

ÉVALUATION DE SPECTRES DE RÉPONSE INÉLASTIQUE À DUCTILITE CONSTANTE

EVALUATION OF INELASTIC RESPONSE SPECTRA WITH CONSTANT DUCTILITY

R. ATTAL¹, O. KADA¹, N. BELHAMEDI², A. BOUROUBA¹.

¹ Maître Assistant, Université A. Mira, Bejaia, Algérie.

² Ingénieur CTC-Est, Bejaia, Doctorant Université A. Mira, Bejaia, Algérie.

Adresse : Département de Génie Civil, Université A. Mira de Bejaia, Route de Targa Ouzmour Bejaia
06000 Algérie.

E-mail : ATTALRIAD80@yahoo.fr

Tél. : 0552 19 42 79

RÉSUMÉ

Le but de ce travail est d'étudier la réponse dynamique des structures ayant un comportement inélastique. A cet effet, des enregistrements du séisme du 21 mai 2003 de Boumerdes (nord Algérien) sont employés. L'analyse effectuée prend en compte la non-linéarité matérielle du comportement des structures subissant des mouvements sévères du sol. La modélisation du comportement non-linéaire a été faite sur la base des modèles élastoplastiques bilinéaires. Des spectres élastiques et inélastiques ont été calculés pour différents degrés de ductilité et comparés au spectre réglementaire algérien (RPA). L'examen de quelques cas d'enregistrement a montré clairement les dépassements des différents niveaux prévus par le RPA.

MOTS-CLÉS : *Réponse Non-linéaire, Comportement Elastoplastique, Ductilité, Spectre Inélastique.*

ABSTRACT

The present work deals with the seismic response of structures presenting inelastic behavior under strong ground excitations. To this effect, recorded ground accelerations of Boumerdes earthquake (North Algeria, May 2003) are used to evaluate the dynamic response of single degree of freedom systems characterized by elastoplastic models. Elastic and inelastic spectra are computed for different degrees of structural ductility and then compared to Algerian Building Code recommended spectrum. Results obtained from a set of accelrograms used in this study, have clearly shown the severity of the earthquake through huge computed spectral values of the occurred accelerations largely exceeding the recommended levels.

KEYWORDS: *Nonlinear Response, Elastoplastic Behavior, Ductility, Inelastic Spectra.*

1. INTRODUCTION

Les structures soumises à de forts mouvements du sol subissent des déformations inélastiques. La modélisation du comportement doit dans ce cas se faire dans le domaine non-linéaire, et la connaissance à tout instant de l'état de sollicitation régnant dans la structure constitue également une étape importante dans l'analyse dynamique des structures. Pour mener une analyse de la réponse dynamique des structures soumises à de forts mouvements du sol, il est important de bien définir l'action sismique d'une part, et de choisir le modèle qui puisse représenter au mieux le comportement réel de la structure, ainsi que la méthode de résolution la plus performante et la plus facile à implémenter d'autre part.

En général, les structures ont un comportement élastique lorsqu'elles sont soumises à des mouvements de faible intensité, mais il est bien reconnu que les structures destinées à résister à de forts mouvements du sol doivent être capables de supporter des déformations inélastiques induisant un comportement non-linéaire (ductile). Pour avoir la réponse à une excitation sismique d'un système à un degré de liberté, on considère une relation Force-Déplacement définie par une idéalisation des courbes expérimentales. L'approche utilisée pour la modélisation du comportement post-élastique consiste à localiser la déformation non-linéaire en certains points et idéaliser la courbe Force-Déplacement du matériau par des segments de droites. Quand un bâtiment est soumis à un séisme destructif, la non-linéarité intervient, en laissant la possibilité aux structures de sortir du domaine élastique.

L'objectif de ce travail est de mettre en évidence les effets de la non-linéarité du comportement des structures sur leur réponse sismique. A cet effet, un outil permettant de construire des spectres inélastiques pour des enregistrements sismiques a été développé. Les résultats rapportés ici, ont permis de situer, par rapport aux niveaux d'excitation prévus par la réglementation, ceux de l'enregistrement de Dar-el-Beïda du séisme du 21 mai 2003 de Boumerdès.

2. CALCUL NON-LINÉAIRE DES STRUCTURES

L'équation gouvernant l'équilibre dynamique d'une structure soumise à une excitation sismique, à l'instant t , est exprimée par :

$$\ddot{u}(t) + 2\xi \omega \dot{u}(t) + R[u(t)] = -\ddot{u}_s(t) \quad (1)$$

Où R désigne la force de rappel par unité de masse, ξ et ω sont le taux d'amortissement critique et la pulsation propre, respectivement. La déformation $u(t)$ dépend de l'excitation sismique \ddot{u}_s et les paramètres de la structure (ω et ξ), en plus de la forme de la relation Force-Déplacement.

La technique de résolution employée consiste à calculer la réponse par incrément de temps Δt , sous l'hypothèse d'accélération linéaire et de caractéristiques mécaniques constantes durant chaque intervalle de temps. La réponse non-linéaire est calculée pour chaque intervalle, le déplacement et la vitesse relatifs obtenus à la fin de l'intervalle seront considérés comme conditions initiales pour l'intervalle suivant. La non-linéarité est prise en compte en calculant de nouvelles caractéristiques au début de chaque pas de temps. Pour la commodité des calculs, Δt est pris constant sur toute la durée de l'excitation. Le choix de l'intervalle est très important pour l'efficacité de la méthode, en général, un rapport incrément / période ($\Delta t/T$) [1 & 2] inférieur ou égal à 1/10 permet d'obtenir des résultats satisfaisants. La forme incrémentale de l'équation d'équilibre est donnée par l'expression suivante :

$$\Delta \ddot{u}(t) + 2\xi \omega \Delta \dot{u}(t) + \omega^2 R(t) \Delta D(t) = -\Delta \ddot{u}_s(t) \quad (2)$$

Où $\Delta \ddot{u}(t)$, $\Delta \dot{u}(t)$, $\Delta u(t)$ représentent, respectivement, l'incrément d'accélération de vitesse et de déplacement. $\Delta \ddot{u}_s$ est l'incrément de l'accélération du sol. $R(t)$ représente la force de rappel dont l'expression est la suivante :

$$R(t) = \frac{\bar{k}(t)}{k} \quad (3)$$

Où $\bar{k}(t)$ est la rigidité équivalente du système à l'instant t et k la rigidité élastique (initiale) du système.

3. SPECTRE DE RÉPONSE INÉLASTIQUE À DUCTILITÉ CONSTANTE

La ductilité d'une structure est définie comme étant la capacité de cette structure à absorber de l'énergie de déformation dans la phase inélastique précédant la rupture sans perte de résistance. La ductilité est représentée dans les calculs par le coefficient de ductilité. Il est très important de faire la différence entre la ductilité disponible (capacité) dans le système et la demande de ductilité, qui elle est imposée au système par l'action sismique. Le coefficient de ductilité peut être exprimé en termes de divers paramètres liés à la déformation, à savoir, déplacement, rotation et courbure [3, 5, 6]

Par ailleurs, construire un spectre de réponse à une excitation sismique, nécessite, outre l'amortissement, le choix d'un facteur permettant de classer les oscillateurs simples selon leurs ductilités. Ceci peut être réalisé par l'introduction du coefficient de ductilité. Le déplacement élastique limite doit être conforme à la ductilité imposée, d'où la nécessité d'un calcul itératif sur la valeur de ce déplacement donc sur la résistance élastique limite.

Un programme de calcul pour la construction de spectres inélastiques de ductilité constante a été développé. La procédure permettant d'avoir ce spectre, pour un modèle Elasto-Plastique Bilinéaire (EPB), comprend les étapes suivantes :

- D'abord, un calcul linéaire est effectué pour déterminer la valeur du déplacement maximal u_{max1}

$$u_{y1} = \frac{u_{max1}}{\mu} \quad (4)$$

- Après, un calcul de la réponse non-linéaire est effectué pour la valeur du déplacement élastique limite calculé. Ce calcul conduit à une valeur maximale du déplacement relatif à partir de laquelle est calculé le coefficient de ductilité :

$$\mu_1 = \frac{u_{max1}}{u_{y1}} \quad (5)$$

Un teste de convergence vers le coefficient de ductilité demandée est vérifié avec une précision tol :

$$\frac{|\mu - \mu_1|}{\mu} \leq tol \quad (6)$$

- Si la précision n'est pas atteinte, une nouvelle valeur du déplacement élastique limite est calculée à partir de :

$$u_{y2} = \frac{u_{max1}}{\mu} \quad (7)$$

- Pour la valeur de u_{y2} , une nouvelle valeur du déplacement maximal relatif est calculée, d'où une nouvelle valeur du coefficient de ductilité :

$$\mu_2 = \frac{u_{max2}}{u_{y2}} \quad (8)$$

Evidemment, on refait le test de convergence pour la nouvelle valeur du coefficient de ductilité. Pour améliorer la convergence et réduire le temps des calculs on procède par dichotomie. Les étapes précédentes doivent être refaites autant de fois pour que la condition Eq. (6) soit satisfaite Réfs. [1&4].

4. ANALYSE DE LA RÉPONSE NON-LINÉAIRE DES STRUCTURES À UN DEGRÉ DE LIBERTÉ

L'analyse de la réponse inélastique d'une structure à fait l'objet d'un calcul numérique à l'aide d'un programme qui a été développé à cet effet. On a, pour cela, considéré une structure dont les caractéristiques sont les suivantes : période propre de vibration T égale à 1,04 sec ; masse m égale à l'unité ; taux d'amortissement ξ égal à 5 %, soumise au séisme du 21 mai 2003 de Boumerdes enregistré à la station de Dar-el-Beïda, le séisme est représenté par son accélérogramme sur la fig.1a

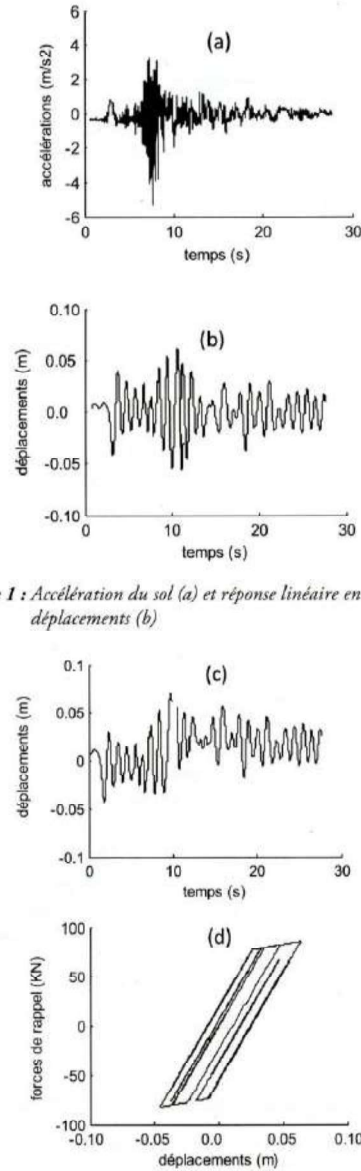


Figure 1 : Accélération du sol (a) et réponse linéaire en déplacements (b)

Figure 2 : Déplacement non-linéaire (c) et relation forces-déplacements (d).

Sur les figs. 1 & 2 on a représenté la réponse de chaque modèle en considérant l'histoire temporelle du déplacement relatif et le diagramme Force-Déplacement correspondant. Elles montrent une nette différence entre le comportement élastique et le comportement inélastique. On constate que dans le modèle élastique la position d'équilibre demeure fixe,

le système vibre autour du zéro pendant toute la durée de l'excitation. Par contre, les systèmes inélastiques vibrent autour d'une nouvelle position d'équilibre après avoir subi des déformations permanentes, autrement dit, des déformations inélastiques. Cette nouvelle position d'équilibre est très apparente sur le digramme 'Force-Déplacement' décrivant une concentration des boucles d'hystérésis. A la fin de la réponse, la structure ne possède plus les mêmes caractéristiques qu'elle avait initialement. Cette remarque peut être utilisée comme un point d'identification des non-linéarités matérielles, car, la dégradation de la rigidité entraîne une modification de la période propre du système. De plus, Les déplacements présentent des amplitudes différentes pour chaque modèle, atteintes à des instants différents. Pour étendre ces résultats on a calculé la réponse de trois structures, de rigidités différentes, de périodes (0.9, 1.03, et 1.5 sec) et ce pour trois niveaux de ductilité : 1, 3 et 5. Les résultats sont présentés sur les figs 3, 4 et 5. Les mêmes constatations précédentes sont faites. De plus, on voit clairement que d'un côté le déplacement maximal augmente pour des valeurs de périodes croissantes, aussi bien pour le modèle élastique que pour le modèle inélastique, d'un autre côté, ce déplacement est d'autant plus important que le niveau de ductilité est grand. On peut ainsi conclure, que quelque soit son modèle de comportement, la flexibilité d'une structure entraîne des niveaux de déplacements importants, et que plus une structure est ductile, plus grandes sont ces déformations irréversibles.

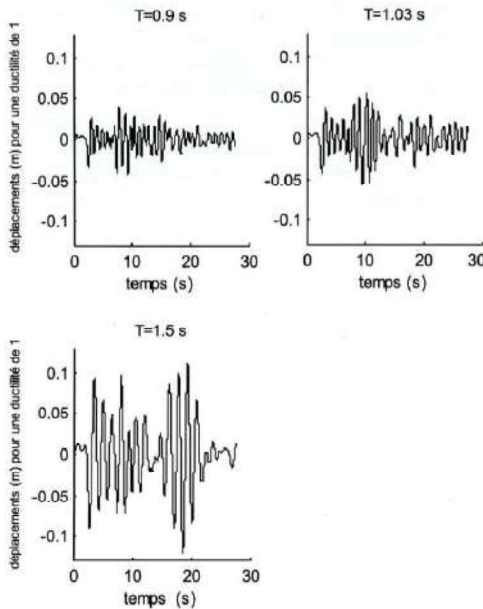


Figure 3 : Réponse de trois structures ayant un coefficient de ductilité égal à 1 (cas linéaire).

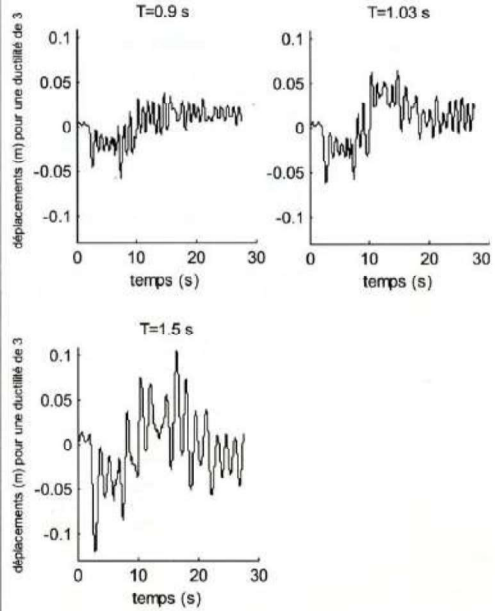


Figure 4 : Réponse de trois structures ayant un coefficient de ductilité égal à 3.

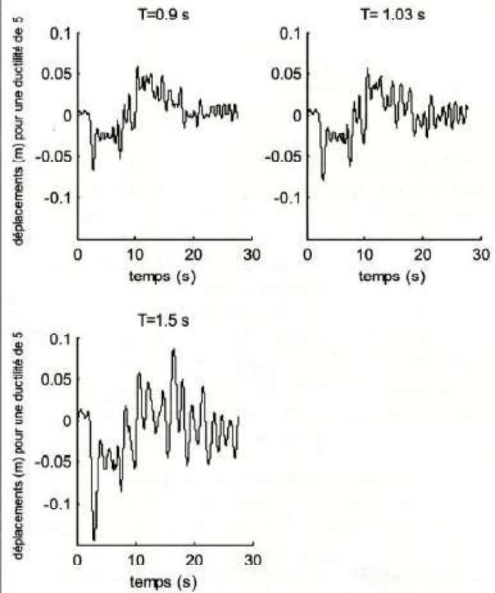


Figure 5 : Réponse de trois structures ayant un coefficient de ductilité égal à 5.

5. SPECTRE DE RÉPONSE INÉLASTIQUE

Nous allons représenter les spectres de réponse en accélération Sa/g pour des ductilités constantes, en fonction de la période, couvrant la plage de : $0.05 < T < 3$ (secondes) englobant ainsi les structures rigides et les structures flexibles. Les valeurs du coefficient de ductilité considérées sont : 1, 3 et 5. Le coefficient d'amortissement est pris égal à 5 %. L'excitation est représentée sur la fig. 1 par l'accélérogramme enregistré à la station de Dar-el-Beïda lors du séisme de Boumerdés du 21 mai 2003. Les structures étudiées ont un comportement non-linéaire idéalisé par le modèle élastoplastique bilinéaire, avec une rigidité plastique $k_p=10\%$.

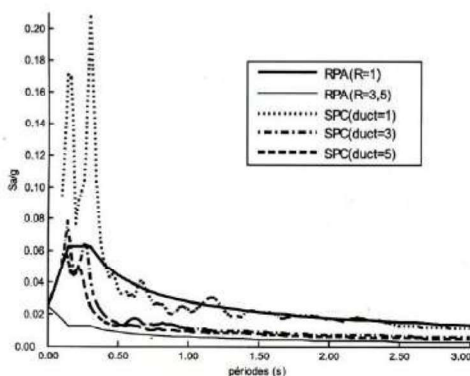


Figure 6 : Spectres de réponses inélastiques et spectres réglementaires.

On remarque, d'après la fig. 6, une diminution des accélérations spectrales pour des niveaux de ductilité croissants. Par la suite, on a ajouté aux spectres de ductilités constantes les spectres réglementaires (RPA) élastiques ($R=1$) et inélastiques ($R=3.5$) correspondant aux structures auto-stable et aux structures en voile et ce dans le but d'examiner les niveaux d'accélération du séisme du 21 mai 2003 de Boumerdés. Les paramètres du spectre réglementaire ont été choisis en correspondance avec les caractéristiques de l'enregistrement de Dar-el-Beïda notamment en ce qui concerne l'accélération de zone et le type de sol.

Les niveaux élastiques prévus par le règlement sont amplement dépassés, de même, le spectre inélastique RPA ($R=3.5$) se situe au dessous des spectres inélastiques de l'accélérogramme notamment pour les périodes inférieures à 1s qui touche pratiquement toute la gamme des structures courantes concernées par le règlement. Ceci confirme bien la violence du séisme.

6. CONCLUSION

Contrairement aux systèmes élastiques, les systèmes inélastiques vibrent autour de positions d'équilibres différentes qui changent dans le temps en fonction des déformations irréversibles. Les valeurs maximales du déplacement imposé par le séisme à la structure diminuent en fonction de la ductilité. De plus, celle-ci a une influence remarquable sur les réponses spectrales en termes d'accélération. La diminution des accélérations spectrales est d'autant plus importante que la ductilité du système est grande. Par ailleurs, l'examen de l'enregistrement à la station de Dar-el-Beïda du séisme de Boumerdés du 21 Mai 2003, confirme la violence du séisme qui explique l'une des causes des dégâts observés.

7. REFERENCES

- [1] Filiatrault A. Élément de génie parasismique et de calcul dynamique des structures, Montréal, Ecole polytechnique de Montréal, 1996.
- [2] Clough R, Penzien J. Dynamic of structure, California, Hill, 1975.
- [3] Chopra AK. Dynamic of structure, New Jersey, Earth.Eng.resarch, 1995.
- [4] Shunsuk O. Hysteresis model of reinforced concrete for earthquake response analysis, Journal of faculty of engineering, university of Tokyo, vol. 136, 1981, p. 407-441.
- [5] Mostaghel N, Hurried AG. Seismic inelastic design spectrum, Department of civil engineering, university of Utah, Salt lake city. Utah, USA, Earth. Eng. Struct. dyn.. Vol. 14, 1986, p. 379-389.
- [6] Uang CM, Bentero V. Evaluation of Seismic energy in structure, Department of civil engineering, university of Northeastern, Boston, USA, Earth. Eng. Struct. dyn.. Vol. 19, 1990, pp. 77-90.