



## L'évaluation déterministe de l'effet de l'interaction sol-structure sur l'impact vulnérabiliste d'un bâtiment en béton armé (The deterministic assessment of the effect of the soil-structure interaction on a vulnerable impact of a reinforced concrete building)

Taoufik Tbatou<sup>1\*</sup>, Mohamed Rougui<sup>2</sup>, Mohammed El Youbi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Structure LEME, EST Salé – CED de l'EMI, Rabat Agdal- Université Mohammed V, Rabat, Maroc

<sup>2</sup> Structure LEME, EST Salé- Université Mohammed V, Rabat, Maroc

Received 17 March 2014, Revised 7 September 2014; Accepted 7 September 2014.

\* Corresponding author: Email: [tbatou.taoufik@gmail.com](mailto:tbatou.taoufik@gmail.com)

### Abstract

The aim of this study is to take into account the effect of the soil-structure interaction on the seismic response of a reinforced concrete structure as part of a capacitive approach (concept of analysis based on the performance) justified for seismic design of a reinforced concrete building. The response of the structure is evaluated using non-linear in-depth analysis submitted progressive landslides in different carrier bases (Recessed and flexible). A parametric analysis was used to quantify the effects of ISS on the damage of the structure, by the estimate structural damage, by modeling the system studied (soil-structure) by the mixed approach: digital two-dimensional by finite elements in the gantry structure, and stiffness at the interface of ground with the building.

*Keywords:* Building of portico, Damage index, Earthquake, Nonlinear, Soil-structure interaction.

### Résumé

L'objectif de cette étude, est de prendre en compte l'effet de l'interaction sol-structure sur la réponse sismique d'une structure en béton armé, dans le cadre d'une approche capacitive (concept d'analyse basée sur la performance), pour une conception parasismique justifiée d'un bâtiment en béton armé. La réponse de la structure est évaluée à l'aide de l'analyse en poussée progressive non-linéaire, soumis à des mouvements de terrain dans différents bases porteuses (encastree et flexible). Une analyse paramétrique a permis de quantifier les effets de l'ISS sur l'endommagement de la structure, par l'estimation des dommages structurels, en modélisant le système étudié (sol-structure) par l'approche mixte : numérique bidimensionnel par les éléments finis au niveau de la structure en portique, et par les raideurs au niveau de l'interface du sol avec le bâtiment.

*Mots clés :* Bâtiment en portique, Indice d'endommagement, Interaction sol-structure, Non linéaire, Séisme.

### 1. Introduction

L'estimation des dommages des structures en béton armé, sous l'excitation sismique à nos jours est indispensable. Néanmoins, Les récents progrès réalisés dans le traitement des données et les domaines de calcul numérique, conduisent à améliorer le contrôle du problème de la stabilité et de décrire réellement l'état sismique [1]. En effet, la prise en compte de l'interaction sol-structure est extrêmement importante pour une analyse complète et fiable des risques au niveau de la réponse structurelle.

La prévention d'un dommage structurel de différents degrés est primordiale. L'un des outils les plus appropriés pour prédire les risques depuis la phase de conception et de dimensionnement d'un bâtiment est *l'évaluation déterministe*. La méthodologie utilisée dans ce présent travail, pour estimer l'état de dommage, est basée sur la détermination de la capacité du bâtiment. Son spectre de réponse est le point de performance qui le caractérise dans le plan des déplacements ( $S_d$ ) et d'accélération ( $S_a$ ). Les états de dommages spécifiés à chaque mouvement sismique et la typologie du milieu porteur caractérisant l'effet de l'ISS, sont exprimés en termes des valeurs de l'indice de dommages décrivant l'état de la fragilité global du bâtiment [2].

## 2. Estimation simplifiée de la vulnérabilité structurelle

### 2.1. La performance du bâtiment

La bonne évaluation parasismique requiert un modèle capable d'analyser un large éventail des bâtiments, en captant l'essentiel des paramètres physiques et architecturaux des constructions multi-étages dans l'objectif d'obtenir les courbes de fragilité.

La méthode de capacité spectrale définie par ATC40 [3] et FEMA440 [4] évalue la performance du bâtiment en béton armé en matière de déplacements ( $S_d$ ) pour lesquelles une évaluation plus favorable de la sécurité parasismique peut éviter des mesures de renforcement coûteuses.

A partir d'une corrélation entre la courbe de comportement de la structure, pour le mode désiré généralement le mode fondamental de vibration (obtenue à partir d'une analyse statique en poussée progressive [5]), et la courbe de sollicitation du séisme (spectre de réponse non linéaire [6 et 7]), on obtient le point de performance. Sa position par rapport au niveau de la performance recherché, indique si ce niveau est atteint ou pas (Fig 1).

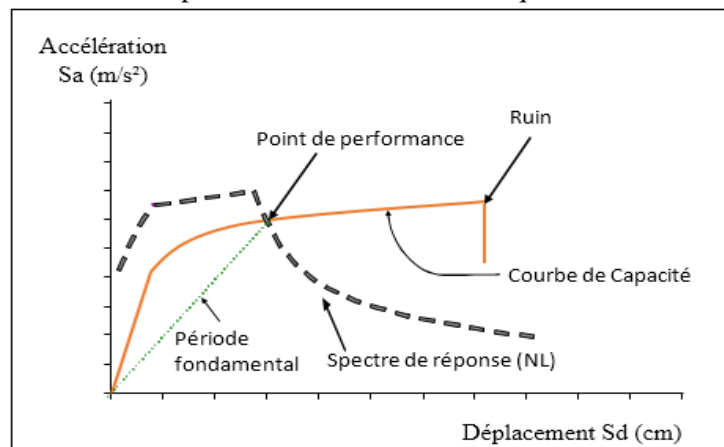


Figure 1 : Différents éléments de l'analyse basée sur la performance [2]

### 2.2. Indices des dommages

Les paramètres représentatifs de l'évolution des degrés de dommages d'une structure sous mouvement du sol, sont nombreux [8, 9]. Cependant, l'indice d'endommagement (DI) dépend de l'ensemble des paramètres de la réponse structurelle. Park et Ang [10] proposent des formules dépendant de l'énergie hystérésis pour le calcul de l'indice d'endommagement. Cet indice est normalisé et discrétisé en une série de valeurs partant de "0", indiquant que la structure n'a subi aucun dommage structurel, jusqu'à la valeur de "1" pour laquelle la structure atteint sa capacité maximale et une instabilité structurelle au voisinage de l'effondrement parfait.

Powell et Allahabadi [11] ont proposé un indice de dommage en terme de la ductilité ultime ( $\mu_u$ ) et la ductilité maximale ( $\mu_{max}$ ) atteinte au niveau de la performance pendant les vibrations du sol.

$$ID = \frac{\delta_p - \delta_y}{\delta_u - \delta_y} = \frac{\mu_{max} - 1}{\mu_u - 1} \quad (1)$$

$\delta_p$  : Déplacement dans l'état de performance de la conception.

$\delta_u$  : Déplacement dans l'état ultime de la conception.

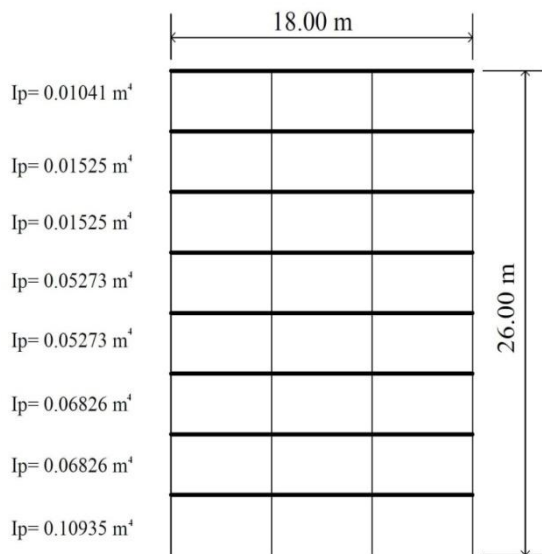
$\delta_y$  : Déplacement dans l'état élastique de la conception.

## 3. Application

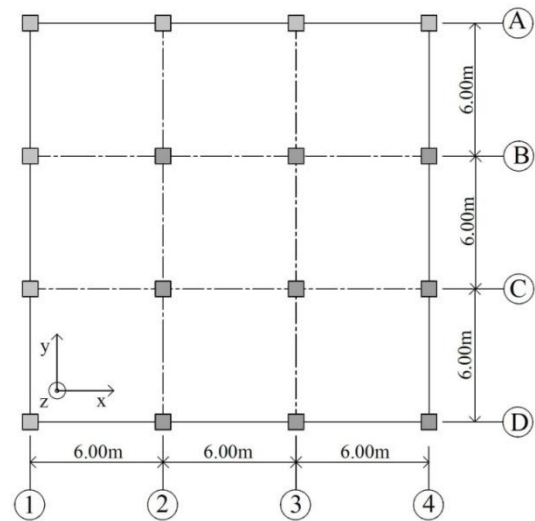
### 3.1. Description du cas étudié

#### 3.1.1. Bâtiment

Le bâtiment étudié, est un bâtiment d'habitation à sept étages sur un rez de chaussé en portique [12-13], essentiellement de forme carré de vue en plan, d'une hauteur de 3,25 m pour chaque niveau et de surface totale de 324 m<sup>2</sup> (Figures 2 et 3). La structure résistante est composée de dalles pleines d'épaisseurs 20 cm, les poutres sont de section (60x30) cm, tandis que les poteaux sont de différentes sections de forme carrée, et fondés sur des semelles d'une surface moyenne de 4 m<sup>2</sup>.



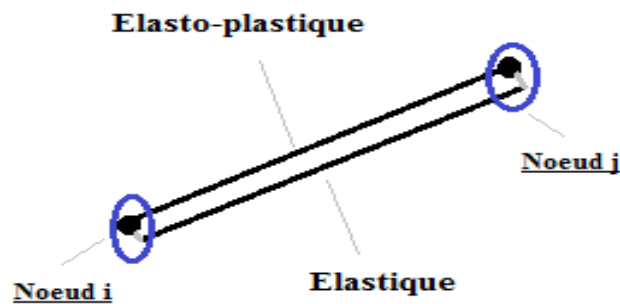
**Figure 2 :** Vue de face du bâtiment en béton armé (R+7) en 2D



**Figure 3 :** Vue en plan du bâtiment en béton armé (R+7) en 2D

Le comportement des planchers est supposé élastique et linéaire. Les non-linéarités sont portées par des éléments discrets de type rotule situés aux extrémités des poteaux et poutres, que l'on modélise par deux éléments en parallèles : Un linéaire, l'autre élasto-plastique parfait.

On forme ainsi, une rotule plastique parfaite sur le composant élasto-plastique (le modèle de deux composantes de Giberson [14] avec les modifications proposées par Prakash [15].



**Figure 4 :** Composants de Giberson de poutre-poteau.

Le béton utilisé est un béton de résistance 25Mpa, acier HA500, le ferrailage des poutres est (8HA16 armatures tendues, 4HA8 armatures comprimés) et le ferrailage des poteaux les plus sollicités est (8HA20). Le bâtiment est dimensionné selon le respect des règlements parasismiques [16 et 17].

### 3.1.2. Sol et signaux sismiques

Le bâtiment étudié est implanté sur différentes type du sol, dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau (1).

**Tableau 1 :** Caractéristiques physiques propres du sol utilisé

| Type du sol (ATC40) | Caractéristiques physiques du sol |                          |                              |                       |
|---------------------|-----------------------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------|
|                     | Module de cisaillement Gs (MPa)   | Module de Young Es (MPa) | Densité (Kg/m <sup>3</sup> ) | Module de Poisson (ν) |
| SC                  | 538,461538                        | 1400                     | 2200                         | 0,3                   |
| SD                  | 96,153846                         | 250                      | 1800                         |                       |
| SE                  | 15,384615                         | 40                       | 1700                         |                       |

Afin d'étudier l'effet de l'ISS sur la stabilité du bâtiment, par la méthode statique équivalente, en utilisant les spectre de réponse non linéaire défini par FEMA440 [4] (dans le cas de l'encastrement et de l'ISS au niveau de la base), dans les trois niveaux d'accélération des vibrations sismiques, que nous avons choisi d'après [3] (Zone sismique 1 avec une accélération de 0,75m/s<sup>2</sup>, zone 2 avec une accélération de 1,5m/s<sup>2</sup> et une accélération environ 2m/s<sup>2</sup> pour la zone 3).

### 3.2. Modélisation

Pour évaluer la vulnérabilité sismique du bâtiment choisie (R+7), une analyse de capacité progressive a été effectuée (Pushover), moyennant le programme d'analyse structurel [18].

On discrétise le milieu continue par des éléments finis, qui est composé de la structure du bâtiment en poutres et colonnes en béton armé de sept étages sur un rez de chaussée, soumis à des chargements vibratoires du séisme à différente amplitude. Le bâtiment est raisonnablement régulier et symétrique pour le chargement dans les deux sens x et y. Nous prenons par exemple l'axe «C» dans la figure 3 pour développer le modèle structurel 2D équivalent. Nous utilisons les mêmes propriétés de la rigidité du modèle en 3D pour les colonnes et les poutres en 2D. Ensuite on assimile à cet axe structurel «C» un affluent distribué des charges permanentes de 5KN/m<sup>2</sup> et d'exploitation de valeur 2 KN/m<sup>2</sup> le long de 0,5 x (6+6) = 6m. Les charges sismiques horizontales effectuées au niveau maximal à la toiture supérieure, définies par les équations de [16] sont décroissantes vers la base. Le modèle bidimensionnel équivalent respecte les propriétés dynamiques et la non-linéarité du comportement du modèle en 3D.

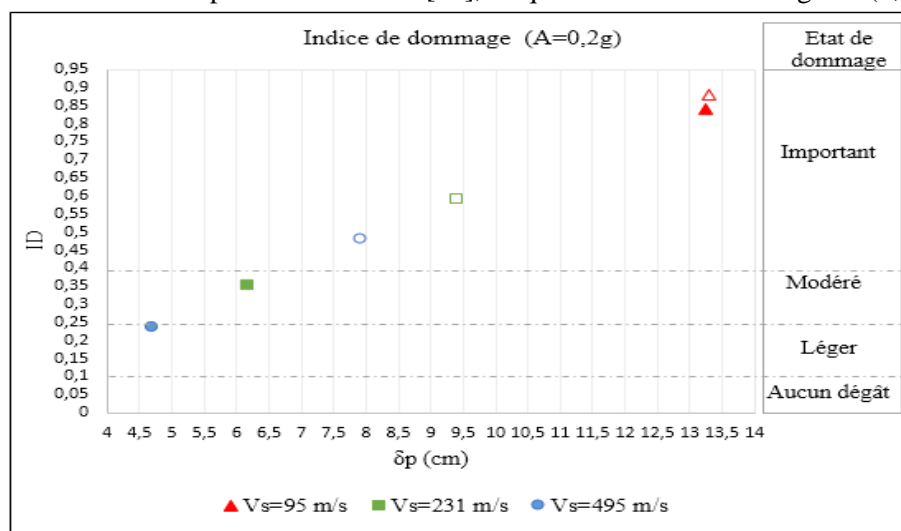
L'interface de la fondation du bâtiment avec le sol est modélisée par des raideurs élastiques de translations horizontales de rigidité donnée dans le tableau 2, reliant un ou plusieurs nœuds à une base rigide, définie par l'ensemble les équations données en [4].

**Tableau 2 :** Rigidité de l'interface du sol avec la structure

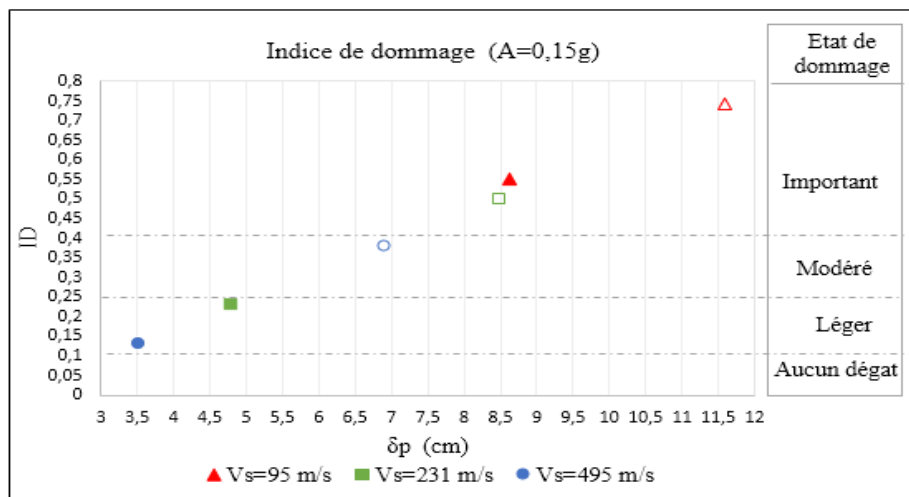
| Profil du sol  | Rigidité (MPa.m) |          |          |
|----------------|------------------|----------|----------|
|                | Zone 1           | Zone 2   | Zone 3   |
| S <sub>C</sub> | 2854,246         | 2774,167 | 2745,568 |
| S <sub>D</sub> | 492,322          | 480,065  | 469,851  |
| S <sub>E</sub> | 70,273           | 64,144   | 58,588   |

## 4. Identification de l'effet d'ISS au niveau de la vulnérabilité sismique

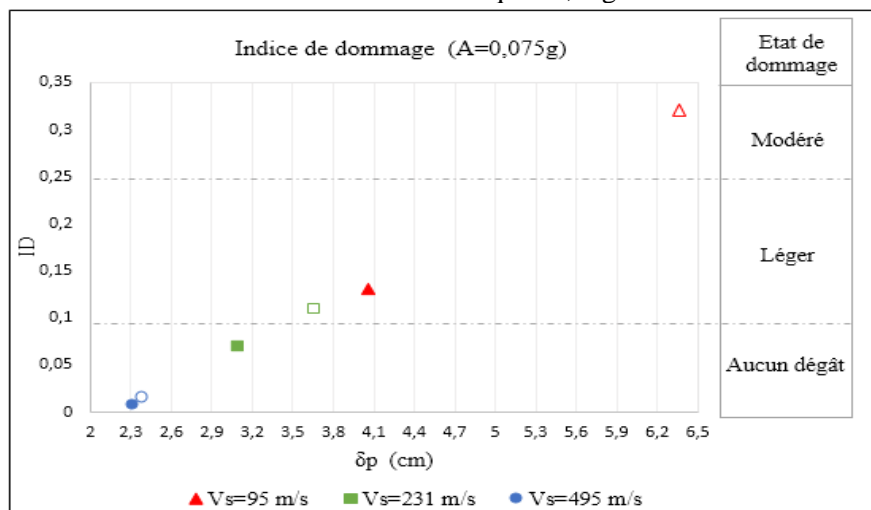
Nous projetons dans le plan les valeurs (ID) calculées pour chaque catégorie de la base porteuse, à partir de l'équation (1), et les résultats des simulations numériques de la méthode de progression en capacité (Pushover). Cette projection des valeurs (ID) permet de caractériser l'influence de la flexibilité de l'interface au niveau de la fondation sur la réponse structurelle [19], ce qui est illustré sur les figures (5, 6 et 7).



**Figure 5 :** Indices d'endommagement du bâtiment (R+7) en fonction du déplacement maximal - Accélération sismiques 0,2g -



**Figure 6 :** Indices d'endommagement du bâtiment (R+7) en fonction du déplacement maximal - Accélération sismiques 0,15g -



**Figure 7 :** Indices d'endommagement du bâtiment (R+7) en fonction du déplacement maximal - Accélération sismiques 0,075g -

Les figures 5, 6 et 7 montrent clairement les indices d'endommagement obtenus du bâtiment pour chaque cas du sol étudié en fonction des déplacements maximaux au niveau du point de la performance du bâtiment (R+7), issue de différents chargements sismiques équivalents aux charges horizontales (suivant l'axe x). Cependant, on constate que l'indice d'endommagement du bâtiment obtenu en tenant compte de l'interaction sol-structure est toujours inférieur à celui calculé en l'absence de ce dernier.

Pour  $A=0.2g$  ; lorsque l'accélération est élevée, le comportement du bâtiment en tenant compte de l'interaction sol-structure se rapproche de la valeur calculée à base encastree pour le type du sol  $S_E$  ( $V_s=95m/s$ ), cela est due à l'existence de l'amplification dynamique élevée. Pour le sol de  $V_s=231m/s$  et  $V_s=495m/s$ , on constate que l'indice d'endommagement se trouve dans le niveau important [2] en cas de la base encastree (symbole vide), par contre le niveau de l'indice de dommage est respectivement modéré et léger dans le cas d'ISS (symbole pleine) pour les mêmes types des sols.

Pour une valeur de l'accélération  $A=0.15g$  ; l'endommagement de la structure estimé dans la figure 5, se réduit au résultat des figures 6 et 7. Cela est due à la réduction de l'intensité utilisée (accélération du sol), dans ce cas, pour le même aléa sismique, l'indice ID en tenant compte de l'ISS chute d'une manière important (plus que la moitié) pour les sols  $S_C$  et  $S_D$  et environ 25% pour  $S_E$  (de 0,74 à 0,55).

Pour une valeur de l'accélération  $A=0.075g$  ; le niveau d'endommagement de la structure pour chaque cas du sol est moins significatif par rapport aux résultats précédents, à l'exception du cas de l'encastrement du bâtiment étudié au sol  $S_E$  atteint le niveau modéré ( $ID=0,32$ ). Par ailleurs, pour les deux types des sols de  $V_s=95m/s$  et  $V_s= 231 m/s$  ; on pourra constater que les valeurs en tenant compte de l'ISS sont moins

importantes à celles calculées en cas de l'encastrement. Pour le sol de  $V_s=495\text{m/s}$ , la valeur de dommage en tenant compte de l'ISS se rapproche de la valeur du cas de la base encastree, ce qui serait due à la rigidité de ce type du sol par rapport au niveau d'excitation sismique faible.

D'une manière générale, il est clair que l'effet global de l'ISS, lors de l'analyse dynamique par la méthode équivalente de progression capacitive, est toujours favorable en diminuant considérablement l'endommagement subit par la structure.

## Conclusion

Les résultats obtenus à l'issue de ce travail, montrent que la prise en compte de l'interaction sol-structure, modélisée par la méthode statique non linéaire au niveau de la structure et le calcul paramétrique dans le domaine élastique pour l'interface de la fondation avec le sol, peut modifier de façon optimale les prédictions d'endommagement d'un bâtiment lors d'un chargement sismique. Bien que dans les dix-huit cas étudiés (figures 5, 6 et 7) le niveau d'endommagement décroît de façon appréciable avec le phénomène de l'ISS, et par conséquent, un dimensionnement du bâtiment en béton armé sera traditionaliste si on néglige les effets de l'ISS.

## Références

1. Esteban S., Fernando L.C., Arézou M., Farahmand R., *Structural safety*, 33 (2011) 51– 63.
2. Park YJ, Ang AHS, Wen YK. Damage-limiting aseismic design of buildings. *Earth Spectra* 3(1) (1987) 1–26.
3. ATC. "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings", ATC 40, Redwood City: Applied Technology Council (1996).
4. FEMA 440. "Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures (draft) (Report ATC and FEMA)". Applied Technology Council (ATC55 Project) and Federal Emergency Management Agency (2004).
5. Fajfar P., Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 28 (1999) 979-993.
6. Fajfar P., A nonlinear analysis method for performance based seismic design. *Earthquake Spectra*, 16 (3) (2000) 573-592.
7. Fajfar P., Fischinger, M. N2. A method for nonlinear seismic analysis of regular buildings. Proceedings of the 9<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Kyoto; Tokyo: Maruzen 5 (1988) 111-16.
8. Cosenza C., Manfredi G., and Ramasco R., "The use of damage functional in earthquake engineering: a comparison between different methods" *Earthquake Eng. Struct. Dyn* 22 (1993) 855-868.
9. Ghobarah A., Abou-Elfath H., and Biddah A., "Response-based damage assessment of structures." *Earthquake Eng. Struct. Dyn* 28 (1999) 79–104.
10. Park Y., Ang A., "Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete", *Journal of Structural Engineering, ASCEE*, n° 4 (111) (1985) 722-739.
11. Powell G. H., and Allahabadi R., "Seismic damage predictions by deterministic methods: concepts and procedures." *Earthquake Eng. Struct. Dyn* 16 (1988) 719–734.
12. EN, Eurocode 8. Design of structures for earthquake resistance, Ed. Eyrolles (2004).
13. BAEL 91 modifiées 99 "règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites", Éd. Eyrolles (2000).
14. Giberson M., "Two nonlinear beams with definitions of ductility", *Journal of Structural Division* 2 (1969) 137-157.
15. Prakash V., Powel G., Campbell S., "DRAIN 2D-X Base program description and user Guide", Report UCB, Department of Civil Engineering, University of California Berkeley (1993).
16. RPS2000, Règlement parasismique marocain. Ministère de l'habitat et l'aménagement de l'espace, Maroc (2008).
17. FEMA 2000. Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA 356. Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency.
18. Structural Analysis Program (2000), tutorial-quick pushover analysis tutorial- computer and structures, Berkeley, California (1999).
19. Kunnath S.K., "Cumulative Seismic Damage" Techn. Rep. NCEER 97-0006, State Univ. of New York, Buffalo. (1997).