

EVALUATION DU COEFFICIENT DE COMPORTEMENT GLOBAL « R » DE STRUCTURES EN ACIER DE TYPE PORTIQUE AUTOSTABLE

BELHAMDI N.¹, TAHAKOURT A.², BOUROUBA A.¹, ATTAL R.¹

¹Département de Génie Civil, Université A. MIRA, Béjaia, Algérie, e-mail : nouredinebelhamdi@gmail.com

²Laboratoire de Technologie des Matériaux et Génie des Procédés, Université A. MIRA, Béjaia, Algérie, e-mail : atahakourt@yahoo.fr

Résumé : Dans les normes et règlements parasismiques, la capacité des systèmes structuraux dissipatifs à résister aux actions sismiques dans le domaine inélastique est exprimée par un paramètre dit « coefficient de comportement global de la structure ». Il est noté « R » dans les actuelles règles parasismiques algériennes (RPA 99). Dans ce travail, nous avons évalué ce paramètre pour quatre portiques métalliques auto-stables à l'aide d'une méthode numérique fondée sur l'analyse dynamique inélastique des systèmes à plusieurs degrés de liberté. Les résultats obtenus ont montré que le coefficient de comportement global d'une structure est très sensible au choix des accélérogrammes adoptés pour son évaluation.

Mots-Clefs : Sismique, Comportement non-linéaire, Accélérogramme, Spectre de réponse, Facteur de comportement.

1. Introduction

Le problème fondamental du calcul parasismique réside dans la détermination de la réponse d'une structure à des mouvements sismiques forts ou modérés. En général, les structures ont un comportement linéaire tant qu'elles sont soumises à des séismes de faibles intensités, mais il est bien connu que pour des structures soumises à des séismes majeurs, leur comportement devient non linéaire et il en résulte l'apparition de déformations inélastiques. Par conséquent, le calcul linéaire devient insuffisant et le recours à un calcul non linéaire explicite dans le temps apparaît plus réaliste et mieux adapté, notamment, pour satisfaire le compromis sécurité-économie.

La forme la plus complète d'une analyse non linéaire des structures sous sollicitations sismiques est le calcul dynamique temporel non linéaire, couramment appelés « analyse temporelle non linéaire ». C'est dans ce type d'analyse que les équations couplées du mouvement sont intégrées directement en utilisant une technique d'intégration numérique, pas à pas dans le temps. A chaque fin d'un pas de temps, les caractéristiques mécaniques de la structure sont modifiées en fonction de l'état des contraintes et des déformations qui se sont développées lors du pas [8, 13, 17]. Cette méthode permet d'introduire explicitement le comportement hystérique complexe des éléments de la structure.

Les normes et règlements parasismiques actuels (RPA, EC8, UBC,... etc.) ne privilégient pas le calcul non linéaire explicite qui est très coûteux, même pour les structures les plus simples, mais prennent en considération les effets des non linéarités, en faisant appel à des spectres de réponses inélastiques couramment appelés « spectre de réponse de calcul ». Ces derniers, sont construits à partir de spectres élastiques, en introduisant un coefficient de comportement global de la structure, lié indirectement à sa ductilité et à son comportement non linéaire.

2. Présentation du coefficient de comportement global d'une structure

Le coefficient de comportement global traduit la capacité des systèmes structuraux dissipatifs à résister aux actions sismiques dans le domaine inélastique. Il est noté « R » dans les règles parasismiques algériennes actuelles RPA99 [5]. Il permet d'étendre le calcul sismique élastique des structures par l'analyse spectrale au domaine

plastique tout en satisfaisant le compromis sécurité-économie. Les normes de dimensionnement parasismiques utilisent des spectres de réponse de calcul obtenus à partir de spectres élastiques en introduisant le coefficient de comportement global de la structure, grossièrement au moyen de la relation suivante :

$$S_a(T) = \frac{S_e(T)}{R} \quad (1)$$

avec :

$S_a(T)$: ordonnée du spectre de réponse de calcul en termes d'accélération

$S_e(T)$: ordonnée du spectre de réponse élastique en accélération caractérisant l'action sismique

R : valeur de calcul du coefficient de comportement.

Cette stratégie, adoptée par les règlements parasismiques, nous évite principalement d'effectuer des analyses non linéaires explicites dans le temps. Ces analyses sont à la fois difficiles à mettre en œuvre et très coûteuses en moyens et en temps de calcul. En outre, le calcul spectral offre un grand avantage en évitant le choix souvent très difficile des accélérogrammes à utiliser pour les analyses temporelles. Les accélérogrammes doivent impérativement être représentatifs de l'action sismique de la région d'implantation de la structure.

Selon les règles parasismiques algériennes RPA(99) [5], le spectre de réponse de calcul d'une structure est donné en fonction de la période à l'aide des relations suivantes :

$$\frac{S_a(T)}{g} = \begin{cases} 1,5 \left(1 + \frac{T}{T_1} \left(2,5\eta \frac{Q}{R} - 1 \right) \right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2,5\eta(1,25A) \left(\frac{Q}{R} \right) & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2,5\eta(1,25A) \left(\frac{Q}{R} \right) \left(\frac{T_2}{T} \right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3s \\ 2,5\eta(1,25A) \left(\frac{T_2}{3} \right)^{2/3} \left(\frac{3}{T} \right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R} \right) & T > 3s \end{cases} \quad (2)$$

avec :

g : La constante gravitationnelle

A : Coefficient d'accélération de la zone

$\eta = 7/(2 + \xi)$: est un facteur de correction d'amortissement (si $\xi \neq 5\%$)

ξ : Pourcentage d'amortissement critique

T_1, T_2 : Périodes caractéristiques associées à la catégorie du site

Q : Facteur de qualité

R : Coefficient de comportement global de la structure dont les valeurs sont fonction du système de contreventement et du matériau constitutif de la structure. Ses valeurs varient de 2 pour les structures peu dissipatives à 6 pour les structures très dissipatives. C'est ce coefficient qui fait l'objet de notre étude.

3. Méthode d'évaluation du coefficient de comportement global R

Divers méthodes ont été utilisées dans le but d'établir la valeur du coefficient de comportement global R [9,11]. Ces méthodes se différencient par le type d'analyse de structure effectuée et par le critère considéré pour associer réponse purement élastique et réponse élasto-plastique. Elles peuvent être groupées en quatre catégories principales [7]:

1. méthodes basées sur la théorie du facteur de ductilité, applicables uniquement dans le cas de structures suffisamment régulières ;
2. méthodes basées sur l'analyse dynamique inélastique des systèmes à plusieurs degrés de liberté ;
3. méthodes basées sur l'approche énergétique ;
4. méthodes basées sur l'accumulation de dommages.

Parmi ces méthodes, on peut citer la méthode de Newmark et Hall [12] qui fait partie de la première catégorie, la méthode de Ballio-Setti [1, 2, 16] de la seconde, et la méthode de Bonev et Christov [3] de la troisième catégorie.

Dans ce travail nous avons opté pour l'utilisation d'une méthode de la deuxième catégorie à savoir la méthode Ballio-Setti. Cette méthode, basées sur l'analyse dynamique inélastique des systèmes à plusieurs degrés de liberté, peut s'appliquer à différentes catégories de structures (portiques non contreventés, treillis, portiques contreventés,... etc.), à des structures de formes plus ou moins régulières, voire irrégulières. Elle peut également intégrer le comportement hystérique complexe des éléments ainsi que les effets P-Δ. En outre, comparativement à d'autres méthodes, elle offre l'avantage d'utiliser peu de paramètres.

Par ailleurs, cette méthode relativement générale, est utilisée dans le contexte de l'Eurocode 8 [4] pour les constructions en acier. Son principe s'énonce comme suit :

Soit un accélérogramme quelconque $a(t)$ et une

structure donnée à plusieurs degrés de liberté, fig. 1. On effectue, à l'aide d'un programme d'analyse dynamique non linéaire, les calculs de la réponse de cette structure sous l'accélérogramme $a(t)$ amplifié d'un multiplicateur λ . On trouve successivement en faisant croître λ :

1. des multiplicateurs λ tels que toutes les sections de la structure restent dans le domaine élastique. Si on retient la valeur maximale δ du déplacement d'un point de référence de la structure, on observe que δ obtenu lors de chaque calcul est proportionnel au multiplicateur λ considéré ;
2. un multiplicateur λ_y , tel qu'on atteigne la résistance plastique dans un élément structural. On obtient le déplacement limite élastique $\delta = \delta_y$. Ce point est schématisé sur la fig. 1 par A ;
3. pour un λ supérieur à λ_y , le déplacement élasto-plastique est inférieur à celui qui lui correspond si la structure est considérée indéfiniment élastique. Cette phase est décrite par la courbe ABC pour les déplacements élasto-plastiques et la droite AC pour les déplacements élastiques. Ceci résulte de la dissipation d'énergie dans le domaine plastique par hystérésis ;
4. un multiplicateur λ_{max} pour lequel les deux types de calcul donnent le même déplacement obtenu lorsque la courbe du calcul non linéaire coupe la droite du calcul élastique au point C. La valeur maximale de l'accélération $\lambda_{max} a(t)$ correspond à l'atteinte d'un état limite d'instabilité dynamique au-delà duquel la dissipation d'énergie plastique dans la structure n'est plus suffisante pour s'opposer à des déplacements excessifs [1, 2, 14, 16] ;
5. en se basant sur le critère ultime de l'atteinte d'un comportement dynamique instable (point C), la valeur du coefficient de comportement est obtenue par le rapport : $R = \frac{\lambda_{max}}{\lambda_y}$.

Il y a, par ailleurs, d'autres critères pour définir le stade ultime [6]. On peut évoquer par exemple :

- les critères basés sur le dépassement de valeurs limites de déformabilité (déformation totale ou relative entre les étages) qui correspond à un point sur la courbe ABC (point de type B) de la fig. 1 ;
- les critères basés sur l'atteinte de la ductilité maximale locale, au niveau des assemblages et/ou des éléments structuraux, toujours point de type B sur la fig. 1.

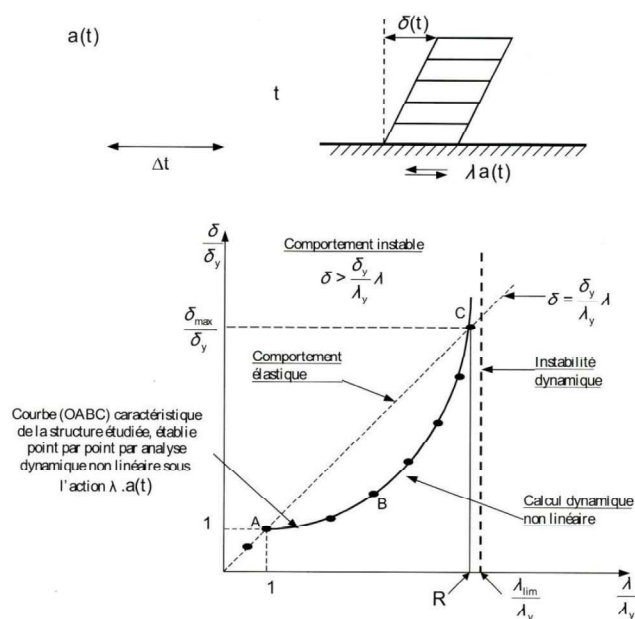


Figure 1 : Etablissement du coefficient de comportement par la méthode de BALLIO-SETTI

4. Application

4.1. Structures étudiées

4.1.1. Description

Les structures étudiées sont quatre portiques auto-stables plans en profilés métalliques dont la nuance d'acier est S235. Le premier est un portique à deux versants d'un hall industriel nommé : ST1 (fig. 2). Les trois autres sont des portiques simples de bâtiments industriels définis comme suit :

- ST2 : portique simple à une travée et un seul niveau (fig. 3)
- ST3 : portique à deux travées et un seul niveau (fig. 4)
- ST4 : portique à une travée et deux niveaux (fig. 5)

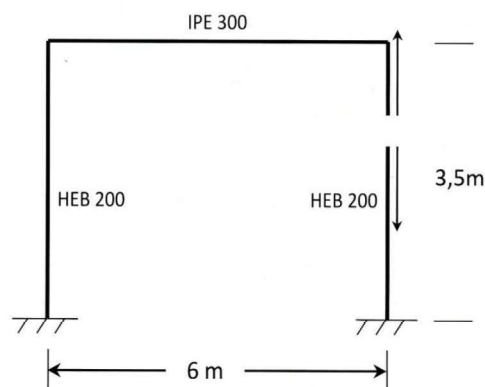


Figure 3 : Portique simple à une travée et un seul niveau (ST2)

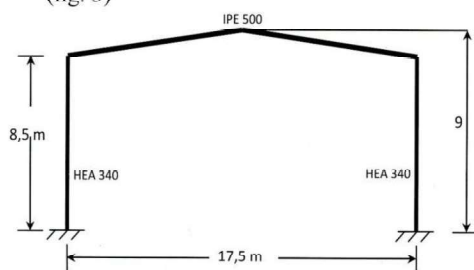


Figure 2 : Portique à deux versants d'un hall industriel (ST1)

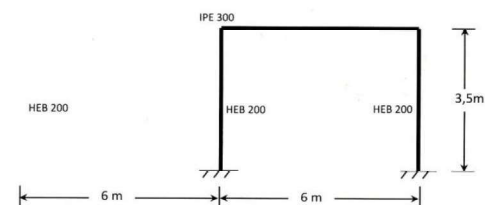


Figure 4 : Portique à deux travées et un seul niveau (ST3)

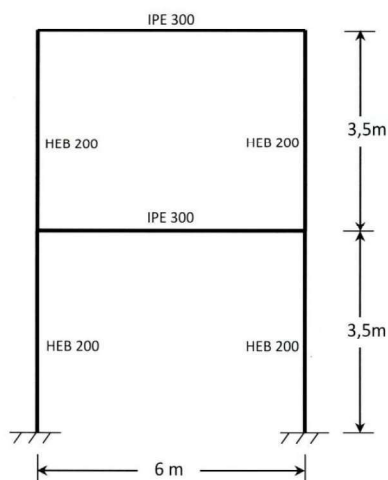


Figure 5 : Portique à une travée et deux niveaux (ST4)

4.1.2. Modélisation

La modélisation numérique des structures est faite à l'aide du logiciel d'éléments finis « ABAQUS » (qui permet l'analyse dynamique non linéaire) avec une discrétisation assez raffinée des éléments, afin d'obtenir la réponse structurelle la plus réaliste possible. Des éléments finis de type poutre B21 (beam type : shear-flexible) disponibles dans la bibliothèque du logiciel sont utilisés. Ce type d'élément tient compte des déformations dues à l'effort tranchant en plus de celles dues au moment fléchissant.

Les liaisons poutre-colonne et poutre-poutre sont supposées rigides et tous les degrés de liberté de déplacement et de rotation sont retenus. Chaque nœud peut se déplacer horizontalement, verticalement et tourner autour d'un axe perpendiculaire au plan de la structure. Un nœud de mesure est choisi au sommet des poteaux gauches de chaque portique.

Les masses additionnelles sont prises en compte sous forme de masses réparties linéairement sur les poutres et de masses concentrées sur les colonnes (dans le cas où elles existent : cas de ST1). Ces masses sont évaluées en utilisant la relation (3) ci-après, prescrite dans les règles parasismiques algériennes RPA(99) [5] (relation 4.5 du RPA).

$$m = m_G + \beta \cdot m_Q$$

avec :

m_G : masse due aux charges permanentes (autres que le poids propre des éléments) ;

m_Q : masse due aux charges d'exploitations éventuelles ;

β : Coefficient de pondération, fonction de la nature et de la durée de la charge d'exploitation pris égal à 0,4 pour ST1 et à 0,2 pour les autres structures.

L'amortissement proportionnel de Rayleigh est utilisé pour la construction des matrices d'amortissement. Le taux d'amortissement critique des structures est fixé à 5% pour tous les modes de vibration.

Un modèle de comportement bilinéaire élasto-plastique avec écrouissage a été utilisé pour l'analyse non linéaire. L'évaluation de la contrainte en fonction des déformations est illustrée sur la fig. 6. La pente d'écrouissage est égale 0,1% de la pente initiale.

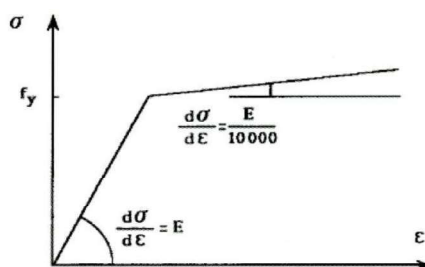


Figure 6 : Modèle de comportement utilisé

Les périodes propres des modes fondamentaux des quatre structures obtenus après l'analyse des vibrations libres sont récapitulés dans le tableau 1.

Tableau 1: Valeurs des périodes propres fondamentales des structures étudiées

Structure	Période fondamentale (scc)
ST1	0,31
ST2	0,36
ST3	0,40
ST4	0,71

4.2. Accélérogrammes utilisés

Dans l'analyse sismique des structures, il est bien connu qu'il n'est pas suffisant d'utiliser un seul accélérogramme particulier. Il est souvent essentiel de considérer un ensemble d'accélérogrammes représentatifs. A cet effet, quatre accélérogrammes issus d'enregistrements du séisme de Boumerdes du 21 mai 2003 de magnitude 6,8 sont utilisés. Ces accélérogrammes sont comme suit :

1. composantes Est-Ouest enregistrées à la station de Keddara (DE=20Km)
2. composantes Nord-Sud enregistrées à la station de Dar El Beida (DE=27Km)
3. composantes Est-Ouest enregistrées à la station de Hussein Dey (DE=35Km)
4. composantes Est-Ouest enregistrées à la station d'El Afroun (DE=80Km)

La sélection de ces accélérogrammes est faite sur la base de leurs accélérations maximales (A_{max}) et de leurs contenus fréquentiels tout en prenant en considérant le champ proche, le champ intermédiaire et le champ lointain. La nature du champ est fonction de la distance épacentrale (DE) et de la magnitude du séisme. Les deux premiers accélérogrammes représentent le champ proche, le troisième le champ intermédiaire et le dernier le champ lointain. Les quatre accélérogrammes sont représentés sur la fig. 7.

Le contenu fréquentiel d'un accélérogramme peut être évalué de deux manières :

- soit en traçant le spectre de réponse de l'accélérogramme représentant les réponses maximales d'un ensemble d'oscillateurs simples, avec différentes périodes de vibration et taux d'amortissement critique ;
- soit en traçant le spectre d'amplitude de Fourier de l'accélérogramme qui est défini comme la racine carrée de la somme des carrés des parties réelles et imaginaires de la transformée de Fourier.

Les spectres de réponse ainsi que les spectres d'amplitude de Fourier des accélérogrammes considérés sont illustrés respectivement sur les fig. 8 et fig. 9.

A travers ces deux spectres, on peut définir directement deux paramètres permettant de caractériser le contenu fréquentiel d'un accélérogramme. La période prédominante T_p qui correspond à la période donnant la plus grande accélération spectrale dans un spectre de réponse

(pour un taux d'amortissement critique $\xi_{cr}=5\%$). La période moyenne T_m qui, contrairement à la période prédominante, permet de prendre en compte le caractère aléatoire de l'accélérogramme en faisant la moyenne des fréquences contenues dans celui-ci [15]. Elle est définie par la relation :

$$T_m = \frac{\sum C_i^2 / f_i}{C_i} \quad (4)$$

où : C_i correspond aux amplitudes de la transformée de Fourier sur toute la durée de l'accélérogramme pour toute fréquence f_i comprise entre 0.25 et 20Hz de la transformée de Fourier.

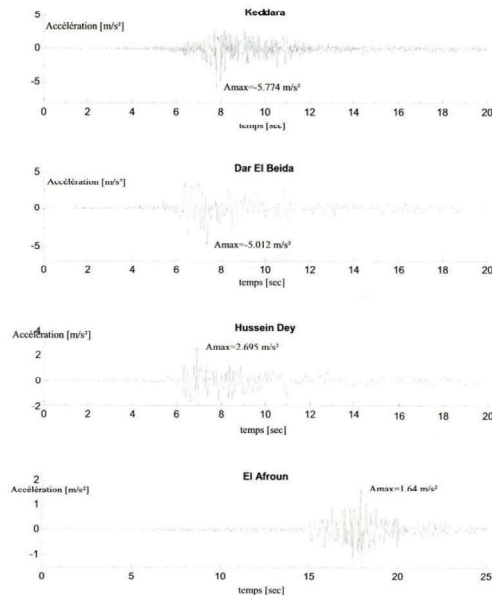


Figure 7 : Accélérogrammes considérés

Ces deux derniers paramètres ainsi que l'accélération maximale ne sont pas les seuls paramètres caractéristiques d'un accélérogramme. D'autres paramètres tels que la vitesse maximale V_{max} , l'intensité d'Arias (I_a) et la durée significative du séisme t_{1a} (5-95) peuvent être considérés pour caractériser un accélérogramme.

L'intensité d'Arias est une mesure de l'énergie contenue dans l'accélérogramme et permet de quantifier la variation du niveau d'excitation dans le temps. Elle est définie par la relation :

$$I_a^{1/2} = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_T} [a(t)]^2 dt \quad (5)$$

où : $a(t)$ est l'accélération en fonction du temps et t_T est la durée totale du séisme.

La durée significative du séisme représente le temps au cours duquel le mouvement fort se produit. Elle correspond au temps requis pour passer du niveau 5% de I_a au niveau 95% de I_a . Elle est définie par : $t_{Ia(5-95)} = t_{Ia}^{95} - t_{Ia}^5$. Les paramètres caractéristiques des quatre accélérogrammes utilisés sont récapitulés dans le tableau 2 suivant :

Tableau 2 : Caractéristiques des accélérogrammes utilisés

Accélérogramme	A_{max} (m/s ²)	V_{max} (m/s)	T_p (s)	T_m (s)	$t_{Ia(5-95)}$ (s)	I_a (m/s)
Keddara	5,774	0,188	0,080	0,128	6,615	1,444
Dar El Beida	5,012	0,407	0,160	0,440	9,555	1,991
Hussein Dey	2,695	0,186	0,120	0,590	11,800	0,493
El Afroun	1,640	0,050	0,120	0,236	9,620	0,182

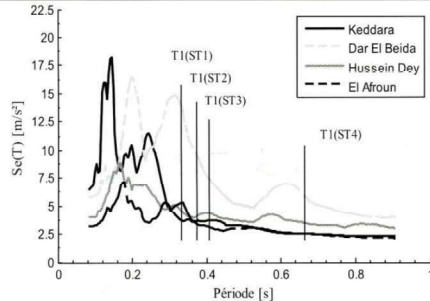


Figure 8 : Spectre de réponse élastique des accélérogrammes considérés pour un taux d'amortissement critique $\zeta_{cr} = \%$

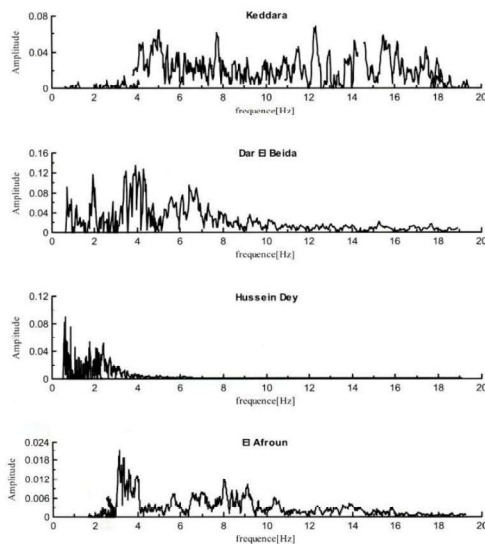


Figure 9 : Spectre d'amplitude de Fourier des accélérogrammes considérés

4.3. Résultats de l'application

Dans l'application de la méthode de Ballio-Setti, on doit déterminer la valeur du multiplicateur λ_y qui conduit à la première plastification dans la structure. C'est là que réside toute la difficulté de cette méthode. Pour ce faire nous avons procédé par dichotomie. La procédure consiste à faire varier le multiplicateur λ , tout en observant à chaque fois dans quelle phase on se trouve (phase élastique ou plastique). Cette observation se fait en visualisant l'énergie de déformation plastique à chaque calcul effectué. Les figures 10.a, 10.b et 10.c montrent les variations de l'énergie de déformation plastique en fonction du temps pour trois valeurs de λ qui correspondent à trois phases de calcul : élastique, début de plastification et plastique.

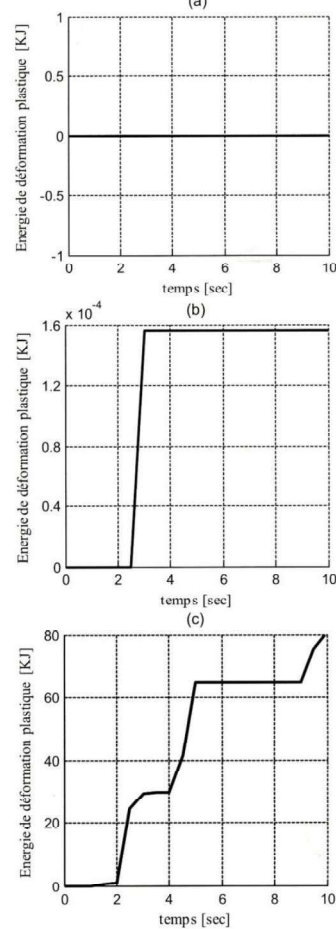


Figure 10 : Exemple de variations de l'énergie de déformation plastique en fonction du temps
(a) Phase élastique - (b) Phase début de plastification - (c) Phase plastique

Les résultats des simulations numériques obtenus en se basant sur le critère ultime de l'atteinte d'un comportement dynamique instable ($R = \lambda_{\max} / \lambda_y$), sont récapitulés dans le tableau 3.

La représentation graphique des résultats obtenus pour la structure ST1 sont illustrés sur la fig. 11.

Tableau 3: Valeurs évaluées du coefficient de comportement

Accélérogramme	Keddara	Dar El Beida	Hussein Dey	El Afroun
Structure				
ST1	4,23	6,8	2,87	11,55
ST2	3,5	6,9	2,41	8,7
ST3	1,86	5,5	5,75	16,4
ST4	2,55	8,85	2,40	40,5

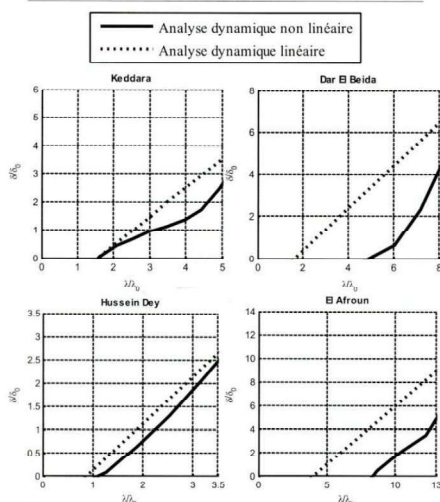


Figure 11 : Evaluation du coefficient de comportement global R de ST1 par la méthode de BALLIO-SITTI

A partir des résultats du tableau 3, on voit que les valeurs du coefficient de comportement global évaluées sont différentes d'un accélérogramme à l'autre et d'une structure à une autre, notamment celles obtenues avec l'accélérogramme d'El Afroun qui sont trop élevées comparativement aux autres.

L'écart, entre les valeurs obtenues, montre principalement la sensibilité du coefficient de comportement aux accélérogrammes utilisés pour son évaluation.

Si on exclut les valeurs extrêmes que l'on juge excessives, à savoir : 11,55, 16,4 et 40,5, on obtient une moyenne arithmétique $\bar{R}=4,79$ qui est relativement proche de celle adoptée par le RPA pour ce type de structure.

Par ailleurs, une définition alternative à celle de

Ballio-Sitti pour la détermination du coefficient de comportement global, a été donnée par Aribert et Grecea [6], en considérant la réduction de l'effort de cisaillement à la base de la structure, donnée par la relation :

$$R = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_y} \frac{V_y}{V_{\text{inel}}} \quad (6)$$

où : V_y : effort de cisaillement à la base de la structure au stade de première plastification ;

V_{inel} : effort de cisaillement inélastique à la base de la structure au stade ultime.

En considérant toujours le stade ultime, l'atteinte du comportement dynamique instable et en appliquant la relation (6), on a obtenu les valeurs du coefficient de comportement récapitulées dans le tableau 4.

Tableau 4: Valeurs du coefficient de comportement évaluées par la définition de Aribert et Grecea

Accélérogramme	Keddara	Dar El Beida	Hussein Dey	El Afroun
Structure				
ST1	2,08	3,75	1,81	4,93
ST2	2,5	4,7	1,79	5,87
ST3	1,32	3,84	3,07	8,1
ST4	1,85	4,75	1,70	6,89

Cette fois-ci encore, les valeurs du coefficient de comportement global obtenues restent différentes, mais avec des écarts moins importants. Une réduction moyenne de l'ordre de 40% de ces valeurs est enregistrée. En considérant, cette fois toutes les valeurs, on obtient une moyenne arithmétique $\bar{R}=3,68$.

On conclut, de cette deuxième application, que le fait de considérer la réduction de l'effort de cisaillement à la base de la structure n'exclut pas la sensibilité des valeurs du coefficient de comportement aux accélérogrammes et ne fait que réduire ces valeurs et par suite leurs écarts.

5- Conclusion

Les résultats des simulations numériques obtenus en utilisant la méthode basée sur l'analyse dynamique inélastique des systèmes à plusieurs degrés de liberté, ont montré que le coefficient de comportement global d'une structure est très sensible au choix des accélérogrammes utilisés pour son évaluation.

La valeur moyenne obtenue, après exclusion des valeurs extrêmes jugées excessives, est relativement proches de la valeur caractéristique adoptée par le RPA pour ce type de structure. Ceci est cohérent avec le principe réglementaire dans la mesure où la valeur caractéristique repose sur des basses statistiques et choisie pour correspondre à une probabilité donnée de non dépassement du côté défavorable.

Vu la sensibilité de la valeur du coefficient de comportement global d'une structure à l'action sismique (accélérogrammes), il peut être intéressant d'introduire dans les règlements parasismiques le paramètre de la zone sismique et de la catégorie du site d'implantation pour les valeurs du coefficient de comportement. L'utilisation d'accélérogrammes simulés à partir de spectres du RPA correspondant à différents sites d'implantation et à différentes zones sismiques, confirmerait ou infirmerait cette supposition.

Par ailleurs, il nous a été donné de constater que l'utilisation de la méthode numérique fondée sur l'analyse dynamique inélastique des systèmes à plusieurs degrés de liberté est une opération très coûteuse en temps de calcul.

Références bibliographiques

- [1] Ballio, G. et Castiglioni, C. A., *Le costruzioni metalliche in zona sismica: un criterio di progetto basato sulla accumulazione del danno.*, Giornate Italiane della Costruzione in Acciaio del CTA., Viareggio, 24-27 Ottobre, 1993.
- [2] Ballio, G., Perotti, F., Rampazzo, L. et Setti, P., *Determinazione del coefficiente di struttura per costruzioni soggette a carichi assiali.*, 2 Convegno Nazionale l'Ingegneria in Italia., Rappallo, 1984.
- [3] Bonev, Z. and Christov, H., *Behavior, factor evaluation based on SDOF system presentation and energy approach.*, Internationales Kolloquium über Anwendungen der Informatik und Mathematik in Architektur und Bauwesen, IKM, 15, Weimar, Bauhaus-Universität, 2000.
- [4] CEN., *Eurocode 8 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes- Partie1: règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments.* ENV 1998, Bruxelles, Décembre 2004.
- [5] CGS., *Règles parasismiques algériennes RPA 99 version 2003.*, Document technique réglementaire, Ministère de l'Habitat, Algérie, 2003.
- [6] Ciutina, L.A., *Assemblages et comportement sismique de portiques en aciers et mixtes aciers-béton : expérimentation et simulation numériques.* Thèse de Doctorat en génie civil : spécialité Mécanique des structures. Institut national des sciences appliquées de Rennes, 28 novembre 2003.
- [7] El Hasouni, A., *Etude de la réponse sismique de structures en acier considérant l'effet de vitesses d'allongement élevées sur les propriétés mécaniques du matériau.* Thèse de Doctorat en science de l'ingénieur, Université de Liège, 2006.
- [8] Filiatrault, A., *Eléments de génie parasismique et de calcul dynamique des structures.* Edition de l'Ecole Polytechnique de Montréal, 1996.
- [9] Guerra, C. A., Mazzolani, F.M and Piluso V. *Evaluation of the q-factor in steel frames : state of the art.*, Ingegneria Sismica, No. 2, 1990.
- [10] International Conference of Building Officials., *Uniform Building Code (UBC)* .. Whittier, California, USA, 1997.
- [11] Mazzolan, i F. M and Piluso V., *Theory and Desing of Seismic Resistant Steel Frames.*, Tylor & Francis, 1996.
- [12] Newmark, N. M and Hall, J. W., *Procedures and criteria for earthquake resistan design* , Building Practice for Disater Mitigation., Building Science Series 45, National Bureau of Standards, Washington, Febr. 1973.
- [13] Paultre, P., *Dynamique des structures. Application aux ouvrages de génie civil.*, Hermes sciences, Lavoisier 2005.
- [14] Plumier, A., *Constructions en zone sismique,* faculté des sciences appliquées, Département d'architecture, géologie, environnement et structure, université de liège, Edition 2007
- [15] Rathje, E. M., Abrahamson, N. A., Bray, J. D., *Simplified frequency content estimates of earthquake ground motions.*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 330 Évaluation des mouvements sismiques vol. 124, n°2, p. 150-159, 1998.
- [16] Setti, P., *A method to compute the behaviour factor for construction in seismic zones.*, Constuctionei Metallich., n° 3, 1985.
- [17] Wilson, E. L., *Threes-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structure.*, Computer and Structures, Inc. Berkeley, California, USA, Third Edition.