
Effet d'échelle sur la courbe-R des matériaux quasi-fragiles : Investigations à l'échelle mésoscopique

N. Aissaoui¹, M. Matallah^{1*}

¹ RISAM Université de Tlemcen, BP 230, Algeria (*)mohammed.matallah@gmail.com

RÉSUMÉ. Dans cette contribution, l'effet d'échelle sur la courbe-R est investi en utilisant une approche mésoscopique. Les deux paramètres clefs de la courbe-R (l'extension de la fissure et l'énergie de fissuration) sont déterminés numériquement. Les longueurs des extensions sont calculées à partir des longueurs de la FPZ. Une fois l'incrément de fissure évalué, l'énergie de fissuration est estimée à la pointe de la fissure. Les simulations numériques sont réalisées sur des poutres en béton testées expérimentalement en flexion 3 points. Les courbes-R obtenues montrent l'existence d'un effet d'échelle sur la partie ascendante.

ABSTRACT. In this paper, the size-effect on the R-curve is investigated using a mesoscopic approach. The two parameters of the R-curve: the crack extension and the energy release rate are determined numerically. The crack extensions are calculated from the FPZ length. Once the crack extension is assessed, the energy release rate is estimated at the tip of the crack. Numerical simulations are carried out on concrete beams tested experimentally under 3-point bending. The numerical curves obtained show a size-dependency of the R-Curve in the rising part.

MOTS-CLÉS : Courbe-R, Effet d'échelle, Approche mésoscopique.

KEYWORDS: R-curve, Size effect, Mesoscopic approach.

1. Introduction

Il est aujourd'hui communément admis que la mécanique linéaire de la rupture (MLER) ne peut pas décrire le comportement à la rupture des matériaux quasi-fragiles à cause (en partie) de l'existence d'une zone principalement microfissurée devant la pointe de la fissure appelée *Fracture Process Zone*. Pour le matériau béton, la taille de cette zone est plus au moins considérable comparée à la taille des spécimens. La FPZ est un lieu de redistribution de contraintes. Le transfert des contraintes est dû à différents mécanismes de durcissement qui se manifestent dans la FPZ. Ce transfert de contraintes à travers les lèvres de la fissure est un phénomène dissipatif. Une fois toute l'énergie stockée libérée, la fissure se trouve dans un *état libre* et une fissure macroscopique est alors amorcée et continue à se propager d'une manière *stationnaire*. La redistribution des contraintes et les phénomènes de libération d'énergie associés à la propagation des fissures ou plus généralement au développement de la FPZ, provoquent des phénomènes complexes tels que les effets d'échelle. De ce point de vue, l'effet d'échelle est considéré comme un phénomène énergétique [BAZ 84].

L'existence de la FPZ est à l'origine de la non-linéarité du processus de propagation de fissuration. En effet, l'énergie dissipée dépend de l'extension de la fissure. L'évolution de l'énergie dissipée en fonction de l'extension de la fissure est représentée par la courbe-R (Courbe de résistance), une courbe qui décrit la résistance à l'extension de la fissure. Cette résistance peut aussi être exprimée en fonction de la ténacité (Facteur d'intensité..).

Le but principal de ce travail est d'investiguer l'existence d'un effet d'échelle sur la courbe-R en utilisant une approche numérique conduite à l'échelle mésoscopique. La longueur de l'extension de la fissuration est liée à la longueur de la FPZ. Cette longueur est estimée numériquement selon l'approche proposée par les auteurs dans [AIS17]. Quant à l'énergie dissipée, elle est estimée localement au niveau des fronts de fissures une fois l'extension évaluée. La modélisation mésoscopique est utilisée, car elle permet de reproduire l'effet d'échelle global (sur la contrainte nominale). Les courbes Force-Déplacements (ou Force-CMOD) sont bien reproduites. Ceci est la conséquence d'un processus de dissipation d'énergie correctement décrit à l'échelle locale. Le travail se base sur des résultats de poutres en flexion trois-points testés expérimentalement dans [GRE 13]. Les courbes-R de différentes poutres testées sont tracées afin de discuter l'existence d'un effet d'échelle sur cette caractéristique appelée R-curve.

2. Construction de la courbe de résistance

Pour la construction des courbes-R, deux paramètres doivent être déterminés à chaque instant du processus de fracturation de la poutre: l'énergie de rupture et l'extension de la fissure. Les deux principales étapes pour la construction d'une telle courbe sont décrites ci-dessous

2.1. Extension de la fissure

Pour calculer l'extension de la fissure, on s'inspire du concept de la Mécanique Linéaire de la Rupture Equivalente (MLER). Selon ce concept, toute diminution de la complaisance (où raideur) apparente du spécimen sera accompagnée de la propagation d'une fissure élastique équivalente. Un élément parfaitement élastique possédant cette fissure équivalente a la même complaisance (ou raideur) que le spécimen réel possédant une FPZ. La pointe de cette fissure n'est pas située à la pointe de la FPZ, mais à une certaine distance telle que $a_{eq} = a_0 + \Delta a$ avec a_0 est la longueur de fissure initiale et Δa est l'incrément de fissure élastique équivalente [BAZ90].

Les courbes Force-Déplacements sont d'abord reproduites par une modélisation mésoscopique. On cherche le point correspondant au développement total de la FPZ. Ce point correspond à une fissure *libérée*. Ainsi, la raideur correspondant à cet état est évaluée. L'étape suivante consiste à chercher, en re-simulant la rupture des poutres avec des extensions différentes, la même raideur évaluée précédemment. Cette procédure peut être automatisée en utilisant une approche par analyse inverse [MAT13] (Figure 1. (a)).

La longueur de la fissure équivalente estimée numériquement est approximativement égale à $\left(a_{eq, Num} = a_0 + \frac{L_{FPZ}}{2} \right)$ pour toutes les tailles de poutres. Donc l'extension de la fissure est donnée par $\Delta a = \frac{L_{FPZ}}{2}$.

Ce rapport est proche de celui trouvé par les auteurs dans [AIS17] où la longueur de la FPZ estimée numériquement en suivant l'évolution de la contrainte tangentielle le long de la fissure a été comparée à l'extension de la fissure proposée par Bazant [BAZ90]. Selon cette approche, la longueur de la FPZ étant la longueur entre la contrainte à la pointe de la fissure (égale à la résistance à la traction f_t) et la pointe initiale ou la contrainte devient nulle (Figure 1 (b)).

Ce rapport trouvé correspond à un état de FPZ totalement ouverte. Le même rapport est adopté pour calculer les extensions progressives à chaque pas. Cela suppose une variation linéaire entre la longueur de la FPZ et la longueur de l'extension. Cette variation linéaire a déjà été constatée par Morel et al [MOR11], en utilisant un modèle cohésif.

3. Taux de restitution d'énergie

Les simulations numériques sont réalisées en utilisant un modèle d'endommagement isotrope régularisé. La régularisation énergétique permet d'adapter la forme de la loi de comportement de chaque élément en fixant son énergie dissipée. Ainsi, pour déterminer les courbes-R, l'énergie relâchée à chaque extension est calculée pour le premier élément fini fissuré situé à la pointe de l'extension déjà calculée lors de la première étape en utilisant l'expression suivante.

$$G_f = h * \left(\int_0^{\infty} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \right) \quad [1]$$

Avec h la taille de l'élément fini.

La figure1 (c) et (d) montrent les courbes-R des deux poutres entaillées (200 et 400 mm) avec un rapport $\alpha=0.2$ nommée ici FN. L'évolution de l'énergie de dissipation G_f est tracée en fonction de l'extension de fissure équivalente Δa durant tout le processus de calcul.

Les courbes-R trouvées numériquement montrent clairement une première partie ascendante relative au développement du processus de rupture dans laquelle G_f augmente jusqu'à atteindre une valeur plateau. La seconde phase correspond à une propagation instable de la fissure où G_f atteint sa valeur critique (égale à l'énergie de rupture introduite dans les simulations (Figure1 (a) et (b)).

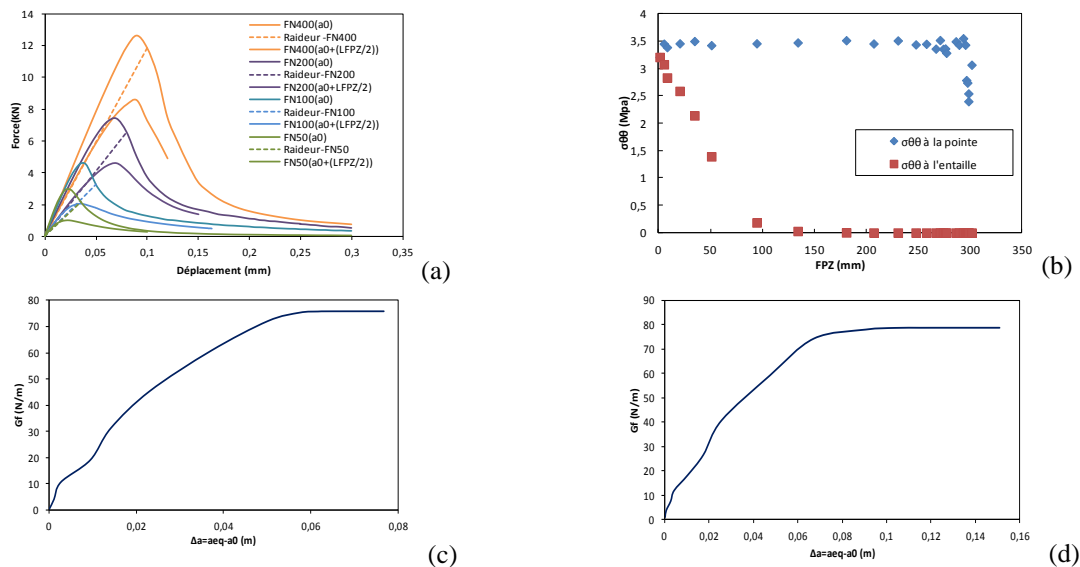


Figure 1. Résultats numériques: (a) Détermination de l'extension de la fissure, (b) Longueur de la FPZ selon le principe de l'évolution de $\sigma_{\theta\theta}$ (D=400mm), (c) et (d) Courbe-R pour D=200mm et 400mm.

Le tableau 1. résume les principaux résultats trouvés.

Tableau 1. Paramètres de rupture à partir de la courbe-R.

Hauteur poutre FN (mm)	G_{Rc} (N / m)	Δa_c (mm)	$l_{FPZ} = 2 \times \Delta a_c$ (mm)
50	68	17	33
100	68,45	28	56
200	72	50	100
400	74	67	134

4. Effet d'échelle sur la courbe-R

La figure 2 montre les résultats des courbes-R obtenues numériquement pour les différentes poutres ($D=50,100,200,400$ mm) avec un rapport d'entaille $\alpha=0.2$. Les résultats montrent que la partie ascendante des courbes-R a une forme concave reflétant une variation de la ténacité du matériau béton lors du processus de fissuration. La partie ascendante est dépendante de la hauteur des poutres. On constate dans cette première phase que le développement de la FPZ engendre un écart considérable dans l'énergie de dissipation. L'existence de la FPZ est responsable de l'évolution non-linéaire de l'énergie dissipée en fonction de l'extension de la fissure. Dans la seconde phase, les courbes-R s'approchent d'une même valeur plateau notée G_{Rc} pour laquelle les énergies de rupture deviennent constantes annonçant la phase de propagation instable. Cependant, pour la plus petite dimension de poutre (50mm), la courbe-R ne respecte pas la forme classique obtenue pour les autres poutres. Ceci peut s'expliquer par un confinement non négligeable de la FPZ. Cette constatation a déjà été soulignée dans [MOR 11].

Les résultats de l'étude numérique à l'échelle mésoscopique révèlent un effet d'échelle significatif sur la partie ascendante des courbes-R.

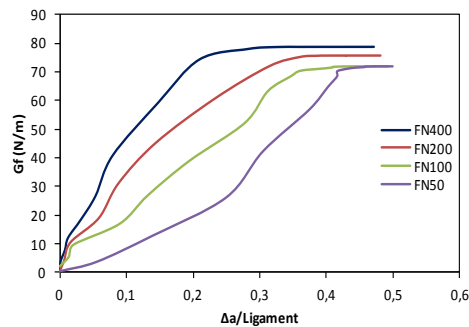


Figure 2. Effet d'échelle sur la courbe-R.

5. Conclusion

Dans cette étude, les courbes-R des poutres homothétiques entaillées sont déterminées numériquement en se basant sur une approche mésoscopique. Les deux paramètres de la courbe-R, ie, l'extension de la fissure et l'énergie de fissuration sont évaluées numériquement. Les extensions progressives sont déterminées à partir de la longueur de la FPZ. Les résultats numériques montrent l'existence d'un effet d'échelle sur les courbes-R. D'autres investigations sont nécessaires pour disséquer le rôle du confinement.

6. Bibliographie

- [AIS 17] AISSAOUI N., MATALLAH M., «Numerical and analytical investigation of the size-dependency of the FPZ length in concrete», *International Journal of Fracture*. Doi:10.1007/s10704-017-0186-200
- [BAZ 84] BAZANT ZP., «Size Effect in blunt fracture: concrete, rock, metal», *Journal of engineering Mechanics*, vol. 110, n° 4, 1984, p. 518-535
- [BAZ 90] BAZANT ZP., KAZEMI MT., «Determination of fracture energy, process zone length and brittleness number from size effect, with application to rock and concrete» *International Journal of Fracture*, vol. 44, 1990, p. 111-131.
- [GRE 13] GREROIRE D., ROJAS SOLANO LB., PIJAUDIER-CABOT G., «Failure and size effect for notched and unnotched concrete beams», *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 37, n° 10, 2013, p. 1434-1452.
- [MAT13] MATALLAH M., FARAH M., GRONDIN F., LOUKILI A., ROSIERE E., «Size-independent fracture energy of concrete at very early ages by inverse analysis», *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 109, 2013, p. 1-16.
- [MOR 11] MOREL S., DOURADO N., «Size effect in quasibrittle failure: Analytical model and numerical simulations using cohesive zone model», *International Journal of Solids and Structures*, vol. 48, n° 10, 2011, p. 1403–1412.