

SISMOA : Une méthode d'estimation rapide de la vulnérabilité des ponts aux séismes

DENIS DAVI
PATRICE SCHMITT

1. Introduction - contexte général

La France métropolitaine est une région à sismicité relativement faible. On y dénombre en moyenne chaque année une vingtaine de séismes de magnitude supérieure à 3,5 ce qui est peu en comparaison d'autres pays européens tels que l'Italie, la Grèce ou la Turquie. Néanmoins la France a subi dans le passé des séismes beaucoup plus forts (9000 morts en Maurienne en 1248, 40 en Provence en 1909...) et des évènements récents nous ont montré que les tremblements de terre en France sont toujours d'actualité (séismes de magnitude 5,5 à Annecy en 1996, de magnitude 4,6 au large de Nice en février 2001 et de magnitude 5,4 en Bretagne en septembre 2002...). Le phénomène sismique peut donc toucher le territoire français, en particulier les régions des Pyrénées, des Alpes, de la Provence, de l'Alsace, du Massif Central jusqu'en Bretagne (fig. 1a et 1b) et bien sûr, des Antilles où des séismes très destructeurs se sont produits en Martinique en 1839, en Guadeloupe en 1843 (plus de 3000 morts dans la capitale Pointe-à-Pitre) et en 1897. Plus récemment, en 1985, une secousse de magnitude 6,0 a de nouveau fortement ébranlé Pointe-à-Pitre.

Aujourd'hui la réglementation parasismique a atteint un niveau permettant de garantir la fonctionnalité et le bon comportement général des ouvrages neufs en cas de secousse tellurique. Cependant, ces règlements sont très récents puisqu'ils datent du début des années 90 (recommandations AFPS 92 pour les ouvrages d'art [3]). La majorité des ouvrages existants ayant été conçus avant cette période, ils ne sont donc pas tous a priori en mesure de supporter les sollicitations engendrées par un tremblement de terre. L'idée d'une catastrophe de grande échelle est insupportable pour un pays du niveau technologique de la France. Il serait pourtant illusoire de vouloir se lancer dans une vaste campagne d'inspection et de confortement des ouvrages existants tant le nombre de ponts à traiter et les coûts engagés seraient importants. Une telle mesure ne serait d'ailleurs sans doute pas nécessairement bénéfique car pour un ouvrage donné, le coût de confortement pourrait s'avérer bien souvent supérieur au coût engendré pour la société par son effondrement en cas de séisme.



Figure 1a : Zonage sismique de la France

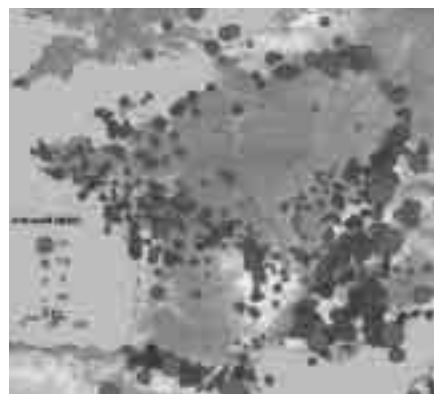


Figure 1b : Les séismes passés

Il est donc indispensable d'établir un plan d'intervention cohérent et de classer les ouvrages à traiter par ordre de priorité. En 1997, la Direction des Routes a passé commande au Setra d'une étude d'évaluation du risque sismique sur les ouvrages d'art. La collaboration entre le Setra et les CETE Méditerranée, de l'Est, de Lyon, du Sud-Ouest et de

Normandie-Centre a débouché sur l'élaboration de la procédure "SISMOA".

2. SISMOA : une méthode empirique et qualitative

2.1. L'expérience des séismes passés

L'observation et l'interprétation des dégâts causés par les séismes anciens ou récents sur les ponts ont permis d'une part de mieux comprendre la nature des sollicitations de type sismique sur ces ouvrages et d'autre part d'identifier un certain nombre de causes de fragilité classiques et récurrentes liées à des défauts de conception [1], [2].

Au cours d'un séisme, les efforts induits dans une structure sont essentiellement liés aux forces inertielles horizontales

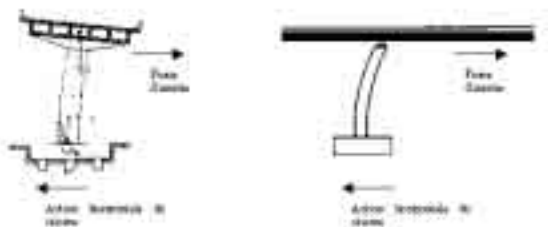


Figure 2 : Nature des sollicitations sismiques

qui résultent de la mise en mouvement des masses (fig. 2). Sur les ponts, l'essentiel de la masse est généralement concentré au niveau du tablier. L'effort provient donc de

celui-ci et descend dans les appareils d'appui, les piles, les culées et les fondations.

Vis-à-vis des sollicitations verticales (environ 2 fois plus faibles que les sollicitations horizontales), les charges sismiques à vide sont généralement couvertes par le dimensionnement sous charges d'exploitation et ne posent donc pas de problème particulier.

La description des principaux désordres observés sous l'effet des sollicitations horizontales fait l'objet des quatre sous-paragraphes suivants.

2.1.1. Echappement du tablier de ses appuis

Lorsque les distances de repos d'appui sont insuffisantes, le déplacement relatif entre le tablier et ses appuis peut entraîner un échappement. Ce phénomène, qui peut se produire selon la direction longitudinale ou transversale, concerne plus particulièrement les ponts à travées indépendantes (photo 1). Selon la direction transversale, le risque peut être accentué par un biais ou une courbure importants (photo 2). Sur les ponts biais, les chocs des culées sur le tablier créent un moment de rotation d'axe vertical dans la structure (fig. 3) qui a pour conséquence de pousser le tablier hors de ses appuis.

2.1.2. Rupture fragile des piles

La présence de butées latérales (photo 3) supprime généralement le risque d'échappement transversal. Il faut toutefois bien noter que les butées, comme toute autre connexion rigide du tablier sur ses appuis (encastrement, appareils d'appuis à pot mono-directionnels...), peut conduire à une forte augmentation des efforts dans ces derniers. Cette augmentation des efforts



Photo 1 : Echappement longitudinal (Kobé, 1995)



Photo 2 : Echappement dû à une courbure importante (San Fernando, 1971)



Photo 3 : Exemple de butées latérales

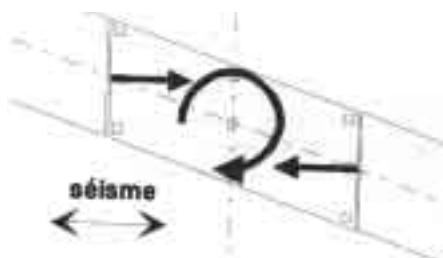


Figure 3 : Rotation d'axe vertical



Photo 4 : Kobé (1995)



Photo 5 : Rupture par effort tranchant



Photo 6 : Costa Rica (1990)

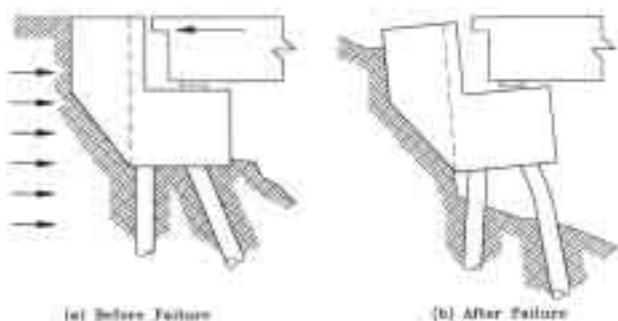


Figure 4 : Endommagement des culées



Photo 7 : Exemple de liquéfaction (Costa Rica, 1990)

est alors susceptible de provoquer des ruptures fragiles notamment dans les piles (photos 4 et 5) si leur résistance est insuffisante (manque de ductilité ou de confinement du béton, rupture par effort tranchant, insuffisance d'ancrage ou de recouvrement des aciers passifs...).

2.1.3. Endommagement des culées

L'opposition des forces de poussée dynamique des terres et de chocs du tablier sur les culées peut provoquer un endommagement de celles-ci (fig. 4, photo 6).

Notons que plus la hauteur des remblais est grande, plus la culée est vulnérable vis-à-vis des effets de la poussée dynamique des terres.

2.1.4. Problèmes liés aux sols de fondation

Lorsque l'ouvrage est localisé sur un sol liquéfiable ou soumis à d'éventuels glissements de terrain, il y a un gros risque de perte de portance et d'effondrement général (photo 7). Les ouvrages fondés profondément dans le substratum rocheux sont, en comparaison des ouvrages fondés superficiellement, moins vulnérables vis-à-vis de ces phénomènes.

2.2. La méthode SISMOA

A partir des observations précédentes et sur la base de critères typologiques ou géométriques de nature à accentuer ou à atténuer la vulnérabilité de tel ou tel élément structurel (tablier, appuis, fondations...) d'un ouvrage existant donné, la procédure SISMOA détermine empiriquement le risque sismique sur cet ouvrage. A l'échelle d'un itinéraire, les résultats permettent de hiérarchiser les ponts par ordre de sensibilité, en vue d'une analyse socio-économique des risques par rapport aux enjeux.

La méthode aboutit, pour l'ouvrage étudié, au calcul de l'indice de vulnérabilité V , représentatif de sa sensibilité propre aux mouvements dynamiques de type sismique. Couplé à l'aléa sismique A (représentatif de l'agression sismique prévisible dans sa région d'implantation), l'indice de vulnérabilité permet de calculer le risque sismique R qui définit l'espérance mathématique d'endommagement du pont au cours d'une période de référence. Enfin, la combinaison de l'indice de risque R avec le critère d'importance I , représentatif du caractère plus ou moins essentiel de l'ouvrage pour la société

en cas de crise (desserte des hôpitaux, acheminement des secours, reprise rapide de l'activité économique...), permet d'établir le niveau de priorité P. De façon plus synthétique, on peut noter :

$$P = R \times I = (V \times A) \times I$$

Le recensement et le traitement des données au niveau départemental s'appuient sur :

- Une approche informatique systématique à partir des bases de données existantes Edouart+, Lagora et IQOA ;
- Une approche manuelle, à partir des dossiers d'ouvrages quand ils existent, pour les données non accessibles dans les bases de données ;
- Une visite sur le terrain pour les dossiers d'ouvrages non suffisamment renseignés.

3. L'outil informatique SISMOA

Le logiciel SISMOA se présente sous la forme d'une feuille Excell sophistiquée. Il a été réalisé par le Laboratoire Régional de Nice du CETE Méditerranée sous le pilotage du Setra [4], [5]. A partir d'un certain nombre de critères géométriques et typologiques, le logiciel permet une évaluation qualitative de la vulnérabilité des différents éléments structurels de l'ouvrage (tablier, culées, piles, fondations). La combinaison de ces indices de vulnérabilité spécifiques conduit au calcul de l'indice de vulnérabilité global, compris entre 0 et 1. On a ainsi :

- pour un pont courant :

$$V = V_{\text{général}} \times \max (V_{\text{tablier}} ; V_{\text{culées}} ; V_{\text{piles}} ; V_{\text{fondations}})$$

- pour un pont en maçonnerie :

$$V = V_{\text{général}} \times V_{\text{rsc}}$$

3.1. L'indice de vulnérabilité générale

L'indice de vulnérabilité générale $V_{\text{général}}$ est une combinaison de trois facteurs d'influence à l'échelle globale de l'ouvrage :

- La date de construction de l'ouvrage (ou méthode de conception utilisée)
- Le type de structure (cadre ou portique, travées continues, travées indépendantes, maçonnerie)

- L'état de l'ouvrage (ou classe IQOA)

Les paragraphes suivants traitent les deux cas d'ouvrages types cités plus haut.

3.2. Le cas des voûtes en maçonnerie

La vulnérabilité des voûtes en maçonnerie V_{rsc} est directement liée à la hauteur h_g du tympan au niveau de son centre de gravité. Cette hauteur est calculée à partir des épaisseurs h_1 et h_2 du tablier respectivement à la naissance des voûtes et à la clé (fig. 5).



Figure 5 : Vulnérabilité des voûtes en maçonnerie

3.3. Le cas des ponts courants

3.3.1. Vulnérabilité du tablier

La vulnérabilité du tablier V_{tablier} est calculée en intégrant un grand nombre de paramètres tels que :

- Le biais et la courbure en plan de l'ouvrage ;
- Les risques d'échappement d'appui au droit de chaque appui selon les directions longitudinale et transversale (la notion de repos d'appui, illustrée fig. 6, caractérise ce risque) ;
- La présence ou non de butées transversales ;
- L'éventuelle dissymétrie des appuis en élévation ;
- La sensibilité à une éventuelle rupture des appareils d'appui (fonction de la rigidité du tablier).

3.3.2. Vulnérabilité des culées

La vulnérabilité des culées $V_{\text{culées}}$ est liée d'une part à la hauteur du remblai et d'autre part à la typologie propre de la culée. Par ordre de vulnérabilité croissante, on distingue les culées fondées superficiellement en tête de déblai, les culées

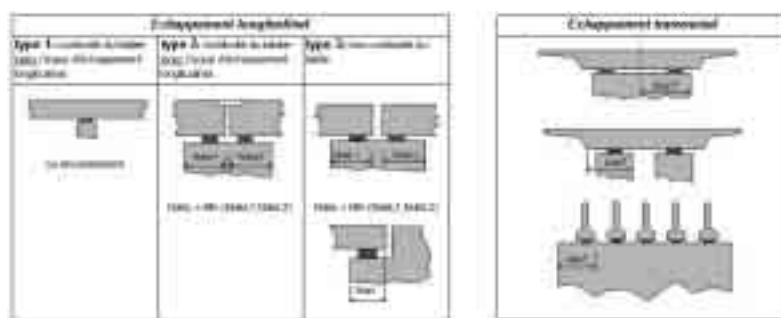


Figure 6 : Indications sur la définition des repos d'appui

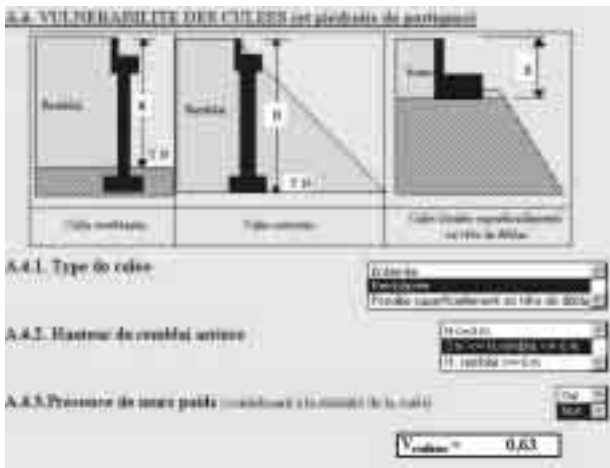


Figure 7 : Vulnérabilité des culées

enterrées et les culées remblayées (fig. 7). Suite aux différents retours d'expérience des premières utilisations de SISMOA, le cas des culées creuses a été rajouté, de même que des éléments permettant de prendre en compte la vulnérabilité des éléments latéraux. Pour le cas des culées remblayées, une distinction plus fine a été apportée selon la typologie des murs de front ("murs poids", voiles en béton armé ou murs en "terre armée").

3.3.3. Vulnérabilité des piles

Le calcul de la vulnérabilité des piles V_{piles} s'effectue selon les directions longitudinale et transversale. Il tient compte de la participation de chacune des piles à la reprise des efforts horizontaux en fonction de la régularité des hauteurs (notion de pile courte) et de la liaison entre la pile considérée et le tablier (liaison fixe, élastique ou glissante). La typologie (fût massif, pile caisson, voile, pile à colonnes multiples ou pile-marteau) et la masse du tablier sont aussi prises en considération.

3.3.4. Vulnérabilité des fondations

La vulnérabilité des fondations $V_{fondations}$ est évaluée en fonction du type de fondations (superficielles, semi-superficielles ou profondes) et des risques de liquéfaction et de glissement de terrain. En cas d'incertitude, le logiciel préconise d'avoir recours à une expertise géologique.

4. L'exploitation des résultats

4.1. L'outil SIG

La présentation des résultats a fait l'objet d'une procédure automatique afin d'en permettre ultérieurement une exploitation à l'échelle d'un itinéraire sous support SIG (Système d'Information Géographique). Cette fonctionnalité permet une représentation visuelle et efficace des résultats (fig. 8a,b,c,d) et autorise un croisement immédiat entre des données concer-



Figure 8a : Itinéraire et zonage sismique



Figure 8b : Sélection d'un pont



Figure 8c : Implantation IGN

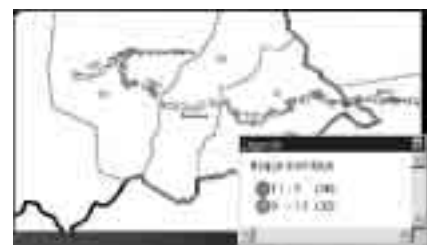


Figure 8d : Visualisation des indices de risque sismique

nant le site (équipements stratégiques, itinéraires, géologie, sismicité...) et celles directement relatives aux ouvrages (typologie, photographie, vulnérabilité et risque sismique). Grâce à l'interactivité de l'outil SIG, SISMOA constitue non seulement un outil d'aide à la définition des programmes de confortement mais pourrait aussi évoluer à terme vers des fonctions d'élaboration de stratégies de prévention des risques sismiques voire d'aide à la prise de décision en période de crise.

4.2. Les premières utilisations

A ce jour, l'outil SISMOA a été utilisé sur quatre régions différentes, particulièrement exposées au risque sismique :
- L'itinéraire Nice-Digne en région PACA pour lequel la

méthode a été validée par des études détaillées sur un échantillon représentatif de huit ouvrages de l'itinéraire [4], [5] ;
 - Le département de la Martinique pour lequel deux ouvrages stratégiques ont fait l'objet d'études détaillées (fig. 9) [6], [7], [8] ;
 - Le territoire de l'agglomération grenobloise [9] ;
 - La Vallée de la Tinée dans le département des Alpes-Maritimes [10].

Ce travail a permis de montrer la pertinence et l'efficacité de l'outil logiciel mais la méthode reste insuffisante pour prédire avec précision le niveau d'endommagement que subirait un ouvrage donné au cours d'un séisme. Ainsi, l'indice de présomption de risque sismique n'a de sens que statistiquement. Avant d'entamer un programme de confortement sismique ou de prévoir l'utilisation d'ouvrages stratégiques après un séisme, il conviendra donc de procéder à des études détaillées. L'objectif premier de SISMOA est d'établir un plan de priorité pour la réalisation de ces études. Les résultats obtenus constituent par ailleurs une banque de données intéressante pour une première évaluation des conséquences économiques d'un tremblement de terre, des coûts de confortement

pré-sismiques ou de réparations post-sismiques ainsi que pour une première ébauche de l'élaboration des Plans de Prévention des Risques.

Les retours d'expérience sur les itinéraires traités sont en cours d'analyse en vue d'un re-calibrage visant à affiner l'influence relative de certains paramètres par rapport aux autres. Des critères de vulnérabilité ou de solidité supplémentaires ont aussi été identifiés et ont été introduits dans la procédure, la rendant ainsi plus exhaustive. Sur le plan de l'ergonomie, une saisie des données rendue plus explicite devrait d'autre part faciliter l'accessibilité de l'outil à des utilisateurs non-spécialistes.

5. Les perspectives de développement

5.1. Coûts et solutions de confortement

Sur la base des indices de vulnérabilité calculés pour chaque élément structural de l'ouvrage, il est possible de prévoir à l'avenir une évaluation sommaire du coût des travaux de

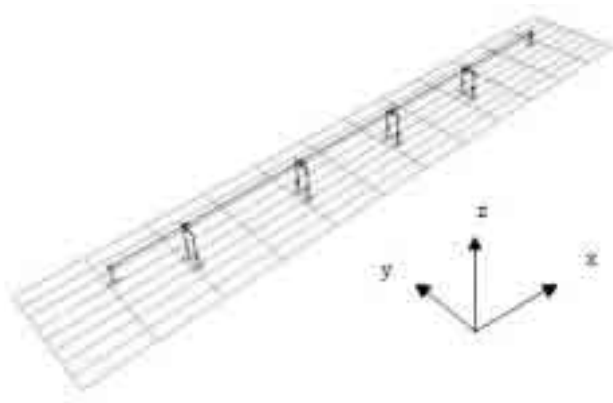


Figure 9 : Modèle pour l'analyse dynamique détaillée du Pont sur le trou au Diable en Martinique

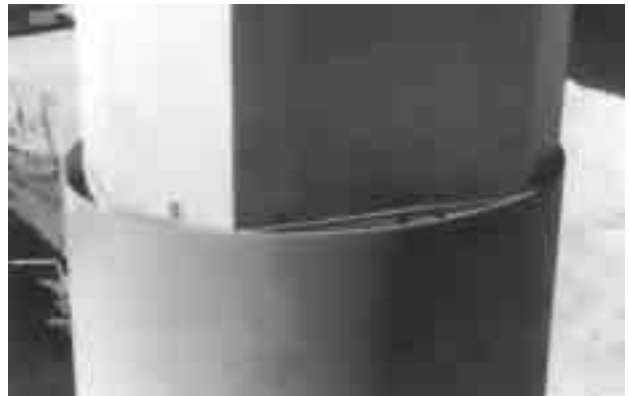


Photo 8 : Chemisage métallique des piles

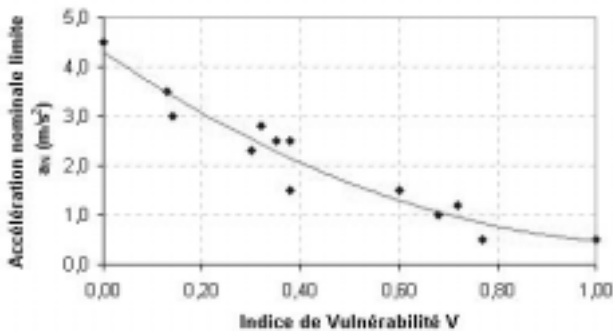


Figure 10 : Corrélation entre l'indice de vulnérabilité et l'accélération maximale admissible

Sur ces trois régions, les études détaillées ont permis de valider la méthode en établissant une corrélation satisfaisante entre l'indice de vulnérabilité obtenu par SISMOA et le niveau d'accélération nominale maximal auquel l'ouvrage est capable de résister d'après les résultats des calculs approfondis (fig. 10).

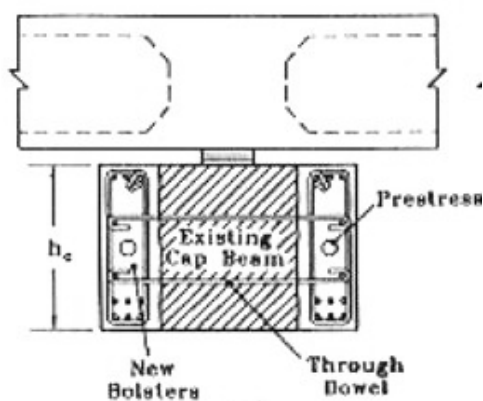


Figure 11 : Augmentation des repos d'appui

renforcement et de proposer des mesures de confortement à partir des techniques les plus couramment utilisées dans les pays à fort risque sismique : chemisage des piles (photo. 8), augmentation des repos d'appui (fig.11), remplacement des appareils d'appui, utilisation d'appareils amortisseurs (fig. 12)...

5.2. Aléa sismique

Actuellement, la définition de l'aléa sismique se limite au zonage réglementaire défini par les PS 92 [3]. Il sera intéressant à terme d'introduire des critères concernant l'aléa local et les effets de site (sols de nature à augmenter ou atténuer les ondes sismiques, présence de failles actives...) et de prendre en compte des données sur l'environnement immédiat de l'ouvrage (remblais, murs de soutènement, risque de chutes de blocs...).

5.3. Critère d'importance

L'introduction du critère d'importance dans la méthode SISMOA constitue à ce jour un objectif majeur de perfectionnement. Il s'agit en effet d'un paramètre essentiel, indispensable pour fournir aux préfets et aux maîtres d'ouvrages des éléments précis et objectifs en vue de l'établissement des Plans de Prévention des Risques et de la définition des itinéraires stratégiques. Ce critère d'importance devra être basé sur des paramètres tels que le trafic moyen supporté par l'ouvrage, le rattachement de celui-ci à des centres vitaux (hôpitaux, casernes de pompiers, commissariats de police, aéroports...), les possibilités ou non d'établir une déviation ou encore le rôle de l'ouvrage dans l'approvisionnement et la desserte des zones les plus urbanisées.

5.4. Vulnérabilité à l'échelle des réseaux

A la demande de la Direction des Routes, la méthode SISMOA devra évoluer de la "simple" évaluation de la vulnérabilité des ponts à celle, plus générale, de la vulnérabilité des réseaux.

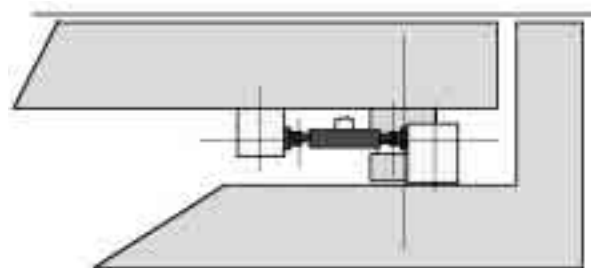


Figure 12 : Appareil amortisseur longitudinal

Cette évolution sous-entend non seulement d'élaborer une procédure d'évaluation d'autres types d'ouvrages tels que les murs de soutènement et les tunnels mais implique aussi une réflexion à une échelle plus importante intégrant la présence d'équipements stratégiques, une ébauche d'organisation et d'utilisation des moyens en cas de crise et une analyse plus fine de la topographie du site (liquéfaction à grande échelle, glissements de terrain, instabilités de pentes...)

6. Conclusion

Le logiciel SISMOA est un outil permettant l'évaluation qualitative de la vulnérabilité des ouvrages d'art au séisme. L'analyse, basée sur l'expérience des séismes passés, s'appuie sur des critères essentiellement typologiques et géométriques. L'attention est attirée sur le caractère préliminaire de l'évaluation. Les paramètres obtenus par la méthode SISMOA ne peuvent en aucun cas se substituer à un calcul de vérification pour les ouvrages les plus sensibles. Ils constituent néanmoins un critère efficace de comparaison et donc de classement de la sensibilité des ouvrages d'art aux séismes, quelle que soit leur région d'implantation. L'exploitation de cette méthode devrait permettre de définir une politique de mise à niveau des ouvrages vis-à-vis du risque sismique et constituer, grâce à une représentation graphique synthétique des résultats sous support SIG, un outil précieux pour l'élaboration des plans d'organisation des secours (moyens, itinéraires...) ainsi que pour la maîtrise de l'urbanisation future (implantation judicieuse des bâtiments et ouvrages stratégiques).

Références

- [1] Ponts courants en zone sismique – Guide de conception
Setra – SNCF
- [2] Priestley, Seible, Calvi : Seismic Design and Retrofit of
Bridges – New York : Wiley 1996
- [3] Guide AFPS 92 pour la protection parasismique des
ponts – Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
- [4] Vulnérabilité des ouvrages d'art aux séismes, Phase N°1,
fév. 2000 – C. Thibault, CETE Méditerranée, Laboratoire
Régional de Nice
- [5] Vulnérabilité des ouvrages d'art aux séismes, Phase N°2,
déc. 2000 – F. Légeron, Setra
- [6] Pont sur le trou au Diable (RN5 – Martinique) – Etudes
de confortement sismique, jan. 2003 - D. Davi - Setra /
CTOA
- [7] Pont sur la Rivière Lézarde (A1 – Martinique) – Etudes
de vulnérabilité aux séismes, jan. 2003 - P. Schmitt - Setra /
CTOA
- [8] Vulnérabilité aux séismes des ouvrages d'art de
Martinique – Etude préliminaire du risque spécifique par le
logiciel Sismoa, avril 2003 – CETE Normandie Centre,
DEIOA
- [9] Territoire de l'agglomération grenobloise, Risque
Sismique, documents 1 et 2, juin 2002 – CETE de Lyon
- [10] Vulnérabilité aux séismes des ponts de la Vallée de la
Tinée, fév. 2003 – CETE Méditerranée, DOA