
Stratégie de prédiction de courbes de fragilité pour les conduites enterrées

Fatma Zohra Halfaya^{1*}, Mahmoud Bensaïbi², Luc Davenne³

^{1,2} Université Saad Dahlab, BP 270 route de Soumâa, Blida, Algérie

³ Laboratoire Énergétique Mécanique Électromagnétisme - EA 4416
50 rue de Sèvres - 92410 Ville d'Avray, France.

*fz_halfaya@yahoo.fr

RESUME. Dans ce travail, on s'intéresse à l'évaluation de la vulnérabilité d'un réseau d'alimentation en eau potable sous un chargement sismique. Nous développons les outils numériques basés sur une approche multi échelles pour la prédiction des courbes de fragilité des conduites. Dans une première étape nous étudions une portion de conduite sous différents chargements en prenant en compte les interactions avec le milieu environnant (particulièrement l'interaction sol structure) et on calcul la réponse non linéaire jusqu'à la rupture. Cette réponse est synthétisée dans des lois globales de macroéléments. Dans la seconde étape, il s'agit d'étudier la réponse d'un réseau d'alimentation en eau potable par l'utilisation de macroéléments. L'analyse globale est assez rapide pour permettre des calculs probabilistes à grande échelle. Un premier exemple est donné pour montrer l'intérêt de cet outil.

ABSTRACT. In this work we focus on the seismic vulnerability of water supply networks. We develop numerical tools based on a multiscale approach, to compute fragility curves of pipes. In a first step, we study a portion of pipe under various loadings, taking into account the interactions with the surrounding media (especially soil structure interaction), and we compute the non linear response until failure. This response is embedded in global laws of macro elements. In the second step, the macro elements are used to study the response of the water supply network. The global analysis is fast enough to allow large scale probabilistic computations. A first example is given to show the interest of the tool.

MOTS-CLES: vulnérabilité, réseau d'alimentation en eau potable, courbes de fragilité, probabilité de rupture.

KEYWORDS: vulnerability, water supply, fragility curves, failure probability.

1. Introduction

L'évaluation de la vulnérabilité d'un site vis à vis de l'intensité sismique est un objectif majeur, dans le sens où il permet aux décideurs de prendre les dispositions nécessaires pour réduire le risque sur la population et les actifs économiques. Les premières études dans ce domaine ont porté sur la vulnérabilité des bâtiments afin de protéger les vies humaines. Cependant, le retour d'expérience sismique a montré la nécessité d'évaluer la vulnérabilité des réseaux vitaux (routes, électricité, communication, ...) vu leurs impacts sur la vie de la cité. Parmi ces réseaux, on distingue le réseau d'alimentation en eau potable, qui a un rôle prépondérant quant à la survie des populations et la non prolifération des maladies hydriques.

La vulnérabilité est souvent exprimée à l'aide des courbes de fragilité. Elles expriment la probabilité de dépassement d'un niveau de dommage en fonction du mouvement sismique du sol. Pour la plupart des structures, l'endommagement est divisé en quatre niveaux : mineur, modéré, extrême et ruine. Dans le cas des conduites, l'endommagement est généralement exprimé en nombre de réparation par kilomètre de conduite. En ce qui concerne le mouvement sismique du sol, il peut être exprimé en accélération (PGA), en vitesse (PGV) ou en déplacement (PGD) (Risk-ue, 2003).

La convolution de l'aléa (carte d'aléas construites à partir des données géologiques et enrichies avec les enregistrements des séismes récents) et de la vulnérabilité (courbes de fragilité basées sur des scénarii sismique) permet l'obtention du risque de dommage encouru. Vu l'étendue de la zone d'étude dans le cas d'un réseau d'alimentation en eau potable, il sera fait appel aux systèmes d'information géographique (SIG) pour la collecte et le traitement des données.

Actuellement, la plupart des courbes de fragilité sont empiriques et se base sur l'observation post sismique. Elles sont construites sur la base de considérations statistiques (des composants ayant des propriétés similaires subiront des dommages similaires sous un chargement sismique donné). Elles sont construites pour des pays spécifiques (souvent Etats Unis et Japon) et ne sont pas nécessairement adaptées pour d'autres pays.

Le but de notre travail est de développer une approche numérique pour la modélisation du comportement et de l'endommagement de réseaux d'alimentation en eau potable sous différents chargements sismiques afin de déterminer les courbes de vulnérabilité. Nous commencerons par l'étude des conduites. Comme cette dernière est complexe vu l'étendue du système d'alimentation en eau potable, nous

développerons une approche efficace permettant l'obtention rapide de la réponse non linéaire.

2. Système d'alimentation en eau potable

Le système d'alimentation en eau potable est composé de plusieurs éléments : les barrages ou retenues collinaires, les stations de traitement, les stations de pompes, les systèmes de stockage (châteaux d'eau,...), les conduites (canalisations, tunnels, canaux) et le système de contrôle et d'acquisition des données (SCADA). Dans notre travail, nous nous intéresserons uniquement aux canalisations.

Les principaux paramètres relatifs à la conduite sont : le matériau, le diamètre, l'épaisseur, la rugosité, le type de joint, la profondeur et le type de canalisation (conduite sous pression ou non, enterrée ou non).

Plusieurs méthodes d'estimation des dommages ont été développées. La première a été élaborée par l'ATC (Applied Technology Council) ((FEMA, 2000). Cette méthode donne le risque de dommage (nombre de ruptures par kilomètre) sous la forme d'une matrice de probabilité de dommage où l'intensité sismique est caractérisée par l'échelle de Mercalli Modifiée (MMI). Chaque terme de la matrice représente la probabilité qu'une structure appartenant à une classe donnée subisse un dommage donné lorsqu'elle est soumise à une intensité sismique donnée. L'addenda 251 de l'ATC est consacré uniquement au réseau d'eau et donne des outils pour l'évaluation de l'impact d'un séisme sur les fonctionnalités d'un système d'alimentation au niveau local ou régional (Toprak, 1998). Les conduites sont divisées en deux groupes : les eaux usées (diamètre > 508 mm) et les eaux potables (diamètre < 508 mm). Il est fait l'hypothèse que ces derniers sont plus vulnérables.

La FEMA (Federal Emergency Management Agency) et le NIBS (National Institute of Building Sciences) ont financé un projet pour le développement d'un outil d'estimation des dommages suite à un tremblement de terre (FEMA, 1997). La méthodologie a été implantée dans le logiciel HAZUS utilisant un système d'information géographique (SIG). Dans ce dernier, l'intensité sismique est donnée en accélération (PGA), en vitesse (PGV) ou en déplacement (PGD). Pour les canalisations, ne sont considérées que les vitesses (PGV) qui provoquent des fuites et les déplacements (PGD) qui provoquent la fissuration. Dans HAZUS, le diamètre de la canalisation n'est pas un paramètre de dommage. D'un autre côté, les canalisations fragiles (amiantes, ciment, béton, fonte et acier soudé au chalumeau) et les canalisations ductiles (PVC, acier soudé par arc électrique) sont distinguées. Par hypothèse dans HAZUS, la vulnérabilité des conduites ductiles est uniquement de 30% de celle des conduites fragiles.

Le projet Européen Risk UE avait pour objectif de définir une méthodologie adaptée au contexte européen pour la réalisation de scénarii risque sismique (Risk-ue, 2003). Dans ce cadre, un module a été consacré aux réseaux vitaux (Monge et al., 2007) (Pitilakis et al., 2006) et en particulier au réseau d'alimentation en eau potable. Le manuel donne un état de l'art essentiellement aux Etats Unis. Il a été adapté aux villes européennes bien que les données post sismiques fussent insuffisantes. La contribution la plus importante est la structuration de la méthode présentée.

Comme exemple, on peut voir sur la figure 1 la courbe de vulnérabilité pour un réservoir déposé sur le sol. Le modèle de vulnérabilité proposée pour les canalisations enterrées est exprimé par un taux de réparation par kilomètre fonction de la vitesse (PGV) ou du déplacement (PGD) :

$$R=0.24 K1 PGV \quad \text{ou} \quad R=11.223 K2 PGD^{0.319}$$

où :

K1 et K2 sont des coefficients dépendant du type de canalisation (matériau, diamètre, nature du joint et agressivité du sol).

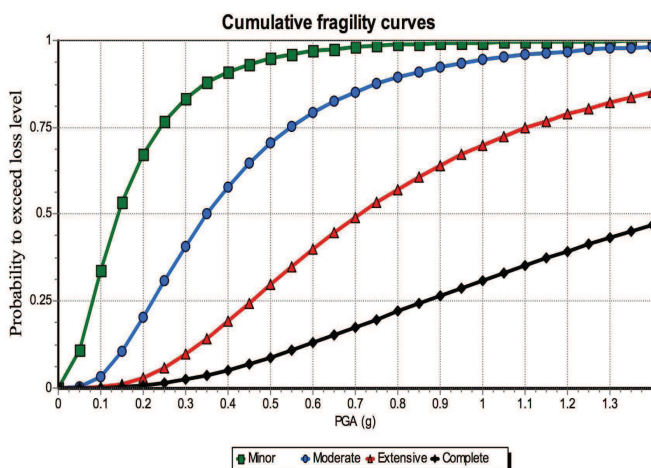


Figure 1. Courbe de vulnérabilité d'un réservoir

Comme on peut le constater, les courbes de fragilité sont basées sur l'expérience de l'expert et sur les observations post sismiques. Ainsi elles sont valables pour les pays pour lesquelles elles ont été développées et les paramètres retenus pour exprimer la vulnérabilité des canalisations peuvent être différents d'un pays à un

autre. Ceci peut induire des contradictions dans les différentes méthodes. Actuellement, il n'y a pas d'outil pour calculer les courbes de vulnérabilité de manière non empirique.

3. Modélisation

Une alternative à l'approche empirique semble être l'approche numérique. Le but est de construire un outil capable de déterminer la réponse sismique de canalisations avec différentes géométries et différents matériaux. Cet outil devra être assez précis pour obtenir la réponse non linéaire jusqu'à la rupture. Il devra tenir compte aussi des différentes conditions aux frontières, en particulier l'interaction sol-structure pour les canalisations enterrées. D'un autre côté, cet outil devra permettre des analyses rapides (simulation à grande échelle).

Nous avons développé des outils numériques basés sur une approche multi échelle. Dans une première étape nous étudions en détail une portion de canalisation sous différents chargements prenant en compte les interactions avec l'environnement (particulièrement l'interaction sol structure). Nous calculons alors la réponse jusqu'à la rupture. Cette réponse détaillée est synthétisée dans une loi non linéaire macro pour quelques degrés de liberté d'un macroélément (poutres linéaires connectées par des ressorts concentrés non linéaire). L'interaction sol-structure est aussi prise en compte à travers trois ressorts non linéaires représentant les effets non linéaires du champ proche (plasticité, jeux...) et le comportement du champ lointain (impédances et amortissements).

L'analyse globale, malgré l'utilisation d'un grand nombre de macroéléments est assez rapide pour permettre des calculs étendus.

4. Exemple

Nous considérerons l'exemple d'une canalisation avec différentes portions (quelques unes aériennes et les autres enterrées, voir figure 2). Après le calcul détaillé de la réponse non linéaire d'une partie de la canalisation (acier avec joints soudés), nous modélisons le site de plus de 600m de large avec des macroéléments (figure 3). Le calcul structural a été réalisé avec le code Aster et l'interaction sol-structure est effectuée avec MISS3D (Clouteau, 2007). Le site a été soumis à un séisme dans les trois directions de l'espace.

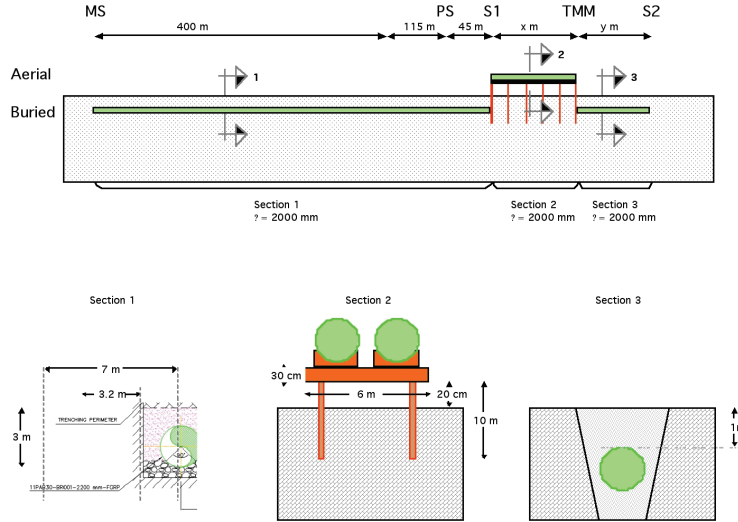


Figure 2. Vue du système d'alimentation en eau potable

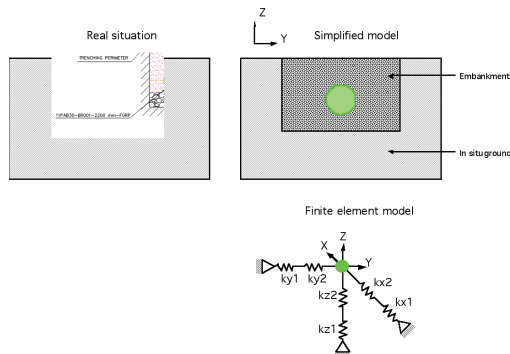


Figure 3. Model du macroélément (ressorts concentrés)

Dans ce cas particulier, il n'y a pas de déplacement relatif important entre le sol et la structure. Ceci est dû au fait qu'il n'y a pas d'effet de site. En effet il n'y a pas de bâtiments au dessus de la conduite et l'excitation sismique est relativement homogène. On n'observe pas de dommage important dans les parties courantes de la canalisation (les parties courantes étant modélisées par des poutres). En revanche, auprès des liaisons avec les ouvrages de génie civil (bâtiment abritant les pompes, support pour la partie aérienne) et vers les coudes, on observe des efforts plus importants dus aux interactions.

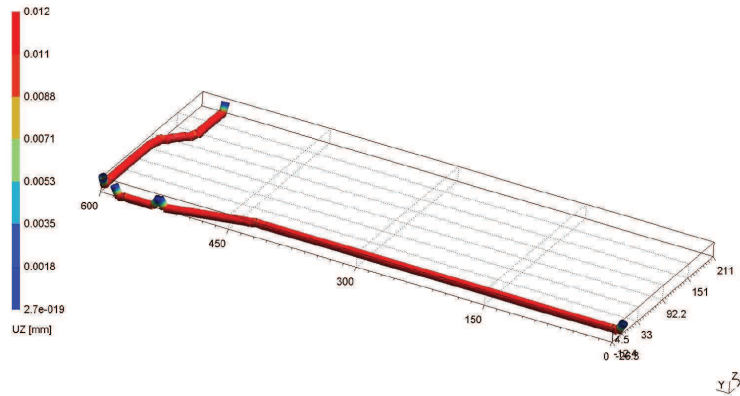


Figure 4. Déplacement relatif sol structure (direction verticale)

5. Conclusion

Dans ce papier nous avons présenté une méthode alternative pour la détermination des courbes de fragilité pour les canalisations des systèmes d'alimentation en eau potable. A l'opposé des méthodes usuelles qui se base sur l'approche empirique, nous proposons une approche numérique qui permet de traiter non seulement des situations en moyenne mais aussi des cas particuliers.

Le premier exemple est encourageant, puisqu'il permet de voir qu'il est possible de déterminer la réponse d'une structure étendue prenant en compte les principales non linéarités (comportement structurel et interaction sol-structure).

La prochaine étape consistera à déterminer les courbes de fragilité en introduisant la variabilité et en menant des simulations probabilistes puis à comparer les résultats aux données expérimentales disponibles (retour d'expérience post sismique) et aux autres méthodes empiriques

6. Bibliographie

Clouteau D. 2007. MISS3D Manuel utilisateur, rev. 6.5. Laboratoire MSSMat, Ecole Centrale de Paris, Châtenay Malabry.

Code_Aster www.codeaster.org

Federal Emergency Management Agency (FEMA), Earthquake Loss Estimation Methodology, HAZUS Technical Volumes , NIBS Document Number 5201, National Institute of Building Sciences, Washington, D.C, 1997.

XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil, Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.

- Federal Emergency Management Agency (FEMA), Estimating Earthquake Losses with HAZUS, United States, 2000.
- Halfaya F.Z., Bensaibi M., Davenne L., "Blida water supply network vulnerability" International Symposium on Reliability Engineering and Risk Management, paper N°0132, Shanghai, China, 23-26 September, 2010
- Halfaya F.Z., Davenne L., Bensaibi M., "Evaluation des courbes de vulnérabilité sismique d'un réseau d'alimentation en eau potable", 19 ème Congrès Français de Mécanique, article n°316, Marseille, 24-28 Aout, 2009
- Halfaya F.Z., Davenne L., Bensaibi M., "Seismic vulnerability assessment of water supply network", Proceedings of the NATO-ARW Damage assessment and reconstruction after natural disasters and previous military activities, 05-09 October, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, pp. 322-328, 2008
- Halfaya F.Z., Bensaibi M., Tayebi K. A., "Diagnostic de vulnérabilité du réseau d'alimentation en eau potable de la ville de Blida", Actes du VII ème Colloque National AFPS, 04-06 Juillet, Ecole Centrale Paris, France, 2007
- Kuwata Y., Takada S., « Seismic risk assessment for hospital lifeline considering SRM method », NCREE Workshop, 2004.
- Monge et al, 7ème Colloque National AFPS 2007 Ecole Centrale Paris.
- Pitilakis et al, "Advances in Earthquake Engineering for Urban Risk Reduction", 229244., 2006 *Springer*
- Riskue and GeoTer, Vulnerability assessment of lifelines and essential facilities (WP06): methodological handhook. Appendix 5: Potable water utility system » Report n° GTRRSK 0101152av7, February 2003.
- Riskue and GeoTer, « Vulnerability assessment of lifelines and essential facilities (WP06) :methodological handhook. Appendix 11: Water pipes » Report n° GTRRSK 0101152av7, February 2003.
- Toprak S., Earthquake effects on buried lifeline systems, These de doctorat, faculty of the Graduate School of Cornell University, August 1998.
- TorresVera M.A., Canas J.A., « A lifeline vulnerability study in Barcelona, Sain »Reliability Engineering and System Safety 80, pp205210, 2003.
- Ueno J., Takada S., Kuwata Y., « Performance of water supply system during the 2003 TokachiOki earthquake », NCREE Workshop, 2004.