



HAL
open science

Estimation des propriétés de rupture des matériaux quasifragiles béton et mortier : essais de rupture par Wedge Splitting Test

Alexandre Gangnant, Stéphane Morel

► **To cite this version:**

Alexandre Gangnant, Stéphane Morel. Estimation des propriétés de rupture des matériaux quasifragiles béton et mortier : essais de rupture par Wedge Splitting Test. 31ème rencontres universitaires de l'AUGC (AUGC 2013), May 2013, Cachan, France. hal-01528940

HAL Id: hal-01528940

<https://hal.science/hal-01528940v1>

Submitted on 30 May 2017

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.

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/279930129>

Estimation des propriétés de rupture des matériaux quasifragiles béton et mortier : essais de rupture par Wedge Splitting Test

Conference Paper · May 2013

CITATIONS

0

READS

62

2 authors:



Alexandre Gangnant

Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bord...

8 PUBLICATIONS 0 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Stéphane Morel

University of Bordeaux

68 PUBLICATIONS 660 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



quasi-brittleness of wood [View project](#)



glued in rod [View project](#)

Estimation des propriétés de rupture des matériaux quasifragiles béton et mortier : essais de rupture par Wedge Splitting Test

A. Gangnant¹, S. Morel²

¹ alexandre.gangnant@etu.u-bordeaux1.fr

² s.morel@i2m.u-bordeaux1.fr

RÉSUMÉ. Les bétons et mortiers présentent une rupture qualifiée de quasifragile du fait de la présence d'une large zone d'élaboration (FPZ), principalement microfissurée, se développant en avant du front de fissure. Dans cette étude, on se propose d'estimer les propriétés de rupture de ces deux matériaux à partir d'un essai de fissuration en Mode I provoquée par enfoncement d'un coin (Wedge Splitting Test). La Mécanique Linéaire Élastique de la Rupture équivalente (MLER eq.) est ici utilisée afin d'estimer les courbes de résistance à la propagation de fissure (courbes-R) de ces deux matériaux. Sur la base de ces courbes de résistance, la rupture quasifragile est simulée à partir du Modèle de Zone Cohésif (MZC). Les différents paramètres cohésifs (énergie de rupture cohésive, ouverture critique, résistance à la traction, et répartition de l'énergie de rupture cohésive entre microfissuration et pontage de fissure) sont estimés sur la base des relations entre courbe de résistance et comportement adoucissant (approximation bilinéaire).

ABSTRACT. Concrete and mortar exhibit a quasibrittle failure due to the existence of a large fracture process zone (FPZ), mainly microcracked, which develops ahead of the crack front. In this study, the fracture properties of concrete and mortar are estimated from a mode I fracture test: Wedge Splitting Test. Within the framework of equivalent Linear Elastic Fracture Mechanics (eq. LEFM), resistance curves (R-curves) of concrete and mortars are estimated. Then, on this basis, the quasibrittle failure is simulated from the Cohesive Zone Model (CZM). The cohesive parameters (cohesive fracture energy, critical opening, tensile strength, and energy distribution between microcracking and crack bridging cohesive phenomena) are estimated from the connections between the R-curve characteristics and the softening behaviour (bilinear approximation).

MOTS-CLÉS: Rupture quasifragile, zone d'élaboration, MLEReq, Courbe-R, MZC, WST

KEY WORDS: Quasibrittle failure, FPZ, eq. LEFM, R-curve, CZM, WST

1. Introduction

La rupture des matériaux à matrice cimentaire comme les bétons et mortiers est considérée comme quasifragile du fait de la présence d'une zone endommagée, principalement microfissurée, se développant en avant du front de fissure. L'existence de cette zone d'élaboration de la rupture, encore appelée *fracture process zone* en anglais (FPZ), rend impossible l'application de la mécanique linéaire élastique de la rupture (MLER). En revanche, une approximation du comportement quasifragile est possible en utilisant la MLER équivalente. A partir d'un milieu considéré comme parfaitement élastique, cette approche utilise, en lieu et place de la fissure principale et de sa zone d'élaboration, une longueur de fissure élastique équivalente permettant l'obtention d'une raideur identique à celle constatée expérimentalement. Dans cette étude, il est proposé d'utiliser la MLER équivalente afin d'estimer les propriétés de rupture d'un béton et d'un mortier par le biais de courbes de résistance (courbes-R) et ce à partir d'un essai par enfoncement d'un coin (Wedge Splitting Test : WST). Sur la base de ces courbes-R, décrivant la résistance que le matériau oppose à la propagation de la fissure élastique équivalente en fonction de l'avancée de cette dernière, le modèle de zone cohésive est utilisé pour décrire la rupture quasifragile du béton et du mortier et la méthode employée pour estimer les différents paramètres cohésifs est détaillée.

2. Wedge Splitting Test

Les essais de rupture en mode d'ouverture de fissure (mode I) du béton et du mortier sont effectués sur la base de l'essai dit Wedge Splitting Test.

2.1. Géométrie et propriétés des échantillons

Dix éprouvettes de mortier et douze éprouvettes de béton ont été réalisées et testées à 42 jours. Les dimensions des éprouvettes sont les suivantes : 300x250x100 (mm³). Chaque échantillon présente une entaille initiale de 90mm de long et de 4mm d'épaisseur. Une gorge de 30 mm de profondeur accueillera le système de roulement. Il est à noter que la hauteur caractéristique D du spécimen correspond à 285 mm. Le diamètre maximal des granulats pour le béton est de 16mm et de 5mm pour le mortier. Le ciment utilisé est un CEMII 32.5R pour un rapport E/C= 0.5.

2.2. Principes et instrumentations

Un coin présentant un demi-angle de $\alpha=15^\circ$ [TSC 95] est positionné au niveau d'une gorge préexistante à l'aide d'un système de roulement et provoque par enfoncement l'ouverture δ d'un spécimen pré-fissuré en mode I. L'essai se fait par un déplacement imposé de la traverse de 0.15mm/min permettant d'obtenir la rupture complète du spécimen en quelques minutes (4 à 5 minutes) et ainsi de

s'affranchir d'un éventuel comportement viscoélastique. La force verticale P_v de compression de la presse électromécanique est vectoriellement divisée en une force transversale d'ouverture du spécimen P_{sp} qui dépend de l'angle α . Il est considéré, dans les conditions de cet essai que les forces de frottement f dues aux roulements sont négligeables ce qui donne $P_{sp}=1.866P_v$ [1].

$$P_{sp} = \frac{P_v}{2 \tan \alpha} = \frac{P_v}{2 \tan(15)} = 1.866 P_v \quad [1]$$

L'éprouvette est placée sur un appui de type rotule. L'ouverture du spécimen δ et la force verticale P_v sont respectivement mesurées par des capteurs LVDT et un dynamomètre (Figure 1. *Montage d'un essai WS*).

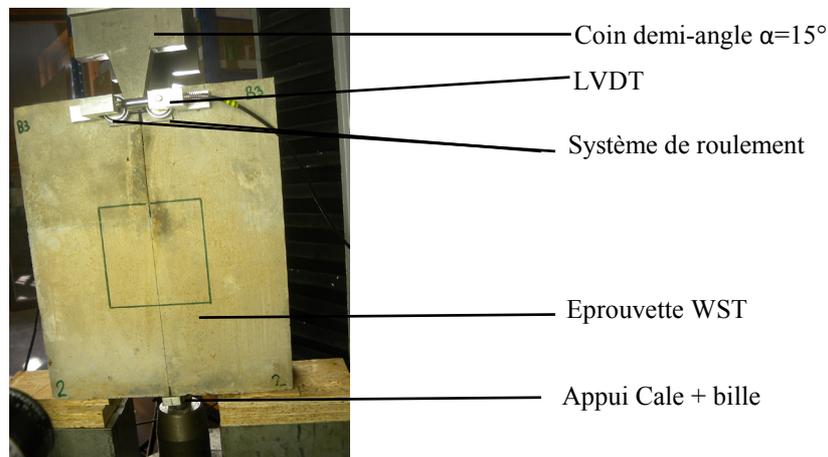


Figure 1. *Montage d'un essai WS*

On constate à partir des courbes $F_{sp}-\delta$ que la partie pré-pic correspond à la phase de développement de l'endommagement (pas de fissure apparente). Tandis que la partie post-pic est associée à la propagation de la fissure principale.

3. Estimation des propriétés de rupture

3.1. Applicabilité de la MLER équivalente : cycles charge/endommagement-propagation/décharge

Afin de vérifier l'applicabilité de la MLER équivalente [BAZ 97, MOR 05] des cycles charge/endommagement-propagation/décharge à déplacement imposé d'une éprouvette en béton ont été effectués. La méthode de la MLER eq. est applicable dès

que pour un cycle charge-décharge donné, la complaisance initiale du cycle passe par le point de décharge du cycle précédent (point à partir duquel le déplacement diminue). En conséquence, en tout point d'une courbe force-déplacement, la complaisance apparente du spécimen, i.e., $\lambda = \delta/P$ correspond à la complaisance élastique de ce dernier (Figure 2.b). Ainsi, l'augmentation de la complaisance apparente du spécimen pourra être traduite par la propagation d'une fissure élastique équivalente, i.e., une fissure qui, dans un modèle élastique, produira la même complaisance que celle constatée expérimentalement c'est à dire celle due à la fissure principale avec sa zone d'élaboration.

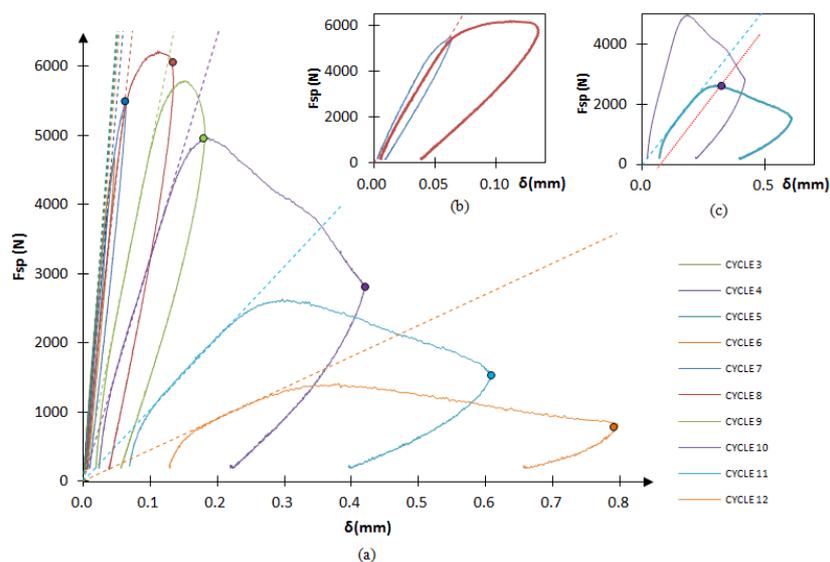


Figure 2. (a) Cycles charge-décharge du béton. (b) MLER eq. applicable dans le pré-pic. (c) MLER eq. non applicable dans le post-pic.

Toutefois, comme le montre la Figure 2 si la complaisance apparente correspond à la complaisance élastique dans la partie pré-pic, il n'en est pas de même dans la partie post-pic. En effet, dans le post-pic, l'évolution de la complaisance élastique du spécimen ne peut à elle seule traduire le déplacement constaté pour une force donnée. L'hypothèse énoncée ici est, qu'en plus du processus de rupture quasifragile, un phénomène de type plasticité se manifeste se traduisant par des déplacements irréversibles venant s'ajouter à ceux dus à l'évolution de la complaisance élastique du spécimen. La MLER eq. semble donc uniquement applicable dans la partie pré-pic et au tout début du post-pic.

3.2. Calcul de la longueur de fissure élastique équivalente

Dans le cadre de la MLER eq., une analyse par éléments finis en élasticité linéaire à été réalisée afin de déterminer les polynômes de complaisance des spécimens de mortier et de béton. L'analyse numérique se fait en 2D pour un chargement unitaire en considérant un incrément de fissure tous les millimètres. Il a été considéré des modules d'élasticité de 18 et 28 GPa pour le mortier et le béton et un coefficient de poisson identique et égal à 0.2. Après traitement des résultats EF, l'expression de l'évolution de la complaisance en fonction de la longueur relative de fissure $\alpha=a/D$ (où a est la longueur de fissure et D la hauteur caractéristique) permet d'adimensionner le problème). Les fonctions de complaisances numériques pour une épaisseur unité $\lambda_1(\alpha)$ du mortier et du béton sont est ajustées par un polynôme de degré 7. Sur la base de ces polynômes de complaisance, il sera possible d'estimer la longueur de fissure élastique équivalente correspondant à tout point de la courbe force-déplacement (processus de dichotomie) : $\lambda_{\text{exp}}(\alpha)=\delta/P = \lambda(\alpha) = \lambda_1(\alpha)/b$.

3.3. Courbe de résistance

Selon la MLER eq., toute variation de complaisance correspond à une propagation de la fissure élastique équivalente et, en conséquence, il est possible d'estimer la résistance à la propagation de fissure (élastique eq.) $G_R(a)$ à partir du taux de restitution d'énergie $G(a)$ [2]:

$$G(a) = \frac{P^2}{2b} \frac{\delta\lambda}{\delta a} = \frac{P^2}{2b} \frac{1}{D} \frac{\delta\lambda(\alpha)}{\delta\alpha} = G_R(a) \quad [2]$$

En pratique, la résistance à la propagation de la fissure [2] est déterminée en fonction de la fonction adimensionnelle du taux de restitution d'énergie notée $g(\alpha)$ [MOR 11] :

$$G_R(a) = G(a) = \frac{P^2}{E'b^2D} g(\alpha) \quad [3]$$

où

$$g(\alpha) = \frac{E'}{2} \text{cor} \frac{\partial\lambda_1(\alpha)}{\partial\alpha} \quad [4]$$

Où $\lambda(\alpha)$ est la complaisance de l'éprouvette et $\lambda_1(\alpha)$ est la complaisance déterminé à partir du modèle EF avec b la largeur du spécimen. Le coefficient de correction noté cor [5], permet d'ajuster le polynôme de complaisance numérique à la complaisance initiale expérimentale du spécimen considéré. En effet, du fait de l'existence de la zone d'élaboration et donc de l'utilisation d'une longueur de fissure élastique équivalente, la complaisance numérique peut être comparée à la complaisance expérimentale pour la seule longueur d'entaille initiale a_0 (longueur de fissure élastique équivalente égale à la longueur d'entaille expérimentale).

$$\text{avec cor} = \frac{\lambda \exp(a_0).b}{\lambda_1(a_0)} \sim \frac{E \text{num}}{E \text{exp}} \quad [5]$$

Les courbes de résistance obtenues sont vérifiées par une méthode inverse, à savoir la génération d'une courbe force-déplacement théorique à partir de la courbe de résistance calculée grâce à $g(\alpha)$.

$$P = \sqrt{\frac{Gr(\Delta a) \times E' \times b^2 \times D}{g(\alpha)}} \quad [6]$$

Dès l'obtention de la force pour une longueur de fissure donnée, il est possible d'obtenir le déplacement correspondant grâce à la complaisance suivant l'équation et de comparer la courbe force-déplacement obtenue à partir des propriétés de rupture avec une courbe force-déplacement expérimentale :

$$\delta(\alpha) = \lambda(\alpha).P_{sp}(\alpha) = \frac{\lambda_1(\alpha)}{b}.P_{sp}(\alpha) \quad [7]$$

La résistance à la propagation de fissure apparaît fonction de la longueur de fissure élastique équivalente. On parle alors de courbe de résistance ou courbe-R. Cette courbe-R présente généralement une première partie croissante associée à la phase de développement de la zone d'élaboration (pas de propagation de la fissure principale) suivie d'un plateau traduisant la propagation de la fissure principale avec sa zone d'élaboration [MOR 07](Figure 3.). Notons que la propagation à résistance constante n'est pas observée ici du fait que la fissure principale se propage dans la phase post-pic et que le MLER eq. n'est plus applicable dans ce régime du fait de la présence de phénomènes dissipatifs d'énergie autre que la fissure et l'endommagement quasifragile.

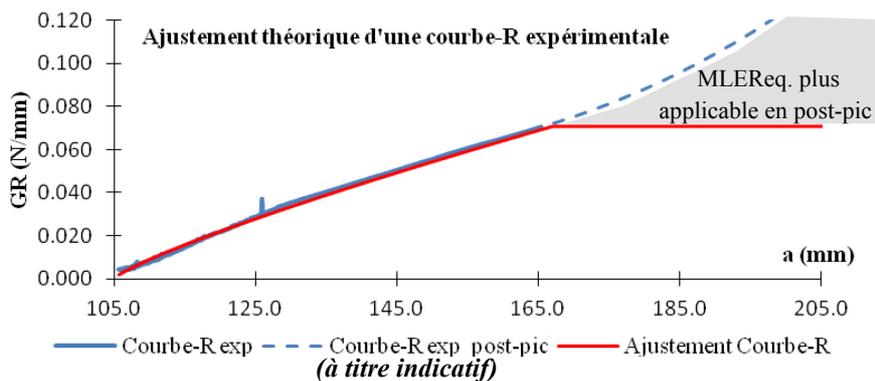


Figure 3. Ajustement théorique d'une courbe-R expérimentale

Une courbe-R n'est toutefois pas intrinsèque au matériau car elle dépend de la géométrie de l'échantillon considéré. La partie croissante de la courbe-R peut généralement être décrite par l'intermédiaire d'une loi puissance [8] exprimée en fonction de l'incrément de longueur de fissure (élastique équivalent) $\Delta a = a - a_0$:

$$G_R(\Delta a) = \begin{cases} \phi \Delta a^\beta & \text{si } \Delta a < \Delta a_c \\ G_{RC} & \text{si } \Delta a \geq \Delta a_c \end{cases} \quad \text{Avec} \quad \begin{cases} \phi = \frac{G_{RC}}{\Delta a_c^\beta} \\ \Delta a = a - a_0 \end{cases} \quad [8]$$

où G_{RC} correspond à la valeur plateau de la résistance à la propagation de fissure et a_c la longueur de fissure pour laquelle cette résistance plateau apparaît. Notons que l'incrément de longueur de fissure correspondant, i.e., $\Delta a_c = a_c - a_0$, correspond à la longueur élastique équivalente de la zone d'élaboration également appelée longueur interne. Dans notre cas, la courbe-R sera considérée jusqu'au pic de charge puis la résistance sera considérée constante en post-pic et égale à la valeur constatée au pic (Figure 3.).

3.4. Résultats des courbes-R

Après traitements des résultats pour chaque échantillon, il a été calculé une moyenne des caractéristiques des courbes-R G_{RC} et a_c (Tableau 1.).

	Nombre	cor	G_{RC} (N/mm)	Δa_c (mm)
Moyenne Mortier	10 ep.	0.69	0.049	64.9
Cov (%) Mortier	-	4.3%	15.6%	3.8%
Moyenne Béton	12 ep.	0.80	0.076	74.7
Cov (%) Béton	-	3.6%	9.0%	4.5%

Tableau 1. Résultats des propriétés de rupture

4. Propriétés cohésives

4.1. Modèle de zone cohésive (MZC)

Le modèle de la zone cohésive permet de caractériser la rupture quasi-fragile dans le cas des structures entaillées [PLA 03]. En se plaçant au niveau des lèvres de la fissure, la zone endommagée peut être décrite par une ligne de fissure fictive qui transmet une contrainte normale en fonction de l'ouverture. Il est donc obtenu une fonction décroissante dite fonction adoucissante de l'ouverture w de l'interface de type $\sigma = f(w)$ [HIL 71]. La zone cohésive commence lorsque la contrainte normale à la surface atteint la résistance à la traction notée f_t (en MPa). Une approximation bilinéaire de la fonction adoucissante est utilisée [PET 81].

Dans la présente étude les différents paramètres cohésifs sont estimés sur la base des relations entre courbe de résistance et comportement adoucissant. Quatre paramètres

cohésifs permettent de décrire intégralement le comportement adoucissant bilinéaire :

- L'énergie de rupture G_f (correspond à l'aire sous la courbe bilinéaire)
- l'ouverture critique w_c donnant l'ouverture de la fissure où la contrainte cohésive devient nulle,
- la résistance à la traction f_t donnant la contrainte à partir de laquelle l'endommagement s'initie,
- le ratio μ entre l'énergie de microfissuration ($G_{f\mu}$) et l'énergie de rupture G_f définissant la répartition d'énergie entre les deux comportements cohésifs.

4.2. Simulation MZC

Les paramètres cohésifs sont estimés sur la base des relations entre courbe de résistance et comportement adoucissant (approximation bilinéaire) selon une procédure précise [MOR 10].

4.2.1. Energie de rupture G_f

L'énergie de rupture G_f est égale à la résistance plateau G_{RC} [9] de la courbe-R moyenne issue de la campagne d'essai :

$$G_f = G_{RC} \quad [9]$$

4.2.2. L'ouverture critique w_c

La relation [10] permet d'estimer approximativement l'ouverture critique w_c à partir de la fonction de l'ouverture de fissure au niveau de a_0 $w=f(a)$ obtenue par modélisation EF en élasticité :

$$w_c = f(a_c).F_c/b \quad [10]$$

où F_c correspond à la force constatée pour la longueur de fissure élastique équivalente a_c c'est à dire la longueur de fissure pour laquelle commence la propagation à résistance constante G_{RC} , i.e., la propagation de la fissure principale avec sa zone d'élaboration. Notons que G_f et w_c permettent de fixer la longueur de fissure a_c et la résistance $G_f=G_{RC}$ marquant la propagation à résistance constante (régime de propagation auto-similaire). La résistance en traction f_t et répartition d'énergie cohésive μ n'ont aucune influence sur ce régime stationnaire.

4.2.3. Résistance en traction f_t et répartition d'énergie cohésive μ

Pour la détermination de ces paramètres, l'utilisation du modèle cohésif est nécessaire. Dans un premier temps, pour une valeur de μ imposée (ratio entre l'énergie de microfissuration $G_{f\mu}$ et l'énergie de rupture G_f), la résistance en traction f_t est estimée par simulations successives en comparant la courbe-R résultant de la simulation avec la courbe-R expérimentale mais uniquement pour des valeurs de résistance $G_R(a)$ comprises entre $0 < G_R < 0.2 G_f$. (simulations courtes correspondant

au début du développement de la zone cohésive). Une fois f_t déterminée, le ratio pilotant la répartition des énergie cohésives μ est estimée en faisant coïncider la courbe-R issue de la simulation avec la courbe-R expérimentale sur les deux derniers tiers de la partie croissante des courbes-R.

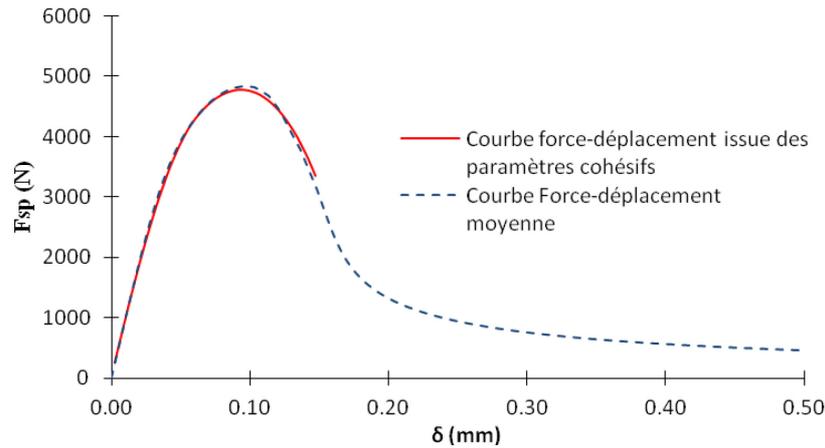


Figure 4. Recherche des paramètres cohésifs à par simulation MZC

4.3. Résultats MZC

Suite à la procédure précédemment énoncée, il a été obtenu les résultats suivants (Tableau 2.)

	G_f (J/m^2)	w_c (mm)	f_t (MPa)	$G_f\mu$ (J/m^2)	G_{fb} (J/m^2)	μ (%)
Mortier	49.4	0.067	2	7.41	41.99	15
Béton	76.4	0.0074	3	11.46	64.94	15

Tableau 2. Propriétés cohésifs des spécimens étudiés

5. Discussion et Conclusion

Dans la présente étude, les propriétés de rupture (courbe-R) et les paramètres cohésifs (approximation bilinéaire du comportement adoucissant) d'un béton et d'un mortier ont été déterminés.

La taille des granulats a un effet majeur sur la taille de la zone d'élaboration ($\Delta a_{cbéton} > \Delta a_{cmortier}$) ainsi que sur la résistance à la propagation de fissure ($G_{RCbéton} > G_{RCmortier}$).

Les cycles charges-décharges ont remis en question de la notion de « matériaux quasifragiles » : la MLER eq. jusque là utiliser pour les bétons et mortier ne serait applicable qu'en phase de développement de la zone d'élaboration et en tout début

de la propagation auto-similaire. Ce constat est une mise en garde quant à l'utilisation de l'énergie de rupture moyenne G_F résultant de l'aire sous la courbe force-déplacement (énergie globale de rupture) divisée par l'aire totale du ligament. En effet, il conviendrait de prendre en compte la part que représente les déplacements irréversibles (induits par la plasticité) dans les déplacements mesurés en post-pic de manière à estimer précisément la résistance à la propagation de fissure. L'estimation de l'énergie de rupture via une courbe-R permet de ne pas surestimer la résistance à la propagation de fissure de la fissure principale avec sa zone d'élaboration.

6. Bibliographie

[BAZ 97] BAZANT ZP., *Fracture and Size effect in concrete and other quasibrittle materials*, US, CRC, 1997.

[HIL 71] HILLERGORG A., MODEER M., PETERSSON PE., « Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements », *Cement and Concrete Research*, 06, 1976, p. 773-782.

[MOR 05] MOREL S., DOURADO N., VALENTIN G., MORAIS J., « Wood : a quasibrittle material R-curve behavior and peak load evaluation », *International Journal of Fracture*, 131, 2005, p. 385-400.

[MOR 07] MOREL S., « R-curve and size effect in quasibrittle fractures : Case of notched structures », *International Journal of Solids and Structures*, 44, 2007, p. 4272-4290.

[MOR 10] MOREL S., LESPINE C., COUREAU JL, PLANAS J., DOURADO N., « Bilinear softening parameters and equivalent LEM R-Curve in quasibrittle failure », *International Journal of Solids and Structures*, 47, 2010, p. 837-850.

[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*, 48, 2011, p.1403-1412.

[PET 81] PETERSSON PE., *Crack growth and development of fracture zone in plain concrete and similar materials*, Report TVBM-1006, Lund University, Sweden, 1981.

[PLA 03] PLANAS J., ELICE M., GUINEA GV., GOMEZ FJ., CENDO DA., ARBILLA I., « Generalizations and specializations of cohesive crack models », *Engineering Fracture Mechanics*, 70, 2003, p. 1759-1776.

[TSC 95] TSCHEGG EK., ELSER M., STANZL-TSCHEGG., « Biaxial fracture tests on concrete-Development and Experience », *Cement & Concrete Composites*, 17, 1995, p. 57-75.