

ESTIMATION DE L'INDICE DE VULNÉRABILITE SISMIQUE POUR LES PONTS

M. BENSAIBI¹, M.C. DJEMAI²

¹Université Saad Dahleb, Blida, Algérie, e-mail : bensaibim@yahoo.co.uk

²Université Saad Dahleb, Blida, Algérie, e-mail : djmai.medcherif@gmail.com

RÉSUMÉ : La vulnérabilité sismique des ouvrages d'art est une priorité pour les gestionnaires. Aussi, il convient de disposer d'un outil fiable permettant d'appréhender le sujet. A cet effet, une méthode d'évaluation de la vulnérabilité des ponts a été mise en œuvre. Cette méthode se base sur le principe de l'indice de vulnérabilité. Cet indice est un estimateur de l'état du pont. Il est fondé sur un certain nombre de paramètres développés par Kubo et Katayama. Ces paramètres sont affectés d'un coefficient exprimant leur comportement vis-à-vis de l'action sismique. Une classification des ponts étudiés a été mise en œuvre dans un programme Delphi sur la base de l'estimation de leur indice de vulnérabilité. Une tentative d'ajout d'autres paramètres a été réalisée. Plusieurs exemples de ponts sur les Wilaya d'Alger et de Tipaza ont été étudiés.

Mots - Clés : Vulnérabilité - Pont - Ouvrage d'art - Séisme.

1. Introduction

Les ouvrages d'art sont des moyens très importants dans l'infrastructure routière et ferroviaire, dont le coût, les délais de leurs constructions et leur correction sont très élevés. Aussi, leur rupture et mise hors service suite à des tremblements de terre occasionnent des pertes considérables.

Afin de prédire le niveau d'endommagement subi par les ponts durant et après des secousses sismiques, des études de la vulnérabilité sismique sont recommandées. Cette vulnérabilité peut être estimée par plusieurs méthodes. Ces dernières reposent sur la définition d'un aléa sismique régional et local, sur les caractéristiques mécaniques du pont et du sol d'assise pour estimer l'état de l'ouvrage vis-à-vis des séismes.

Parmi les méthodes d'estimation de la vulnérabilité sismique des ponts nous avons :

- La méthode «IQOA» (Image de la Qualité des Ouvrages d'Art) élaborée par l'organisme français SETRA (Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes). Dans cette méthode les ponts sont caractérisés par cinq classes exprimant l'état de l'ouvrage et de ses équipements, plus une mention spéciale en cas d'urgence. [1]

- Méthode «NYDOT» développée par le «New York Département of Transportation», en 1995. Elle utilise un algorithme de classification des ponts et viaducs pour regrouper les ouvrages selon leurs caractéristiques structurales sans prendre en considération l'aléa sismique régional ou local. Elle comporte quatre classes de vulnérabilité qui correspond à des niveaux d'intervention sur les ponts allant de l'intervention très urgente à celle différée. [2]

- Méthode des courbes de fragilité : elle permet de prédire le niveau de dommage que pourrait subir un pont soumis à une accélération sismique, avec des propriétés matérielles et structurelles fixées. Les résultats seront schématisés par des courbes pour chaque type de pont et pour des sites bien précis. [3]

- Méthode «MTQ» développée par le Ministère des Transports du Québec : elle permet de calculer un indice de vulnérabilité numérique entre 0 et 100 et qui dépend du facteur de risque sismique, facteur de fondation, facteur d'âge, coefficient d'influence sismique et coefficient de pondération. [2].

- Méthode «SISMOA» réalisée en collaboration entre l'organisme français SETRA et CETE Méditerranée: c'est un outil permettant l'évaluation qualitative de la vulnérabilité des ouvrages d'art au séisme. A partir d'un certain nombre de critères géométriques et typologiques, cette méthode permet de calculer l'indice de vulnérabilité global qui est la combinaison des indices de vulnérabilité spécifiques des différents éléments structuraux de l'ouvrage (tablier, culées, piles, fondations). [4]

- Méthode de «Kubo - Katayama» : elle a été développée par ces deux chercheurs japonais. [5]

Parmi toutes ces méthodes, nous avons choisi d'approfondir cette dernière parce qu'elle permet de déterminer un coefficient permettant la classification des ponts en fonction de leurs vulnérabilité sismique en tenant compte des caractéristiques du pont et du sol d'assise, ainsi que de l'aléa local. Les autres méthodes n'en tiennent pas compte ou prennent en compte seulement deux éléments au maximum.

2. Méthode de «Kubo - Katayama»

Cette méthode a été développée en se basant sur une analyse statistique des endommagements enregistrés sur des ponts suite aux séismes de Kanto (1923), Fukui (1948) et Niigata (1964). Elle se base sur l'indice de vulnérabilité qui est un indicateur de l'état de la structure et qui peut être estimé avant comme après l'occurrence de l'évènement sismique. Il nous permet de connaître l'état des ouvrages d'art d'une région et de les classer selon leur vulnérabilité, donc il offre la possibilité d'une mise à jour pratiquement continue de la qualité sismique des ponts d'une région. [5]

Dans cette méthode, dont le principe est illustré dans l'organigramme ci-après Fig. 1, nous avons différents paramètres de type descriptif ou typologique, ou bien de type quantitatif, qui influent sur la vulnérabilité sismique des ponts. Chacun d'entre eux est divisé en catégories, et chaque catégorie a son propre facteur de pondération (tableau 1). Le produit des valeurs des facteurs de pondération de tous les paramètres représente l'indice de vulnérabilité d'un pont.

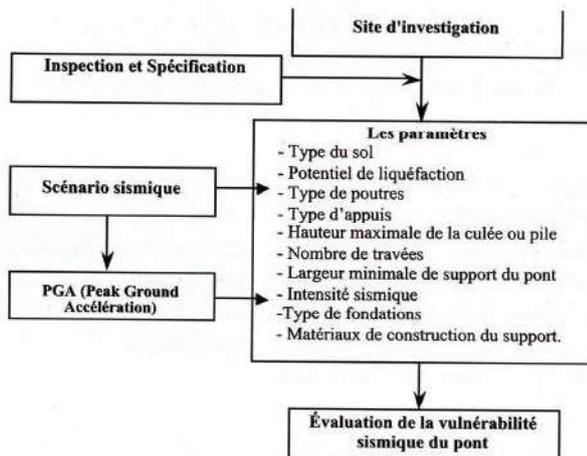


Figure 1 : Organigramme de l'analyse de la vulnérabilité des ponts selon la méthode de « K. Kubo et T. Katayama ». [5]

Tableau 1 : Tableau des paramètres de la méthode avec leurs coefficients de pondérations. [5]

Paramètres	Classes	Coefficients de Pondération
Type de sol	Sol rigide (Stiff)	0,50
	Sol moyen (Medium)	1,00
	Sol mou (Soft)	1,50
	Sol très mou (Very Soft)	1,80
Potentiel de liquéfaction	Sol non liquéfiable	1,00
	0 < PL < 15	1,50
	PL ≥ 15	2,00
Type de poutre	Arc ou portique rigide	1,00
	Poutre continue	2,00
	Poutre simple	3,00
Type d'appuis	Avec un appareillage spécifique	0,60
	Appuis (avec une bonne conception)	1,00
	Mobiles	1,15
	Autres (pas d'appuis, etc.)	1,10
	Système de prévention	0,60
Système d'isolation ou de résistance sismique		0,90
		0,90
Hauteur Maximum de culée / Pile (m)	Inferieur à 5m	1,00
	Entre 5 et 10m	1,35
	Supérieur à 10m	1,70
Nombre de travées	1 travée	1,00
	2 travées ou plus	1,75
Largeur minimale du support du pont (cm)	Supérieure à 70cm (Wide)	0,80
	Inférieure à 70cm (Narrow)	1,20
	Pas d'assise (0 cm) (No seat)	1,10
Intensité sismique	MSK < 7.885	1,00
	7.885 ≤ MSK < 8.680	2,10
	8.680 ≤ MSK < 9.475	2,40
	9.475 ≤ MSK < 10.270	3,00
	10.270 ≤ MSK	3,50
Type de Fondation	Pieu battu	1,40
	Autre pieu	1,00
	Etendue	1,00
	Béton armé	1,40
Matériau de la culée / Pile	Acier	1,00
	maçonnerie	1,40
		1,40
	Autres	1,00

$$I_v = \prod_{j=1}^n \prod_{k=1}^{m_j} w_{jk}^{X_{ijk}} \quad (1)$$

Avec :

n : nombre de tous les paramètres.

m_j : nombre de classes de paramètre j .

x_{ijk} : correspond à la classe k du paramètre j de l'échantillon (pont) i . Cette variable prend la valeur 1 (un) si les propriétés de l'échantillon i correspondent à la classe k pour le paramètre j , et 0 (zéro) autrement.

W_{jk} : coefficient de pondération de la classe k du paramètre j .

Le classement de cet indice est établi suivant trois classes de probabilité d'endommagement qui sont indiquées dans le tableau suivant :

Tableau 2 : Tableaux des classes d'endommagement en fonction de «Iv». [5]

Classes de probabilité d'endommagement	I_v
Faible probabilité d'endommagement	$0 < I_v < 22$
Moyenne probabilité d'endommagement	$22 \leq I_v < 30$
Forte probabilité d'endommagement	$I_v \geq 30$

3. Méthode modifiée

L'observation des caractéristiques des ponts présents en Algérie, nous a interpellé sur quelques paramètres qui nous semblent avoir un impact sur la réponse sismique des ponts. Aussi, nous nous proposons dans ce qui suit de voir l'influence de ces paramètres ainsi que les modifications que nous avons apportées à la méthode pour la rendre plus applicable à notre contexte.

Les nouvelles modifications apportées à cette méthode sont les suivantes :

- Calcul des intensités sismiques sur l'échelle MMI (Modified Mercalli Intensity Scale) au lieu de MSK (Medvedev-Sponheuer-Karnik Scale) ;
- Introduction de nouveaux paramètres qui ne sont pas inclus dans cette méthode et qui semblent avoir une influence sur la vulnérabilité sismique des ponts. Ces paramètres sont :
 - La typologie de la pile ;
 - La courbure du tablier ;
 - Attribution des valeurs des coefficients de pondération à chaque classe de ces paramètres.
 - Etablissement des nouvelles bornes des classes de l'indice de vulnérabilité ;

- Elaboration de la fiche technique qui regroupe tous les paramètres de cette méthode et leur classement selon leurs ordres d'importance et d'influence sur la vulnérabilité sismique des ponts.

3.1. Calcul des intensités sismiques

L'intensité sismique dans la méthode de «Kubo - Katayama» est représentée en MSK, mais puisque cette dernière devient obsolète, nous avons donc représenté l'intensité sismique dans cette méthode sur l'échelle MMI. Pour effectuer ce changement de la représentation de l'effet sismique nous avons utilisé la loi de «Murphy» pour exprimer le PGA (Peak Ground Acceleration) en fonction de MSK puis le MMI en fonction du PGA, ce qui est montré ci-après (tableau 3).

La loi de Murphy :

$$MSK = \frac{\ln\left(\frac{PGA}{0,8103}\right)}{0,7433} \longrightarrow PGA = 0,8103 e^{(0,7433 \cdot MSK)} \quad (2)$$

$$PGA = 1,7787 e^{(0,5756 \cdot MMI)} \longrightarrow MMI = \frac{\ln\left(\frac{PGA}{1,7787}\right)}{0,5756} \quad (3)$$

Tableau 3 : Transformation du MSK en MMI en fonction du PGA.

MSK	PGA (cm/s ²)	MMI calculé par eq. (3)	MMI (correspondance en chiffres romains)
7,885	284,453	8,816	IX
8,680	513,625	9,843	X
9,475	927,429	10,869	XI
10,270	1674,617	11,896	XII

L'échelle MSK est une échelle discontinue. Afin de pouvoir appliquer la formule (2), il est nécessaire de la rendre continue. A cet effet un travail a été élaboré par l'équipe de la JICA (Japan International Cooperation Agency) lors de son étude sur la vulnérabilité sismique du tissu urbain de la wilaya d'Alger. [6]

Notons que le Règlement Parasismique des Ouvrages d'Art (RPOA) préconise des valeurs d'accélération qui prennent en compte l'aléa sismique de la zone et l'importance du pont, néanmoins ces valeurs ne tiennent pas compte de phénomène tel que l'effet de site qui peut induire des accélérations supérieures. Dans notre cas, nous utilisons des accélérations auxquelles un pont pourrait être soumis.

Par la suite, nous avons opté pour des valeurs normalisées de ces nouvelles classes d'intensité sismique représentées à l'échelle MMI comme indiqué sur le tableau suivant :

Tableau 4 : Nouvelles bornes d'intensité sismique en MMI.

Paramètre	Classes en MMI	Coefficient de pondération
Intensité sismique	MMI < IX	1,0
	IX ≤ MMI < X	2,1
	X ≤ MMI < XI	2,4
	XI ≤ MMI < XII	3,0
	XII ≤ MMI	3,5

3.2. Introduction de nouveaux paramètres

Des modélisations par éléments finis de ponts ont été effectuées. Ces modélisations prennent en compte chaque fois un paramètre étudié. Pour la typologie de la pile, nous avons considéré trois types de ponts à savoir un pont à une seule travée, un pont à piles colonnes et enfin un pont à pile en fût massif. Les données de la section transversale du tablier est donnée sur la figure 2.

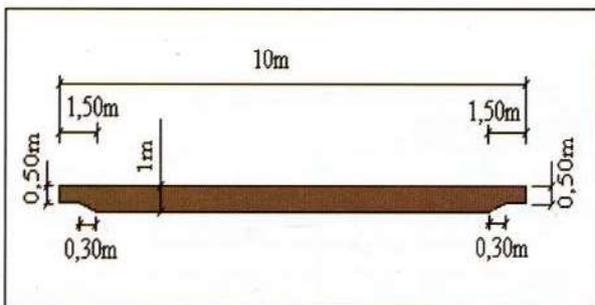


Figure 2 : Section transversale du tablier du pont.

Les modélisations développées sont représentées dans les figures suivantes (Fig. 3, 4 et 5) :

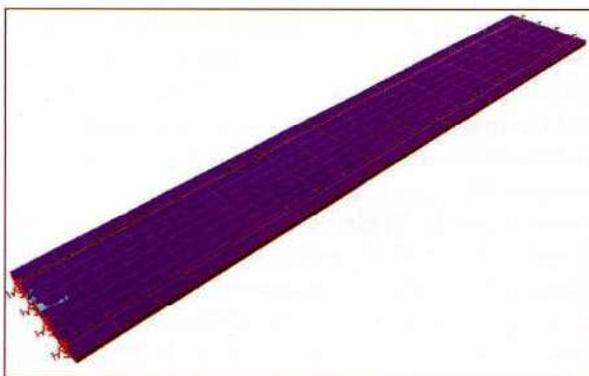


Figure 3 : Pont droit à une seule travée.

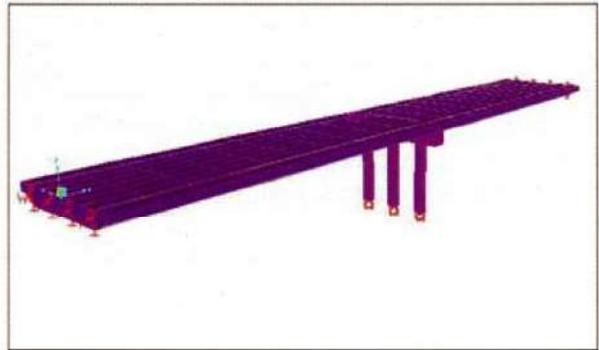


Figure 4 : Pont à deux travées séparées par piles colonnes.

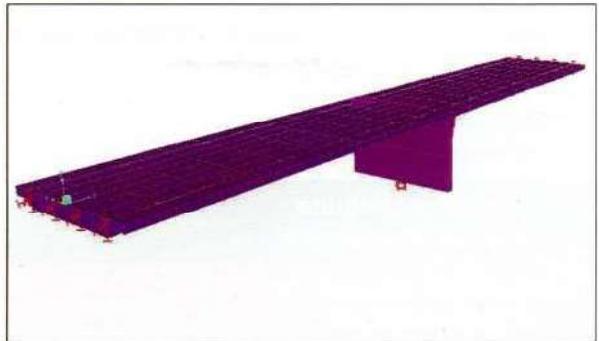


Figure 5 : Pont à deux travées séparées par pile en fût massif.

La courbure du pont a été considérée dans quatre types de ponts. Le premier est un pont droit avec un angle de courbure $\theta = 0^\circ$ et un rayon de courbure $R = 0m$ (Fig. 3). Le deuxième modèle correspond à un pont fortement courbé avec un angle de courbure $\theta = 80^\circ$ et un rayon de courbure $R=30m$ (Fig. 6). Le troisième pont est moyennement courbé avec $\theta = 30^\circ$ et $R= 60m$ (Fig. 7), et enfin le dernier modèle est légèrement courbé avec un angle de 30° et un rayon de 100 m (Fig. 8).

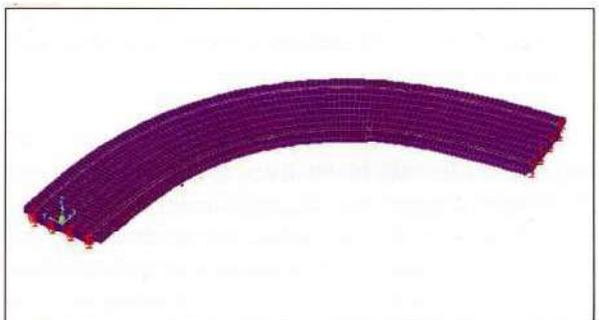


Figure 6 : Pont à tablier fortement courbé.



Figure 7 : Pont à tablier moyennement courbé.

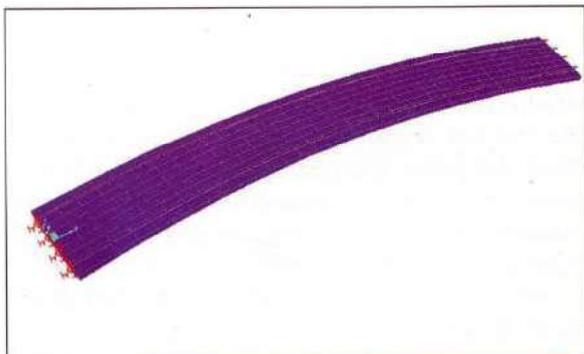


Figure 8 : Pont à tablier légèrement courbé.

Après une étude sismique par analyse temporelle de tous les modèles étudiés en utilisant les accélérogrammes des séismes de Boumerdés (2003), de Cherchell (1989) et d'El Centro (1940), une analyse statistique des résultats (périodes, déplacements) a été faite afin de déterminer des coefficients de pondération pour les différentes classes des paramètres rajoutés.

Par un calcul statistique de la moyenne des moyennes arithmétiques des déplacements extrêmes obtenus pour chaque modèle étudié de chaque paramètre [7], nous avons obtenu les coefficients de pondération à partir des nouveaux paramètres donnés dans le tableau 5.

Tableau 5 : Coefficients de pondération des nouveaux paramètres.

Paramètres	Classes	Coefficients de Pondération
Typologie de la pile	Fût massif	1,00
	Piles colonnes	1,05
	Pas de piles	1,10
Courbure du pont	Pas de courbure	1,00
	Légèrement/ Moyennement courbé	1,05
	Fortement courbé	1,10

Les coefficients de pondération trouvés seront utilisés pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique des ponts qui seront étudiés.

3.3. Intervalles de l'indice de vulnérabilité

Du fait que nous avons introduit de nouveaux paramètres, il s'avère nécessaire de changer les bornes des intervalles de l'indice de vulnérabilité donnés dans le tableau 2. Aussi, nous proposons les intervalles suivants (Tableau 6):

Tableau 6 : Nouvelles classes d'endommagement en fonction de « I_v ».

Classes de probabilité d'endommagement	I_v
Faible probabilité d'endommagement	$0 < I_v < 18$
Moyenne probabilité d'endommagement	$18 \leq I_v < 42$
Forte probabilité d'endommagement	$I_v \geq 42$

Un pont ayant un indice de vulnérabilité compris entre 0 et 18 sera classé vert c'est-à-dire ayant une faible probabilité d'endommagement en cas d'un séisme. Un pont ayant son « I_v » compris entre 18 et 42, sera classé orange donc ayant une moyenne probabilité d'endommagement.

Enfin, un pont dont le « I_v » est supérieur à 42 aura une forte probabilité d'endommagement.

Les bornes de ces intervalles ont été déterminées par une estimation du meilleur cas pour chacun des intervalles considérés.

3.4. Elaboration de la fiche technique

Afin de permettre l'évaluation de l'indice de vulnérabilité d'un ouvrage d'art, nous avons élaboré une fiche technique regroupant l'ensemble des informations nécessaires au calcul de cet indice.

Cette fiche sera remplie durant une enquête sur site. Elle contient les renseignements suivants :

- Données générales ;
- Caractéristiques géométriques ;
- Caractéristiques sismiques ;
- Caractéristiques du sol ;
- Caractéristiques structurales.

4. Programmation-Applications

Afin de faciliter l'utilisation de la méthode présentée auparavant, nous avons développé un programme sous environnement « Delphi » permettant

le calcul de l'indice de vulnérabilité et le classement des ponts selon leur probabilité d'endommagement en tenant compte des modifications apportées. Ce programme est appelé « V.I.P.B » (Vulnerability Index Program for Bridge), et se compose d'une page d'introduction des données constituée de trois onglets (paramètres d'identification, paramètres de calcul, et rapport), le tout est géré par une barre des menus et un navigateur (fig. 9).

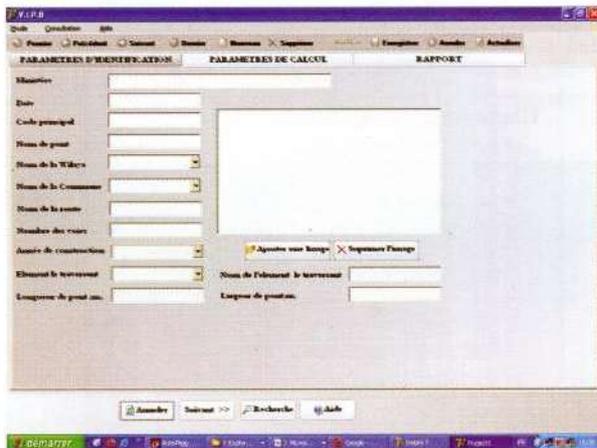


Figure 9 : Interface du programme « V.I.P.B ».

Plusieurs exemples de ponts de la wilaya d'Alger et de la wilaya de Tipaza ont été traités par les deux approches. Ceci nous a permis de comparer les deux approches et de valider l'application de la méthode au contexte algérien.

5. Comparaison des résultats

Une étude a été effectuée sur 61 ponts répartis sur les wilayas d'Alger et de Tipaza par les deux méthodes présentées. Les résultats illustrés dans les figures 10 et 11 montrent que le pourcentage des ponts à moyenne probabilité d'endommagement obtenue avec la méthode modifiée est supérieur à celui obtenu dans la méthode de « Kubo – Katayama », avec un écart de 15% entre les deux méthodes. Par contre, l'écart des pourcentages des ponts à faible et à forte probabilité d'endommagement est inférieur : il est de 7 et 8% respectivement.



Figure 10 : Résultats d'estimation des ponts de la wilaya d'Alger et de Tipaza par la méthode de « Kubo-Katayama ».

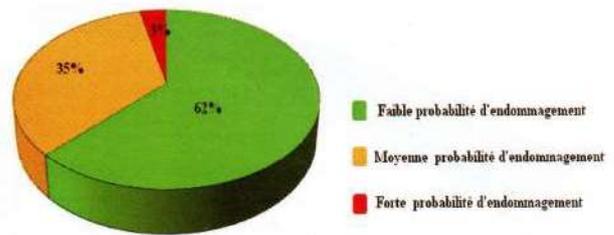


Figure 11 : Résultats d'estimation des ponts de la wilaya d'Alger et de Tipaza par la méthode modifiée.

6. Conclusions

La méthode de « Kubo – Katayama » regroupe des paramètres de nature qualitative et quantitative. Elle permet l'estimation de la vulnérabilité sismique des ponts. Cette méthode a été modifiée par l'ajout de nouveaux paramètres et donc la détermination des nouvelles bornes et l'utilisation de l'échelle MMI au lieu de MSK.

A travers cette étude, il a été possible d'estimer le degré d'endommagement des ponts de la wilaya d'Alger et de la wilaya de Tipaza. Cette évaluation permet une intervention rapide et ciblée afin de prendre des mesures efficaces pour la réduction du risque sismique.

L'étude effectuée ne saurait s'arrêter là vu les multiples questions qui restent posées, surtout en ce qui concerne les paramètres rajoutés, qui nécessitent plus d'investigation, ainsi qu'une étude numérique plus approfondie.

Références bibliographiques

- [1]. SETRA, *Image de la Qualité des Ouvrages d'Art (IQOA), Classification des ouvrages*, 1996.
- [2]. Marie-José N., Amar K. and Denis, L., *Microzonage et vulnérabilité sismique des ponts de la Ville de Québec*, École de technologie supérieure, Université Laval, 2007.
- [3]. Mander J., *Fragility Curve Development for Assessing the Seismic Vulnerability of Highway Bridges*, University at Buffalo, State University of New York, 1999.
- [4]. Davi D., Schmitt P., *SISMOA : Une méthode d'estimation rapide de la vulnérabilité des ponts aux séismes*, Ouvrages d'art, Bulletin n°43, SETRA, 2003.
- [5]. Kubo K., Katayama T. : *A simple method for evaluating seismic safety of existing bridge structures.*, Proc. of the 6th World Conf. on Earthq. Engrg., India, Sarita Prakashan, 1977.
- [6]. OYO INTERNATIONAL CORP, Nippon Koei Co, LTD, *Study of seismic microzonning of the wilaya of Algiers*, Progress report, August 2005.
- [7]. Bernard P.Y., *Statistique descriptive*, Economica, Paris, juillet 1998.