

---

# Modélisation de l'endommagement des structures en béton armé par des éléments finis multicouches

**KHEBIZI Mourad<sup>1</sup>, GUENFOUD Hamza<sup>2</sup>, GUENFOUD Mohamed<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Département de génie civil, Université des frères Mentouri, Constantine, Algérie. Email : [Mourad\\_gc@yahoo.fr](mailto:Mourad_gc@yahoo.fr)*

<sup>2</sup> *Laboratoire de génie civil d'hydraulique LGCH, Université 8 Mai 1945, Guelma, Algérie.*

---

*RÉSUMÉ. Une Modélisation bidimensionnelle par éléments finis multicouches du comportement non-linéaire des structures en béton armé sous charge monotone et cyclique est présentée. La non linéarité matérielle est caractérisée par plusieurs phénomènes tels que : la non-linéarité physique des matériaux béton et acier, le comportement du béton fissuré, l'effet d'interaction entre les matériaux représentée par le domaine post-fissuration. Ces paramètres sont pris en considération dans cet article pour examiner la réponse des structures en béton armé à comportement non linéaire. Quatre exemples d'applications sont présentés. Les résultats numériques obtenus, sont en concordance très favorable avec ceux obtenus par l'expérience et d'autres modèles numériques de la littérature.*

*ABSTRACT. A two-dimensional multi-layered finite elements modeling of reinforced concrete structures at non-linear behaviour under monotonic and cyclical loading is presented. The non-linearity material is characterized by several phenomena such as: the physical non-linearity of the concrete and steels materials, the behaviour of cracked concrete and the interaction effect between materials represented by the post-cracking field. These parameters are taken into consideration in this paper to examine the response of the reinforced concrete structures at the non-linear behaviour. Two examples of application are presented. The numerical results obtained, are in a very good agreement with available experimental data and other numerical models of the literature.*

*MOTS-CLÉS : modélisation, endommagement, béton armé, éléments finis multicouches, non-linéaire, modèle unilatéral.*

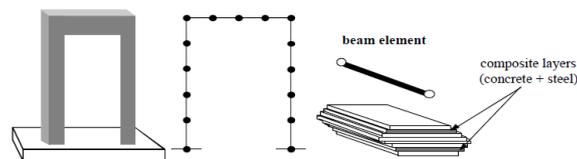
*KEYWORDS: modelling; Damage, reinforced concrete; multi-layer elements; non-linear behaviour; unilateral model.*

---

## 1. Introduction

La réponse d'une structure sous un chargement résulte d'une forte interaction entre les effets des matériaux (non-linéarités locales), les effets de géométries des structures (géométrie, répartition des forces et des raideurs, liaisons) et l'effet d'environnement (interaction sol-structure). Les non-linéarités locales sont notamment liées à la formation, à l'ouverture et la refermeture des fissures d'une part, à la liaison et au comportement des armatures (plastification des aciers) d'autre part. Une bonne description de ces phénomènes est un passage obligé si l'on veut représenter les variations des raideurs de la structure et suivre le comportement jusqu'à la ruine.

Dans cet article nous présentons une méthode de modélisation numérique des structures planes (2D) en béton armé sous chargement statique et cyclique, elle utilise des éléments poutres de type multicouches dont la matrice de raideur est calculée à l'aide d'une discrétisation de la poutre selon la hauteur en couches successives superposées (figure 1). La sommation de ces couches permet le calcul de la raideur d'une manière correcte et la prise en compte des variations du comportement. L'hypothèse cinématique de Bernoulli confère aux différentes couches un comportement uniaxial [KOT 00]. Ceci permet de traiter les comportements locaux à travers des lois uniaxiales, pour le béton et l'acier, attribuées à chaque couche. Le calcul des efforts anélastiques s'effectue grâce à une méthode d'itération basée sur la raideur sécante initiale [RAG 06]. Un traitement particulier est réservé aux couches comprenant simultanément du béton et d'acier. Le comportement des couches mixtes est homogénéisé par la loi de mélange permettant ainsi de calculer la contrainte de la couche au prorata de chaque matériau [KEB 15]. L'adhérence acier- béton est supposée parfaite (déformation identique sur les deux matériaux à leur frontière).



**Figure 1.** *Discretisation principale of reinforced concrete structures with multi-layered beam.*

## 2. Modèle d'endommagement pour le béton

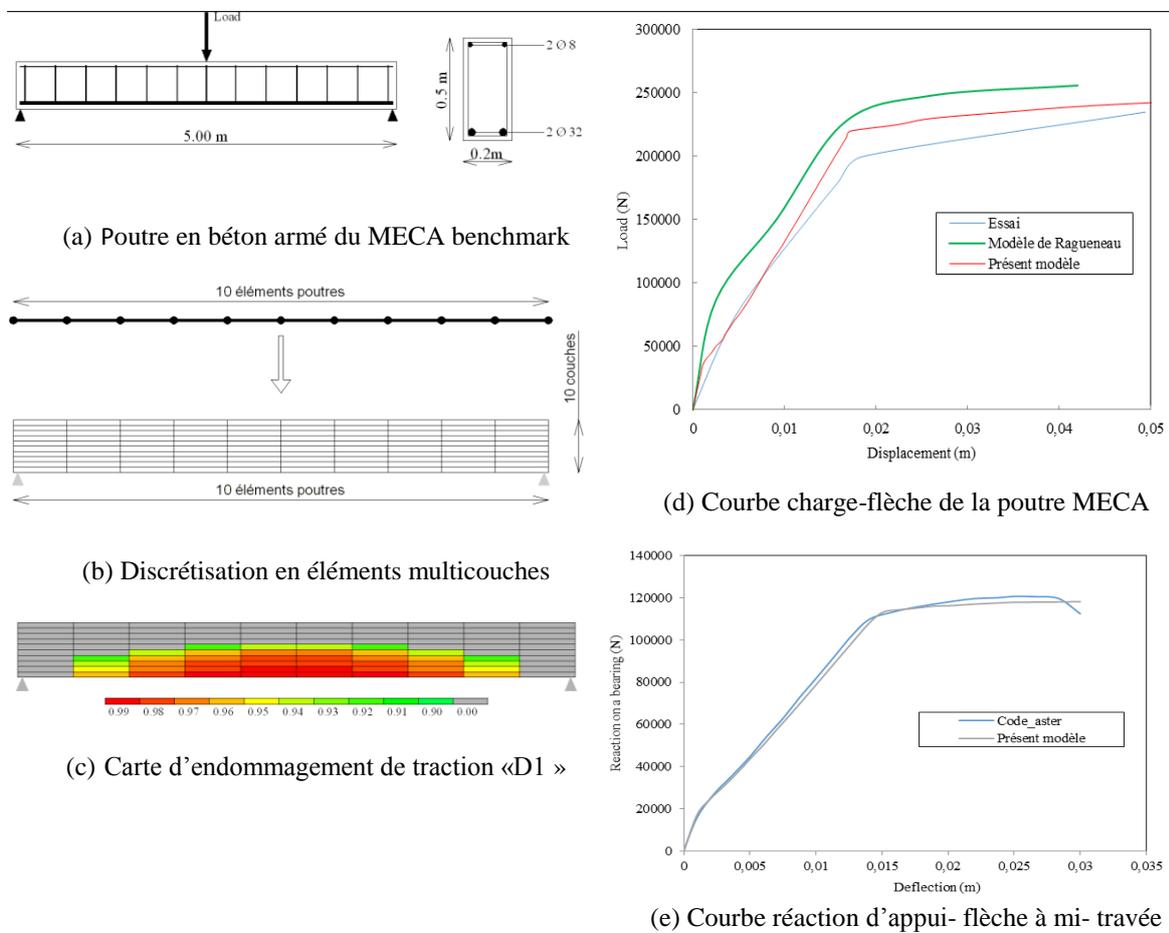
Le comportement du béton est décrit dans cet article par le modèle unilatéral de Laborderie [LAB 91], il est adapté à la description du comportement endommageable généré par la création de microfissures (abaissement des raideurs) et le fonctionnement lié, au cours de cycles, à leur refermeture. Deux variables d'endommagement scalaire sont utilisées, l'une en traction  $D1$ , l'autre en compression  $D2$ , agissant sur la rigidité des matériaux et générant des déformations permanentes.

## 3. Applications

### 3.1. Modélisation d'une poutre en béton armé (Benchmark MECA [GHA 01])

Dans cette section nous utilisons des éléments finis multicouches pour modéliser la poutre MECA [GHA 01]. La géométrie et les conditions de chargement sont présentées dans la figure 2.a. Vu son élancement, cette structure se comporte comme une poutre dominée par la flexion. L'influence du cisaillement est négligeable et une modélisation de type poutre multicouche de Bernoulli, avec lois de comportement uniaxial pour le béton et l'acier, est suffisante [KOT 00]. Le comportement du béton suit le modèle d'endommagement de Laborderie [LAB 91], les caractéristiques mécaniques considérées pour le béton et l'acier sont présentées dans [KHE 15]. Dans ce travail nous avons modélisé la structure par 10 éléments poutres à 2 nœuds avec 2 points d'intégration, la section de chaque élément est discrétisée par 10 couches superposées, dont 8 en béton seul et 2 comprenant simultanément du béton et de l'acier (figure 2.b). Ragueneau [RAG 06] a été étudié numériquement (3D) la réponse de la même poutre. La figure 2.d représente une comparaison entre les résultats obtenus par notre simulation numérique, ceux de Ragueneau [RAG 06] et les résultats expérimentaux extraits obtenus lors du benchmark MECA [GHA 01]. Nous voyons que notre modélisation donne dans l'ensemble des résultats comparables avec ceux Ragueneau [RAG 06] d'une part et les résultats expérimentaux d'autre part. Cependant, les légères différences entre les résultats peuvent être imputables à un effet de maillage de la section de la poutre.

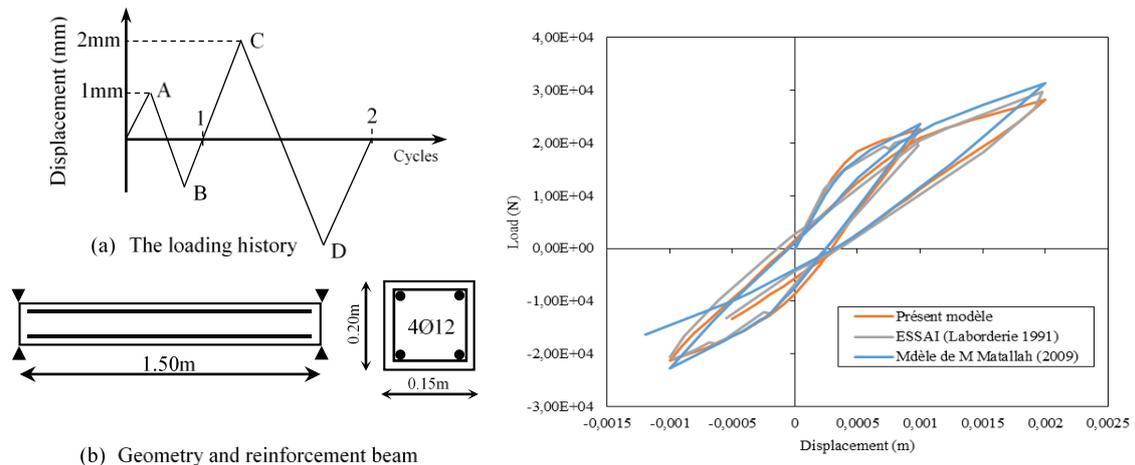
La figure 2.c représente la carte d'endommagement de traction obtenue par la présente modélisation, cet endommagement est localisé au milieu de la fibre inférieure de la poutre, et se propage tout le long de celle-ci.



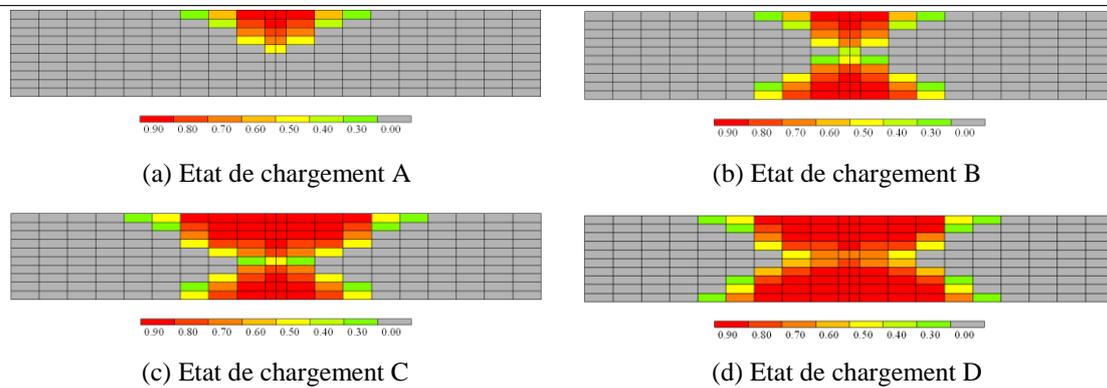
**Figure 2.** Poutre en béton armé du MECA benchmark.

### 3.2. Modélisation de la réponse cyclique d'une poutre en béton armé

On va modéliser maintenant le comportement cyclique d'une poutre en béton armé dont la géométrie est présentée dans la figure 3.b. Le chargement est composé de deux cycles (figure 3.a). La structure est modélisée dans ce travail par 20 éléments poutres à 2 nœuds et 2 points d'intégration, la section de chaque élément est discrétisée par 10 couches superposées, dont 8 en béton seul et 2 comprenant simultanément du béton et de l'acier. Le comportement du béton suit la loi d'endommagement de Laborderie [LAB 91], les caractéristiques mécaniques considérées pour le béton et l'acier sont présentées dans [KHE 15].



**Figure 3.** Géométrie de la poutre, histoire de chargement et réponse charge-flèche de la poutre.



**Figure 4.** Carte d'endommagement de traction «D1 » pour le premier et le deuxième cycle de chargement.

La figure 3.c compare la réponse de la poutre décrite par notre modélisation et celle obtenue expérimentalement par Laborderie [LAB 91], on remarque une très bonne cohérence entre les deux réponses. La figure 3.c présente également une comparaison de la réponse force-flèche décrite par notre simulation et celle de Matallah [MAT 09] obtenue par un modèle de comportement basé sur le couplage de l'endommagement et le l'anélasticité. Les deux modèles numériques donnent des résultats similaires dans le premier cycle du chargement. Cependant, pour le deuxième cycle de chargement, des légères différences sont observées. Les figures 4.a et 4.b présentent la carte d'endommagement de la poutre pour le premier cycle de chargement. A l'état de chargement « A » la partie supérieure de la poutre est endommagée (figure 4.a). L'état de chargement « B » correspond à un chargement opposé, l'état d'endommagement initialement produit est toujours conservé en mémoire alors qu'un nouveau état d'endommagement se crée dans la partie inférieure de la poutre (figure 4.b). Les figures 4.c et 4.d présentent la carte d'endommagement de la poutre au cours du deuxième cycle de chargement.

#### 4. Conclusion

Une modélisation simple du comportement non linéaire des structures en béton armé est présentée. Elle utilise des éléments poutres multicouches obéissant à l'hypothèse de Bernoulli pour conférer aux différentes couches un comportement uniaxial. Elle permet également la description de l'état d'endommagement des structures au cours d'un chargement. Deux exemples d'applications ont été présentés. Le premier est celui d'une poutre soumise à une flexion 03 points (Benchmark MECA), et le deuxième est celui d'une poutre soumise à une flexion cyclique. A la lumière de ces exemples nous avons constaté une très bonne cohérence et concordance entre les résultats de nos simulations et l'expérimentation d'une part et ceux d'autres modèles numériques de la littérature d'autre part. Nous avons constaté aussi, si le matériau est déchargé après avoir subi un état d'endommagement, il restaure sa raideur, les fissures précédemment ouvertes se referment mais la structure interne du matériau reste toujours endommagée.

#### 5. Bibliographie

- [GHA 01] GHAVAMIAN S., Three-dimensional nonlinear constitutive models of fractured concrete. Evaluation-Comparison-Adaptation, MECA project benchmark, Edited by EDF R&D, 2001.
- [KHE 14] KHEBIZI M., GUENFOUD H., GUENFOUD M., Modélisation des poutres en béton arme par des éléments Multicouches. *Courrier du Savoir*, N°18, 2014, p. 111-115.
- [KHE 15] KHEBIZI M., GUENFOUD M., Numerical modelling of the damaging behaviour of the reinforced concrete structures by multi-layers beams elements, *Computers and Concrete*, Vol. 15, n°4, 2015, p. 547-562.
- [KOT 00] KOTRONIS P., Cisaillement dynamique de murs en béton armé. Modèles simplifiés 2D et 3D. Thèse de Doctorat, Ecole normale supérieure de Cachan, Cachan, 2000.
- [KOT 05] KOTRONIS P., RAGUENEAU F., MAZARS J., A simplified modelling strategy for R/C walls satisfying PS92 and EC8design, *Engineering Structures*, 27, 2005, p. 1197-1208.
- [LAB 03] LABORDERIE C., Stratégies et Modèles de Calculs pour les Structures en Béton. Thèse d'habilitation à diriger les recherches, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2003.

- 
- [LAB 91] LABORDERIE C., Phénomènes unilatéraux dans un matériau endommageable : modélisation et application à l'analyse des structures en béton, Thèse de doctorat, Université Paris 6, 1991.
- [MAT 09] MATALLAH M., LABORDERIE C., Inelasticity–damage-based model for numerical modeling of concrete cracking, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.76, 2009, p. 1087-1108.
- [RAG 06] RAGUENEAU F., Comportements endommageants des matériaux et des structures en béton armé. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, 2006.