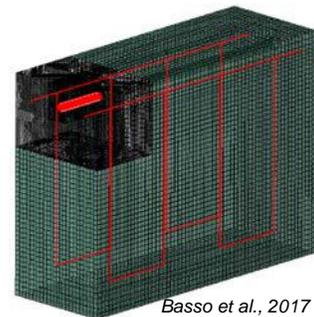
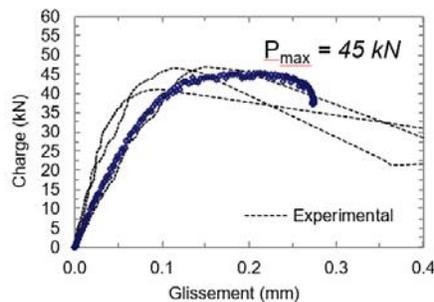


# Actes de la 18<sup>e</sup> édition des Journées Scientifiques

## (RF)<sup>2</sup>B Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation sur le Béton

« Les nouveaux matériaux et les méthodes innovantes utilisés dans un  
contexte de développement durable »



6 et 7 Juillet 2017

Université Laval  
CRIB Québec





## TABLE DES MATIÈRES

Programme des Journées pp. iv

Liste des affiches pp. viii

### Articles

*UTILISATION DU BÉTON RECYCLÉ DANS LA FORMULATION DES  
BÉTONS AUTO-COMPACTANTS* pp.1-11

Md El K. Bouarroudj<sup>A,B</sup>, C. Colman<sup>A,B</sup>, E. Robinet<sup>A</sup>, Z. Zhao<sup>A</sup>, F. Michel<sup>A</sup>, L. Courard<sup>A</sup>, S. Remond<sup>B</sup>, D. Bulteel<sup>B</sup>

A : Laboratoire des Matériaux de Construction, Urban and Environmental Engineering, – Université de Liège Belgique

B : IMT Lille Douai, Univ. Lille, EA 4515 LGCgE – Laboratoire de Génie Civil et Géo Environnement, Département Génie Civil & Environnemental, F-59000 Lille, France

*STRATEGIE MULTI-ECHELLE DE MODELISATION NUMERIQUE DE LA  
FISSURATION DES STRUCTURES EN BETON ARME DE GRANDES  
DIMENSIONS* pp. 12-22

C. Nader<sup>A</sup>, P. Rossi<sup>A</sup>, J-L. Tailhan<sup>A</sup>

A : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR), Université Paris-Est

*VALORISATION DE LAITIERS D'ACIÉRIE DANS DES BLOCS DE  
BÉTONS D'ENROCHEMENT* pp. 23-33

C. Perlot<sup>A</sup>, H. Carré<sup>A</sup>

A : Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur Appliquées à la Mécanique et au génie électrique, ISA BTP - Université de Pau et des Pays de l'Adour, Anglet, France

*PRÉ-MÉLANGES DE SABLES NATURELS AVEC DE FAIBLES  
PROPORTIONS DE SABLES DE BÉTONS RECYCLÉS : PROPRIÉTÉS  
ET DOSAGES* pp. 34-42

R. Trauchessec<sup>A</sup>, E. Ghorbel<sup>B</sup>, A. Lecomte<sup>A</sup>, O. Safiuallah<sup>B</sup>, Z. Ben Aouda<sup>A</sup>, G. Wardeh<sup>B</sup>

A : Équipe Matériaux pour le Génie Civil, Institut Jean Lamour - Université de Lorraine, Nancy, France

B : Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil - Université de Cergy-Pontoise, France



*ÉTUDE DE L'AUTOCICATRISATION DE MORTIERS CONTENANT DES  
ADDITIONS REACTIVES* pp. 43-58

S. Fattahi<sup>A</sup>, R. Gagné<sup>A</sup>

A : Centre de recherche sur les infrastructures en béton (CRIB), Université  
de Sherbrooke, Québec, Canada

*FLUAGE DU BÉTON ET DU BÉTON PRÉCONTRAIT SOUS  
CONDITIONS THERMO-HYGRO-MÉCANIQUES VARIABLES* pp. 59-69

H. Cagnon<sup>A</sup>, V.N. Nguyen<sup>B</sup>, T. Vidal<sup>A</sup>, J.M. Torrenti<sup>B</sup>, A. Sellier<sup>A</sup>

A : Université de Toulouse; UPS, INSA; LMDC (Laboratoire Matériaux et  
Durabilité des Constructions); 135, avenue de Ranguel; F-31 077  
Toulouse Cedex 04, France.

B : Institut français des sciences et technologies des transports, de  
l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR), 14-20 Boulevard Newton -  
Champs-sur-Marne – 77447 Marne-la-Vallée Cedex 2, France.

*RÉCENTS DÉVELOPPEMENTS DANS LA RECHERCHE ET LES  
SPÉCIFICATIONS SUR LES GRANULATS À BÉTON INCORPORANT  
DES SULFURES DE FER* pp. 70-80

B. Fournier<sup>A</sup>, J. Duchesne<sup>A</sup>, A. Rodrigues<sup>B</sup>

A : Département de géologie et de génie géologique, Université Laval,  
Québec, Canada

B : GHD Consultants Ltée, Québec, Canada

*EFFET DE LA PRÉSENCE DE VIDES SUR LA QUALITÉ DE  
L'ADHÉRENCE D'UNE BARRE D'ARMATURE* pp. 81-89

P. Basso Trujillo<sup>A</sup>, M. Jolin<sup>A</sup>, B. Massicotte<sup>B</sup>, B. Bissonnette<sup>A</sup>

A : Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton, Université Laval,  
Québec, Canada

B : Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton, Polytechnique  
de Montréal, Québec, Canada

*AMELIORER L'EVALUATION DES STRUCTURES ENDOMMAGEES PAR  
DES REACTIONS DE GONFLEMENT INTERNE A L'AIDE DE  
MODELISATIONS PHYSICO-CHIMIQUES* pp. 90-98

S. Multon<sup>A</sup>, A. Sellier<sup>A</sup>

A : Université de Toulouse, Laboratoire Matériaux et Durabilité des  
Constructions, INSA - Université Paul Sabatier, Toulouse, France

*INFLUENCE DU TYPE DE FIBRES ET DE LEUR ORIENTATION SUR LA  
FISSURATION ET LA PERMÉABILITÉ DU BÉTON ARMÉ SOLlicitÉ EN  
TRACTION* pp. 99-117

T. Plagué<sup>A</sup>, C. Desmettre<sup>A</sup>, J.-P. Charron<sup>A</sup>

A : Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton (CRIB), École  
Polytechnique, Montréal, QC, Canada



UNIVERSITÉ  
LAVAL



Centre de recherche sur les  
infrastructures en béton (CRIB)

PASSERELLE PIETONNE ISABEY-DARNLEY – UTILISATION DE  
DALLES PREFABRIQUEES EN BFUP

pp. 118-143

É. Cantin-Bellemare<sup>A</sup>, J.-P. Charron<sup>B</sup>

A : Ville de Montréal, QC, Canada

B : Centre de Recherche sur les Infrastructures en Béton (CRIB), École  
Polytechnique, Montréal, QC, Canada



## PROGRAMME DU 6 JUILLET 2017

### 8h30 Accueil des participants

9h00 Mot de bienvenue et présentation du (RF)<sup>2</sup>B par Gilles Escadeillas

9h15 **Conférencier invité** : Jacques Marchand, SIMCO Technologies  
Titre : L'ingénierie de la durabilité - Concevoir des structures qui  
atteindront une durée de vie de 100 ans et plus

10h15 **Étude du comportement résiduel de structures atteintes par la RAG**  
Farid Benboudjema (1), Georges Nahas (1, 2), Ejona Kishta (1)  
(1) LMT (ENS Cachan, CNRS, Université Paris Saclay), France  
(2) Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, France

### 10h45 : Pause-café – (affiches)

11h15 **Mécanismes d'hydratation des liants à base de ciments alumineux  
en système dilué - confrontation mesures expérimentales et  
modélisation numérique**  
Nicolas Maach (1), Jean-François Georgin (1), Judith Pommay (2)  
(1) LGCIE – INSA de Lyon, France  
(2) Kerneos, France

11h45 **Passerelle piétonne Isabey-Darnley – Utilisation de dalles  
préfabriquées en BFUP**  
Étienne Cantin-Bellemare (1), Jean-Philippe Charron (2)  
(1) Ville de Montréal  
(2) École Polytechnique de Montréal

### 12h15 Repas

13h45 **Utilisation de bétons recyclés dans la formulation de bétons  
autocompactants**  
Mohamed El Karim Bouarroudj (1,2), Charlotte Colman (1,2), Eva  
Robinet (1), Zengfeng Zhao (1), Frédéric Michel (1) Luc Courard (1),  
Sébastien Remond (2), David Bulteel (2)  
(1) Laboratoire des Matériaux de Construction, Urban and Environmental  
Engineering, – Université de Liège, Belgique  
(2) IMT Lille Douai, Université de Lille, France

14h15 **Stratégie multi-échelle de modélisation numérique de la fissuration  
des structures en béton armé de grandes dimensions**  
Christian Nader, Pierre Rossi, Jean-Louis Tailhan  
IFSTTAR, France



14h45 **Valorisation de laitiers d'aciérie dans des blocs de bétons d'enrochement**

Céline Perlot, Hélène Carré

Université de Pau et des Pays de l'Adour - laboratoire SIAME, France

15h15 **Mélange de sable naturel avec une faible proportion de sables de bétons recyclés : dosages et propriétés**

Romain Trauchessec (1), Elhem Ghorbel (2), André Lecomte (1), Omary Safiuallah (2), Zakaria Ben-Aouda (1), George Wardeh (2)

(1) Équipe Matériaux pour le Génie Civil, Institut Jean Lamour - Université de Lorraine, Nancy, France

(2) Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil - Université de Cergy-Pontoise, France

15h45 **Visite des laboratoires de l'Université Laval**

19h00 **Restaurant Le Cosmos** (terrasse), 2813 boulevard Laurier, Québec



## PROGRAMME DU 7 JUILLET 2017

### **8h30 Accueil des participants**

9h00 **Conférencier invité** : Luc Bédard, Association béton Québec (ABQ)  
Titre : L'avenir de l'industrie du béton et l'intégration du développement durable

10h00 **Influence des additions cimentaires à forte teneur en chaux libre sur l'autocicatrisation naturelle des mortiers**  
Salma Fattahi, Richard Gagné  
Université de Sherbrooke

### **10h30 Pause-café (affiches)**

11h00 **Fluage du béton et du béton précontraint sous conditions thermo-hygro-mécaniques variables**  
Hugo Cagnon (1), V.N. Nguyen (2), T. Vidal (2), J.M. Torrenti (2), A. Sellier (1)  
(1) LMDC, France  
(2) IFSTTAR, France

11h30 **Récents développements dans la recherche et les spécifications sur les granulats à béton incorporant des sulfures de fer**  
Benoit Fournier, Josée Duchesne et Andreia Rodrigues  
CRIB, Université Laval

### **12h00 Repas**

13h30 **Analyse du cycle de vie pour les infrastructures en génie civil : passé, présent et futur**  
Ben Amor, Jean-Martin Lessard  
CRIB, Université de Sherbrooke

14h00 **Calcul de la longueur de développement en présence de défauts**  
Pasquale Basso (1), Marc Jolin (1), Bruno Massicotte (2)  
(1) CRIB, Université Laval  
(2) CRIB, École Polytechnique de Montréal

14h30 **Améliorer l'évaluation des structures endommagées par des réactions de gonflement interne à l'aide de modélisations physico-chimiques.**  
Stéphane Multon, Alain Sellier  
LMDC, France



15h00 **Influence de l'orientation et du type de fibres sur la fissuration et la perméabilité à l'eau du béton armé**

Thibault Plagué, Clélia Desmettre, Jean-Philippe Charron  
École Polytechnique de Montréal

15h30 Clôture des Journées scientifiques

15h45 Réunion du Conseil d'orientation (interne)  
Salle 3347, pavillon Alphonse-Desjardins



## **AFFICHES POUR LES JOURNÉES SCIENTIFIQUES DU (RF)2B**

BÉDARD, Frédéric. *Renforcement à l'effort tranchant des dalles épaisses en béton en conditions de service*. Université Laval

COLMAN, Charlotte. *Residues de plâtre dans les fines de recyclage*. Université de Liège

ESSALIK, Samy-Joseph. *Nouvel essai annulaire adapté aux bétons à retrait compensé*. Université Laval

FAUCON, Samuel. *Réactions de gonflement interne (RAS et DEF) soumis à des chocs thermiques*. Université de Sherbrooke

FRECH-BARONET, Jessy. *Influence de l'humidité relative sur le comportement du fluage et de la relaxation de la pâte de ciment à l'échelle de la microstructure*. Université Laval

GAGNON, Antoine. *Conception et évaluation de la performance du béton projeté renforcé de fibres : concepts et défis*. Université Laval

HILT, Mélodie. *Production de béton en usine et développement durable : utilisation de technologie de contrôle continu*. Université Laval

MENU, Bruce-Ghandi. *Comportement différé des bétons au jeune âge*. Université Laval

MBINA, Mihindou. *Évaluation non-destructive de la qualité de l'adhérence entre deux bétons par la méthode de la réponse impulsionnelle (RI)*. Université de Sherbrooke

VU, Viet Anh. *Mur radiant : panneaux composite hybride bois et matériel inorganique*. Université Laval

MASOUD, Hosseinpoor. *Simulation numérique de l'écoulement du béton autoplaçant (BAP)*. Université de Sherbrooke

AHMED, Mostafa. *Nouvelle méthode pour quantifier la structuration des suspensions cimentaires*. Université de Sherbrooke

DIMA, Youness. *Caractérisation améliorée de l'écoulement des liants, ajouts cimentaires et liants alternatifs*. Université de Sherbrooke

## **STRATEGIE MULTI-ECHELLE DE MODELISATION NUMERIQUE DE LA FISSURATION DES STRUCTURES EN BETON ARME DE GRANDES DIMENSIONS.**

C. Nader<sup>A</sup>, P. Rossi<sup>A</sup>, J-L. Tailhan<sup>A</sup>

A Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR), Université Paris-Est

**RÉSUMÉ** : Cet article présente une nouvelle approche concernant la modélisation numérique de la fissuration dans les grandes structures en béton armé. Pour ces types de structures, il est déraisonnable, en raison du temps de calcul, de modéliser explicitement les armatures ainsi que leurs interfaces avec le béton. Pour résoudre ce problème, une Stratégie de Modélisation Multi-Echelle (S2ME) de la fissuration du béton armé a été développée. Elle est basée sur des approches probabilistes. Une validation de cette stratégie de modélisation est proposée dans cet article. Elle concerne l'analyse de la propagation d'une microfissure au sein d'une éprouvette de très grandes dimensions, couramment utilisée en mécanique de la rupture. Il s'agit d'une éprouvette DCB (Double Cantiver Beam) contenant des armatures. Les résultats obtenus sont prometteurs au regard de la modélisation du comportement global de l'éprouvette, des informations relatives à la fissuration et de la réduction importante du temps de calcul.

### **1. INTRODUCTION**

L'IFSTTAR a récemment développé un modèle de fissuration semi-explicite et probabiliste pour le béton (Tailhan et al., 2010). En ce qui concerne la modélisation de la liaison acier/béton, deux stratégies de modélisation ont également été récemment introduites (Phan, Tailhan, Rossi, 2013, Phan et al., 2013, Phan, Rossi, Tailhan, 2015) au sein du code aux éléments finis qui constitue le support numérique des modèles:

1. La liaison acier/béton-est représentée par des éléments d'interface. Leur comportement est décrit au travers d'un modèle d'endommagement déterministe comprenant seulement deux paramètres, la cohésion et le glissement (c'est-à-dire le déplacement tangentiel relatif entre l'acier et le béton).
2. Les crénelures de l'armature sont explicitement modélisées sur toute la longueur ceci avec une liaison parfaite avec le béton. Il s'agit donc d'une approche plus locale.

Ces deux stratégies de modélisation permettent d'analyser la fissuration des structures en béton armé en modélisant explicitement les armatures et les liaisons acier/béton (que ce soit par des éléments d'interface ou des crénelures explicitement modélisées). Ces deux types d'approche sont intéressantes car elles fournissent des informations fiables sur le processus de fissuration du béton armé et sont donc utilisables pour réaliser de l'expérimentation numérique au cas où les données expérimentales sont manquantes.

Néanmoins, l'échelle de modélisation pris en considération par les modèles évoqués ci-dessus n'est guère raisonnable (en raison des temps de calcul beaucoup trop élevés) lorsque les structures concernées sont

de très grandes dimensions ou lorsqu'elles contiennent un pourcentage élevé d'armatures. Pour pallier ce problème, un modèle macroscopique probabiliste pour modéliser le béton armé (MPBA) est proposé. Ce modèle intègre implicitement les armatures et leurs liaisons avec le béton et fournit des informations précises sur la macro-fissuration des structures. Il s'agit donc d'un changement d'échelle de modélisation par rapport à celle relative aux modèles évoqués ci-dessus. La conception et la validation de cette nouvelle approche modélisatrice sont le sujet principal de cet article.

## 2. MODELE DE FISSURATION SEMI-EXPLICITE DU BETON ET MODELE D'INTERFACE ACIER/BETON

### 2.1 Modèle semi-explicite de fissuration du béton

Le modèle de fissuration semi-explicite et probabiliste du béton a été développé à l'IFSTTAR (Tailhan et al, 2010). Il constitue une approche légèrement différente (notamment dans la représentation de la fissuration) du modèle explicite et probabiliste développé trente ans plus tôt (Rossi et al., 1987) Il décrit le comportement du béton par ses deux principales caractéristiques: l'hétérogénéité et la sensibilité aux effets d'échelle (Rossi et al. 1994) La base physique du modèle (qui est la même que celle du modèle explicite) peut être résumée comme suit:

- L'hétérogénéité du béton est liée à sa composition. Les caractéristiques mécaniques locales (résistance à la traction  $f_t$ , résistance au cisaillement  $T_c$ ) sont distribuées de manière aléatoire.
- Les effets d'échelle sont une conséquence de l'hétérogénéité du matériau. La réponse mécanique dépend directement du volume de matériau sollicité.
- Le processus de fissuration est contrôlé par des défauts dans la pâte de ciment, par l'hétérogénéité du matériau et par le développement de gradients de contraintes de traction.

Les points suivants précisent comment le modèle numérique intègre ces évidences physiques:

- Le modèle est développé dans le cadre de la méthode des éléments finis, chaque élément représentant un volume donné de matériau (hétérogène).
- La résistance à la traction est répartie de manière aléatoire sur tous les éléments du maillage en utilisant une fonction de distribution de Weibull dont les caractéristiques dépendent du rapport *volume de l'élément fini/volume du plus gros grain* et de la *résistance à la compression* (comme bon indicateur de la qualité de La pâte de ciment). Le volume de l'élément fini dépend du maillage, tandis que le volume du plus gros grain est une propriété du béton (Rossi et Richer, 1987, Rossi et Wu, 1992).

**Remarque:** la fonction de distribution de Weibull est la meilleure pour prendre en compte la rupture en traction d'un matériau fragile et hétérogène comme le béton.

- La résistance au cisaillement est également répartie de façon aléatoire sur tous les éléments à l'aide d'une fonction de distribution: (1) sa valeur moyenne est indépendante du maillage et est supposée égale à la moitié de la résistance à la compression moyenne du béton et (2) son écart-type et le même (pour les éléments finis de même taille) que celui relatif à la résistance en traction.
- En ce qui concerne la représentation des fissures, l'approche semi-explicite consiste, dans le cas présent, à utiliser des éléments linéaires de volume. Le problème, avec ce type d'élément, est qu'il n'est pas capable de prendre correctement en compte les concentrations de contraintes à la pointe de la macrofissure lors de sa propagation. Une solution consiste alors à introduire une certaine énergie de dissipation dans les critères de propagation de fissure associés à cet élément de volume. De cette façon, l'erreur dans la détermination de l'amorçage de la fissure dans un élément de volume est compensée par une approche pertinente de la de la propagation de cette fissure dans l'élément. En ce qui concerne le modèle actuel, l'effet énergétique associé au processus élémentaire de fissuration est représenté par une simple loi d'endommagement isotrope avec un seul paramètre scalaire. Une régularisation énergétique probabiliste est également appliquée (écart-type de l'énergie de dissipation dépendant du volume de l'élément fini).

Sans entrer dans les détails de la mise en œuvre de la modélisation numérique, ses caractéristiques principales peuvent être résumées comme suit:

- Une relation contrainte-déformation bilinéaire est utilisée pour représenter la fissuration d'un élément primaire. Le processus dissipatif élémentaire (c'est-à-dire la propagation de la fissure à l'intérieur de l'élément lui-même) commence lorsque la contrainte de traction principale au centre de gravité de l'élément est égale à la résistance à la traction du matériau. La dissipation d'énergie est ensuite liée à la partie positive de la projection de la déformation dans la direction de la contrainte principale majeure. Lorsque l'énergie totale disponible pour l'élément est dissipée, celui-ci est déclaré fissuré et sa matrice de rigidité élémentaire est mise égale à zéro. Cela permet d'éviter les phénomènes de blocage de contrainte.
- Le modèle est implémenté numériquement en utilisant une approche de type « rotative crack » (Jirasek 1998, Rots et al., 1985). Pendant la phase de dissipation, la contrainte est autorisée à évoluer en fonction de tout changement dans l'état de contrainte dans le matériau.
- Contrairement aux approches de type « smeared » (de Borst et al., 1985, Jirasek, 2011, Meschke et al., 2011), aucune décomposition additive n'est introduite dans la loi constitutive pour distinguer entre la déformation élastique et la contribution de la fissure. Une fissure élémentaire est censée exister seulement après que le paramètre de dommage associé à la dissipation d'énergie soit égal à 1 (Rossi et al., 2012). L'ouverture de fissure élémentaire est ensuite calculée à partir de la projection des déplacements élémentaires selon la direction normale de la contrainte principale de traction.
- Par souci de simplicité, la re-fermeture des fissures n'est pas traitée explicitement dans le cadre de cette approche. Le modèle suppose que le processus de dissipation en traction n'influence pas la rigidité élémentaire en compression. Ainsi, pour les fissures refermées, la matrice de rigidité élémentaire en compression est complètement récupérée tandis que la résistance à la traction élémentaire est mise à zéro.
- La loi constitutive du modèle est complètement définie par deux paramètres: la résistance à la traction et la densité volumétrique d'énergie dissipée. Une technique de régularisation énergétique permet de calculer la densité volumétrique de l'énergie dissipée à partir de l'énergie de fissuration en divisant cette dernière par une longueur caractéristique élémentaire (Bazant et al., 1983). Cette longueur caractéristique élémentaire,  $l_e$ , est ici calculée à partir du volume élémentaire,  $V_e$ , comme  $l_e = V_e^{1/3}$ . Des définitions plus complexes sont possibles, selon la forme de l'élément fini et l'ordre d'interpolation du champ de déplacement. Ce choix peut influencer les chemins de fissure prévus, mais en raison des aspects probabilistes du modèle, cet effet est fortement réduit. La densité volumétrique de l'énergie dissipée est définie élément par élément selon une loi de distribution de type log-normal non corrélée spatialement (Feller, 2008). Ce choix d'une loi log-normal est arbitraire (l'utilisation d'une loi de type Weibull n'est plus pertinente dans cette approche car la rupture n'est plus considérée comme parfaitement fragile). L'écart type relatif à la densité volumétrique d'énergie dissipée dépend du volume élémentaire de l'élément. Par contre, sa valeur moyenne est supposée indépendante du volume élémentaire. Sa valeur est estimée à  $2\gamma$  où  $\gamma$  est l'énergie spécifique par unité de surface de fissure (ce qui est un paramètre de matériau intrinsèque) selon la théorie de Griffith (Irwing, 1968).

Notez que, dans cette approche modélisatrice, la création et la propagation d'une fissure résulte de la création de trous élémentaires qui apparaissent de manière aléatoire et qui peuvent se rejoindre pour former les macrofissures (c'est pour cela que le vocable semi-explicite est utilisé). En tant que « output » de la simulation numérique, la représentation visuelle des fissures est liée aux directions perpendiculaires aux contraintes principales de traction à l'origine de l'initiation des fissures.

## 2.2 Modélisation de la liaison acier-béton

Un modèle simple et robuste a été développé et validé à IFSTTAR (Phan, Tailhan, Rossi, 2013, Phan et al., 2013, Phan, Rossi, Tailhan, 2015). Il prend en compte le comportement non linéaire de la liaison acier-

béton dans le cadre de la mécanique de l'endommagement. Il a pour objectif de représenter des phénomènes physiques tels que le processus de dégradation de l'interface et le glissement avec frottement de l'armature dans le béton. La liaison acier-béton est ainsi modélisée au travers d'un élément d'interface. Son rôle est:

- D'assurer la continuité des déplacements entre le béton et l'acier avant que la liaison s'endommage assurant ainsi le transfert des contraintes entre l'acier et le béton.
- De simuler l'endommagement de la liaison liée à la fissuration locale ceci jusqu'à la perte d'adhérence entre le béton et l'acier.
- De simuler le frottement entre le béton et l'acier après la perte d'adhérence entre les deux.

Le modèle est développé et implanté (dans le code aux éléments finis) en 2D et 3D. Il fait l'hypothèse que la liaison est une zone matérielle de faible épaisseur (représentée par l'élément d'interface sans épaisseur) qui se dégrade progressivement en cisaillement. Cette dégradation progressive est simulée au travers d'un modèle d'endommagement classique à un paramètre (endommagement isotrope). L'endommagement considéré conduit à maintenir une valeur constante de la contrainte de cisaillement jusqu'à ce que le déplacement tangentiel relatif (au niveau de l'élément d'interface) atteigne une valeur critique. La rupture d'adhérence est alors simulée en considérant que la rigidité transversale de l'élément d'interface devient nulle. Le glissement avec frottement de l'armature dans le béton est ensuite prise en compte au travers d'une loi classique de type Mohr-Coulomb. Le modèle d'interface est considéré comme déterministe. Ce choix est pertinent car le processus de fissuration autour de l'armature est régi par la présence de ses crénelures plutôt que par l'hétérogénéité du béton. Finalement, seules les valeurs de la contrainte de cisaillement maximale et du déplacement relatif tangentiel critique doivent être déterminées. Cette détermination est réalisée au travers d'une approche inverse consistant à simuler le comportement d'un tirant constitué du béton et du type d'armature relatifs au problème à traiter (Phan, Tailhan, Rossi, 2013, Phan, Rossi, Tailhan, 2015).

### **3. MODELE MACROSCOPIQUE PROBABILISTE DU BETON ARME**

Le modèle a été développé afin:

- d'obtenir des informations sur l'espacement et l'ouverture des macro-fissures dans une structure en béton armé de grandes dimensions.
- d'être probabiliste pour permettre une analyse statistique du comportement structurel via une approche de type Monte Carlo (analyse fiabiliste de la structure).

Pour atteindre ces objectifs avec des temps de calcul raisonnable (compatibles avec des analyses en bureau d'études), le modèle doit être simple. Par conséquent, certaines hypothèses fortes sont faites:

- À l'échelle structurelle donc globale (l'échelle d'intérêt de ce travail), le béton est considéré se rompre en traction ou en cisaillement (selon le champ de contraintes) de manière fragile (comportement élastique-fragile parfait). Les critères de rupture sont considérés au centre de gravité de l'Elément Béton Armé (EBA). Les résistances en traction et en cisaillement sont des valeurs aléatoires tirées de fonctions de distribution de type lognormal. Ce choix de fonction de distribution est arbitraire.
- Après rupture de la matrice, le béton, une nouvelle évaluation des coefficients de la matrice de rigidité de l'EBA est nécessaire et réalisée dans la direction parallèle aux armatures. Ces nouvelles valeurs de ces coefficients sont associées à la rigidité des barres et au phénomène de "tension stiffning". Elles sont considérées comme aléatoires pour tenir compte, notamment, de l'effet aléatoire du "tension stiffning". Une fonction de distribution log-normale est choisie arbitrairement pour ces valeurs aléatoires.
- L'EBA prend en compte un comportement plastique dans la direction des armatures lorsque la limite élastique de l'acier est atteinte au centre de gravité de l'EBA. Une plasticité parfaite est considérée.

Pour modéliser cette plasticité parfaite, un modèle d'endommagement est utilisé. Cette simplification n'est viable que si l'on ne tient pas compte des déformations permanentes liées à la plastification des armatures et donc si l'on considère, uniquement, les sollicitations monotones croissantes appliquées à la structure considérée. Cette restriction constitue le cadre et la limite de l'approche proposée.

- Il est considéré qu'une seule macrofissure par EBA peut être générée.
- La structure est considérée comme un assemblage de tirants. Chaque tirant peut contenir une ou plusieurs armatures.

Comme expliqué précédemment, le macroélément est renforcé dans une seule direction uniquement, celle des armatures. Il peut donc être considéré comme représentant un matériau orthotrope. Lorsque les critères de rupture en traction (Rankine) ou en cisaillement (Tresca) sont activés, la limite élastique de l'EBA est atteinte et les contraintes dans l'EBA sont calculées en appliquant à la matrice de rigidité initiale de l'EBA un coefficient de réduction  $\beta$  affectant les coefficients de la matrice dans la direction des armatures. À ce stade, il peut être considéré que le modèle comporte deux paramètres inconnus: la résistance à la traction de l'élément et la rigidité résiduelle dans la direction des armatures. Des fonctions de distribution de type log-normal sont affectées aux deux paramètres inconnus.

**Remarque:** la contrainte de cisaillement moyenne est supposée être égale à la moitié de la résistance à la compression et son écart-type est égal à celui de la résistance à la traction. La figure 1 schématise le modèle de comportement d'un EBA dans la direction des armatures.

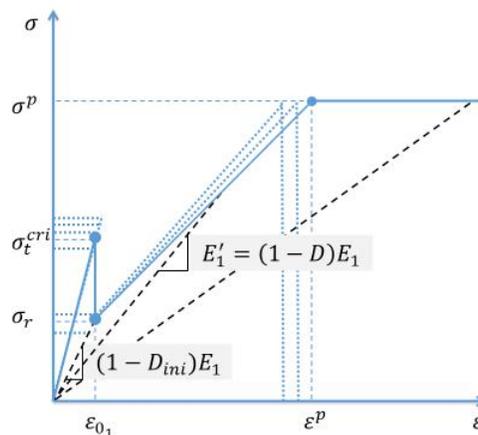


Figure 1. Modèle de comportement d'un EBA dans la direction des armatures

Les paramètres des deux fonctions de distributions sont déterminés à partir de méthodes inverses à partir de la simulation d'un ou plusieurs essais tirants (suivant le nombre de type d'armature au sein de la structure). D'un point de vue pratique, la stratégie de modélisation proposée se décompose en plusieurs étapes:

- **Etape 1 : Etude du comportement élastique de toute la structure en tenant compte de la position spatiale des armatures au sein de cette structure.**

Cette étape doit permettre de fixer la taille maximale des éléments du maillage qui permette d'aboutir à une analyse correcte de la cinématique de la structure. Cette étape permet ainsi de définir le nombre de type de tirant constituant la structure ainsi que les dimensions de ces tirants et donc des différents EBA.

- **Etape 2 : Détermination des paramètres probabilisés de la loi de comportement relative à chaque EBA,**

Comme ces paramètres sont obtenus par méthode inverse, il faut connaître le comportement statistique de chaque tirant constitué par un type d'EBA donné. Deux situations peuvent exister :

- Des essais expérimentaux de tirants existent pour chaque type d'armature se trouvant dans la structure. Dans ce cas de figure, il est alors possible, par méthode inverse, de déterminer les paramètres de la loi d'interface acier-béton (voir paragraphe 2.2) relative à chaque type d'armature. Une fois ces paramètres déterminés, tous les tirants, définis dans l'étape 1, sont simulés à par partir des modèles liés à l'approche locale présentée dans le paragraphe 2. Comme les paramètres de la loi macroscopique, relative à chaque EBA, sont probabilisés, il est nécessaire de réalisés suffisamment de simulations des tirants avec l'approche locale. Une fois les courbes de comportements relatives à chaque tirant (et donc à chaque EBA) obtenues, il suffit alors, par méthode inverse, de déterminer les paramètres probabilisés des lois de comportement relatives à chaque EBA (un tirant étant, dans l'approche macroscopique, des EBA mis en série).
  - Il n'existe pas d'essais expérimentaux de tirants avec les différents types d'armature. Des expérimentations numériques sont alors réalisées sur les différents tirants définis dans l'étape 1. Ces expérimentations numériques sont réalisées à l'aide des modèles de l'approche locale (paragraphe 2) mais, cette fois-ci en modélisant les armatures avec leurs crénelures. Il s'agit donc d'une étude numérique assez coûteuse en temps de calcul, mais qui remplace à la fois une étude expérimentale et une étude numérique permettant d'accéder aux différentes lois d'interface acier-béton. Les courbes de comportement des différents tirants ainsi obtenues, les paramètres probabilisés des lois de comportement macroscopique des différents EBA sont obtenus par méthode inverse tel que évoqué ci-dessus.
- **Etape 3 : Simulations numériques de la structure réalisées en utilisant l'approche macroscopique et, donc, les lois de comportement relatives aux différents EBA.**

#### **4. MODELISATION DE LA PROPAGATION D'UNE MACROFISSURE AU SEIN D'UNE EPROUVETTE DCB ARMEE**

Le problème structurel ici concerné est la propagation d'une macrofissure au sein d'une éprouvette de type DCB (Double Cantilever Beam). Ce type d'éprouvette et d'étude sont très courants dans le cadre de la mécanique linéaire de la rupture. La spécificité de l'éprouvette ici concerné est liée à deux aspects: le premier concerne le fait que les dimensions de l'éprouvette sont très (exceptionnellement) importantes), en l'occurrence 3,5 mètres de longueur et 1,1 mètres de largeur et le second concerne le fait que l'éprouvette contient des armatures placée sur le chemin de propagation potentiel de la macrofissure (Rossi, 1986). Ainsi, ce problème structurel traite clairement de la propagation, sur une longue distance, d'une macrofissure qui est amenée à traverser des armatures. C'est, par conséquent, un cas intéressant de validation de l'approche multi-échelle proposée.

##### **4.1 Quelques détails concernant l'essai de validation**

Les dimensions de l'éprouvette et les conditions de chargement sont présentées dans la figure 2. Les armatures utilisées étaient des armatures haute-adhérence avec un diamètre de 6 mm. La distance entre les armatures était de 10 cm et la première d'armature était située à 30 cm de l'extrémité de l'entaille (figure 3). Notez que l'éprouvette contenait une section rétrécie dans sa partie centrale pour forcer la propagation de la macrofissure le long de cette section réduite (Figure 4). Pour la même raison et l'objectif, des câbles de précontrainte avaient positionnés le long des flancs de l'éprouvette (Figure 2).

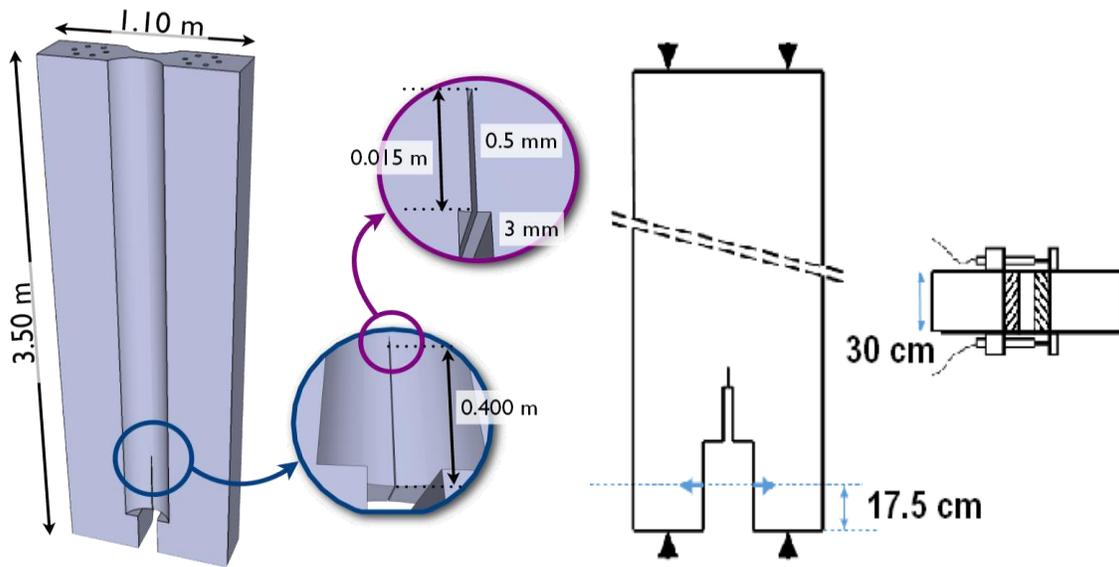


Figure 2. Dimensions et conditions de sollicitation de l'éprouvette

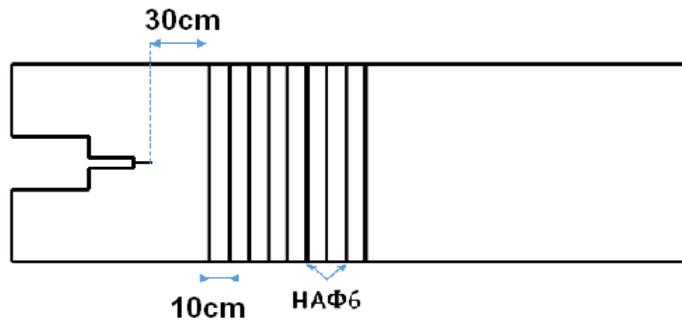


Figure 3. Position des armatures au sein de l'éprouvette

## 4.2 Simulations numériques

La première étape de la stratégie de modélisation est de choisir les dimensions des EBA (dimensions des «macroéléments»). Ces dimensions doivent être pertinentes vis-à-vis de l'obtention d'un champ de déplacement correct (en élasticité). Dans le cas du spécimen DCB concerné par cette étude (figure 4), deux points doivent être notés:

- Le premier est que le maillage doit être très fin à la pointe avant de l'entaille où seul le béton est présent (concentration de contraintes élevée).
- Le second concerne la partie du spécimen où les armatures sont présentes. Dans cette partie, il n'y a pas de concentration de contraintes en raison de l'action mécanique des armatures. Ainsi, les éléments fins peuvent être de dimensions plus importantes.

Dans la figure 4- est présenté le maillage aux éléments finis 3D retenu. On y trouve les EBA. Ces EBA sont des éléments cubiques de 10 cm de côté. Ils ne renferment qu'une armature. Dans la figure 4 est également présentée une coupe 2D du maillage 3D. La seconde étape de la modélisation consiste à définir la géométrie du tirant sur lequel va être réalisée l'approche inverse qui va permettre de déterminer les paramètres probabilisés de la loi macroscopique rattachée à l'EBA.

La figure 5 présente le tirant constitué des EBA placés en série. Ce tirant a les dimensions suivantes : 10 x 10 x 140 cm<sup>3</sup>. C'est avec ce maillage que l'approche inverse permettant de déterminer les valeurs des paramètres du MPBA est réalisée.

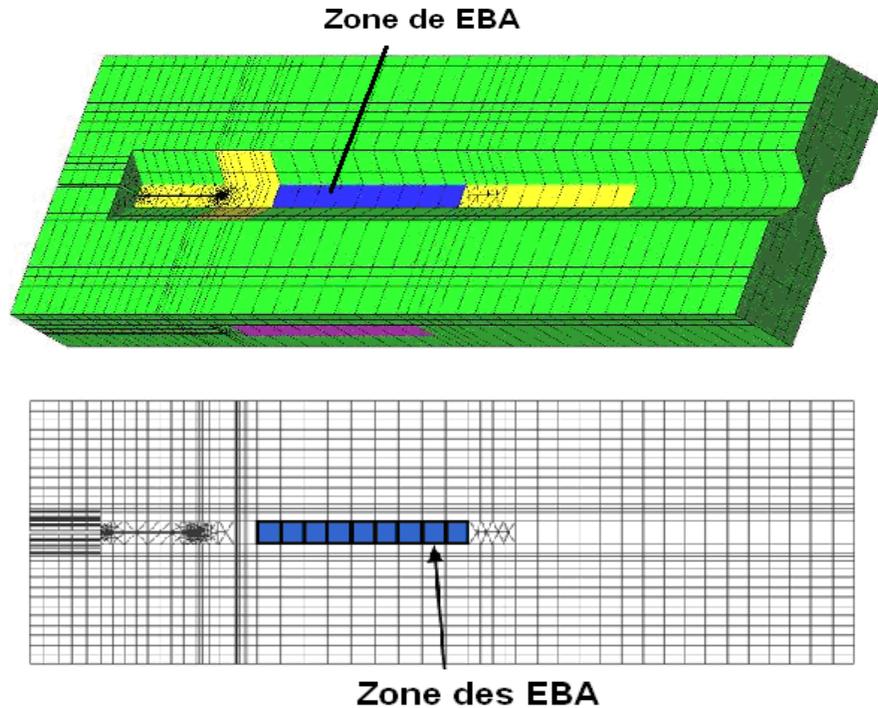


Figure 4. Maillage 3D et coupe 2D de ce maillage relatifs à la poutre DCB

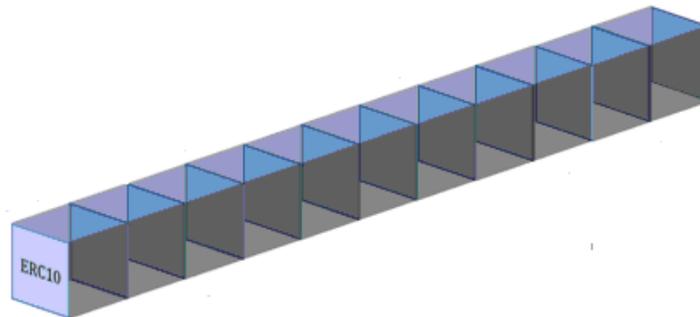


Figure 5. Maillage 3D du tirant constitué des EAB choisis

Le problème est que, dans le cadre de l'étude expérimentale réalisée sur la poutre DCB, aucun essai tirant n'a été réalisé avec l'armature et le béton de l'étude. Il a donc fallu réaliser une campagne d'expérimentation numérique sur le tirant avec l'approche locale en modélisant l'armature avec ses crénelures (voir paragraphe 3). Comme ce type d'étude numérique est très lourd, les calculs (plusieurs simulations pour obtenir plusieurs courbes de comportement du tirant) ont été réalisés en 2D et en contraintes planes. La figure 6 présente le maillage 2D retenu pour cette expérimentation numérique (même longueur et même hauteur que le maillage 3D).

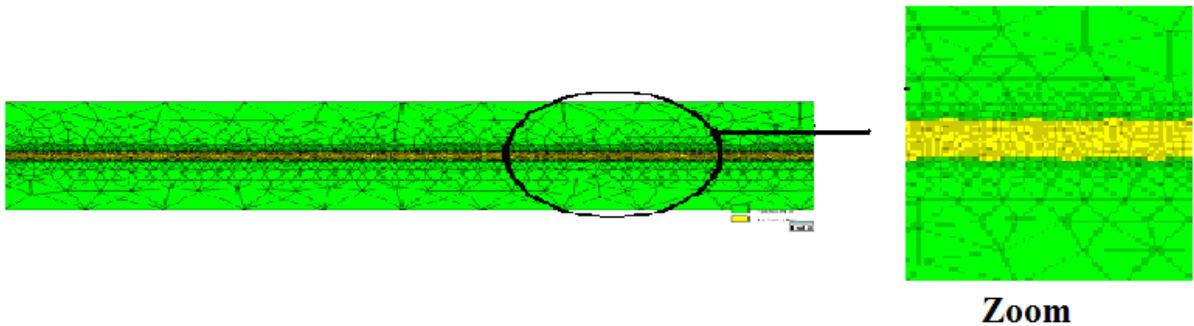


Figure 6. Maillage 2D du tirant – Expérimentation numérique avec l'approche locale

Les valeurs des paramètres des modèles locaux utilisés dans l'expérimentation numérique sont donnés dans le tableau 1;

Tableau 1. Valeurs des paramètres des modèles locaux utilisés dans le cadre de l'expérimentation numérique de l'essai tirant

Matériau	Paramètre	Valeur	Unité
Béton	<b>Résistance en traction (distribution de Weibull)</b>		MPa
	Paramètre d'échelle	8.0	
	Paramètre de forme	1.0	
	<b>Energie de dissipation <math>G_c</math> (distribution lognormal)</b>		
	Valeur moyenne	1.3	$10^{-4}MN\ mm^{-2}$
	Ecart-type	8.4	$10^{-4}MN\ mm^{-2}$
	<b>Résistance en compressive</b>	55	MPa
	<b>Module d'Young</b>	35000	MPa
Acier	<b>Module d'Young</b>	191000	MPa
	<b>Limite Elastique</b>	400	MPa

La méthode inverse conduit à la détermination des valeurs des paramètres de la loi de comportement macroscopique attachée à l'EBA choisi pour la simulation numérique du comportement de la poutre DCB. Ces valeurs sont données dans le tableau 2.

Tableau 2. Valeurs des paramètres du modèle macroscopique et probabiliste de l'EBA

<b>Résistance en traction</b>	
Moyenne	3.05
Ecart-Type	0.4
<b>Contrainte résiduelle après fissuration <math>\sigma_r</math></b>	0.75
<b>Module d'Young Résiduel</b>	
Moyenne	390.
Ecart-Type	50.

L'utilisation du tableau 2 permet de réaliser l'analyse numérique en 3D du comportement de la poutre DCB. La figure 7 présente les courbes *effort-ouverture d'entaille* obtenues avec l'analyse numérique (plusieurs courbes sont présentées correspondant à plusieurs calculs effectués dans le cadre d'une approche de type Monte-Carlo) ceci en comparaison avec la courbe expérimentale. On constate que l'analyse numérique est en bonne concordance avec l'expérience. Il faut souligner que le temps de moyen de calcul pour l'analyse complète de la poutre DCB est de 527 secondes, ce qui est tout à fait raisonnable et compatible avec une activité de bureau d'études. Le même type d'analyse 3D avec une approche locale (donc avec les modèles présentés dans le paragraphe 2) aurait nécessité plus d'une semaine de calcul.

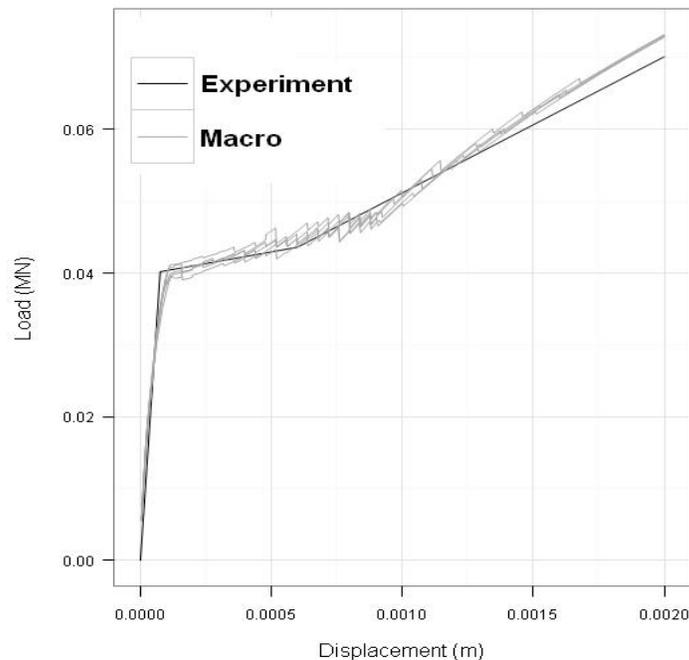


Figure 7. Courbes effort-ouverture d'entaille – Comparaison entre l'analyse numérique et l'expérience

## 5. CONCLUSIONS

Une Stratégie de Modélisation Multi-Echelle (S2ME) pour permettre de développer un modèle macroscopique et probabiliste pour les Eléments (finis) en Béton Armé (EBA) est présentée dans cet article. Cette stratégie consiste à construire un modèle macro à partir d'expérimentations numériques utilisant des modèles locaux (aussi probabilistes) validés. L'étude de la propagation d'une macrofissure au sein d'une poutre DCB armée constitue une première validation de cette stratégie. Les simulations numériques 3D montrent que l'approche scientifique proposée est prometteuse. Ainsi le comportement global de la structure ainsi que les temps de calculs nécessaires à l'analyse numérique sont tout à fait acceptables.

## 6. REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier l'Agence Nationale de la Recherche pour son aide dans le financement de la présente recherche, ceci dans le cadre du projet "MACENA" (ANR-11-RSNR-012).

## 7. REFERENCES

- Bazant, Z., Oh, B. (1983). "Crack band theory for fracture of concrete." *Mater struct* 16(3):155– 177.
- De Borst, R., Nauta, P. (1985) "Non-orthogonal cracks in a smeared finite element model." *Eng Comput* 2(1):35–46.
- Feller, W. (2008). "An introduction to probability theory and its applications." vol 2. Wiley, New York.
- Irwin, G. (1968). "Linear fracture mechanics, fracture transition, and fracture control." *Eng Fract Mech* 1(2):241–257.
- Jirasek, M. (2011). "Damage and smeared crack models." In: Hofstetter G, Meschke G (ed) *Numerical modeling of concrete Ann. Solid Struct. Mech. cracking. CISM International Centre for Mechanical Sciences*, vol 532. Springer, Vienna, pp 1–49.
- Meschke, G., Grasberger, S., Becker, C., Jox, S. (2011). "Numerical modeling of concrete cracking." *Springer, chap Smeared Crack and X-FEM Models in the Context of poromechanics*, pp 265–327.

- Phan, T. S. et al. (2013). "Numerical modeling of the rebar/concrete interface: case of the flat steel rebars." *Materials and structures* 46.6: 1011-1025.
- Phan, T. S., Tailhan, J-L and Rossi, P. (2013). "3D numerical modelling of concrete structural element reinforced with ribbed flat steel rebars." *Structural Concrete* 14.4: 378-388.
- Phan, T. S., Rossi, P. and Tailhan, J-L. (2015). "Numerical modelling of the concrete/rebar bond." *Cement and Concrete Composites* 59: 1-9.
- Rossi, P. (1986) "Fissuration du béton : du matériau à la structure. Application de la mécanique linéaire de la rupture." *PhD Thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, p. 228 (in french), published in *rapport de recherche des LPC*, n°150, 1988 (in french).
- Rossi, P., and Richer, S. (1987) "Numerical modelling of concrete cracking based on a stochastic approach." *Materials and Structures* 20.5: 334-337.
- Rossi, P., Wu, X. (1992) "Probabilistic model for material behaviour analysis and appraisalment of concrete structures." *Magazine of concrete research* 44.161: 271-280.
- Rossi, P., et al. (1994) "Scale effect on concrete in tension." *Materials and Structures* 27.8: 437- 444.
- Rossi, P., Tailhan, J.L. (2012) "Cracking of concrete structures: interest and advantages of the probabilistic approaches." *In: Rilem international conference on numerical modelling strategies for sustainable concrete structures, SSCS'2012. Aix-en-Provence, France.*
- Rots, J.G., Nauta, P., Kuster, G.M.A., Blaauwendraad, J. (1985) "Smearred crack approach and fracture localization in concrete." *HERON* 30(1).  
structures." *Computational Materials Science* 110: 39-53.
- Tailhan, J-L., Dal Pont, S. and Rossi, P. (2010) "From local to global probabilistic modeling of concrete cracking." *Annals of Solid and Structural Mechanics* 1.2: 103-115.

# MERCI À NOS PRÉCIEUX COMMANDITAIRES



UNIVERSITÉ  
**LAVAL**

Faculté des sciences et de génie  
Département de génie civil  
et de génie des eaux



Centre de recherche sur les  
infrastructures en béton

Québec 



LA référence



Association  
Canadienne  
du Ciment



QUEBEC &  
E. ONTARIO



www.bm-underground.com



**Ciment Québec**



EUCLID CANADA



INTERNATIONAL  
CONCRETE REPAIR  
INSTITUTE

SECTION  
Québec



**LAFARGE**