

EVALUATION DE LA VULNERABILITE SISMIQUE DES ROUTES

SONIA ADAFER¹ & MAHMOUD Bensaïbi²

¹ Magister, Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics, Kouba, Algérie

² Professeur, Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics, Kouba, Algérie

RÉSUMÉ

Le retour d'expérience sismique a mis en évidence la vulnérabilité des réseaux routiers vis-à-vis de l'action sismique et a souligné l'importance de l'évaluer.

Le but de cette étude est de développer un indice de vulnérabilité (I_v) pour le réseau routier. Pour ce faire, les paramètres ayant une influence sur le comportement sismique des routes ont été identifiés en se basant sur le retour d'expérience sismique à travers le monde et en Algérie (Aïn Temouchent 1999, Zemouri 2003). Afin de définir l' I_v , une méthode d'analyse multicritère (MCDM) a été utilisée. Elle permet la détermination des coefficients de pondération pour chaque paramètre identifié. Plusieurs exemples de routes ont été traités afin de montrer l'efficacité de la méthode.

1. INTRODUCTION

Les routes jouent un rôle fondamental dans le transport des personnes, des biens et des marchandises. De plus, lors de catastrophes majeures elles permettent d'acheminer les secours dans les zones sinistrées, de faciliter le transport des victimes et des blessés. Après la catastrophe, elles permettent la réhabilitation et la reconstruction des infrastructures endommagées et favorisent également la reprise des activités sociales et économiques. (Jenelius et al., 2006).

Les séismes destructeurs passés ont mis en évidence la vulnérabilité des routes et la nécessité de l'évaluer (Argyroudis et al., 2005) (Yin & Xu, 2010) (Arsik & Sibel Salman, 2013).

Plusieurs études ont été menées sur le sujet (Melis & Maltinti, 2007) (Yin & Xu, 2010) (Yang & Qian, 2012) (Berdica and Eliasson, 2004) (D'Andrea et al., 2005) (Werner et al., 2006). Des méthodes permettant de réaliser des scénarii sismiques ont été aussi développées en considérant le réseau routier (ATC-13, 1985) (ATC-25, 1991) (RADIUS, 1996) (JICA, 2002) (RISK-UE, 2004) (Synerg D3.7, 2009).

Dans le cadre de cette étude, nous proposons d'évaluer la vulnérabilité des routes en utilisant la méthode de l'indice de vulnérabilité. A cet effet, les paramètres ayant une influence sur cette vulnérabilité seront identifiés. Par la suite des coefficients de pondération de ces paramètres seront déterminés en utilisant la méthode AHP (Analytical Hierarchy Process).

2. MÉTHODE DE L'INDICE DE VULNÉRABILITÉ

L'approche utilisant l'indice de vulnérabilité vise à évaluer la vulnérabilité des routes en se basant sur la définition d'un indice résultant d'une expression analytique qui combine les principaux facteurs qui influent sur le comportement sismique des routes.

Cette méthode consiste en la collecte quantitative d'informations dans le but de définir des paramètres significatifs en termes de vulnérabilité (D'Andrea et al., 2006) et les caractéristiques sismiques du site (Wang & Zhang, 2013). Par la suite, des valeurs sont attribuées aux paramètres définis. Ces valeurs peuvent être définies par des experts en se basant sur le retour d'expérience des tremblements de terre passés. Par conséquent, l'expression analytique définie comprend généralement des coefficients de pondération. Ces coefficients permettent de tenir compte de la contribution relative de chaque paramètre dans la vulnérabilité totale.

Plusieurs méthodes permettent de déterminer ces coefficients de pondération. Dans la présente étude, ces coefficients seront calculés en appliquant une méthode d'analyse multicritère MCDM (Multi Criterion Decision Making).

Le recours à une MCDM répond à la nécessité de prise en compte de nombreux critères de nature qualitative et/ou quantitative et d'importance inégale qui influent différemment sur la vulnérabilité du réseau routier.

3. PROCESSUS D'ANALYSE HIÉRARCHIQUE (AHP)

Les méthodes d'analyse multicritère sont nombreuses et différentes par leur approche. Toutefois, elles sont toutes utilisées pour agréger plusieurs critères et estimer leur importance relative. La méthode AHP 'Analytic Hierarchy Process' est une MCDM. Elle a été récemment utilisée par plusieurs chercheurs dans le cadre de l'évaluation de la vulnérabilité sismique notamment des tunnels (Wang & Zhang, 2013), des ponts (Mohammadreza et al., 2012), des bâtiments (Ishita & Khandaker, 2010) (Panahi et al., 2013) des chantiers de réalisation (Zahaf & Bensaïbi, 2014), des réseaux (Quilin et al., 2013) et des zones urbaines (Gheitarani et al., 2013). Elle sera utilisée dans le cadre de cette étude pour les routes.

L'AHP a été développée par Saaty (Saaty, 1980). Cette méthode 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 permettent de construire des matrices qui sont utilisées pour obtenir les poids d'importance des critères.

Ces poids sont obtenus en calculant les vecteurs propres W par :

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

où :

A est la matrice de comparaison d'ordre n , n est aussi le nombre de critères ;

λ_{\max} est la valeur propre maximale de la matrice de comparaison ;

W est le vecteur propre normalisé ou vecteur « Poids » tel que :

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

avec : w_i composantes du vecteur « Poids » W , où $i=1, \dots, n$

Saaty propose de vérifier la cohérence des comparaisons en calculant le ratio de cohérence RC (Consistency Ratio : CR) par l'expression (3). Ce ratio doit être inférieur à 0.1 (Saaty, 2001).

En utilisant la méthode AHP pour chaque niveau, c'est à dire pour les facteurs, les rubriques et les paramètres, on aboutit aux pondérations suivantes (Tableau 3).

Paramètre	Poids	Rubrique	Poids	Facteur	Poids
Structurel	0,78	Chaussée	0,186	Nombre de voies	0,067
				Type de chaussée	0,111
		Remblai	0,197	Hauteur	0,030
				Qualité de compactage	0,024
				Pente	0,136
		Conditions de sol	0,161	Nature de sol	0,240
				Potential de glissement	0,060
		Conditions de Maintenance	0,160	Etat de la chaussée	0,067
Dispositifs de protection des pentes	0,111				
Autre (sismog)	0,220	Intensité de sismog	0,011	-	-
		Potential de liquéfaction	0,106	-	-
		Intersection route-faïte	0,103	-	-

Tableau 3 : Coefficients de pondération

Etape 3 : Définition de l'indice de vulnérabilité

Sur la base des coefficients de pondération donnés ci-dessus (Tableau 3), les scores assignés (Tableau 2), et en posant W_i le coefficient de pondération du paramètre structural ou sismique, W_{ij} le coefficient de pondération de la rubrique, W_{ijk} le coefficient de pondération du facteur et C_{ijkl} le score attribué à la catégorie, l'indice de vulnérabilité peut être calculé par l'expression suivante :

$$IV = \sum_{l=1}^2 W_l \sum_{j=1}^3 W_{lj} \sum_{k=1}^2 C_{ljk} * W_{ljk} \quad (5)$$

avec :

$$W_{ljk} = 1 \text{ si } i = 2$$

et C_{ljk} : score de la catégorie où :

$l = 2$ pour les catégories des facteurs : nombre de voies, type de chaussée et intersection route-faïte ;

$l = 3$ pour les catégories des facteurs : qualité de compactage, pente, état de la chaussée, potentiel de glissement, dispositifs de protection des pentes et potentiel de liquéfaction ;

$l = 4$ pour les catégories des facteurs : hauteur et nature de sol ;

$l = 5$ pour les catégories du facteur : intensité.

Application

Plusieurs cas d'études ont été traités et nous présentons quatre d'entre eux. Les sections de routes étudiées sont situées dans la wilaya de Ain Temouchent. Le 22 décembre 1999 un séisme d'intensité MMI = 7 s'est produit et a endommagé ces sections de routes.

Cas 1 :

Il s'agit d'une section de la route nationale RN35 située entre le PK 2+800 et le PK 2+950. Elle traverse un sol meuble et comporte un remblai de faible hauteur ($H = 6m$). Les caractéristiques sont données dans le tableau 4.

Facteur	Catégorie	Caractéristiques
Nombre de voies	≥ 2 voies	-
	≤ 2 voies	+
Type de chaussée	Revêtue	+
	Non revêtue	-
Hauteur	$H \leq 2m$	-
	$2m < H \leq 5m$	-
	$5m < H \leq 8m$	+
	$H > 8m$	-
Qualité de compactage	Conformes aux normes	-
	Conformes aux dispositions techniques	-
	Autres (non imperméables)	+
Pente	$\leq 2\%$	-
	$> 2\%$	-
	$\geq 2\%$	+
Nature de sol	Rocheux	-
	Sol ferme	-
	Sol meuble	+
	Sol très meuble	-
Potential de glissement	Faible	+
	Moyen	-
Etat de la chaussée	Médiocre	-
	Élevé	-
	Dun	+
Dispositifs de protection des pentes	Moyen	+
	Élevé	-
	Médiocre	-
Intensité de sismog	Conformes aux normes	-
	Conformes aux dispositions techniques	-
	Sans dispositifs de protection	+
	MMI = VIII	+
Potential de liquéfaction	VIII = MMI = IX	-
	IX = MMI = X	-
	X = MMI = XI	-
	XI = MMI	-
	$0 < PL \leq 5$	+
Intersection route-faïte	$5 < PL \leq 15$	-
	$15 < PL$	+
Intersection route-faïte	Fas d'interaction	+
	Interaction	-

Tableau 4 : Caractéristiques du cas d'étude 1

En utilisant l'équation (5), l'indice de vulnérabilité obtenu est égal à 13.92.

Cas 2 :

Il s'agit d'une section de la route nationale RN35 située entre le PK 5+500 et le PK 5+650. Elle traverse un sol meuble et comporte un remblai épais ($H=2m$). Les caractéristiques sont données dans le tableau 5.

Facteur	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	
Qualité du compactage	Conformes aux normes Conformes aux dispositions techniques	
	Autres (non répertoriées)	
Pente	< 2%	•
	= 2%	
	> 2%	
Nature de sol	Rocher	•
	Sol ferme	
	Sol meuble	
	Sol très meuble	
Potentiel de glissement	Faible	•
	Moyen	
	Élevé	
État de la chaussée	Bon	•
	Moyen	
	Médiocre	
Dispositifs de protection des pentes	Conformes aux normes Conformes aux dispositions techniques	•
	Sans dispositifs de protection	
	MMI < VIII	
Intensité du séisme	VIII < MMI < IX	•
	IX < MMI < X	
	X < MMI < XI	
	XI < MMI	
	0 < PL < 5	
Potentiel de Liquéfaction	5 < PL < 15	•
	15 < PL	
	Pas d'intersection	
Intersection route-faïte	Intersection	•

Tableau 5: Caractéristiques du cas d'étude 2

En utilisant l'équation (5), l'indice de vulnérabilité trouvé est égal à 12.22.

Cas 3 :

Il s'agit d'une section de la route nationale RN35 située entre le PK 5+900 et le PK 6+150. Elle traverse un sol meuble et comporte un remblai épais (H=10m). Les caractéristiques sont données dans le tableau 6.

Facteur	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	Conformes aux normes Conformes aux dispositions techniques	•
	Autres (non répertoriées)	
	< 2%	
Pente	= 2%	•
	> 2%	
	Rocher	
Sol ferme		
Sol meuble		
Sol très meuble		
Potentiel de glissement	Faible	•
	Moyen	
	Élevé	
État de la chaussée	Bon	•
	Moyen	
	Médiocre	
Dispositifs de protection des pentes	Conformes aux normes Conformes aux dispositions techniques	•
	Sans dispositifs de protection	
	MMI < VIII	
Intensité du séisme	VIII < MMI < IX	•
	IX < MMI < X	
	X < MMI < XI	
	XI < MMI	
	0 < PL < 5	
Potentiel de Liquéfaction	5 < PL < 15	•
	15 < PL	
	Pas d'intersection	
Intersection route-faïte	Intersection	•

Tableau 6: Caractéristiques du cas d'étude 3

En utilisant l'équation (5), l'indice de vulnérabilité trouvé est égal à 14.45.

Cas 4 :

Il s'agit d'une section de la route nationale RN35 située entre le PK 20+200 et le PK 20+300. Elle traverse un sol meuble et comporte un remblai épais (H=3m). Les caractéristiques sont données dans le tableau 7.

Facteur	Catégorie	Caractéristiques
Nombre de voies	> 2 voies	*
	≤ 2 voies	
Type de chaussée	Revêtement	*
	Non revêtue	
Hauteur	H ≤ 2m	*
	2m < H ≤ 3m	
	3m < H ≤ 5m	
	H > 5m	
Qualité du compactage	Conformes aux normes	-
	Conformes aux dispositions techniques	
	Autres (avec répétitions)	
Pente	≤ 2%	*
	> 2%	
	> 3%	
Nature de sol	Rocher	*
	Sol ferme	
	Sol meuble	
	Sol très meuble	
Potential de glissement	Stable	*
	Médian	
	Déjà	
Etat de la chaussée	Moyen	*
	Médiocre	
Dispositifs de protection des pentes	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	
	XI = MMI	
Potential de Liquidation	5 = PL ≤ 15	*
	15 < PL	
Intersection route-bûche	Pas d'intersection	*
	Intersection	

Tableau 7: Caractéristiques du cas d'étude 4

En utilisant l'équation (5), l'indice de vulnérabilité trouvé est égal à 13.21.

Les indices de vulnérabilité obtenus pour les différentes sections étudiées sont reportés dans le Tableau 8.

Section	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
IV	13.92	12.22	14.45	13.21

Tableau 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).

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.

Les résultats obtenus par cette méthode sont en parfaite adéquation avec les observations in-situ. En effet, selon

l'expertise du CTTIP, les sections de routes des cas 2 et 4 ont été classées en degré de gravité 1 et ont nécessité quelques réparations mineures. Par contre les sections des cas 1 et 3 ont été classées en degré de gravité 2 et ont nécessité des travaux de réhabilitation importants après le séisme (CTTP, 1999).

6-CONCLUSION

Une méthode d'estimation de la vulnérabilité sismique des routes a été développée. C'est une méthode originale qui a été appliquée dans un contexte algérien. Elle est basée sur 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 paramètres. Une expression analytique de l'indice de vulnérabilité a été proposée. La méthode développée permet ainsi de calculer un indice de vulnérabilité d'un tronçon routier quelconque en prenant en compte ses caractéristiques. Cet indice nous renseigne sur le comportement de la route en cas d'un séisme. Ceci permet d'utiliser cette méthode comme outil de diagnostic pour la priorisation des réparations. Elle peut être aussi un outil de planification pour la gestion des secours et dans le cadre de l'aménagement du territoire.

RÉFÉRENCES

- Anbazhagan, P., Srinivas, S., & Chandran, D. (2011). Classification of road damage due to earthquakes. *Natural Hazards*, 60(2), 425-460.
- Argyroudis, S. A., Pitilakis, K. D., & Anastasiadis, A. I. (2005). *Roadway Network Seismic Risk Analysis in Urban Areas: The case of Thessaloniki - Greece*. Paper presented at the Goolina, Lyon, France.
- Arsak, I., & 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.
- Chouw, N., Hong Hao, H., & Goldsworthy, H. (2011). *Some observations of damage in the 22nd February Christchurch earthquake*. Australian Earthquake Engineering Society, Earthquake Reconnaissance Report, New Zealand.
- CTTP. (1999). *Road networks expertise of Ain Temouchent following the earthquake of 22/12/99*, Algeria.
- CTTP. (2003). *Road networks diagnosis of Boumedien following the 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.
- Durville, J. L., Méneroud, J.P. (1987). Vulnérabilité aux séismes des itinéraires routiers. *Bulletin de l'Association 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 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^e 1980*. Earthquake Engineering Research Institute, USA.
- 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, 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.
- 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.
- Jenelius, E., Petersen, T., & Mattson, L. G. (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.
- Melis, D., & Maltinti, F. (2007). Developing vulnerability index for roads networks under hidrogeological 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.
- 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, New York, USA.
- 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.*, 7, 4511-4538.
- Pitilakis, K., Alexoudi, A., Argyroudis, S., Monge, O., & 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 L 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), United Nations
- RISK-UE. (2004). *An Advanced Approach to Earthquake Risk Scenarios with Applications to Different European Towns*. Research Project, European Commission, .
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: planning, priority setting resources*. Mc Graw, Hill, New York.
- Saaty, T. L. (2001). *Decision Making for Leaders* Pittsburgh: RWS Publications.
- 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, P. T. (2004). *Road vulnerability assessment of earthquakes*. Master of Science, Thesis, International Institute for Geo-information, Science and Earth Observation Enschede, The Netherlands.
- 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*, 43, 43-55.
- 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-SP08*.
- Yang, L., & Qian, D. (2012). Vulnerability Analysis of Road Networks. *Journal of transportation systems engineering and information technology*, 12 (1), 105.
- Yin, H., & Xu, L. (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., & Bensaihi, 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. (2012). Seismic damage of earth structures of road engineering in the 2008 Wenchuan earthquake. *Environmental Earth Sciences*, 65(4), 987-993.