



Cit this: *JOWSET*, 2020 (05), N°1,530-534

## Synthèse comparative des Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments

**Mouad El Khoudri<sup>1\*</sup>, Iliass Lahmass<sup>2</sup>, Mohammed Ammari<sup>1</sup>, Dounia El Adak, Mohamed Ahlalouch, Abdelkarim Chamrar<sup>3</sup>, Laïla Ben Allal<sup>1</sup>**

<sup>[1]</sup> Research Team: Materials, Environment and Sustainable Development (MEDD), Faculty of Sciences and Techniques of Tangier, BP 416 – Tangier, Morocco

<sup>[2]</sup> Laboratory of biochemistry and biotechnology, University 1<sup>st</sup>, Oujda, Morocco

<sup>[3]</sup> Laboratory of applied geosciences, University Mohammed 1, Oujda, Morocco

\*Corresponding Author: Tel.: +212661612421; e-mail: mouad.elkhoudri@gmail.com

Dans cet article on va effectuer une vérification de manière à accomplir un examen critique et une comparaison des différentes techniques d'évaluation sismique des bâtiments existantes jusqu'à présent, et examiner leur application sur le contexte marocain afin d'évaluer leur adéquation au contexte local pour l'évaluation du risque sismique.

Ainsi les méthodes considérées seront : FEMA 154 (prospection visuel rapide), Eurocode 8, Lignes directrices de la Nouvelle-Zélande, les lignes directrices du CNRC du Canada la réglementation turque et le règlement parasismique marocain. Dans cette synthèse on va proposer un système de notation pour sélectionner la technique d'évaluation de la vulnérabilité appropriée et la plus performante du point de vue globale.

Au Canada par exemple le classement tient compte de la description générale de la vulnérabilité, des facteurs de réponse du bâtiment, de la variance des résultats, l'applicabilité et la facilité d'utilisation, qui sont identifiées comme les principales caractéristiques requises pour les échelles de vulnérabilité utilisées dans l'évaluation des risques sismiques.

Dans cette optique, une analyse de sensibilité a été réalisée pour les différentes méthodes au regard des différents critères de pondération. En outre, un outil de prise de décision multicritères a également été utilisé pour trouver les alternatives appropriées pour l'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments.

Received: 19 October 2020

Accepted: 02 November 2020

Available online: 12 December 2020

### Keywords:

Evaluation de la vulnérabilité sismique  
Notation méthodologie de vulnérabilité sismique  
Réglementation parasismique marocaine

## Introduction

Le terme «vulnérabilité sismique» est défini comme la susceptibilité d'une population de bâtiments à subir des dégâts dus au mouvement sismique du sol ([1]; [2]; [3]). Créer un cadre régional d'évaluation de la vulnérabilité sismique devrait être un outil essentiel pour les gouvernements et les entités

scientifiques concernés par ce phénomène pour allouer de manière optimale les ressources et atténuer les conséquences des tremblements de terre [1]; [4]. Les méthodes existantes d'évaluation de la vulnérabilité sismique varient catégoriquement selon différentes hypothèses, par exemple la quantification de l'aléa sismique, l'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments et le type de bâtiment [5]. Durant les dernières décennies une recherche croissante dans le développement de

techniques d'évaluation de la vulnérabilité sismique est monté en croissance (par exemple, Calvi et al [6]; [7]).

Dans cet article, on va effectuer une comparaison et examen critique des méthodes existantes d'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments régionaux à savoir [FEMA 154 [8], Eurocode 8 [9], Lignes directrices de la Nouvelle-Zélande [10], les lignes directrices du CNRC [11] et le règlement parasismique marocain [12]. Le tableau 1 montre divers facteurs de vulnérabilité, qui sont fréquemment utilisés dans différentes techniques d'évaluation de la vulnérabilité sismique.

## Examen des méthodes existantes d'évaluation de la vulnérabilité

Dans cette synthèse, les méthodes ont été sélectionnés pour leur pertinence par rapport aux classes de bâtiments prédominantes ainsi qu'aux pratiques contemporaines d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments. Les différentes méthodes d'évaluation de la vulnérabilité ont été recueillis depuis plusieurs recherches sur la thématique des réglementations sismiques.

**Tab 1 :** Les facteurs de vulnérabilité Principaux pris en considération dans différentes méthodologies d'évaluation de la vulnérabilité sismique

| Méthode d'évaluation de la vulnérabilité | Âge de la structure | Hauteur du bâtiment | Tassement au sol visible |
|--|---------------------|---------------------|--------------------------|
| FEMA 154                                 | O                   | O                   | N                        |
| FEMA 310                                 | O                   | O                   | O                        |
| IITK-GSDMA                               | O                   | O                   | N                        |
| Euro Code 8                              | O                   | O                   | -                        |
| Code néozélandais                        | O                   | O                   | -                        |
| RPS Marocain                             | N                   | O                   | N                        |

N pas considéré, Y considéré, - pas clairement mentionné

**Tab 2 :** Comparaison des classes de vulnérabilité pour différentes techniques d'évaluation de la vulnérabilité sismique

| Méthode d'évaluation de la vulnérabilité | Classes de vulnérabilité |        |       |
|--|--------------------------|--------|-------|
| FEMA 154                                 | Faible                   |        | Élevé |
| Réglementation turque                    | Faible                   | Modéré | Élevé |
| Euro Code 8                              | Faible                   | Moyen  | Élevé |
| Code néozélandais                        | Faible                   | Moyen  | Élevé |
| RPS Marocain                             | *PS1                     | PS2    | PS3   |

\*Ps : Performance sismique de niveau x

Le tableau 2 résume les différentes classes de vulnérabilité décrites dans les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité proposés dans cette étude.

### FEMA 154

La méthode FEMA 154 [13] se base sur une procédure de dépistage visuel rapide Pour identifier, inventorier et classer les bâtiments potentiellement dangereux du point de vue sismique. Cette méthode reste une procédure relativement rapide pour développer une liste de bâtiments potentiellement risqués, sans l'analyse sismique détaillée coûteuse des bâtiments individuels. Une approche d'enquête trottoirs est incluse, ce qui permet aux géomètres de classer les bâtiments en deux classes à l'aide de scores seuils, à savoir les bâtiments acceptables en termes de risque pour la sécurité des personnes ou les bâtiments pouvant présenter un danger sismique, lorsqu'une évaluation détaillée est nécessaire. Un score élevé (c'est-à-dire supérieur au score seuil) indique la résistance sismique adéquate d'un bâtiment, alors que si un bâtiment obtient un score faible, il doit être évalué en détail par un ingénieur professionnel. Sur la base de cette analyse détaillée, les besoins de réhabilitation peuvent être déterminés.

### FEMA 310

FEMA 310 [14] est une procédure avancée d'évaluation sismique pour les bâtiments existants, qui a été étendue à la suite du Manuel NEHRP pour l'évaluation sismique des bâtiments existants [15]. FEMA 310 décrit une procédure à trois niveaux pour augmenter les détails et réduire la marge de sécurité pour l'évaluation sismique des bâtiments existants. Certains aspects structurels, non structurels et de fondation ont été discutés dans la phase de criblage au niveau 1 sous la forme de listes de contrôle pour le niveau de performance choisi et la région de sismicité donnée. Évaluation détaillée Les évaluations au niveau 2 et 3 ne sont effectuées que si l'on trouve l'évaluation de niveau 1 trop prudente et qu'il y aurait un avantage économique ou autre significatif à une évaluation plus détaillée. Cependant, un degré plus élevé de compréhension de la part des professionnels de la conception est nécessaire et parfois cela peut prêter à confusion en raison du manque de détails.

### Eurocode 8

L'Eurocode 8 a été approuvé par le Comité Européen de Normalisation comme réglementation sismique de la région européenne [9]. L'un des objectifs principaux de ce document est de fournir des critères pour l'évaluation sismique des structures existantes. Ici, le processus d'évaluation tient compte des actions non sismiques et sismiques pour un bâtiment existant, pendant la durée de vie prévue.

Un facteur d'incertitude du modèle couvrant les incertitudes supplémentaires liées à l'analyse de la structure pertinente peut être incorporé. [16] ont utilisé cette méthode pour valider l'influence des incertitudes de modélisation structurale dans l'évaluation sismique des structures en béton armé.

### Lignes directrices de la Nouvelle-Zélande

Les lignes directrices néo-zélandaises [10] décrivent les étapes et procédures clés impliquées dans l'évaluation des bâtiments existants de divers types de matériaux et configurations. Les lignes directrices de la Nouvelle-Zélande commencent par une procédure d'évaluation rapide basée sur une procédure de dépistage visuel de l'ATC [8]. Le score structurel de cette

évaluation est basé sur environ quatorze critères structurels qui sont les indicateurs de dommages potentiels aux bâtiments. Cependant, l'évaluation structurelle détaillée des lignes directrices néo-zélandaises est effectuée au niveau des composants. Pour tenir compte de l'incertitude relative à la fiabilité des informations disponibles sur la configuration et l'état d'un composant, un facteur de connaissance (J) est introduit.

#### IITK-GSDMA

IITK-GSDMA est une directive à grande échelle pour évaluer la vulnérabilité sismique de différents types de bâtiments dans la région du sous-continent indien [17]. La directive a été élaborée sur la base des nombreuses années de pratique d'évaluation sismique des bâtiments existants dans différents pays du monde à risque sismique [par exemple, [14]310, [18], code néozélandais [10] et Euro Code 8 [9].

#### RPS 2011

Le règlement parasismique marocain RPS2011 qui est la version mise à jour de la version RPS2000 est la réglementation adoptée par l'institution marocaine et le règlement officiel du calcul parasismique par les ingénieurs pour le dimensionnement sismique des structures en génie civil.

Le Règlement de Construction Parasismique [12] a été approuvé en premier temps en l'an 2002. Il avait pour objectif de limiter les dégâts matériel et humaine en premier lieu susceptibles de survenir suite à des tremblements de terre. Il s'appuie principalement sur l'évaluation des actions sismiques sur un bâtiment et les prendre en considération pour le calcul des structures afin de résister aux accélérations sismiques du sol tout en proposant un zonage sismique sous forme de carte du royaume réparti en cinq zones d'accélération sismique variable.

Il définit ainsi la méthode de l'évaluation de l'action sismique sur les bâtiments à prendre en compte dans le calcul des structures et décrit les critères de conception et les dispositions techniques à adopter pour permettre à ces bâtiments de résister aux secousses sismiques.

### Proposition d'un système de notation pour la classification des méthodes de vulnérabilité sismique

Afin de mettre en évidence une classification claire ; fiable et objective des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique nous allons proposer dans ce chapitre deux critères principaux comme system de notation.

Ce système de notation de la performance est développé à la base par Hill et Rossetto [2] pour classer les méthodologies d'évaluation de la vulnérabilité selon ces critères. Le système de notation est présenté dans le tableau 3, pour cette synthèse on propose deux critères principaux avec 10 sous-critères.

**Tab 3 :** Caractéristiques importantes des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité (d'après Hill et Rossetto[2])

| Critères  | Définition  |
|---|---|
| <b>Critère I : description générale de la vulnérabilité</b> |   |
| I.1 facilité de mesure                                      | États clairement distinguables et facilement applicables aux bâtiments  |
| I.2 L'étendue   | Large gamme de types de bâtiments   |
| I.3 Globalité   | Composante de vulnérabilité globale   |
| I.4 local   | Composants de vulnérabilité locale  |
| I.5 Facteurs spécifiques au site                            | Facteurs spécifiques au site  |
| <b>Critère II : paramètres physiques vulnérables</b>        |   |
| II.1 facilité de mesure                                     | Le paramètre peut-il être mesuré directement à partir de résultats analytiques ou de populations de bâtiments ? |
| II.2 L'étendue  | Large gamme de variabilité des paramètres   |
| II.3 Composant non structurel                               | Paramètres vulnérables non structurels  |
| II.4 Quantité de base de données                            | Sources et quantité de données  |
| II.5 Calibrage  | Expérimental / analytique / jugement  |

**Tab 4 :** Définition et note de « significatif », « modéré », « minimum » ou « insatisfaisant » dans la quantification des catégories (d'après Hill et Rossetto [2]).

| Condition      | Définition   | Note |
|----------------|--|------|
| Insatisfaisant | Pas le minimum ou indéterminé  | 0    |
| Minimum        | Si la ligne directrice satisfait à l'exigence minimale pour les critères | 1    |
| Modéré         | 2 observations sont disponibles pour tous les critères                   | 2    |
| Significatif   | 3 observations ou plus disponibles pour tous les critères                | 3    |

Afin de statuer une classification objective des différentes méthodes et donner une note définition l'applicabilité de la condition du critère de notation d'une manière précise et fiable, on essayer de classer les différentes méthodologies pour fournir une indication claire de la performance ou de la fiabilité de chaque méthodologie, Ainsi une déclaration affirmative (où trois observations ou plus sont disponibles) est donnée en trois points, une déclaration modérée (deux observations sont disponibles) est donnée en deux, la méthode qui répond partiellement à l'exigence (une seule observation est disponible) reçoit un point, tandis qu'une déclaration insatisfaisante équivaut zéro point.

A la fin on totalise la somme des points obtenues des critères I et II pour avoir un score final.

**Tab 5** : Scores individuels pour les critères I et II pour diverses méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

| Sous-critères   | FEMA 154  | Euro Code 8 | Code néozélandais | Réglementation turque | RPS Marocain |
|---|-----------|-------------|-------------------|-----------------------|--------------|
| <b>Critère I : description générale de la vulnérabilité</b> |           |             |                   |                       |              |
| <b>I.1 facilité de mesure</b>                               | 3         | 1           | 1                 | 1                     | 1            |
| <b>I.2 L'étendue</b>  | 3         | 3           | 3                 | 0                     | 0            |
| <b>I.3 Globalité</b>  | 1         | 3           | 3                 | 1                     | 0            |
| <b>I.4 local</b>  | 3         | 1           | 3                 | 1                     | 1            |
| <b>I.5 Facteurs spécifiques au site</b>                     | 3         | 1           | 1                 | 1                     | 1            |
| <b>Critère II : paramètres physiques vulnérables</b>        |           |             |                   |                       |              |
| <b>II.1 facilité de mesure</b>                              | 2         | 0           | 0                 | 0                     | 0            |
| <b>II.2 L'étendue</b>                                       | 1         | 1           | 1                 | 1                     | 1            |
| <b>II.3 Composant non structurel</b>                        | 0         | 1           | 1                 | 0                     | 0            |
| <b>II.4 Quantité de base de données</b>                     | 1         | 3           | 3                 | 3                     | 1            |
| <b>II.5 Calibrage</b>                                       | 1         | 1           | 1                 | 1                     | 0            |
| <b>Score total</b>  | <b>18</b> | <b>15</b>   | <b>17</b>         | <b>9</b>              | <b>5</b>     |

Le critère I du système de notation traite de la description d'entrée de base des outils d'évaluation de la vulnérabilité, c'est-à-dire la facilité de mesure, la gamme des types de bâtiments couverts, les facteurs spécifiques au site, y compris les aspects locaux et globaux. Ceci est important pour les personnes travaillant sur le terrain. Dans le critère II, la plupart des facteurs de vulnérabilité mesurables physiques ont été pris en compte, ce qui est très utile pour analyser le comportement structurel. Il traite de la portée des paramètres vulnérables, de la quantité de base de données, de l'applicabilité des outils ainsi que des composants non structurels des structures.

Les scores individuels pour les cinq méthodes d'évaluation de la vulnérabilité pour les critères de performance I et II sont résumés dans le tableau 5. Ainsi on trouve que le FEMA 154 occupe la première position pour les deux critères sélectionnés et totalise un score final de 18 suivis par codé néozélandais puis Eurocode8 et à la fin on trouve le RPS Marocain avec un score de 5 en dernière position.

## Conclusion

Cette synthèse a permis d'identifier des caractéristiques importantes qui devraient être prises en compte pour sélectionner une méthode appropriée d'évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments. Pour cela il fallut établir un système de notation pour l'examen qualitatif de diverses techniques d'évaluation de la vulnérabilité, selon plusieurs Sous-critères afin d'évaluer des méthodes d'évaluation sismique tout autant différentes que diversifiées selon la réglementation et le contexte locale de la méthode. Ainsi à l'issue de cette classification on a pu constater que les scores varient considérablement d'une méthode à autre et qu'il y a un écart phénoménal entre la méthode américaine FEMA 154 par exemple et la réglementation marocaine RPS 2000 version 2011

en termes de critères description générale de la vulnérabilité et des paramètres physiques vulnérables.

La classification démontre que le RPS2000 reste visiblement faible en termes de quantité de base de données utilisé pour la rédaction de cette réglementation tant au niveau des paramètres physique déployé dans cette dernière que dans l'expérimentation et les retours d'expériences des événements antécédents, en plus de la difficulté d'applicabilité et l'exhaustivité des grandeurs physique à calculer dans cette réglementation.

Enfin de compte on n'oubliera pas de préciser que le rps2000 ne couvre pas la totalité de type de bâtiments et ne s'applique pas qu'en présence de certain critères pas forcément présents dans la réalité.

La présente synthèse démontre clairement que la réglementation parasismique marocaine nécessite une réévaluation profonde et une révision totale des paramètres de base de la vulnérabilité sismique pour essayer de rattraper le retard fulgurant par rapport aux autres réglementations que ça soit au niveau de champs d'application qu'au détail de calcul et l'intégration de l'aspect dynamique dans le calcul des structures.

Comme perspective à cette synthèse on espère apporter plus de détails sur le RPS2000 en s'inspirant des autres réglementations et essayer de les intégrer sur un contexte local marocain.

## References and notes

1. Cockburn, G. and S. Tesfamariam, *Earthquake disaster risk index for Canadian cities using Bayesian belief networks*. Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 2012. 6(2): p. 128-140.
2. Hill, M. and T. Rossetto, *Comparison of building damage scales and damage descriptions for use in earthquake loss modelling in Europe*. Bulletin of Earthquake Engineering, 2008. 6(2): p. 335-365.
3. FEMA, *Earthquake Loss Estimation Methodology: User's Manual*. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 1999.

4. Tesfamariam, S. and M. Saatcioglu, *Risk-based seismic evaluation of reinforced concrete buildings*. Earthquake Spectra, 2008. **24**(3): p. 795-821.
5. Bertogg, M., L. Hitz, and E. Schmid. *Vulnerability functions derived from loss data for insurance risk modelling: findings from recent earthquakes*. in *Proceedings of the twelfth European conference on earthquake engineering (paper 281)*, London. 2002.
6. Calvi, G.M., et al., *Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years*. ISET journal of Earthquake Technology, 2006. **43**(3): p. 75-104.
7. Okada, S. and N. Takai. *Classifications of structural types and damage patterns of buildings for earthquake field investigation*. in *Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering (paper 0705)*, Auckland. 2000.
8. ATC-21, *Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: A handbook*. Vol. 21. 1988: Applied Technology Council, Redwood city, CA, USA.
9. CEN, *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance part 1. General rules, seismic actions and rules for building*. Comité Européen de Normalization Brussels, 2005. **1**: p. 1998-1.
10. NZSEE, *An initial evaluation process for identifying buildings not safe in earthquake*. August, p 27. (Prepared for Building Industry Authority). New Zealand Society for Earthquake Engineering, Wellington, 2000.
11. NRCC, *Manual for screening of buildings for seismic investigation*. . Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada, Ottawa, 1993: p. p 88.
12. RPS, *LE REGLEMENT DE CONSTRUCTION PARASISMIQUE*. Ministère de l'ATUHE, Secrétariat d'État à l'Habitat, Rabat, Maroc, 2000.
13. FEMA154, *Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: A handbook . Edition 2*. 2017: Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
14. FEMA310, *Handbook for the seismic evaluation of buildings*. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 1998.
15. FEMA, *NEHRP handbook for the seismic evaluation of existing buildings*. Building Seismic Safety Council, Washington, DC, 1992.
16. Jalayer, *Structural modeling uncertainties and their influence on seismic assessment of existing RC structures*. Struct Saf 32:220–228, 2010.
17. Durgesh, *IITK-GSDMA guidelines for seismic evaluation and strengthening of buildings*. IITKGSDMAProject on Building Codes, Gujarat State Disaster Management Authority and Indian Institute of Technology Kanpur, 2005.
18. FEMA356, *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 2000.