



## Evaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments en béton armé en utilisant l'analyse dynamique incrémentale (Seismic vulnerability assessment of reinforced concrete buildings using Incremental Dynamic Analysis IDA)

M. EL Khoudri\*<sup>1</sup>, L. BenAllal<sup>1</sup>, M. Himi<sup>2</sup>, D. EL Adak<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire des Matériaux et Valorisation des Ressources (LMVR)

Faculté des Sciences et Techniques de Tanger, Université Abdelmalek Essaadi, BP 416, Tanger (Morocco)

<sup>2</sup>Ecole Nationale des sciences appliquées d'AL Hoceima, Université Mohammed Premier, AL Hoceima (Morocco)

\*Corresponding Author. E-mail: [mouad.elkhoudri@gmail.com](mailto:mouad.elkhoudri@gmail.com)

### Résumé

L'analyse dynamique incrémentale IDA est une analyse dynamique non linéaire qui offre une possibilité immense d'évaluer les réponses sismiques de la structure et prend en compte les effets de l'intensité énergétique, de la durée et la fréquence contenues dans un accélérogramme, et produit l'effet de ces paramètres sur le déplacement inter-étages et les déplacements maximaux dans une structure, contrairement à l'analyse PUSHOVER qui est une analyse statique qui ne donne qu'un moindre aperçu des réponses sismiques sur la structure. La survenance d'un dommage avec différents degrés est un processus aléatoire, donc, le seul outil approprié pour prédire la répartition des dommages attendus serait probabiliste. De ce fait nous nous proposons d'établir des courbes de fragilités en se basant sur les données de l'analyse dynamique incrémentale afin de définir avec précision un schéma séquentiel de dégâts et ainsi dresser une échelle de dommages structuraux pour des intensités sismiques du parc immobilier marocain.

*Mots-clés:* vulnérabilité sismique, IDA, Analyse dynamique non linéaire, courbes de fragilité, parc immobilier, développement durable.

### Abstract

Incremental dynamic analysis IDA is a non linear dynamic analysis that offers a huge opportunity to evaluate the seismic response of the structure and takes into account the effects of the energy, the duration and the frequency contained in seismic record and product the effect of these parameters as an inter-story drift ratio and maximum displacement in a structure, unlike the PUSHOVER analysis which is a static analysis that provides only an overview of lesser seismic responses on the structure. The occurrence of damage with varying degrees is a random process; therefore, the only appropriate tool to predict the distribution of expected losses would be probabilistic. Therefore we propose to establish fragility curves based on the data of the incremental dynamic analysis to precisely define a sequential pattern of damage and establish a level of structural damage of different seismic intensities of Moroccan real estate.

*Keywords:* seismic vulnerability, IDA, nonlinear dynamic analysis, fragility curves, real estate, sustainable development.

### 1. Introduction

Le 24 février 2004 un séisme d'une magnitude de 6.2 a frappé la côte nord méditerranéenne du Maroc près de la capitale provinciale Al-Hoceima. Le séisme a causé plus de 600 morts. [15].

L'éventualité d'une résonance sol-structure semble évidente partout dans la commune urbaine d'Imzouren située dans la province d'Al-Hoceima. Les dégâts dépendent par conséquent de l'énergie transmise par les sols lors des sollicitations sismiques. La figure 1 montre les dégâts structurels importants qu'a causés ce séisme [1]. Durant un séisme, savoir le degré de dommage dans un bâtiment en béton armé est très vital pour une analyse fiable de l'aléa sismique.

Plusieurs modes de défaillances ont été observés dans des ossatures de béton armé, Notamment les défaillances de joints, de voiles et aussi combiné entre voiles et éléments flexibles ; les poteaux sont souvent les plus exposés à des modes de défaillance [11]. La survenance d'un dommage avec différents degrés est un processus aléatoire, donc, le seul outil approprié pour prédire la répartition des dommages attendus serait probabiliste.

Les relations utilisées pour caractériser la distribution des dégâts sont en forme de distribution de probabilité conditionnelle des états de dommages dans chaque mouvement du sol et sont généralement exprimés en termes de la matrice de probabilité de dommages ou courbe de fragilité [8]. Les fonctions de fragilité d'un bâtiment particulier ou d'une catégorie de bâtiment spécifique représentent la probabilité que sa réponse à l'excitation d'un séisme dépasse la vulnérabilité de divers états limites de dégâts. [4]

La vulnérabilité sismique des structures peut être estimée non seulement en termes de besoin pour empêcher l'effondrement de la structure, mais aussi pour prévenir les dommages qui peuvent causer de moindre interruption de service [18].

L'estimation des fonctions de fragilité à l'aide de l'analyse structurale dynamique est une étape importante dans un certain nombre de procédures d'évaluation sismiques [2].

Ce document traite de l'applicabilité des concepts d'inférence statistique pour l'estimation des fonctions de fragilité, en utilisant une analyse dynamique non linéaire via une analyse dynamique incrémentale pour construire des courbes de fragilité, et ce sera grâce à la modélisation d'une structure de six étages pour calculer la réponse dynamique de cette structure.



**Figure 1 :** la ville d'Imzouren après un séisme d'une magnitude de  $M_w = 6.2$  le 24 février 2004

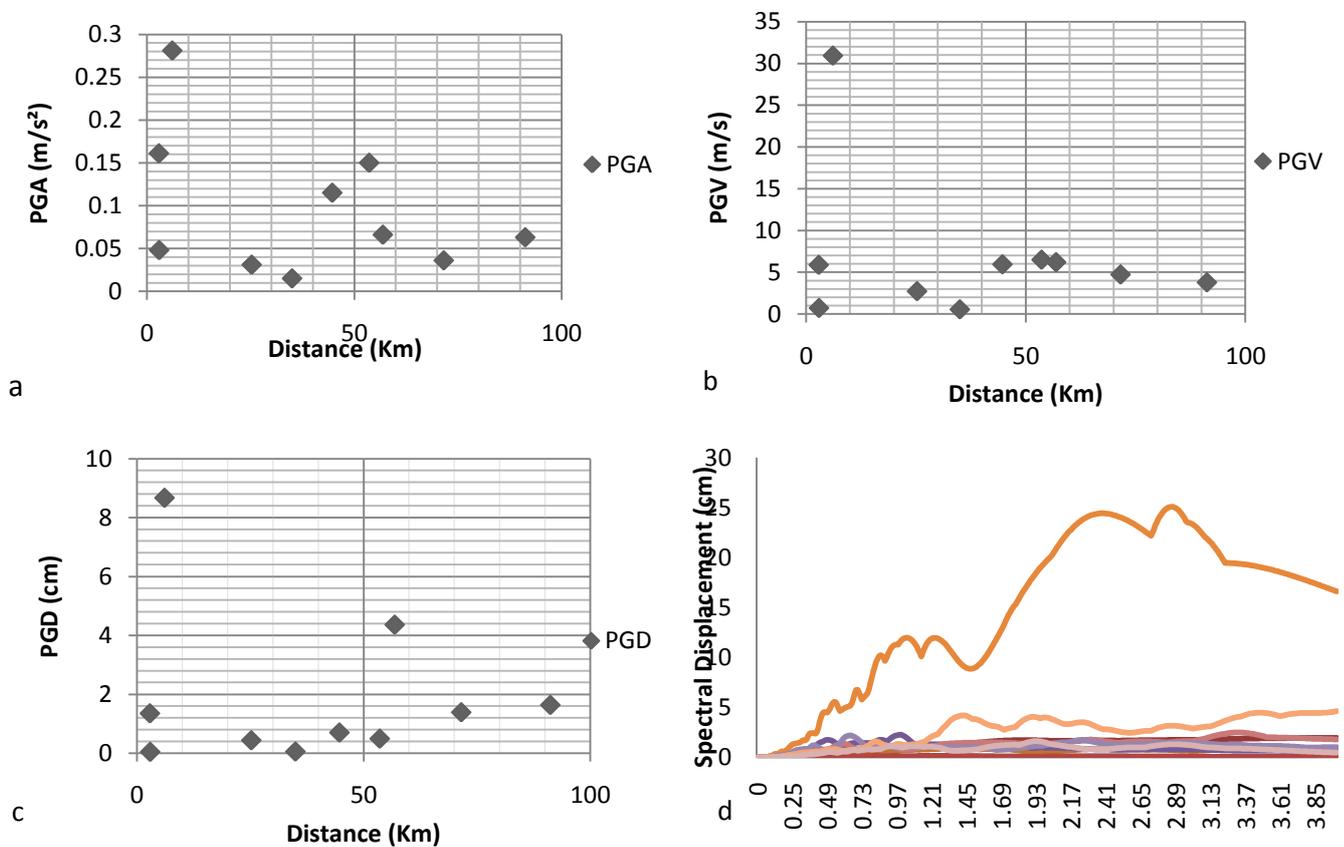
## 2. Données sismiques

Les analyses sur domaines de temps ont été effectuées sur l'ensemble de 10 enregistrements sismiques. Le tableau 1 résume la liste des séismes utilisés pour ce cas. Ces enregistrements sont collectés à partir du centre de recherche et d'ingénierie des séismes du pacifique communément appelé PEER. [12].

La figure 2 montre la variation des Pics d'Accélération du Sol, Pics de vitesse du Sol, Pics de déplacement du Sol et le spectre de déplacement de 5% d'amortissement ( $d$ ) pour les enregistrements sismiques sélectionnés.

**Tableau 1** : les enregistrements sismiques choisis pour cette étude.

Enregistrement No.	Séisme	Année	magnitude	Distance focale (km)
1	Helena, Montana-01	1935	6.0	2.86
2	Helena, Montana-02	1935	6.0	2.92
3	HumboltBay	1937	5.8	71.57
4	Imperial Valley-01	1938	5.0	34.98
5	Northwest Calif-01	1938	5.5	53.58
6	Imperial Valley-02	1940	6.95	6.09
7	Northwest Calif-02	1941	6.6	91.22
8	Northern Calif-01	1941	6.4	56.88
9	Borrego	1942	6.5	56.88
10	Imperial Valley-03	1951	5.6	25.24



**Figure 2** : Variation de (PGA) Pic d'Accélération du Sol (PGV) Pic de vitesse du Sol et (PGD) Pic de déplacement du Sol (a, b et c) et spectre de déplacement de 5% d'amortissement (d) pour les enregistrements sismiques sélectionnés.

### 3. Description de la structure et modélisation

Le cas d'étude est un bâtiment à six étages (le rez de chaussé et cinq autres étages) en béton armé. Le bâtiment est rectangulaire de 18 m de hauteur avec des étages de hauteurs égales de 3.00 m, la structure est constituée de trames de moments résistant avec 20 m de longueur et 10 m de largeur, avec 4 baies de 5 m sur toute sa longueur et deux de même distance sur sa largeur.

Il y a quinze poteaux dans chaque étage, les dimensions des poteaux est de 50x50 pour le rez-de-chaussée, 40x40 pour l'étage supérieur, 30x30 pour les autres étages. Les poutres sont de 30 cm de largeur et de 40 cm d'épaisseur.

Les planchers sont des diaphragmes supposés infiniment rigide d'une épaisseur de 20 cm. Le bâtiment est dimensionné suivant le règlement parasismique marocain RPS 2000 [17], les bars utilisés pour le renforcement sont respectivement pour le rez de chaussé, l'étage supérieure et les autres étages de (12 $\Phi$ 16) ;(9 $\Phi$ 16) and (9 $\Phi$ 14) [9]. Un modèle numérique tridimensionnel de cette structure est modélisé en utilisant sap2000 [3] et opensees [10] pour comparaison et vérification.

On a effectué une analyse élastique linéaire et une analyse modale en SAP2000 [3] et on a vérifié en opensees [10]. Les résultats montrent que la période fondamentale de vibration dans les deux logiciels est consistante, la période à la première vibration fondamentale (T1) est 1.04s.

Le béton utilisé a une contrainte de compression de 25 MPa et les barres d'acier sont des HA500. Le béton confiné et non confiné sont utilisés respectivement pour le noyau et le béton d'enrobage dans ces analyses.

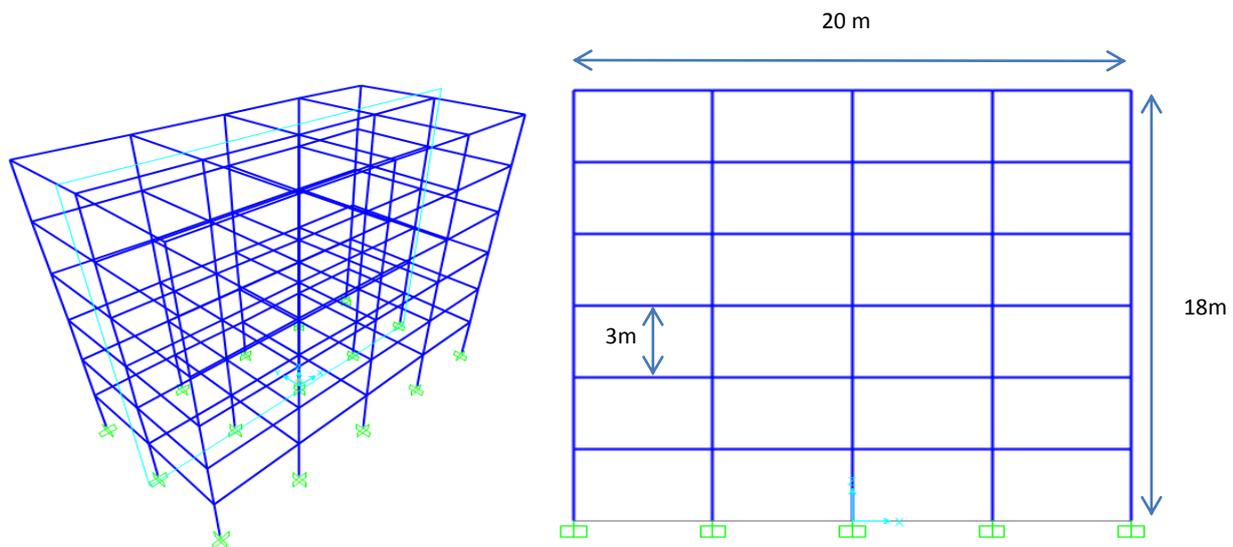


Figure 3:conception tridimensionnel du modèle éléments finis du de la structure

#### 4. Définition du problème

Durant les derniers séismes plusieurs questions à propos de la capacité d'un bâtiment et sa résistance face à de grands séismes ont commencé à voir le jour. Connaitre l'état de dommage et le seuil de la vulnérabilité est très primordiale pour une analyse fiable du bâtiment.

D'après l'historique des séismes enregistrés au Maroc, la plupart des séismes sont compris entre un intervalle de magnitudes de 4 et 7.

La majorité des bâtiments au Maroc n'excède généralement pas 6 étages. La particularité du parc immobilier marocain est généralement une ossature en béton armé s'appuyant généralement sur des poteaux, des poutres et des voiles de contreventement.

Modéliser une structure proche de ceux de la réalité est un bon outil de comparaison entre la conception sur logiciel et la réalité, de ce fait, nous allons modéliser une structure typique basé sur des plans de bâtiments marocains et en utilisant les propriétés des matériaux de construction locales.

L'objectif de cette étude est de déterminer avec une méthode probabiliste la vulnérabilité sismique comme mesure de dommage pour appréhender l'effet d'une exposition à une intensité sismique spécifique en s'appuyant sur les courbes de fragilité.

Les fonctions de vulnérabilité et de fragilité relient l'aléa sismique ou la distribution des séismes à l'estimation des pertes. Les fonctions de fragilité d'un bâtiment individuel ou une classe de bâtiments spécifique représente la probabilité que leur réponse par rapport à une excitation sismique excède un état limite de dommage. Les fonctions de vulnérabilité vont même plus loin et traduisent les mesures de dommages prédits en valeurs de décisions. [4]

Pour la dérivation des fonctions analytiques de fragilité, soit, pour estimer les paramètres de la fonction de fragilité. Il existe plusieurs approches telles que l'analyse incrémentale dynamique, l'analyse de bande multiple, la technique de simulation de Monte Carlo, et aussi l'échantillonnage hypercube latin ([7]; [16];[13]; [19]) parmi d'autres.

## 5. Evaluation probabiliste de la performance sismique

L'évaluation de la performance sismique probabiliste identifie la réponse d'une structure compte tenu des incertitudes associées aux événements sismiques et les réponses structurelles ultérieures. L'état limite, qui est désigné par l'état de dommages (DS), la probabilité de l'évaluation du risque sismique est définie par l'équation(1) en supposant que la demande sismique d'intensité (Q) et la capacité structurelle (R) comme des variables aléatoires. [5] :

$$P_{LS} = \sum_x P[DS|Q = x]. P[Q = x] \quad (1)$$

Où  $P[DS|Q = x]$  représente la fragilité sismique de la structure et  $P[Q = x]$  représente l'aléa sismique. Les fonctions de fragilité d'un bâtiment particulier ou d'une catégorie de bâtiment spécifique représentent la probabilité que sa réponse à l'excitation d'un séisme dépasse la vulnérabilité de divers états limites de dégâts. [4].

Fragilité sismique intègre les incertitudes associées à la réponse structurelle, qui est affectée par le dispositif de modification de réponse ou rétrofit. Les estimations de l'aléa sismique, d'autre part, sont caractérisées à partir d'analyses probabilistes de risques sismiques et sont souvent représentés sur la base de moyenne des taux d'occurrence d'un tremblement de terre. La Combinaison de ces informations donne des estimations de probabilités des différents niveaux de risques d'état de dégât. La Définition appropriée de la mesure des états de dégât de l'intensité sismique est l'une des étapes importantes pour l'évaluation sismique probabiliste. Les chercheurs ont proposé plusieurs unités de mesure de dommage pour les structures, mais il n'y a aucune ligne directrice spécifique pour choisir la mesure la plus appropriée de dommages [14]. Fema 356 [6] propose trois niveaux de performance structurale, soit, prévention d'effondrement « collapse prevention (CP) », sécurité de vie « Life safety (LS) » et occupation immédiate « Immediate Occupancy (IO) » avec des ratios de déplacement maximum admissibles correspondants de 5%, 2.5% et 0.7%. Et on considère aussi d'autres états limites de dommage comme 0.2% pour des Légers dégâts (Slight Damage), 0,5% pour les dommages modérés (Moderate Damage), de 1,0% pour les dommages importants (Extensive Damage), et 2,5% pour les dommages complets (Complete Damage).

Le spectre d'accélération (S) correspondant à la période fondamentale de la structure ( $T_1=1.04s$ ) est considéré comme mesure d'intensité sismique pour le présent travail.

La fragilité  $F(x)$  est estimée comme une distribution log normale indiquant la probabilité de dépassement des différents niveaux de dommages Eq 2[5] :

$$F_r(x) = \Phi[(\ln x - \ln \hat{S}_a)/\beta_R] \quad (2)$$

Où  $\hat{S}_a$  la moyenne des valeurs de fragilité de la structure en unité de  $S_a$  ,  $\beta_R$  est l'écart type lognormale du système de fragilité. Le paramètre de dispersion  $\beta_R$  qui reflète les incertitudes associé avec la demande sismique [5].

## 6. Résultats et discussion

Les courbes de fragilité obtenues en utilisant dix enregistrements sismiques factorisés sont estimés en utilisant une plage de données d'accélération spectrales en terme de ratio de déplacement maximum d'étages.

Les courbes de fragilités résultantes Figure (4 ; 5) montre qu'il y a une considérable variation entre les états limites de dommages.

Dans les courbes de fragilité obtenues les valeurs d'accélération qu'on adopte varient dans un intervalle de [0,2.3g] qui est pour le moins une très grande plage d'intensité sismique en unité d'accélération, mais pour une analyse fiable on a opté à considérer toutes les valeurs correspondantes à la période de la structure modélisée.

On constate d'après les résultats obtenues que pour les différents états limites de dommages la probabilité d'occurrence ou de dépassement varie considérablement d'un état à l'autre. Ainsi concernant l'état (Immediate Ocupancy) on observe que la probabilité d'atteinte de ce niveau de dommage d'un taux de 50% commence avec une très faible accélération vers environs 0.02g, et atteint une certitude complète vers une accélération de 0.083 g par contre concernant le niveau de dommage (slight damage) la probabilité d'occurrence à 100% commence à 0.03g, mais en analysant ce dernier on constate une insuffisance de données par rapport aux faibles accélérations.

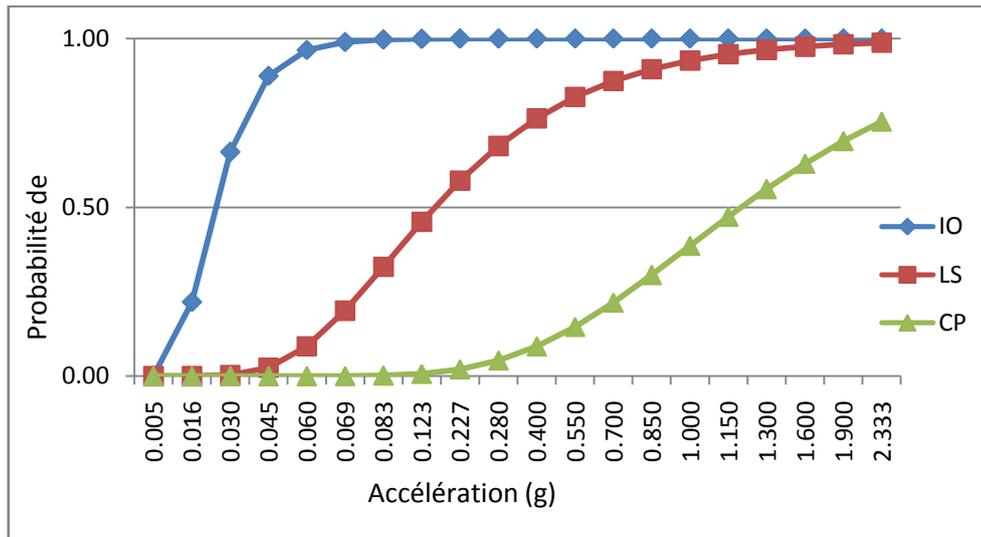


Figure 4 : courbes de fragilité pour niveaux de dommages (IO,LS,CP).

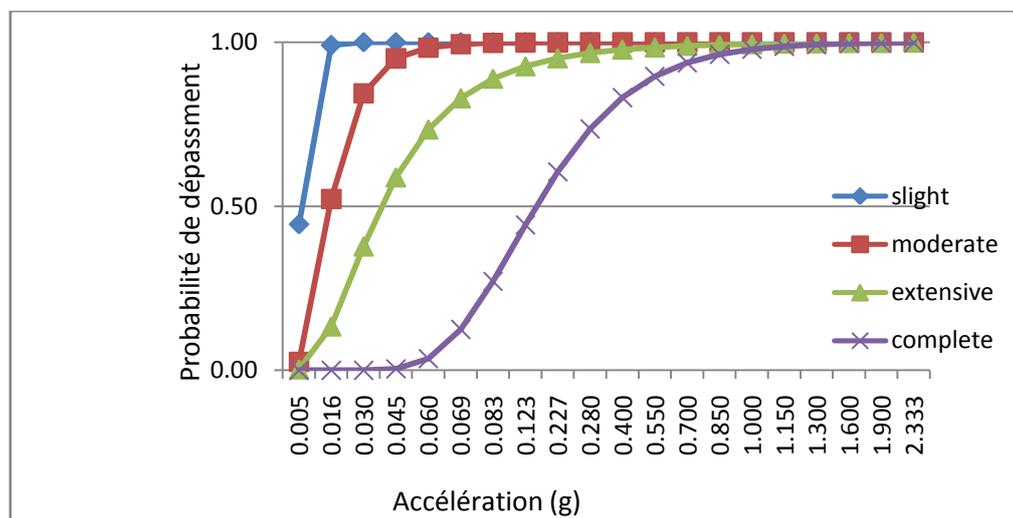


Figure 5 : courbes de fragilité pour niveaux de dommages (Slight, Moderate, Extensive, complete damage).

On peut dire distinctement que pour les faibles niveaux de dommages où ces derniers ne représentent pas un danger important, autrement dit quand il n'y a pas une perte de rigidité, les courbes de fragilité ne donnent pas un résultat distinct avec une précision irréprochable.

En ce qui concerne « moderate damage » et « extensive damage » on observe que l'apparition de ces deux niveaux de dommage commence quasiment de la même intensité, et se distingue quand la probabilité est de 50%, avec une valeur d'accélération de 0.016 g pour le premier et 0.04 g quant au deuxième, on commence donc à concevoir une intensité de valeurs moyenne.

Dans toute structure le niveau de dommage le plus craint est l'effondrement, ce que représentent les deux états limites « Collapse prevention » et « Complete damage », concernant le premier on observe que l'apparition de ce niveau de dommage apparait dès une intensité de 0.123 g et atteint une probabilité de 50% à 1.2 g, quant au deuxième, l'apparition commence plus tôt à 0.045 g et atteint une probabilité de 50% à 0.5g et devient une certitude de 100% à 1.6g.

### Conclusion

La procédure probabiliste qui réunit la vulnérabilité sismique et l'analyse dynamique non linéaire sous forme de courbes de fragilité offre une possibilité fiable capable de fournir des données réelles sur la capacité structurale face aux séismes en appliquant des enregistrements sismiques sur la structure à l'aide d'une analyse dynamique qui prend en compte les effets de l'intensité énergétique de la durée et la fréquence du séisme, et de distinguer

les différents niveaux de dommages subis par la structure avec précision ainsi que leur probabilité d'occurrence en terme d'intensité sismique.

En utilisant divers intensités de plusieurs enregistrements sismiques, on peut prédire la réponse d'une structure semblable à celle modélisé dans cette étude et connaître avec précision les valeurs d'intensité pouvant produire un certain niveau de dommages et sa probabilité de dépassement. Ainsi on peut conclure par exemple que pour une structure en béton armé de six étages en portiques la probabilité que ce niveau de dommage apparaisse commence d'une intensité 0.12g. Alors en connaissant l'historique des séismes d'une région et sa période de retour on peut dire si oui ou non une structure peut résister à une intensité précise.

Le présent travail a su évaluer avec précision la vulnérabilité sismique d'une structure en béton armé typique qui peut traduire un schéma directeur des structures et du bâti du parc immobilier marocain, et peut être pris comme référence pour les structures et ainsi intégrer les réglementations en vigueur comme un outil de base pour les dispositions parasismiques, fiables, précis et performants.

## Références

1. Douiri A., Mourabit T., Cheddadi A., Chourak M., Louhibi S., *J. Mater. Environ. Sci.* 6 (2) (2015) 366-376.
2. Baker J. W., "Efficient analytical fragility function fitting using dynamic structural analysis." *Earthquake Spectra* (2014).
3. Computers and Structures, Inc. SAP2000. Static and dynamic finite element analysis of structures; 2000.
4. Crowley H., Colombi M., Crempien J., Erduran E., Lopez M., Liu H., et al. GEM1 seismic risk report: Part 1. GEM technical report 2010-5. Pavia, Italy: GEM Foundation; 2010.
5. Ellingwood B.R., Kinali K., *Struct. Saf.* 31(2) (2009) 179-87
6. FEMA, 356: Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC; 2000.
7. Jalayer F. Ph.D. thesis. Stanford, CA: Dept. of Civil and Environmental Engineering, Stanford University; 2003.
8. Loss Estimation Methodology. Technical manual. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency (FEMA); 2003.
9. Mouzzoun M., Moustachi O., Taleb A., *J. Mater. Environ. Sci.* 3 (6) (2012) 1037-1044
10. McKenna F., Fenves G.L., Filipou F.C., Scott M., Law K., Deierlein G., et al. Pacific Earthquake Research Center (PEER), University of California, Berkeley, Stanford University and University of Washington; 2002.
11. Mitchell D., Tinawi R., Gardner N.J., Anthony G. Gillies, Ghobarah A., Anderson D.L. and Lau D. "The August 17, 1999, Kocaeli (Turkey) earthquake — damage to structures". *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28 (2001) 715-737
12. Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center Strong motion database (<http://ngawest2.berkeley.edu/>), University of California, Berkeley).
13. Paolacci F, Giannini R., *J. Earthq. Eng.* 13 (2) 2009)217-35.
14. Park J et al., *Eng. Struct.* 31(1) (2009)125-37.
15. Patrick Murphy Corella. Al-Hoceima earthquake. 2004.
16. Porter K., Kennedy R., Bachman R., *Earthqu. Spectr.* 23(2) (2007)471-89.
17. RPS2000, règlement parasismique marocain, Ministère de l'habitat et de l'aménagement de l'espace, Maroc, 2008.
18. Ufuk Hancilar, Eser Çakti, Mustafa Erdik, Guillermo E. Franco, George Deodatis. Earthquake vulnerability of school buildings: Probabilistic structural fragility analyses. 2014
19. Vamvatsikos D., Cornell C.A., *Earthq. Spectr.* 20(2) (2004) 523-53.