
Modélisation de la rupture quasifragile du béton à l'échelle mésoscopique

A.Gangnant¹, S.Morel¹, C. La Borderie², J. Saliba¹

¹ Institut de Mécanique et d'Ingénierie Bordeaux (I2M), Département Génie Civil et Environnemental (GCE) – UMR CNRS 5295 (I2M GCE). Université de Bordeaux, Bât A11, 351 cours de la Libération 33405 TALENCE CEDEX.

e-mail : a.gangnant@i2m.u-bordeaux1.fr, s.morel@i2m.u-bordeaux1.fr, j.saliba@i2m.u-bordeaux1.fr

² Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur Appliquées à la Mécanique et au génie Électrique – EA 4581 (SIAME). Allée du parc Montaury Bât.ISA BTP 64600 ANGLET

e-mail : christian.laborderie@univ-pau.fr

RÉSUMÉ. Les bétons présentent une rupture quasifragile du fait de la présence d'une zone d'élaboration de la fissure (FPZ), principalement microfissurée, se développant en avant du front de fissure. La puissance de calcul actuelle a permis le développement de modèles mésoscopiques ayant pour objectif de représenter la participation de la géométrie dans le comportement du matériau hétérogène. Ces modèles s'appuyant sur des approches de type élément fini ou lattices, ont montré leur intérêt dans la description détaillée de la rupture ainsi que pour celle des phénomènes couplés. Cependant pour des raisons souvent liés à la difficulté de mailler différentes tailles d'hétérogénéités, la plupart des modèles se contente de représenter les plus grosses hétérogénéités. Cette étude montre l'influence de l'exhaustivité de la représentation du squelette granulaire du béton sur la réponse du modèle mésoscopique. Suite à différentes simulations où nous mêlons progressivement les plus petits granulats à la pâte de ciment dans un mortier dont les caractéristiques sont homogénéisées numériquement, nous soulignerons l'importance de l'exhaustivité des classes d'inclusions lors d'une modélisation.

ABSTRACT. Concrete exhibits a quasibrittle failure due to the existence of a large fracture process zone (FPZ), mainly micro-cracked, develops ahead of the crack front. Currently, the computational power allows the development of mesoscopic models which represent the contribution of inclusions to the behaviour of heterogeneous materials. These models, based on finite element or lattices approach, have a significant interest in the detailed description of the failure and coupled phenomenon. Unfortunately, many models are forced to represent only largest heterogeneities because of the difficulty of meshing smallest aggregates. In this paper, the effect of classes of aggregates on the mesoscopic response of concrete is studied. Following different simulations in which we gradually smallest aggregates are gradually mixed to cement paste in a mortar whose properties are numerically homogenized properties, we show the relevance of modelling all classes of aggregates in order to obtain an accurate description of concrete failure behaviour.

MOTS-CLÉS : béton, éléments-finis, endommagement, quasifragile, mésoscopique, zone d'élaboration de la fissure

KEYWORDS: concrete, finite element, damage, quasibrittle, mesopic, fracture process zone

1. Introduction

La rupture des matériaux à matrice cimentaire est considérée comme quasi-fragile du fait de la présence, en fond de fissure, d'une zone d'élaboration de taille conséquente, principalement microfissurée (Fracture Process Zone – FPZ). La compréhension du processus de développement de la FPZ et sa caractérisation sont un objectif majeur dans l'étude du comportement à la rupture du béton. L'étude de l'endommagement et de la rupture d'un béton peut se faire à plusieurs échelles (le plus souvent à l'échelle macroscopique) et suivant différents modèles :

- *sans discontinuité cinématique* (Endommagement isotrope, Smearred Crack, Microplans, Théorie du premier gradient, Fictitious Crack, Crack band model).
- *avec prise en compte explicite de la discontinuité cinématique* (Mécanique linéaire de la rupture, approche éléments finis et éléments finis enrichis ou étendus, modèle lattices).

Par nature, le béton est un matériau hétérogène constitué de granulats de formes et de tailles différentes repartis aléatoirement dans une pâte de ciment (matrice). Etant donné que le processus de fissuration est fortement lié au caractère hétérogène du béton et que ce dernier s'étend de l'échelle du grain de sable à l'échelle du plus gros granulats, une modélisation à l'échelle mésoscopique (de l'ordre du millimètre) s'avère intuitivement nécessaire. En effet, l'utilisation de l'échelle mésoscopique devrait permettre la description des conséquences du désordre initial local sur la réponse macroscopique. La plupart des approches mésoscopiques liées au béton proposent une géométrie idéalisée des granulats souvent circulaires ou sphériques ou polygonaux. Toutefois, pour des raisons essentiellement liées à des temps de calcul prohibitifs, de nombreux modèles font l'impasse sur la modélisation des petites classes de granulats. Néanmoins, cette simplification de la mésostructure du béton peut poser un problème de représentativité du comportement à la rupture simulé et, les processus d'homogénéisation des classes inférieures de granulats ne sont pas forcément aisés à mettre en œuvre notamment en ce qui concerne les propriétés de rupture homogénéisées. Dans ce travail, on propose donc d'étudier l'influence des différentes classes de granulats sur le comportement à rupture du béton afin de voir si une homogénéisation des classes inférieures de granulats permet de simuler correctement le comportement à rupture attendu du béton. Dans cette étude, des inclusions modélisées en disques (bi-dimensionnelles) sont utilisées [LAB 07]. Notons qu'une modélisation en 3D aurait pour conséquence une augmentation notable du ratio obtenu entre l'énergie de fissuration macroscopique et celle introduite à l'échelle mésoscopique due à la complexité géométrique plus importante du chemin de fissure engendrée par la présence des inclusions en 3D. Cependant, compte tenu du nombre important de simulations effectuées, nous nous sommes contentés d'une approche 2D, nous nous attendons bien sûr à obtenir des résultats comparables en 3D. Chaque tirage respecte la courbe granulométrique du béton étudié. Une approche éléments finis est utilisée parmi les différents types d'approches possibles (réseaux de poutres, éléments discrets...) suivant un modèle de comportement de type élasto-plastique endommageable isotrope. Le modèle utilisé est le modèle d'endommagement isotrope de Fichant [FIC 99] à l'échelle mésoscopique. Lors de cette étude, après une description du fonctionnement du modèle, nous nous appliquerons à apporter des informations supplémentaires sur la nécessité de représenter, dans la mesure du possible, la totalité des classes de granulats dans ce type de modèle éléments finis à l'échelle mésoscopique. Pour y parvenir une comparaison des résultats entre un tirage de référence (totalité des classes de granulats modélisées) et des tirages où des inclusions d'une ou plusieurs classes ont été supprimées et incorporées dans une matrice passant du stade de pâte à « mortier homogénéisé ».

2. Elaboration de la mésostructure

2.1. Méthode de génération de la mésostructure

La procédure de distribution spatiale des inclusions est importante pour la bonne représentation des granulats. La méthode utilisée suit un algorithme stochastique-heuristique où les granulats sont placés un par un (« take and place ») [LEI 03]. La répartition des particules est effectuée successivement en commençant par la classe la plus grande (le rayon le plus important). En paramètres d'entrée on retrouve les dimensions de la frontière de l'étude, le nombre de classe de granulats, la fraction volumique globale (F_{vg}) et pour chaque classe le rayon et la fraction volumique correspondante (respectivement R_i et f_{gi}) liés à la courbe granulométrique du béton. Le principe est tel qu'une position (dans un repère euclidien) est déterminée aléatoirement (en respectant les frontières du problème) : si la surface de l'inclusion de diamètre R_i n'interfère aucunement avec une autre inclusion alors la position est validée, sinon, une nouvelle position est déterminée jusqu'à ce qu'aucun chevauchement ne soit constaté.

2.2. Maillage diffus

Pour un tirage donné (position et rayon de chaque granulat définis), le maillage en éléments finis peut être modélisé de manières différentes :

- Le maillage exact où le granulat est modélisé avec son contour, cependant la proximité de petits granulats rend souvent difficile (voire impossible) la génération du maillage.
- Le maillage discret où les granulats sont projetés sur une grille fixe, cette méthode peu couteuse, introduit toutefois des irrégularités dans l'interface granulats/pâte.
- Le maillage diffus dans lequel les propriétés des granulats et de la pâte sont directement projetées sur le champ par éléments associé à un maillage régulier quelconque. La dimension des éléments doit toutefois être trois fois plus faible que le diamètre minimal des granulats [NGU 10]. De ce fait, le calcul de la matrice de rigidité élémentaire prend en compte la répartition des différents matériaux (pâte et inclusions). Notons que via cette méthode le temps de génération d'un maillage avec la prise en compte de toute de la classe granulaire est relativement court (à savoir une dizaine de minutes).

C'est cette dernière méthode qui a été utilisée dans cette étude. Tout en étant peu couteuse elle permet de diminuer les risques d'irrégularités à l'interface granulats/pâte. De plus, nous avons fait le choix de représenter au mieux la compacité granulaire ; en ayant la capacité de représenter les plus petits éléments, il est alors impossible de mailler indépendamment chaque granulat et donc l'interface de transition (ITZ) dont les paramètres mécaniques de ce dernier sont difficilement identifiables et dont l'épaisseur est de l'ordre du μm .

3. Modèle d'endommagement

3.1. Principe du modèle de comportement

Comme énoncé précédemment, le modèle utilisé est le modèle d'endommagement isotrope développé par Fichant et al. [FIC 99] basé sur le modèle de Mazars [MAZ 86], qui permet la prise en compte de l'effet unilatéral et de la plasticité. Dans ce modèle, l'endommagement est décrit avec un nombre limité de paramètres. La méthode de régularisation (prise en compte de la localisation des déformations dans la partie adoucissante) utilisée est basée sur l'énergie de fissuration G_f . De manière générale, un modèle d'endommagement permet d'obtenir la réponse du matériau sous différents types de sollicitations (traction et compression uniaxiale, flexion). L'influence de la microfissuration provoquée par un chargement extérieur est introduite par une variable scalaire D variant de 0 pour un matériau sain à 1 pour un matériau complètement endommagé. La notion de matériau sain et de matériau endommagé conduit à la notion de contrainte effective notée $\tilde{\sigma}$ [1]. Elle représente la contrainte qu'il faut appliquer à un élément de matière non-endommagé pour qu'il se déforme de la même façon qu'un élément endommagé sous une contrainte σ . La contrainte effective est obtenue à partir de la déformation ε et des caractéristiques élastiques du matériau.

$$\tilde{\sigma}_{ij} = \frac{E_0}{1+\nu_0} \varepsilon_{ij} + \frac{E_0 \nu_0}{(1+\nu_0)(1-2\nu_0)} [\varepsilon_{kk} \delta_{ij}] \quad , \quad [1]$$

où E_0 , ν_0 sont le module de Young et le coefficient de poisson du matériau non-endommagé, ε_{ij} et $\tilde{\sigma}_{ij}$ correspondent respectivement à la matrice de déformation et la contrainte effective et δ_{ij} le symbole de Kronecker. La variable d'endommagement D rend possible une relation entre la contrainte totale σ [2] et la contrainte effective $\tilde{\sigma}$:

$$\sigma_{ij} = (1-D) \langle \tilde{\sigma} \rangle_{ij}^+ + (1-D^\alpha) \langle \tilde{\sigma} \rangle_{ij}^- \quad , \quad [2]$$

où $\langle X \rangle^+$ et $\langle X \rangle^-$ désignent les parties positives et négatives du tenseur X définies par Ladevèze. D est donc une variable interne d'endommagement [4] calculée à partir de la déformation équivalente $\tilde{\varepsilon}$ (déformation qui permet de traduire l'état d'extension local provoqué par une sollicitation). $\tilde{\varepsilon}$ est calculée à partir des déformations élastiques ε^e [3] :

$$\tilde{\varepsilon} = \sqrt{\langle \varepsilon_1^e \rangle_+^2 + \langle \varepsilon_2^e \rangle_+^2 + \langle \varepsilon_3^e \rangle_+^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \langle \varepsilon_i^e \rangle_+^2} \quad , \quad [3]$$

où ε_i représente les déformations principales.

$$D = 1 - \frac{f_t}{E_0 \tilde{\varepsilon}} \exp\left(\frac{hf_t}{G_f} \left(\frac{f_t}{E_0} - \tilde{\varepsilon}\right)\right) = 1 - \frac{f_t}{E_0 \tilde{\varepsilon}} \exp\left(B_t \left(\frac{f_t}{E_0} - \tilde{\varepsilon}\right)\right), \quad [4]$$

où f_t désigne la contrainte ultime en traction, G_f l'énergie de fissuration, h la taille de l'élément fini considéré et ($= hf_t/G_f$) B_t un paramètre d'évolution. Notons que l'introduction de la plasticité est décrite par le critère de Nadai [5] (soit la combinaison linéaire de deux fonctions de Drucker-Prager F_1 et F_2 ayant la même forme) où une loi d'érouissage est incorporée :

$$F_{1,2}(J'_2, I'_1) = \sqrt{\frac{2}{3} J'_2 + A_{1,2} \frac{I'_1}{3}} - B_{1,2} w, \quad [5]$$

où w est la variable d'érouissage, I'_1 et J'_2 sont respectivement le premier invariant des contraintes effectives et le second invariant du déviateur des contraintes effectives. $A_{1,2}$ et $B_{1,2}$ sont des paramètres liés au matériau.

3.2. Paramètres du modèle

Pour chaque constituant du modèle (pâte et granulats) les paramètres du modèle d'endommagement sont donc : le module d'élasticité E , le coefficient de poisson ν , la résistance ultime en traction f_t , le seuil de déformation (limite d'élasticité en traction) ε_{d0} suivant la relation f_t/E , le paramètre d'évolution B_t^1 , qui permet de décrire le comportement adoucissant.

Propriétés	Granulats	Pâte de ciment
G_f (J/m ²)	60	20
E (GPa)	35	25
ν	0.2	0.2
f_t (MPa)	6	3

Tableau 1. Propriétés élastiques et de rupture des constituants

3.3. Influences « générales » des paramètres

Dans le cadre de cette étude, des simulations ont été réalisées sur une éprouvette de béton en traction. Le but étant d'analyser l'influence « générales » des paramètres sur l'endommagement. L'énergie de fissuration G_f la plus faible des constituants sera prépondérante au niveau de l'endommagement. Plus cette énergie sera faible, plus le comportement sera fragile et accompagné d'une localisation rapide des déformations anélastiques. Plus cette dernière sera élevée, plus le système devra consommer de l'énergie pour faire propager la fissure jusqu'à la rupture complète. Ainsi l'énergie de fissuration a une influence notable sur le comportement adoucissant et sur la résistance à la rupture. Dans la plupart des cas, l'endommagement s'initiera dans le constituant où le seuil d'endommagement ε_{d0} est le plus faible.

3.4. Remarque

Par ailleurs, le modèle mésoscopique permet de rendre compte de l'existence d'une longueur interne (taille de FPZ) dans le processus de rupture. En effet, l'analyse par la mécanique linéaire élastique équivalente (MLER eq) de poutres sollicitées en flexion 3 points, a conduit à l'obtention de courbe de résistance (courbe-R) montrant un plateau associé à la propagation auto-similaire de la fissure principale avec sa FPZ [GAN 13].

4. Simulations sur l'influence des différentes classes de granulats

4.1. Stratégie de calcul

L'objectif des simulations suivantes est d'étudier l'influence liée au retrait successif des classes inférieures des granulats sur la réponse macroscopique, la cartographie de l'endommagement et le chemin de la fissure. Pour les différents cas de calcul, 10 tirages aléatoires ont été réalisés. Les calculs ont été menés sur des éprouvettes en 2D (100x100x50 mm) entaillées des deux côtés (**Figure 1**) et sollicitées en traction (hypothèse

¹ La plasticité est également intégrée dans ce paramètre d'évolution via un coefficient lié à l'érouissage. Ce coefficient diminue B_t provoquant une diminution de la vitesse d'endommagement $\dot{D}(\varepsilon)$.

contraintes planes). Les simulations reposent sur une courbe granulométrique précise où sont représentées 10 classes de granulats (**Tableau 2**) pour une fraction volumique globale de référence de 70%.

Classe	Diamètre (mm)	fg_i	Classe	Diamètre (mm)	fg_i
1	1	27.750%	6	6.3	6.576%
2	2	5.444%	7	8	14.324%
3	4	8.616%	8	10	16.713%
4	5	7.999%	9	12.5	3.979%
5	5.6	6.211%	10	14	2.388%

Tableau 2. Fraction volumique de chaque classe de granulats.

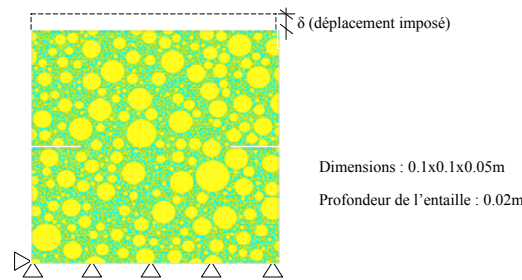


Figure 1. Maillage mésoscopique et conditions aux limites.

La stratégie de calcul abordée est la suivante :

1. Calcul de référence, i.e., calcul en présence de toutes les classes de granulats $i=1$ à 10 (**Tableau 2**).
2. Les classes inférieures de granulats sont incorporées successivement dans la pâte de ciment afin de former un mortier (**Figure 2**). Pour un mortier donné, la fraction volumique des granulats nécessite d'être modifiée en fonction du volume de mortier considéré et non en fonction du volume initial de l'éprouvette. Pour un mortier constitué de classe 1 à i , la fraction volumique globale s'obtient à partir de l'équation suivante

$$Fvg_{g^{1-i}}^* = \frac{Fvg \sum_{i=1}^i fgi}{1 - Fvg \sum_{i+1}^{10} fgi} \quad [6]$$

et le mortier sera identifié par la nomenclature suivante : **1_(i)P-(i,1)_10M** où i correspond à la classe la plus haute présente dans le mortier, P signifiant « présent » et M « manquant ». Les différents mortiers sont obtenus en utilisant la procédure de tirage décrite précédemment et les propriétés élastiques (E et ν) sont estimées à partir de la réponse macroscopique de simulations menées sur des éprouvettes non entaillées tandis que les propriétés de rupture (G_f et f_t) sont estimées à partir de simulations menées sur des éprouvettes entaillées. Les propriétés élastiques (E et ν) et de rupture (G_f et f_t) estimées lors de ces simulations seront utilisées comme propriétés homogénéisées du mortier lors des simulations suivantes (**Tableau 3**).

3. La dernière simulation consiste à considérer un béton formé à partir d'un mortier « homogénéisé » constitué de la pâte de ciment et des granulats 1 à i (propriétés estimées à l'étape 2) et des granulats des classes restantes c'est-à-dire $i+1$ à 10. La nomenclature retenue pour ces bétons est la suivante : **1_(i)H-(i,1)_10P** où H signifie « homogénéisé » et P « présent ». Les résultats de ces simulations sont comparés à ceux obtenus à partir du calcul de référence.

Notons que pour chaque configuration « mortier + granulats », 10 simulations sont effectuées correspondant à 10 tirages différents des granulats. Au total, la stratégie décrite ci-dessus a impliqué plus de 300 simulations soit environ 8000h de calcul sur un cluster.

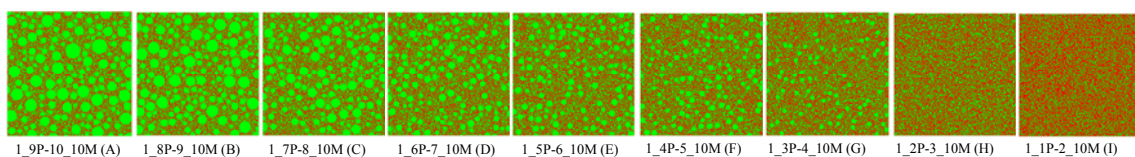


Figure 2. Exemple d'un jeu de tirages pour l'extraction des propriétés du mortier homogénéisé

4.2. Résultats de l'homogénéisation

Pour chaque configuration 1_(i)P-(i+1)_10M de mortier, 10 tirages sont réalisés et les moyennes du module d'élasticité E , du coefficient de Poisson ν , de la résistance en traction f_t et de l'énergie de rupture sont évaluées.

Fvg*	Cas	E_{moy} (GPa)	ν_{moy}	F_{tmoy} (MPa)	G_{fmin} (J/m ²)	$G_{f moy}$ (J/m ²)	G_{fmax} (J/m ²)
69.5%	A (1_9P-10_10M)	31.55	0.20	3.23	57.39	88.40	119.41
68.6%	B (1_8P-9_10M)	31.48	0.20	3.24	43.15	101.93	160.72
64.2%	C (1_7P-8_10M)	31.01	0.20	3.18	60.72	94.89	129.07
59.4%	D (1_6P-7_10M)	30.52	0.20	3.12	52.12	70.79	89.40
56.7%	E (1_5P-6_10M)	30.24	0.20	3.05	47.90	69.51	91.12
53.8%	F (1_4P-5_10M)	29.95	0.20	3.04	53.06	73.69	94.33
49.4%	G (1_3P-4_10M)	29.52	0.20	2.95	50.61	67.46	84.31
43.6%	H (1_2P-3_10M)	28.97	0.20	2.94	45.88	65.08	84.28
39.3%	I (1_1P-2_10M)	28.25	0.20	2.81	45.43	65.65	85.87

Tableau 3. Propriétés du mortier homogénéisé pour les différents cas

Pour chaque configuration, on constate de faibles coefficients de variations pour les propriétés mécaniques (E et ν) et pour la résistance en traction f_t . Seule l'énergie de fissuration G_f montre un coefficient de variation supérieur à 20%. De manière générale, plus la fraction volumique des granulats est importante, plus le module d'élasticité et la résistance en traction sont importants. Ce constat n'est plus valable pour l'énergie de fissuration qui montre une forte dépendance vis-à-vis de la géométrie du chemin de fissure. Afin de prendre en compte la forte variabilité constatée sur G_f , trois valeurs différentes de G_f seront envisagées dans les simulations « mortier homogénéisé + granulats » : la valeur moyenne ($G_{f moy}$), une valeur supérieure ($G_{f max} = G_{f moy} + 2$ écart type) et une valeur inférieure ($G_{f min} : G_{f moy} - 2$ écart type).

4.3. Résultats des simulations : béton de référence et béton constitué d'un mortier homogénéisé et granulats

Pour des soucis de clarté, nous proposons de présenter, pour chaque configuration de béton (mortier homogénéisé + granulats), la moyenne des résultats des 10 tirages.

4.3.1. Réponse macroscopique

La **Figure 3** présente les réponses macroscopiques des différentes configurations. L'observation de la raideur initiale de chaque courbe montre que la technique d'homogénéisation des propriétés élastiques fonctionne parfaitement. Cependant il y a des différences notables au niveau du comportement adoucissant (énergie de rupture) et de la résistance en traction (contrainte au pic).

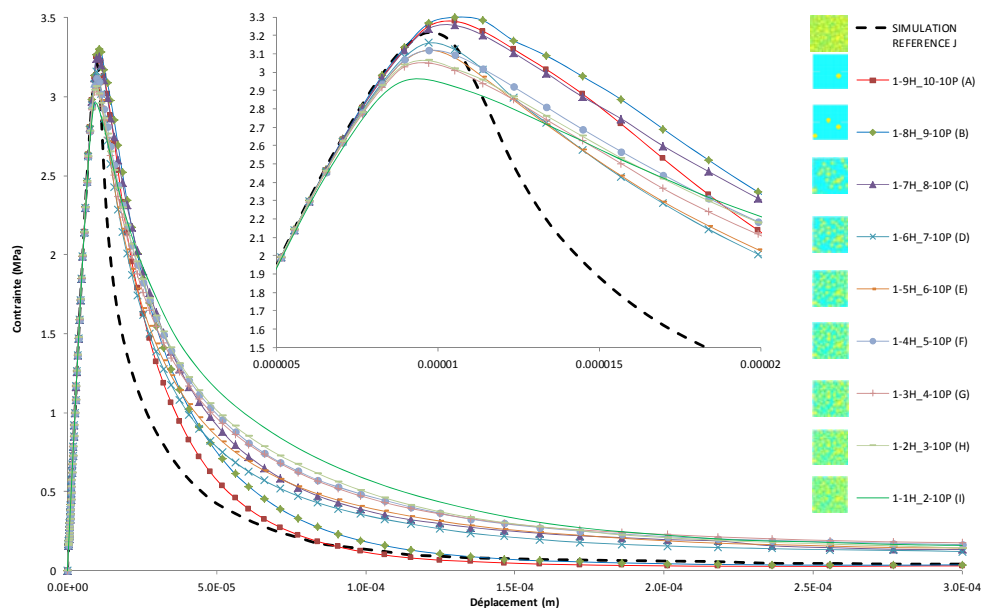


Figure 3. Courbes numériques contraintes-déplacements « moyens »

4.3.2. Module d'élasticité

La **Figure 4** présente les modules d'élasticités des bétons issus des différentes configurations. Les valeurs constatées sont quasi-constantes, et permettent de valider la procédure d'homogénéisation mise en place.

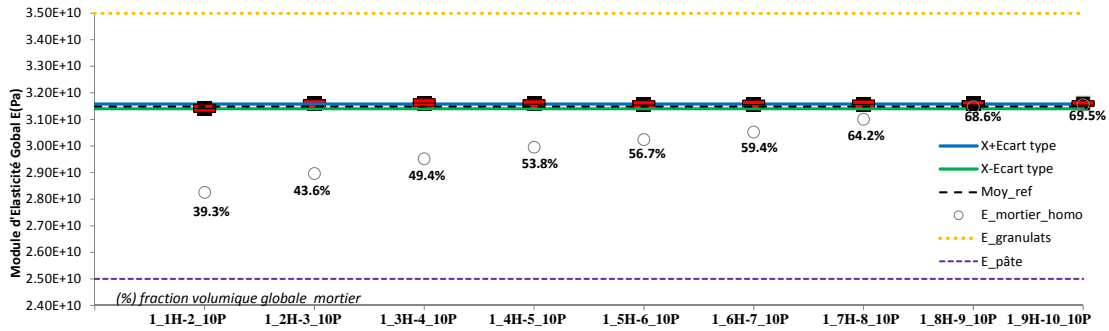


Figure 4. Résultats sur le module d'élasticité du béton

4.3.3. Propriétés de rupture

La **Figure 5** présente les résultats moyens obtenus pour chaque configuration. Les lignes représentent la valeur moyenne et l'écart type des résultats issus du tirage de référence (présence de toutes les classes). Les résistances en traction estimés pour les différentes configurations peuvent avoir selon les cas jusqu'à 10% de différences par rapport à celles correspondant au béton de référence. Pour la résistance en traction comme pour l'énergie de rupture, la tendance est la même : plus on homogénéise le problème et plus on semble se rapprocher des résultats du béton de référence. Cependant comme le montre la **Figure 6**, l'homogénéisation progressive des granulats de classes inférieures dans un mortier provoque une perte importante d'informations concernant le champ d'endommagement. De plus, on peut constater sur la **Figure 3** que même dans les cas où seules 2 ou 3 classes sont homogénéisées, ni la contrainte au pic, ni le comportement post-pic (énergie de rupture) ne sont décrits correctement.

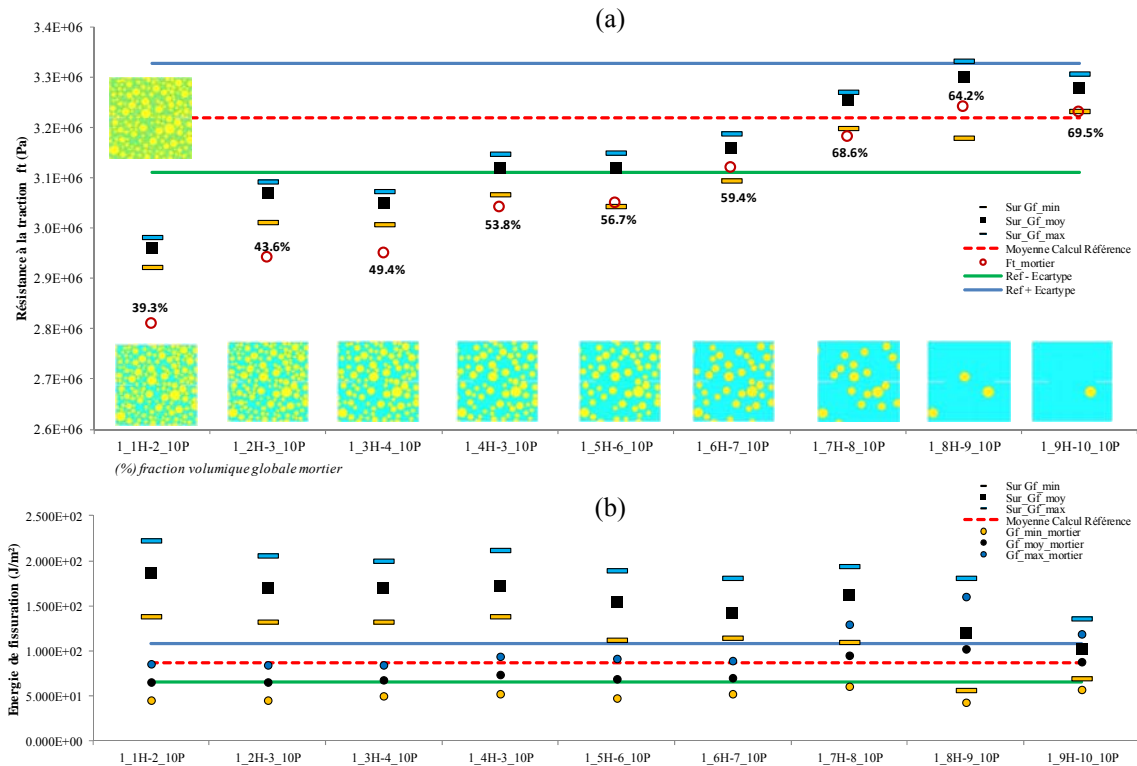


Figure 5. Résistances en traction (a) et énergies de fissuration (b) moyennes obtenues pour chaque configuration de béton (mortier homogénéisé + granulats)

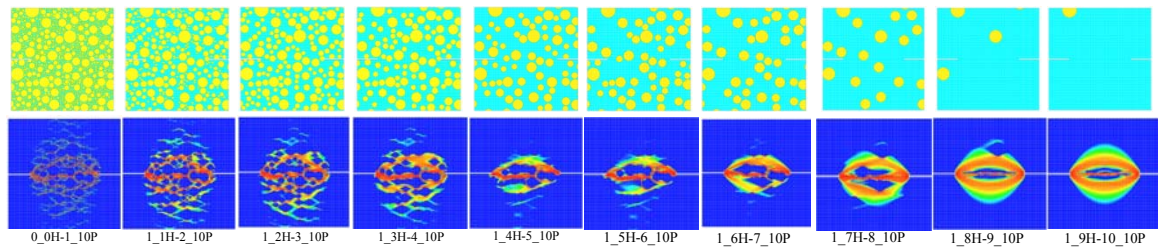


Figure 6. Évolution de l'endommagement suivant le retrait successif d'une classe inférieure de granulats

5. Conclusions et perspectives

Une étude numérique a été réalisée afin de déterminer l'influence des classes de granulats et si les inclusions de faible diamètre peuvent être homogénéisées dans la matrice cimentaire afin d'améliorer le coût de calcul. Tout d'abord, les simulations menées dans cette étude montrent que chaque classe de granulats a son importance dans le comportement de rupture car affecte le processus d'endommagement et le trajet de la fissure. En effet pour une réponse macroscopique quasi-identique on peut constater une fissuration différente : une tortuosité plus importante liée à la présence de gros granulats et une localisation plus précise de l'endommagement liée à la présence de granulats de faible diamètre. En effet, l'opération d'homogénéisation numérique des propriétés de rupture du mortier ne permet pas de rendre compte du processus d'interaction existants entre les granules constituant le mortier et les granules de classes supérieures présents dans le béton. De plus, les simulations montrent que les amorçages de fissuration se font toujours à l'interface pâte-granulats, et nous pouvons admettre que le modèle utilisé pour le mortier inclue de façon « macroscopique » le comportement de l'ITZ. Pour conclure, la simulation précise du comportement de rupture du béton nécessite de représenter au mieux la granulométrie du matériau et ce fut ce au dépend du temps de calcul.

Dans la suite de l'étude, on s'intéressera à mettre en exergue les sites où l'endommagement est actif lors d'un incrément de chargement et ce afin d'estimer la géométrie de la FPZ [ROJ 12]. Une campagne expérimentale sera également menée pendant laquelle l'endommagement quasi-fragile sera étudié au moyens des méthodes d'émission acoustique et de traitements d'images (corrélation d'images numériques et suivi de cibles).

Remerciements

A.Gangnant remercie le Mésocentre de Calcul (MCIA) sur lequel l'ensemble des simulations ont été effectuées.

6. Bibliographie

- [FIC 99] FICHANT S., LA BORDERIE C., PIJAUDIER-CABOT G., « Isotropic and anisotropic descriptions of damage in concrete structure », *Mechanics of Cohesive-Frictional Material*, vol. 4, n° 4, 1999, p. 339-359
- [GAN 13] GANGNANT A., MOREL S., « Rupture quasifragiles des bétons et mortier. MLER équivalente et courbe-R », *Congrès Français de la Mécanique*, Bordeaux, 2013,
- [LAB 07] LA BORDERIE C., LAWRENCE C., SORNIN G., « Approche mésoscopique du comportement du béton – Apport de la représentation géométrique », *RUGC'06*, La Grande Motte, 2006.
- [LEI 04] LEITE J.P.B., SLOWIK V., MIHASHI H., « Computer simulation of fracture processes of concrete using mesolevel models of lattice structures », *Cement and Concrete Research*, vol. 34, n° 6, 2004, p. 1025-1033.
- [MAZ 86] MAZARS J., « A description of micro- and macroscale damage of concrete structures », *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 25, n° 5-6, 1986, p. 729-737.
- [NGU 10] NGUYEN T.D., Apport de la modélisation mésoscopique dans la prédiction des écoulements dans les ouvrages en béton fissuré en conditions d'accident grave, Thèse de doctorat, UPPA, 2010.
- [ROJ 12] ROJAS SOLANO L.B., Endommagement non-local, interactions et effets d'échelle, Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2012