



HAL
open science

Simulation numérique de la propagation de l'endommagement dans les matériaux granulaires (béton synthétique).

Rachid Berbaoui, Abderrahim El Mahi

► **To cite this version:**

Rachid Berbaoui, Abderrahim El Mahi. Simulation numérique de la propagation de l'endommagement dans les matériaux granulaires (béton synthétique).. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. hal-03362182

HAL Id: hal-03362182

<https://hal.science/hal-03362182>

Submitted on 1 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude de la propagation de l'endommagement dans les matériaux granulaires à base polymère.

Rachid Berbaoui & Abderrahim El Mahi

*Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine
UMR CNRS 6613*

*Laboratoire des Activités Physiques et Sportives
Université du Maine, 72085 Le Mans cedex 9, France*

Rachid.berbaoui.etu@univ-lemans.fr

Abderrahim.elmahi@univ-lemans.fr

Résumé :

Dans cette étude nous nous sommes intéressés à l'analyse de l'endommagement et à la rupture par fatigue de béton à base polymère. Ce matériau est élaboré à partir d'une matrice polymère renforcée par des granulats et du sable. Le comportement du matériau et son endommagement sont étudiés d'un point de vue expérimental. D'un point de vue numérique, l'endommagement est modélisé à travers une approche itérative par éléments finis. Cette approche consiste dans un premier temps à repartir de manière statistique les contraintes à la rupture dans les éléments de la structure. Après calcul par éléments finis, les éléments pour lesquels le critère de rupture est atteint sont rompus. L'opération est répétée en passant au cycle suivant de manière itérative jusqu'à la ruine de la structure. Cette modélisation permet de suivre la progression de l'endommagement dans la structure en fonction de nombre de cycles.

Abstract :

In this work the fatigue behaviour of the polymer concrete in three point bending has been studied. A stiffness reduction approach was adopted which was further based on the interpolation by the empirical functions of test results, whose coefficients depends on the material properties and loading conditions. This analytical approach combined with the numerical analysis during cycles fatigue allows to follow the evolution of the polymer concrete damage. The calculation of the average stresses in the elements are then carried out and compared with failure stresses. The elements for which the average stresses are superior to failure stresses are broken. The operation is repeated while passing to the following cycle in an iterative way until specimen rupture. The developed model was applied to analyse the damage evolution of polymer concrete according to number of cycles and for different loading levels.

Mots-clefs :

Fatigue ; éléments finis ; béton polymère.

1 Introduction

Le béton de polymère est constitué d'un liant de polymère, et d'une charge minérale comme le gravier ou la pierre concassée et du sable. Les résines les plus généralement utilisées ont été les polystères, et époxydes. Comparativement au béton de ciment Portland, le béton de résine possède une plus grande résistance mécanique, résiste mieux aux produits chimiques et aux agents corrosifs, absorbe moins d'eau et présente une plus grande stabilité aux cycles gel-dégel. Les applications initiales du béton de polymère, étaient à la production du revêtement de bâtiment et confection de mortier pour sols industriels résistant aux agressions physiques ou chimiques, revêtement antidérapant pour routes, enduit pour murs extérieurs et matériau de réfection de surfaces endommagées. Pour l'emploi de béton à base polymère dans différents secteurs, la connaissance des propriétés statiques ne suffit pas et son développement nécessite des informations complémentaires sur son comportement en fatigue. Le travail proposé s'intéresse à une analyse par éléments finis de l'endommagement en cours de la fatigue du béton à base polymère. Notre contribution consiste à développer une procédure itérative et à trouver une loi d'évolution de la contrainte à la rupture des éléments à partir des résultats des

essais de flexion 3-points. Enfin cette loi est introduite dans la procédure itérative permettant ainsi de suivre l'évolution de l'endommagement au cours de la fatigue du matériau.

2 Analyse expérimentale

2.1 Matériaux et essais

Le matériau utilisé dans ce travail est un matériau granulaire à base polymère type béton synthétique. Ce matériau est élaboré à partir d'une matrice polymère résine époxyde renforcée par des granulats et du sable. La mise en œuvre est réalisée au sein du laboratoire avec le dosage suivant : 40% de sable fin, 30% d'agrégats et 30% de résine époxyde.

Après un temps de polymérisation de quelques jours à température ambiante, les éprouvettes parallélépipédiques sont découpées à l'aide d'une tronçonneuse à disque diamanté, à partir d'une plaque de 250 *250 mm² de surface et de 15 mm d'épaisseur. Les dimensions des éprouvettes sont : $L = 160$ mm, $l = 40$ mm et $b = 15$ mm, où L , l et b sont respectivement la longueur, la largeur et l'épaisseur des éprouvettes. Les éprouvettes sont ensuite sollicitées en flexion 3-points avec une distance entre appuis prise égale à 120 mm. Les essais sont effectués sur une machine d'essais hydraulique universelle type INSTRON modèle 8516 de 100 kN de capacité, où le pilotage et l'acquisition se font par ordinateur. Les essais sont effectués en contrôlant la force avec un rapport de chargement R ($R = F_{\min}/F_{\max}$) égal à 0, et pour différents niveaux de chargement r_F ($r_F = F_{\max}/F_{rup}$). La forme d'onde est sinusoïdale avec une fréquence de 10Hz.

2.2 Résultats et analyse

Au cours des essais de fatigue, nous avons enregistré l'évolution du déplacement maximum d_{\max} en fonction du nombre de cycles n , pour différents niveaux de chargement r_F . Dans la figure 1, nous avons reporté l'évolution de la rigidité en fonction du nombre de cycles et pour quatre niveau de chargement r_F (60% , 70%, 80% , 90%). L'analyse de ces résultats montre que, la perte de la rigidité jusqu'à la rupture de l'éprouvette se déroule en 3 phases, dans la première phase se manifeste une diminution progressive dès les premiers cycles, la diminution devient ensuite très lente dans la deuxième phase, correspondant à la quasi-totalité de la durée de vie de l'éprouvette, enfin dans la troisième phase courte, où la perte de rigidité s'accélère brutalement jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La durée de vie augmente avec la diminution du niveau de chargement.

La procédure itérative permettant l'analyse de la progression de l'endommagement au cours de la fatigue dans l'éprouvette, nécessite l'introduction d'une loi d'évolution de la contrainte à la rupture des éléments en fonction du nombre de cycles. Dans cette perspective, nous proposons d'interpoler l'évolution de la rigidité en fonction du nombre de cycles par une fonction simple $f(n)$, dont les constantes dépendent des conditions de chargement et du matériau. Nous nous sommes basés sur des modèles utilisés par Hwang et al. 86, Clark et al. 99, El Mahi et al. 2004, pour établir cette fonction. L'examen des résultats expérimentaux nous a conduit à choisir une fonction $f(n)$ sous forme logarithmique en fonction du nombre de cycles et avec un paramètre dépendant du niveau de chargement et du matériau, cette fonction s'écrit sous la forme :

$$f(n) = 1 - (a.r^2 + b.r + c) . \text{Ln}(n)$$

L'interpolation des résultats expérimentaux nous a permis de déterminer l'ensemble des paramètres ($a = 0,23$, $b = 0,27$ et $c = 0,11$). Cette fonction caractérise l'évolution de la contrainte à la rupture en fonction du nombre de cycles. Elle sera introduite dans la procédure itérative utilisant le calcul par élément finis.

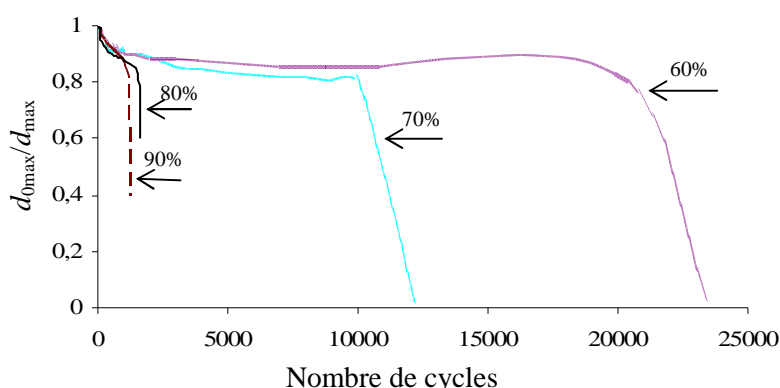


FIG. 1 – Evolution de déplacement en fonction du nombre de cycles pour différents niveaux de chargement.

3 Analyse numérique

3.1 Conditions aux limites et maillage de l'éprouvette

Le modèle par éléments finis utilise les mêmes dimensions que celles utilisées dans les essais expérimentaux. L'éprouvette est discrétisée en 16100 éléments de type penta, est divisé en cinq couches dans son épaisseur (fig. 2). Les conditions aux limites utilisées dans le calcul sont : une force appliquée aux nœuds centraux de la face supérieure de l'éprouvette et deux appuis à une distance de 120 mm en bas de l'éprouvette et symétrique par rapport à l'axe de la force. Le matériau est considéré comme un matériau isotrope.

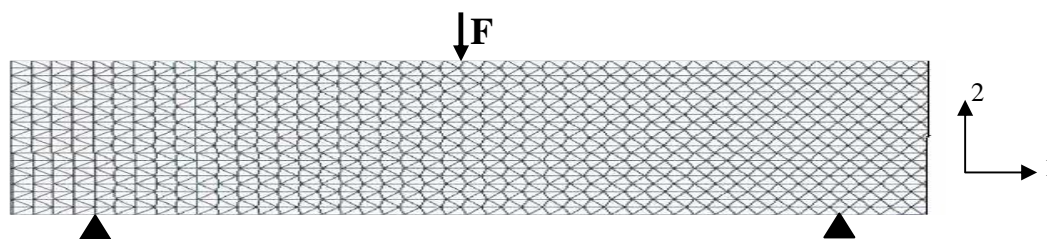


FIG. 2 – Maillage de l'éprouvette et conditions aux limites aux limites

3.2 Procédure de l'analyse

Comme critère d'endommagement local, nous avons choisi un critère en contraintes et nous avons considéré que le matériau étudié a un comportement fragile en traction, compression et cisaillement. Ainsi, trois modes de rupture des éléments sont considérés un mode de rupture en traction suivant les directions 1,2,3, un mode de rupture en compression suivant les trois directions 1,2,3 et un mode de rupture en cisaillement dans les plans (1,2), (1,3), (2,3). Par exemple : une rupture longitudinale en traction ou en compression d'un élément (i) se produit lorsque la contrainte moyenne longitudinale de l'élément atteint sa contrainte à la rupture. Après rupture, l'élément ne peut plus transmettre les contraintes longitudinales, les constantes élastiques C_{ij} correspondantes sont annulées et la loi de comportement de l'élément se réduit à :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{C_{11}-C_{12}}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix}$$

Dans notre modélisation, pour tenir compte de la nature de matériau de type composite à particules tels que le béton, les hétérogénéités sont introduites à partir des propriétés mécaniques. Pour cela, les contraintes à la rupture sont réparties dans l'éprouvette, de manière statistique (fig. 3) entre deux valeurs limites minimale et maximale. Cette distribution est obtenue à l'aide du logiciel MATLAB en utilisant la distribution pseudo-normale centrée réduite. La figure 4 représente un exemple de distribution normale pour une population de 16100 éléments pour des contraintes à la rupture dans un intervalle [16 MPa, 19 MPa].

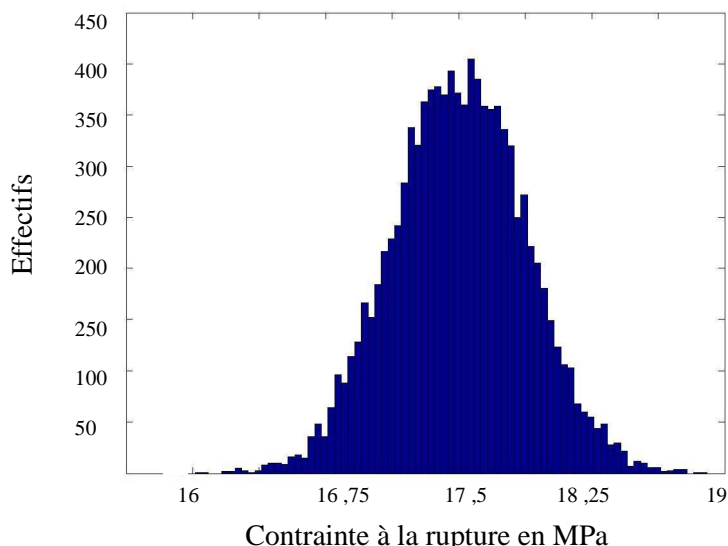


FIG. 3 – Distribution normale des contraintes à la rupture.

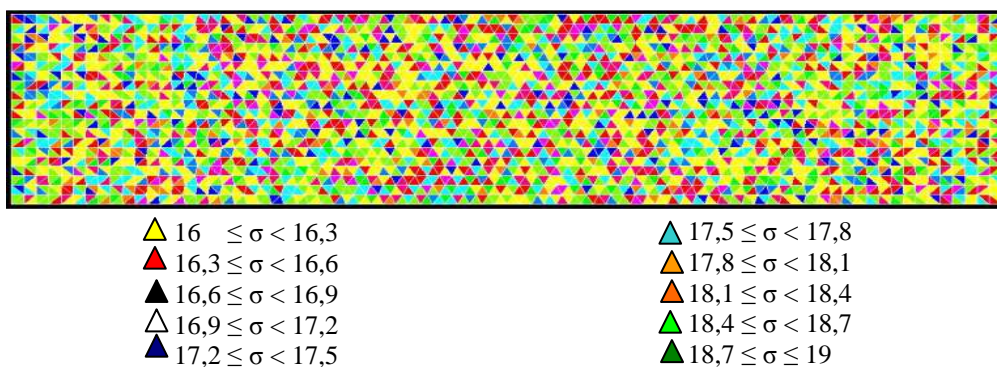


FIG. 4 – Distribution aléatoire des contraintes à la rupture dans l'intervalle [16 MPa, 19 MPa].

La contrainte à la rupture dépend du nombre de cycles. Nous avons supposé que cette contrainte suit la même évolution que la fonction $f(n)$ déterminée précédemment, ce qui entraîne une diminution de la contrainte à la rupture lorsque le nombre de cycles augmente. Après chaque calcul par éléments finis, la contrainte moyenne est comparée à la contrainte à la rupture de l'élément en calculant le rapport r_i :

$$r_i = \frac{\sigma_j(i)}{\sigma_{ju}(i)} \quad \begin{array}{l} j=1,2,\dots,6 \\ i : \text{numéro de l'élément} \end{array}$$

Où σ_j la contrainte moyenne et σ_{ju} la contrainte à la rupture
Les éléments les plus contraints sont donnés par le rapport r_i supérieur ou égal à 1

Cette recherche permet de trouver les éléments endommagés ainsi que leurs modes de rupture. Après endommagement, la rigidité locale des éléments est modifiée et une nouvelle analyse par élément finis est alors effectuée avec des nouvelles contraintes à la rupture. Cette procédure est répétée autant de fois jusqu' à la ruine de l'éprouvette, selon l'algorithme donné dans la figure 5.

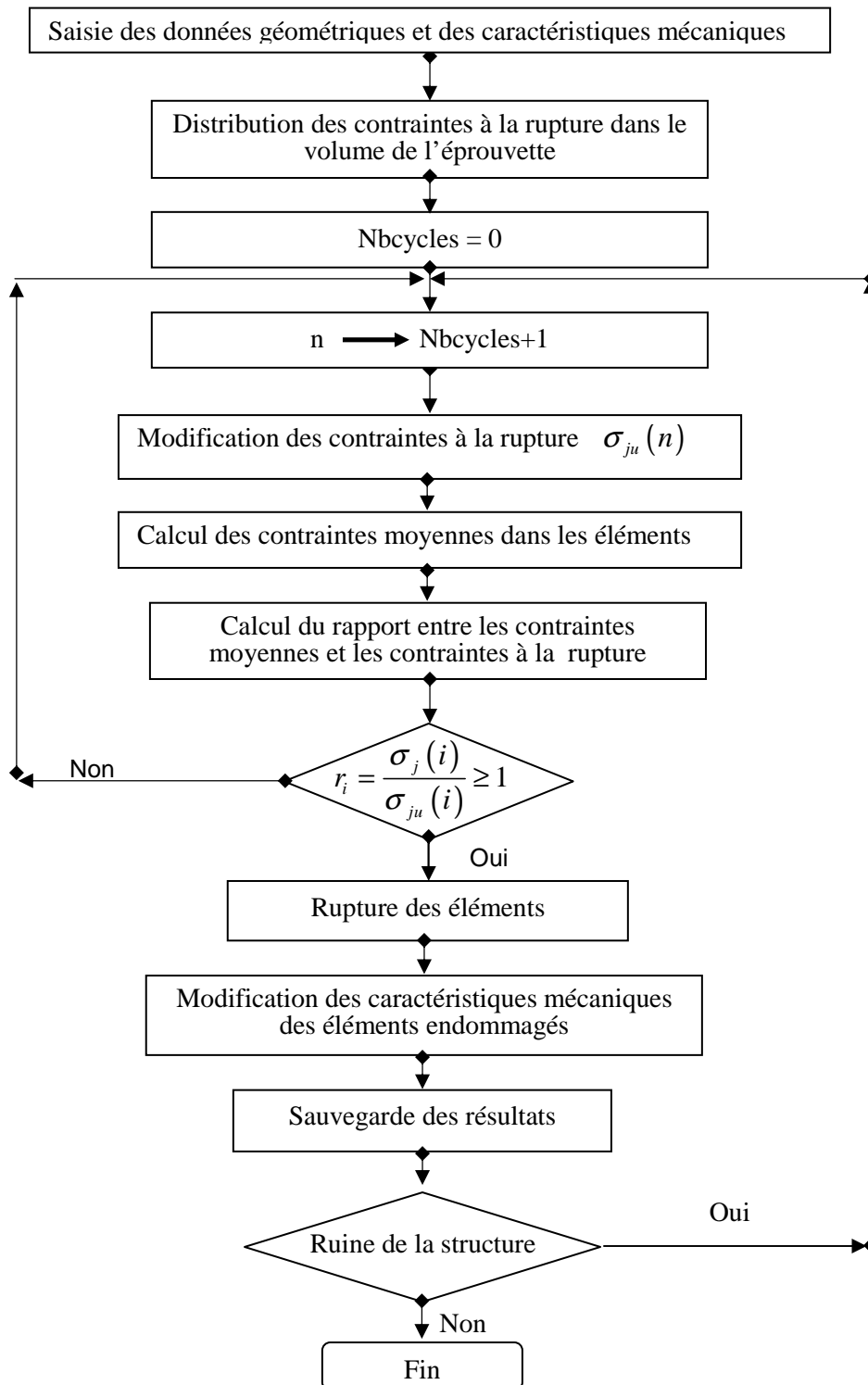


FIG. 5 – Algorithme de la procédure d'analyse de la progression de l'endommagement

3.3 Résultats obtenus

Pour illustrer les résultats nous avons appliqué cette procédure à un modèle numérique avec différents niveaux de chargement r_F . La Figure 6 présente des cartographies de l'évolution de l'endommagement au cours de la fatigue obtenues par éléments finis et pour un niveau de chargement de 65%. L'endommagement est initié dans la partie tendue (face inférieure) et en face de la charge de l'éprouvette dès les 100 premiers cycles. Ensuite l'endommagement se propage dans l'épaisseur et la largeur de l'éprouvette en fonction du nombre de cycles jusqu'à la rupture. Tous les éléments endommagés l'ont été suivant le même mode de rupture en traction. En effet pour une même éprouvette, en superposant les cinq couches, l'endommagement progresse de la même manière en fonction du nombre de cycles.

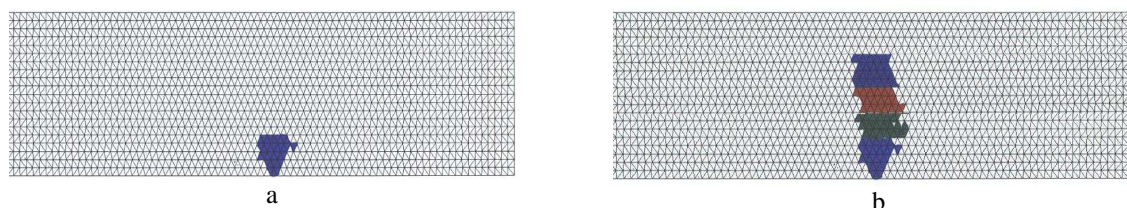


FIG. 6- Cartographie de l'éprouvette endommagée :
a) 100 cycles, b) 100000 cycles

4 Conclusions

L'objectif de ce travail était d'analyser l'endommagement des matériaux granulaires à base polymère en fatigue en utilisant la méthode des éléments finis. Cette analyse est basée sur une procédure itérative, avec variation de la contrainte à la rupture des éléments en fonction du nombre de cycle. Cette variation est obtenue à partir des résultats expérimentaux. Pour tenir compte de l'hétérogénéité du matériau, une distribution aléatoire de la contrainte à la rupture a été effectuée. Les résultats obtenus par cette analyse montrent une initiation de l'endommagement dans la face tendue, puis une progression dans l'épaisseur et la largeur de l'éprouvette. Cet endommagement est relativement localisé au cours de la fatigue. Associée à l'émission acoustique, il pourrait permettre d'identifier et localiser plus finement les mécanismes d'endommagement élémentaires les plus critiques qui conduisent à la rupture, dans une perspective d'estimation de la durée de vie restante du matériau.

Références

- Clark S. D., Sheno R. A. et Allen H. G., 1999 Modelling the fatigue behaviour of sandwich beams under monotonic, 2 step and block loading regimes , *Composites Science and Technology*, **59**, pp. 471-486.
- El Mahi A., Khawar Farooq M., Sahraoui S. et Bezazi A., 2004. Modelling the flexural behaviour of sandwich composite materials under cyclic fatigue , *Materials & Design*, **25**, pp.199-208.
- Hwang W. et Han K.S., 1986. Fatigue modulus concept and life prediction, *J Compos Mater*, v.13, **20**, pp154-65.
- Reynouard J.-M. et Pijaudier C., 2005. Comportement mécanique du béton, *édition Lavoisier*.
- Diouf B. 2005. Analyse statistique de l'évolution de l'endommagement dans des matériaux hétérogènes, *Thèse université du maine*.
- Berthelot J.-M. 1999. Matériaux composites. Comportement mécanique et analyse des structures, *édition TEC et DOC*, 3^{ème} édition.