

Nouvelle technique de ferrailage des poteaux couplés à voiles par introduction d'un Accélérogramme sismique

Lynda KHEDDACHE^{*,a}, Ourdia BELAIDI^b, Mohand OULD OUALI^a et Fatma TAOUCHE^b

^a Laboratoire Elaboration et Caractérisation des Matériaux et Modélisation – LEC2M.

Université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou, BP 17 RP, 15 000 Tizi-Ouzou. ALGERIE

^b Laboratoire LAMOMS. Université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou, BP 17 RP, 15 000 Tizi-Ouzou. ALGERIE

Abstract

The objective of our work is to reproduce the real effect of the seisms on constructions. For that, we submitted a structure with a nonlinear dynamic loading type "Accelerogram" in the finite element code Abaqus. The studied structure is a reinforced concrete gantry braced by RC shear walls. The structure is established in zone III, classified according to the RPA 99/V2003 zone of strong seismicity. A natural signal of type seism (Boumerdes 2003) is used. Natural signals of type seism (Boumerdes 2003) are used. The objective of our work is to study and validate the availability of reinforcements, imposed by the concrete method of limit states (BAEL 1991) under major seismic solicitations in the RC shear wall. Thereafter, we could implement a technique of modeling which reproduces the real behavior of a structure under dynamic loading. An optimal reinforcement says was adopted and applied to all the shear walls of the structure.

Keywords : seismic accelerogram , modeling, shear wall, reinforced concrete, damage.

Résumé

Afin de reproduire les effets réels des séismes sur les constructions, nous avons soumis une structure à un chargement dynamique non linéaire de type "Accélérogramme" dans le code de calcul par éléments finis Abaqus. La structure étudiée est un portique d'un bâtiment couplé à voile. Cette dernière est implantée en zone III, classée selon le RPA 99/V2003 zone de forte sismicité. Un signal naturel de type séisme (Boumerdes 2003) est utilisé. L'objectif de notre travail est d'étudier et de valider la disposition des armatures, imposées par la méthode de béton armé aux états limites (BAEL1991) face aux sollicitations sismiques majeurs dans les voiles de contreventement. Par la suite, nous avons pu mettre en œuvre une technique de modélisation qui reproduit le comportement réel d'une structure sous chargement dynamique. Un ferrailage dit optimal a été retenu et appliqué à tous les voiles de la structure.

Mots-clés : Accélérogramme, sismique, modélisation, voile en béton armé, endommagement.

1. Introduction

La tenue des structures de génie civil face aux sollicitations environnementales (séismes, vents, vagues, chocs ...) reste une problématique majeure à la fois pour la sécurité des personnes mais aussi pour la pérennité des ouvrages [1-2]. Les voiles de contreventement jouent un rôle important pour le renforcement des constructions civiles en raison de leur efficacité à assurer une bonne résistance aux forces horizontales. Afin de reproduire les effets réels des séismes sur les constructions, nous avons soumis un portique d'une structure couplé à voile à un chargement dynamique non linéaire de type "Accelerogramme" dans le code de calcul par éléments

finis Abaqus [3]. Un signal naturel dans la direction x de type séisme est utilisé [4].

L'objectif de notre travail est de mettre en œuvre une technique de modélisation qui reproduit le comportement réel d'une structure sous chargement dynamique. Par la suite, nous avons pu étudier et valider la disposition des armatures dans les voiles imposée par la méthode de béton armé aux états limites [5] face aux sollicitations sismiques majeurs tout en respectant les recommandations du règlement parasismique algérien [6]. Un ferrailage optimal a été retenu pour tous les voiles de contreventement de la structure.

2. Modélisation du comportement du béton et de l'acier

2.1. Modèle de comportement endommageable pour le béton

Le modèle numérique utilisé pour le béton est le modèle "Concrete Damaged Plasticity"(CDP) [3]. Le modèle est implanté dans le logiciel de calcul par éléments finis Abaqus [3], il permet la description du comportement inélastique du matériau béton à la fois en traction et en compression. Il a pour but de capturer les effets irréversibles de l'endommagement associés aux mécanismes de rupture se produisant dans le béton sous des pressions de confinement relativement petites. Il est conçu pour l'analyse des structures en béton soumises à un chargement monotone, cyclique et/ou dynamique. Les majeurs mécanismes de rupture pour ce modèle sont la fissuration en traction et l'écrasement du béton en compression. La formulation de ce modèle est basée sur les modèles proposés par Lubliner [7].

La réponse uniaxiale du béton en traction et en compression est donnée dans la figure 1 :

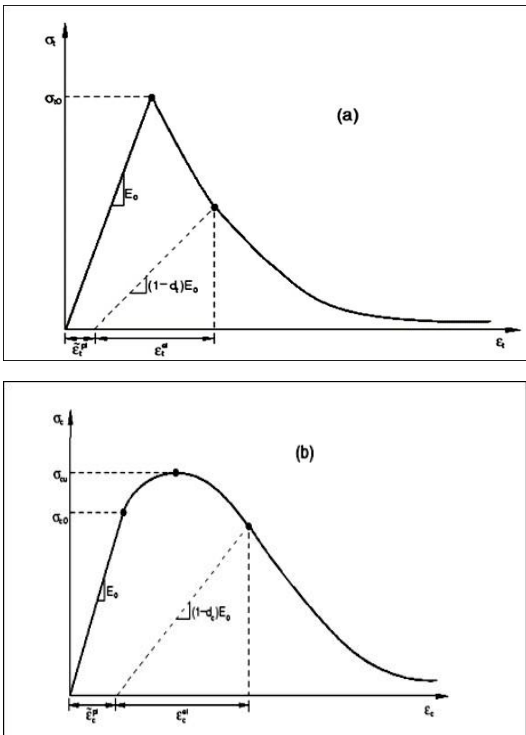


Figure 1 Réponse uniaxiale du béton a) en traction b) en compression [3].

La réponse du béton en traction et en compression est caractérisée par deux variables d'endommagement

indépendantes d_t et d_c , qui sont supposées être dépendantes des déformations plastiques équivalentes en traction et en compression $\bar{\epsilon}^{pl}$ et de la température θ . Ces deux variables sont données par les équations suivantes :

$$d_t = f(\bar{\epsilon}_t^{pl}, \theta) \quad (0 \leq d_t \leq 1) \tag{1}$$

$$d_c = f(\bar{\epsilon}_c^{pl}, \theta) \quad 0 \leq d_c \leq 1 \tag{2}$$

Les indices « t » et « c » se référant à la traction et à la compression respectivement.

Les relations contraintes-déformations incluant l'endommagement isotrope du modèle "CDP" dans le cas d'un chargement uniaxial en traction et en compression sont données par les équations suivantes :

$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0^{el}(\epsilon_t - \bar{\epsilon}_t^{pl}) \tag{3}$$

$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0^{el}(\epsilon_c - \bar{\epsilon}_c^{pl}) \tag{4}$$

La condition de plastification de ce modèle est basée sur la fonction de plastification proposée par Lubliner et al., et prend en considération les modifications proposées par Lee et Fenves [7], pour tenir compte de l'évolution différente de la résistance du béton en traction et en compression. La fonction de plastification exprimée en fonction des contraintes effectives est donnée par l'équation suivante :

$$F(\bar{\sigma}, \bar{\epsilon}^{pl}) = \frac{1}{1 - \alpha} (\bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \beta(\bar{\epsilon}^{pl})(\bar{\sigma}_{max}) - \nu(-\bar{\sigma}_{max})) - \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}_c^{pl}) \leq 0 \tag{5}$$

où :

$\bar{\sigma}_{max}$ est la valeur maximale du tenseur des contraintes effectives $\bar{\sigma}$. Tandis que la fonction $\beta(\bar{\epsilon}^{pl})$ est définie par l'équation suivante :

$$\beta(\bar{\epsilon}^{pl}) = \frac{\sigma_c(\bar{\epsilon}_c^{pl})}{\sigma_t(\bar{\epsilon}_t^{pl})} (1 - \alpha) - (1 + \alpha) \tag{6}$$

et,

$$\bar{p} = \frac{1}{3} \bar{\sigma} \cdot \bar{I} \quad : \text{La contrainte hydrostatique,}$$

: La contrainte effective équivalente de Mises,

$$\bar{S} : \text{La partie déviatorique du tenseur des contraintes effective } s \bar{\sigma},$$

$$\bar{q} = \sqrt{\left(\frac{2}{3} \bar{S} \cdot \bar{S}\right)}$$

α : Paramètre calculé sur la base de la courbe de Kupfer.

Le potentiel d'écoulement choisi pour ce modèle est la fonction hyperbolique de Drucker-Prager défini par l'équation (7) suivante :

$$G = \sqrt{(\epsilon \sigma_{t0} \tan \psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \tan \psi \quad (7)$$

où :

ψ : est l'angle de dilatation mesuré dans le plan p-q à haute pression de confinement.

ϵ : est une excentricité de la surface potentielle dans le domaine plastique.

2.2. Modèle de Johnson-Cook pour les aciers

En se basant sur le modèle de von Mises, Johnson Cook [8] a proposé une loi élasto-plastique écrouissable pour les aciers. La loi de comportement élastique est donnée par l'équation (8) :

$$\bar{\sigma} = 2 \mu \bar{\epsilon}^e + \lambda \text{tr} \bar{\epsilon}^e \bar{I} \quad (8)$$

Le critère de plasticité est défini par l'équation (9) :

$$\phi = \sigma_{eq} - \bar{\sigma} \leq 0 \quad (9)$$

La contrainte d'écoulement de Johnson Cook utilisée est représentée par l'équation (10) :

$$\bar{\sigma} = (A + B \epsilon^n) \left[1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right] \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_t}{\theta_{fusion} - \theta_t} \right)^m \right] \quad (10)$$

Cette loi est composée d'un terme d'écrouissage, d'un terme dynamique, d'un terme d'adoucissement thermique et où :

A : limite d'élasticité

B : module d'écrouissage (paramètre linéaire d'écrouissage

n : coefficient d'écrouissage (paramètre non linéaire d'écrouissage).

$\dot{\epsilon}$: vitesse de déformation plastique

C : coefficient de dépendance à la vitesse d'écrouissage

m : exposant d'adoucissement thermique

Nous avons considéré un comportement isotherme. Les caractéristiques de l'acier utilisé sont les suivantes [9] :

$E= 210\,000\text{MPa}$; $\nu=0,3$; $R_e=348\text{ MPa}$; $\sigma_m=527\text{ MPa}$ et $\epsilon_u=0,164$.

3. Technique de calcul du portique couplé à voile

Un portique couplé à voile d'une structure à deux niveaux est soumis à un chargement dynamique de type " séisme " dans le code de calcul par éléments finis Abaqus. La géométrie et les conditions aux limites du portique sont illustrées sur la figure 2.

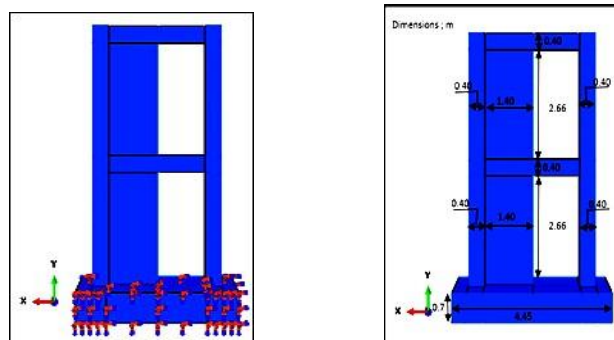


Figure 2 Géométrie et conditions aux limites du portique.

Le portique couplé à voile est soumis à un chargement dynamique de type " Accélérogramme ". La technique de calcul adoptée dans cette étude, consiste à modéliser l'effet des charges sismiques (plutôt que du séisme lui-même). La particularité de cette approche est que le chargement (Accélérogramme) est appliqué en bloc en utilisant la « notion du nœud maître. Un signal naturel enregistré lors du séisme Boumerdès [4] à la station de Dar El Beida est utilisé, et appliqué à la base du portique. La composante du signal du chargement est illustrée dans la figure 3 :

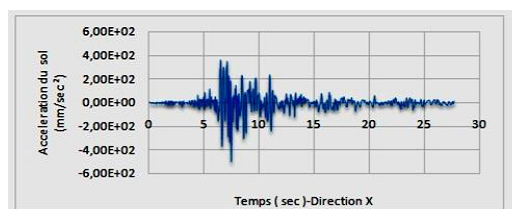


Figure 3 Composante du signal de Boumerdès [4].

Deux dispositions des armatures dans les voiles en béton armé sont testées. La première disposition est celle dictée par la méthode classique du béton armé aux états limites [5] tout en respectant les recommandations du règlement parasismique algérien [6]. Cette première disposition est prise comme étant notre modèle classique de référence (modèle classique "MC"). La deuxième disposition est celle des modèles inclinés "MI"[10]. Elle consiste à placer des barres inclinées de part et d'autre de l'âme du voile en faisant varier l'angle d'inclinaison des barres verticales par rapport à l'horizontal (modèle incliné "MI").

Les voiles sont étudiés en flexion composée avec la méthode classique de béton armé [5], et sont sollicités par les efforts M (moment fléchissant), et N (effort normal). Le ferrailage final pour le modèle classique "MC" est le suivant :

- 4 barres verticales en $\phi 20$, espacées de 10 cm, qui constituent le potelet de l'extrémité,
- 12 barres verticales en $\phi 8$ réparties en deux nappes espacées de 20 cm,
- 84 barres horizontales en $\phi 8$ réparties en deux nappes avec un espacement de 20 cm,
- 84 cadres en $\phi 8$ réparties sur le long des potelets espacées de 20cm.

Afin de vérifier la pertinence de la technique développée, nous avons utilisé des modèles inclinés "MI" qui sont inspirés du modèle classique de référence "MC".

Le ferrailage du modèle incliné à 15° "MI15" est le suivant :

- 4 barres verticales en $\phi 20$, espacées de 10 cm, qui constituent le potelet de l'extrémité,
- 64 barres inclinées de 15° en $\phi 8$ réparties en deux nappes,
- 84 barres horizontales en $\phi 8$ réparties en deux nappes avec un espacement de 20 cm,
- 84 cadres en $\phi 8$ réparties sur le long des potelets espacées de 20cm.

Le ferrailage du modèle incliné à 30° "MI30" est le suivant :

- 4 barres verticales en $\phi 20$, espacées de 10 cm, qui constituent le potelet de l'extrémité,
- 124 barres inclinées de 30° en $\phi 8$ réparties en deux nappes,
- 84 barres horizontales en $\phi 8$ réparties en deux nappes avec un espacement de 20 cm,
- 84 cadres en $\phi 8$ réparties sur le long des potelets espacées de 20cm.

Le ferrailage du modèle incliné à 45° "MI45" est le suivant :

- 4 barres verticales en $\phi 20$, espacées de 10 cm, qui constituent le potelet de l'extrémité,

- 202 barres inclinées de 45° en $\phi 8$ réparties en deux nappes ;
- 84 barres horizontales en $\phi 8$ réparties en deux nappes avec un espacement de 20 cm,
- 84 cadres en $\phi 8$ réparties sur le long des potelets espacées de 20cm.

Les hypothèses de calcul sont les suivantes :

- La masse est concentrée au niveau des planchers, la notion du "nœud maître" est défini à l'aide de la commande "RIGID BODY" dans le logiciel Abaqus.
- Des éléments "CONSAINT" permettant la transmission et la distribution du chargement de la base vers les nœuds maitres sont défini.
- Le portique est sollicité à sa base par la composante horizontale du signal de Boumerdès dans la direction x.
- Les interactions béton-armatures et portique-voile sont supposées parfaites.

1. Résultats et discussions

1.1. Etude comparative globale

1.1.1. En termes de déplacements

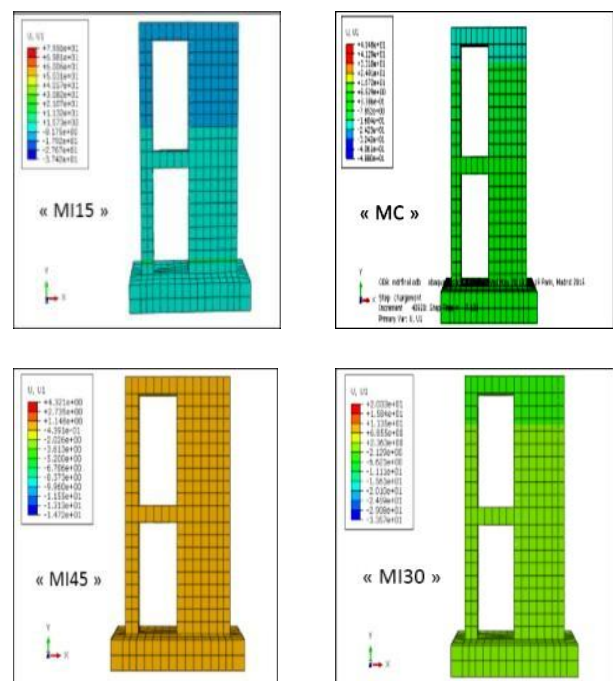


Figure 4 Déplacements dans le portique couplé à voile pour les différentes dispositions.

1.1.2. En termes d'endommagement

- Endommagement en compression

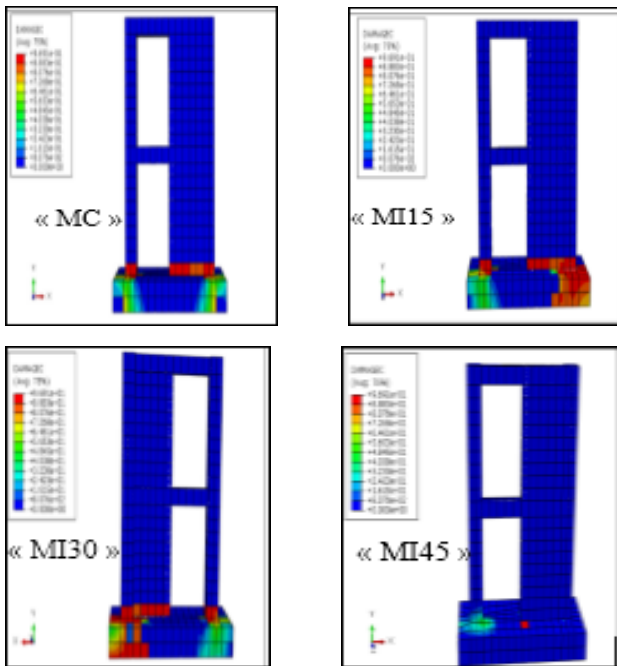


Figure 5 Endommagement en compression.

- Endommagement en traction

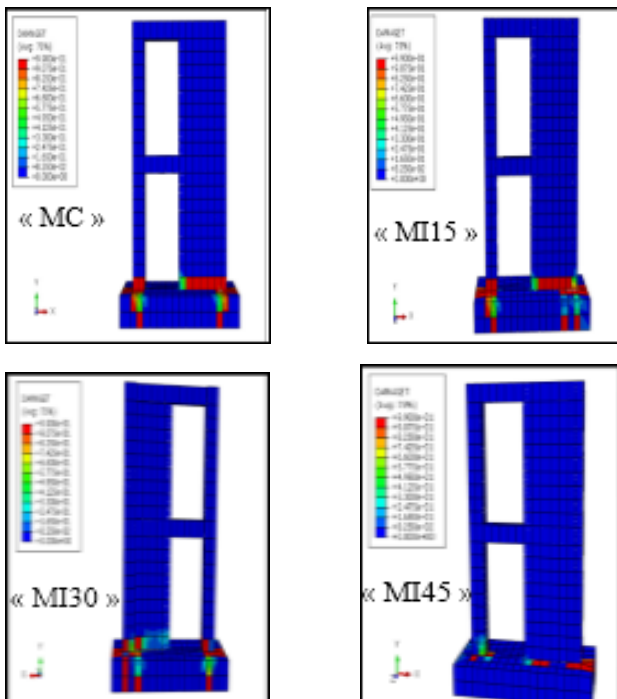


Figure 6 : Endommagement en traction.

1.1.3. En termes de contrainte dans les armatures

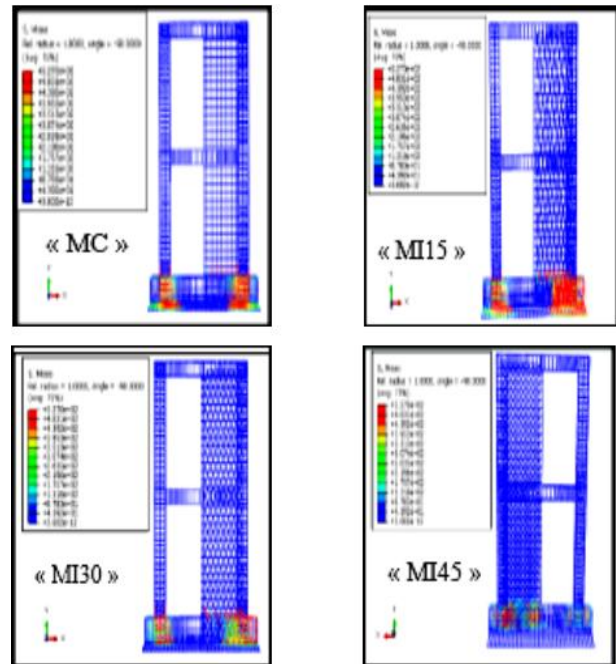


Figure 7 : Propagation des contraintes dans les armatures du portique.

3.1. Etude comparative locale

Dans cette section, on présente une étude comparative locale pour des éléments étudiés qui sont situés à la base des voiles sachant que cette zone est la zone la plus sollicitée. La zone étudiée est représentée par la figure 8 suivante:

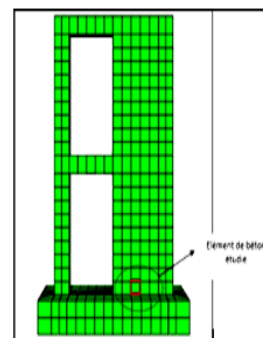


Figure 8 : Elément de béton étudié.

La figure 9 illustre les courbes contraintes en fonction des déformations pour un élément de béton, et pour les différentes dispositions d'armatures. Nous constatons :

- L'élément de béton travaille en compression.
- Pour les dispositions "MC" et "MI15", on remarque une phase élastique suivit d'un pic qui représente la

contrainte limite de compression ($f_c = 32\text{MPa}$) et un post pic qui représente l'apparition des microfissures, et par la suite la rupture de l'élément.

- Pour la disposition "MI30", on observe une phase élastique suivit d'un comportement adoucissant, et enfin l'apparition des microfissures.

Bien que la technique de ferrailage incliné puisse présenter certaines difficultés de réalisation et éventuellement un surcoût, elle reste une solution pertinente dans certains types de construction selon que l'on recherche une augmentation de résistance ou de ductilité.

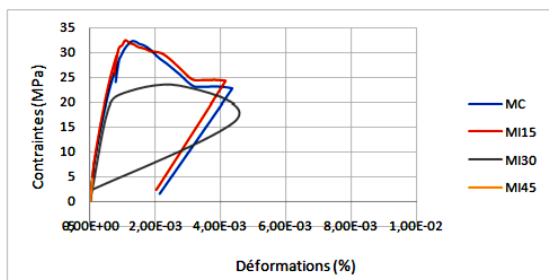


Figure 9 : Contrainte – déformation dans un élément de béton.

Pour la disposition "MI45", il y a lieu de rappeler que l'analyse s'est interrompue au bout d'un temps 0,55 sec ; ce qui justifie les faibles contraintes observées pour cette disposition. La courbe 10 représente la variation des contraintes en fonction des déformations pour un élément de barre $\phi 8$. On constate :

- Un comportement cyclique de l'élément de barre pour toutes les dispositions.
- La phase élastique est clairement visible suivit d'un écrouissage cinématique pour enfin passer au comportement en compression pour toutes les dispositions.
- La contrainte ultime est atteinte pour le comportement en compression, et en traction de l'élément de barre.
- Particulièrement, on distingue une petite déformation pour la disposition des armatures dans le modèle de référence "MC" comparé aux autres modèles.

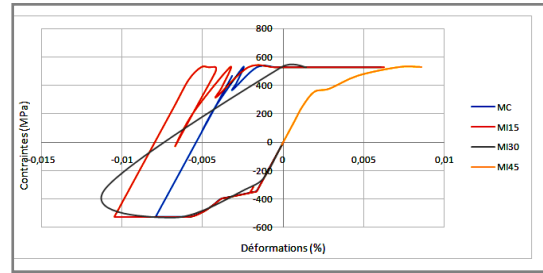


Figure 10 : Contrainte – déformation dans un élément d'armature $\phi 8$

4. Conclusion

La modélisation du comportement non linéaire des structures en béton armé est présentée. Deux principales dispositions des armatures dans les voiles du portique sont étudiées. Le choix astucieux du chargement qui consiste en l'introduction d'un Accélérogramme dans le code de calcul par éléments finis "Abaqus" nous a permis de reproduire l'effet réel du séisme sur le portique couplé à voile. Grâce aux hypothèses émises, la technique de modélisation reproduit avec succès le comportement d'une structure sous chargement sismique. Les résultats obtenus en termes de déplacements, nous informent que le portique peut être assimilé à un oscillateur à deux degré de liberté.

Finalement, les résultats obtenus en comparant les différentes dispositions, permettent de constater l'efficacité de la disposition des armatures des voiles de contreventement dictée par les règlements parasismiques, et la technique de modélisation appliquée a illustré sa perspicacité.

Comme perspectives à ce travail, nous prévoyons :

- d'appliquer cette nouvelle technique de calcul en comparaison avec des résultats expérimentaux.
- d'effectuer une étude sur l'influence de la hauteur des poutres et ses répercussions sur les transferts de charge. Il est important de distinguer lors des simulations le cas du poteau couplé à voile du cas du voile avec ouverture.
- de décrire le comportement de structures à plusieurs niveaux en reproduisant notamment les déplacements relatifs des niveaux.
- de comparer les transferts de charges le long des éléments structuraux : poutres, poteaux et voiles modélisés en utilisant cette technique avec les résultats des autres méthodes de calculs.

Références

- [1] G. Lebon. " Analyse de l'endommagement des structures de génie civil : technique de sous-structuration hybride couplées à un modèle d'endommagement anisotrope". Ecole normale supérieure de Cachan – ENS Cachan, 2011. French.
- [2] V. Davidovici, "Séisme de BOUMERDES – 21 mai 2003, Rapport préliminaire, Ministère de l'Habitat, république algérienne démocratique et populaire. 8 juin 2003.
- [3] ABAQUS, "Theory manuel", Version 4.8, Hibbit, Karlson et Sorensen, Version 6.14.
- [4] Centre de recherche en Génie Parasismique appliqué CGS, Hussein Dey. Alger. 2015.
- [5] B.A.E.L 91 révisé 99, Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites.
- [6] Centre National de Recherche Appliquée en Génie – Parasismique, "Règlement parasismique algérien", (RPA 99/V2003), Ministère de l'habitat document technique réglementaire, DTR B C 2 48.
- [7] Lubliner O., Oliver J., Oller S., Oñate E., "A plastic-damage model for concrete", Int. J. Solids Structures, 25 (3) (1989) 299-326.
- [8] Johnson G. R. and Cook W. H., Fracture characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain rates, Temperature and Pressures, Engineering Fracture Mechanics, 21 (1985) 31-48.
- [9] Senturk A. E., "*Experimental and Analytical Evaluation of Conventionally Reinforced Deck-Girder Bridge Bent Caps with Vintage Details.*" Thèse de doctorat (Phd thesis) en philosophie de l'université d'état d'Oregon, 11 juillet 2008.
- [10] Kezmane A., Boukais S. and Hamizi M., Optimization of the Reinforcement Positioning in the Squat Reinforcement Concrete Walls, ACSIT International Journal of Engineering and Technology, Vol. 5, No. 5, October 2013