
Détermination du seuil de déclenchement d'un système d'alerte sismique par évaluation des pertes évitées

Nicolas Taillefer¹, Daniel Monfort-Climent¹, Thomas Le Guéan¹, Virginie Bastone¹.

¹ BRGM, 3 avenue Claude-Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2, France, n.taillefer@brgm.fr

RÉSUMÉ. L'article propose une méthode de détermination du seuil de déclenchement d'un système d'alerte sismique basée sur l'évaluation des pertes évitées. Il s'agit d'une méthode quantitative qui met en valeur le fonctionnement du système et permet une utilisation optimale de ce système de sécurité. Deux applications sont étudiées, un pont routier et un bâtiment scolaire, afin d'illustrer les résultats de la démarche, mais aussi identifier les données nécessaires à sa mise en œuvre concrète.

ABSTRACT. This article exposes a method used to set the threshold of an earthquake early warning system. It is based on a quantification of avoided losses. The method stresses the system functionalities, and aims at providing practical tools to use the system in the optimal way. Two case studies, a school and a bridge, illustrate the results and the data necessary to complete the analysis.

MOTS-CLÉS: Système d'alerte précoce, pertes, séisme

KEY WORDS: Early Warning System, Losses, Earthquake.

1. Introduction

Les systèmes d'alerte précoce permettent de prévenir leurs utilisateurs de l'imminence d'une secousse potentiellement destructrice quelques secondes avant qu'elle n'atteigne un ouvrage sensible. Le projet européen REAKT étudie la faisabilité d'un tel système en Europe. Une des questions importantes consiste à déterminer le seuil à partir duquel le déclenchement de l'alerte est pertinent. La méthode proposée consiste à quantifier les pertes qui pourraient être évitées grâce au système d'alerte, et de les comparer aux coûts associés aux fausses alertes inhérentes à un tel dispositif. Le présent article développe une méthode d'évaluation systématique des pertes à travers deux cas d'étude : un pont routier et un bâtiment scolaire.

2. Description des systèmes d'alerte précoce

L'idée du système d'alerte précoce est d'enclencher des mesures de protection (alerte, procédure de mise en sécurité automatique), lorsque que le risque estimé dépasse un seuil fixé.

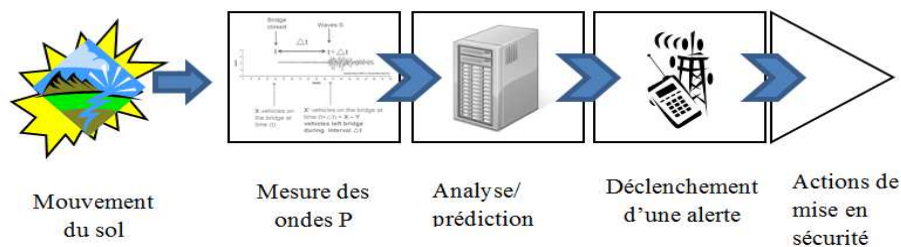


Figure 1: Schéma de principe d'un système d'alerte précoce

Les modules élémentaires du système sont donc :

- un dispositif de mesure des mouvements du sol (réseau d'accéléromètres),
- un système de traitement des mesures, qui caractérise le mouvement de sol,
- une procédure de déclenchement d'alerte.

Dans les systèmes actuellement opérationnels (USA, Japon, Mexique), cette alerte est utilisée, soit pour avertir les services de secours, soit pour inciter les usagers à prendre des mesures de protection individuelle, soit pour déclencher des procédures automatiques de mise en sécurité (arrêt d'un procédé industriel dangereux, arrêt d'un train, fermeture d'un pont). Le système est analogue à des systèmes d'alarme bien connus (alarme incendie, alerte de sécurité), avec néanmoins les spécificités suivantes:

- le délai très court (typiquement inférieur à la minute) entre l'alarme et la survenue de l'évènement redouté,
- l'absence possible de stimuli environnementaux,
- l'incertitude non négligeable de la « prédiction » du séisme.

Parmi les enjeux principaux de tels systèmes figurent la fiabilité et l'adoption d'un seuil de déclenchement pertinent.

3. Détermination du seuil de déclenchement

1.1. Méthodologie générale

Il est de plus en plus fréquent d'évaluer au moyen de l'analyse coût-bénéfice l'intérêt d'un investissement dans une solution technologique complexe, et même l'opportunité de politiques de prévention. Une analyse complète doit considérer l'ensemble du cycle de vie du système et prendre en compte de façon exhaustive les coûts liés au nouveau système en regard des pertes potentielles [EUR 08]. Un grand

nombre de paramètres entrent en ligne de compte, notamment pour les systèmes dont le seuil de déclenchement peut être ajusté et dont les données d'entrée sont sujettes à une incertitude non négligeable. En l'occurrence, on se limite à la question du seuil de déclenchement, en supposant que la mise en place du système est actée. Il s'agit de s'assurer que lorsque l'alarme retentit, le coût d'une fausse alerte est inférieur aux pertes qui pourront être évitées.

Les principales étapes permettant de fixer une valeur de seuil de déclenchement pour le système sont les suivantes :

1. identification du paramètre caractérisant l'intensité du séisme, généralement l'accélération (PGA, PSA), qui est estimée par le système à partir des caractéristiques des ondes S détectées,
2. choix d'un critère de décision (valeur de pertes évitées, coût de sauvetage de la vie) pour fixer le seuil du paramètre d'intensité,
3. évaluation des pertes évitables, en fonction de l'intensité du séisme,
4. évaluation du coût d'une fausse alarme,
5. optimisation du seuil de déclenchement de l'alarme, en fonction du critère de décision.

L'étape 1 fait l'objet de recherches propres dans le domaine de la sismologie en temps réel [ALL 09]. Le présent article détaille les étapes opérationnelles d'optimisation du système qui font l'objet des étapes 2 à 5.

1.2. Critère de décision

Du point de vue du décideur (responsable sécurité, gestionnaire du système), la question du déclenchement d'une alerte se pose dans les termes suivants : compte tenu de la valeur mesurée d'un ensemble de paramètres physiques, avec une incertitude intrinsèque, est-il pertinent de déclencher des actions de prévention, ayant un coût pour l'utilisateur ? Si l'alerte est fondée, c'est-à-dire si le séisme redouté se produit, les actions déclenchées réduisent les pertes par rapport à la situation sans alerte. Si l'alerte n'est pas fondée, c'est-à-dire si le séisme ne se produit pas ou n'a pas une intensité mettant en danger les utilisateurs ou les biens, le coût des mesures de protection déclenchées par l'alerte devient une perte pour l'ensemble du système. On appelle valeur de décision (DV) les seuils associés aux paramètres physiques mesurés au-delà desquels le déclenchement de l'alerte est pertinent, c'est-à-dire à une probabilité suffisante d'éviter des pertes supérieures au coût d'une fausse alerte. Si l'ensemble des estimations est faite selon un format probabiliste, la valeur de décision est calculée à partir de l'espérance des pertes évitées, qui sera alors comparée à l'espérance des coûts induits par une fausse alerte [WU 13], la probabilité de perte étant calculée en combinant les probabilités de défaillances de la structure pour une intensité donnée avec les coûts associés à chaque niveau de dommage (obtenu à dire d'experts, ou sur la base des retours d'expérience post-sismique). Comme proposé par Wu, DV peut se calculer comme suit :

$$DV = \operatorname{argmax}\{[L_b |D(t), a_i] - [L_c |D(t), a_i]\} \quad (1)$$

Où :

L_b sont les pertes évitées par l'action a_i ,

L_c sont les pertes causées ou les coûts induits par l'action a_i ,

$D(t)$ est l'ensemble de paramètres sismologiques (accélération attendue et temps d'arrivée) fournis par le système d'alerte sismique.

Une alternative pour les systèmes principalement destinés à éviter des pertes humaines, consiste à déterminer le *coût d'une vie sauvée* (*Cost to save life*, C_{SL}) grâce au système, pour un seuil de déclenchement donné, et de laisser au décideur le choix d'en déterminer le niveau, par exemple en comparaison du coût d'autres mesures de sécurité courantes (alarme incendie, mesures de prévention). Le coût d'une vie sauvée est issu du concept de consentement à payer (*Willingness To Pay*) pour un service. Il s'obtient en faisant le rapport du coût d'une fausse alerte ou le coût global du système dans le cadre d'une analyse complète) sur le nombre de vies sauvées.

1.3. Estimation des pertes

1.3.1. Types de pertes

L'estimation des pertes est une quantification des dommages provoqués par le séisme ou des impacts négatifs du dispositif d'alerte. Pour se faire, il convient tout d'abord d'identifier les pertes provenant de dommages qui peuvent être atténués ou évités par le dispositif. Les tableaux ci-dessous proposent une classification simple des différentes pertes, en cas de séisme (tableau 1) et celles associées à un système d'alarme.

Tableau 1: Classification des pertes en cas de séisme

Pertes	Directes	Indirectes
Pertes humaines	Morts, blessés	Maladies, Stress post traumatique, effets induits, modification de population
Pertes économiques	Dommages, pertes de contenu, interruption d'activité, pertes de revenus	Effets induits (incendie), perturbation du marché, coût de réparation, pertes de productivité
Pertes sociales	Besoins d'abris provisoires	Déplacement de population, perte de confiance

Tableau 2: Impacts et pertes associés à un système d'alarme

Impacts	Directs	Indirects
Humains	Stress, Panique	-
Pertes	Interruption d'activité	Coût de remise en service et de

économiques		levée de doute, coût de remplacement du service
Social	-	Confiance

1.3.2. Valeurs

Les pertes économiques directes sont relativement faciles à chiffrer. Pour permettre une analyse cohérente du dispositif, il est d'usage d'attribuer une valeur économique à des dommages humains et sociaux. Il s'agit d'un exercice plus délicat, mais relativement courant dans les processus d'aide à la décision [ECL 03]. La quantification des dommages s'appuie sur l'expérience de séismes passés, mais également d'autres événements de type catastrophes naturelles, pour lesquels un retour abondant existe. En effet, les séismes étant des événements rares, il existe souvent peu de données de terrain pour une région précise, ce qui rend nécessaire la consultation de données relatives à d'autres types de catastrophes. Les pertes physiques (pertes humaines, destruction, interruption d'activité) sont reliées au niveau d'endommagement du bâtiment. Pour tenir de l'aspect aléatoire du risque sismique, on cherche à relier les pertes aux variables d'intensité mesurées par le système. De nombreuses études permettent de relier *a priori* l'endommagement d'une structure au niveau d'accélération du sol (courbe de fragilité). Ensuite, les relations entre pertes et endommagement doivent être estimées. Généralement, il s'agit de corrélations obtenues à dire d'experts, le retour d'expérience des missions post-sismiques ne permettant pas de disposer de données suffisamment détaillées pour les justifier totalement.

De la même manière, l'efficacité du dispositif est évaluée par sa capacité à atténuer ou éviter des pertes. Pour une intensité de mouvement sismique donnée, il s'agit donc de connaître la réduction de pertes qu'on peut attendre. Lorsque le système d'alerte déclenche des mesures de protection individuelle, la question de l'impact de facteurs psychologiques sur le temps de réponse et le type de comportement effectivement adopté se pose [WOO 13]. Ces effets ont été documentés pour les alarmes incendies et les systèmes d'évacuation, et il ressort qu'ils peuvent avoir un impact déterminant pour les dispositifs dans lesquels les délais de réponse sont quasi-instantanés. Il est connu qu'une information de prévention et un entraînement régulier sont indispensables à l'efficacité de ces systèmes. [KUB 03]

4. Cas d'étude

4.1. Pont routier

Le risque principal envisagé en cas de séisme pour un pont est l'effondrement d'une travée.

Le système d'alerte a pour but d'arrêter le flux de véhicules en empêchant de nouveaux véhicules d'accéder à la zone de danger pendant que les véhicules déjà présents évacuent. En conséquence, l'étude va examiner l'impact d'un tel dispositif

sur les pertes humaines évitées, en fonction de la taille du pont et de l'importance du trafic. Pour l'application numérique, on évalue les pertes humaines (décès), et les pertes matérielles (véhicules).

Pour permettre la monétarisation des pertes humaines, le montant des compensations versées par les assurances en cas de décès dans un accident de circulation est pris comme référence, soit 4 800 000€, sur la base des chiffres de la CCR [CCR 13]. De même, les pertes matérielles évitées correspondent au coût d'indemnisation moyen des véhicules concernés, fixé à 5 000 € sur la base des statistiques françaises. Un critère supplémentaire est le temps disponible avant l'arrivée de l'onde S (*lead time*) qui dépendra notamment de la localisation de l'ouvrage par rapport à l'épicentre probable. Ainsi chaque pont a un temps d'évacuation qu'il faut comparer avec le *lead time*. Les coûts associés au déclenchement de l'alerte consistent en des pertes de recettes financières (péage), si on considère que pendant l'alerte un itinéraire de délestage est mis en place ou si l'opérateur renonce au péage pour les véhicules immobilisés, et des coûts indirects liés à la perturbation du trafic routier pour les véhicules déjà engagés dans la zone de contrôle d'accès au pont, soit 14.62€/h/véhicule [CEB 12]. Pour illustrer les avantages de la méthode, on l'applique à quatre cas, inspirés de ponts réels en Europe de type différent (tableau 3).

Tableau 3: *Caractéristiques des ponts étudiés*

	Pont 1	Pont 2	Pont 3	Pont 4
Type	Treillis	Suspendu	Haubané	Suspendu
Année de construction	2000	av. 1970	1990	av. 1970
Longueur (m)	260	2 277	17 000	1 560
Nombre de travées	4	14	203	3
Flux moyen (Véhicules/jour)	25 000	165 000	54 000	20 000
Vitesse moyenne (km/h)	70	70	90	70
Prix du péage (€)	/	1.65	2.65	2.70

Le paramètre d'intensité est l'accélération du sol, les courbes de fragilité du pont pour le niveau de dommage maximal (effondrement d'une travée), en fonction de la pseudo-accélération spectrale (PSA) de [FEM 03] sont utilisées.

L'étude consiste donc à déterminer un seuil pour lequel le déclenchement de l'alerte est pertinent en fonction de deux paramètres, la valeur d'accélération attendue et le *lead time*, en calculant une valeur de décision monétarisée ; on recherche $DV > 0$, pour une seule action a_i : interdire l'accès au pont. Il s'agit du domaine (d_i , PSA) situé au-dessus des courbes de la figure 2. En cas de secousse détectée, l'intensité probable du mouvement du sol (IM) et le *lead time* (d_i) sont évalués par le système. La position du point (d_i , PSA) sur le graphe permet d'évaluer la pertinence de l'alerte. Les seuils sont obtenus en calculant pour différentes

combinaisons de (d_i , PSA) les pertes associées en fonction des la fragilité de la structure, et des caractéristiques du trafic.

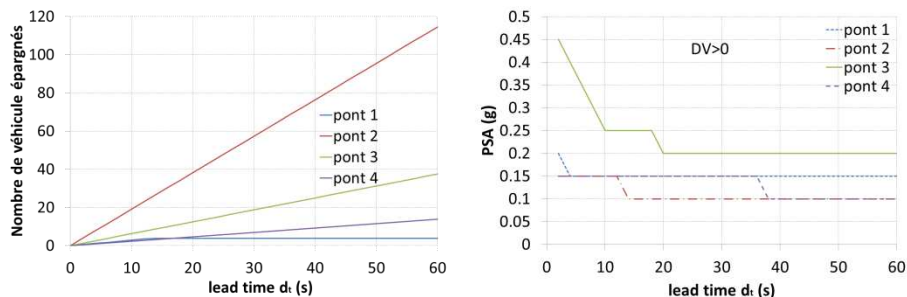


Figure 2: Nombre de véhicules épargnés, et limite des domaines pour lesquels $DV > 0$

4.2. Bâtiment scolaire

Le risque principal envisagé en cas de séisme pour un bâtiment scolaire est la perte humaine, comme l'a rappelé le drame survenu à l'école de San-Giuliano-di-Puglia en Italie en 2002. Le système d'alerte a pour but de limiter ces pertes [IER 07].

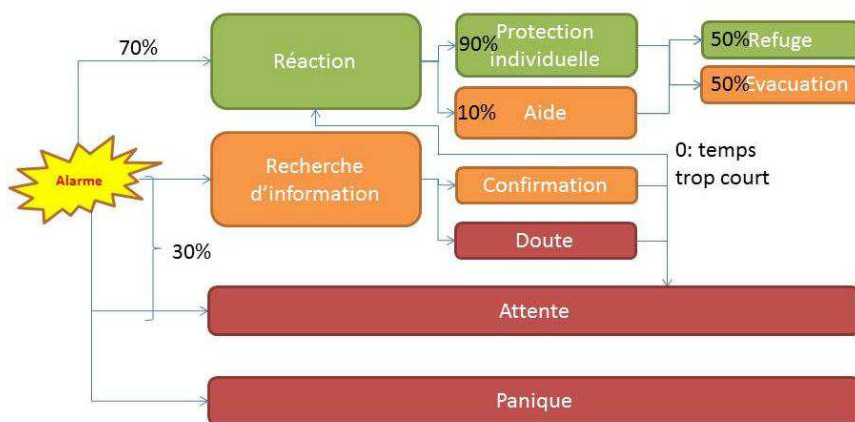


Figure 3: Schéma des réactions à l'alarme

L'objectif de cas est d'illustrer la démarche de détermination d'un seuil de déclenchement pour un dispositif initiant une réaction comportementale, en ayant recours au coût de sauvetage d'une vie (C_{SL}) comme valeur de décision. Le cas s'appuie sur une école réelle comprenant 10 classes (maternelles et primaires), avec 446 enfants et 25 adultes. Les classes sont réparties sur 3 niveaux. On considère un bâtiment non parasismique, soit en béton soit en maçonnerie non chaînée. Le système déclenche une alerte sonore demandant aux personnes se trouvant au rez-

de-chaussée d'évacuer et aux autres de se protéger sous une table. Le délai séparant l'alerte de la survenue d'une secousse est typiquement de l'ordre de 30 à 60 secondes. La mesure d'intensité qui pilote le système est l'accélération (PGA). La Figure 3 illustre les différents comportements consécutifs à l'alarme, la répartition approximative indiquée est basée sur les retours d'expériences disponibles dans la littérature, en supposant qu'une information de prévention a été donnée.

Les taux de blessures et de décès proposés par la FEMA [FEM] sont retenus pour illustrer les deux types de structure. L'efficacité du dispositif est représentée par le facteur de réduction de pertes (0 : pas d'effet, 1 : plus de perte) proposé dans le tableau 4, en fonction du niveau de dommage (D0 à D5, dommage croissant). Pour simplifier la présentation, on ne considère que le risque de décès.

Tableau 4: Facteur de réduction des pertes humaines en cas d'alerte

Niveau de dommages	D0	D1	D2	D3	D4	D5
Abris sous une table	0	1	1	0.8	0.5	0.2
Evacuation	0	1	0.9	0.9	0.9	0.9
Evacuation manquée	0	0	0	0	0	0
Aider autrui	0	0.5	0.45	0.4	0.25	0.1
Recherche d'information	0	0	0	0	0	0
Attente	0	0	0	0	0	0
Panique	0	0	0	0	0	0

Les courbes de fragilité obtenues expérimentalement par Rota [ROT 08] sont choisies, car elles donnent la probabilité de dépassement d'un niveau de dommage en fonction de l'accélération du sol (PGA). La figure 4 montre le nombre de décès évités, pour deux types de structures, avec le système d'alerte dans le cas d'une occupation standard des classes (456 personnes, 295 à l'intérieur, 157 à l'extérieur) et dans le cas où le nombre de personnes à l'intérieur est le plus élevé (471 personnes).

Le coût d'une fausse alerte est estimé sur la base du coût par élève de l'enseignement selon les statistiques de l'éducation nationale, du taux d'occupation des écoles et en faisant l'hypothèse qu'une alarme fait perdre une demi-journée de cours en maternelle et une journée en primaire (évacuation, retour en classe, reprise des activités, explications). Chaque fausse alarme a donc un coût de 5 630 €. Le ratio du coût d'une fausse alerte sur le nombre de décès évité donne le coût de sauvetage d'une vie (C_{SL}).

Pour donner des ordres de grandeurs, les compensations d'assurances pour accident de la route mortel sont de 4 800 k€ en France [CCR 13], et le C_{SL} de l'installation de détecteur de fumées dans les logements a été estimé à 20 k€ au Canada [MAR 04]. Dans les zones de sismicité moyenne (zone 4), l'accélération de référence pour le dimensionnement d'un bâtiment scolaire, sur un sol de type D est de $0.3g$ ($\gamma_{III} a_{gS}$).

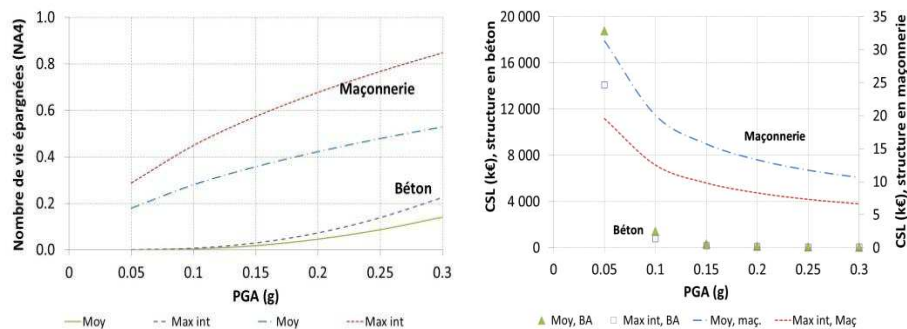


Figure 4: Nombre de vies épargnées par le système d'alerte précoce, et CS_L , en fonction de son seuil de déclenchement (PGA)

5. Conclusions et perspectives

Lorsqu'un système d'alerte est mis en place pour protéger la population, il existe des méthodes rationnelles pour déterminer le seuil à partir duquel l'alarme sera déclenchée. La méthode illustrée dans cet article montre comment s'appuyer sur une analyse systématique des coûts et des pertes associées au système, et à l'évènement redouté. Ensuite, la quantification de ces paramètres permet de donner une valeur à un critère de décision, qui pourra être optimisé en fonction des données physiques mesurées en entrée du dispositif. Une telle démarche pragmatique offre un cadre formel à la prise de décision et permet de vérifier que le but du dispositif est atteint. Elle met également en valeur l'importance d'accompagner de telles mesures techniques d'actions de sensibilisation et de prévention des populations au risque sismique.

Néanmoins, la quantification des pertes évitées, et même celle des coûts d'une fausse alerte, restent difficiles à réaliser en pratique. Une forte incertitude demeure, et le manque d'information de terrain fiable limite l'efficacité de la méthode. Au stade actuel des connaissances, la démarche proposée est applicable à des cas concrets sous réserve de clairement identifier, et lorsque c'est possible, de quantifier les incertitudes. Dans les deux cas utilisés en exemple, la suite du projet comprend la quantification des incertitudes, notamment celles liées à la l'aléa et à la réponse de la structure. Plus généralement, une poursuite des travaux de recherches sur les impacts humains des séismes et sur le comportement individuel en cas d'alarme permettra d'améliorer les mesures de prévention. La généralisation d'études de type analyses coût-bénéfices devrait permettre à l'avenir de rendre les résultats encore plus précis, ce qui rendra les systèmes d'alerte précoces plus efficaces. Enfin, la méthode proposée ici pourra être étendue à une analyse plus complète, en intégrant les coûts d'installation et de maintenance, la fiabilité du système et la probabilité d'occurrence d'un séisme destructeur. Ce type d'analyse est requis dans le processus de décision d'installation d'un tel système, ou pour argumenter de sa pertinence dans une politique de prévention globale du risque sismique.

6. Bibliographie

- [ALL 09] RICHARD M. ALLEN, PAOLO GASPARINI, OSAMU KAMIGAICHI, AND MAREN BÖSE, «The Status of Earthquake Early Warning around the World: An Introductory Overview», *Seismological Research Letters*, Volume 80, Number 5 September/October 2009.
- [CEB 12] The economic cost of gridlock, Study for INRIX, Centre for Economics and Business Research Ltd, 2012.
- [CCR 13] RC Corporels automobile – L'indemnisation des dommages corporels graves en France, rapport de la Caisse centrale de réassurance, Département des Etudes Techniques, Août 2013.
- [ECL 03] Guide to Cost Benefit Analysis of Investment Project, Rapport, 2003, Commission économique des nations unies pour l'Amérique Latine et les Caraïbes (ECLAC).
- [EUR 08] Handbook for estimating the socio-economic and environmental effects of disasters, Rapport EU Regional Policy, 2008, Union Européenne.
- [FEM] Multi-hazard Loss Estimation Methodology, Hazus TM2.1 Technical Manual, FEMA.
- [IER 07] IERVOLINO, I., GIORGIO, M., & MANFREDI, G. «Expected loss-based alarm threshold set for earthquake early warning systems», *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol.36, Feb. 2007, p. 1151–1168.
- [KUB 03] KUBO, T., HISADA, Y., MURAKAMI, M., KOSUGE, F., & HAMANO, K. «Application of an earthquake early warning system and a real-time strong motion monitoring system in emergency response in a high-rise building », *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 31(2), 2003, p. 231–239
- [MAR 04] DE MARCELIS-WARIN, N., PEIGNIER, I., BOISCLAIR, D., Analyse économique des activités du service de sécurité Incendie de Montréal, rapport de projet, CIRANO, 2004RP-22.
- [RER 09] Repères et références statistiques sur les enseignements, l'éducation et la recherche, Rapport RERS 2009, Ministère de l'éducation nationale.
- [ROT 08] ROTA, M., PENNA, A., & STROBBIA, C. L. «Processing Italian damage data to derive typological fragility curves», *Soil dynamics and Earthquake Engineering*, vol.28 , 2008, p. 933–947.
- [WOO 12] WOO, G. Review of social science studies on the behavioural response of populations to hazard warnings, Rapport REAKT D6.2, 2012.
- [WU 13] WU, S., BECK, J. L., & HEATON, T. H. «ePAD: Earthquake Probability-Based Automated Decision-Making Framework for Earthquake Early Warning», *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 28, 2013, p. 737-752.