



# INFLUENCE DU SITE SUR LA MODÉLISATION DES DOMMAGES SISMIQUES DES STRUCTURES EN BÉTON ARMÉ PAR LA MÉTHODE PUSHOVER

**A. KAHIL<sup>1</sup>, M. HAMIZI<sup>2</sup>, N.E. HANNACHI<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Doctorant en génie civil, Laboratoire de Modélisation Expérimentale et numérique des Matériaux et Structures (LaMoMs), Université de Tizi-Ouzou, Algérie, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou B.P.17 Tizi-Ouzou 15000. E-mail: amar.kahil@yahoo.com

<sup>2</sup> Maître de conférence, Laboratoire de Modélisation Expérimentale et numérique des Matériaux et Structures (LaMoMs), Université de Tizi-Ouzou, Algérie, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou B.P.17 Tizi-Ouzou 15000. E-mail: chamizi@yahoo.fr

<sup>3</sup> Professeur, Laboratoire de Modélisation Expérimentale et numérique des Matériaux et Structures (LaMoMs), Université de Tizi-Ouzou, Algérie, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou B.P.17 Tizi-Ouzou 15000. E-mail: hannachina@yahoo.fr

## CONTEXTE

Notre groupe de recherche, rattaché au Laboratoire de Modélisation des Matériaux et des Structures de Génie civil de l'Université de Tizi-Ouzou, s'est assigné comme objectif, l'étude et l'appréciation de la performance sismique des ouvrages (aussi bien de type bâtiments que de réservoirs d'eau). La majorité des villes en Algérie, édifiées avant les années 80, étaient construites dans l'ignorance totale des risques sismiques. En effet, les bâtiments ainsi que les ouvrages hydrauliques situés dans les zones à sismicité avérée devraient dans ce cas faire l'objet d'inspections et d'évaluations techniques afin de vérifier leur

supposée 'tenue'. Non seulement, il faudrait évaluer la vulnérabilité de ces ouvrages, mais aussi, s'assurer de leur performance sismique.

La vulnérabilité est évaluée grâce à des outils informatiques basés sur l'approche analytique et sur des méthodes issues des sciences de l'information géographique (SIG, bases de données spatiales, géo-référencement des informations, représentations cartographiques...).

Les objectifs attendus sont d'arriver à un indicateur conventionnel de vulnérabilité qui doit permettre de classer les ouvrages de la simple petite réparation à la démolition. Quant à la performance sismique, elle sera obtenue par une méthode statique non linéaire, la



méthode push over. Cette méthode nécessite, pour obtenir le point de performance, une courbe de *capacité* sismique du bâtiment, et une courbe représentant la *demande* sous forme d'un spectre de réponse obtenu à partir du règlement parasiémique Algérien. Un niveau de dommage est alors obtenu et des propositions de conformité sont formulées afin d'améliorer leur gestion patrimoniale. Cette approche a été validée pour des ouvrages se trouvant dans la zone épicentrale du dernier séisme du 21 mai 2003.

## 1. INTRODUCTION

Les séismes occupent un problème d'actualité dans les pays à sismicité avérée. Ces manifestations soudaines et imprévisibles provoquent assez souvent des dégâts dans les ouvrages de génie civil. C'est la raison pour laquelle la prévention et la connaissance du comportement de ces ouvrages sont indispensables [1].

Dans ce travail, nous nous intéressons particulièrement à l'évaluation des dommages probables attendus sur des structures réalisées en portiques en béton armé et implantées sur de différents sites. Cette évaluation est basée sur la méthode « Pushover » et le point de performance.

## 2. MÉTHODOLOGIE D'ESTIMATION DU POINT DE PERFORMANCE

Afin de déterminer le point de performance, nous utilisons la méthode statique non linéaire qui consiste à comparer la demande avec la capacité sismique. Cette méthode est une analyse pseudo statique non-linéaire simplifiée [4], qui nécessite la définition des paramètres suivants:

- La demande sismique.
- La capacité sismique.
- Le point de performance.

### 2.1. La demande sismique

La notion la plus répandue pour représenter un séisme est le spectre de réponse. Il fournit la réponse maximale d'un oscillateur linéaire soumis à un séisme.

Le spectre de réponse élastique  $S_a(T)$  pour les composantes horizontales de l'action sismique, est défini par l'expression suivante [3] :

$$S_{a/g} = \begin{cases} 1.25A \left( 1 + \frac{T}{T_1} \left( 2.5\eta \frac{Q}{R} - 1 \right) \right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5\eta(1.25A) \left( \frac{Q}{R} \right) & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta(1.25A) \left( \frac{Q}{R} \right) \left( \frac{T_2}{T} \right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3.0s \\ 2.5\eta(1.25A) \left( \frac{T_2}{3} \right)^{2/3} \left( \frac{3}{T} \right)^{5/3} \left( \frac{Q}{R} \right) & T > 3.0s \end{cases} \quad (1)$$

### 2.1.1. Représentation spectrale de la demande sismique

Chaque point du spectre de réponse élastique (équation 1), est représenté dans un diagramme  $S_a = f(T)$  [1], pour un amortissement de type visqueux. Chacun des points précédents  $S_{ai} = f(T_i)$ , est transformé dans un diagramme  $S_d = g(S_a)$ , où  $(S_d)$  est le déplacement spectral [4], donné par la relation (2):

$$S_d = \frac{T^2 \times S_a}{4\pi^2} \quad (2)$$

### 2.2. La courbe de capacité

La courbe de capacité d'une structure est une représentation graphique, qui relie l'effort tranchant à la base de celle-ci au déplacement du sommet, elle est obtenue, par un calcul statique non linéaire, appelé analyse 'Pushover'. Le principe de cette analyse consiste en l'application d'une force latérale que l'on augmente d'une manière incrémentale, jusqu'à atteindre le déplacement maximal du bâtiment [4].

### 2.2.1. Représentation spectrale de la capacité sismique

Les courbes de capacité sont exprimées dans la représentation classique  $V=f(\Delta s)$ , avec  $V$  est l'effort tranchant à la base du bâtiment et  $(\Delta s)$  le déplacement au sommet du bâtiment.

La représentation spectrale de la capacité sismique est obtenue, en multipliant l'effort tranchant et le déplacement par  $\frac{\alpha_1}{w}$  et  $\frac{1}{(P_{f1} \cdot \phi_{1s})}$  respectivement et les valeurs de  $(S_a)$  et  $(S_d)$  sont données par :

$$S_a = V \cdot \alpha_1 / W \quad (3)$$

$$S_d = \Delta / (P_{f1} \times \phi_{1s}) \quad (4)$$

avec :  $\alpha_1$  est le coefficient de masse modale.  $P_{f1}$  est le facteur de participation du premier mode et  $\phi_{1s}$  est l'amplitude au sommet, du premier mode qui est normalisé à 1.

## 3. MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DES DOMMAGES SISMIQUES

Afin de déterminer le point de performance qui correspond à l'égalité entre le déplacement maximum élastique et inélastique, nous avons utilisé la procédure itérative dans laquelle on a superposé les deux courbes spectrales de la capacité et de la demande.

L'approche élastique classique, nous permet d'obtenir une première valeur qui est déterminée par l'intersection de la demande spectrale à (5%) d'amortissement avec la tangente à l'origine de la courbe de capacité [5], qui corres-

pond au déplacement spectral ( $S_{dp1}$ ) et la projection de ce point sur la courbe de capacité nous donne ( $S_{ap1}$ ). En ce point le déplacement élastique est égal au déplacement inélastique.

La demande sismique à 5% d'amortissement, est affectée par des coefficients de réduction spectraux  $S_{RA}$  et  $S_{RV}$  tels que :

$$S_{RA} = \frac{3.27 - 0.68 \times \ln(\xi_{eff})}{2.12} \quad (5)$$

$$S_{RV} = \frac{2.31 - 0.41 \times \ln(\xi_{eff})}{1.65} \quad (6)$$

avec

$$\xi_{eff} = 5 + 63.7 \times K \times \left[ \frac{S_{ay1} \times S_{dp1} - S_{dy1} \times S_{ap1}}{S_{ap1} \times S_{dp1}} \right] \quad (7)$$

Où :  $K$  est le coefficient de capacité de dissipation d'énergie,  $S_{ay}$  est la limite élastique en accélération et  $S_{dy}$  est la limite élastique en déplacement.

### 3.1. Déterminations du point de performance

Le spectre de la demande sismique à (5%) d'amortissement est réduit une fois qu'il est multiplié par les coeffi-

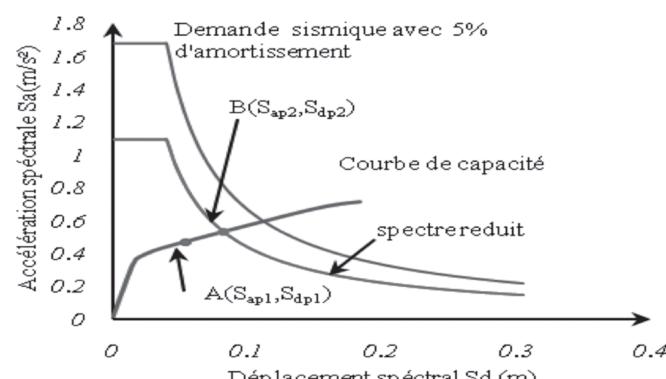


Figure 1 : Détermination du deuxième point de performance

cients de réduction spectraux  $S_{RA}$  et  $S_{RV}$  [4,6]. Son intersection avec le spectre de capacité définit le deuxième point de l'essai B ( $S_{ap2}$ ,  $S_{dp2}$ ). (Figure.1)

Le deuxième point de performance B ( $S_{ap2}$ ,  $S_{dp2}$ ), est comparé en termes de déplacement au premier point de l'essai A ( $S_{ap1}$ ,  $S_{dp1}$ ), affecté par un coefficient de 0,07, qui représente la tolérance pour l'estimation du premier point donné par la condition suivante :

$$S_{dp2} \geq 1.07 \times S_{dp1} \quad (8)$$

Si la condition (8) est vérifiée, le deuxième point (B) devient le point de performance. Sinon un nouveau point C ( $S_{ap3}$ ,  $S_{dp3}$ ) doit être choisi tel que :

$$S_{ap3} = S_{ap2} + \Delta S_{ap} \quad (9)$$

$$S_{dp3} = S_{dp2} + \Delta S_{dp}$$

Le processus ainsi développé est répété autant de fois jusqu'à la satisfaction de la condition (8).

### 3.2. Estimation des dommages sismiques

Nous rappelons que sur la courbe de capacité, la position du point de performance détermine un certain degré de dommage et niveaux d'endommagement (tableau 1), à travers la représentation graphique de la capacité sismique (figure 2).

La partition de la courbe de capacité en cinq domaines de dommages (Figure 2), nous permet de bien évaluer les degrés des dommages que la structure va subir en fonction de la variation du point de performance, qui se circonscrit dans un intervalle, qui définit un état d'endommagement de la structure pour les différentes accélérations sismiques.

## 4. APPLICATION DE LA MÉTHODE

### 4.1. Présentation du bâtiment étudié

Le bâtiment étudié est une structure constituée de portiques auto-stables en béton armé en (R+5), avec des remplis-

Niveaux d'endommagements	Degré de dommage	Description des dommages	Le déplacement spectral associé
NIV 01	DG1	Corresponds au comportement élastique de la structure et représente le niveau de conception parasismique habituel. Il indique par conséquent un état d'endommagement superficiel	$S_d = 0,4 S_{dy}$ pour DG1
	DG2		$S_d = 0,8 S_{dy}$ pour DG2
NIV 02	DG3	Corresponds à un niveau de dommage contrôlé. La stabilité de la structure n'est pas en danger, mais toutefois un endommagement mineur est susceptible de se développer. C	$S_d = S_{dy} + 0,25 (S_{du} - S_{dy})$
NIV 03	DG4	Niveau représente un état d'endommagement avancé, la stabilité de la structure étant en danger.	$S_d = 0,75 S_{du}$
NIV 04	DG5	La structure est susceptible de s'effondrer, ne présentant plus de capacité de résistance.	$S_d = S_{du}$

Tableau 1 : État d'endommagement des structures en béton armé

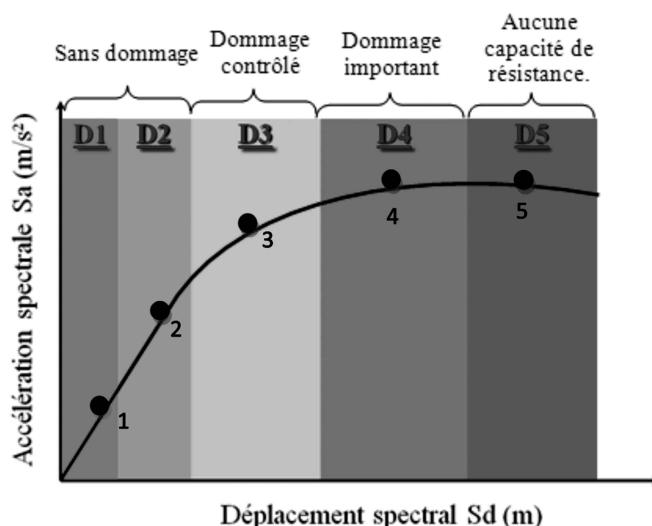


Figure 2 : Représentation graphique de l'état d'endommagement des structures en béton armé

sages en maçonnerie. La configuration en élévation, en plan, ainsi que les coupes verticales suivant les deux directions sont représentées sur les figures 3,4, 5 et 6. [9] et [10].

## 4.2. Caractéristiques des sites

### 4.2.1. Catégories et Critères de classification

Les sites sont classés en quatre (04) catégories en fonction des propriétés mécaniques des sols qui les constituent et en fonction des périodes de transition spectrales  $T_1$  et  $T_2$  [3].

### 4.2.2. Propriétés mécaniques des sols

#### 4.2.2.1. Catégorie S1 (site rocheux)

Roche ou autre formation géologique caractérisée par une vitesse moyenne d'onde de cisaillement  $V_s \geq 800$ m/s.

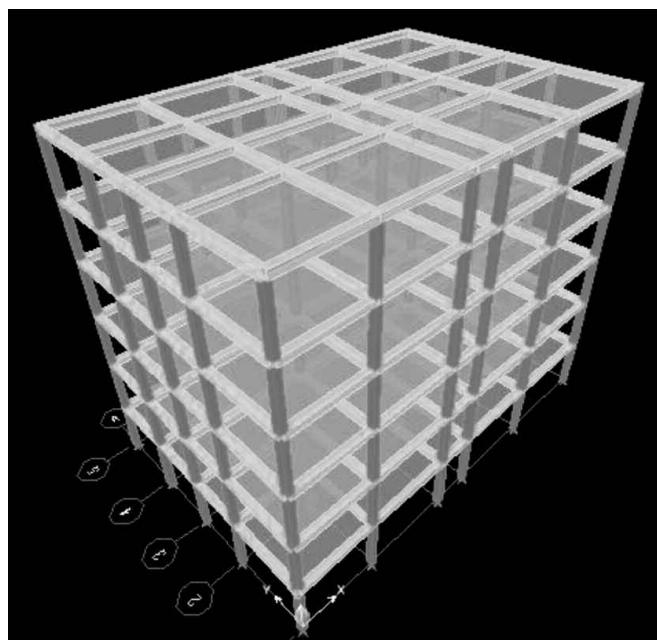


Figure 3 : Vue en 3 D

#### 4.2.2.2. Catégorie S2 (site ferme)

Dépôts de sables et de graviers très denses et/ou d'argile sur consolidée sur 10 à 20 m d'épaisseur avec  $V_s \geq 400$  m/s à partir de 10 m de profondeur.

#### 4.2.2.3. Catégorie S3 (site meuble)

Dépôts épais de sables et graviers moyennement denses ou d'argile moyennement raide avec  $V_s \geq 200$  m/s à partir de 10 m de profondeur.

#### 4.2.2.4. Catégorie S4 (site très meuble)

Dépôts de sables lâches avec ou sans présence de couches d'argile molle avec  $V_s < 200$  m/s dans les 20 premiers mètres. Dépôts d'argile molle à moyennement raide avec  $V_s < 200$  m/s dans les 20 premiers mètres.

### 4.2.3 Périodes caractéristiques associées à la catégorie de site

Les périodes caractéristiques des sites sont récapitulées dans le tableau 2.

Site	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$
$T_1$ (sec)	0,15	0,15	0,15	0,15
$T_2$ (sec)	0,30	0,40	0,50	0,70

Tableau 2 : Valeurs de  $T_1$  et  $T_2$

## 5. ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

La variation du point de performance en fonction de l'accélération sismique pour les différents types de sol, est donnée par les figures 7 et 9. Les dommages correspondant aux variations étudiées sont représentés par les figures 8 et 10.

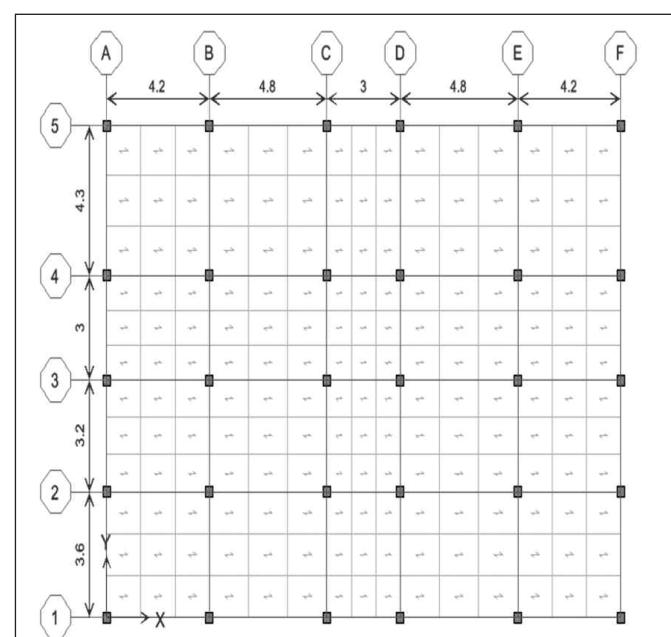


Figure 4 : Configuration en plan

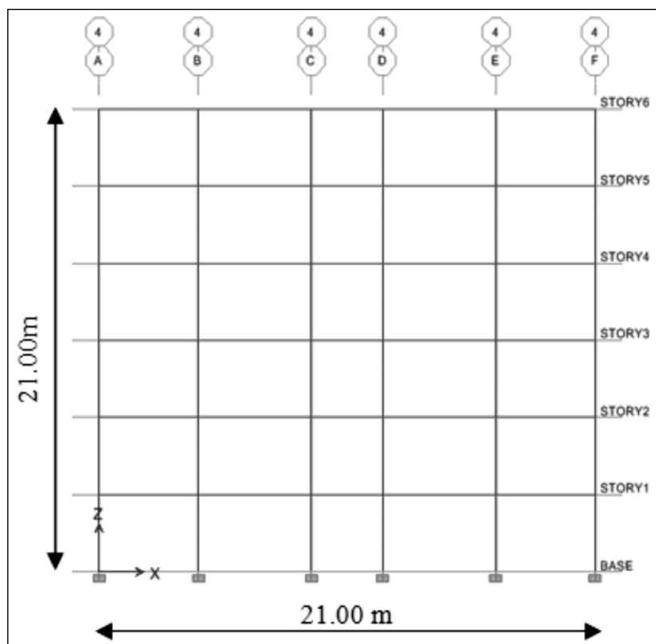


Figure 5 : Coupe verticale direction -xx-

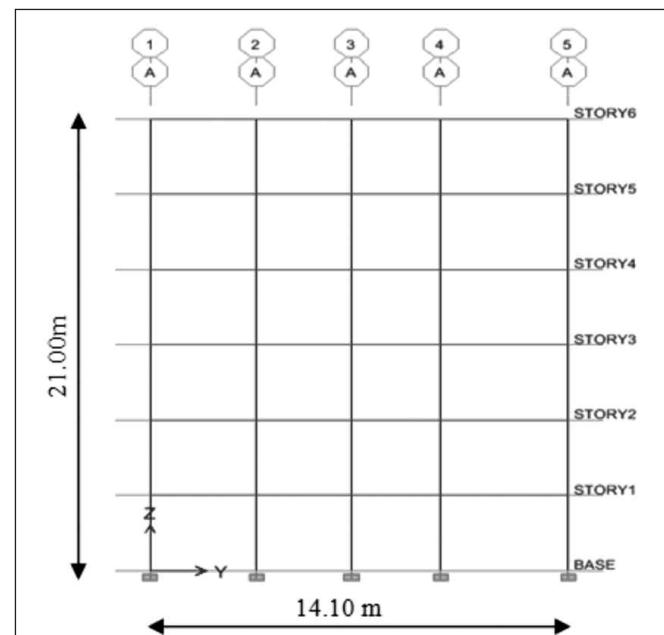


Figure 6 : Coupe verticale direction -yy-

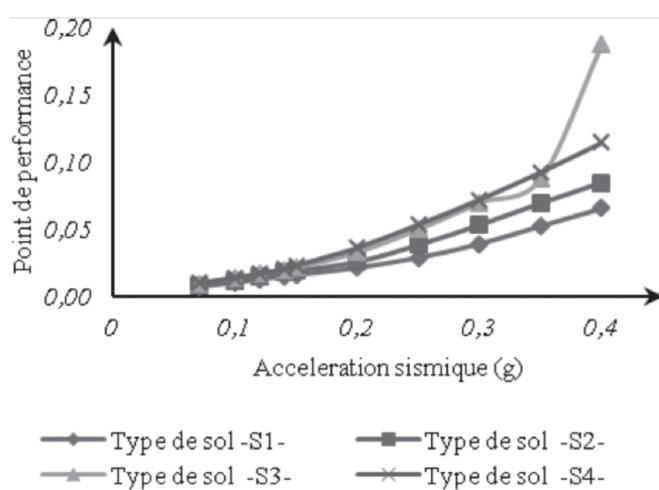


Figure 7 : Variation du point de performance en fonction de l'accélération sismique et le type de sol - Direction xx-

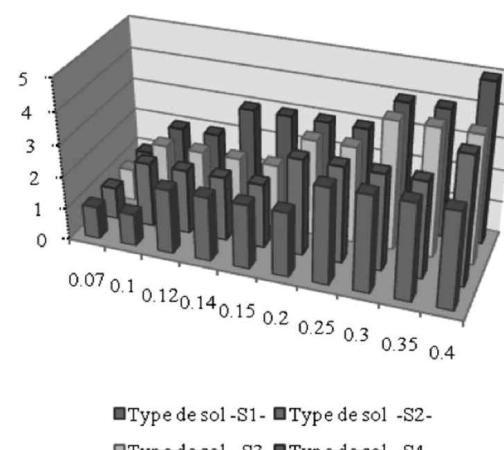


Figure 8 : Variation des dommages en fonction de l'accélération sismique et le type de sol - Direction xx-

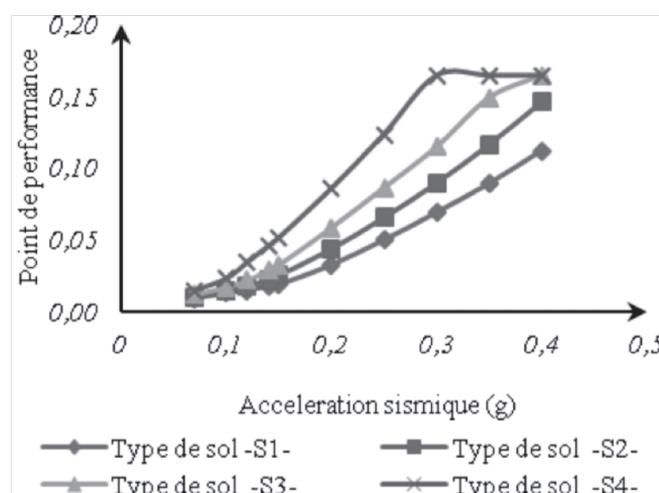


Figure 9 : Variation du point de performance en fonction de l'accélération sismique et le type de sol - Direction yy-

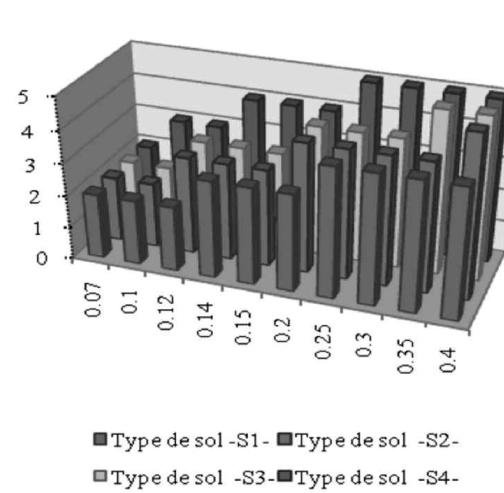


Figure 10 : Variation des dommages en fonction de l'accélération sismique et le type de sol - Direction yy-



Les figures 7 et 9 représentent la variation du point de performance en fonction de l'accélération sismique pour les différents sites. Nous constatons que les bâtiments en portiques présentent une vulnérabilité plus élevée, c'est-à-dire une performance plus faible, pour les sites dont la vitesse de cisaillement est faible à savoir les sites ( $S_3, S_4$ ). Par contre, les bâtiments implantés sur des sites dont les vitesses de cisaillement sont plus ou moins importantes (sites  $S_1, S_2$ ) ont une performance améliorée. D'autre part, nous constatons que la vulnérabilité est plus élevée pour les bâtiments implantés sur des sites dont l'accélération du sol est plus élevée. De ce fait, les dommages sismiques occasionnés aux bâtiments sont plus importants pour le site dont la vitesse de cisaillement est moins importante.

## CONCLUSION

Cette étude a permis de mettre en évidence l'influence du type de sol (site d'implantation) sur la performance sismique des structures auto-stables en fonction de l'accélération sismique. Les dommages sismiques occasionnés aux bâtiments sont plus importants pour les sites dont la vitesse de cisaillement est faible (site meuble et très meuble). De ce fait, l'enregistrement accélérométrique reste le seul outil fiable permettant d'estimer la capacité portante du site et la méthode pushover d'estimer le point de performance avec précision. Ces deux outils combinés ensemble permettent de mieux connaître le comportement sismique des bâtiments et de contrôler les dommages attendus.

## RÉFÉRENCES

- [1] Zacek, M. 1996. (1996). Construire Parasismique. Éditions Parenthèses, Marseille, 340 pages. Applied Technology Council (ATC), « The seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings », 2 volumes, Redwood City, CA. 1996, ATC 40.
- [2] Règlement Parasismique Algérien, Document technique réglementaire DTR BC 248 (Centre national des recherches appliquées en génie parasismique CGS).
- [3] Eurocode 8, Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Partie 1: Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments. Norme européenne prNV 1998-, Project définitive, Bruxelles, 2003.
- [4] Federal Emergency Management Agency FEMA 440, Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures.2004.
- [5] EMS 98 – Échelle macroseismique européenne, sous la direction de G. Grünthal, édition française A. Levret, Conseil de l'Europe : Cahier du Centre européen de Géodynamique et de Séismologie, Vol. 19. 2001.
- [6] Reinhorn, A.M. and R.E. Valles: Damage evaluation in inelastic response of structures, a deterministic approach. Technical Report NCEER-95, state university of New York at Buffalo. Etats Unis, 1995.
- [7] M. HAMIZI, N E HANNACHI et A. KAHIL. Évaluation de la performance sismique d'un bâtiment à ossature en portiques auto – stable en béton armé avant et après conformatement'. Cycle de vie des ouvrages : une approche globale 18 et 19 mars 2009 ESTP - CACHAN, France.
- [8] M. HAMIZI, N.E. HANNACHI et A.KAHIL. Évaluation de la performance sismique d'un bâtiment à ossature en portiques autostables en béton armé. 9ème congrès de Mécanique- Marrakech du 21 au 24 Avril 2009.
- [9] A.KAHIL, M.HAMIZI et N.E. HANNACHI. Évaluation de la performance sismique des structures à ossature auto-table avec la méthode itérative. Premier Symposium Méditerranéen de Géo engineering « SMGE09 ». Alger 20 et 21 juin 2009.
- [10] A.KAHIL, M.HAMIZI et N.E. HANNACHI. Évaluation de la performance sismique des structures à ossature auto-stables avec la méthode non itérative. SBEIDCO- 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures In Developing Countries. ENSET Oran (Algérie)-October 12-14, 2009.