributs

Afin de bien montrer l’influence sur la vulnérabilité des routes des différents attributs identifiés, nous allons définir chacun d’eux.

### 4.2.1. Nombre de voies

Les routes à une voie ou deux voies sont souvent plus susceptibles à l’endommagement en raison de la défaillance du sol que celle à plusieurs voies (Syner-G D3.7, 2009).

En effet, les courbes de fragilité développées par HAZUS (FEMA-NIBS, 2004) pour les routes à 2 voies ou 4 voies et plus, ont été validées par les observations post sismiques des dommages occasionnés aux routes (Figure 3.9).



**Figure 3.9 : Courbes de fragilité des chaussées sujettes à la défaillance du sol (Syner-G D3.7, 2009).**

La figure ci-dessus montre que la probabilité d'excéder une déformation permanente (PGD) est toujours plus importante pour une route à deux voies quel que soit le niveau d'intensité

Par ailleurs, la figure 3.10 illustre l'intérêt d'avoir des chaussées à plusieurs voies. La vulnérabilité physique est moins importante. La route est partiellement fonctionnelle et les secours peuvent être acheminés malgré les dommages occasionnés.



**Figure 3.10 : Endommagement d'une chaussée à plusieurs voies Pan Américain Highway (Perou) (O'Connor et al., 2007).**

Cet attribut est par conséquent divisé en deux catégories compte tenu des remarques précédentes.

- Catégorie 1 : Nombre de voies  $> 2$
- Catégorie 2 : Nombre de voies  $\leq 2$

Tung (Tung, 2004) a proposé de considérer l'attribut de vulnérabilité 'Largeur de voie' car la vulnérabilité sismique d'une route est d'autant plus importante que la chaussée est étroite surtout en site urbain.

Cette proposition n'a pas été prise en compte car la largeur des routes est directement liée au nombre de voies.

#### 4.2.2. Type de chaussée

Les chaussées peuvent être classées en 4 catégories principales :

- Chaussées souples.
- Chaussées rigides.
- Chaussées semi-rigides.
- Chaussées non revêtues.

Les chaussées non revêtues sont très susceptibles aux déformations dues aux contraintes d'exploitation. Elles sont généralement plus vulnérables aux déformations engendrées par les mouvements sismiques que les chaussées revêtues (Duran & Miyajima, 2001),(Tung, 2004).

Quant aux chaussées revêtues, elles peuvent être sévèrement endommagées ou au contraire ne subir aucun dommage. Leur comportement dépend de l'intensité du séisme et de la nature du sol (FHWA, 2004). Lors de mouvements sismiques faibles, les chaussées souples sont suffisamment ductiles pour absorber les contraintes et les chaussées rigides peuvent être endommagées par endroit mais la structure générale de la chaussée est maintenue. Par contre, lors de mouvements sismiques forts, les deux types de chaussées peuvent être endommagés et peuvent nécessiter des réparations conséquentes (FHWA, 2004).

Ainsi, sur la base du comportement des chaussées vis-à-vis du séisme, cet attribut est divisé en deux catégories principales :

- Catégorie 1 : Route revêtue
- Catégorie 2 : Route non revêtue

Dans le tableau 3.1 ci-dessous, nous récapitulons le facteur '**Chaussée**' avec ses deux attributs leurs catégories respectives.

Facteur	Attribut	Catégorie
Chaussée	Nombre de voies	> 2 voies
		≤ 2 voies
	Type de chaussée	Revêtue
		Non revêtue

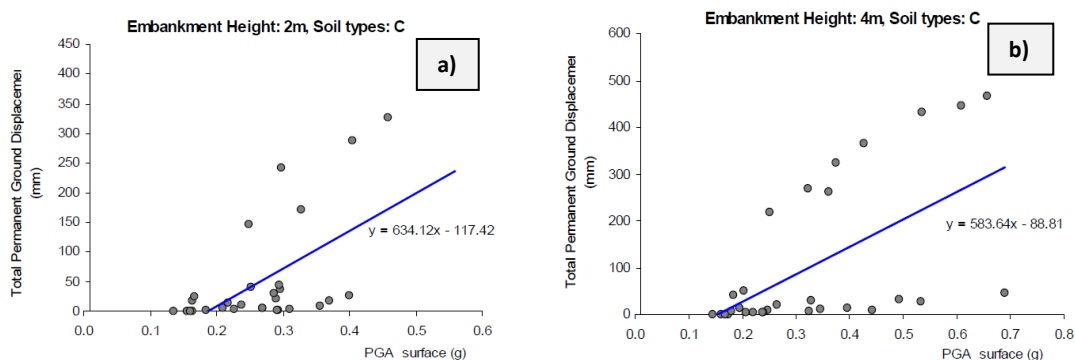
**Tableau 3.1 : Attributs et catégories du facteur 'Chaussée'.**

#### 4.2.3. Hauteur

La performance du remblai vis-à-vis du séisme dépend de sa hauteur : plus la hauteur du remblai est élevée plus il est vulnérable et susceptible d'être endommagé par le mouvement sismique (FHWA, 2004), (D'Andrea et al., 2006), (Syner-G D3.7, 2009), (Zhang et al., 2011). Ceci s'explique par l'amplification du

mouvement sismique en raison de l'augmentation de la hauteur (Zhang et al., 2011).

La figure 3.11 illustre l'évolution des dommages d'un remblai en fonction de la hauteur pour un même type de sol. On constate que pour un PGA donné, le déplacement permanent PGD est plus important dans le cas du remblai de 4m.



**Figure 3.11 : Influence de la hauteur de remblai sur l'évolution des dommages (Syner-G D3.7, 2009).**

**a) Hauteur =2m**

**b) Hauteur =4m**

La hauteur de remblai a été subdivisée en quatre (04) catégories représentées dans le Tableau 3.2.

Attribut	Catégorie
Hauteur	$H \leq 2 \text{ m}$
	$2\text{m} < H \leq 5\text{m}$
	$5\text{m} < H \leq 8\text{m}$
	$H > 8\text{m}$

**Tableau 3.2 : Catégories de l'attribut 'Hauteur'.**

#### 4.2.4. Qualité du Compactage

La mauvaise qualité du compactage des matériaux d'un remblai contribue considérablement à sa vulnérabilité au séisme. En effet, le mouvement sismique fort et long provoque généralement le compactage ou la densification des matériaux pulvérulents des remblais qui ont été mal compactés lors de leur mise en œuvre (Duran & Miyajima, 2001), (FHWA, 2004), (D'Andrea et al., 2006), (Syner-G D3.7, 2009).

Cet attribut ne peut pas être caractérisé par la nature des matériaux en place car il est impensable de réaliser des essais longs et onéreux pour le diagnostic d'un réseau en vue d'en évaluer la vulnérabilité sismique. De ce fait, pour apprécier la qualité du compactage du remblai, nous nous référons aux dispositions réglementaires en vigueur utilisées lors de sa mise en œuvre.

L'attribut 'Qualité du compactage' a été donc subdivisée en trois (03) catégories selon les dispositions réglementaires. Elles sont représentées dans le Tableau 3.3.

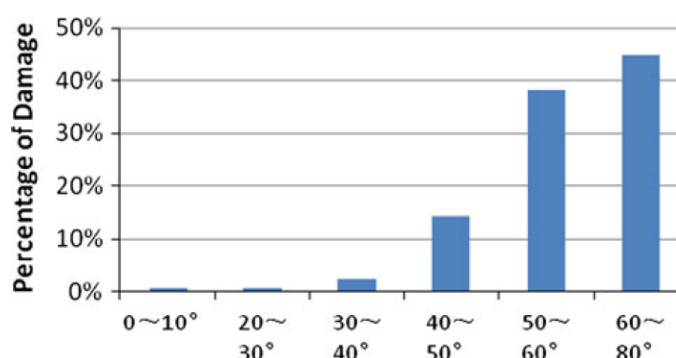
Attribut	Catégorie
Qualité du compactage	Conforme aux normes
	Conforme aux dispositions techniques
	Autres (non répertoriées)

**Tableau 3.3 : Catégories de l'attribut 'Qualité du compactage'.**

#### 4.2.5. Pente

Un angle de pente appropriée contribue à la stabilité du remblai : la pente 2/3 habituellement utilisée est un bon compromis entre la taille et la stabilité du remblai. Il est évident que plus l'inclinaison de la pente est importante (pente raide) plus la stabilité diminue et par conséquent plus la vulnérabilité sismique augmente (D'Andrea et al., 2006).

La figure 3.12 illustre clairement l'influence de la pente sur la vulnérabilité sismique d'un remblai.



**Figure 3.12 : Relation entre le pourcentage de dommages des pentes et l'angle d'inclinaison (Zhang et al., 2011).**

La figure ci-dessus montre que si l'angle d'inclinaison est supérieur à 30°, le pourcentage des dommages augmente rapidement. En outre, si la pente devient trop raide (>50°) le pourcentage des dommages est important de l'ordre de 40%.

L'attribut 'Pente' est subdivisé en trois (03) catégories de valeurs de pente significatives et régulièrement utilisées pour les talus. Ces catégories sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Attribut	Catégorie
Pente	< 2/3
	= 2/3
	> 2/3

**Tableau 3.4 : Catégories de l'attribut 'Pente'.**

Dans le tableau 3.5, nous avons récapitulé le facteur ‘Remblai’ avec ses attributs ainsi que leurs catégories respectives.

Facteur	Attribut	Catégorie
Remblai	Hauteur	$H \leq 2 \text{ m}$
		$2\text{m} < H \leq 5\text{m}$
		$5\text{m} < H \leq 8\text{m}$
		$H > 8\text{m}$
	Qualité du compactage	Conformes aux normes
		Conformes aux dispositions techniques
		Autres (non répertoriées)
	Pente	$< 2/3$
		$= 2/3$
		$> 2/3$

**Tableau 3.5 : Attributs et catégories du facteur ‘Remblai’.**

#### 4.2.6. Nature du Sol

La nature des sols a une influence sur la distribution et la sévérité des dommages occasionnés par un séisme. En effet, les caractéristiques médiocres du sol support peuvent engendrer des tassements différentiels importants lors d'évènements sismiques. De plus, les ondes sismiques ne se propagent pas à la même vitesse selon le milieu traversé. Elles n'ont donc pas la même fréquence selon le milieu. C'est ce que l'on appelle ‘les effets de site’.

La réglementation algérienne prévoit la prise en compte des effets de site en caractérisant la réponse du site en fonction de la catégorie de sol selon la classification établie dans le RPA 99 (version 2003). Le Tableau 3.6 résume cette classification.

Catégorie	Description	$q_c$ (MPa) (e)	N (d)	PI (MPa) (e)	$E_p$ (MPa) (e)	$q_u$ (MPa) (f)	$V_s$ (m/s) (g)
S <sub>1</sub>	Rocheux (a)	-	-	>5	>100	>10	≥800
S <sub>2</sub>	Ferme	>15	>50	>2	>20	>0.4	≥400 - <800
S <sub>3</sub>	Meuble	1.5 ~ 15	10 ~ 50	1 ~ 2	5 ~ 20	0.1 ~ 0.4	≥200 - <400
S <sub>4</sub>	Très Meuble ou Présence de 3m au moins d'argile molle (b)	<1.5	<10	<1	<5	<0.1	≥100 <200

**Tableau 3.6 : Classification du sol selon le RPA 99 (RPA-99, 2003).**

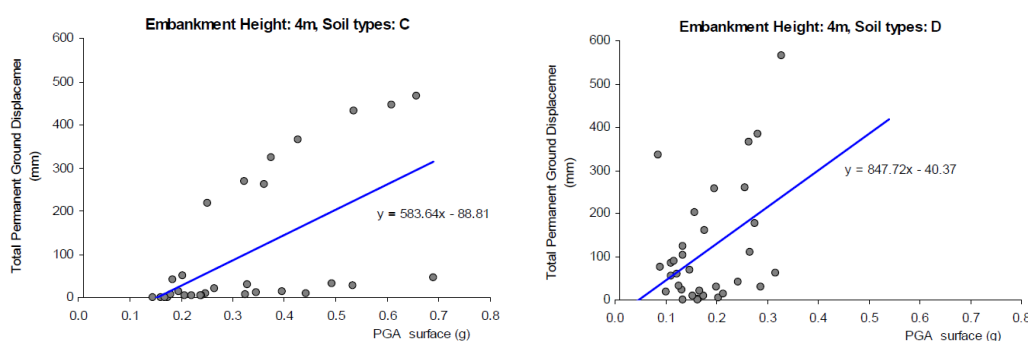
Sur la base de cette classification, l'attribut 'Nature du sol' a été subdivisé en quatre (04) catégories de sol tel que repris dans le tableau 3.7.

Attribut	Catégorie
Nature du sol	Rocher (S <sub>1</sub> )
	Sol ferme (S <sub>2</sub> )
	Sol meuble (S <sub>3</sub> )
	Sol très meuble (S <sub>4</sub> )

**Tableau 3.7 : Catégories de l'attribut 'Nature de sol'.**

Pour illustrer l'influence de la nature du sol sur les dommages, nous avons présenté dans la figure 3.13, le cas d'un remblai de 4m sous sollicitation sismique. Les valeurs présentées ont été obtenues lors de l'élaboration de courbes de fragilités numériques pour les remblais. Dans le cadre de l'étude en question deux types de sol selon la classification de l'Eurocode (Eurocode 7, 1996) ont été considérés :

- le sol de type C (Dépôts de graviers et sables normalement consolidés  $V_{s,30} = 300\sim 500\text{m/s}$ ) qui correspond à un sol S<sub>3</sub> selon le RPA-99 (version 2003).
- et un sol de type D (Dépôts de sables fins, de silts et d'argiles non consolidés  $V_{s,30} = 150\sim 300\text{m/s}$ ) qui correspond à un sol S<sub>4</sub> selon le RPA-99 (version 2003) (Syner-G D3.7, 2009).



**Figure 3.13 : Influence de la nature du sol sur les dommages du remblai (Syner-G D3.7, 2009).**

On constate que les déformations permanentes (PGD) sont plus importantes dans le cas du sol de nature D (S<sub>4</sub>) dont les caractéristiques sont plus médiocres et pour lequel le mouvement sismique est amplifié.

#### 4.2.7. Potentiel de Glissement

Les routes sont souvent sujettes à des mouvements de terrains très variés, par leur nature (glissements de terrains, éboulements rocheux, coulées de boues, effondrements de vides souterrains, affaissements, gonflement ou retrait des sols, etc.) et par leur intensité ou effets ou ampleur.

Dans le cas des routes construites en déblai, l'observation des instabilités de pente survenues lors des grands séismes montre que ces mouvements de terrain peuvent être classés en deux groupes :

- les instabilités de type classique qui concernent les pentes réputées instables, pour lesquelles le séisme joue un simple rôle de « déclencheur », analogue à une pluie exceptionnelle ;
- les instabilités spécifiques de l'action sismique, sur des sites considérés comme stables en régime statique (Bard et al., 1987), (FHWA, 2004).

Parmi les mouvements de terrains susmentionnés, on s'est intéressé au potentiel de glissements des pentes.

L'étude de stabilité des pentes est réalisée en régime statique. Le calcul de la stabilité en dynamique n'est pas pris en compte car on considère que l'action sismique ne représente qu'un facteur d'augmentation de l'aléa 'Glissement'. De plus, dans la structure hiérarchique préalablement établie, l'aléa sismique a été défini comme paramètre exogène au facteur 'Conditions de sol'. L'effet du séisme est donc déjà pris en compte par ailleurs.

Rappelons que le principe de calcul de la stabilité des pentes consiste à déterminer un facteur de sécurité  $F_s$ . Ce facteur peut être calculé par différentes méthodes ou à l'aide de différents logiciels.

Ainsi, le potentiel de glissement est déterminé à partir du facteur de sécurité  $F_s$ . Les valeurs de ce facteur sont généralement classées en 3 niveaux : 1) faible, 2) modéré et 3) élevé (Chowdhury, 2000).

L'expérience a montré, que sauf erreur grossière sur les hypothèses de calcul :

- les talus restent stables si  $F_s > 1.4$
- le glissement est pratiquement inévitable si  $F_s < 1$  (Phillipponnat & Hubert, 2005)

Entre ces deux valeurs s'étend un domaine où il existe un risque de rupture, risque d'autant plus grand que  $F_s$  diminue.

Ainsi nous pouvons considérer qu'à :

- la catégorie (1) (potentiel faible) correspond un  $F_s > 1.4$
- la catégorie (3) (potentiel élevé) correspond un facteur  $1 < F_s < 1.25$
- la catégorie (2) (potentiel modéré) correspond les valeurs intermédiaires c.à.d.  $1.25 \leq F_s \leq 1.4$  (Ritter, 2004).

Le tableau 3.8 récapitule les différentes catégories pour l'attribut 'Potentiel de glissement'.

Attribut	Catégorie
Potentiel de glissement	Faible
	Modéré
	Elevé

**Tableau 3.8 : Catégories de l'attribut 'Potentiel de Glissement'.**

#### 4.2.8. Etat de la Chaussée

L'état de la chaussée peut contribuer à la vulnérabilité de la route de façon significative. Lors d'un événement sismique, les dégradations dues à l'exploitation et au mauvais entretien des chaussées peuvent les aggraver induisant ainsi la fermeture des routes ou la réduction de leur fonctionnalité et par conséquent la nécessité de les réparer.

Cet attribut sera donc directement lié aux dégradations observées lors d'un diagnostic de l'état de la chaussée du réseau routier. Le diagnostic consiste à relever visuellement ou par instrumentation les dégradations de la chaussée et de préconiser les travaux de renforcements adéquats (CTTP, 1992).

Sur la base des dégradations répertoriées, l'état de la chaussée peut se décliner en trois catégories : 1) Bon état, 2) Etat moyen et 3) Etat médiocre (Tableau 3.9).

Ces trois états correspondent respectivement aux travaux de renforcement : légers, moyens et lourds (à très lourds) préconisés généralement suite à la réalisation de l'étude de renforcement (CTTP, 1992).

Néanmoins, il est fort probable qu'au moment de l'évaluation de la vulnérabilité du réseau, l'étude de renforcement ne soit pas disponible ou soit dépassée (datant de plus de 2ans). Dans ce cas, un diagnostic des dégradations visuelles pourra être effectué afin d'apprécier l'état de la chaussée.

Attribut	Catégorie
Etat de la chaussée	Bon
	Moyen
	Médiocre

**Tableau 3.9 : Catégories de l'attribut 'Etat de la chaussée'.**

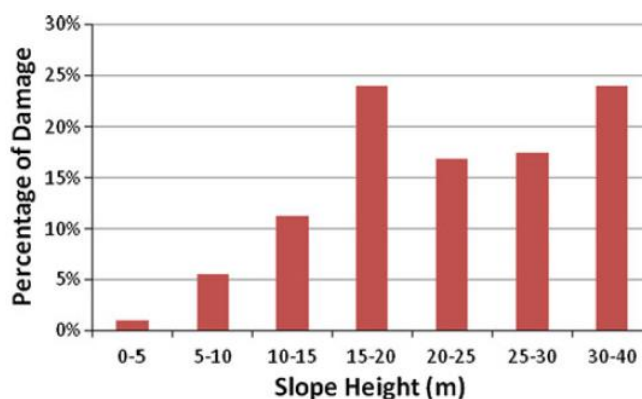
#### 4.2.9. Dispositifs de protection des pentes

Dans le cas des talus de remblais ou des pentes naturelles, la réalisation adéquate des pentes, la mise en place de dispositifs de protection ainsi que la maintenance des talus en général, sont tous des facteurs qui ont une influence sur la vulnérabilité des routes.

Ainsi, la maintenance des réseaux routiers en exploitation impose de préserver et réparer si nécessaire tous les dispositifs de protection des talus lorsqu'ils existent et d'en prévoir dans le cadre des études de renforcement sur les tronçons routiers diagnostiqués à risque d'instabilité de talus (CTTP, 1992).

Cette nécessité est d'autant plus importante en zone sismique, car il a été constaté que lors d'un séisme les pentes avec des dispositifs de protection résistent mieux (D'Andrea et al., 2006), (Zhang et al., 2011).

La figure 3.14 illustre que le déplacement permanent du sol (PGD) augmente avec la hauteur des pentes de la même manière que pour les remblais (§ 5.1.2.). Néanmoins, nous constatons que pour les pentes dont la hauteur varie entre 15 et 20m, le pourcentage des déformations est plus important que dans le cas des pentes plus élevés. Dans le cadre de leur étude Zhang et al. (Zhang et al., 2011) expliquent cette augmentation par l'absence de dispositifs de protection des pentes.



**Figure 3.14 : Relation entre le pourcentage de dommages et la hauteur de la pente (Zhang et al., 2011).**

Par ailleurs, il est évident, que certains dispositifs sont plus performants que d'autres en raison essentiellement de leur conception, de la qualité des travaux de réalisation et de leur entretien général (Zhang et al., 2011).

De ce fait, l'efficacité et la performance des dispositifs de protection des pentes lors d'une catastrophe sismique peut être jugée en se référant aux dispositions

réglementaires en vigueur utilisées lors de leur réalisation. Les dispositifs réalisés avec des normes rigoureuses avec éventuellement un calcul sismique seront plus fiables et risquent moins d'endommagement que les dispositifs de protection réalisés suivant des dispositions techniques générales (D'Andrea et al., 2006), (Zhang et al., 2011).

En définitive, l'attribut 'Dispositifs de protection des pentes' sera subdivisé en trois catégories relatives aux dispositions réglementaires (Tableau 3.10).

Attribut	Catégories
Dispositifs de protection des pentes	Conformes aux normes
	Conformes aux dispositions techniques
	Sans dispositifs de protection

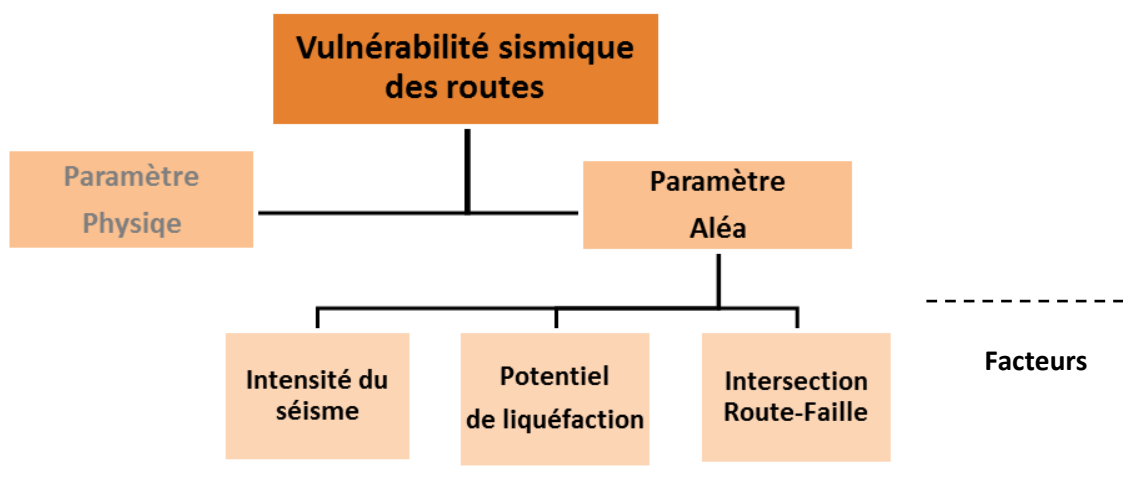
**Tableau 3.10 : Catégories de l'attribut 'Dispositifs de protection des pentes'.**

### V. Caractéristiques du 'Paramètre Aléa'

Le 'Paramètre Aléa' est caractérisé par trois facteurs de vulnérabilité. Les trois facteurs concernent les propriétés sismiques de la zone de localisation de la route.

Ce paramètre est caractérisé par : 1) l'intensité du séisme, 2) le potentiel de liquéfaction et 3) l'intersection route-faille (FEMA-NIBS, 2004), (FHWA, 2004), (Panahi et al., 2013), (Wang & Zhang, 2013) comme indiqué auparavant .

Le 'Paramètre Aléa' et ses facteurs sont représentés dans la structure hiérarchique du problème d'évaluation de la vulnérabilité sur la Figure 3.15.



**Figure 3.15 : Facteurs du 'Paramètre Aléa'.**

La définition et la caractérisation des trois facteurs de vulnérabilité suscités sont données dans les paragraphes qui suivent.

### 5.1. Définition du facteur ‘Intensité’

L’intensité est une grandeur qui permet de caractériser le séisme. Elle mesure l’effet du séisme en surface et se fonde sur l’observation des effets et des conséquences d’un séisme à un endroit donné

Il est vrai que l’intensité est basée sur des données qualitatives et des témoignages souvent entachés de subjectivité ; cependant, ce sont ces témoignages représentant la mémoire des hommes qui sont les seuls disponibles sur de longues périodes de temps et servent encore très souvent pour les régions n’ayant pas d’instruments. Pour déterminer les probabilités d’occurrence des événements sismiques, c’est donc naturellement l’intensité qui est utilisée.

L’Echelle Mercalli Modifiée (MMI) a été retenue pour caractériser ce facteur. Ce dernier a été subdivisé en cinq catégories (Tableau 3.11).

Rappelons qu’il existe des correspondances entre les différentes échelles d’intensité existantes (MSK, EMS98, JMA...) et des relations entre la MMI et l’accélération au sol  $a_g$  et des relations empiriques entre l’intensité MMI et les pics d’amplitude (Peak Ground Motion :PGA, PGV ou PGD) (Lesueur, 2011). Il sera donc aisé de passer à une autre échelle ou de caractériser le mouvement sismique par une autre grandeur.

Facteur	Catégories
Intensité du séisme	MMI < VIII
	VIII $\leq$ MMI < IX
	IX $\leq$ MMI < X
	X $\leq$ MMI < XI
	XI $\leq$ MMI

**Tableau 3.11 : Catégories du facteur ‘Intensité du séisme’.**

### 5.2. Définition du facteur ‘Potentiel de liquéfaction’

La liquéfaction des sols a souvent été la cause majeure de la déformation du sol support, des remblais et des chaussées.

La liquéfaction est un phénomène qui fait perdre à certains sols saturés une part significative de leur résistance au cisaillement par initiation ou accumulation d’un excès de pression interstitielle lors d’une sollicitation sismique (BRGM, 2000).

Le potentiel de liquéfaction des sols dépend de la compacité du sol à son état initial, de la perméabilité et de la composition des sols. Les sols les plus vulnérables à la liquéfaction sont les sables et silts saturés lâches à très lâches et faiblement compacts, de granulométrie serrée. Par ailleurs, certains types de sol argileux sont vulnérables à la liquéfaction.

Il existe plusieurs méthodes pour évaluer le potentiel de liquéfaction. Dans le cadre de notre étude nous avons opté pour la méthode de l'indice du potentiel de liquéfaction développée par Iwasaki (1978) (Arakawa et al., 1982) et pour laquelle un programme de calcul a été développé par Bahi (Bahi, 2013) sous Delphi et qu'il nous sera possible d'utiliser pour estimer le potentiel de liquéfaction.

Iwasaki a estimé l'indice du potentiel de liquéfaction sur la base des essais in-situ (SPT). Il considère que le potentiel de liquéfaction est très élevé pour les sites présentant des valeurs de l'indice PL supérieure à 15 et il est relativement bas si l'indice PL est inférieur à 5. Il a défini quatre classes :

Potentiel nul (absence de liquéfaction) :	$PL = 0$
Potentiel relativement bas :	$0 < PL \leq 5$
Potentiel relativement élevé :	$5 < PL \leq 15$
Potentiel très élevé (liquéfaction sévère) :	$15 < PL$

Sur la base de ces résultats, le facteur Potentiel de liquéfaction sera caractérisé par les trois catégories présentées dans le tableau 3.12.

Facteur	Catégories
Potentiel de Liquéfaction	$0 \leq PL \leq 5$ (nul ou faible)
	$5 < PL \leq 15$ (élevé)
	$15 < PL$ (sévére)

**Tableau 3.12 : Catégories du facteur 'Potentiel de Liquéfaction'.**

### 5.3. Définition du facteur 'Intersection Route-Faille'

La présence d'une faille active peut causer d'importants dégâts. La rupture sur le plan de faille ayant engendré le séisme peut se propager du foyer à la surface et ainsi causer d'importants déplacements et déformations. Par conséquent certaines routes peuvent être considérablement endommagées par la rupture de la faille à la surface. En effet, il n'est pas rare que certaines routes soient construites en travers de failles souvent non répertoriées. Toutefois, même dans le cas des failles répertoriées il n'est pas toujours possible de les éviter tout le long du tracé souvent

en raison des difficultés rencontrées sur site ou de l'existence d'ouvrages ou constructions qui généralement conditionnent le tracé.

Ce facteur a donc été caractérisé par deux catégories relatives l'une à l'existence d'intersection avec la faille, la seconde à la non existence de cette intersection (Tableau 3.13).

Facteur	Catégories
Intersection route-faille	Pas d'intersection
	Intersection

**Tableau 3.13 : Catégories du facteur 'Intersection route-faille'.**

Les failles actives doivent être identifiées et délimitées grâce aux données d'études antérieures si elles existent dans la région d'évaluation. A défaut, une reconnaissance sur le terrain peut être nécessaire pour recueillir les informations sur les caractéristiques géologiques et géomorphologiques. Une analyse de photographies aériennes et d'autres images de télédétection incorporant le tracé de la route peut fournir des informations supplémentaires sur la localisation et l'existence d'un risque potentiel de rupture de faille.

## **VI. Calcul des coefficients de pondérations (AHP)**

Les paramètres, les facteurs et les attributs de vulnérabilité définis et expliqués dans les paragraphes précédents sont récapitulés dans le tableau suivant (Tableau 3.14).

Paramètre	Facteur	Attribut	Catégorie
Physique	Chaussée	Nombre de voies	> 2 voies
			≤ 2 voies
		Type de chaussée	Revêtue
			Non revêtue
	Remblai	Hauteur	$H \leq 2\text{ m}$
			$2\text{ m} < H \leq 5\text{ m}$
			$5\text{ m} < H \leq 8\text{ m}$
			$H > 8\text{ m}$
		Qualité du compactage	Conforme aux normes
			Conforme aux dispositions techniques
			Autres (non répertoriées)
		Pente	$< 2/3$
	$= 2/3$		
	$> 2/3$		
	Conditions du Sol	Nature de sol	Rocher
			Sol ferme
			Sol meuble
			Sol très meuble
		Potentiel de glissement	Faible
			Modéré
Conditions de Maintenance	Etat de la chaussée	Bon	
		Moyen	
		Médiocre	
	Dispositifs de protection des pentes	Conformes aux normes	
		Conformes aux dispositions techniques	
		Sans dispositifs de protection	
		MMI < VIII	
		VIII ≤ MMI < IX	
Aléa	Intensité du séisme	IX ≤ MMI < X	
		X ≤ MMI < XI	
		XI ≤ MMI	
		Potentiel de Liquéfaction	$0 \leq PL \leq 5$
			$5 < PL \leq 15$
	$15 < PL$		
	Intersection route-faïlle	Pas d'intersection	
Intersection			

**Tableau 3.14 : Récapitulation de la hiérarchisation des paramètres.**

Sur la base de cette hiérarchisation, la méthode AHP sera utilisée pour déterminer les coefficients de pondération (ou poids) pour les paramètres, les facteurs et les attributs. Quant aux catégories, un score sera affecté à chacune d'elle.

La méthodologie adoptée pour déterminer les poids respectifs comporte deux étapes principales qui peuvent être résumées en :

- 1- la construction des matrices de comparaison (par niveau) : les matrices de comparaison binaire seront construites sur la base de l'exploitation et l'analyse des données utilisées pour la détermination des paramètres de vulnérabilité.
- 2- le calcul des vecteurs Poids : vu que nous ne disposons pas du logiciel ExpertChoice dédié à la méthode AHP, nous avons élaboré deux programmes sous MATLAB pour le calcul des coefficients de pondération. Le premier programme 'VSAT' (Vecteurs de Saaty) basé sur la méthode de Saaty permet de calculer les vecteurs propres (vecteurs Poids) en utilisant en entrée les matrices de comparaison. Il permet en seconde étape de vérifier la cohérence par le calcul du ratio de cohérence RC de Saaty (Saaty, 1980). Une vérification des résultats sera réalisée avec un second programme. Le programme 'VCEW' (Vecteurs de Crawford et Williams) basé sur la méthode de Williams et Crawford (Aguarón, Juan & Moreno-Jiménez, José Maria, 2003) utilise les mêmes matrices en entrée et permet de calculer les vecteurs Poids et de vérifier en seconde étape la cohérence par le calcul de l'Indice de Cohérence Géométrique ICG (§ 2).

L'étape qui consiste à construire les matrices de comparaison binaire pour chaque niveau de la hiérarchie a été effectuée sur la base de l'analyse de toutes les données exploitées pour la définition des paramètres pertinents de vulnérabilité. Une analyse statistique n'a pas pu être réalisée en raison de l'insuffisance de données représentatives. L'utilisation de la méthode AHP permet justement de contourner ce problème en permettant de faire un classement hiérarchique par niveau et de pouvoir comparer des paramètres de différente nature. Ainsi, dans un premier temps, des matrices ont été construites sur la base de l'analyse des données puis soumises au jugement d'ingénieurs du CTTT (du Département Tracé et du Département Entretien Routier) et d'ingénieurs gestionnaires de la DTP de Boumerdes, du Ministère des Travaux Publics et du secteur privé. Par la suite, des ajustements et des corrections par rapport à la cohérence des jugements ont été apportés et les matrices définitives ont été construites.

Cette démarche comporte une part de subjectivité car elle est basée sur le jugement personnel d'ingénieurs. Toutefois cette subjectivité est réduite par le fait de croiser les jugements sur la base évidemment de cas réels retrouvés dans les observations

post-sismiques. De plus, la vérification de la cohérence permet de réduire cette subjectivité (§ 2). C'est pour cette raison que nous avons décidé de faire une vérification supplémentaire par la méthode de Crawford et Williams en calculant l'indice ICG.

Dans les paragraphes qui suivent, nous présentons les matrices construites pour chaque niveau, les résultats du calcul des vecteurs Poids et les résultats de la vérification de la cohérence obtenus par les deux programmes.

### 6.1. Coefficients de pondération des Paramètres (Niveau 1)

La comparaison binaire se fait entre les deux paramètres fondamentaux de vulnérabilité : 'Paramètre Physique' et 'Paramètre Aléa'.

L'Aléa sismique contribue de manière significative à la vulnérabilité sismique des routes comparativement au Paramètre Physique. Toutefois les dommages dépendent de l'intensité qui est très variable dans le temps et dans l'espace. La matrice de comparaison binaire construite et le vecteur Poids calculé sont donnés dans le tableau 3.15. Les vecteurs Poids obtenus par les deux programmes VSAT (Vecteurs de SAATY) et VCEW (Vecteurs de Crawford Et Williams) sont égaux.

	Paramètre Physique	Paramètre Aléa	Poids Saaty/Crawford
Paramètre Physique	1	1/3	<b>0.25</b>
Paramètre Aléa	3	1	<b>0.75</b>

**Tableau 3.15 : Matrice et Vecteurs Poids des 'Paramètres'.**

Le poids de l'aléa sismique est  $w=0.75$  est supérieur à celui du Paramètre Physique ( $w=0.25$ ). Ceci est clairement vérifié, il n'y a vulnérabilité sismique que s'il y a Aléa sismique

### 6.2. Coefficients de pondération des facteurs (Niveau 2)

Pour le 'Paramètre Physique', les facteurs de vulnérabilité à savoir : la chaussée, le remblai, les conditions du sol et les conditions de maintenance, sont comparés entre eux deux à deux pour construire la matrice. Nous obtenons la matrice et les vecteurs Poids suivants (Tableau 3.16) :

	Chaussée	Remblai	Conditions du sol	Conditions de Maintenance	Méthode de Saaty		Méthode de Crawford	
					Poids	RC	Poids	ICG
Chaussée	1	1/4	1/5	3	0.108	0.0472	0.104	0.1657
Remblai	4	1	1/3	6	0.283		0.281	
Conditions du sol	5	3	1	9	0.561		0.569	
Conditions de Maintenance	1/3	1/6	1/9	1	0.048		0.047	

**Tableau 3.16 : Matrice et Vecteurs Poids des 'Facteurs' du Paramètre Physique.**

Les valeurs des vecteurs Poids obtenus par les deux méthodes sont très proches avec un écart type de 0.18%. Ce qui est très faible.

De plus la cohérence des comparaisons est vérifiée car  $RC=0.0472 < 0.1$  et  $ICG=0.1657 < 0.35$ .

Nous constatons que le facteur 'Conditions du sol' présente la plus grande influence sur la vulnérabilité ( $w=0.561$ ), suivi du facteur 'Remblai' avec un poids  $w=0.283$ . Les contributions des facteurs 'Chaussée' et 'Conditions de Maintenance' sont moindres avec respectivement un poids 0.108 et 0.048 selon la méthode AHP.

Ceci est clairement justifié car les conditions de sol peuvent engendrer des dommages au sol support, au remblai et à la chaussée. Le facteur 'Conditions de maintenance' présente la contribution la plus faible car les dégradations d'exploitation peuvent être superficielles mais dans le cas de dégradations structurelles il s'agit généralement de problèmes liés au sol support (CTTP, 1992). En outre pour réduire la vulnérabilité des routes il suffit d'intervenir sur la chaussée et d'en améliorer les caractéristiques par des actions de renforcement. L'intervention sur le sol support pour en améliorer les caractéristiques est également possible mais nécessite des techniques souvent complexes et onéreuses.

Les résultats obtenus par la méthode de Crawford sont cohérents avec ceux de la méthode AHP.

Pour le 'Paramètre Aléa', les facteurs de vulnérabilité à savoir : l'intensité sismique, le potentiel de liquéfaction et l'intersection route-faille, sont comparés à leur tour entre eux deux à deux pour construire la matrice. Nous obtenons après calcul la matrice et les vecteurs poids suivants (Tableau 3.17) :

	Intensité sismique	Potentiel de liquéfaction	Intersection route-faille	Méthode de Saaty		Méthode de Crawford	
				Poids	RC	Poids	ICG
Intensité sismique	1	5	3	0.633	0.0034	0.637	0.1152
Potentiel de liquéfaction	1/5	1	1/3	0.106		0.105	
Intersection route-faille	1/3	3	1	0.261		0.258	

**Tableau 3.17 : Matrices et Vecteurs Poids des 'Facteurs' du Paramètre Aléa.**

Les valeurs des vecteurs Poids sont très proches avec un écart type très faible de 0.13%.

La cohérence des comparaisons est vérifiée :  $RC=0.0034 < 0.1$  et  $ICG=0.1152 < 0.31$ .

Le coefficient de pondération  $w=0.633$  du séisme est prédominant. Ceci est vrai quel que soit l'intensité du séisme car c'est ce phénomène qui induit la vulnérabilité du site. Il est suivi du poids  $w=0.261$  de l'intersection route faille qui est plus important que le poids  $w=0.106$  du potentiel de liquéfaction selon la méthode AHP. En effet, une rupture de faille est imprévisible et souvent c'est elle qui induit le séisme. Par contre le potentiel de liquéfaction peut être estimé, plus ou moins localisé et de surcroît on peut y remédier avec certaines dispositions techniques (RPA-99, 2003).

Les résultats obtenus par la méthode de Crawford confirment ceux obtenus par la méthode AHP.

### 6.3. Coefficients de pondération des attributs (Niveau 3)

Les coefficients de pondération des attributs sont déterminés par la construction des matrices de comparaisons de la manière suivante :

#### - Pour le facteur 'Chaussée'

Les deux attributs : 1) Nombre de voies et 2) Type de chaussée sont comparés entre eux. On obtient la matrice et le vecteur Poids suivants (Tableau 3.18) :

	Nombre de voies	Type de chaussée	Poids Saaty/Crawford
Nombre de voies	1	2	<b>0.67</b>
Type de chaussée	1/2	1	<b>0.33</b>

**Tableau 3.18 : Matrices et Vecteurs Poids du facteur 'Chaussée'.**

Toutes choses égales par ailleurs (intensité, type de revêtement, caractéristiques de la route), pour deux routes avec un nombre de voies différents, le nombre de voies est considéré plus important car si le revêtement est endommagé, il peut ne

pas l'être pour toutes les voies de la route (FHWA, 2004). De plus les routes étroites peuvent être endommagées par les effets indirects (chutes de blocs, débris, etc.).

D'un autre côté, pour minimiser la vulnérabilité des routes, on peut agir sur le revêtement car il est conditionné par la qualité de réalisation et de maintenance, tandis que le nombre de voies est conditionné par des considérations techniques et économiques sur lesquelles il est plus difficile d'agir.

**- Pour le facteur 'Remblai'**

Les attributs : 1) Hauteur, 2) Qualité du compactage et 3) Pente sont comparés entre eux deux à deux. Nous obtenons la matrice et les vecteurs Poids suivants (Tableau 3.19) :

	Hauteur	Qualité du Compactage	Pente
Hauteur	1	5	3
Qualité du Compactage	1/5	1	1/2
Pente	1/3	2	1

Méthode de Saaty		Méthode de Crawford	
Poids	RC	Poids	ICG
0.648	0.0031	0.648	0.0111
0.122		0.122	
0.230		0.229	

**Tableau 3.19 : Matrices et Vecteurs Poids du facteur 'Remblai'.**

Les valeurs des vecteurs Poids sont identiques et la cohérence est vérifiée car  $RC=0.0031 < 0.1$  et  $ICG=0.0111 < 0.31$

L'attribut Hauteur avec le poids le plus important ( $w=0.648$ ) est suivi du facteur Pente ( $w=0.230$ ) et enfin par le compactage avec un poids  $w=0.122$  donnés par la méthode AHP. La qualité du compactage contribue moins à la vulnérabilité que les deux autres facteurs. En effet, ce facteur est lié à la qualité de réalisation qui peut être contrôlé et amélioré grâce à certaines dispositions réglementaires (Eurocode 7, 1996). Par contre la hauteur et la pente sont des caractéristiques de conception et ne peuvent être modifiées en cours d'exploitation. Cependant pour assurer la stabilité du remblai et réduire la vulnérabilité de la route certaines dispositions peuvent être mise en œuvre sur les talus (Eurocode 7, 1996).

**- Pour le facteur 'Conditions du Sol'**

Les attributs : 1) Nature du sol et 2) Potentiel de glissement sont comparés entre eux. Nous obtenons la matrice et le vecteur Poids suivants (Tableau 3.20) :

	Nature du sol	Potentiel de Glissement	Poids
Nature du sol	1	1/4	<b>0.20</b>
Potentiel de Glissement	4	1	<b>0.80</b>

**Tableau 3.20 : Matrices et Vecteurs Poids du facteur ‘Conditions du Sol’.**

Le glissement de terrain est un phénomène imprévisible dont l’étendue et les dégâts engendrés sont généralement impressionnants. Par contre, les caractéristiques du sol en place sont connues ou peuvent l’être même ultérieurement dans le cas où l’on doit remédier à certains désordres. De plus, les dégâts occasionnés sont généralement localisés.

**- Pour le facteur ‘Conditions de Maintenance’**

Les attributs : 1) Etat de la chaussée et 2) Dispositifs de protection des pentes sont comparés entre eux. On obtient la matrice et le vecteur Poids suivants (Tableau 3.21) :

	Etat de la chaussée	Dispositifs de protection des pentes	Poids
Etat de la chaussée	1	2	<b>0.667</b>
Dispositifs de protection des pentes	½	1	<b>0.333</b>

**Tableau 3.21 : Matrices et Vecteurs Poids du facteur ‘Conditions de Maintenance’.**

Les deux attributs ‘Etat de la chaussée’ et ‘Dispositifs de protection des pentes’ contribuent presque de la même manière sur la vulnérabilité. Toutefois, les actions menées pour réduire la vulnérabilité sont plus aisée à mettre en œuvre pour les dispositifs de protection car elles sont souvent localisées et ciblent directement le problème d’instabilité. Contrairement à l’Etat de la chaussée, les actions à mener sont subordonnées à plusieurs paramètres tels que la qualité du sol support, du compactage, de la mise en œuvre des actions de réparation en cours d’exploitation.

#### **6.4. Système de notation des Catégories**

Après la détermination des coefficients de pondération des paramètres, des attributs et des facteurs, une note est attribuée à chaque catégorie afin de pouvoir évaluer les paramètres (Ennaouri, 2010),(Wang & Zhang, 2013). Pour ce faire nous avons adopté un système de notation tel que chaque catégorie est notée de 0 à 50 selon son influence sur la vulnérabilité des routes. Le score '0' est attribué à la catégorie ayant un impact minimal sur la vulnérabilité et le score '50' est attribué à la catégorie ayant un impact maximal sur la vulnérabilité.

Le système de notation proposé a été adopté sur la base des différents systèmes de notation utilisés par différents auteurs (Mohammadreza et al., 2012), (Ennaouri, 2010), (Zhang et al., 2011). Ce n'est pas la valeur attribuée qui importe, mais l'interprétation que nous en ferons après le calcul de l'indice de vulnérabilité. En effet, comme il s'agit d'évaluer la vulnérabilité des routes en calculant leur indice de vulnérabilité, pour les comparer entre elles, l'élément essentiel pour le faire est de disposer d'un seul et unique système de notation qui sera bien entendu combiné aux coefficients de pondération calculés au départ.

Dans le tableau 3.22, sont récapitulés tous les résultats de la méthode développée dans la présente étude.

Paramètre	Poids	Facteur	Poids	Attribut	Poids	Catégorie	Score		
Physique	0.250	Chaussée	0.108	Nombre de voies	0.667	> 2 voies	20		
						$\leq 2$ voies	40		
				Type de chaussée	0.333	Revêtue	20		
						Non revêtue	50		
		Remblai	0.283	Hauteur	0.648	$H \leq 2$ m	10		
						$2\text{m} < H \leq 5\text{m}$	30		
						$5\text{m} < H \leq 8\text{m}$	40		
						$H > 8\text{m}$	50		
				Qualité du compactage	0.122	Conforme aux normes	10		
						Conforme aux dispositions techniques	30		
						Autres (non répertoriées)	40		
				Pente	0.230	$< 2/3$	10		
		$= 2/3$	30						
		$> 2/3$	50						
		Conditions du Sol	0.561	Nature du sol	0.200	Rocher	0		
						Sol ferme	10		
						Sol meuble	40		
						Sol très meuble	50		
				Potentiel de glissement	0.800	Faible	10		
						Modéré	30		
Conditions de Maintenance	0.048	Etat de la chaussée	0.667	Bon	10				
				Moyen	20				
				Médiocre	40				
		Dispositifs de protection des talus	0.333	Conformes aux normes	20				
				Conformes aux dispositions techniques	30				
				Sans dispositifs de protection	50				
				MMI < VIII	10				
		Aléa	0.750	Intensité du séisme	0.633	-	-	VIII $\leq$ MMI < IX	20
						IX $\leq$ MMI < X	30		
						X $\leq$ MMI < XI	40		
XI $\leq$ MMI	50								
0 $\leq$ PL $\leq$ 5	10								
Potentiel de Liquéfaction	0.106			-	-	5 < PL $\leq$ 15	30		
						15 < PL	50		
Intersection route-faille	0.261			-	-	Pas d'intersection	10		
		Intersection	50						

**Tableau 3.22 : Récapitulation des coefficients de pondération et des scores.**

Les scores sont attribués à la catégorie en fonction de l'occurrence des dommages engendrés, de leur gravité et des actions à mener pour réduire la vulnérabilité des routes.

## VII. Détermination de l'expression analytique de l'Indice de Vulnérabilité

La combinaison de la méthode de l'indice de vulnérabilité et la méthode multicritère AHP nous permet de déterminer l'indice de vulnérabilité par la somme des deux indices des deux paramètres Physique et Aléa

Ainsi, l'indice de vulnérabilité 'IV' d'une route est obtenu par l'expression :

$$IV = I_{\text{Physique}} + I_{\text{Aléa}} \quad (3.1)$$

Avec  $I_{\text{Physique}}$  l'indice lié à la vulnérabilité Physique

et  $I_{\text{Aléa}}$  l'indice lié à la vulnérabilité du site sismique.

Par ailleurs, chacun de ces deux indices est obtenu par les sommes du produit du score de la catégorie par le poids de l'attribut concerné rapporté au facteur considéré. Ainsi après développement de l'expression de chacun de ces indices fondamentaux, nous avons réussi à développer l'expression analytique de l'indice de vulnérabilité qui est formulée par l'équation suivante :

$$IV = \sum_{i=1}^2 W_i \sum_{j=1}^{3 \text{ ou } 4} W_{ij} \sum_{k=1}^{2 \text{ ou } 3} W_{ijk} \times C_{ijkl} \quad (3.2)$$

Avec :

$W_i$  le coefficient de pondération du Paramètre Physique ou du Paramètre Aléa,

$W_{ij}$  le coefficient de pondération des facteurs,

$W_{ijk}$  le coefficient de pondération des attributs, où  $W_{ijk}=1$  si  $i=2$

et  $C_{ijkl}$  le score de la catégorie, où  $l = 2$  ou  $3$  ou  $4$  ou  $5$ .

Pour utiliser cette expression nous avons élaboré un troisième programme sous Matlab appelé 'RSVI' qui permet de calculer rapidement l'indice de vulnérabilité de n'importe quelle route. Ce programme utilise en sous-programme les résultats du premier programme 'VSAT' relatif à la méthode AHP (Poids) obtenus par la méthode classique de Saaty et les scores attribués aux différentes catégories. Il utilise en entrée les caractéristiques de la route à étudier.

## VIII. Conclusion

Les paramètres qui influent sur la vulnérabilité sismique des routes identifiés et définis dans le présent chapitre ne sont pas exhaustifs. Toutefois nous avons identifiés les plus importants et les plus fréquents. De plus, l'utilisation de la méthode multicritère AHP a permis de calculer leur coefficient de pondération. Ainsi, l'expression de l'indice de vulnérabilité développée à l'issue de toute cette démarche permet de calculer l'indice de vulnérabilité d'une route quelconque. L'avantage de cette expression est d'être relativement simple d'utilisation mais nécessite néanmoins plusieurs calculs. De ce fait, le programme développé prend en compte les caractéristiques de la route étudiée et permet d'effectuer rapidement tous les calculs pour donner l'indice de vulnérabilité 'IV' de la route en question.

Ce programme a été utilisé dans la cadre de cette étude pour traiter quelques exemples de routes. L'indice de vulnérabilité étant est un indicateur chiffré, il nous permettra dans un premier temps de comparer et classer les routes étudiées selon leur vulnérabilité.

## CHAPITRE 4 : MISE EN ŒUVRE ET VALIDATION

### I. Introduction

L'Algérie fait partie des pays vulnérables face aux tremblements de terre. La sismicité historique de l'Algérie montre que le Nord du pays a été touché par de nombreux séismes de magnitudes modérées à élevées. Les conséquences de tels événements ont quelques fois été catastrophiques sur le plan socio-économique.

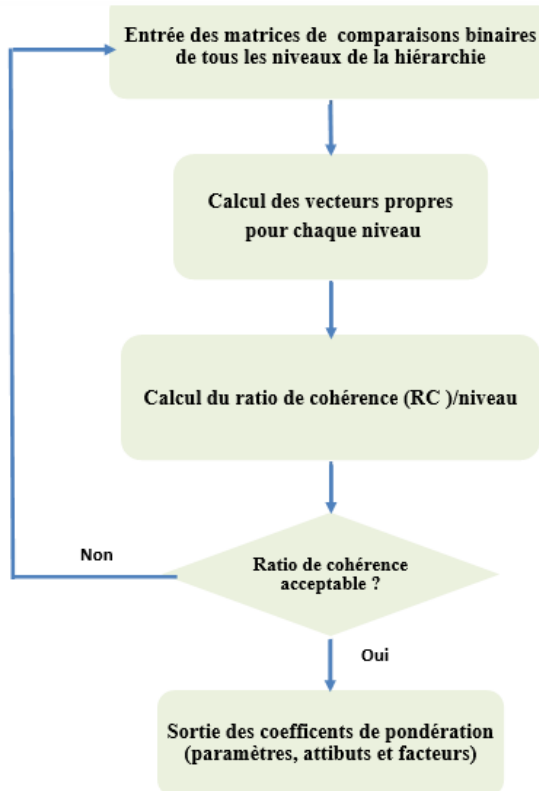
Le réseau routier qui constitue le moyen de transport principal du pays a souffert de dommages importants lors des différents événements sismiques (Chlef, Ain Temouchent, Chenoua, Boumerdes, etc). L'évaluation de la vulnérabilité de ce réseau pourra être effectuée aisément grâce au modèle développé dans la présente étude. Ce modèle constitue un outil facile à utiliser par les ingénieurs et les gestionnaires.

### II. Programmes développés

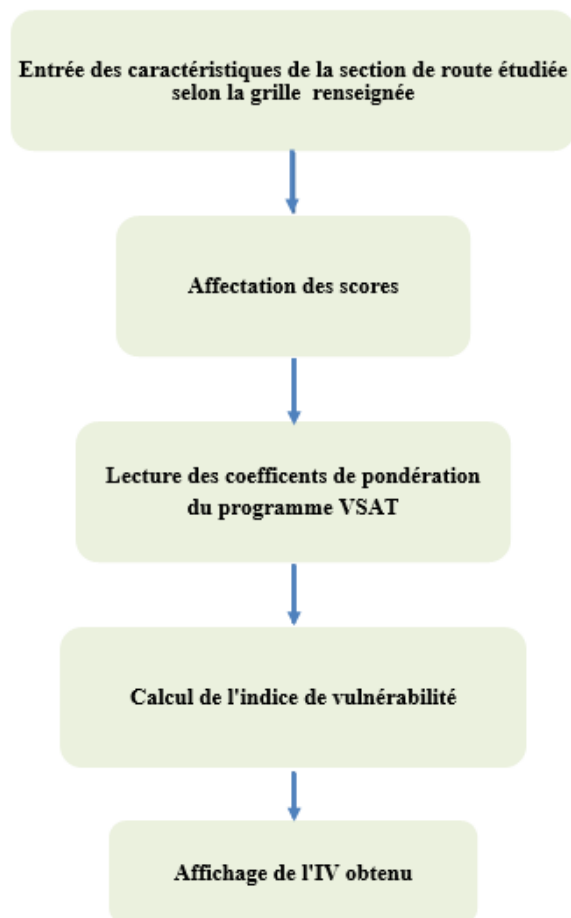
Afin de déterminer l'indice de vulnérabilité d'un tronçon routier, deux programmes ont été développés sous Matlab.

Le premier appelé '**VSAT**' (Vecteurs de SAATY) permet de calculer les coefficients de pondération des paramètres, des facteurs et des Attributs selon la méthode AHP de Saaty. Le second programme appelé '**RSVI**' (Road Seismic Vulnerability Index) permet de calculer l'indice de vulnérabilité de la section de route étudiée. Ce programme utilise les résultats du programme '**VSAT**'.

Les organigrammes des programmes VSAT et RSVI sont présentés respectivement en figure 4.1 et figure 4.2.



**Figure 4.1 : Organigramme du programme ‘VSAT’.**



**Figure 4.2 : Organigramme du programme ‘RSVI’.**

Nous pouvons constater sur l'organigramme de la figure 4.2 que les données de la route étudiée sont introduites selon une grille que nous avons élaborée. Cette grille est représentée ci-après (Tableau 4.1).

Attribut	Catégorie	Caractéristiques
Nombre de voies	> 2 voies	
	$\leq 2$ voies	
Type de chaussée	Revêtue	
	Non revêtue	
Hauteur	$H \leq 2$ m	
	$2\text{m} < H \leq 5\text{m}$	
	$5\text{m} < H \leq 8\text{m}$	
	$H > 8\text{m}$	
Qualité du compactage	Conforme aux normes	
	Conforme aux dispositions techniques	
	Autres (non répertoriées)	
Pente	$< 2/3$	
	$= 2/3$	
	$> 2/3$	
Nature de sol	Rocher	
	Sol ferme	
	Sol meuble	
	Sol très meuble	
Potentiel de glissement	Faible	
	Modéré	
	Elevé	
Etat de la chaussée	Bon	
	Moyen	
	Médiocre	
Dispositifs de protection des pentes	Conformes aux normes	
	Conformes aux dispositions techniques	
	Sans dispositifs de protection	
Intensité du séisme	$\text{MMI} < \text{VIII}$	
	$\text{VIII} \leq \text{MMI} < \text{IX}$	
	$\text{IX} \leq \text{MMI} < \text{X}$	
	$\text{X} \leq \text{MMI} < \text{XI}$	
	$\text{XI} \leq \text{MMI}$	
Potentiel de Liquéfaction	$0 \leq \text{PL} \leq 5$	
	$5 < \text{PL} \leq 15$	
	$15 < \text{PL}$	
Intersection route-faille	Pas d'intersection	
	Intersection	

**Tableau 4.1 : Grille des caractéristiques à renseigner.**

### III. Stratégie de validation

La validation du programme 'RSVI' élaboré pour le calcul de l'indice de vulnérabilité 'IV' a été effectuée sur plusieurs sections de routes endommagées par le séisme de Ain Temouchent (1999) en utilisant ce programme.

La démarche adoptée pour est la suivante :

- Collecte des données pour chaque section de route étudiée
- Renseignement de la grille des caractéristiques (Tableau 4.1).
- Calcul de l'indice de vulnérabilité (programme RSVI)
- Comparaison des indices pour classer les routes selon leur vulnérabilité
- Vérification des résultats obtenus avec les observations in situ.

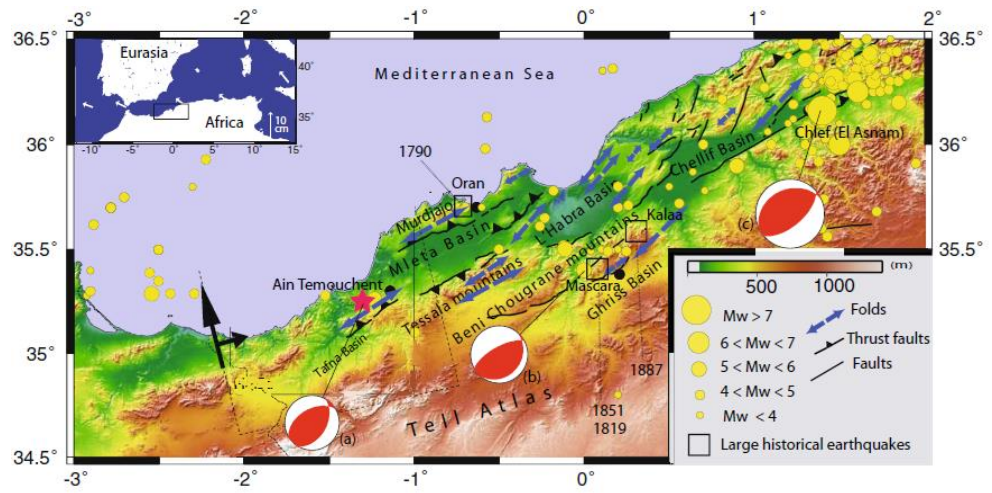
#### **IV. Description de la zone d'étude**

La zone d'étude concerne la wilaya de Ain Temouchent située à l'Ouest de l'Algérie à 70 Km de la wilaya d'Oran.

En 1999, la wilaya comptait près de 32 7000 habitants répartis sur 28 communes. Le Mercredi, 22 décembre 1999, à 18h 36 mn 55s, la ville de Ain Temouchent et les villages environnants (Ain-Tolba, Ain-Kihal et Sidi-Ben-Adda, Ain Allem, etc.) ont été frappés par un séisme d'une magnitude  $M_w = 5.7$  faisant 25 morts et près de 25000 sans-abris (Yelles et al., 2004). Ce séisme a occasionné des dégâts matériels importants (bâti, routes, réseaux d'AEP, ...) dans plusieurs localités. Tout le reste de la Wilaya a aussi été touchée mais sans dégâts significatifs et sans perte en vie humaine. Ce séisme a été ressenti dans tout l'ouest algérien (Oran, Tlemcen, Mascara ...) jusqu'au Maroc (Oujda) (World Bank, 2000).

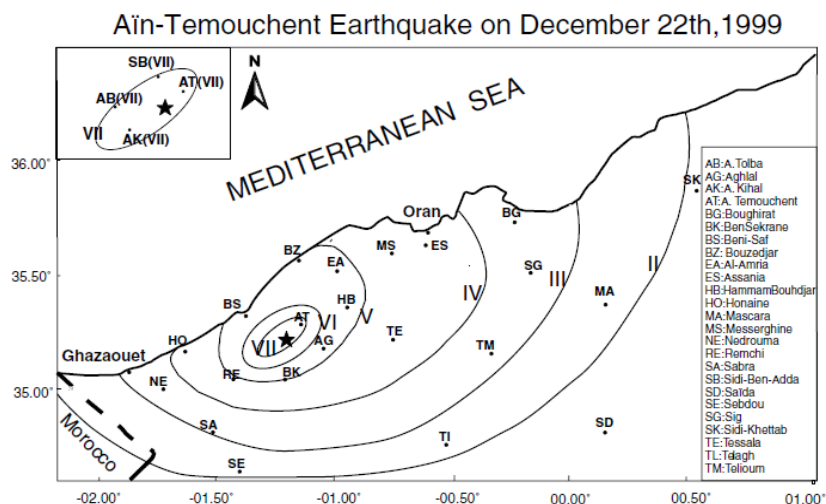
##### **4.1. Description de la sismicité**

En comparaison avec la région d'Oran et de Mascara (intensité maximale des séismes entre IV à X), la région de Ain Temouchent est caractérisée par une activité sismique faible à modérée. En effet, à travers la sismicité historique, il apparaît que la région n'a pas connu de séismes forts par le passé (Figure 4.3). Au cours des vingt dernières années, on a répertorié trois événements sismiques importants dont l'épicentre était localisé à Ain Temouchent. Il s'agit notamment : du séisme du 16.01.1980 ( $M_w=3.8$  et  $I_o=V$ ), du séisme du 15.07.1985 ( $M_w=4.1$  et  $I_o=V$ ) et du séisme du 17.12.1992 ( $M_w=4.8$  et  $I_o=V$ ). Ces trois séismes avaient une magnitude inférieure à 5.0. Selon le RPA99, la wilaya de Ain Temouchent est classée en zone sismique II (RPA-99, 2003).



**Figure 4.3 : Sismotectonique et relief de la région de Ain Temouchent (Belabbès et al., 2008).**

Le séisme du 22.12.1999 dont la magnitude a été estimée à 5.7 s’est produit près du village d’Ain Allem. Sur l’échelle de Mercalli, l’intensité évaluée de cette zone est VII. Le tracé de la carte isoséiste est illustré par la figure 4.4.



**Figure 4.4 : Carte Isoséiste du séisme (Yelles et al., 2004).**

Le séisme s’est produit le long d’une faille proche, non répertoriée, localisée à une profondeur approximative de 10 Km. Le mouvement fort a duré 15 secondes et l’épicentre a été supposé à 5Km au sud de la ville de Ain Temouchent. Selon les observations, il n’y a pas eu de rupture de faille en surface et la surface macrosismique dépasse 260 km de rayon. Quelques heures après le séisme, dix (10) répliques dont la magnitude varia entre 3.8 et 5.1 se sont produites (World Bank, 2000).

## 4.2. Caractéristiques géomorphologiques et géologiques

Le relief de la Wilaya de Ain Témouchent se compose de trois (3) principales unités géomorphologiques à savoir :

- a. les plaines intérieures dont l'altitude varie entre 50 et 300 m,
- b. la bande côtière qui fait partie de la chaîne tellienne dont l'altitude moyenne est de 200 m. Le point culminant atteint 409 m à Djebel Skhouna
- c. la zone montagneuse dont l'altitude varie entre 400 et 500 m. Les monts de Tessala d'une altitude moyenne de 600 m comporte le point culminant qui atteint 923 m à Djebel Bouhaneche (Yelles et al., 2004).

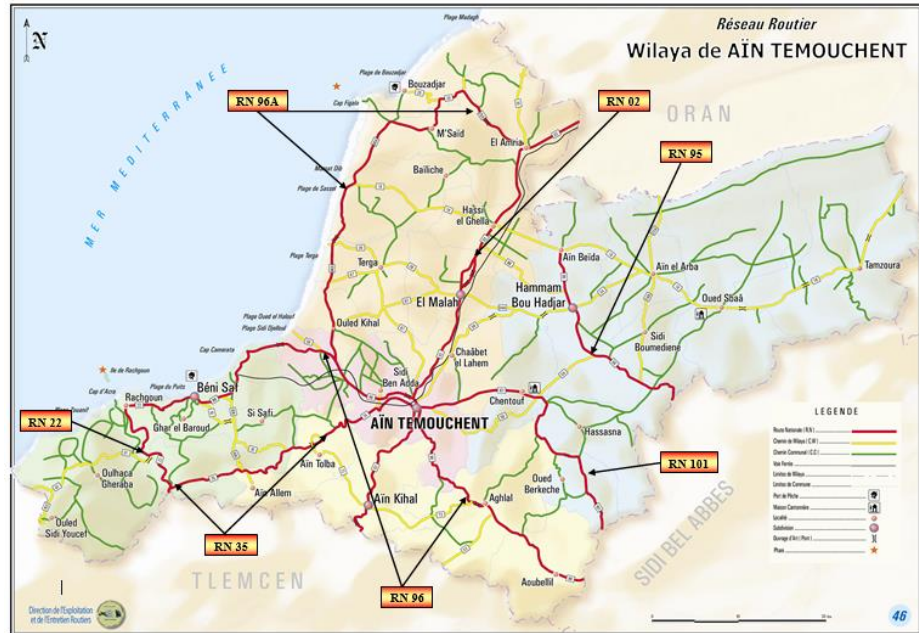
Du point de vue géologique, la région de Ain Temouchent est caractérisée par deux unités géologiques principales : 1) un sous-sol métamorphique constitué de quartzites, 2) des sédiments volcaniques. L'aspect quasi-tabulaire des formations géologiques confirme la présence de ses sédiments. L'absence de déformations dans cette région pourrait expliquer le niveau d'activité sismique plutôt faible (Yelles et al., 2004).

## 4.3. Description du réseau routier

La Wilaya de Ain Témouchent qui s'étend sur une superficie de 2376.34Km<sup>2</sup> dispose d'un réseau routier dense. En 1999, le linéaire total de routes (toutes catégories confondues) était de 1277 km réparti comme suit :

- Route Nationales (RN) : 266 Km
- Chemins de Wilaya (CW ) : 297 Km
- Chemins Communaux (CC) : 714 Km (dont 242 Km non revêtus) (CTTP-BDR, 1999).

Lors du séisme du 22.12.1999, près de 45 Km de routes furent sérieusement endommagés. Certaines routes ont nécessité des réparations, d'autres ont nécessité des reconstructions partielles. Certaines routes ont souffert d'instabilités de talus qui ont été aggravées par le fait que le séisme se soit produit en hiver. Ainsi, les réparations post-sismiques ont concernées la RN 2, la RN 35, la RN 96, le CW 10 et le CC 3 (Figure 4.5).



**Figure 4.5 : Réseau routier de la wilaya de Aïn Temouchent (MTP, 2012).**

Les travaux entrepris ont porté sur la démolition de certaines sections, des excavations, des travaux de terrassement sur les remblais des routes reconstruites, la mise en œuvre de caniveaux, de systèmes de protections des pentes et enfin des travaux de revêtement de chaussée. Tous ces travaux ont été financés par la Banque Mondiale pour un montant global de 1.2 million de Dollars US (World Bank, 2000).

## V. Validation du modèle développé

Le modèle développé a été utilisé pour évaluer six (06) sections de routes endommagées par le séisme de Aïn Temouchent. Ces sections appartiennent aux routes qui ont fait l'objet d'une expertise par l'équipe du CTPP en 1999 suite au séisme.

Les six cas d'études choisis concernent des sections de la RN 35. Cette route nationale à 2 voies (1999), d'un linéaire de près de 30 km relie Aïn Temouchent à Tlemcen. Le sol support sous la RN 35 est en général une argile plastique et comporte plusieurs remblais de hauteur moyenne à élevée. Aucun phénomène de glissement de terrains ou de liquéfaction n'a été observé suite au séisme.

### 5.1. Cas d'étude 1

Ce cas d'étude concerne la section de la route nationale RN35 située entre le PK 2+800 et le PK2+950. Cette section est localisée dans la ville de Aïn Temouchent. Cette section concerne un remblai moyen de hauteur  $H=6m$ . Construite avant les années 60, elle a fait l'objet d'un renforcement léger (Béton Bitumineux, et Enduit Superficiel) en 1988. Un

gabionnage a été mis en œuvre pour stabiliser le talus. Des dégradations modérées ont été répertoriées avant le séisme (fissures, affouillements dus aux infiltrations d’eaux, etc.), (CTTP, 1999), (CTTP-BDR, 1999).

Les caractéristiques de cette section sont reportées dans la grille représentée par le Tableau 4.2

Attribut	Catégorie	Caractéristiques
Nombre de voies	> 2 voies	
	≤ 2 voies	•
Type de chaussée	Revêtue	•
	Non revêtue	
Hauteur	H ≤ 2 m	
	2m < H ≤ 5m	
	5m < H ≤ 8m	•
	H > 8m	
Qualité du compactage	Conforme aux normes	
	Conforme aux dispositions techniques	
	Autres (non répertoriées)	•
Pente	< 2/3	
	= 2/3	
	> 2/3	•
Nature de sol	Rocher	
	Sol ferme	
	Sol meuble	•
	Sol très meuble	
Potentiel de glissement	Faible	•
	Modéré	
	Elevé	
Etat de la chaussée	Bon	
	Moyen	•
	Médiocre	
Dispositifs de protection des talus	Conformes aux normes	
	Conformes aux dispositions techniques	•
	Sans dispositifs de protection	
Intensité du séisme	MMI < VIII	•
	VIII ≤ MMI < IX	
	IX ≤ MMI < X	
	X ≤ MMI < XI	
Potentiel de Liquéfaction	XI ≤ MMI	
	0 ≤ PL ≤ 5	•
	5 < PL ≤ 15	
Intersection route-faille	15 < PL	
	Pas d’intersection	•
	Intersection	

**Tableau 4.2 : Caractéristiques du cas d’étude 1.**

- En utilisant le programme élaboré pour le calcul de l’IV, et en introduisant toute les caractéristiques selon la grille ci-dessus, on obtient l’indice de vulnérabilité de cette section : **IV =13.92**

## 5.2. Cas d'étude 2

Ce deuxième cas d'étude concerne la section de la RN35 située entre le PK 5+500 et le PK 5+650 qui comporte un remblai faible ( $H=2m$ ). En 1999, l'état de la chaussée était relativement bon (CTTP, 1999), (CTTP-BDR, 1999).

Les caractéristiques sont données par la grille représentée par le Tableau 4.3

Attribut	Catégorie	Caractéristiques
Nombre de voies	> 2 voies	
	$\leq 2$ voies	•
Type de chaussée	Revêtue	•
	Non revêtue	
Hauteur	$H \leq 2$ m	•
	$2m < H \leq 5m$	
	$5m < H \leq 8m$	
	$H > 8m$	
Qualité du compactage	Conforme aux normes	
	Conforme aux dispositions techniques	
	Autres (non répertoriées)	•
Pente	$< 2/3$	
	$= 2/3$	•
	$> 2/3$	
Nature de sol	Rocher	
	Sol ferme	
	Sol meuble	•
	Sol très meuble	
Potentiel de glissement	Faible	•
	Modéré	
	Elevé	
Etat de la chaussée	Bon	•
	Moyen	
	Médiocre	
Dispositifs de protection des talus	Conformes aux normes	
	Conformes aux dispositions techniques	
	Sans dispositifs de protection	•
Intensité du séisme	$MMI < VIII$	•
	$VIII \leq MMI < IX$	
	$IX \leq MMI < X$	
	$X \leq MMI < XI$	
	$XI \leq MMI$	
Potentiel de Liquéfaction	$0 \leq PL \leq 5$	•
	$5 < PL \leq 15$	
	$15 < PL$	
Intersection route-faille	Pas d'intersection	•
	Intersection	

**Tableau 4.3 : Caractéristiques du cas d'étude 2.**

➤ L'indice de vulnérabilité obtenu est : **IV =12.22**

### 5.3. Cas d'étude 3

Ce cas d'étude concerne la section de la RN35 située entre le PK 5+900 et le PK 6+150 qui comporte un remblai épais ( $H=10\text{m}$ ). En 1999, l'état de la chaussée était relativement moyen et aucun système de protection des talus n'avait été mis en œuvre (CTTP, 1999), (CTTP-BDR, 1999).

Les caractéristiques sont données par la grille représentée par le Tableau 4.4

Attribut	Catégorie	Caractéristiques
Nombre de voies	> 2 voies	
	$\leq 2$ voies	•
Type de chaussée	Revêtue	•
	Non revêtue	
Hauteur	$H \leq 2\text{ m}$	
	$2\text{ m} < H \leq 5\text{ m}$	
	$5\text{ m} < H \leq 8\text{ m}$	
	$H > 8\text{ m}$	•
Qualité du compactage	Conforme aux normes	
	Conforme aux dispositions techniques	
	Autres (non répertoriées)	•
Pente	$< 2/3$	
	$= 2/3$	
	$> 2/3$	•
Nature de sol	Rocher	
	Sol ferme	
	Sol meuble	•
	Sol très meuble	
Potentiel de glissement	Faible	•
	Modéré	
	Elevé	
Etat de la chaussée	Bon	
	Moyen	•
	Médiocre	
Dispositifs de protection des talus	Conformes aux normes	
	Conformes aux dispositions techniques	
	Sans dispositifs de protection	•
Intensité du séisme	$\text{MMI} < \text{VIII}$	•
	$\text{VIII} \leq \text{MMI} < \text{IX}$	
	$\text{IX} \leq \text{MMI} < \text{X}$	
	$\text{X} \leq \text{MMI} < \text{XI}$	
	$\text{XI} \leq \text{MMI}$	
Potentiel de Liquéfaction	$0 \leq \text{PL} \leq 5$	•
	$5 < \text{PL} \leq 15$	
	$15 < \text{PL}$	
Intersection route-faïlle	Pas d'intersection	•
	Intersection	

**Tableau 4.4 : Caractéristiques du cas d'étude 3.**

➤ L'indice de vulnérabilité obtenu est : **IV = 14.45**

#### 5.4. Cas d'étude 4

Ce cas d'étude concerne la section de la RN35 située entre le PK 16+000 et le PK 16+150 qui comporte un remblai épais ( $H=7m$ ). En 1999, aucun dispositif de protection de talus n'était prévu, de plus l'état de la chaussée était médiocre (fissures importantes, affaissements d'accotements, affouillements ...) (CTTP, 1999), (CTTP-BDR, 1999).

Les caractéristiques sont données par la grille représentée par le Tableau 4.5

Attribut	Catégorie	Caractéristiques
Nombre de voies	> 2 voies	
	$\leq 2$ voies	•
Type de chaussée	Revêtue	•
	Non revêtue	
Hauteur	$H \leq 2$ m	
	$2m < H \leq 5m$	
	$5m < H \leq 8m$	•
	$H > 8m$	
Qualité du compactage	Conforme aux normes	
	Conforme aux dispositions techniques	
	Autres (non répertoriées)	•
Pente	$< 2/3$	
	$= 2/3$	•
	$> 2/3$	
Nature de sol	Rocher	
	Sol ferme	
	Sol meuble	•
	Sol très meuble	
Potentiel de glissement	Faible	•
	Modéré	
	Elevé	
Etat de la chaussée	Bon	
	Moyen	
	Médiocre	•
Dispositifs de protection des talus	Conformes aux normes	
	Conformes aux dispositions techniques	
	Sans dispositifs de protection	•
Intensité du séisme	$MMI < VIII$	•
	$VIII \leq MMI < IX$	
	$IX \leq MMI < X$	
	$X \leq MMI < XI$	
	$XI \leq MMI$	
Potentiel de Liquéfaction	$0 \leq PL \leq 5$	•
	$5 < PL \leq 15$	
	$15 < PL$	
Intersection route-faille	Pas d'intersection	•
	Intersection	

**Tableau 4.5 : Caractéristiques du cas d'étude 4.**

➤ L'indice de vulnérabilité obtenu est : **IV= 13.83**

## 5.5. Cas d'étude 5

Ce cas d'étude concerne une section de la RN35 située entre le PK 20+500 et le PK 20+600 et comporte un remblai de faible hauteur ( $H=3m$ ). Elle a fait l'objet d'un renforcement léger en 1986. En 1999, cette section présentait plusieurs dégradations de la chaussée relativement modérées (fissures larges et fines, arrachements, nids de poules, etc.) (CTTP, 1999), (CTTP-BDR, 1999).

Les caractéristiques sont données par la grille représentée par le Tableau 4.6

Attribut	Catégorie	Caractéristiques
Nombre de voies	> 2 voies	
	$\leq 2$ voies	•
Type de chaussée	Revêtue	•
	Non revêtue	
Hauteur	$H \leq 2$ m	
	$2m < H \leq 5m$	•
	$5m < H \leq 8m$	
	$H > 8m$	
Qualité du compactage	Conforme aux normes	
	Conforme aux dispositions techniques	
	Autres (non répertoriées)	•
Pente	$< 2/3$	
	$= 2/3$	•
	$> 2/3$	
Nature de sol	Rocher	
	Sol ferme	
	Sol meuble	•
	Sol très meuble	
Potentiel de glissement	Faible	•
	Modéré	
	Elevé	
Etat de la chaussée	Bon	
	Moyen	•
	Médiocre	
Dispositifs de protection des talus	Conformes aux normes	
	Conformes aux dispositions techniques	
	Sans dispositifs de protection	•
Intensité du séisme	$MMI < VIII$	•
	$VIII \leq MMI < IX$	
	$IX \leq MMI < X$	
	$X \leq MMI < XI$	
	$XI \leq MMI$	
Potentiel de Liquéfaction	$0 \leq PL \leq 5$	•
	$5 < PL \leq 15$	
	$15 < PL$	
Intersection route-faille	Pas d'intersection	•
	Intersection	

**Tableau 4.6 : Caractéristiques du cas d'étude 5.**

➤ L'indice de vulnérabilité obtenu est : **IV =13.21**

## 5.6. Cas d'étude 6

Ce dernier cas d'étude concerne la section de la RN35 située entre le PK 20+850 et le PK 20+950 et comporte un remblai épais ( $H=7m$ ). En 1999, cette section était caractérisée par des dégradations de la chaussée relativement modérées (fissures larges et fines, arrachement, nids de poules,...) (CTTP, 1999), (CTTP-BDR, 1999).

Les caractéristiques sont données par la grille représentée par le Tableau 4.7

Attribut	Catégorie	Caractéristiques
Nombre de voies	> 2 voies	
	$\leq 2$ voies	•
Type de chaussée	Revêtue	•
	Non revêtue	
Hauteur	$H \leq 2$ m	
	$2m < H \leq 5m$	
	$5m < H \leq 8m$	•
	$H > 8m$	
Qualité du compactage	Conforme aux normes	
	Conforme aux dispositions techniques	
	Autres (non répertoriées)	•
Pente	$< 2/3$	
	$= 2/3$	•
	$> 2/3$	
Nature de sol	Rocher	
	Sol ferme	
	Sol meuble	•
	Sol très meuble	
Potentiel de glissement	Faible	•
	Modéré	
	Elevé	
Etat de la chaussée	Bon	•
	Moyen	
	Médiocre	
Dispositifs de protection des talus	Conformes aux normes	
	Conformes aux dispositions techniques	
	Sans dispositifs de protection	•
Intensité du séisme	$MMI < VIII$	•
	$VIII \leq MMI < IX$	
	$IX \leq MMI < X$	
	$X \leq MMI < XI$	
	$XI \leq MMI$	
Potentiel de Liquéfaction	$0 \leq PL \leq 5$	•
	$5 < PL \leq 15$	
	$15 < PL$	
Intersection route-faille	Pas d'intersection	•
	Intersection	

**Tableau 4.7 : Caractéristiques du cas d'étude 6.**

➤ L'indice de vulnérabilité obtenu est : **IV = 13.59**

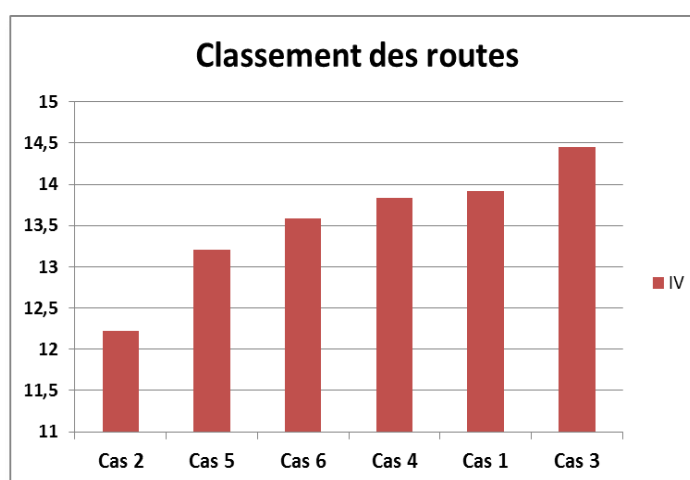
Les indices de vulnérabilité obtenus pour les différentes sections étudiées sont reportés dans le Tableau 4.8.

Section	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5	Cas 6
<b>IV</b>	<b>13.92</b>	<b>12.22</b>	<b>14.45</b>	<b>13.83</b>	<b>13.21</b>	<b>13.59</b>

**Tableau 4.8 : Synthèse des Iv obtenus.**

A travers les résultats obtenus, nous pouvons conclure que la section de route du **cas 3** est la plus vulnérable (IV=14.45) et celle du **cas 2** la moins vulnérable (IV=12.22).

L'histogramme de la figure 4.6 illustre le classement des différentes sections de la section la moins vulnérable à la section la plus vulnérable.



**Figure 4.6 : Classement des sections de routes étudiées**

Le cas 3 est le plus vulnérable en raison de l'importance de la hauteur du remblai, de la raideur du talus (la pente  $>2/3$ ), du mauvais état de la chaussée, de la qualité médiocre du compactage et de l'absence de dispositifs de protection. Tous ces Attributs ont contribué à l'endommagement de cette section. De plus, l'instabilité du talus fut aggravée par le mouvement sismique et les pluies hivernales.

Les résultats obtenus par la méthode développée sont en parfaite adéquation avec les observations in-situ et les conclusions de l'expertise du CTPP (CTPP, 1999). En effet, selon cette expertise, les sections de routes des cas 2 et 5 ont été classées en degré de **gravité 1** et ont nécessité quelques réparations mineures. Par contre les sections des cas 1, 3, 4 et 6 ont été classées en degré de **gravité 2** et ont nécessité des travaux de réhabilitation importants après le séisme.

Pour rappel, le CTTP classe le niveau d'endommagement des routes en 2 catégories données ci-après (Tableau 4.9):

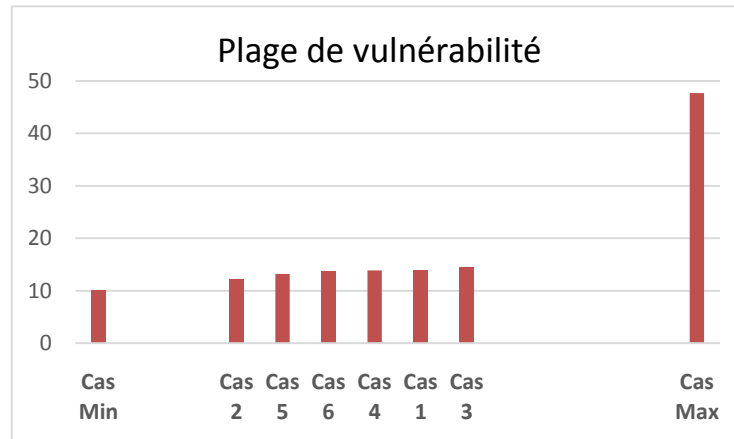
Catégorie	Dénomination	Explications
1	Gravité 1	Sections en remblai moyen nécessitant une simple solution préventive avec une attention particulière sur l'évolution de la gravité (affaissement, glissement ...).
2	Gravité 2	Sections en remblai épais à très épais dont les pentes de talus dépassant les 45° nécessitent en premier lieu une intervention d'urgence par une simple solution préventive et prévoir rapidement des études complémentaires en particulier des études géotechniques concernant la stabilité des talus.

**Tableau 4.9 : Niveaux d'endommagement (CTTP, 1999).**

## VI. Classes de vulnérabilité

Dans le paragraphe précédent, grâce à l'indice de vulnérabilité 'IV' nous avons classé les sections de routes étudiées selon leur vulnérabilité. Nous avons représenté sur la figure 4.7, les valeurs trouvées ainsi que la valeur minimale et la valeur maximale possibles pour indice.

- la valeur minimale de l'IV qui correspond à la vulnérabilité minimale est **IV<sub>min</sub> = 10.03**. Cette valeur correspond à une route avec de bonnes caractéristiques physiques et des caractéristiques sismiques du site qui induisent la vulnérabilité minimale de la route
- la valeur maximale de l'IV qui correspond à la vulnérabilité maximale est **IV<sub>max</sub> = 47.70**. Cette valeur correspond à une route avec des caractéristiques physiques médiocres et des caractéristiques sismiques du site qui induisent la vulnérabilité maximale de la route.



**Figure 4.7 : Plage de vulnérabilité.**

Le tableau 4.10 représente les résultats de l'écart entre l'IV de la section étudiée et l'IVmin ainsi que l'écart avec l'IVmax.

Cas d'études Ecart	Cas d'études					
	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5	Cas 6
Ecart avec IVmin (%)	<b>10.33</b>	<b>5.81</b>	<b>11.73</b>	<b>10.09</b>	<b>8.44</b>	<b>9.45</b>
Ecart avec IVmax (%)	<b>89.67</b>	<b>94.19</b>	<b>88.27</b>	<b>89.91</b>	<b>91.56</b>	<b>90.55</b>

**Tableau 4.10 : Ecart enregistré pour les cas d'études.**

Nous constatons que dans tous les cas d'études, les pourcentages d'écart avec la valeur minimale de l'IV sont plus faibles que les écarts avec la valeur maximale de l'IV.

Nous remarquons que pour les cas 2 et 5 l'écart avec l'IVmin est inférieur à 9% par contre pour les autres cas il est compris entre 9 et 12%. Cette observation devra être confirmée par d'autres cas afin de déterminer des intervalles de vulnérabilité.

Nous remarquons également que l'écart avec l'IVmax est très important ce qui s'est vérifié sur le terrain puisque ces routes sont restées praticables.

## VII. Scénarii sismiques

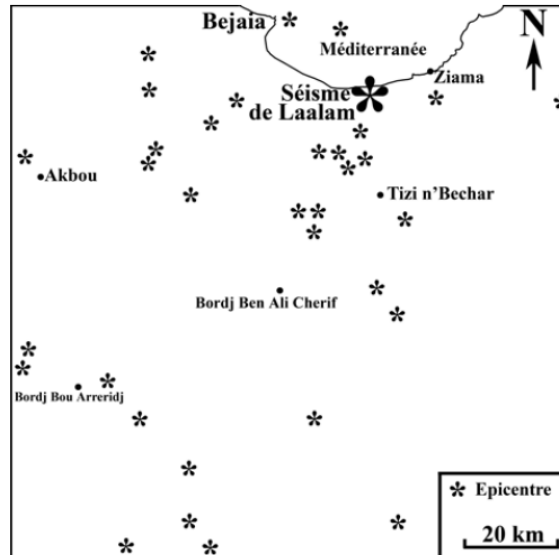
Le modèle développé peut être aussi utilisé comme outil de diagnostic en vue de connaître le comportement de la route lors d'un évènement sismique.

C'est ce qui est communément appelé 'Evaluation pré-sismique' et qui permet de réaliser des scénarii sismiques.

Nous nous proposons d'étudier une section de route située dans la wilaya de Béjaïa.

Cette région a connu plusieurs séismes recensés depuis 1946 (figure 4.8) et dont les intensités varient de IV à X (Machane et al., 2009), (Beldjoudi, 2011).

La région d'étude est située dans la chaîne des Babors. Elle est caractérisée par un relief montagneux avec un potentiel de glissement de terrains élevé. Des glissements de terrains ont été provoqués ou activés par les séismes de 1974 et 2006 (Bouhadad et al., 2009), (Machane et al., 2009), (Beldjoudi, 2011).



**Figure 4.8 : Carte de la distribution de la sismicité dans la région des Babors (Machane et al., 2009).**

La section de route étudiée concerne le CC 17 (chemin communal) situé à 9 Km de la RN 43 qui mène au village de Laalam situé dans la commune de Tamricht située à 50Km du chef-lieu de la wilaya de Béjaia (figure 4.9). Cette section est à 2 voies et le sol support se traduit par une lithologie argilo-marneuse à schisteuse et une concentration de sources d'eau aux écoulements omniprésents. En outre une faille a été répertoriée dans la région de Laalam (Machane et al., 2009).



**Figure 4.9 : Réseau routier de la wilaya de Béjaïa (MTP, 2012).**

L'état actuel de la chaussée étudiée est moyen (quelques fissures, arrachement par endroits isolés). Cette section a été construite dans les années cinquante et suite au séisme de 2006, elle a fait l'objet en 2007 d'un renforcement avec la mise en place d'un gabionnage pour stabiliser les talus (DTP de Béjaïa, 2014).

Une section de 300m du tronçon routier du CC17 a fait l'objet d'une analyse en faisant varier l'intensité sismique de VII à XI. Les failles répertoriées dans la région des Babors peuvent provoquer des séismes ayant ces intensités (Machane et al., 2009).

La grille des caractéristiques de cette section de routes est donnée sur le Tableau 4.11.

Attribut	Catégorie	Caractéristiques
Nombre de voies	> 2 voies	
	≤ 2 voies	•
Type de chaussée	Revêtue	•
	Non revêtue	
Hauteur	H ≤ 2 m	•
	2m < H ≤ 5m	
	5m < H ≤ 8m	
	H > 8m	
Qualité du compactage	Conforme aux normes	
	Conforme aux dispositions techniques	
	Autres (non répertoriées)	•
Pente	< 2/3	•
	= 2/3	
	> 2/3	
Nature de sol	Rocher	
	Sol ferme	
	Sol meuble	•
	Sol très meuble	
Potentiel de glissement	Faible	
	Modéré	
	Elevé	•
Etat de la chaussée	Bon	
	Moyen	•
	Médiocre	
Dispositifs de protection des talus	Conformes aux normes	
	Conformes aux dispositions techniques	•
	Sans dispositifs de protection	
Intensité du séisme	MMI < VIII	• (cas 1)
	VIII ≤ MMI < IX	• (cas 2)
	IX ≤ MMI < X	• (cas 3)
	X ≤ MMI < XI	• (cas 4)
	XI ≤ MMI	• (cas 5)
Potentiel de Liquéfaction	0 ≤ PL < 5	•
	5 ≤ PL < 15	
	15 ≤ PL	
Intersection route-faïlle	Pas d'intersection	•
	Intersection	

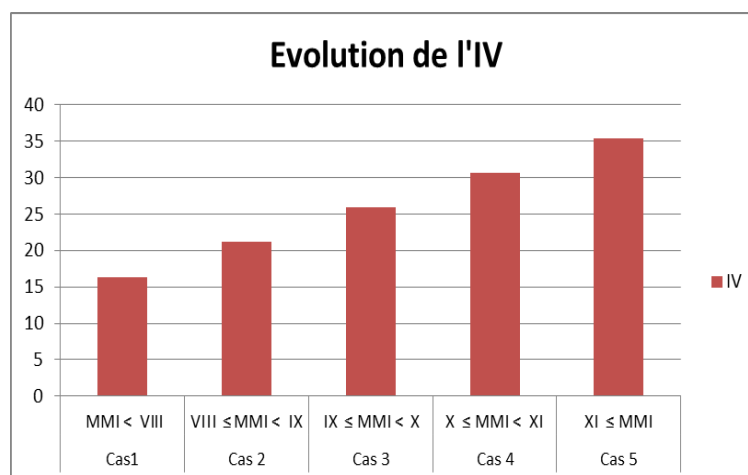
**Tableau 4.11 : Caractéristiques du cas d'étude pour différents scénarii sismiques.**

Les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau 4.12

Scénario	Cas1 MMI < VIII	Cas 2 VIII ≤ MMI < IX	Cas 3 IX ≤ MMI < X	Cas 4 X ≤ MMI < XI	Cas 5 XI ≤ MMI
<b>IV</b>	<b>16.38</b>	<b>21.13</b>	<b>25.88</b>	<b>30.63</b>	<b>35.38</b>

**Tableau 4.12 : Résultats de l'IV pour différents scénarii sismiques.**

Ces résultats sont représentés par l'histogramme de la figure 4.10 qui représente l'évolution de l'indice de vulnérabilité 'IV' en fonction de l'intensité sismique.



**Figure 4.10 : Evolution de l'Indice de Vulnérabilité 'IV'.**

L'Indice de vulnérabilité IV et par conséquent la vulnérabilité sismique augmentent évidemment avec l'augmentation de l'intensité du séisme.

Le pourcentage (%) d'écart entre le cas minimal et le cas maximal est représenté dans le Tableau 4.13

Scénario	Cas 1 MMI < VIII	Cas 2 VIII ≤ MMI < IX	Cas 3 IX ≤ MMI < X	Cas 4 X ≤ MMI < XI	Cas 5 XI ≤ MMI
<b>Ecart</b>					
Ecart ave IVmin (%)	<b>16.86</b>	<b>29.47</b>	<b>42.08</b>	<b>54.69</b>	<b>67.29</b>
Ecart avec IVmax (%)	<b>83.14</b>	<b>70.53</b>	<b>57.92</b>	<b>45.31</b>	<b>32.71</b>

**Tableau 4.13 : Ecart enregistré selon différents scénarii sismiques.**

Nous remarquons que l'écart avec l'IVmin est relativement important, ce qui indique que ce tronçon est relativement vulnérable à l'action sismique.

Cette vulnérabilité au séisme s'explique par le fort potentiel de glissement de terrains dû principalement à la nature des sols, au relief montagneux, aux écoulements permanents et aux constructions récentes au pied des talus.

Le diagnostic ainsi réalisé permet de mettre en évidence le risque d'endommagement important de ce tronçon en cas de séisme. Des dispositifs de protection de talus et de drainage doivent être mis en œuvre afin de réduire le risque sismique.

## **VIII. Conclusion**

Le modèle développé a l'avantage d'être d'utilisation et d'interprétable aisées par les différents acteurs de la route. Ce modèle nous a permis dans un premier temps de faire une évaluation post-sismique. Cette évaluation visait à comparer les sections d'une même route entre elles et à les classer selon leur vulnérabilité. La comparaison des résultats obtenus par le modèle développé a montré une parfaite concordance avec les conclusions post sismiques. Dans un deuxième temps, une évaluation pré-sismique a pu être effectuée pour différents scénarii d'intensité sismiques. Ce diagnostic visait à définir les mesures à prendre afin de réduire la vulnérabilité sismique de la route étudiée.

## CONCLUSION GENERALE

Le travail entrepris dans le cadre de ce mémoire a permis de développer une méthode pour l'évaluation de la vulnérabilité des routes. Cette méthode basée sur la méthode de l'indice de vulnérabilité a l'avantage d'être aisée à mettre en œuvre et rapide à exécuter. De plus, elle est applicable à n'importe quel contexte et permet de prendre en compte les caractéristiques de la route et de son environnement.

En première étape, nous avons identifié les principaux paramètres qui influencent la vulnérabilité des routes. Ces derniers ont été définis sur la base des observations et des données recueillies suite aux séismes passés dans le monde et en Algérie. Nous avons été confrontés à l'insuffisance de données statistiques représentatives pour pouvoir réaliser une analyse statistique afin de déterminer les poids de ces paramètres, aussi, pour pallier à cette insuffisance, nous avons eu recours à une analyse multicritère. La méthode multicritère AHP (Analytical Hierarchy Process) a été ainsi utilisée pour déterminer les coefficients de pondération des paramètres de vulnérabilité déterminés. A l'issue de ces deux étapes, en utilisant les paramètres définis et caractérisés par des attributs, des facteurs et des catégories et pour lesquels nous avons déterminé les coefficients de pondération respectifs, nous avons déterminé l'expression analytique de l'indice de vulnérabilité des routes. Le modèle ainsi développé permet de calculer l'indice de vulnérabilité d'un tronçon routier quelconque en prenant en compte ses caractéristiques.

En raison de la multitude et de la complexité des calculs, le modèle élaboré a fait l'objet du développement de deux programmes sous Matlab. Le programme 'RSVI' (Road Seismic Vulnerability Index) dédié au calcul de l'IV a été développé sur la base de l'expression analytique proposée. Il prend en compte en entrées les différentes caractéristiques de la route étudiée et du site de localisation de cette dernière. Il utilise également les résultats du programme 'VSAT' (Vecteurs de Saaty). Ce dernier également développé sous Matlab en raison de l'indisponibilité du logiciel ExpertChoice, est dédié à la méthode AHP. Il permet de calculer les différents Vecteurs Poids selon la hiérarchisation des paramètres.

Pour valider le modèle développé, nous avons étudié six sections de la route nationale RN35 endommagée par le séisme de Ain Temouchent de 1999. La comparaison des résultats obtenus montre une concordance avec les observations in-situ.

Enfin, pour montrer l'applicabilité du modèle développé, nous l'avons utilisé pour réaliser différents scénarii sismiques en traitant une section du chemin communal CC17 menant au

village de Laalam (localité de Tamricht) dans la wilaya de Béjaia. Ce diagnostic permet de prévoir le comportement de la section étudiée sous différentes intensités sismiques.

Au terme de ce travail, nous avons développé un modèle qui constitue :

- un outil d'évaluation post-sismique qui permet de classer les routes selon leur vulnérabilité et de définir la priorisation des actions de réparation ou de reconstruction sur le réseau endommagé.
- un outil de diagnostic qui permet de réaliser des scénarii sismiques. Les résultats obtenus dès lors permettent d'identifier les routes vulnérables. Il sera alors possible d'améliorer certaines caractéristiques de ces routes afin d'en réduire la vulnérabilité.
- un outil de planification qui permet de préconiser l'aménagement de nouveaux axes routiers pour offrir aux usagers des itinéraires de substitution qui assureront la fonctionnalité du réseau routier en cas de catastrophe sismique.

En outre, ce modèle a l'avantage d'être aisé à utiliser et à interpréter par les différents acteurs (Ingénieurs, Gestionnaires et Maîtres d'ouvrages) pour une prise de décision.

Le travail entamé est loin d'être achevé. En effet des améliorations sont envisagées pour enrichir et développer cette méthode. Ainsi nous pouvons citer :

- la définition des classes de vulnérabilités des routes en définissant des intervalles auxquelles l'IV obtenu appartiendrait.
- l'amélioration du programme RSVI par un module relatif aux classes de vulnérabilité et le développer en créant une interface utilisateur pour faciliter l'entrée des différentes données.
- l'intégration du modèle de l'IV développé à un Système d'Informations Géographiques (SIG) qui permet d'utiliser une base de données relatives aux caractéristiques des sections étudiées et qui en outre permettrait de visualiser la classification de ces dernières.

# RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adamcsek, E. (2008). *The Analytic Hierarchy Process and its Generalizations*. Eotvos Lorand Budapest.
- Aguarón, J., & Moreno-Jiménez, J. M. (2003). The geometric consistency index: Approximated thresholds. *European Journal of Operational Research*, 147(1), 137-145.
- Aguarón, J., & Moreno-Jiménez, J. M. a. (2003). The geometric consistency index: Approximated thresholds. *European Journal of Operational Research*, 147(1), 137-145.
- Al-Harbi, K. M. A.-S. (2001 ). Application of the AHP in project management. *International Journal of Project Management* 19, 19-27.
- ALA (2001). American Lifelines Alliance. Seismic fragility formulations for water systems: Part 1 - Guideline. ASCE-FEMA.
- Alonso, J. A., & Lamata, T. (2006). Consistency in the Analytic Hierarchy Process : A new approach *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 14(4), 445–459.
- Anbazhagan, P., Srinivas, S., & Chandran, D. (2011). Classification of road damage due to earthquakes. *Springer Science+Business Media B.V.*
- Arakawa, T., Tokida, K.-i., & Toshio, K. (1982). *Estimation Procedure of Liquefaction Potential and its Application to Earthquake Resistant Design*.
- Arsik, I., Sibel Salman, F. (2013). Modeling Earthquake Vulnerability of Highway Networks. *Electronic Notes in Discrete Mathematics* 41 319-326.
- ATC-13. (1985). Earthquake Damage Evaluation Data for California, Applied Technology Council. *Federal Emergency Management Agency (FEMA)*.
- ATC-25. (1991). Seismic Vulnerability and Impact of Disruption of Lifelines in the Conterminous United States, Applied Technology Council. . *Federal Emergency Management Agency (FEMA)*.
- Bahi, F. Z. (2013). Indice du Potentiel de Liquéfaction. *Algérie Equipement*, N°53, 2-5.
- Bard, P. Y., Ménour, J.-P., Durville, J.-L., & Mouroux, P. (1987). *Microzonage sismique Application aux plans d'exposition aux risques ( PER )*.
- Basöz, N., & Kiremidjian, A. S. (1998). Evaluation of Bridge Damage Data from the Loma Prieta and Northridge. California Earthquakes Technical Report MCEER-98-0004. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY.
- Belabbès, S., Meghraoui, M., Çakir, Z., & Bouhadad, Y. (2008). 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, 421-432.
- Beldjoudi, H. (2011). *Etude de la sismicité du Nord*. Thèse de Doctorat Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen.
- Benouar, D. (2008). Integrated disaster management of the Algiers-Boumerdes (Algeria) earthquake of 21 may 2003. *The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China*.
- Béranger, S. (2009). Vers une approche participative : l'analyse multicritère *EPI-SSP- Géosciences pour une terre durable*: BRGM.
- Berdica, K. (2002). An Introduction To Road Vulnerability: What Has Been done, Is Done, And Should Be Done – *Transport Policy* 9.
- Berdica, K., & Eliasson, J. (2004). Regional accessibility analysis from a vulnerability perspective, . *2<sup>nd</sup> International Symposium on Transportation Network Reliability. Queenston and Christchurch, New Zealand*, , 89 - 95.
- Bhushan, N., & Rai, K. (2004). *Strategic Decision Making - Applying the Analytic Hierarchy Process*. United States of America: Decision Engineering Series - springeronline.com.
- Bleux, A., Stada, J. E., & Immers, B. (2005). The effect of network layout on the reliability of travel time. *3rd International SIV Congress "People, Land, Environment and Transport Infrastructures - Reliability and development." (Session C1 "Network reliability") – Bari, Italy*.

- Bouhadad, Y., Benhamouche, a., Bourenane, H., Ait Ouali, a., Chikh, M., & Guessoum, N. (2009). The Laalam (Algeria) damaging landslide triggered by a moderate earthquake (Mw = 5.2). *Natural Hazards*, 54, 261-272.
- BRGM. (2000). Contrat de plan Etat-région Martinique relatif à l' évaluation et la réduction du risque sismique : Estimation à l' échelle régionale , des déplacements induits par des phénomènes de liquéfaction et de mouvements de terrain (pp. 68).
- BRGM. (2006). Scénario de crise sismique. Valorisation des scénarios départementaux de risque sismique. *RP 54582-FR*.
- Cafiso, S., Colombritta, R., D'Andrea, A., Mussumeci, G., Colombritta, E., & Condorelli, A. (2001). Un modello GIS per la valutazione del rischio sulle infrastrutture stradali nelle emergenze della protezione civile, Atti XI Convegno Nazionale SIIV, Società Italiana Infrastrutture Viarie Progettazione ed adeguamento Bibliografia 135 funzionale delle infrastrutture viarie. Occasioni di recupero dell'ambiente e di contributo per la protezione civile", Verona, Italy.
- Caillet, R. (2003). Analyse multicritère: Étude et comparaison des méthodes existantes en vue d'une application en analyse de cycle de vie, CIRANO, Montréal, .
- Calvi, G. M., Pinho, R., Magenes, G., Bommer, J. J., & Crowley, H. (2006). Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years *ISER Journal of earthquake Technology*, 43, 75-104.
- Chiroiu, L. (2004). *Modélisation de dommages consécutifs aux séismes . Extension à d'autres risques naturels, Volume 1*. Université Paris 7/Denis Diderot - Thèse pour l'obtention du Diplôme de Docteur en géographie
- Chouw, N., Hong Hao, H., & Goldsworthy, H. (2011). Some observations of damage in the 22<sup>nd</sup> February Christchurch earthquake. *Australian Earthquake Engineering Society, Earthquake Reconnaissance Report, May 2011*.
- Chowdhury, R. N. (2000). Hazard of Landsliding during Earthquakes - Critical overview of assessment methods *12 wcee 2000*.
- Corigliano, M. (2007). Seismic response of deep tunnels in near-fault conditions. PhD dissertation. Politecnico di Torino, Italy.
- CTTP-BDR. (1999). Banque de données routière -HDM
- CTTP. (1992). *Guide des Renforcements - Fascicule 1*. Alger Direction des Routes
- CTTP. (1999). Expertise du réseau routier dans la wilaya de Ain Temouchent suite au séisme du 22/12/99. rapport établi le 18.01.2000.
- CTTP. (2003). Diagnostic du réseau routier de la wilaya de Boumerdes suite au séisme du 21/05/2003.
- D'Andrea, A., Cafiso, S., & Condorelli, A. (2005). Methodological Considerations for the Evaluation of Seismic Risk on Road Network. *Pure and Applied Geophysics- 162* 767-782.
- D'Andrea, A., Cafiso, S., & Condorelli, A. (2006). Valutazione del rischio sismico di infrastrutture viarie urbane: analisi funzionale della rete in condizioni di emergenza - In "Metodologie di valutazione del rischio sismico sulle infrastrutture viarie" Comitato Tecnico 3.2 "Gestione dei rischi legati alle strade" Associazione Nazionale della Strada AIPCR - *Comitato Nazionale Italiano - XXV Convegno Nazionale Stradale, Napoli, 4-7 ottobre, , 69-104*.
- Daneshvar, M. R. M., Rezayi, S., & Khosravi, S. (2013). Earthquake vulnerability zonation of Mashhad urban fabric by combining the quantitative models in GIS,northeast of Iran. *International Journal of Environmental Protection and Policy*, 1(4 ), 44-49.
- DelVecchio, S. (2006). *Mesure quantitative des impacts de risque en contexte d'impartition*. Université de Montréal, HEC Montréal.
- DIPCN. (1992). Glossaire international multilingue agréé de termes relatifs à la gestion des catastrophes. UN DHA, Genève,. 83.
- DTP de Béjaia (2014). [Caractéristiques du réseau routier de la wilaya de Béjaia].
- Duran, F. C., & Miyajima, M. (2001). The January 13, 2001 Off the Coast of El Salvador Earthquake - Lifelines and critical facilities (pp. 89-100).
- Durville, J. L., Méneroud,J.P. (1987). Vulnérabilité aux séismes des itinéraires routiers *Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées . 150/151 juil-août/ sept-oct*, 186.
- Edwards, C. L. (2004). Zemmouri, Algeria, Mw 6.8 Earthquake of may 21, 2003. *Technical Council of lifeline Earthquake Enginnering. Monograph N°.27 August 2004/ ASCE*.

- EERI. (1991). Costa Rica Earthquake of april 22, 19991. *EERI Special earthquake report*
- EERI/CTC. (1980). Preliminary Reconnaissance Report El Asnam Earthquake, Algeria 10<sup>th</sup> 1980
- Ennaouri, I. (2010). *Modélisation de la dégradation hydraulique et structurale des réseaux sanitaires et pluviaux* Maîtrise Es Sciences Appliquées (Génie Civil), Université de Montréal
- ENSURE. (2009). Ensure Project : Enhancing resilience of communities and territories facing natural and natech hazards - Contract Number: 212045, WP 1: State-of-the art on vulnerability types Del. 1.1.1: Methodologies to assess vulnerability of structural systems *European Commission by the Seventh Framework Programme - Area "Environment" Activity 6.1 "Climate Change, Pollution and Risks"*.
- Erdik, M. (2000). Report on 1999 Kocaeli and Duzce (Turkey) earthquakes. University, Dept. of Earthquake Engineering.
- Eurocode 7. (1996). Calcul géotechnique Partie 1 : Règles générales *Normalisation française XP ENV 1997-1, P 94-250-1*: AFNOR.
- FEMA-NIBS. (2004). HAZUS: Hazard US: Earthquake Loss Estimation Methodology. National Institute of Building Sciences, . *NIBS document 5200-03, Washington, DC*.
- FHWA. ( 2004). Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures. *Federal Highway Administration, Part 2*.
- Fumey, M. (2001). *Méthode d'Evaluation des Risques Agrégés : application au choix des investissements de renouvellement d'installations*. Doctorat Institut National Polytechnique de Toulouse . Spécialité Systèmes industriels
- Gagné, R., & Gharbi, A. (2003). *Exemples de cas d'analyse multicritère dans le cadre d'études de faisabilité pour des projets technologiques.*, École de technologie supérieure, Montréal, QC.
- Gheitarani, N., Ghadarjani, R., Kahvand, M., & Mehrabadi, S. A. M. (2013). Explaining the Effective Measures in Decreasing the Vulnerability of Urban Area against Earthquake Using AHP Model (Case study: Tehran, a Metropolis). *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 3(8), 675-681.
- Gleyze, J. F. (2005). *La vulnérabilité structurelle des réseaux de transport dans un contexte de risques* Doctorat d'Analyse Théorique et Epistemologique en Géographie Université Paris 7, .
- Guerreiro, L., Azevedo, J. (2004). Seismic vulnerability assessment of highways and railroads -Application to the great Lisbon area. *13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada , August 1-6 2004, Paper No. 2035*.
- Guesdon, G. (2011). 5e. Méthodes et outils - Aide multicritère à la décision-Comparaison de Saaty: Faculté des sciences et de génie - Université Laval.
- Husdal, J. (2004). Reliability and Vulnerability versus cost and benefits [C]. *Proceeding of the Second International Symposium on Transportation Network Reliability (INSTR).Christchurch, New Zealand:[s.n.]*, 180-186.
- Ishita, R. P., & Khandaker, S. (2010). Application of Analytical Hierarchical Process and GIS in Earthquake Vulnerability Assessment: Case Study of Ward 37 and 69 in Dhaka City. *Bangladesh Institute of Planners*, 3, 103-112.
- Ishizaka, A., & Labib, A. (2009). Analytic Hierarchy Process and Expert Choice: Benefits and Limitations. *ORInsight*, , 22 (4), 201-220.
- Jenelius, E. (2010). Large-Scale Road Network Vulnerability Analysis. Doctoral Thesis in Infrastructure. *Division of Transport and Location Analysis- Sweden*, 8.
- Jenelius, E., Petersen, T., & Mattson, L.-G. (2006). Importance and exposure in road network vulnerability. *Transportation Research part A*, 40,, pp 537,560.
- JICA. (2002). The study on earthquake disaster mitigation in the Kathmandu Valley, Kingdom of Nepal, Final report, Volume 1 Summary March 2002.
- Kiremidjian, A., Moore, J., Yue Yue, F., Yazlali, O., Basoz, N., & Williams, M. (2007). Seismic Risk Assessment of Transportation Network Systems. *Journal of Earthquake Engineering Vol. 11, No. 3*, (1-12).
- Lagaros, N., Tsompanakis, Y., Psarropoulos, P., & Georgopoulos, E. (2009). Computationally efficient seismic fragility analysis of geostructures. . *Computers & Structures*, 87, 1195-1203.

- LESSLOSS. (2007). Risk Mitigation for Earthquakes and Landslides. Research Project, European Commission, Sixth Framework Programme, Priority 1.1.6.3, GlobalChange and Ecosystems, Contract Number: GOCE-CT-2003-505448.
- Lesueur, C. (2011). *Relation entre les mesures de mouvements du sol et les observations macrosismiques en France : Etude basée sur les données accélérométriques du RAP et les données macrosismiques du BCSF* Doctorat Université de Strasbourg, Spécialité Géophysique
- Machane, D., Guillier, B., Chatelin, J.-L., Bouillin, J. P., Guemache, M. A., Zetoutou, S., . . . Benelhadj, Z. (2009). Le séisme (M w = 5 ) de Laalam ( Kabylie , Algérie)du 20 mars 2006 : Prospection géologiques et géophysiques (bruit vibratoire ambiant) et corrélations avec les dommages. *Bulletin du Service Géologique National, 20*, 357-373.
- Majid, T. A., & Yousefi, A. (2012). Prioritization of Highway Bridges for Seismic Retrofitting Using Multi Criteria Decision Making. *Disaster Research Nexus, School of Civil Engineering, Universiti Sains Malaysia, Pulau, 15 WCEE Lisboa*.
- Maruyama, Y., Yamazaki, F., Mizuno, K., Tsuchiya, Y., & Yogai, H. (2010). Fragility curves for expressway embankments based on damage datasets after recent earthquakes in Japan. . *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30*, 1158-1167.
- McDonough, P. W. (2001). *The Nisqually, Washington, Earthquake of February 28, 2001: Lifeline Performance*: American Society of Civil Engineers.
- Melis, D., Maltinti, F. (2007). Developing vulnerability index for roads networks under hydrogeological events.  
<https://indico.conferences.dtu.dk/getFile.py/access?contribId=37&sessionId=60&resId=0&materialId=paper&confId=28>.
- Mohammadreza, Y., Mohammad. Zin, R., & Mohammadreza, V. (2012). A Model for Seismic Vulnerability Score Assignment of Road Infrastructure Using Linear Regression Technique. *Applied Mechanics and Materials 147* 266-269.
- Mouroux, P., Bertrand, E., Bour, M., Le Brun, B., Depinois, S., & Masure, P. (2004). The European RISKUE project: an advanced approach to earthquake risk scenarios. . *Proceedings of the 13th world conference on earthquake engineering, Vancouver, BC, Canada, paper 3329 (CD-Rom)*.
- MTP. (2012). Atlas du Réseau Routier de l'Algérie
- O'Connor, J. S., Mesa, L., & Nykamp, M. (2007). Damage to the highway system from the Pisco, Peru earthquake of August 15, 2007 *Technical report MCEER-07-0021 December, 10*
- Ouyed, M. (1981). *Le tremblement de terre d'El Asnam du 10 octobre 1980, Etude des répliques*. Doctorat, Université Scientifique et Médicale de Grenoble
- Panahi, M., F. Rezaie, F., & Meshkani, S. A. (2013). Seismic vulnerability assessment of school buildings in Tehran city based on AHP and GIS. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss, 1*, 4511-4538.
- Peng, Y. (2012). Regional earthquake vulnerability assessment using a combination of MCDM methods. *Annals of Operations Research* doi: 10.1007/s10479-012-1253-8
- Perrault, M. (2013). *Évaluation de la vulnérabilité sismique de bâtiments à partir de mesures in situ*. Doctorat Université de Grenoble
- Phillipponnat, G., & Hubert, B. (2005). *Fondations et Ouvrages en Terre* (Eyrolles ed.). Paris-France
- Pitilakis, K., Alexoudi, A., Argyroudis, S., Monge, O., & and Martin, C. (2006). Earthquake Risk Assessment of Lifelines. *Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 4 No.4*(Special Issue: The Risk-Ue Project (Ed. Atilla Ansal)), p. 365-390.
- Pitilakis, K., Alexoudi, A., Argyroudis, S., Monge, O., & Martin, C. (2005). Chapter 9: vulnerability assessment of lifelines. In: GoulaX, Oliveira CS, Roca A (eds) *Assessing and Managing Earthquake* In I. 1-4020-3524-1 (Ed.), *Risk Springer Publications*.
- Qunlin, J., Pengfei, B., & Qianqian, D. (2013). Risk Assessment on Beijing Urban Infrastructure Vulnerability. *Proceedings of the 2nd International Conference On Systems Engineering and Modeling (ICSEM-13)*.
- RADIUS. (1996). Assessment Tools for Diagnostic of Urban Areas against Seismic Disasters- Secrétariat IDNDR (International Decade for Natural Disaster Reduction ).
- RISK-UE. (2003). Vulnerability assessment of lifelines and essential facilities (WP06): methodological handbook - Appendix 1: Roadway transportation system *Report n°GTR-RSK 0101-152av7/Geo Ter*.

- Ritter, J. B. (2004). *Landslides and Slope Stability Analysis*.
- Roozbahani, A., Zahraie, B., & Tabesh, M. (2013). Integrated risk assessment of urban water supply systems from source to tap. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 27(4), 923-944.
- Rosyidi, Y. A. P., Aldiamar, F., Nazib, F., & Taha, M. R. (2011). Lesson Learned from Road Infrastructure Deterioration Caused by Earthquake 7.6 M. 180-187.
- Rousval, B., & Bouyssou, D. (2009). CAHIER DU LAMSADE 293 - De l'aide multicritère à la décision à l'aide multicritère à l'évaluation - Un cadre et une application aux transports et à l'environnement: Laboratoire d'Analyse et Modélisation de Systèmes pour l'Aide à la Décision CNRS FRE 3234.
- RPA-99. (2003). Règles Parasismiques Algériennes RPA 99 / Version 2003 *Document Technique Règlementaire DTR B C 2 48* Ministère de l'Habitat-CGS.
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: planning, priority setting resource*. Mc Graw, Hill, New York.
- Saaty, T. L. (2001). *Decision Making for Leaders* Pittsburgh: RWS Publications.
- Salmon, M., Wang, J., Jones, D., & Wu, C. (2003). Fragility Formulations for the BART System. Proc. of the 6th U.S. Conference on Lifeline Earthquake Engineering, TCLEE, Long Beach, August 10-13.
- Sarvar, H., Amini, J., & Laleh-Poor, M. (2011). Assessment of Risk Caused By Earthquake in Region 1 of Tehran Using the Combination of RADIUS, TOPSIS and AHP Models. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 1(1), 39-48
- Syner-G D2.1. (2009). Systemic Seismic Vulnerability and Risk Analysis for Buildings, Lifeline Networks and Infrastructures Safety Gain, Deliverable 2.1. D2.1 - General methodology for systemic vulnerability assessment, . In F.-E.-.-. Project No. 244061 (Ed.), *Norwegian Geotechnical Institute (NGI) - Seventh Framework Programme*
- Syner-G D3.7. (2009). Systemic Seismic Vulnerability and Risk Analysis for Buildings, Lifeline Networks and Infrastructures Safety Gain, Deliverable D3.7 - Fragility functions for roadway system elements *Norwegian Geotechnical Institute (NGI) - Seventh Framework Programme*
- Tampère, C., Stada, J., Immers, B., Peetermans, E., & Organe, K. (2007). Methodology for identifying vulnerable section in a national road network [Version électronique]. Transport research record. *The transportation research board* 1-10.
- Tang, A. K. (2013). Padang, West Sumatra, Indonesia, Earthquake of 2009: Lifeline Performance Vol. 37 de TCLEE Monograph. A. Publications (Ed.) (pp. 176).
- Taylor, M. A. P., & D'Este, G. M. (2003). Concepts of network vulnerability and applications to the identification of critical element of transportation infrastructure -. *26nd Australasian Transport Research Forum. Wellington, New Zealand, 1-3 October*.
- Taylor, M. A. P., Shekar, S. V. C., & D'Este, G. M. (2006). Application of accessibility based methods for vulnerability analysis of strategic road networks. *Networks and Spatial Economics*, 6(3-4) 267-291.
- Triantaphyllou, E., & Mann, S. H. (1995). Using the Analytic Hierarchy Process for Decision Making in Engineering Applications : Some Challenges *Inter'l Journal of Industrial Engineering: Applications and Practice*, 2 N°1, 35-44.
- Tung, P. T. (2004). *Road vulnerability assessment of earthquakes. Master of Science thesis, International Institute for Geo-information Science and Earth Observation Enschede, The Netherlands*.
- UNDRO. (1979). Natural Disasters and Vulnerability Analysis in Report of Expert Group Meeting (9-12 July 1979). (pp. 49). Geneva United Nations Disaster Relief Organization.
- Wang, Z. Z., & Zhang, Z. (2013). Seismic damage classification and risk assessment of mountain tunnels with a validation for the 2008 Wenchuan earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 45, 45-55.
- Werner, S. D., Cho, S., Taylor, G. E., & Lavoie, J. P. (2008). Use of Seismic Risk Analysis of Roadway Systems to Facilitate Performance-Based Engineering and Risk-Reduction Decision Making.
- Werner, S. D., Cho, S., Taylor, G. E., Moore, J. E., & Walton, J. S. (2000). A Risk-based methodology for assessing the seismic performance of highway systems
- Werner, S. D., Taylor, C. E., Cho, S., Lavoie, J. P., Huyck, C., Eitzel, C., . . . Eguchi, R. T. (2006). REDARS 2: Methodology and Software for Seismic Risk Analysis of Highway Systems *MCEER-06-SPO8*.

- World Bank. (2000). Ain Temouchent Emergency Earthquake Recovery Project (pp. 95).
- Yang, L., Qian,D. (2012). Vulnerability Analysis of Road Networks. . *Journal of transportation systems engineering and information technology, Volume 12* (1,February ), 105.
- Yanga, J., & Shia, P. (2002). Applying Analytic Hierarchy Process in Firm's Overall Performance Evaluation:A Case Study in China. *International journal of business, 7*(1).
- Yelles, C., A. K., Djellit, H., Beldjoudi, H., Bezzeghoud, M., & Buforn, E. (2004). The Ain Temouchent (Algeria) Earthquake of December 22 nd , 1999. *Pure and Applied Geophysics, 161*, 607-621.
- Yin, H.-Y., Xu,Li-Q. (2010). Measuring the structural vulnerability of road network : A network efficiency perspective. *J.Shanghai Jiaotong University and Springer-Verlag Berlin Heidelberg*.
- Zahaf, A., & Bensaibi, M. (2014). Seismic Vulnerability of Building Construction Site. *Journal of Civil Engineering and Architecture, ISSN 1934-7359, USA, 8*(1 (Serial No. 74)), 37-46.
- Zhang, J., Qu, H., Liao, Y., & Ma, Y. (2011). Seismic damage of earth structures of road engineering in the 2008 Wenchuan earthquake. *Environmental Earth Sciences, 65*, 987-993.

## ANNEXES

### Annexe 1

Echelle des dommages physiques des routes : Road Damage Scale (Anbazhagan et al., 2011)

Road damage scale	Damage description
1	Damage is in the form of many minute cracks, one or two moderate cracks not exceeding 20 mm width, slight damage of shoulders and food path. Very little repair work is usually necessary to restore road for full traffic. This damage is seen when roads are of good quality and usually expected in road located away from epicenter for larger magnitudes
2	Damage is in the form of settlement or moderate cracks, cracks or separation of pavement layers for width of less than 100 mm. Failure of sides and shoulder/footpath of the roads which reduces the road utility. Minor repair works have to be carried out to restore the road to its initial condition
3	A part of the road is damaged. Formation of big cracks and settlement of road is seen. Crack width may exceed more than 100 mm. Many bigger cracks in either one side or both sides of the road. Failure or crack can be attributed by liquefaction, landslide, fault rupture, and failure of subgrade and subbase. Road can be used by limited traffic. Considerable road repair works should be carried out
4	A portion of the road is rendered completely useless. Loose soil and debris are found all around. Road layers are washed away or slides. Damaged road can be used only for smooth walking or cycling. Vehicles cannot ply on the damaged stretch of the road and the stretch has to be completely rebuilt
5	Maximum damage occurs to a road during an earthquake. Damage of total width of road, road may not be useful for smooth walking and cycling. The roads are completely rendered useless and are totally inaccessible. Roads are damaged structurally and debris from landslides renders the road totally inaccessible. Complete relaying and rebuilding is needed

**Annexe 2:** Article paru: Second European Conference on Earthquake on Earthquake engineering and Seismology, Istanbul Aug 25-29,2014



## SEISMIC VULNERABILITY ASSESSMENT OF ROAD NETWORKS

Sonia ADAFER<sup>1</sup> and Mahmoud BENSAIBI<sup>2</sup>

### ABSTRACT

Past earthquakes showed the vulnerability of road networks under seismic event and highlighted the necessity to assess this vulnerability.

The aim of this study is to develop a vulnerability index (VI) for road networks. To achieve this goal, the most important parameters influencing the seismic behavior of roads are identified, based on the worldwide seismic feedback experience and data from past Algerian earthquakes (Ain Temouchent 1999 and Zemmouri 2003). A Multi Criterion Decision-Making (MCDM) method is used to define the VI. In the present study, the Analytical Hierarchy Process (AHP) allows the determination of weighting factors for each defined parameter. Two examples are processed and the obtained results show a good adequacy with in situ observations.

### INTRODUCTION

Roads play a fundamental role in transportation and during major disasters such as earthquakes, they allow emergency and recovery operations.

The need for studies on seismic vulnerability assessment of road networks was highlighted in (Argyroudis et al., 2005) (Yin and Xu, 2010) (Arsik and Sibel Salman, 2013).

Several studies were conducted on this topic (Berdica and Eliasson, 2004) (Tung, 2004) (D'Andrea et al., 2005) (Jenelius et al., 2006) (Kiremidjian et al., 2007) (Yin and Xu, 2010) (Yang and Qian, 2012) and methods for performing seismic scenarios were developed considering road networks (ATC-13, 1985) (ATC-25, 1991) (RADIUS, 1996) (JICA, 2002) (FEMA-NIBS, 2004) (RISK-UE, 2003) (Werner et al., 2006) (Syner-G D3.7, 2009).

In this study, a seismic vulnerability assessment of roads was performed using the vulnerability index method. For this purpose, the parameters affecting this vulnerability will be identified. Thereafter, the weighting coefficients of these parameters will be determined using the AHP (Analytical Hierarchy Process) method.

### VULNERABILITY INDEX METHOD

The approach using the vulnerability index method allows assessing roads vulnerability. It is based on the definition of an index resulting from an analytical expression that combines the main factors influencing the seismic behaviour of roads.

This method consists in gathering quantitative information to identify significant parameters in terms of vulnerability (D'Andrea et al., 2006) and seismic characteristics of the site (Wang and Zhang,

---

<sup>1</sup> Researcher student, National High School of Public Works, Algiers, Algeria, sbouafia@yahoo.fr

<sup>2</sup> Professor, National High School of Public Works, Algiers, Algeria, bensaibim@yahoo.co.uk

2013). Thereafter, values are assigned to these parameters. These values can be defined by experts based on feedback from past earthquakes. Therefore, the defined analytical expression generally includes weights. These weighting factors reflect the relative contribution of each parameter in the global vulnerability.

There are several methods for determining the weighting factors. In the present study, these factors will be calculated by applying an MCDM (Multi Criterion Decision Making) method. The use of MCDM responds to the need to take into account many qualitative and/or quantitative criteria with different nature and with unequal importance that differentially affect the vulnerability of road networks.

## ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS (AHP)

Several MCDM methods do exist. They are all used to aggregate many criteria and assess their relative importance. The AHP is one of the MCDM methods. Many researchers applied this method to assess seismic vulnerability of tunnels (Wang and Zhang, 2013), bridges (Mohammadreza et al., 2012), buildings (Ishita and Khandaker, 2010) (Panahi et al., 2013), buildings construction site (Zahaf and Bensaibi, 2014), lifelines (Qunlin et al., 2013) and of urban areas (Gheitarani et al., 2013). The AHP method was developed by Saaty (Saaty, 1980). This method uses a hierarchical structure with several levels of objectives, criteria, sub-criteria and alternatives. For each level of the hierarchy, pairwise comparisons are carried out. These binary comparisons allow constructing matrices that are used to obtain criteria weighting factors. These weights are derived by computing the eigenvector  $W$  using the following formula:

$$A.W = \lambda_{\max}.W \quad (1)$$

Where:

$A$  is the comparison matrix of rank  $n$ ,  $n$  the number of criteria and  $\lambda_{\max}$  the largest or principal eigenvalue of the pair wise comparison matrix.

Such us:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (2)$$

Saaty proposed to verify the consistency of comparisons in calculating a Consistency Ratio (CR) using formula (3). This ratio must be less than 0.1 (Saaty, 1980).

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

With  $RI$  the random index defined by Saaty and  $CI$  the Consistency Index calculated as follows:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n - 1)} \quad (4)$$

## PRINCIPLE OF THE PROPOSED METHOD

The proposed method follows three steps:

Step 1: Identification of the parameters that affect the vulnerability of roads

Step 2: Quantification of these parameters using the AHP method

### Step 3: Definition of a vulnerability index

The description of each step is given here after.

#### Step 1: Identification of parameters

Vulnerability of roads depends on their geometric and structural characteristics as well as geotechnical and seismic properties of the site. The parameters are defined on the basis of seismic experience feedback over the world (EERI/CTC, 1980) (EERI, 1991) (Erdik, 2000) (JICA, 2002) (Edwards, 2004) (Tung, 2004) (FHWA, 2004) (O'Connor et al., 2007) (Syner-G D3.7, 2009) (Chouw et al., 2011) (Anbazhagan et al., 2011) (Zhang et al., 2012) (Wang and Zhang, 2013) and Algeria observations following Ain Temouchent and Zemmouri earthquakes (CTTP, 1999) (CTTP, 2003). Thus lead to distinguish two types of parameters, Structural and Seismic one. These parameters are divided into items, which in turn are divided into factors and factors into categories. Finally, the aim is to prioritize and to determine a weighting coefficient for each one (Table.1).

Table 1. Proposed Hierarchy

Parameter	Item	Factor	Category
Structural	Pavement	Number of lanes	> 2 lanes
			≤ 2 lanes
		Pavement Type	Paved
			Unpaved
	Embankment	Height	H ≤ 2 m
			2m < H ≤ 5m
			5m < H ≤ 8m
			H > 8m
		Compaction quality	Compliant with standards
			Compliant with technical provisions
			Other
		Slope	< 2/3
	= 2/3		
	> 2/3		
	Ground conditions	Ground Type	Rock
			Hard soil
			Soft soil
			Very soft soil
		Landslides potential	Low
			Medium
Maintenance conditions	Pavement conditions	High	
		Medium	
		Low	
	Slope protection measures	Compliant with standards	
		Compliant with technical provisions	
		Without any protections	
Hazard	Seismic intensity	MMI < VIII	
		VIII ≤ MMI < IX	
		IX ≤ MMI < X	
		X ≤ MMI < XI	
		XI ≤ MMI	
	Liquefaction potential	0 ≤ PL ≤ 5	
		5 < PL ≤ 15	
		15 < PL	
	Intersection with Fault	No intersection	
		Intersection	

#### Step 2: Quantification of parameters

A score is assigned to each category as given in Table.2.

Table 2. Assigned Scores

Factor	Category	Score
Number of lanes	> 2 lanes	20
	≤ 2 lanes	40
Pavement Type	Paved	20
	Unpaved	50
Height	H ≤ 2 m	10
	2m < H ≤ 5m	30
	5m < H ≤ 8m	40
	H > 8m	50
Compaction quality	Compliant with standards	10
	Compliant with technical provisions	30
	Other	40
Slope	< 2/3	10
	= 2/3	30
	> 2/3	50
Ground Type	Rock	0
	Hard soil	10
	Soft soil	40
	Very soft soil	50
Landslides potential	Low	10
	Medium	30
	High	50
Pavement conditions	High	10
	Medium	20
	Low	40
Slope protection measures	Compliant with standards	20
	Compliant with technical provisions	30
	Without any protections	50
Seismic intensity	MMI < VIII	10
	VIII ≤ MMI < IX	20
	IX ≤ MMI < X	30
	X ≤ MMI < XI	40
	XI ≤ MMI	50
Liquefaction potential	0 ≤ PL ≤ 5	10
	5 < PL ≤ 15	30
	15 < PL	50
Intersection with Fault	No Intersection	10
	Intersection	40

The following weights are obtained using the AHP method for each level (parameters, items and factors) (Table.3).

Table 3. Weighting coefficients

Parameter	Weight	Item	Weight	Factor	Weight
Structural	0.250	Pavement	0.108	Number of lanes	0.667
				Pavement Type	0.333
		Embankment	0.283	Height	0.648
				Compaction quality	0.122
				Slope	0.230
		Ground conditions	0.561	Ground Type	0.200
				Landslides potential	0.800
		Maintenance conditions	0.048	Pavement conditions	0.667
				Slope protection measures	0.333
		Hazard	0.750	Seismic intensity	0.633
Liquefaction potential	0.106			-	-
Intersection with Fault	0.261			-	-

### Step 3: Definition of a vulnerability index VI

Based on the weighting coefficients given above (Table.3) and the assigned scores (Table.2), the vulnerability Index VI is calculated as follows:

$$VI = \sum_{i=1}^2 W_i \sum_{j=1}^{3 \text{ or } 4} W_{ij} \sum_{k=1}^{2 \text{ or } 3} C_{ijkl} W_{ijk} \quad (5)$$

With:

$W_i$  the weighting coefficient of structural or hazard parameters,

$W_{ij}$  the weighting coefficient of items,

$W_{ijk}$  the weighting coefficient of factors, where  $W_{ijk}=1$  if  $i=2$

and  $C_{ijkl}$  the score of category, where  $1 = 2$  or  $3$  or  $4$  or  $5$ .

## APPLICATION

Two case studies have been treated. The studied roads are located in the town of Ain Temouchent. On 22 December 1999 an earthquake (MMI =VII) occurred and damaged these roads.

Case study 1:

This case study is related to a national road section (RN35) located at Ain Temouchent at the kilometer marker 2+800. This road links Ain Temouchent to Tlemcen a big City in the North-West of Algeria. This road section crosses a soft soil and includes an average embankment ( $H=5m$ ). Data regarding this road are given in Table.4.

Table 4. Characteristics of case study 1

Factor	Category	Case study 1 characteristics
Number of lanes	$> 2$ lanes	X
	$\leq 2$ lanes	
Pavement Type	Paved	X
	Unpaved	
Height	$H \leq 2$ m	
	$2m < H \leq 5m$	X
	$5m < H \leq 8m$	
	$H > 8m$	
Compaction quality	Compliant with standards	
	Compliant with technical provisions	X
	Other	
Slope	$< 2/3$	
	$= 2/3$	
	$> 2/3$	X
Ground Type	Rock	
	Hard soil	
	Soft soil	X
	Very soft soil	
Landslides potential	Low	X
	Medium	
	High	
Pavement conditions	High	
	Medium	X
	Low	
Slope protection measures	Compliant with standards	
	Compliant with technical provisions	X
	Without any protections	
Seismic intensity	$MMI < VIII$	X
	$VIII \leq MMI < IX$	
	$IX \leq MMI < X$	
	$X \leq MMI < XI$	
	$XI \leq MMI$	
Liquefaction potential	$0 < PL \leq 5$	X
	$5 < PL \leq 15$	
	$15 < PL$	
Intersection with Fault	No intersection	X
	Intersection	

The obtained vulnerability index (VI) using eq.(5) is equal to 13.011

#### Case study 2

This case study is related to a national road section (RN35) located in the suburb of Ain Temouchent at the kilometer marker 16+000. This road section crosses a soft soil and includes a high embankment ( $H=8m$ ). Data are given in Table.5.

Table 5. Characteristics of case study 2

Factor	Category	Case study 2 characteristics
Number of lanes	> 2 lanes	X
	≤ 2 lanes	
Pavement Type	Paved	X
	Unpaved	
Height	$H \leq 2$ m	
	$2\text{m} < H \leq 5\text{m}$	
	$5\text{m} < H \leq 8\text{m}$	X
	$H > 8\text{m}$	
Compaction quality	Compliant with standards	
	Compliant with technical provisions	
	Other	X
Slope	$< 2/3$	
	$= 2/3$	
	$> 2/3$	X
Ground Type	Rock	
	Hard soil	
	Soft soil	X
	Very soft soil	
Landslides potential	Low	X
	Medium	
	High	
Pavement conditions	High	
	Medium	
	Low	X
Slope protection measures	Compliant with standards	
	Compliant with technical provisions	
	Without any protections	X
Seismic intensity	$\text{MMI} < \text{VIII}$	X
	$\text{VIII} \leq \text{MMI} < \text{IX}$	
	$\text{IX} \leq \text{MMI} < \text{X}$	
	$\text{X} \leq \text{MMI} < \text{XI}$	
	$\text{XI} \leq \text{MMI}$	
Liquefaction potential	$0 \leq \text{PL} \leq 5$	X
	$5 < \text{PL} \leq 15$	
	$15 < \text{PL}$	
Intersection with Fault	No intersection	X
	Intersection	

The obtained vulnerability index (VI) using eq.(5) is equal to 13.794

As it can be noticed the second value of the VI is greater than the first one, thus road section 2 is more vulnerable. This is due to the height of embankment and the lack of slope protection measures. Furthermore, the quality of embankment compaction materials is poorly than in the case study 1. The result of this study is in a good adequacy with in-situ observations. In fact, road section 2 suffered significant damages and great retrofitting activities were necessary after the quake (CTTP, 1999).

## CONCLUSIONS

A seismic vulnerability assessment method for road networks has been developed. This method enables computing a vulnerability index for road sections. This index gives an idea about the seismic behavior of the road section under study. Therefore, the method can be used as a diagnosis tool in

order to classify roads according to their seismic vulnerability and for prioritizing their retrofiting activities. It can also be used as a tool for emergency management and urban planning.

## REFERENCES

- Anbazhagan P, Srinivas S, Chandran D (2011) "Classification of road damage due to earthquakes", *Natural Hazards*, 60(2): 425-460
- Argyroudis SA, Ptilakis KD, Anastasiadis AI. (2005). "Roadway Network Seismic Risk Analysis in Urban Areas : The case of Thessaloniki - Greece", *Geoline*, Lyon, France, 23-25 May
- Arsık I and Sibel Salman F (2013) "Modeling Earthquake Vulnerability of Highway Networks", *Electronic Notes in Discrete Mathematics* 41 (1): 319-326
- ATC-13 (1985) Earthquake Damage Evaluation Data for California, Applied Technology Council, USA
- ATC-25 (1991) Seismic Vulnerability and Impact of Disruption of Lifelines in the Conterminous United States, Applied Technology Council, USA
- Berdica K and Eliasson J (2004) "Regional accessibility analysis from a vulnerability perspective", *2<sup>nd</sup> International Symposium on Transportation Network Reliability*: 89 - 95
- Chouw N, Hong Hao H, Goldsworthy H (2011) Some observations of damage in the 22<sup>nd</sup> February Christchurch earthquake, Australian Earthquake Engineering Society, Earthquake Reconnaissance Report, New Zealand
- CTTP (1999) Road networks expertise following the Ain Temouchent Earthquake of 22/12/99, Algeria
- CTTP (2003) Road networks diagnosis following the Boumedes Earthquake of 21/05/2003, Algeria
- D'Andrea A, Cafiso S, Condorelli A (2005) "Methodological Considerations for the Evaluation of Seismic Risk on Road Network", *Pure and Applied Geophysics*, 162(4): 767-782
- D'Andrea A, Cafiso S, Condorelli A (2006) Valutazione del rischio sismico di infrastrutture viarie urbane: analisi funzionale della rete in condizioni di emergenza, AIPCR - Comitato Nazionale Italiano - XXV *Convegno Nazionale Stradale*, Napoli, Italy, 4-7 ottobre
- Edwards CL (2004). Zemmouri, Algeria, M<sub>w</sub> 6.8 Earthquake of may 21, 2003, Technical Council of lifeline Earthquake Engineering TCLEE Monographs 27, USA
- EERI (1991) Costa Rica Earthquake of april 22, 1991, EERI Special earthquake report, USA
- EERI/CTC (1980) Preliminary Reconnaissance Report El Asnam Earthquake, Algeria 10<sup>th</sup> 1980, Earthquake Engineering Research Institute, USA
- Erdik M (2000) Report on 1999 Kocaeli and Duzce (Turkey) earthquakes, University, Dept. of Earthquake Engineering, Istanbul, Turkey
- FEMA-NIBS (2004) Hazard US Earthquake Loss Estimation Methodology. National Institute of Building Sciences, NIBS document 5200-03, Washington, DC
- FHWA (2004) Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures, Federal Highway Administration Part 2, US Department of transportation, USA
- Gheitarani N, Ghadarjani R, Kahvand M, Mehrabadi SAM (2013) "Explaining the Effective Measures in Decreasing the Vulnerability of Urban Area against Earthquake Using AHP Model (Case study: Tehran, a Metropolis)", *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 3(8): 675-681
- Ishita RP and Khandaker S (2010) "Application of Analytical Hierarchical Process and GIS in Earthquake Vulnerability Assessment: Case Study of Ward 37 and 69 in Dhaka City", *Bangladesh Institute of Planners*, 3: 103-112
- Jenelius E, Petersen T, Mattson LG (2006) "Importance and exposure in road network vulnerability", *Transportation Research part A: Policy and Practice*, 40(7): 537-560
- JICA (2002) The study on earthquake disaster mitigation in the Kathmandu Valley, Nippon Koei Co LTD, Final report, Kingdom of Nepal
- Kiremidjian A, Moore J, Yue F, Yazlali O, Basoz N, Williams M (2007) " Seismic Risk Assessment of Transportation Network Systems", *Journal of Earthquake Engineering* 1(3): 1-12
- Mohammadreza Y, Mohammad Zin R, Mohammadreza V (2012) "A Model for Seismic Vulnerability Score Assignment of Road Infrastructure Using Linear Regression Technique", *Applied Mechanics and Materials* 147: 266-269
- O'Connor JS, Mesa L, Nykamp M (2007) Damage to the highway system from the Pisco, Peru earthquake of August 15, 2007, Technical report MCEER-07-0021, New York, USA
- Panahi M, Rezaie F, Meshkani SA (2013) "Seismic vulnerability assessment of school buildings in Tehran city based on AHP and GIS", *Nat. Hazards Earth Syst Sci. Discuss*, 1: 4511-4538
- Qunlin J, Pengfei B, Qianqian D (2013) "Risk Assessment on Beijing Urban Infrastructure Vulnerability", *Proceedings of the 2nd International Conference On Systems Engineering and Modeling (ICSEM-13)*: 45-50

- RADIUS (1996) Assessment Tools for Diagnostic of Urban Areas against Seismic Disasters, Secrétariat IDNDR (International Decade for Natural Disaster Reduction ),United Nations
- RISK-UE (2003) Vulnerability assessment of lifelines and essential facilities (WP06): methodological handbook Appendix 1:Roadway transportation system, Report n°GTR-RSK 0101-152av7/Geo Ter,UE
- Saaty TL (1980) The analytic hierarchy process:planning,priority setting resource allocation, Mc Graw-Hill, NewYork
- Syner-G D3.7 (2009) Systemic Seismic Vulnerability and Risk Analysis for Buildings, Lifeline Networks and Infrastructures Safety Gain, Deliverable D3.7 - Fragility functions for roadway system elements, Norwegian Geotechnical Institute (NGI) - Seventh Framework Programme,UE
- Tung PT (2004) Road vulnerability assessment of earthquakes, Master of Science.Thesis,International Institute for Geo-information,Science and Earth Observation Enschede,The Netherlands
- Wang ZZ and Zhang Z (2013) "Seismic damage classification and risk assessment of mountain tunnels with a validation for the 2008 Wenchuan earthquake", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 45: 45-55
- Werner SD, Cho S, Taylor GE, Lavoie JP (2006) "Use of Seismic Risk Analysis of Roadway Systems to Facilitate Performance-Based Engineering and Risk-Reduction Decision Making", *Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research*
- Yang L and Qian D (2012) "Vulnerability Analysis of Road Networks", *Journal of transportation systems engeneering and information technology*, 12 (1): 105
- Yin HY and Xu LQ (2010) "Measuring the structural vulnerability of road network : A network efficiency perspective", *J.Shanghai Jiaotong University and Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 15(6): 736-742
- Zahaf A and Bensaibi M (2014) "Seismic Vulnerability of Building Construction Site", *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 8(1): 37-46
- Zhang J, Qu H, Liao Y, Ma Y (2012) "Seismic damage of earth structures of road engineering in the 2008 Wenchuan earthquake", *Environmental Earth Sciences*, 65(4): 987-993