
Un nouveau critère de fissuration pour les matériaux hétérogènes soumis à des sollicitations multi-physiques

Alain Sellier¹, Thierry Vidal¹, Jérôme Verdier¹, Raphaël Bucher¹,

¹ LMDC, INSA/UPS Génie Civil, 135 Avenue de Rangueil, 31077 Toulousecedex 04 France.

RÉSUMÉ. L'avènement du développement durable nécessite une meilleure prédiction du vieillissement des ouvrages, ce qui nécessite des modèles de plus en plus complets, capables de traiter simultanément plusieurs types de pathologies (retrait empêché, réaction alcali-granulat, réaction sulfatique interne, fluage...). Se pose alors le problème des critères de fissuration les plus pertinents à utiliser dans les modèles de calcul d'ouvrages pour traiter les couplages entre ces pathologies. Cet article propose un nouveau critère macroscopique basé sur un enrichissement de la loi de comportement par des informations mésoscopiques considérées non plus numériquement mais analytiquement dans les critères macroscopiques, ce qui devrait accélérer considérablement les temps de calculs sans ignorer la physique sous-jacente.

ABSTRACT. Sustainable development needs a better prediction of the aging of structures, which requires more and more reliable models, able to treat simultaneously several types of pathologies (restrained shrinkage, alkali-aggregate reaction, internal sulfatic attack, creep ...). This raises the problem of the most relevant cracking criteria to be used in the engineering models of structure to treat the couplings between these pathologies. This paper proposes a new macroscopic criterion based on an enrichment of the constitutive law by mesoscopic information considered in the macroscopic criteria, no longer numerically but analytically. This criterion should speed up the computation duration without neglecting underlying physical causes.

MOTS-CLÉS : modélisation, fissuration, couplage, béton, multi-physique.

KEY WORDS: modelling, cracking, coupling, concrete, multi-physics.

1. Introduction

La quantification de l'état de fissuration d'un ouvrage est de première importance pour estimer sa durabilité, sa capacité de résistance, ou son étanchéité. Cet enjeu est particulièrement marqué pour les ouvrages d'intérêt majeur pour l'énergie, les transports ou encore les bâtiments recevant du public. L'estimation de la fissuration passe par des modèles de calcul plus ou moins fiables et complexes en raison du nombre de phénomènes qu'ils doivent prendre en compte. A titre d'exemple, un barrage peut à la fois être atteint par la réaction sulfatique interne (RSI), la réaction alcali-granulat (RAG) et la corrosion des armatures ; il peut présenter simultanément des venues d'eau liées à des fissurations diffuses ou localisées, avoir des zones sèches et d'autres très humides, des zones à température quasi constante et d'autres soumises à des variations saisonnières, conduisant à des gradients de retrait, de fluage ou de vitesses de réaction chimique. Ces différents phénomènes peuvent conduire à de la fissuration diffuse ou de la fissuration localisée. Combiner les différentes causes et types de fissuration (physico-chimique ou mécanique, diffuse ou localisée) dans un même modèle capable d'appréhender simultanément l'ensemble de ces phénomènes est déjà possible grâce à des modèles macroscopiques implantés dans des codes aux éléments finis (Grimal et al. 2010; Morenon et al. 2017). Il existe par ailleurs des modèles de perméabilité capables de considérer l'influence de ces deux types de fissuration sur les propriétés de transfert (Rahal et al. 2016). Ces modèles sont suffisamment performants et leur utilisation en contexte industriel s'amplifie avec l'avènement de la construction durable car ils sont particulièrement utiles lorsque les marges de sécurité s'amenuisent en raison du vieillissement de l'ouvrage, ou lorsque sa dimension et/ou sa géométrie rendent difficiles l'application des règles de calcul usuelles. Malheureusement, c'est également dans ces situations que la limite de leur domaine d'application est atteinte, notamment parce que certains couplages restent encore difficiles à appréhender : il est par exemple difficile de comprendre le couplage entre le fluage multi-axial, le retrait, les variations de températures et les réactions de gonflement internes. La façon de modéliser les couplages entre tous ces phénomènes repose en général sur une combinaison de modèles physico-chimique (RAG, RSI, retrait, hydratation), mécanique (fluage, plasticité, endommagement) et des considérations probabilistes (effet d'échelle statistique, répartition aléatoire de défauts, analyses mésoscopiques). Chacun de ces phénomènes ayant fait l'objet de recherches poussées, mais relativement découplées des autres aspects. L'étude présentée ici est issue de l'ANR MOSAIC, dont l'un des objectifs était d'appréhender le comportement macroscopique à partir d'informations microstructurales sur le matériau. Dans ce projet, le LMDC de Toulouse s'est plus particulièrement intéressé aux effets de la micro-fissuration par retrait et sa conséquence sur la

résistance en traction via une étude expérimentale sur pâte de ciment, mortier et béton (Bucher et al. 2017) ; le travail présenté ici consiste à interpréter les résultats de ces essais grâce à une modélisation originale s'appuyant sur la microstructure du matériau pour traiter les couplages multi-physiques conduisant à sa dégradation. Le couplage « séchage-fissuration / effet d'échelle probabiliste » est abordé par le biais d'un critère macroscopique enrichi analytiquement par les informations mésoscopiques. Ce critère permet de faire une analyse mésoscopique sans recourir au maillage des granulats ; il peut par conséquent être utilisé pour le calcul de grandes structures, ce qui n'est pas possible avec l'approche mésoscopique purement numérique en raison de la finesse des maillages. Considérer de façon relativement réaliste les inclusions sans les mailler explicitement revient à concentrer la complexité des calculs à l'échelle des points d'intégration des codes aux éléments finis, sans accroître la taille de la matrice de rigidité globale du problème. Cette stratégie de modélisation numérique est particulièrement adaptée à l'implémentation de ce nouveau modèle sur les super-calculateurs parallélisés, où le temps d'échange des données entre les sous zones de maillage (qui pénalise l'efficacité de parallélisation) doit être réduit autant que possible.

2. Principe de la modélisation

La plupart des mécanismes de dégradation listés précédemment ont pour origine une déformation différentielle entre la matrice cimentaire et les plus gros granulats. Certains modèles macroscopiques intègrent d'ailleurs déjà ces couplages via la combinaison des champs de contraintes locaux et la contrainte moyenne macroscopique (Grimal et al. 2010; Morenon et al. 2017).

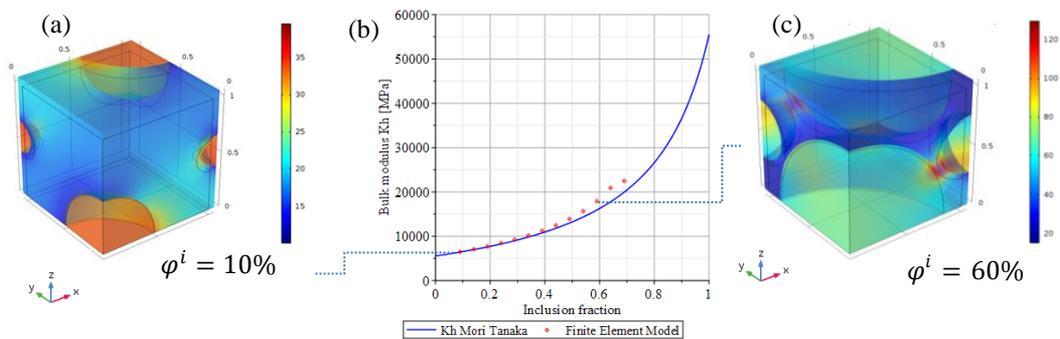


Figure 1. Comparaison du schéma d'homogénéisation de Mori Tanaka (b) et d'une modélisation mésoscopique périodique classique (b et c).

La limite d'utilisation de ces modèles provient généralement du fait que la quantification des champs de contraintes locaux utilisés dans les critères de plasticité et d'endommagement est difficile à appréhender de façon analytique. C'est principalement pour cette raison que les modèles d'homogénéisation et les modèles numériques mésoscopique peuvent apparaître comme des alternatives intéressantes. Ces modèles sont en effet capables de considérer les champs locaux de contrainte en les estimant soit de façon analytique (méthode d'homogénéisation (figure 1b), soit explicitement en modélisant numériquement les inclusions (figure 1a et 1c). D'une façon générale, les modèles d'homogénéisation sont capables de considérer plusieurs échelles d'inclusion imbriquées, plusieurs formes ou caractéristiques d'inclusions ; ils considèrent également les interactions entre inclusions de façon moyennée via des schémas d'homogénéisation adaptés. Bien que la prise en compte des interactions entre inclusions n'y soit considérée qu'en moyenne, ces schémas d'homogénéisation restent très performants pour estimer les modules élastiques jusqu'à des taux d'inclusion compatibles avec la fraction de granulats dans un béton, comme le montre la figure 1b, ce qui signifie que les champs moyens de contraintes par phase sont réalistes. Sur la figure 1, la compressibilité homogénéisée est calculée avec le schéma d'intégration classique de Mori-Tanaka et est comparée à une modélisation éléments finis linéaire mésoscopique avec des conditions aux limites périodiques. Il apparaît clairement que, bien que le schéma de Mori-Tanaka fonctionne bien (ce qui signifie que les contraintes moyennes dans la matrice et dans les inclusions sont réalistes), il existe des variations locales importantes de la contrainte au niveau de l'interface matrice-inclusion qui sont considérées dans les modèles mésoscopiques, mais inaccessibles dans les schémas d'homogénéisation classiques. Partant de ces constatations, le LMDC a tenté, dans le cadre du projet ANR MOSAIC, d'établir un critère de fissuration basé non plus sur le champ moyen dans la matrice ou dans l'inclusion, mais sur la singularité du champ au niveau de l'interface (comme dans les modèles mésoscopiques numériques, mais sans mailler les inclusions), ce qui a nécessité de ne plus utiliser seulement les tenseurs de localisation par phase (type Eshelby), mais de calculer également les expressions des contraintes aux interfaces en fonction des données du problème de

mécanique, qui pour un code aux éléments finis classique sont les déformations issues du champ de déplacement macroscopique et les champs de déformations anélastiques locaux imposés dans les phases (inclusion, matrice). Ce travail a été finalisé pour une inclusion sphérique. Le critère de fissuration est alors établi sur des points d'intérêts situés à la surface de l'inclusion comme indiqué sur la figure 2c. Chacune de ces contraintes est issue de la superposition de chargements élémentaires sphériques et déviatoriques ; les dérivées de ces contraintes par rapport aux déformations imposées constituent une matrice Jacobienne (qui a dimension d'une matrice de rigidité) dont quelques termes sont représentés graphiquement sur la figure 2b. La figure 2b montre clairement que la concentration de la contrainte ortho-radiale (en bleu) sera maximale à l'interface ($r/R=1$), puisque le Jacobien y est maximum, et c'est donc à cet endroit que doivent être définis les critères d'amorçage de fissure, et non pas avec la contrainte moyenne par phase qui est bien considérée dans le calcul des modules mais ensuite « oubliée » par les méthodes d'homogénéisation classiques. Sur la figure 2b, par exemple, le terme J_{21} correspond à la rigidité tangente à l'interface due à un gonflement imposé dans l'inclusion ; il est positif, alors que J_{13} est négatif car il correspond à une dilatation imposée dans une matrice confinée.

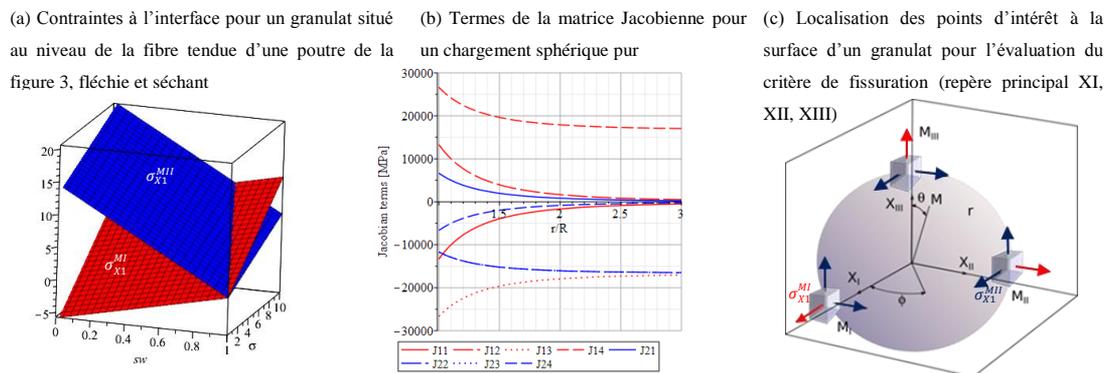


Figure 2.(a) Evolution de 2 contraintes suivant l'axe X_1 de la figure 2(c) pour un couplage retrait-chargement axial (σ est la contrainte macroscopique suivant X_1 , sw le degré de saturation du mortier) ; (b) Evolution des termes du Jacobien des contraintes radiales (rouge) et ortho-radiales (bleu) par rapport aux déformations imposées, en fonction de la distance r au centre du granulat sphérique de rayon R ; (c) Représentation des 3 points d'évaluation du critère à la surface d'une inclusion sphérique.

Une fois tous les chargements considérés, des critères de Rankine (en contrainte principale de traction σ_1^{MJ} sur la figure 2a et 2c) sont construits pour chacun des 3 points d'intérêt (figure 2c) et utilisables pour calculer les déformations anélastiques induites (fluage et plasticité), ainsi que les endommagements.

3. Application

Les essais réalisés dans le cadre du projet MOSAIC permettent de connaître non seulement les caractéristiques mécaniques macroscopiques classiques telles que les résistances en traction R_t , et en compression R_c , mais aussi les retraites libres pour différents niveaux de séchage ainsi que les résistances à la flexion de poutres non armées sollicitées en flexion 3 points et 4 points. La première étape d'exploitation de ces essais consiste à déterminer la résistance locale à l'interface inclusion-matrice Rt^{mi} . En effet, le critère étant écrit en contrainte principale locale, la résistance à considérer est également locale.

1.1. Détermination de la résistance à la traction au niveau de l'interface inclusion –matrice

Le niveau de sollicitation au voisinage immédiat de l'inclusion dépend à la fois de la sévérité du séchage, du niveau de chargement de la poutre, et de la fraction volumique des inclusions à l'endroit où se produit la rupture. Grâce aux matrices Jacobiennes établies durant ce projet de recherche, il est possible de connaître l'évolution des contraintes aux points d'intérêt sans recourir à une modélisation numérique fine. Dans cette analyse, le mortier est considéré comme étant la matrice, et les granulats de diamètres supérieurs à 4 mm les inclusions. La première étape consiste à déterminer l'intensité du retrait dans le mortier. La seconde étape consiste à calculer les contraintes dues au retrait au niveau des points d'intérêt. A ces contraintes locales sont ajoutées celles induites par le chargement extérieur, on utilise pour cela le Jacobien des contraintes par rapport aux déformations de la figure 2b, ce qui permet de calculer les contraintes illustrées en 2a. L'analyse inverse de la poutre en flexion 3 points a permis de constater que la résistance locale au niveau de l'interface granulat-pâte pouvait être considérée comme la cohésion propre de la matrice saturée à laquelle pouvait être ajoutée la contribution des tensions capillaires, expliquant ainsi l'augmentation de la résistance à la flexion des poutres en fonction du

séchage comme le montre la figure 3b : par exemple, à une résistance macroscopique de 8 MPa à 20% de saturation sur la figure 3b correspond une contrainte à l'interface de 15 MPa sur la figure 2a ; la rupture provient dans ce cas d'une décohésion radiale (contrainte maximale au point M_{II} dans la direction X_I), donc perpendiculaire à la tension macroscopique, ce qui n'est plus le cas à saturation où la rupture a lieu à l'interface granulat-pâte (point M_I , direction X_I). Cette première analyse a montré que pour les poutres les plus sèches, le coefficient de Biot à utiliser pour estimer la contribution de la dépression capillaire à la résistance d'interface devrait être inférieur à celui nécessaire au calcul du retrait du mortier, ce qui montre que la transmission des dépressions capillaires est gênée localement par la fissuration induite par les contraintes microscopiques.

1.2. Prédiction de la charge à rupture d'éprouvettes séchées et chargées

Connaissant la résistance locale du mortier et sa dépendance à la saturation, une tentative d'explication de l'effet d'échelle statistique a été réalisée ; pour cela, la densité locale de gros granulats a été supposée aléatoire et susceptible d'atteindre de façon très locale des valeurs plus élevées qu'en moyenne. Cette hypothèse permet d'expliquer l'effet d'échelle probabiliste observé entre les deux poutres comme le montre la figure 3b. Cet effet, également modélisable par la théorie de Weibull (Sellier and Millard 2014), entraîne une moindre capacité portante de la poutre en flexion 4 points par rapport à la poutre en flexion 3 points du fait de la plus grande probabilité d'un arrangement granulaire défavorable sur la longueur fléchie, comme observé expérimentalement dans (Bucher et al. 2017). Ce modèle de critère de fissuration est désormais généralisable à d'autres couplages multi-physiques (gonflement imposé de l'inclusion pour la RAG, gonflement imposé de la matrice pour la RSI...): il n'est plus nécessaire de modifier le critère pour chaque pathologie, seules les causes physiques doivent être rajoutées sous forme de déformations imposées dans l'inclusion, ou dans la matrice.

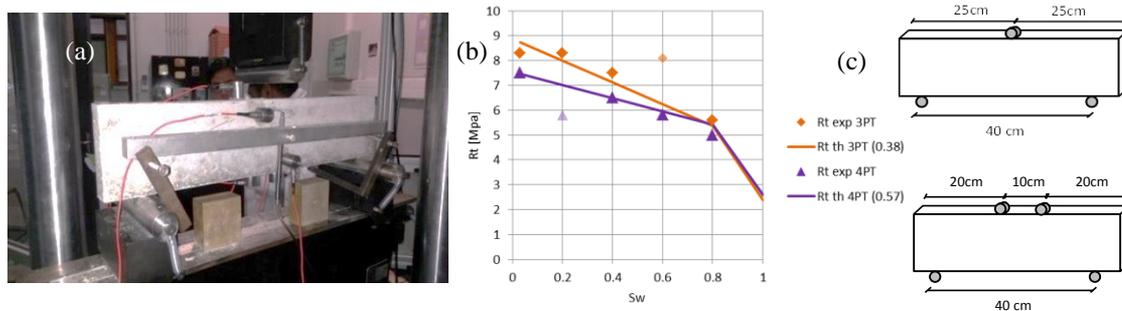


Figure 3. Evolution de la contrainte maximale de flexion (R_t) en flexion 3 points (3PT) et 4 points (4PT) des poutres en fonction du degré de saturation (S_w), modélisation basée sur les critères d'interface granulat-mortier comparée aux points expérimentaux (marqueurs pleins pour les points considérés comme fiable, marqueurs clairs pour les point inexpliqués)

4. Bibliographie

- Bucher, R, Vidal, T., A Sellier A., and J Verdier J., 2017. "Effet du séchage sur les propriétés mécaniques des matériaux cimentaires" In *Congrès Français de Mécanique*, Eds Association Française de Mécanique, ISSN : 2491-715X (en ligne), Lille 27 Août - 1^{er} Septembre 2017, Lille (France).
- Grimal, E. et al. 2010. "Concrete Modelling for Expertise of Structures Affected by Alkali Aggregate Reaction." *Cement and Concrete Research* 40(4): 502–7. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884609002476> (January 28, 2012).
- Morenon, P. et al. 2017. "Impact of Stresses and Restraints on ASR Expansion." *Construction and Building Materials* 140.
- Rahal, S., A. Sellier, and Verdier. J., 2016. "Modelling of Change in Permeability Induced by Dilatancy for Brittle Geomaterials." *Construction and Building Materials* 125: 613–24. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061816312624>.
- Sellier, A., and Millard, A. 2014. "Weakest Link and Localisation WL2: A Method to Conciliate Probabilistic and Energetic Scale Effects in Numerical Models." *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 18(10).