



Journal of Materials and Engineering Structures

Research Paper

Approche numérique de l'endommagement des matériaux quasi-fragiles : Cas du béton

Numerical approach of the damage of quasi-fragile materials: Case of the concrete

Samia Khelifi, Hacene Ait Aider, Naceur Eddine Hannachi, El Mahdi Meghlat*

Mouloud Mammeri University of Tizi-Ouzou, Algeria

ARTICLE INFO

Historique de l'article :

Recu : 17 Novembre 2017

Révisé le 13 Juillet 2018

Accépté 16 Juillet 2018

Mots clés:

Endommagement

Isotrope

Eléments Finis

Béton

Keywords :

Damage

Isotropic

Finite Elements

Concrete

RESUME

Les matériaux hétérogènes à matrice fragile se comportent de manière adoucissante après la phase élastique. Cette dégradation peut être modélisée par la mécanique de l'endommagement continu par l'introduction d'une variable qui mesure la réduction de la surface résistante due à l'amorçage et à la propagation de fissures. Le modèle de Mazars choisi pour notre étude est isotrope et prend en compte le comportement dissymétrique du béton (traction-compression). Le modèle est implémenté dans un programme éléments finis travaillant avec interface GID, pour la simulation du comportement réel du matériau jusqu'à la ruine. L'application du programme à des structures simples montre la complexité du modèle à décrire avec précision le comportement d'un tel matériau. L'objectif principal de notre travail est justement, de mettre en évidence les limites d'une telle formulation en exploitant les résultats issus de la simulation.

ABSTRACT

The heterogeneous materials with fragile matrix behave in a softening manner after the elastic phase. This degradation can be modeled by the mechanics of the continuous damage by the introduction of a variable which measures the reduction of the resistant surface due to the initiation and the propagation of cracks. The Mazars model chosen for our study is isotropic and takes in account the asymmetrical behavior of concrete (traction-compression). The model is implemented in a finite element program working with GID interface, for the simulation of the real behavior of the material up to ruin. The application of the program to simple structures shows the complexity of the model to accurately describe the behavior of such a material. The main objective of our work is then, to highlight the limits of such a formulation by exploiting the results resulting from the simulation.

* *Corresponding author. Tel.: +213.773.00.68.24.*

E-mail address: h_aitaider@yahoo.fr

1 Introduction

Le béton est un matériau qui présente une forte hétérogénéité liée à sa nature composite. Selon la nature et l'intensité de la sollicitation extérieure, le béton se déforme de manière complexe en faisant intervenir une ou plusieurs combinaisons de mécanismes élémentaires : élasticité, frottement, glissement et fissuration. Pour décrire ces mécanismes de dégradation, plusieurs théories appliquées à ce type de matériau ont été développées. On peut citer : l'approche locale de fissuration, théorie de plasticité, mécanique de la rupture et mécanique de l'endommagement à laquelle nous allons nous intéresser.

La mécanique de l'endommagement décrit la perte progressive de l'intégrité du matériau suite à la coalescence et la propagation de micro-vides et de microfissures. Ces changements de la microstructure conduisent à une dégradation de la rigidité observée à l'échelle macroscopique [3]. Les modèles d'endommagement se basent sur la thermodynamique des processus irréversibles et si on se limite aux matériaux endommageables présentant un comportement élastique, (tel que le comportement du béton), deux variables d'état peuvent être retenues ; la déformation et l'endommagement. Ce dernier peut être défini par une ou plusieurs variables internes caractérisant la densité et l'orientation des micro-défauts [4]. Les modèles les plus simples considèrent un endommagement isotrope représenté par une seule variable scalaire qui agit sur le module d'Young du matériau et c'est le cas du modèle d'endommagement phénoménologique de Mazars [5]. L'auteur a, en effet, entrepris de modéliser les phénomènes de dégradation du béton par l'introduction d'une seule variable scalaire d'endommagement D qui quantifie l'influence de la microfissuration d'un matériau. C'est la théorie la plus simple qui présente une démarche type pour établir un modèle d'endommagement.

2 Formulation

Nous utilisons la version locale du modèle de Mazars à variable d'endommagement scalaire [5]. Le comportement du matériau est considéré élastique endommageable, cet aspect se traduit par la relation contrainte-déformation:

$$\underline{\sigma} = (1 - D)\underline{\Lambda} : \underline{\varepsilon} \quad (1)$$

D variable d'endommagement variant de 0 (matériau sain) à 1 (matériau endommagé)

$\underline{\sigma}$ et $\underline{\varepsilon}$ tenseurs des contraintes et déformations

$\underline{\Lambda}$ Rigidité sécante initiale.

Pour décrire l'évolution de l'endommagement, la notion de déformation équivalente est utilisée. L'intérêt principal de cette notion est de traduire un état triaxial par une équivalence à un état uniaxial :

$$\tilde{\varepsilon} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \langle \varepsilon_i \rangle_+^2} \quad (2)$$

Avec : ε_i déformations principales dans la direction i

$$\langle \varepsilon_i \rangle_+ = \frac{|\varepsilon_i| + \varepsilon_i}{2} \quad (3)$$

Puisque l'endommagement apparaît lorsque la déformation équivalente atteint un certain seuil κ (dit seuil d'endommagement), la surface de charge liée à l'endommagement s'écrit alors :

$$F(\tilde{\varepsilon}, \kappa) = \tilde{\varepsilon} - \kappa \quad (4)$$

Initialement $\kappa = \kappa_0$, au cours du chargement κ assure que la surface de charge entraîne la surface seuil, ce qui s'exprime par:

$$si \begin{cases} F(\varepsilon, \kappa) = 0 \\ \dot{F}(\varepsilon, \kappa) = 0 \end{cases} \text{ et } \text{alors } \begin{cases} D = h(\kappa) \\ \kappa = \dot{\varepsilon} \end{cases} \text{ avec } \dot{D} \geq 0 \text{ sinon } \begin{cases} \dot{D} = 0 \\ \dot{\kappa} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$h(\kappa)$ étant une fonction qui décrit l'évolution de l'endommagement.

La surface seuil d'endommagement est définie par:

$$F(\tilde{\varepsilon}) = 0 \text{ et } \dot{D} \geq 0 \quad (6)$$

L'endommagement D est décomposé en un endommagement D_t du à la traction, et un endommagement D_c du à la compression :

$$D = \alpha_t D_t + \alpha_c D_c \quad (7)$$

Les coefficients α_t , α_c sont déterminés à partir du tenseur des déformations et sont fonction des déformations principales ε_{ij}^t et ε_{ij}^c dues aux contraintes de traction et de compression.

En compression pure $\alpha_t = 0$ et $\alpha_c = 1$.

$$\alpha_t = \sum_1^3 \frac{\langle \varepsilon_i^t \rangle \langle \varepsilon_i \rangle_+}{\tilde{\varepsilon}^2} \quad (8)$$

$$\alpha_c = 1 - \alpha_t \quad (9)$$

$$D_t = 1 - \frac{(1 - A_t)}{\kappa} - \frac{A_t}{\exp[B_t(\kappa - \kappa_0)]} \quad (10)$$

$$D_c = 1 - \frac{(1 - A_c)}{\kappa} - \frac{A_c}{\exp[B_c(\kappa - \kappa_0)]} \quad (11)$$

où A_c , B_c , A_t , et B_t sont des paramètres d'identification du matériau et peuvent être déterminés à partir d'un essai de traction ou de compression sur éprouvette ou alors par essai de flexion sur poutre.

3 Application

Dans le présent travail, on introduira cette loi dans un programme de calcul en éléments finis, pour voir l'évolution des réponses des différentes structures aux sollicitations. Ceci a été fait par l'ajout de "blocs" indépendants en se conformant aux notices de programmation et en respectant l'architecture du programme. Les résultats ainsi obtenus seront visualisés sous forme d'isovaleurs à l'aide du logiciel GID 6.0.

3.1 Essai à chargement alterné (traction-compression)

Le but de cette application est de montrer la capacité du modèle à décrire l'aspect dissymétrique du comportement du béton vis-à-vis de la traction et de la compression. [6]. Pour ce faire, nous avons soumis un volume élémentaire de béton à un chargement alterné, et la réponse obtenue est illustrée par la figure ci-dessous.

A partir de cet essai nous pouvons remarquer que lors d'un déchargement total, la contrainte nulle correspond à une déformation nulle. Nœuds qu'il n'y a pas de déformation irréversible. Le modèle est donc un modèle d'endommagement pur la plasticité n'est pas prise en compte dans ce modèle. Le déchargement est élastique avec une pente égale au module d'Young endommagé.

$$E_D = (1 - D) E \quad (12)$$

On peut voir également sur cette réponse globale que le déchargement en traction suivi d'un chargement en compression est linéaire. Or, expérimentalement la reférmure des fissures joue un rôle dans le chargement cyclique [7]. Lors d'un chargement en compression d'une éprouvette préalablement fissurée en traction, les microfissures se referment progressivement et la rigidité augmente alors que la valeur de l'endommagement reste la même [7].

Le modèle ne prend pas en compte le caractère unilatéral du béton et on conclut qu’il n’est pas totalement adapté au calcul avec chargement cyclique [8]. Le modèle est implémenté dans un programme éléments finis conçu initialement pour faire des calculs en élasticité fessant dans lequel nous avons introduit le modèle auquel nous avons associé un processus itérative de convergence. Les paramètres choisis pour la validation des résultats numériques avec les résultats expérimentaux sont donnés dans le tableau 1.

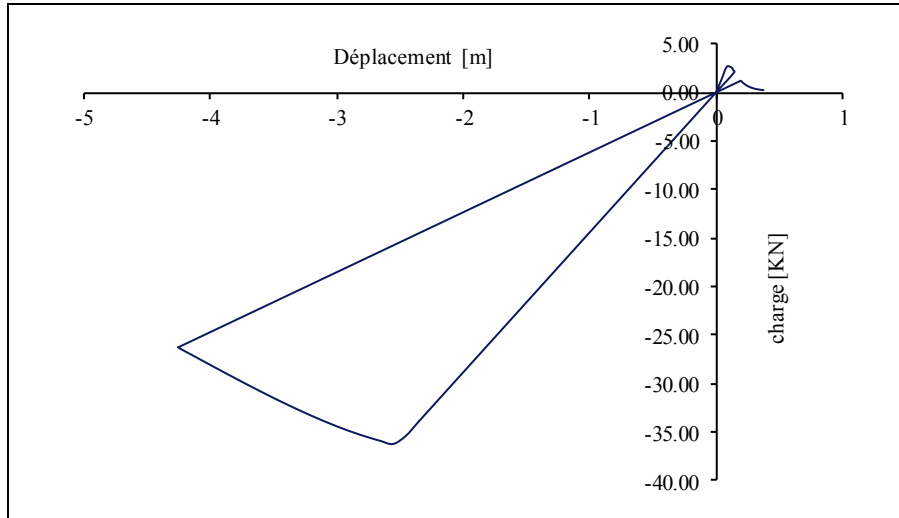


Figure 1- Réponse globale à un chargement alterné (traction- compression)

Tableau 1 : Caractéristiques mécaniques et paramètres du modèle

E (MPa)	n	k ₀	A _t	B _t	A _c	B _c
20000	0.2	0.0001	0.95	18000	1.4	1850

3.2 Plaque carrée soumise à la traction pure

On s’intéresse à présent au comportement d’une plaque carrée de dimension 1*1 soumise à un effort de traction pure. Le maillage est régulier et constitué d’éléments quadratiques à 4 nœuds avec 4 points de Gauss.

Pour mettre en évidence la dépendance des résultats de la simulation au maillage, 3 différentes discrétisations sont réalisées : maillage fin, moyen et grossier avec 650 éléments, 400 éléments et 100 éléments respectivement. La géométrie, la discrétisation ainsi que les conditions aux limites sont montrées par la figure 2 pour le cas de la plaque à 100 éléments.

Les résultats de cette simulation sont donnés par la figure 3, pour deux niveaux de chargement : déplacements de 0.2mm et 0.6mm respectivement, afin d’observer l’évolution progressive du dommage.

Les trois différentes discrétisations réalisées pour cette plaque nous permettent de voir l’influence de la taille des éléments constituant le maillage sur la réponse numérique de la structure. La zone fortement endommagée au centre de la plaque (fig 3) est d’autant plus petite que le maillage est fin. L’intensité de l’endommagement par contre est plus importante pour le maillage fin que pour le maillage grossier. Cela veut dire qu’un maillage fin favorise un endommagement important qui reste confiné dans une zone limitée.

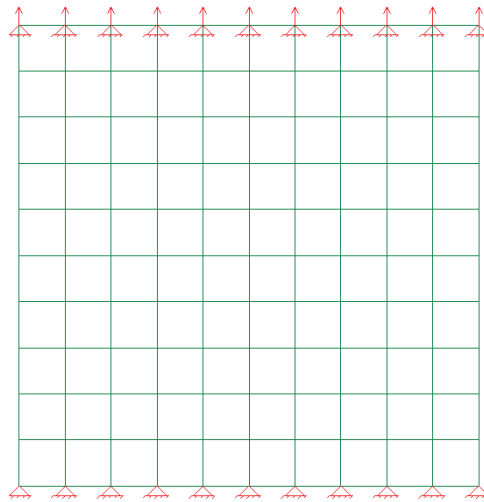


Figure 2- Géométrie, discrétisation et conditions aux limites de la plaque carrée pour 100 éléments

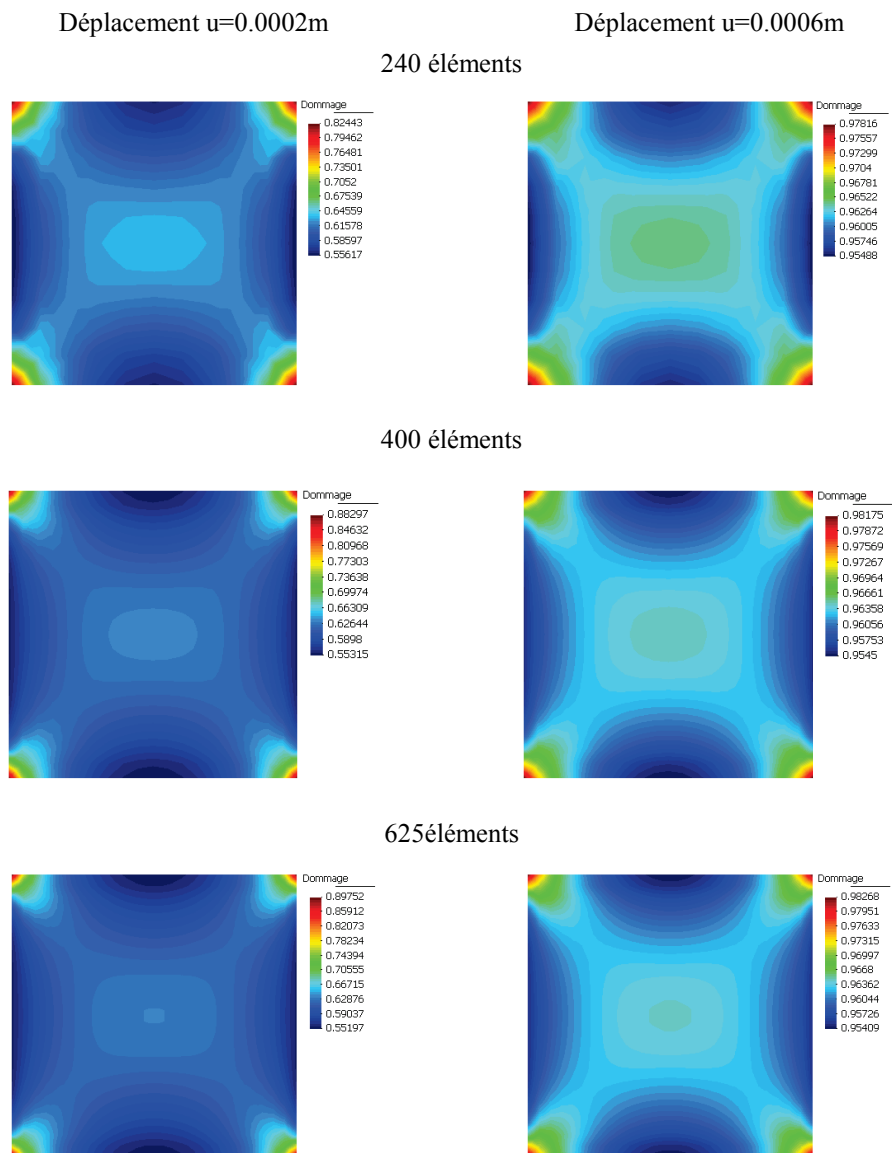


Figure 3- Endommagement à deux niveaux de chargement pour les 3 maillages

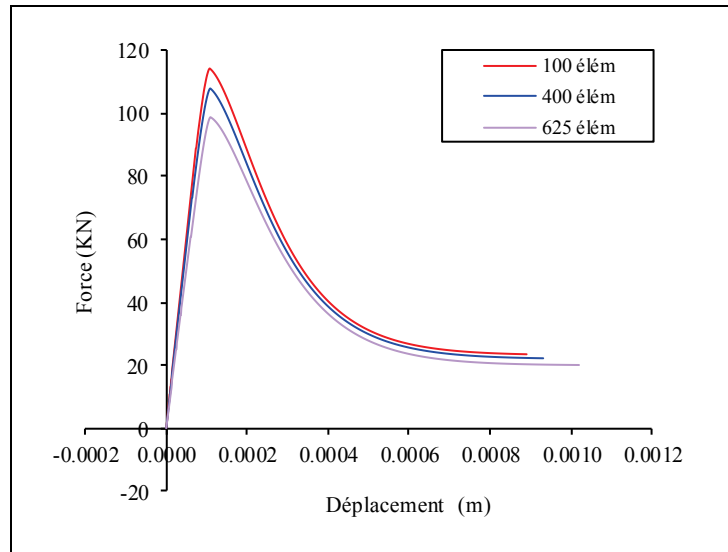


Figure 4- Courbes forces- déplacements pour les trois différents maillages de la plaque carrée

3.3 Plaque rectangulaire soumise à la traction pure

Pour la présente application, nous tentons de mettre en évidence l'influence du maillage sur la réponse globale d'un élément de structure simple dont les dimensions et les conditions aux limites sont données par la figure 5.

Nous avons opté pour un maillage triangulaire à trois nœuds avec un point d'intégration de Gauss. Ce type de maillage nous permet de montrer l'influence de l'orientation des éléments du maillage sur la réponse de la structure. Trois différents maillages sont utilisés pour cet essai.

Ci-après sont présentés les résultats de la simulation à 650 éléments un déplacement de 0.0004 m.

Dans le cas de cette application, on peut voir (fig. 6) que l'endommagement se situe aux deux tiers supérieur et inférieur de la plaque. Les zones endommagées semblent s'orienter suivant le même sens donné aux éléments de ce maillage triangulaire. En effet, un maillage réalisé dans un sens opposé au premier (fig 8) a conduit à une orientation de la zone endommagée dans ce sens-là. On constate donc que les zones d'apparition du dommage et le sens de son développement sont contrôlés par la forme et l'orientation données aux éléments du maillage [9]. On peut remarquer aussi que la réponse globale (fig.7), est fortement liée au nombre d'éléments du maillage. En effet le passage d'un maillage de 240 éléments à celui de 650 éléments entraîne une chute de l'effort au pic d'environ 40%. Ce qui est un écart considérable. Celui-ci est plus important que celui observé pour le cas de la plaque carré avec des éléments quadratiques. On en conclut donc que l'effet du nombre d'élément sur la réponse globale d'une structure est plus ou moins important selon le type de la structure testée et la forme du maillage adopté.

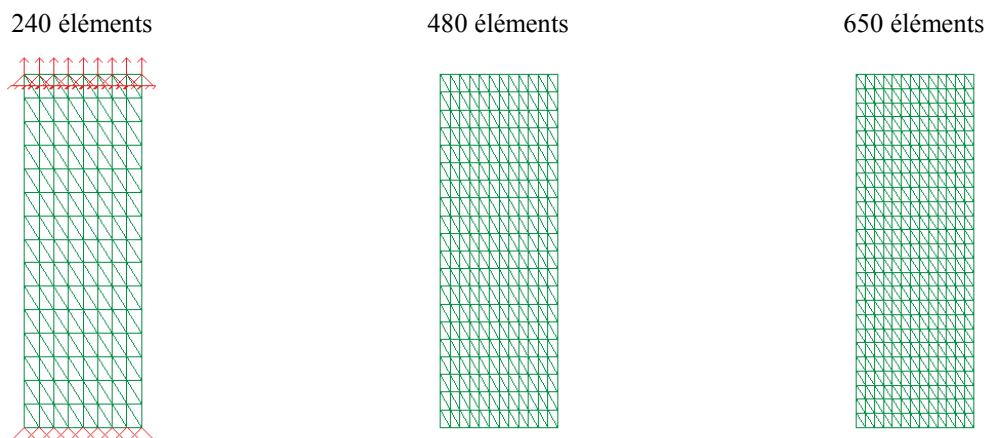


Figure 5- Géométrie, discrétisation et conditions aux limites de la plaque rectangulaire.

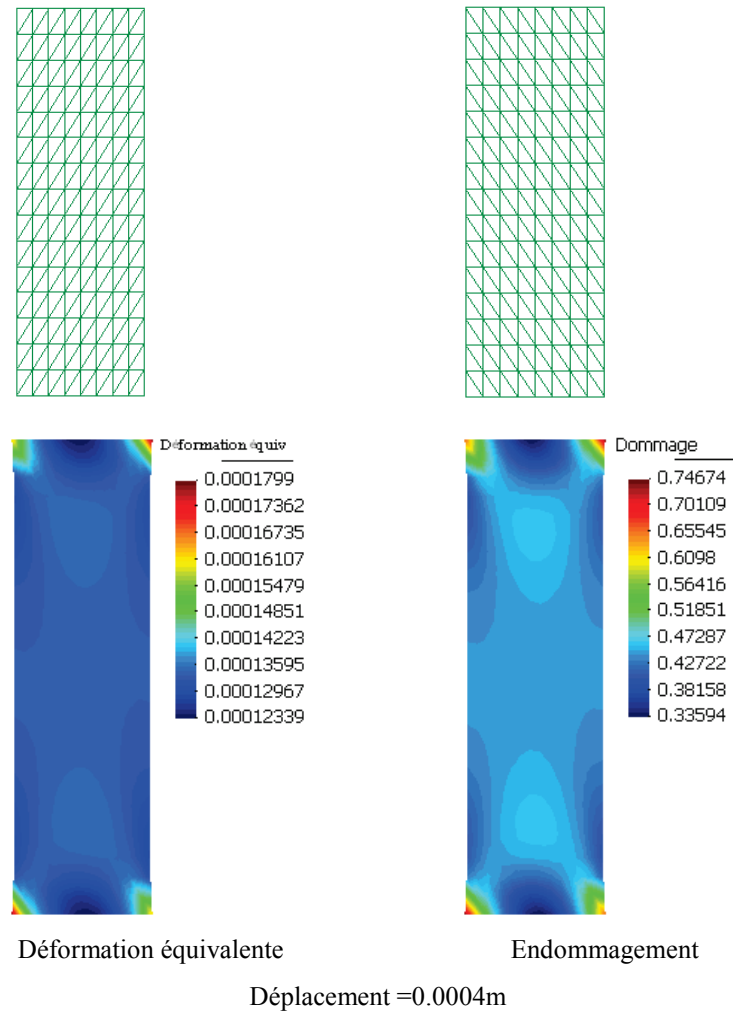


Figure 6- Répartition de la déformation équivalente ainsi que l'endommagement à travers l'éprouvette

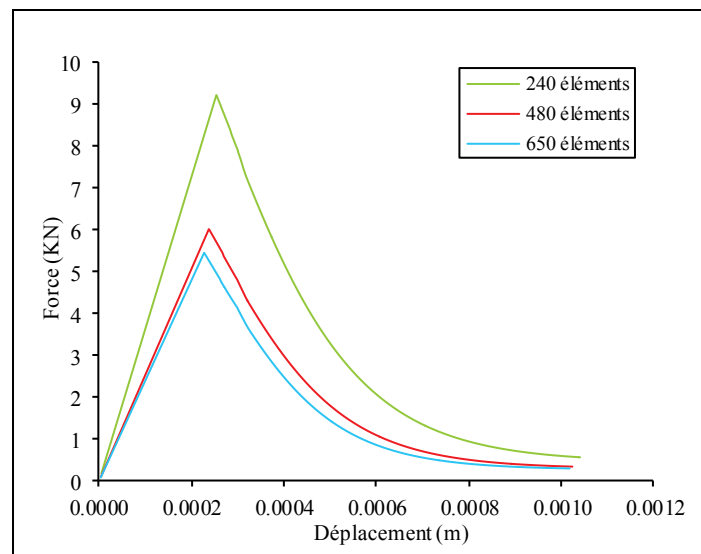


Figure 7- Courbes forces- déplacements pour les trois différents maillages de l'éprouvette rectangulaire

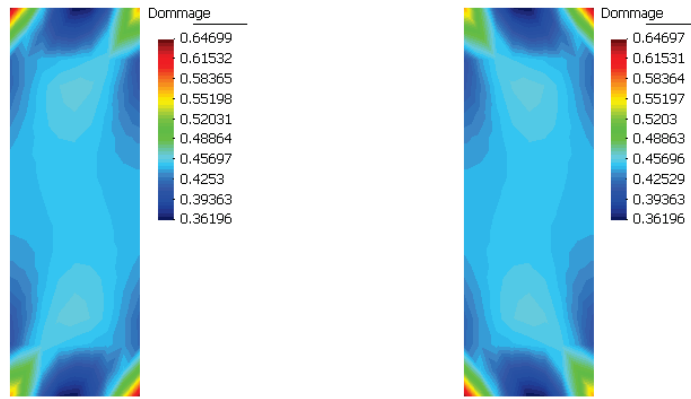


Figure 8 - Mise en évidence de l'influence de l'orientation du maillage

3.4 Plaque rectangulaire soumise à la compression

Nous soumettons la même plaque de l'application précédente à un effort de compression. L'endommagement se localise clairement dans des zones dont la surface est d'autant plus petite que le maillage est fin (Figure 11). Cette localisation est confirmée par la réponse globale de la plaque (Figure 12) où l'aire sous la courbe diminue à mesure que le maillage est raffiné.

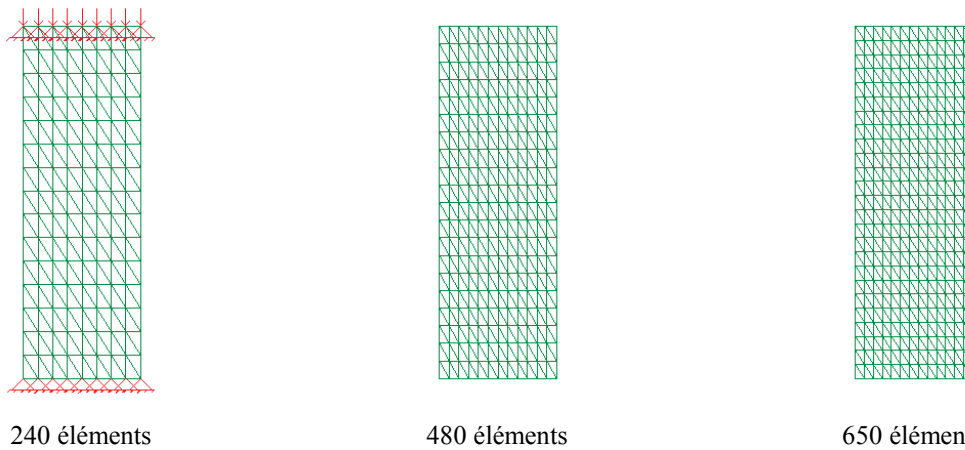


Figure 10- Géométrie, discrétisation et conditions aux limites de la plaque rectangulaire dans le cas de la compression.

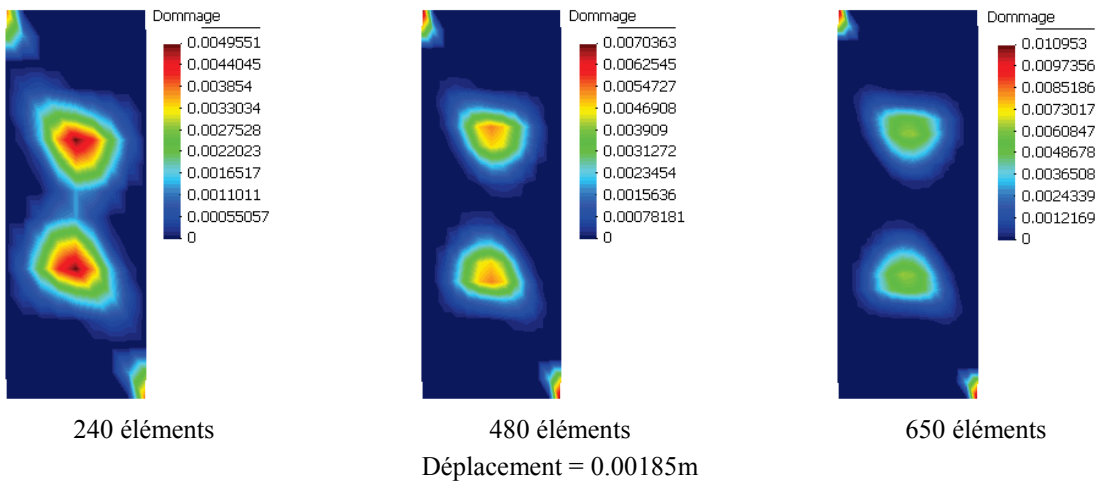


Figure 11- Evolution de l'endommagement dans l'éprouvette pour les trois différents maillages en compression

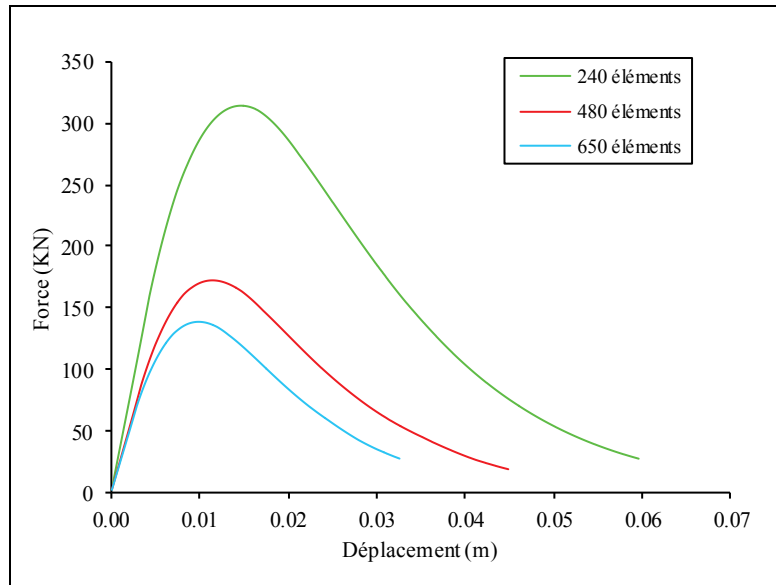
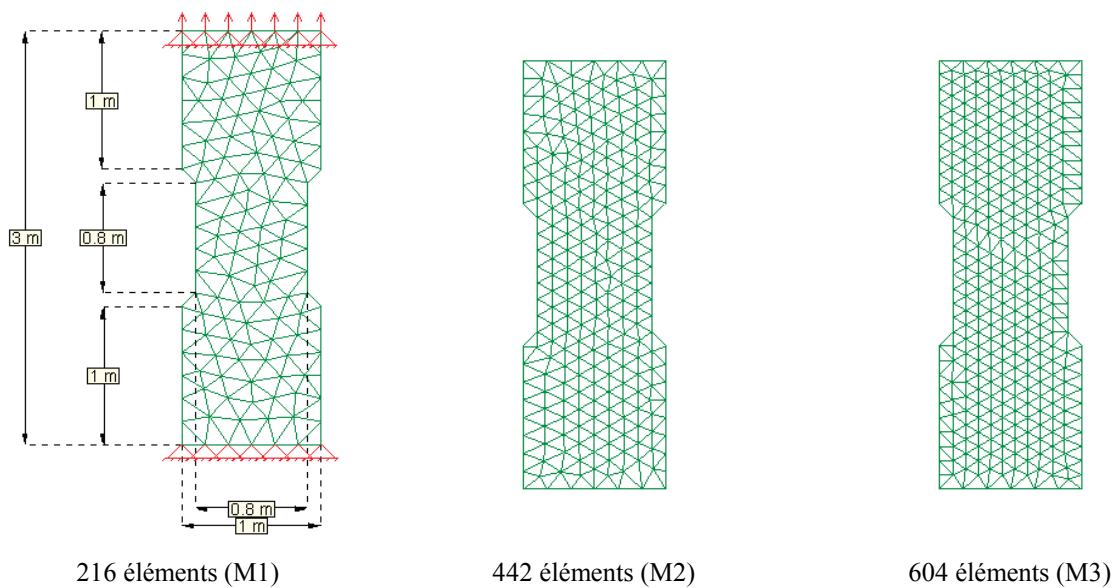


Figure 12- Courbes forces- déplacements pour les trois différents maillages de l'éprouvette rectangulaire en compression

3.5 Plaque rectangulaire avec irrégularités géométriques soumise à la traction pure

Le but de la présente application est de voir le phénomène de localisation des déformations dans un matériau fragile tel que le béton. Le phénomène de localisation est lié au type de chargement, les caractéristiques mécaniques du matériau ainsi qu'à la géométrie de la structure [10]. Nous avons donc choisi de créer des irrégularités géométriques dans une plaque rectangulaire et de la soumettre à un effort de traction pure.

La réponse de cette structure est homogène et le calcul est stable jusqu'à rupture de l'éprouvette (fig.14). L'endommagement s'initie dans les zones fragiles de l'éprouvette et se développe principalement à son tiers central et ce jusqu'à un endommagement allant de 0.64 pour l'éprouvette M1 à 0.75 pour l'éprouvette M2, (fig. 15). L'effet du maillage est visible sur la réponse globale de l'éprouvette (fig. 16), où l'écart de la force au pic des éprouvettes M1 et M3 atteint 55%.



216 éléments (M1)

442 éléments (M2)

604 éléments (M3)

Figure 13- Géométrie, discrétisation et conditions aux limites de la plaque rectangulaire.

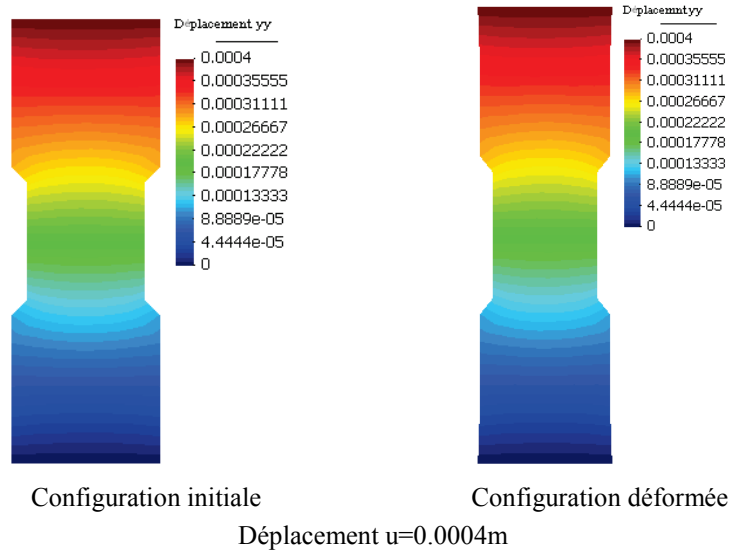


Figure 14- Déplacement suivant le sens de l'application de l'effort pour l'éprouvette M1

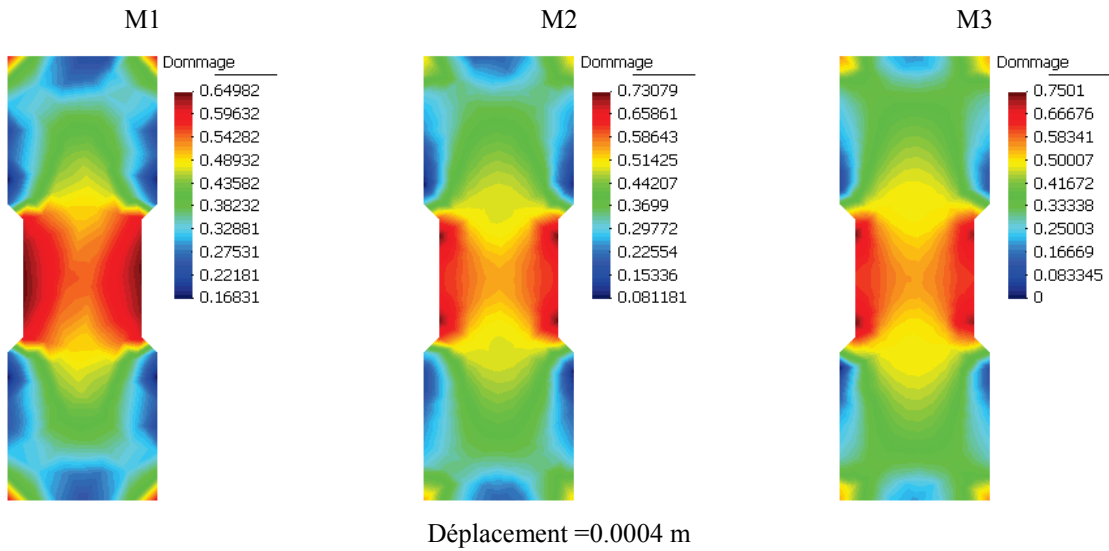


Figure 15- Evolution de l'endommagement dans l'éprouvette

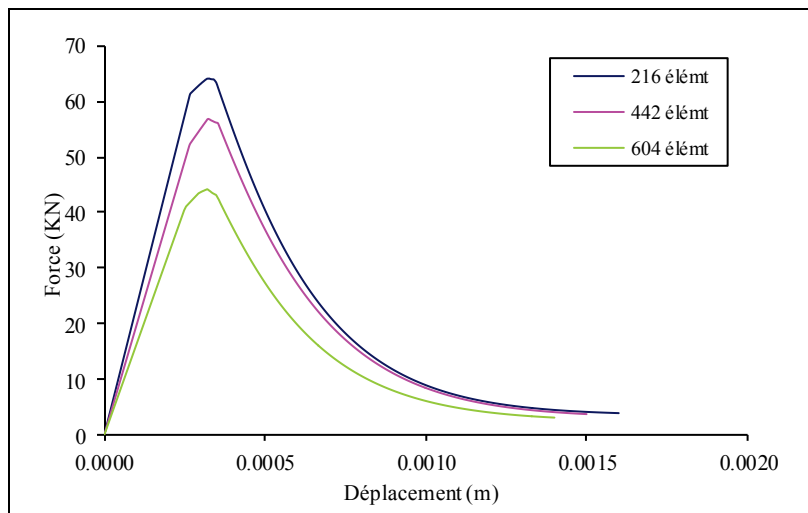


Figure 16- Courbes force- déplacement pour les trois différents maillages de l'éprouvette entaillée

3.6 Poutre entaillée soumise à une flexion trois points

Pour cette application de la poutre entaillée soumise à la flexion trois points avec un maillage triangulaire. Les dimensions de la poutre et les conditions aux limites [3] sont données par la figure (17).

L'effet du maillage est observé également pour le cas de la flexion trois points (Fig. 18) où le raffinement du maillage au voisinage de l'entaille conduit à la réduction de la taille de la zone endommagée [3], [8]. On voit bien que l'endommagement reste confiné au voisinage de l'entaille pour le maillage fin alors qu'il se propage de façon homogène pour le maillage grossier.

Les courbes de la figure 19 montrent la différence des réponses issues des deux maillages. L'aire sous la courbe force-déplacement est d'autant plus petite que le maillage est fin. On observe également que la réponse numérique s'éloigne considérablement de la réponse expérimentale.

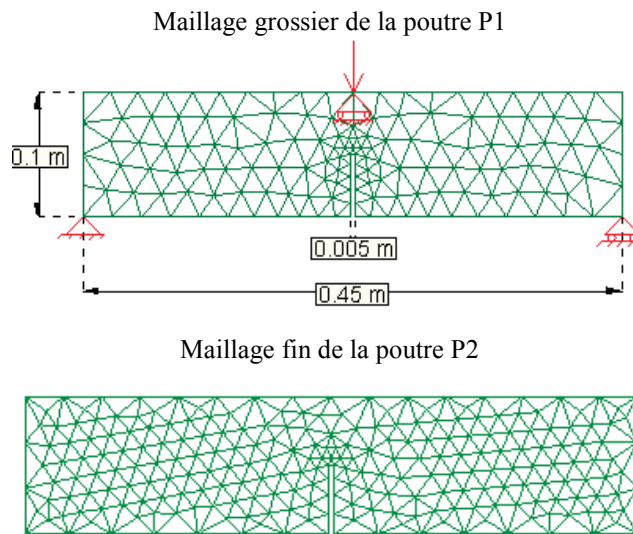
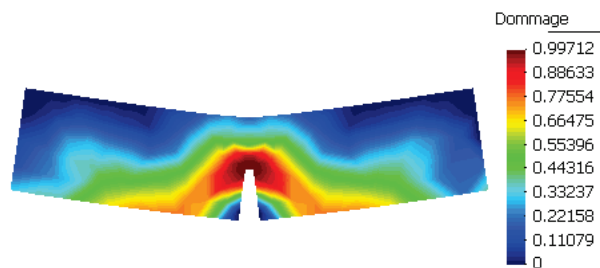


Figure 17- Géométrie et conditions aux limites de la poutre entaillée pour deux différents maillages

Résultats pour un déplacement de 0.0003 m (0.3mm)

237 éléments



443 éléments

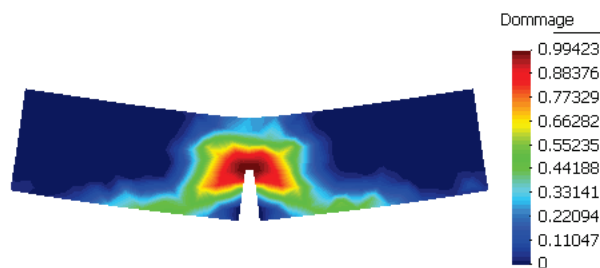


Figure 18- Comparaison de la zone endommagée pour les deux maillages

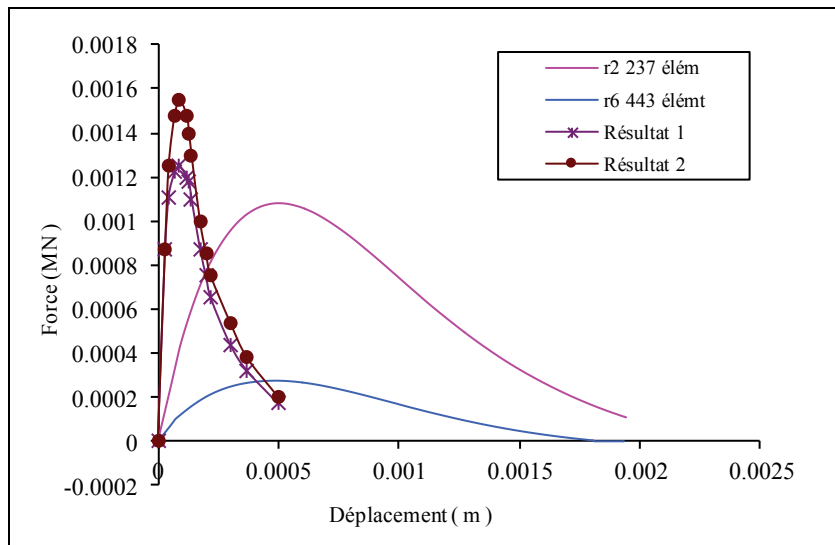


Figure 19- Superposition des résultats de la simulation avec les résultats expérimentaux pour les deux maillages.

4 Conclusion

A travers les exemples présentés dans cette étude, on a pu mettre en évidence d'une part les difficultés d'une simulation numérique liée aux défaillances de la méthode des éléments finis et de l'utilisation de l'algorithme de Newton Raphson, et d'autre part les problèmes de localisation dus à la formulation locale du modèle d'endommagement. Dans cette approche, la contrainte dépend de l'évolution de la déformation en un point sans tenir compte de l'influence des points voisins. Le problème de localisation, peut être levé en utilisant une méthode de formulation non locale de la loi de comportement. En effet, de nombreux travaux [3], [11], .. ont montré qu'un modèle écrit en formulation intégrale ou à gradient permet de mieux décrire le processus de l'endommagement de matériaux adoucissants. Une approche non locale pour la modélisation de l'endommagement est donc nécessaire pour réaliser une modélisation cohérente de la rupture et du comportement adoucissant du béton

REFERENCES

- [1]- Y. Labadi, N.E. Hannachi, Numerical simulation of brittle damage in concrete structures. *Strength Mater.* 37(3) (2005) 268-281. doi:10.1007/s11223-005-0039-5
- [2]- Y. Labadi, N.E. Hannachi, Non Linear modelling of concrete structures. *Can. J. Civ. Eng.* 32(4) (2005) 765-774. doi:10.1139/L05-018
- [3]- J. Milan, Non local damage mechanics with application to concrete. *Revue Française de Génie civil.* 8(5-6) (2004) 683-707. doi:10.1080/12795119.2004.9692625
- [4]- J. Lemaitre, J.L. Chaboche, *Mécanique des matériaux solides.* Dunod Edition, 2001.
- [5]- J. Mazars, Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure, Thèse de Doctorat d'Etat, Université Paris 6, 1984.
- [6]- G. Pijaudier-Cabot, L. Jason, Continuum damage modelling and some computational issues. *Revue Française de Génie civil.* 6(6) (2002) 991-1017. doi:10.1080/12795119.2002.9692728
- [7]- C. La Borderie C, Phénomènes unilatéraux dans un matériau endommageable : Modélisation et Application à l'analyse des structures en béton, Thèse de doctorat, Université Paris 6, 1991.
- [8]- L. Jason, S. Ghavamian, G. Pijaudier-Cabot, A. Huerta, Benchmarks for the validation of an non local damage model. *Revue Française de Génie Civil.* 8 (2-3) (2004) 303-328. doi:10.1080/12795119.2004.9692608
- [9]- G. Pijaudier-Cabot, A. Huerta, L. Bode, Modélisation des matériaux et calculs à la rupture. *Mécanique Industrielle et Matériaux,* 46 (1993) 76-79.
- [10]- C.E. Majorana, V. Salomoni, Strain localisation in concrete using damage mechanics. In proceedings of the Fifth International Conference on Computational Plasticity: Fundamentals and Applications, Barcelona, 1997, p.735-744.
- [11]- J.F. Dube, C. Le Bellego, G. Pijaudier-Cabot, B. Gerard, Identification d'un modèle non local en utilisant les effets d'échelle. *Revue Française de Génie Civil.* 7 (6) (2003) 745-760. doi:10.1080/12795119.2003.9692520