

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En :Génie Civil

Spécialité :structure

Par :Benzineb Khadidja & Sayah Abla

Sujet

Etude de l'effet d'échelle dans les structures en béton

Soutenu publiquement, le / / , devant le jury composé de :

M. Baba Ahmed Smaine	MAA	Univ. Tlemcen	Président
Mme Ghezali Sabah	MAA	Univ. Tlemcen	Examinatrice
Mme Aissaoui Nassima	MCB	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire
M. Mohammed Matallah	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur de mémoire

Remerciements

En préambule à ce mémoire, nous remercions Allah qui nous a aidé et donné la patience et le courage durant ces longues années d'études.

Nous souhaitons adresser nos plus sincères remerciements aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Ces remerciements vont tout d'abord à l'ensemble du corps professoral et administratif de la Faculté de Technologie de Tlemcen. Une mention particulière à Monsieur HOUTI Ibrahim, chef de spécialité, pour la richesse et la qualité de son enseignement et pour les efforts considérables qu'il déploie afin d'assurer une formation actualisée à ses étudiants.

Nous tenons à remercier sincèrement Monsieur Matallah Mohammed, notre directeur de mémoire, et Madame Aïssaoui Nassima, notre co-encadreur, qui se sont toujours montrés à l'écoute et d'une grande disponibilité tout au long de la réalisation de ce travail. Leurs conseils et leur soutien ont été précieux.

Nous exprimons notre gratitude au personnel administratif de Taïbi Abdelsemi et Belbachir Ahmed pour son aide et son soutien dans la réalisation de ce projet.

Nous tenons à remercier profondément Mr BABA Ahmed Smain pour l'honneur qu'il nous fait en acceptant de présider ce jury.

Nous exprimons également nos sincères remerciements à Mme Ghezali Sabah d'avoir accepté d'examiner et discuter ce travail.

Enfin, nous sommes reconnaissantes envers notre famille et nos amis pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Merci à toutes et à tous.

Dédicace

C'est avec la grâce de Dieu le Tout-Puissant que j'ai pu mener à bien ce modeste travail. Je le dédie avec une profonde gratitude à :

La lumière de mes yeux et le bonheur de mon existence : mes chers parents. Vous m'avez encouragé sans relâche et sacrifié les plus beaux moments de votre vie pour ma réussite. Que Dieu vous accorde santé et longue vie. Aucune parole ne saurait exprimer pleinement l'amour, l'estime, le dévouement et le profond respect que je vous porte.

À mon père, mon premier guide depuis ma naissance.

À ma mère, dont les prières et la tendresse m'ont toujours porté vers l'avant. Je ne vous serai jamais assez reconnaissant(e).

À mes chers frères Abdelghani , Ali et Mohammed, ainsi qu'à ma sœur Tassnim, mes premiers amis et confidents de toujours. Votre amour et votre soutien ont été essentiels à l'accomplissement de ce travail. Je suis infiniment reconnaissant(e) de vous avoir à mes côtés.

À mes grands-parents bien-aimés, Vous êtes les racines de notre famille, des modèles de sagesse, de patience et d'amour. Vos prières silencieuses, vos encouragements discrets et votre présence rassurante ont toujours été une source de force pour moi. Que Dieu vous protège et vous accorde une longue vie en santé, ou qu'Il vous accueille dans Son vaste paradis, si vous nous avez quittés. Ce travail vous est dédié avec amour et reconnaissance.

À mon binôme Khadidja avec qui j'ai eu le plaisir et l'honneur de réaliser ce travail.

À toute la promotion de structures, dont je suis fier(e) de faire partie.

À mes professeurs, qui, tout au long de mon parcours, m'ont transmis leur savoir avec dévouement et m'ont guidé(e) vers la réussite.

À mes amis, dont le soutien m'a été d'un grand réconfort durant l'élaboration de ce mémoire. Une mention spéciale à samah, Ghozelen, Kawther et Ayoub, pour leur aide précieuse et leur présence constante.

Enfin, à tous ceux qui occupent une place chère dans mon cœur.

ABLA

Dédicace

Par la grâce de Dieu, je suis ici aujourd'hui, arrivant à cette étape importante de ma vie. En reconnaissance de leurs sacrifices et de leur amour, je dédie ce travail à :

Mon cher père, Ce travail est le fruit de tes sacrifices et de ton soutien constant. Ton dévouement pour mon éducation et mon bien-être est inestimable.

Ma maman adorée, Tu es le cœur de ma vie, celle dont les sacrifices silencieux m'ont permis d'avancer. Je te dois tant... Ce travail t'est dédié avec tout l'amour et le respect que je te porte.

Mes sœurs Chaima et Houria, ainsi que mes chers frères Mohammed et Younes Merci pour votre amour constant, vos encouragements sincères et votre présence rassurante à chaque étape de mon parcours.

À mon petit Rayan, ton sourire illumine ma vie. Je te dédie cette réussite avec l'espoir qu'elle t'inspire à poursuivre tes propres rêves.

À Ghizlene, Imane, Samah , Bendahmane et boumediene. Merci pour votre soutien, votre sérieux et cette belle complicité intellectuelle.

Ma binôme Abla, Ta complicité et ton soutien ont été essentiels tout au long de notre parcours universitaire.

À mes amis de la promotion Génie Civil et l'équipe la RISAM, Merci pour votre esprit d'équipe, votre solidarité et les souvenirs inoubliables que nous avons créés ensemble.

KHADIDJA

Résumé

Le béton est considéré comme le matériau de construction le plus employé dans le monde. Toutefois, en raison de sa nature quasi-fragile, sa rupture s'accompagne de la formation de fissures à l'échelle de la microstructure qui interagissent entre elles dans une zone de taille assez grande comparée à la taille de la structure. Cette zone, appelée Fracture Process Zone (FPZ), joue un rôle fondamental dans l'apparition des effets d'échelle observés lors d'essais expérimentaux. L'effet d'échelle se manifeste par une dépendance des caractéristiques de rupture (résistance maximal ...) des structures à leurs dimensions.

Ce travail de mémoire apporte une contribution numérique à l'étude du comportement du béton à la rupture, à travers une modélisation à l'échelle mésoscopique combinée à un modèle d'endommagement régularisé. L'objectif est d'analyser l'influence de l'échelle sur la réponse mécanique globale et locale du matériau, avec une attention particulière portée à l'évolution de la FPZ. L'analyse numérique met en évidence le rôle central de la FPZ dans le phénomène d'effet d'échelle, en s'appuyant sur les concepts issus de la mécanique de la rupture enrichie. Le travail essaye de montrer l'influence des effets de bords (de confinement) sur l'étude de l'effet d'échelle en comparant les essais de flexion aux essais de traction directes.

Les résultats obtenus permettent une meilleure compréhension des mécanismes de fissuration intervenant dans la rupture du béton.

Mots-clés :

Béton, fissuration, zone de processus de rupture (FPZ), effet d'échelle, endommagement, modélisation mésoscopique, mécanique de la rupture.

Abstract

Concrete is considered as the most widely used construction material in the world. However, due to its quasi-brittle nature, its failure is accompanied by the formation of cracks at the microstructure scale that interact with each other in a zone of relatively large size compared to the size of the structure. This zone, called Fracture Process Zone (FPZ), plays a fundamental role in the appearance of scale effects observed during experimental tests. The scale effect is manifested by a dependence of the fracture characteristics (maximum resistance, etc.) of structures on their dimensions.

This dissertation provides a numerical contribution to the study of concrete fracture behavior through mesoscopic-scale modeling combined with a regularized damage model. The objective is to analyze the influence of scale on the global and local mechanical response of the material, with particular attention paid to the evolution of the FPZ. The numerical analysis highlights the central role of the FPZ in the scale effect phenomenon, drawing on concepts from enhanced fracture mechanics. The work attempts to demonstrate the influence of edge (confinement) effects on the study of the scale effect by comparing bending tests with direct tensile tests.

The results obtained provide a better understanding of the cracking mechanisms involved in concrete failure.

Keywords:

Concrete, cracking, fracture process zone (FPZ), size effect, damage, mesoscopic modeling fracture mechanics.

ملخص

تعتبر الخرسانة أكثر مواد البناء استخدامًا في العالم. ومع ذلك، بسبب طبيعتها الهشة إلى حد ما، فإن فشلها يكون مصحوبًا بتكوين شقوق على نطاق البنية الدقيقة والتي تتفاعل مع بعضها البعض في منطقة ذات حجم كبير نسبيًا مقارنة بحجم البنية. تلعب هذه المنطقة، والتي تسمى منطقة عملية الكسر (FPZ)، دورًا أساسيًا في ظهور تأثيرات الحجم التي لوحظت أثناء الاختبارات التجريبية. يتجلى تأثير المقياس من خلال اعتماد خصائص الكسر (المقاومة القصوى، وما إلى ذلك) للهياكل على أبعادها.

تقدم هذه الأطروحة مساهمة رقمية في دراسة سلوك الخرسانة أثناء التمزق، من خلال النمذجة على نطاق متوسط مع نموذج الضرر المنتظم. الهدف هو تحليل تأثير المقياس على الاستجابة الميكانيكية العالمية والمحلية للمادة، مع إيلاء اهتمام خاص لتطور FPZ. يسلط التحليل العددي الضوء على الدور المركزي لمنطقة FPZ في ظاهرة تأثير المقياس، استنادًا إلى المفاهيم المستمدة من ميكانيكا الكسر المخصصة. يحاول هذا العمل إظهار تأثير تأثيرات الحافة (الحصر) على دراسة تأثير المقياس من خلال مقارنة اختبارات الانحناء مع اختبارات الشد المباشر.

الكلمات المفتاحية

الخرسانة، التصدع، منطقة عملية الانفصال تأثير الحجم، الضرر، النمذجة المتوسطة، ميكانيكا الكسر.

Table des matières

Remerciements.....	I
Résumé	IV
Abstract.....	V
ملخص.....	VI
Introduction générale.....	1
Structure et méthodologie.....	2
CHAPITRE 1:Etude Bibliographique	3
1.1 Introduction de chapitre.....	4
1.2 Analyse de l'effet d'échelle et rupture des matériaux quasi-fragiles : rôle de la FPZ	4
1.2.1 Introduction.....	4
1.2.2 Impact de l'effet d'échelle sur les structures en béton : approche à l'échelle des matériaux	4
1.2.3 Étude des théories de l'effet d'échelle dans les matériaux quasi-fragiles: principes fondamentaux et lois associées	6
1.2.4 Évaluation de la pertinence des théories de l'effet d'échelle pour les matériaux quasi-fragiles.....	9
1.2.5 l'impact de la zone de fissuration sur la rupture des matériaux quasi- fragiles.....	11
1.2.6 Modélisation de la zone de FPZ dans le béton	12
1.2.7 Méthodes expérimentales de caractérisation de la FPZ dans les matériaux semi-fragiles	15
1.3 La complexité des méthodes de modélisation concrètes et multi-échelles	15
1.3.1 Comportement plastique et endommageable des matériaux en ingénierie : théorie et applications	17
1.3.2 Mécanique de la rupture	18
1.3.3 Modèles numériques adaptés pour la modélisation mésoscopique du béton	22
1.4 Déformations localisées : État du problème et stratégies de régularisation	25
1.4.1 Régularisation énergétique pour la simulation numérique	25
1.4.2 Régularisation non locale pour la simulation numérique	25
1.5 Effet d'échelle et durabilité des structures en béton.....	27
1.5.1 Impact de l'effet d'échelle sur la fissuration due au retrait et au fluage	27
1.5.2 Effet d'échelle sur la propagation des fissures sous l'effet des cycles de gel-degel	28
1.5.3 Influence de la taille des éprouvettes sur la caractérisation de la résistance à la corrosion	28
1.6 Application spécifiques de l'effet d'échelle dans le génie civil.....	28
1.6.1 Effet d'échelle dans les ponts et les grands structures	29

1.6.2	Effet d'échelle dans les éléments préfabriqués	29
1.7	Conclusion	30
CHAPITRE 2: Analyse mésoscopique de l'effet d'échelle dans les poutres en béton.....		31
2.1	Introduction.....	32
2.1	32
2.2	Modélisation mésoscopique du béton	32
2.2.1	Caractéristiques des poutres testés expérimentalement.....	32
	34
2.2.2	Approche mésoscopique adoptée et simulation des poutres entaillées	34
2.2.3	Paramètres du modèle et maillage éléments finis	35
2.3	Caractérisation des paramètres de rupture via les lois d'effet d'échelle	36
2.3.1	Loi classique de Bazant	36
2.3.2	L'approche MMTS	36
2.4	Analyse numérique mésoscopique de l'effet d'échelle	41
2.4.1	Effet d'échelle sur le comportement global	41
2.4.2	Effet d'échelle sur la contrainte nominale.....	42
2.5	Effet d'échelle sur la FPZ.....	46
2.5.1	Formules analytiques d'évolution de la FPZ.....	46
2.5.2	Analyse numérique mésoscopique de la variation de la FPZ	48
2.6	Conclusion de chapitre	51
CHAPITRE 3:Analyse de l'effet d'échelle du béton en traction direct.....		52
3.1	Introduction de chapitre.....	53
3.2	Principes de la traction directe.....	53
3.2.1	Spécificités liées au béton.....	53
3.2.2	Intérêt pour l'effet d'échelle	53
3.3	Comportement du béton en traction	54
3.3.1	Comportement pré-rupture	54
3.3.2	Initiation de la fissuration	54
3.3.3	Zone de processus de rupture (FPZ)	54
3.4	Modélisation numérique du béton sous CAST3M.....	55
3.4.1	Objectifs de la modélisation	55
3.4.2	Conditions aux limites.....	55
3.4.3	Suivi et exploitation des résultats.....	55
3.4.4	Evaluation de la FPZ	57
3.5	Comparaison des résultats de l'effet d'échelle: Flexion /traction	59
3.6	Conclusion de chapitre	60

Conclusion générale	62
Bibliographie.....	63

Table des figures

Figure 1-1: Réponses contrainte-flèches pour différentes tailles des structures quasi-fragiles 5 (Bažant 2005).....	5
Figure 1-2: Loi d'effet d'échelle énergétique pour des structures quasi-fragiles entaillées 7 (Bažant 2005).....	7
Figure 1- 3 : (a) Fissure fractale et la zone d'élaboration, (b) courbe fractale de Von..... 9 Koch pour différents niveaux de détail (Bazant, 2005).....	9
Figure 1-4: Prédominance des données d'essai dans la gamme de petite taille : 10 Histogramme base de données de ACI-445.....	10
Figure 1-5 : Comparaison entre différentes lois d'effet d'échelle (Van Mier 2012).....	10
Figure 1-6: Différents types de zones de rupture (Karihaloo 1995) avec (L= zone hachuréesignifie linéaire), (N= zone rouge signifie non linéaire) et (F= zone verte signifie FPZ).	11
Figure 1- 7: Comportement nonlinéaire (relation contrainte-déplacement).	12
Figure 1-8: Évolution de la contraintes de cohésion avec l'ouverture de fissure (zone FPZ).	13
Figure 1-9: modèle de décroissance de la cohésion : linéaire et binaire.	13
Figure 1-10: schéma du modèle Crack Band de Bazant et Oh (1983).	14
Figure 1-11: Comparaison entre modélisation discrète et modélisation continue de la fissuration	14
Figure 1-12: Échelle de modélisation: a) Approche FEM [Pedersen et al., 2007] 16 b) Approche DEM [Kat-saga, 2010], c) Approche Lattices [Grassl et al., 2012].....	16
Figure 1-13: Zone délimitant le voisinage de la pointe d'une fissure dans un milieu fissuré.	18
Figure 1-14: Représentation schématique de la mécanique linéaire élastique de la rupture équivalente (Gagnant 2016).....	21
Figure 1-15: Évaluation de la résistance à la propagation de la fissure (Gagnant 2016).	22
Figure 1-16: Modèles numériques adaptés à la modélisation mésoscopique du béton.	23
Figure 1-17 : impact de l'effet d'échelle sur la fissuration due au retrait et au fluage.....	27
Figure 1-18 :.Essai de retrait/fluage sur différentes tailles d'éprouvettes.	28
Figure 1-19 : Effet d'échelle dans les barrages en béton..... Error! Bookmark not defined.	
Figure 2-1: Détails de la géométrie des poutres étudiées expérimentalement.....	33
Figure 2- 2 : Résultats expérimentaux Forces-CMOD, a) poutres HN et b) poutres FN.	34
.....	34
Figure 2-3: Maillage Macro/Méso des poutres.	35
Figure 2- 3: Courbes Force-CMOD pour les poutres 400, 200, 100 et 50mm, FN et HN.	42
Figure 2-4: Effet d'échelle sur la contrainte nominale des poutres HN et FN (Exp -Num).	44
Figure 2- 5: Comparaison loi d'effet d'échelle de Bazant, MMTS, résultats expérimentales et... 45 Méso.	45
Figure 2- 6: Evolution de la longueur de la FPZ selon le modèle Bazant -MMTS, (a) poutres FN, (b) poutre HN.	48
Figure 2-7 Propagation de la FPZ et extension de la fissure : initiation de la FPZ (a), ouverture complète (b), propagation de la fissure (c).	49
Figure 2-8 : Evolution de la contrainte tangentielle à la pointe de l'entaille en fonction des pas de chargement pour les poutres FN (a) et HN (b).....	49
Figure 2-9 : Variation de la contrainte tangentielle en fonction de la hauteur (FN-HN).	50
Figure 3-1 : Courbe de la force en fonction du déplacement pour les poutres FN 55	55
Figure 3-2 : Courbes Contrainte nominale-déplacement obtenues par simulation numérique en traction directe.....	56
Figure 3-3 : Effet d'échelle sur la contrainte nominale.....	57
Figure 3-4: Carte d'endommagement et d'ouverture de fissure-Poutre h=50mm.	57
Figure 3-5: Carte d'endommagement et d'ouverture de fissure-Poutre h=100mm.	58
Figure 3-6 : Variation de la contrainte tangentielle en fonction de la hauteur au pic du chargement.....	58

Figure 3-7 : Variation de la contrainte tangentielle en fonction de la hauteur à la fin du chargement.....	59
Figure 3-8: Comparaison de la Contrainte nominale en fonction de la hauteurde poutre(flexion /traction).....	60

Liste des tableaux

Tableau 2-1 : Dimensions des poutres HN ($\alpha=0.5$), forces moyennes et contraintes nominales. .	32
Tableau 2-2 : Dimensions des poutres FN ($\alpha=0.2$), forces moyennes et contraintes nominales. .	33
Tableau 2-3: Paramètres utilisés dans la modélisation mésoscopique	35
Tableau 2-4 :Détermination des paramètres de rupture et de fissuration avec la loi classique d'effet.	40
Tableau 2-5: Paramètres de rupture selon le modèle MMTS	40
Tableau 2-6: Dimension de poutre HN et FN, les charges au pic et contraintes nominales	43
(Expérimentales et Numériques).	43
Tableau 3-1 : Dimensions des poutres FN, forces et contraintes nominales.	56

Symboles et caractères utilisés

σ_{ij}^e	Tenseur de contrainte
ε_{ij}^e	Tenseur de déformation élastique
ε_{ij}^p	Tenseur des déformations plastiques
C_{ijkl}^{endo}	Tenseur d'élasticité endommagé
ε_{kl}	Tenseur de déformation totale
ε^f	Déformation de rupture (d'ouverture de fissure)
C_{ijkl}^0	Tenseur d'élasticité initiale
W	Densité d'énergie dissipée par unité de volume
G_f	Energie de fissuration
h	Largeur de la bande de localisation
f_t	Résistance à la traction du matériau
D_0	Taille de transition
D , w, h	Hauteur de poutres
P_{max}	Effort maximal au pic
\emptyset	Contrainte d'Airy
$1/\sqrt{r}$	Singularité
σ_N	Contrainte nominale
r_c	Longueur de la FPZ
A_n, B_n	Coefficients correspondant au mode I et mode II
A_1^*, A_3^*	Coefficients adimensionnels
$c_f, l_{p\infty}$	Longueur de fissure équivalente
a_0	Longueur de l'entaille initiale
c, l_p	Longueur équivalente de la zone non linéaire de la FPZ

S Portée de spécimen

B Epaisseur du spécimen

D' Longueur du ligament

$L_{fissure}$ Longueur de fissure

Introduction générale

Le béton continue de susciter un intérêt considérable dans la recherche fondamentale et les investigations expérimentales. Un fait expérimental largement reconnu pour les structures en béton est la forte influence de la taille des échantillons sur leurs propriétés de rupture, telles que la résistance nominale, la ténacité et l'énergie de rupture. Ces effets d'échelle ont un impact direct sur le comportement mécanique des structures en béton.

Une difficulté majeure réside dans l'extrapolation des propriétés mécaniques déterminées en laboratoire sur des éprouvettes de dimensions limitées au comportement des ouvrages réels, souvent de taille beaucoup plus importante. En effet, la gamme de taille des essais de laboratoire est généralement restreinte, contrastant avec l'échelle des structures de génie civil comme les barrages ou les piles de ponts. Cette disparité dimensionnelle se traduit par une évolution du comportement : d'un mode quasi-fragile observé en laboratoire (éprouvettes, poteaux, poutres) à une rupture potentiellement fragile à l'échelle des grandes structures.

Plusieurs explications ont été avancées. Une constatation évidente est que l'origine de l'effet d'échelle se situe au niveau microstructural du matériau. Le béton est un matériau hétérogène complexe, composé d'agrégats, d'une matrice de mortier (avec ses propres constituants) et d'une zone de transition interfaciale. Les interactions à cette échelle microscopique sont responsables du développement d'une zone de microfissuration à l'extrémité d'une fissure. L'accumulation, l'interaction et la coalescence de ces microfissures au sein de cette région, appelée Zone de Processus de Fissuration (Fracture Process Zone), entraînent un adoucissement du comportement mécanique, résultant d'une localisation significative des déformations.

La FPZ joue également un rôle essentiel dans la redistribution des contraintes. Ce transfert de contraintes à travers les faces de la fissure est un phénomène dissipatif. Lorsque l'énergie stockée dans la structure est libérée, une fissure macroscopique s'amorce et se propage de manière stable. On observe alors une transition d'un comportement non local, régi par des interactions au sein de la FPZ, vers un comportement local, dominé par la propagation de la fissure macroscopique. Cette redistribution des contraintes, associée à la libération d'énergie nécessaire à l'avancement de la fissure et au caractère local/non local des déformations dans la FPZ, est à l'origine des phénomènes complexes d'effet d'échelle. De manière générale, dans un processus de fissuration où le comportement local est régi par une dissipation d'énergie par unité de surface en réponse à une contrainte appliquée, la relation entre ces deux paramètres révèle une dépendance dimensionnelle qui se manifeste à différentes échelles.

L'objectif principal de ce mémoire est de caractériser le comportement de fissuration et de rupture du béton, en considérant sa nature hétérogène. La modélisation du béton implique des choix entre le phénomène étudié et l'échelle de modélisation pertinente. Durant le processus de fissuration, de multiples micro-mécanismes se produisent entre les constituants du béton, notamment aux interfaces granulats-matrice, menant au développement de la FPZ. Cette zone est intrinsèquement liée à l'hétérogénéité du béton. Il est donc crucial d'intégrer correctement ce caractère hétérogène pour une prédiction numérique plus réaliste de la dégradation. Deux échelles de modélisation sont pertinentes pour l'étude des phénomènes liés à l'hétérogénéité : l'échelle microscopique (nanomètre, hydratation du ciment) et l'échelle mésoscopique (centimètre, interaction granulats-mortier).

Étant donné que la FPZ a une taille typique de l'ordre du centimètre, l'échelle mésoscopique apparaît comme un choix pertinent, bien que la modélisation microscopique puisse offrir une description plus détaillée. La modélisation mésoscopique, moins exigeante en termes de paramètres et de temps de calcul, a conduit à l'adoption d'une description explicite du matériau par un béton numérique biphasique. L'approche de modélisation par éléments finis repose sur un

modèle d'endommagement isotrope. Le travail a pour objectif d'étudier les effets d'échelles des éléments en béton soumis à la flexion. Le problème des effets de confinement est mis en avant pour montrer les limites de ce genre d'essais dans l'étude de la FPZ. La propagation de cette dernière est contrainte par des efforts de compression limitant ainsi son développement. Des essais de traction numériques sont proposés pour remédier à ce problème. La pertinence de ces essais est ensuite discutée.

Structure et méthodologie

Ce mémoire est structuré autour des chapitres suivants :

Le premier chapitre constitue une revue de la littérature existante. Il aborde initialement le phénomène de l'effet d'échelle et le processus de rupture dans le béton, en mettant l'accent sur le rôle fondamental de la Zone de Processus de Rupture (FPZ). Différents critères d'effet d'échelle et divers modèles de simulation de la zone de rupture y sont présentés. Les principales approches numériques adaptées à la description de la mésostructure du béton sont également discutées. Enfin, les concepts clés de la mécanique de la rupture et de l'endommagement/plasticité pertinents pour l'étude de la rupture du béton sont brièvement exposés.

Le deuxième chapitre, est consacré à l'étude numérique de l'effet d'échelle dans les structures en béton. L'étude numérique repose sur une approche de modélisation à l'échelle mésoscopique, appliquée à une série de poutres en béton ayant fait l'objet d'essais expérimentaux de flexion trois points. Le comportement non linéaire du béton est simulé à l'aide d'un modèle d'endommagement isotrope régularisé. Dans un premier temps, une analyse de l'effet d'échelle sur l'ouverture et la propagation des fissures est menée en comparant les résultats numériques avec les données expérimentales. Dans un second temps, deux lois analytiques de l'effet d'échelle, à savoir la loi de Bazant et le modèle MMTS, sont utilisées pour analyser les résultats expérimentaux. En s'inspirant des méthodes basées sur l'enrichissement des champs de contraintes, une étude approfondie du comportement de la FPZ, de son influence sur la rupture et de l'effet d'échelle est établie.

Le troisième chapitre présente une étude spécifique des essais de traction directe appliqués à des poutres en béton. Ce chapitre détaillera la mise en œuvre de ces essais dans le contexte de l'étude de l'effet d'échelle et analysera les résultats obtenus, en les reliant aux observations et aux modèles présentés dans les chapitres précédents.

Une comparaison entre les résultats et les analyses présentés dans le chapitre 2 et le chapitre 3 est établie. Cette comparaison vise à identifier les similitudes et les différences dans la manifestation de l'effet d'échelle sous différents modes de sollicitation. Les implications de ces observations pour la compréhension globale du comportement à la rupture du béton et pour les modèles de dimensionnement seront discutées.

CHAPITRE 1.

Etude Bibliographique

1.1 Introduction de chapitre

L'effet d'échelle dans les structures en béton est un phénomène complexe et crucial en génie civil. Il se manifeste par une variation des propriétés mécaniques du béton en fonction de la taille de la structure. Cette variation, due à l'hétérogénéité du matériau et à la distribution des granulats, a des implications significatives pour la conception, l'analyse et la sécurité des ouvrages en béton. La compréhension de cet effet est essentielle pour dimensionner correctement les structures, évaluer la capacité portante des ouvrages existants et développer de nouveaux matériaux de béton plus performants. Les recherches sur l'effet d'échelle visent à explorer les mécanismes à l'origine du phénomène, à développer des méthodes de modélisation précises et à appliquer ces connaissances à la pratique du génie civil, garantissant ainsi la durabilité et la sécurité des constructions en béton.

1.2 Analyse de l'effet d'échelle et rupture des matériaux quasi-fragiles : rôle de la FPZ

1.2.1 Introduction

L'effet d'échelle et la rupture des matériaux quasi-fragiles, comme le béton, sont étroitement liés à la zone de processus de rupture (FPZ, pour Fracture Process Zone). Cette zone est cruciale car elle représente la région où les mécanismes de rupture se produisent avant que la fissuration ne se propage de manière significative. Dans les matériaux quasi-fragiles, l'augmentation de la taille des spécimens peut entraîner une extension de la FPZ, ce qui influence la manière dont les contraintes sont réparties dans le matériau.

Lorsque la taille du spécimen augmente, la FPZ peut également devenir plus importante, ce qui peut entraîner une réduction de la contrainte nominale et une variation dans les propriétés de rupture. Les études montrent que cette zone de processus de rupture joue un rôle clé dans la ductilité et la ténacité du matériau. Par conséquent, comprendre l'influence de la FPZ est essentiel pour expliquer l'effet d'échelle dans les matériaux quasi-fragiles, car elle impacte directement le comportement mécanique et la résistance à la rupture des structures en béton.

L'objectif de ce chapitre est de fournir une revue de la littérature qui établira une fondation pour la compréhension des thèmes qui seront abordés par la suite. Nous examinerons le phénomène de l'effet d'échelle et le processus de rupture du béton, en mettant l'accent sur le rôle de la zone de fissuration (FPZ). Nous présenterons divers critères qui décrivent l'effet d'échelle ainsi que plusieurs modèles de simulation de la zone de fissuration. De plus, les concepts clés de la mécanique de l'endommagement et de la mécanique de la rupture, appliqués à l'analyse du comportement du béton, seront brièvement abordés.

1.2.2 Impact de l'effet d'échelle sur les structures en béton : approche à l'échelle des matériaux

L'effet d'échelle dans les structures en béton se manifeste de manière significative, surtout pour les matériaux quasi-fragiles comme le béton. Des études expérimentales (Nallathambi et al. 1984; Mindess 1984; Bazant & Pfeiffer 1987) ont révélé que les propriétés de rupture, telles que la ténacité et l'énergie de rupture, sont largement influencées par la taille des échantillons examinés. L'augmentation de la taille des spécimens a un impact direct sur le comportement mécanique du béton, entraînant une réduction de la contrainte nominale sous une sollicitation

uniaxiale, ce qui est censé être une caractéristique intrinsèque du matériau. De plus, la réponse post-pic, c'est-à-dire la ductilité, est également affectée par ce changement d'échelle. Ce phénomène, connu sous le nom d'effet d'échelle, a été largement observé dans diverses études pour différents matériaux et géométries. Cependant, l'explication de ce phénomène dans le cas du béton, qui est un matériau hétérogène, demeure un sujet de recherche actif. La gamme dimensionnelle limitée des expériences au laboratoire, pose des défis pour l'extrapolation des résultats aux dimensions structurelles pratiques. Le comportement quasi-fragile observé dans les éprouvettes peut ne pas se traduire directement dans des ouvrages de plus grande taille, où le béton se comporte de manière plus fragile.

Il est essentiel de prendre en compte les effets de changement d'échelle lors de la conception et de l'analyse des structures en béton. Cela peut inclure l'étude des zones de processus de rupture, la distribution des contraintes et l'impact des défauts à grande échelle. Des approches telles que la modélisation numérique ou l'utilisation de facteurs de correction peuvent aider à mieux prédire le comportement des structures en béton à grande échelle.

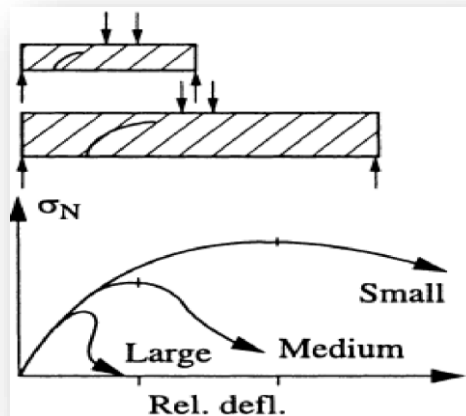


Figure 1-1: Réponses contrainte-flèches pour différentes tailles des structures quasi-fragiles (Bažant 2005).

La zone de processus de fissuration (FPZ) est l'endroit où la pression est redistribuée. Les pressions sont transférées en raison de mécanismes de durcissement différents qui se manifestent dans cette zone. Ce transfert de pression à travers les bords des fissures est un phénomène de dispersion. Une fois que toute l'énergie stockée est libérée, la fissure est en état de liberté et une fissure macroscopique commence à se propager de manière stable.

Nous passons d'une phase de réactions non locales à une phase de concentration, ce qui entraîne un ramollissement lié à la rupture. Les phénomènes associés à la transition d'une phase non locale à une phase de concentration (redistribution des pressions, libération de l'énergie liée à la propagation des fissures ou, de manière générale, au développement de la FPZ, ramollissement, etc.) sont ceux qui causent cette dépendance dimensionnelle qui apparaît au niveau de la structure. De ce point de vue, l'effet d'échelle est un phénomène énergétique.

1.2.3 Étude des théories de l'effet d'échelle dans les matériaux quasi-fragiles: principes fondamentaux et lois associées

Historiquement, plusieurs approches ont été proposées pour expliquer et prédire les effets d'échelle. Le béton, en tant que matériau quasi-fragile, a été l'objet de recherches approfondies pendant une longue période. En raison de sa nature hétérogène, diverses théories, également hétérogènes, ont été élaborées pour décrire cet effet d'échelle. Parmi celles-ci, nous pouvons mentionner :

- La théorie statistique de la distribution aléatoire de la résistance.
- La théorie déterministe de Bazant.
- La théorie de la fractalité des fissures.

1.2.3.1 La théorie statistique de weibull

Weibull a introduit en 1939 une théorie statistique relative à la résistance des matériaux (Weibull, 1951). Selon cette théorie, une chaîne composée de « n » maillons se brise lorsqu'un seul maillon cède, ce qui repose sur l'hypothèse du maillon faible. La théorie de Weibull repose sur deux postulats fondamentaux :

- Lorsqu'un petit élément de matière atteint sa résistance limite, la rupture de la structure se produit.
- La probabilité P qu'un petit élément de matière ne cède pas à une contrainte inférieure à σ est exprimée par l'équation suivante :

$$P(\sigma) = \left(\frac{\sigma - \sigma_u}{\sigma_0}\right)^m \text{ pour } (\sigma > \sigma_u)$$

$$P(\sigma) = 0 \text{ pour } (\sigma \leq \sigma_u)$$

Une extension tridimensionnelle aboutit à la distribution probabiliste suivante (Bazant, 2005) :

$$P(\sigma_N) = 1 - \exp \left[- \int_V c[\sigma(x), \sigma_N] dV(x) \right] \quad (1.1)$$

Pour un volume V d'une éprouvette d'essai très grande, la présence de défauts dans le matériau est significative, ce qui entraîne une résistance réduite de cette éprouvette (Miled, 2005). C'est une explication simplifiée de l'effet d'échelle probabiliste. Selon Bazant (Bazant, 2005), en ce qui concerne les structures en béton et d'autres matériaux quasi-fragiles, la théorie de Weibull ne parvient pas à rendre compte des effets d'échelle, car ces structures sont conçues pour céder uniquement après une croissance importante et stable des fissures.

1.2.3.2 La théorie déterministe

L'étude déterministe de l'effet d'échelle sur les matériaux quasi-fragiles comme le béton a été initiée par Leicester, qui a souligné l'importance de l'inhomogénéité et des défauts géométriques. Bazant a ensuite démontré que la localisation de l'endommagement entraîne un effet d'échelle sur la résistance et la dissipation d'énergie, en proposant le Crack Band Model pour expliquer la libération d'énergie lors de la rupture. Il a également introduit la loi d'effet d'échelle, basée sur le critère énergétique de Griffith, pour formaliser cette relation:

$$\sigma_N = \frac{B f_t}{\sqrt{1 + D/D_0}} \quad (1.2)$$

La contrainte nominale, notée σ_N , est influencée par la taille caractéristique de la structure, D , ainsi que par deux constantes empiriques, B et D_0 , qui sont déterminées par la calibration des résultats expérimentaux sur des spécimens géométriquement similaires. Ces paramètres dépendent de la géométrie de la structure. La résistance à la traction du matériau est représentée par f_t .

La loi d'effet d'échelle décrit deux comportements asymptotiques : la théorie de résistance, qui repose sur des critères de résistance comme la plasticité, et la mécanique linéaire de la rupture (LEFM). Le point d'intersection de ces comportements est une constante D_0 , dépendante de la géométrie, appelée taille de transition. Pour les structures de petite taille ($D \ll D_0$), la zone de fissuration (FPZ) occupe tout le volume, conduisant à une rupture sans propagation de fissures, et un comportement ductile avec un effet d'échelle négligeable. Dans ce cas, l'analyse limite basée sur la plasticité est appropriée pour estimer la contrainte nominale.

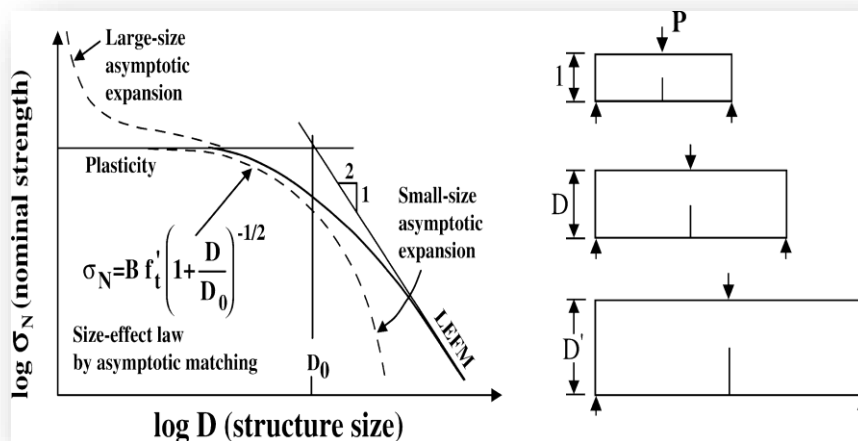


Figure 1-2: Loi d'effet d'échelle énergétique pour des structures quasi-fragiles entaillées (Bazant 2005).

En effet, pour les grandes tailles, lorsque D est beaucoup plus grand que D_0 , la mécanique linéaire de la rupture (MLER) devient applicable. La contrainte nominale σ_N est alors inversement proportionnelle à la racine carrée de la dimension structurelle, ce qui signifie que la

FPZ ne représente qu'une petite fraction du volume total de la structure. Dans cette situation, la plupart de la structure se comporte de manière élastique, et la FPZ est soumise à un champ de déplacement et de contrainte élastique, ce qui justifie l'utilisation de la MLER. Concernant les matériaux quasi-fragiles comme le béton, l'effet d'échelle de transition entre le critère de résistance et la MLER est bien illustré par l'approche de Bazant et Planas, qui établit une relation entre la libération d'énergie $2k (a_0 + c_f) B \Delta a \sigma_N^2$ et l'extension de fissure $B G_f \Delta a$.

$$2k (a_0 + c_f) B \Delta a \sigma_N^2 / 2E = B G_f \Delta a \quad (1.3)$$

L'équation (1.2) susmentionnée est effectivement essentielle pour comprendre l'effet d'échelle de transition dans les structures en béton. Elle montre une bonne correspondance avec les deux comportements extrêmes, à savoir l'analyse plastique et la mécanique linéaire de la rupture (MLER). Les différentes approches analytiques, comme le modèle de fissure cohésive et les expansions asymptotiques, ainsi que les validations par des simulations numériques, illustrent l'importance de cette formule. Les travaux de chercheurs tels que Kim et Morel soulignent l'évolution continue des recherches dans ce domaine, ce qui enrichit notre compréhension des mécanismes de rupture.

1.2.3.3 La théorie fractale de Carpinteri

Carpinteri (Carpinteri, 1994a, 1994b; Carpinteri et al., 1995) a proposé une nouvelle perspective sur l'effet d'échelle, fondée sur des recherches approfondies concernant les caractéristiques des fissures dans divers matériaux. Il en déduit que cet effet est principalement attribuable aux différences dans les caractéristiques fractales des fissures (ou microfissures) qui apparaissent à différentes échelles d'observation dans les matériaux quasi-fragiles (voir Figure -13).

La théorie fractale ne repose pas sur la mécanique de la rupture, mais s'appuie sur des considérations géométriques strictes (Miled, 2005). Cependant, elle a suscité de vives critiques dans la littérature, notamment de la part de Bazant (Bazant, 1995). Ce dernier a démontré que, pour des raisons tant mathématiques que physiques, cette théorie ne peut pas rendre compte de l'effet d'échelle observé dans les matériaux quasi-fragiles. Selon Bazant (Bazant, 1995), le concept fractal contredit les résultats expérimentaux.

La loi d'effet d'échelle proposée par Carpinteri s'exprime comme suit :

$$\frac{f_t}{f'_t} = \beta \sqrt{1 + \frac{l_M}{D}} \quad (1.4)$$

Avec

f_t la résistance du matériau, D la taille de la structure, f'_t la résistance maximale du matériau, l_M une longueur caractéristique qui dépend du matériau et de la géométrie, β un paramètre de la loi. Bien que prometteuse, l'utilisation de ce type de formulation fait l'objet de nombreuses discussions (Bažant & Yavari 2005; Carpinteri et al. 2007) qui remettent en cause les hypothèses et les champs d'application de la théorie fractale dans le cas de la fissuration

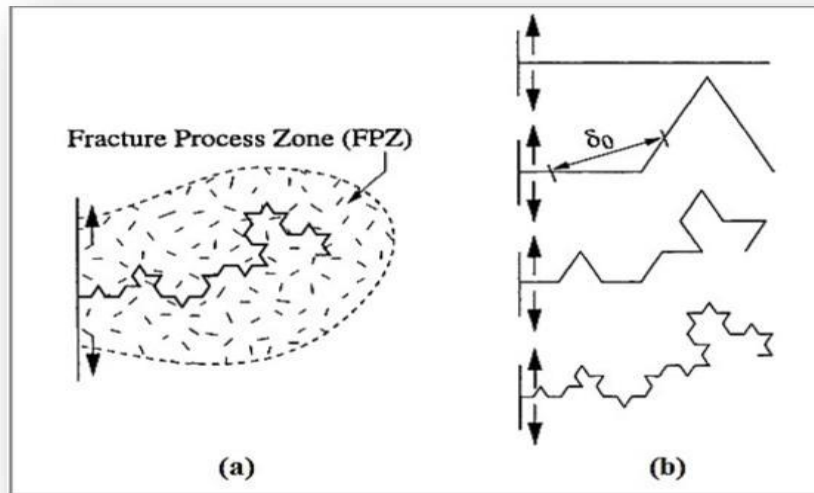


Figure 1- 3 : (a) Fissure fractale et la zone d'élaboration, (b) courbe fractale de Von Koch pour différents niveaux de détail (Bazant, 2005).

1.2.4 Évaluation de la pertinence des théories de l'effet d'échelle pour les matériaux quasi-fragiles

Les trois théories d'effet d'échelle mentionnées précédemment, bien qu'elles soient largement adoptées aujourd'hui, continuent de susciter des débats quant à leur pertinence et leur validité. L'une des raisons principales de cette controverse est le manque de données expérimentales suffisantes pour permettre une évaluation claire entre les différentes théories. De plus, la réalisation d'essais à grande échelle reste un défi, comme le montre bien la Figure (1.4), qui met en évidence l'absence de données à grande échelle. Ces essais ont tendance à présenter un comportement plus fragile que les échantillons habituels utilisés en laboratoire.

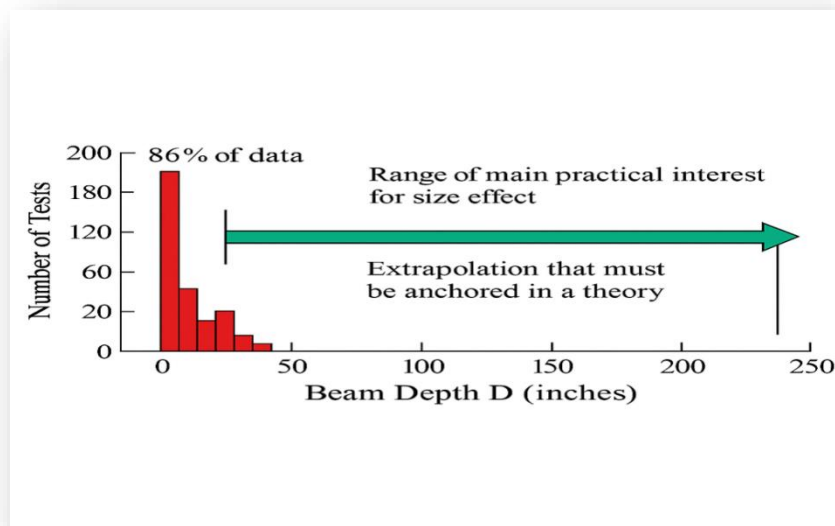


Figure 1-4: Prédominance des données d'essai dans la gamme de petite taille : Histogramme base de données de ACI-445.

La plupart des théories suggèrent des résultats similaires pour des essais à l'échelle du laboratoire, mais elles divergent pour les structures à grande échelle. La Figure (1.5) présente une comparaison de divers modèles d'effet d'échelle sur un graphique logarithmique, ainsi que l'éventail des données expérimentales disponibles. Dans l'étude de Karihaloo et al. (2003), plusieurs modèles d'effet d'échelle ont été récemment analysés. Toutefois, aucune conclusion définitive n'a pu être établie.

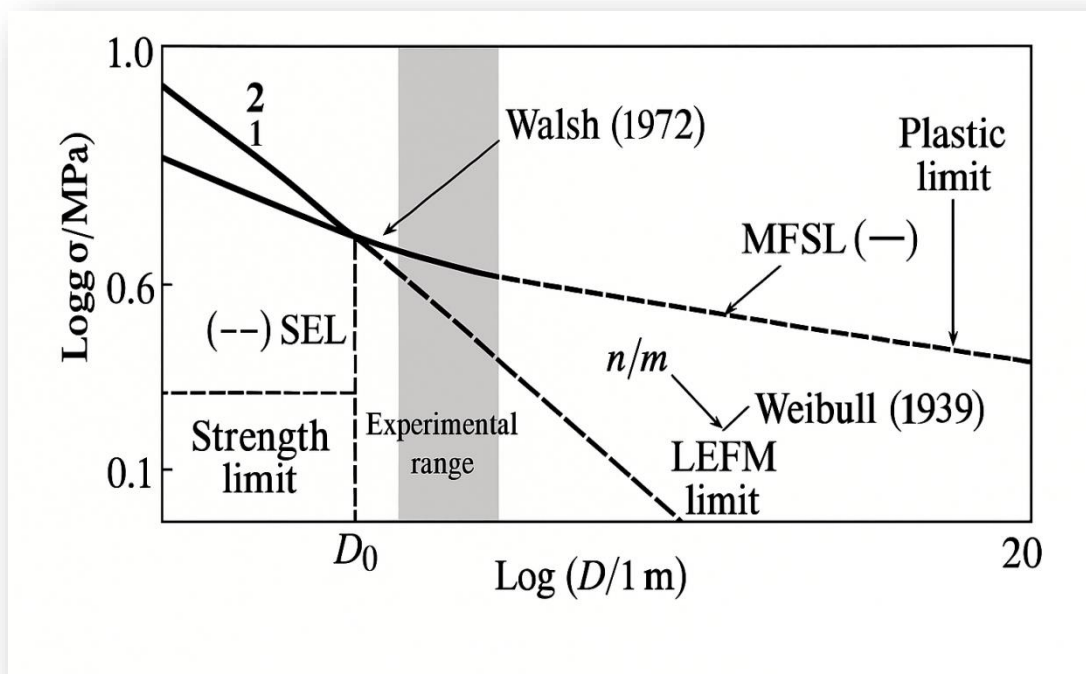


Figure 1-5 : Comparaison entre différentes lois d'effet d'échelle (Van Mier 2012).

1.2.5 l'impact de la zone de fissuration sur la rupture des matériaux quasi-fragiles

La rupture dans les matériaux quasi-fragiles, tels que le béton, est caractérisée par l'existence d'une large zone non-linéaire à la pointe de la fissure. Cette zone se compose de deux sous-zones non-linéaires : la première est une zone de microfissuration appelée zone de processus de rupture (FPZ), qui est caractérisée par un adoucissement progressif, c'est-à-dire une décroissance de la contrainte durant l'augmentation de la déformation. La deuxième zone est une zone plastique non-linéaire, mais non adoucissante.

Le comportement de rupture du matériau est influencé par le rapport de ces deux zones non-linéaires, ou plus spécifiquement, par le rapport entre la zone non-linéaire et la taille de la structure. La figure (1.6) représente les différents types de zones de rupture pour différents matériaux.

La mécanique linéaire de la rupture (MLER) peut être appliquée aux matériaux présentant une taille négligeable de la FPZ. Cependant, dans les matériaux quasi-fragiles, la taille de la FPZ est souvent considérable comparée à la taille de la structure, donc la MLER ne peut pas être appliquée.

Il est donc nécessaire d'utiliser la mécanique non-linéaire de la rupture pour étudier la rupture dans les matériaux quasi-fragiles. Cela nécessite une bonne compréhension de la FPZ et de ses propriétés, telles que sa taille, pour déterminer un modèle approprié.

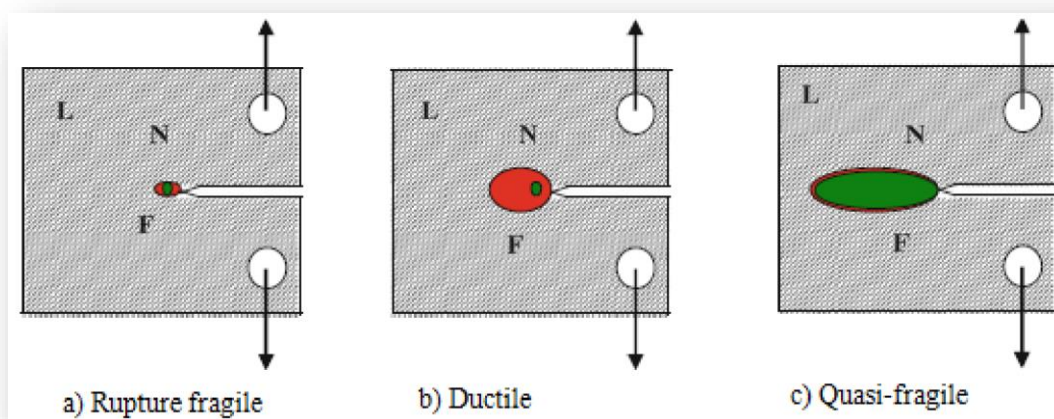


Figure 1-6: Différents types de zones de rupture (Karihaloo 1995) avec (L= zone hachurée signifie linéaire), (N= zone rouge signifie non linéaire) et (F= zone verte signifie FPZ).

La figure (1.7) représente les différents comportements non linéaires sous traction uniaxiale pour les trois types de matériaux mentionnés précédemment. La présence de la FPZ devant une fissure ouverte pose un défi analytique dans le cadre de la mécanique continue des solides pour étudier la rupture du béton.

La traduction numérique et analytique du comportement de cette zone a conduit au développement de plusieurs modèles et méthodes numériques.

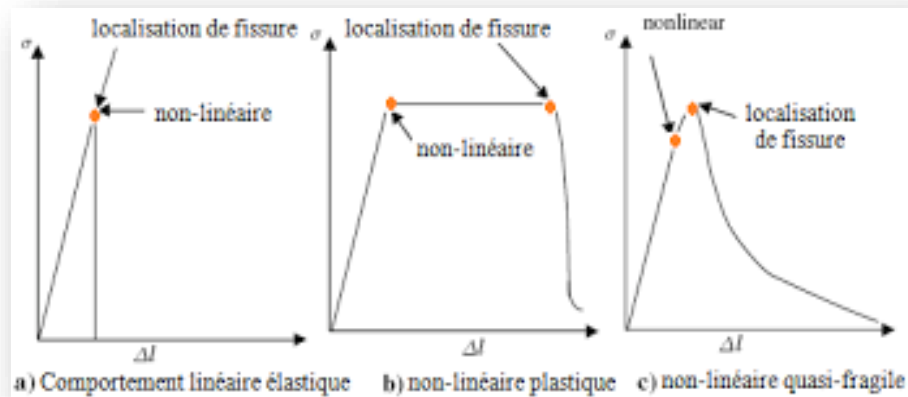


Figure 1- 7: Comportement nonlinéaire (relation contrainte-déplacement).

1.2.6 Modélisation de la zone de FPZ dans le béton

Divers modèles numériques ont été développés pour simuler le FPZ dans différentes conditions de chargement. Parmi les approches les plus efficaces, on distingue principalement deux concepts : l'approche de la fissure cohésive, qui s'appuie sur le modèle de fissure discrète, et l'approche de la fissure diffusive, qui s'appuie sur des modèles de fissuration continue.

1.2.6.1 Le modèle de la fissure cohésive

Le modèle de fissure cohésive, inspiré des travaux de Dugdale et Barenblatt (1962) et proposé par Hillerborg et al. (1976), décrivent la rupture du béton dans le premier mode comme un transfert progressif des contraintes de cohésion entre les états intacts et fissurés du matériau.

Pour représenter la zone de processus de fracture (FPZ), Hillerborg utilise des contraintes de cohésion qui varient en fonction de l'ouverture de la fissure. Le FPZ est alors modélisé par une fissure imaginaire qui subit des forces équivalentes aux contraintes de cohésion transmises au matériau environnant.

Dans la FPZ (Figure 1-8), la contrainte de cohésion atteint un maximum au fond de fissure, la résistance à la traction f_t , puis diminue progressivement jusqu'à disparaître lorsque l'ouverture critique de fissure est atteinte.

L'aire sous la courbe liée à la contrainte d'ouverture de fissure correspond au taux de libération d'énergie, noté G_f . Mathématiquement, cela s'exprime par l'intégrale :

$$G_f = \int_0^{w_c} f(w)dw \quad (1.5)$$

Où $f(w)$ représente la fonction adoucissante du matériau. Cette fonction, qui reflète le comportement intrinsèque du béton lors de la fissuration, doit être déterminée expérimentalement par des essais en laboratoire.

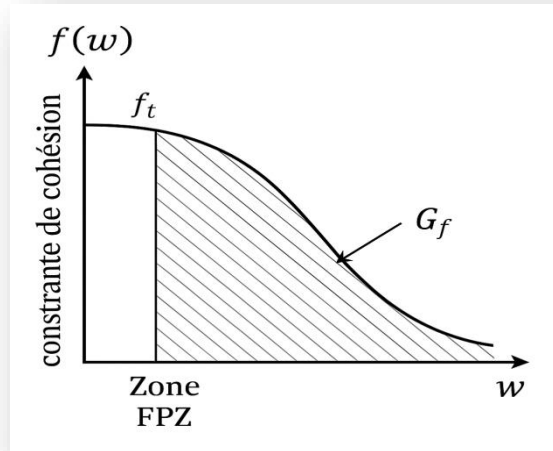


Figure 1-8: Évolution de la contraintes de cohésion avec l'ouverture de fissure (zone FPZ).

Plusieurs modèles ont été proposés pour décrire cette évolution de l'adoucissement. Certains chercheurs, comme Hillerborg et al. (1976) ont adopté une approche linéaire, tandis que Peterson (1981) a présenté une version bilinéaire plus précise (figure 1-9).

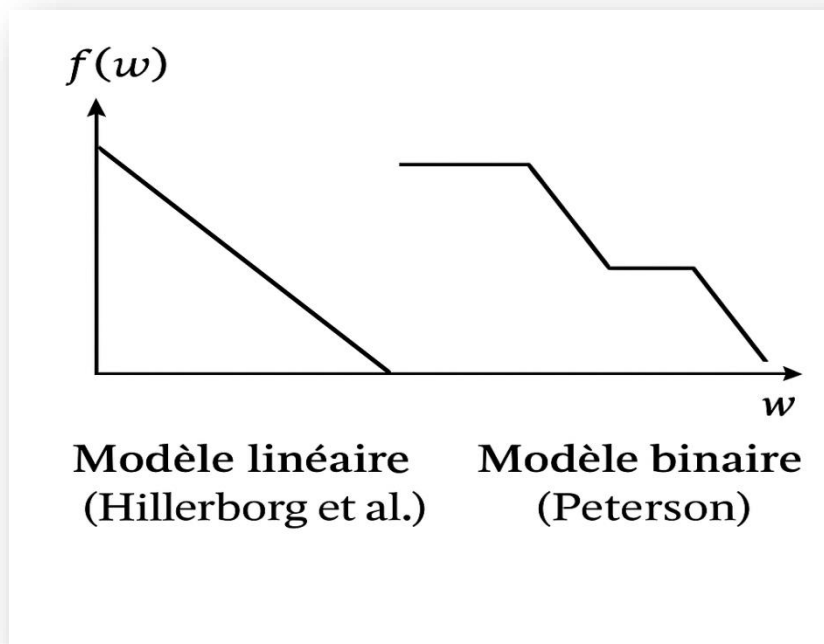


Figure 1-9: modèle de décroissance de la cohésion : linéaire et binaire.

1.2.6.2 Le modèle Crack band

Le modèle Crack Band, proposé par Bazant et Oh (1983), permet de représenter la zone de processus de fracture (FPZ) de manière continue. Ceci en répartissant les déformations inélastiques du FPZ sur une plage de largeur limitée h (Figure 1-10). Pour le béton ordinaire, cette largeur est supposée être trois fois supérieure à la taille du granulat généralement plus gros.

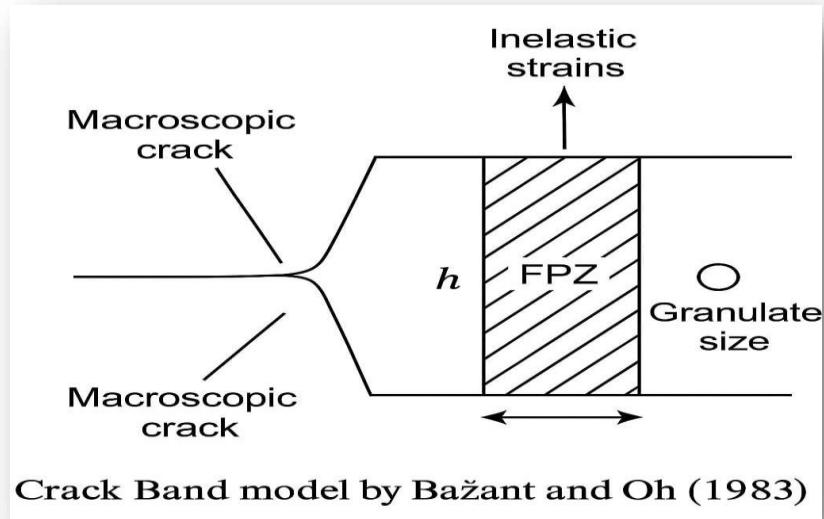


Figure 1-10: schéma du modèle Crack Band de Bazant et Oh (1983).

Le comportement d'un matériau est décrit par la relation contrainte-déformation. Dans la modélisation par éléments finis, la dureté et la résistance de l'élément fissuré sont réduites selon la loi de ramollissement, ce qui revient à une répartition discrète des fissures sur le maillage pour simuler l'endommagement. La figure 1-11 montre la différence entre cette approche continue et l'approche discrète basée sur la fente macroscopique distincte.

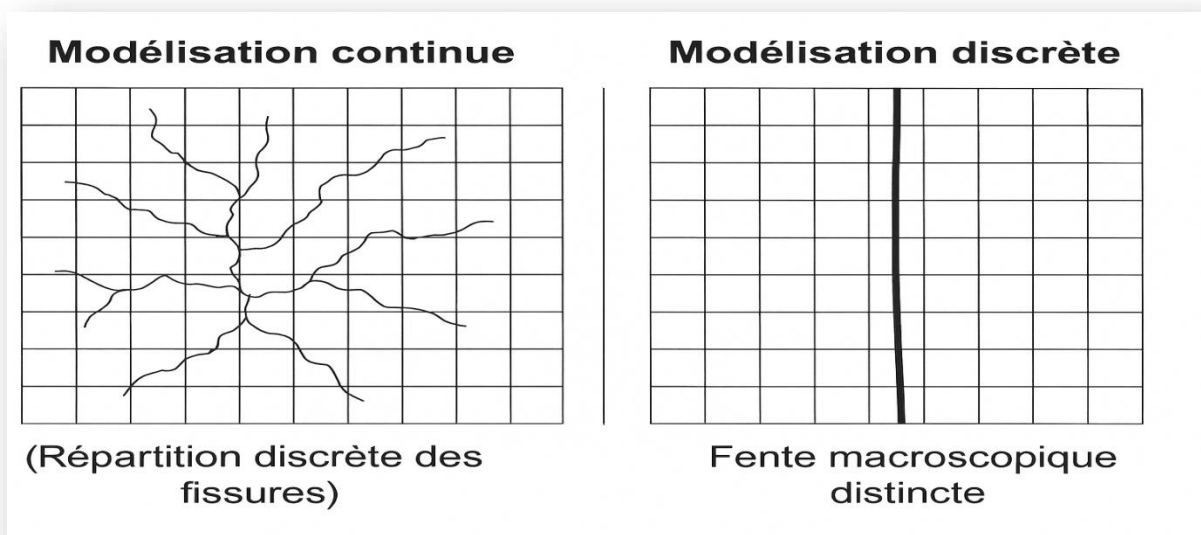


Figure 1-11: Comparaison entre modélisation discrète et modélisation continue de la fissuration .

1.2.6.3 Le modèle non local

Les modèles non locaux prennent en compte une longueur interne caractéristique du matériau, associée au caractère hétérogène de la mésostructure du béton. Cette longueur interne permet ainsi de déterminer les interactions locales tout en évitant les distorsions de localisation. Ces modèles proposent une répartition plus continue et uniforme des contraintes dans la zone de fracturation (FPZ).

Ils peuvent s'appuyer sur une formule intégrale (Bažant&Jirásek, 2002 ; Pijaudier-Cabo&Bažant, 1987) ou sur un gradient de déformations ou de variables endogènes (Frémond & Nedjar, 1995). Dans ces approches, la contrainte en un point résulte de la moyenne spatiale pondérée des variables d'état dans un voisinage défini par le rayon d'interaction non local.

1.2.7 Méthodes expérimentales de caractérisation de la FPZ dans les matériaux semi-fragiles

La FPZ joue un rôle essentiel dans le comportement mécanique des matériaux semi-fragiles, notamment le béton. Leur description, en déterminant leurs dimensions (longueur, largeur et volume), représente un enjeu majeur en analyse spatiale. De nombreux paramètres affectent la taille du FPZ, notamment les dimensions de l'échantillon, la longueur initiale de la fissure (effet de bord), le type de chargement appliqué et les propriétés intrinsèques du matériau. Parmi ces paramètres, la longueur et la largeur du FPZ revêtent une importance toute particulière.

Les tests de rupture constituent la méthode privilégiée pour suivre le développement des FPZ. Des techniques expérimentales directes ou indirectes sont utilisées pour les caractériser, mais chacune a ses limites et ses inconvénients, ce qui explique les écarts parfois observés entre les résultats expérimentaux.

Parmi les méthodes modernes, la technologie de corrélation d'images (DIC) se distingue par sa grande précision. Elle permet de mesurer les champs de déplacement de surface et ainsi de calculer les déformations hors de la zone de faille en utilisant les principes de la mécanique des milieux continus.

Parallèlement, les techniques d'émission acoustique (AE) se sont révélées efficaces pour visualiser et analyser les FPZ dans les structures en béton (Landis 1999 ; Haidar et al. 2005 ; Saliba et al. 2012 ; Farnam et al. 2015 ; Hadjab et al. 2007).

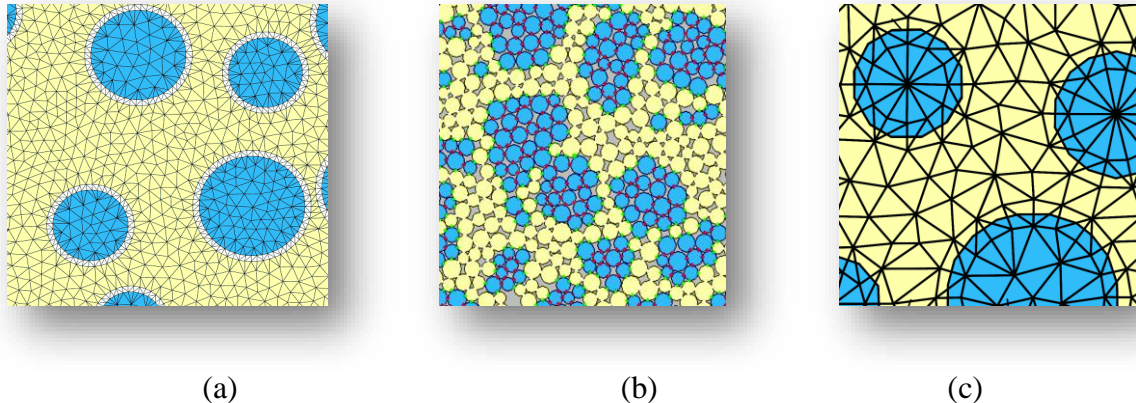
D'autres méthodes analytiques, telles que l'interférométrie (Shah 1990; Cedolin et al. 1983; Guo et al. 1993), la microscopie à balayage électronique et la technique de perméation de colorant (Jankowski et al. 1990), sont également utilisées pour examiner les FPZ de surface. La mesure de la taille des FPZ peut être obtenue grâce à des techniques telles que l'imagerie aux rayons X (Otsuka& Date 2000) ou l'émission acoustique (Muralidhara et al. 2010). L'approche combinée de plusieurs techniques, comme l'association DIC/EA, est souvent privilégiée. Cette méthode hybride permet une détermination plus précise des mécanismes de fissuration et de FPZ (Alam et al. 2015 ; Alam et al. 2014).

1.3 La complexité des méthodes de modélisation concrètes et multi-échelles

Le béton est un matériau complexe dont la microstructure, organisée de manière hiérarchique, se caractérise par une forte hétérogénéité. Cette complexité vient de la répartition aléatoire de ses différentes phases aux échelles micro, méso et macro. En conséquence, le béton présente un comportement mécanique non linéaire influencé par des mécanismes de dégradation interconnectés agissant à différents niveaux. Pour reproduire fidèlement la réponse mécanique

de ce matériau sous différentes contraintes, il est nécessaire de choisir avec soin l'échelle de modélisation appropriée.

Le choix de l'échelle de modélisation dépend de plusieurs facteurs, tels que l'échelle d'observation, les propriétés mécaniques à analyser, la précision requise et les ressources informatiques disponibles. Si les approches multi-échelles permettent une compréhension approfondie des comportements, notamment des phénomènes de rupture (Van Mier 2012), elles restent coûteuses en termes de calculs numériques.



(a) (b) (c)
Figure 1-12: Échelle de modélisation: a) Approche FEM [Pedersen et al., 2007]
b) Approche DEM [Kat-saga, 2010], c) Approche Lattices [Grassl et al., 2012].

En général, trois échelles de modélisation principales sont utilisées : macroscopique, mésoscopique et microscopique (Figure 1-12). L'ingénierie appliquée s'intéresse aux échelles globales et semi-globales.

Au niveau microscopique, le béton est modélisé comme un ensemble de phases hétérogènes. Cette échelle permet de comprendre les interactions mécaniques fines qui sont à l'origine des phénomènes de détérioration.

Au niveau macroscopique, le béton est un matériau homogène. Cette approche nécessite un grand nombre de paramètres pour décrire fidèlement son comportement mécanique global.

Au niveau mésoscopique, la modélisation se concentre sur les interactions entre la pâte de ciment et les granulats. Cette mésoéchelle offre un bon compromis en prenant en compte les propriétés des matériaux tout en restant plus économique que les méthodes microscopiques.

La modélisation à l'échelle microscopique est particulièrement efficace pour représenter la rupture du béton, car elle met en évidence les écarts entre la matrice cimentaire et la structure granulaire, deux composantes clés du processus de fissuration.

Concernant les modèles de calcul, simuler le comportement de matériaux quasi-fragiles comme le béton pose un défi majeur, notamment en raison de l'émergence de la zone de processus de fracturation (FPZ), chargée de ramollir le matériau. Deux approches théoriques principales sont couramment utilisées pour modéliser la rupture du béton :

- Théorie de l'endommagement couplée ou non à la plasticité, qui permet de représenter la détérioration progressive d'un matériau.

- Théorie de la mécanique des fractures, qui se concentre sur la propagation des fissures. Bien que d'autres approches existent, ces deux théories sont fondamentales pour expliquer les fondements des modèles qui seront adoptés dans les études ultérieures.

1.3.1 Comportement plastique et endommageable des matériaux en ingénierie : théorie et applications

La mécanique de l'endommagement étudie la détérioration progressive de l'intégrité des matériaux et des structures de génie civil due à la propagation et à la condensation de microfissures, micro-vides et autres défauts similaires. Ces changements conduisent à la détérioration du matériau au niveau macroscopique et ainsi à la condensation des défauts du matériau conduit à la formation d'une fissure macroscopique.

La dégradation de la raideur peut être modélisée par des variables d'endommagement de nature scalaire, vectorielle ou tensorielle. Une loi de comportement endommageable peut être écrite comme suit

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (1.6)$$

$$C_{ijkl} = (C_{pqrs}^0, D_*) \quad (1.7)$$

C_{ijkl} est le tenseur de rigidité fonction de l'état de l'endommagement décrit par la variable D_* . L'indice (*) désigne la nature de la variable (ordre 0, 1, 2, 4, 8 !). Ainsi, l'évolution de la dégradation du tenseur de rigidité initiale est pilotée par la loi suivante

$$C_{ijkl} = \frac{\partial C_{ijkl}}{\partial D_*} D_* \quad (1.8)$$

L'évolution de la détérioration est généralement contrôlée par une loi standard similaire à celle utilisée dans un cadre en plastique en utilisant la notion de surface de charge. Les modèles de dommages ne suffisent pas à eux seuls à décrire la détérioration du béton. En fait, cette dégradation est toujours associée à l'apparition d'irréversibilité dans l'état mécanique.

Dans le cas du béton, les expériences montrent qu'au-delà d'une certaine limite de contrainte, des déformations permanentes apparaissent. La formulation formelle de la plasticité est bien adaptée pour décrire ces déformations permanentes. Mathématiquement, la plasticité est nécessaire, au moins pour décrire le changement de signe des déformations volumétriques lors d'un essai de compression.

Une loi de comportement plastique générale peut être exprimée sous la forme suivante.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} (\varepsilon_{kl} - \varepsilon_{kl}^p) \quad (1.9)$$

ε_{kl}^p représente le tenseur des déformations plastiques. L'évolution des termes de ce tenseur est décrite par la loi de normalité en utilisant une fonction de charge (Drucker-Prager ...). Cependant, le couplage de l'endommagement et de la plasticité est souvent nécessaire pour décrire le comportement réel des matériaux. Ce couplage peut être décrit par l'équation suivante :

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}^D (\varepsilon_{kl} - \varepsilon_{kl}^p) \quad (1.10)$$

Où C_{ijkl}^D est le tenseur de rigidité endommagé, et le produit de la partie élastique de ce tenseur par la composante $(\varepsilon_{kl} - \varepsilon_{kl}^p)$ représente la contrainte effective.

Le couplage peut être explicite ou implicite, et la résolution numérique peut être réalisée en deux étapes (plasticité à endommagement constant). Les algorithmes de résolution plastique utilisés sont généralement de type Return mapping, closest point projection, etc.

1.3.2 Mécanique de la rupture

La mécanique de la rupture étudie l'interaction entre une fissure et le milieu environnant. Dans un matériau fissuré, il existe trois zones principales :

- La première zone, près de la pointe de la fissure, où les contraintes sont très élevées et tendent vers l'infini.
- La deuxième zone, où les contraintes, les déplacements et les déformations sont continus, mais présentent une singularité.
- La troisième zone, qui représente les champs lointains et relie la zone singulière aux conditions aux limites.

Ces trois zones sont importantes pour comprendre la propagation de la fissuration et le comportement des matériaux fissurés.

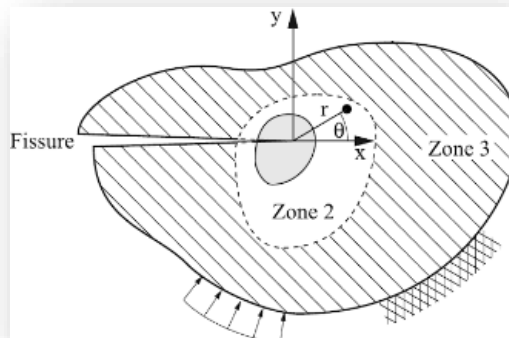


Figure 1-13: Zone délimitant le voisinage de la pointe d'une fissure dans un milieu fissuré.

Pour étudier la zone singulière, il existe deux approches principales :

- L'approche locale : elle permet d'analyser les contraintes et les déformations près de la pointe de la fissure.
- L'approche globale énergétique : elle permet d'analyser le comportement global d'une structure fissurée en fonction des échanges d'énergie qui se produisent.

Ces deux approches complémentaires permettent de mieux comprendre le comportement des matériaux fissurés. L'hypothèse d'un comportement élastique linéaire conduit à des contraintes infinies à la pointe de la fissure, ce qui est impossible en réalité. En effet, la matière va se déformer plastiquement près de la pointe de la fissure, évitant ainsi les contraintes infinies.

Le champ de contrainte près d'une pointe de fissure présente une variation singulière. Des facteurs d'intensité des contraintes (SIF) sont définis pour caractériser l'état de contrainte dans la zone singulière. Ces facteurs, notés K , dépendent de la géométrie du corps fissuré, de ses dimensions et du chargement appliqué. Le champ de contraintes augmente proportionnellement au facteur d'intensité de contrainte.

Ces facteurs peuvent être déterminés par des méthodes expérimentales ou numériques. Dans certains cas, des résultats analytiques exacts peuvent être établis. Irwin a proposé une solution analytique pour les champs de contrainte et de déplacement dans la zone singulière.

$$\sigma_{ij}(r,\theta) = \frac{K_\alpha}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^\alpha(\theta) \quad (1.11)$$

$$u_i = K_\alpha \frac{r}{\sqrt{2\pi r}} g_{ij}^\alpha(\mu, k, \theta) \quad (1.12)$$

μ représente le module de cisaillement défini par:

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1.13)$$

K est la constante de Kolosov définie par:

$$K = \begin{cases} 3-4\nu & \text{en déformation plane} \\ \frac{3-\nu}{1+\nu} & \text{en contrainte plane} \end{cases} \quad (1.14)$$

L'approche énergétique de Griffith, introduite en 1921, considère la propagation d'une fissure comme un équilibre entre l'énergie de surface créée par l'avancée de la fissure et l'énergie de déformation élastique libérée. Plus précisément, lorsque la fissure se propage, elle crée de nouvelles surfaces, ce qui nécessite de l'énergie (énergie de surface, γ , proportionnelle à la surface créée, dA). Simultanément, la déformation élastique du matériau libère de l'énergie. Selon Griffith, la fissure se propage si l'énergie libérée par la déformation élastique est égale ou supérieure à l'énergie requise pour créer les nouvelles surfaces. Cette approche a été fondamentale pour comprendre les mécanismes de rupture des matériaux fragiles et a jeté les bases pour des études ultérieures en mécanique de la rupture.

$$dw = 2\gamma dA \quad (1.15)$$

G c'est Le taux de restitution d'énergie lié à la variation de w_p l'énergie potentielle totale nécessaire pour augmenter la longueur de fissure "a" de "da" par unité de surface de fissure dA.

$$G = - \frac{w_p}{dA} \quad (1.16)$$

L'énergie potentielle totale d'une structure est l'énergie élastique, qui correspond à l'énergie stockée dans la structure due à ses déformations élastiques et à l'énergie due aux efforts extérieurs, qui correspond à l'énergie apportée à la structure par les charges et les contraintes extérieures.

$$w_p = w_{el} + w_{ext} \quad (1.17)$$

Comme indiqué précédemment, la rupture dans les matériaux quasi-fragiles est caractérisée par le développement de la zone de processus de rupture (FPZ). La prise en compte de la FPZ a conduit au développement de la mécanique linéaire élastique de la rupture équivalente (MLEReq).

Irwin (1957) a introduit le concept de "longueur de fissure équivalente" pour décrire l'augmentation fictive d'une fissure lorsqu'une nouvelle répartition de contrainte est considérée dans la zone de processus de fracture (FPZ). Ce concept permet de suivre l'évolution de la rupture dans les matériaux quasi-fragiles en utilisant la mécanique linéaire élastique équivalente.

La notion de longueur de fissure élastique équivalente (a_{ep}) est utilisée pour décrire l'augmentation de la complaisance des spécimens due au développement de la FPZ. Cette longueur équivalente est définie comme la longueur qui, dans un modèle élastique parfait, donnerait une complaisance similaire à celle observée dans une structure réelle fissurée avec sa zone endommagée.

Pour simplifier l'analyse de la rupture dans les matériaux quasi-fragiles, où une zone de processus de fracture (FPZ) complique les calculs, Irwin a introduit le concept de "longueur de fissure équivalente". Cette idée consiste à remplacer la fissure réelle, entourée de sa FPZ, par une fissure fictive plus longue, appelée "fissure élastique équivalente" (a_{ep}). Cette fissure fictive, dans un modèle de matériau élastique linéaire, reproduit le même comportement mécanique que la fissure réelle avec sa FPZ, en simulant l'augmentation de la souplesse de la structure. Ainsi, la longueur de fissure équivalente permet d'appliquer les outils de la mécanique linéaire élastique de la rupture (MLER) à des matériaux qui ne suivent pas strictement ce comportement, en approximant leur comportement de rupture de manière plus précise.

La longueur de fissure équivalente (a_{ep}) représente une extension fictive de la fissure réelle (a_0), prenant en compte l'effet de la zone de processus de fracture (FPZ). Elle est définie comme $a_{ep} = a_0 + \Delta a$, où Δa est l'incrément de longueur de fissure élastique équivalente, positionnant la pointe de la fissure fictive au-delà de la pointe de la fissure réelle. Pour valider ce concept, notamment dans le béton, des essais expérimentaux sont cruciaux, mesurant l'évolution de la complaisance sécante lors de cycles de charge, d'endommagement, de propagation et de décharge. Ces essais, comme ceux de Morel et al. (2005), vérifient si le modèle de longueur de fissure équivalente correspond au comportement réel du matériau, confirmant ainsi sa pertinence dans l'analyse de la rupture.

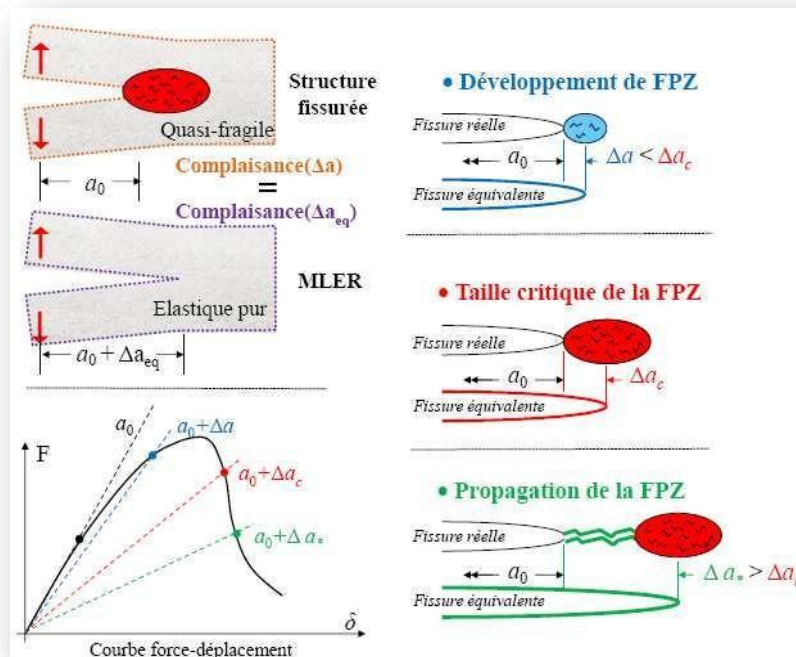


Figure 1-14: Représentation schématique de la mécanique linéaire élastique de la rupture équivalente (Gagnant 2016).

En parallèle de la longueur de fissure équivalente, la courbe de résistance (courbe-R) est une autre approche pour caractériser la rupture des matériaux quasi-fragiles. Elle prend en compte la non-linéarité du processus de fissuration, causée par la zone de processus de fracture (FPZ). La courbe-R décrit l'évolution de l'énergie dissipée en fonction de l'extension de la fissure, reflétant ainsi la résistance croissante du matériau à la propagation de la fissure. Cette courbe peut être exprimée en termes de taux de restitution d'énergie, représentant la force motrice de l'avancée de la fissure, ou par des variables locales comme le facteur d'intensité de contrainte, offrant une vision plus détaillée du comportement à la rupture.

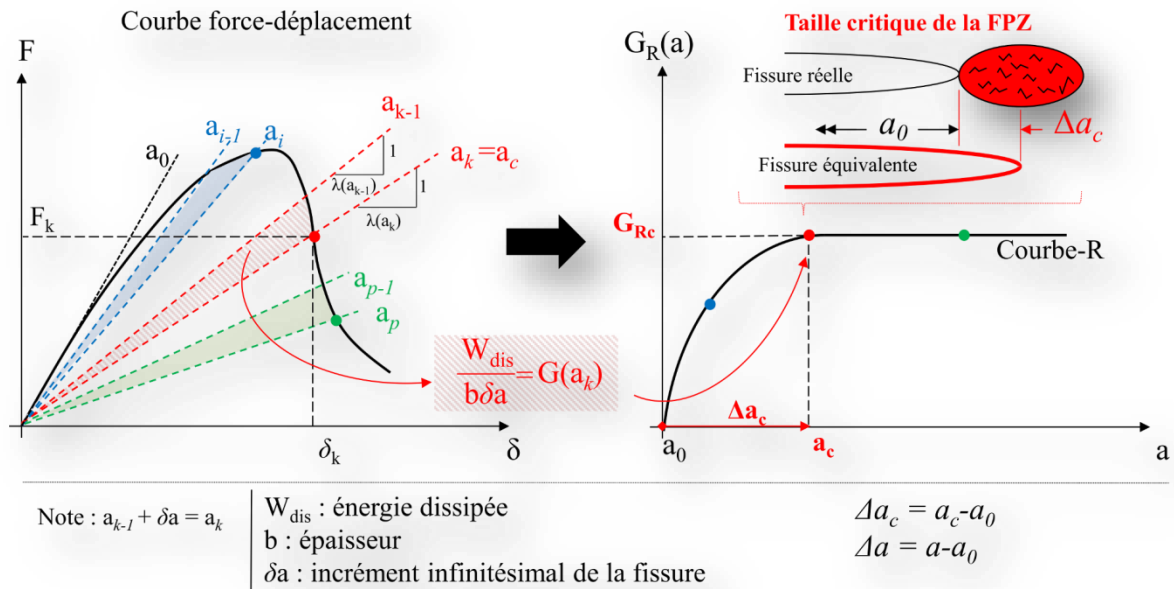


Figure 1-15: Évaluation de la résistance à la propagation de la fissure (Gagnant 2016).

La compréhension de la rupture des matériaux quasi-fragiles, comme le béton, nécessite la prise en compte de la zone de processus de fracture (FPZ) et des courbes de résistance (courbes-R), qui décrivent la résistance du matériau à la fissuration. Ces concepts, qui seront approfondis plus tard, sont essentiels pour établir une stratégie de modélisation efficace. Cette stratégie implique de déterminer la loi de comportement appropriée et l'échelle de description pertinente. Depuis les travaux de Roelfstra et al. (1985), la modélisation mésoscopique, utilisant le béton numérique, s'est avérée être l'approche la plus efficace. Cette méthode permet de capturer l'influence des interactions entre les constituants du béton sur son comportement macroscopique, offrant ainsi une représentation plus réaliste du processus de rupture.

1.3.3 Modèles numériques adaptés pour la modélisation mésoscopique du béton

Quatre approches principales sont disponibles dans la littérature pour la modélisation de la mésostructure du béton, à savoir les modèles continus en éléments finis (Figure 1-16(a)), les modèles en éléments lattices (Figure 1-16(b)) et les modèles en éléments discrets (Figure 1-16(c)).

1.3.3.2 Méthodes lattice pour l'analyse des phénomènes mécaniques

Les modèles en treillis simplifient la représentation des matériaux continus en utilisant un réseau d'éléments de poutre, souvent disposés en triangles ou en rectangles. Ce type de modélisation permet de simuler le transfert des efforts (moments, forces axiales et cisaillement) à travers la structure, en utilisant des éléments de base interconnectés.

Pour simuler l'hétérogénéité du béton, la géométrie des granulats est superposée à un maillage de treillis, définissant ainsi les propriétés mécaniques distinctes des éléments situés dans les phases de granulat, de matrice, et d'interface, afin de représenter la nature triphasique du béton. Cette approche permet également la génération d'un réseau avec une longueur d'élément variable (Man & van Mier 2008), offrant une flexibilité accrue dans la modélisation de la microstructure complexe du béton.

La représentation par modèle treillis présente des limites, notamment des courbes contrainte-déformation imparfaites. Ces courbes peuvent montrer des chutes brutales dues à la suppression d'éléments lorsque leur limite de résistance à la traction est atteinte. De plus, la méthode de suppression des éléments, utilisée pour simuler la fissuration, ne prend pas en compte la fermeture des fissures et ne garantit pas une dissipation constante de l'énergie de rupture.

L'étude mésoscopique via les modèles Lattice a été réalisée par Grassl et Jirásek (2010) qui ont modélisé la zone de fissuration (FPZ) dans le béton sous traction uniaxiale. Leur approche a permis de relier les paramètres macroscopiques du matériau aux interactions observées dans la FPZ à l'échelle des grains. Grassl et al. (2012) ont ensuite appliqué cette méthode à l'analyse de poutres entaillées et non entaillées testées en flexion trois points, avec enregistrement d'émissions acoustiques (Grégoire et al., 2013), révélant que la largeur de la FPZ dépend de la longueur de l'entaille, tandis que la distribution de l'énergie dissipée reste insensible aux effets de bord. Grégoire et al. (2015) ont confirmé la capacité de l'approche de Grassl et Jirásek (2010) à suivre l'évolution de la FPZ, en comparant les distributions d'énergie dissipée obtenues numériquement avec les mesures expérimentales par émission acoustique. Ces études ont également établi une corrélation positive entre la longueur du ligament et celle de la FPZ.

1.3.3.3 Méthodes numériques pour la simulation discrète

Le modèle des éléments discrets (DEM), initialement conçu pour l'étude des géomatériaux granulaires (Aydın et al., 2007), simule un matériau comme un assemblage de particules rigides ou déformables interagissant via des forces de contact et de cohésion. Son application a été étendue aux matériaux hétérogènes quasi-fragiles, tels que le béton (Azevedo et al., 2008), où le comportement continu est représenté par une cohésion accrue et des liaisons aux points de contact. Bien que le DEM excelle dans la modélisation de la rupture, de la fragmentation et des discontinuités, la détermination des forces de liaison aux points de contact discrets pour simuler une interface continue entraîne une forte dépendance des paramètres au problème étudié. De plus, l'efficacité de l'algorithme de détection de contact est fortement influencée par la forme des particules, qui peut varier (circulaires, polygonales, elliptiques ou en amas).

1.4 Déformations localisées : État du problème et stratégies de régularisation

Problème	Cause	Conséquence	Solution
Localisation des déformations	Adoucissement du matériau (béton)	- Perte d'objectivité des analyses par éléments finis - Dépendance à la taille du maillage - Dissipation d'énergie nulle en cas de maillage très fin (Needleman & Tvergaard, 1984)	Mise en place de stratégies de régularisation
Problème mathématique associé	Perte d'ellipticité (statique) et d'hyperbolicité (dynamique)	Difficultés numériques pour simuler correctement le comportement fragile du béton	Utilisation de méthodes de régularisation pour restaurer une formulation bien posée

1.4.1 Régularisation énergétique pour la simulation numérique

Une approche couramment utilisée en ingénierie pratique pour atténuer le problème de localisation dans les calculs de structures est la régularisation énergétique. Cette méthode repose sur l'utilisation de l'énergie de fissuration G_f comme paramètre de régularisation. Elle consiste à ajuster la partie adoucissante du modèle de matériau en fonction de la taille de l'élément fini, en s'appuyant sur des modèles tels que celui de la bande de fissures de Bažant (Bažant & Oh, 1983) ou celui de la fissure fictive de Hillerborg (Hillerborg et al., 1976).

Cependant, cette approche présente des limitations. Elle n'est applicable que lorsque la formulation de la loi de comportement permet d'établir une relation directe entre le paramètre contrôlant l'adoucissement et l'énergie de rupture G_f , ce qui est généralement possible uniquement dans le cas d'un état de contrainte uniaxial. De plus, des études ont montré que même en flexion simple, où la fissuration reste en mode I, l'état de contrainte n'est pas toujours uniaxial (Jirásek & Bauer, 2012; Matallah et al., 2013). Cela peut entraîner des erreurs dans le calcul de la dissipation d'énergie dans l'élément fini.

1.4.2 Régularisation non locale pour la simulation numérique

L'approche de régularisation non locale vise à surmonter le problème de localisation en introduisant une interaction spatiale. Au lieu de considérer uniquement la valeur locale d'une variable en un point donné, elle prend en compte l'influence du voisinage de ce point. Cela se fait en remplaçant la grandeur locale par un opérateur de délocalisation, qui peut être exprimé sous forme intégrale ou sous forme de gradient d'ordre deux (ou supérieur). En essence, la non-localité permet de lisser les variations brusques des champs de déformation, évitant ainsi la concentration excessive de la déformation dans une bande étroite.

Pijaudier-Cabot et Bažant (1987) ont démontré que certaines formulations non locales peuvent agir comme un limiteur de localisation, offrant un effet de régularisation pour les problèmes de

localisation de déformation. Ils ont introduit ce concept pour traiter les problèmes de localisation associés aux lois de comportement adoucissantes de type endommagement. La moyenne non locale $\bar{f}(x)$ correspondant à la variable locale $f(x)$ dans un domaine V est définie par :

$$\bar{f}(x) = \int \phi(x, \xi) f(\xi) d\xi \quad (1.18)$$

La fonction poids $\phi(x, \xi)$ est définie comme une fonction de la distance entre le point source ξ et le point récepteur x . Pour garantir que l'opérateur non local préserve un champ uniforme de déformation, la fonction poids peut être soumise à certaines conditions de normalisation.

$$\phi(x, \xi) = \frac{\phi_0(x, \xi)}{\int \phi_0(x, \xi) d\xi} \quad (1.19)$$

La fonction poids est décrite par une distribution gaussienne, qui introduit une longueur caractéristique, c , qui est liée à la taille de la zone où se produit le processus de rupture

$$\phi_0(x, \xi) = \exp\left(-\left(\frac{4\|x-\xi\|^2}{l_c^2}\right)\right) \quad (1.20)$$

Pour la régularisation en gradient explicite, on ajoute le laplacien de la quantité locale $f(x)$ à celle-ci

$$\bar{f}(x) = f(x) + l^2 \nabla^2 f(x) \quad (1.21)$$

Une forme implicite alternative de régularisation en gradient permet d'améliorer les lois constitutives en introduisant un champ non local. En considérant la déformation équivalente comme variable interne, $\bar{\varepsilon}_{ep}$, les travaux de Peerlings et al. (1996) ont conduit à une formulation implicite qui

$$\bar{\varepsilon}_{ep}(x) - l^2 \nabla^2 \bar{\varepsilon}_{ep}(x) = \varepsilon_{ep}(x) \quad (1.22)$$

Une autre approche pour la régularisation des problèmes de localisation repose sur l'extension des milieux continus classiques, en intégrant les caractéristiques microstructurales des matériaux. Parmi ces approches, les milieux de Cosserat, ou milieux micropolaires, considèrent chaque particule comme un corps rigide, introduisant ainsi des degrés de liberté de rotation en plus des degrés de liberté de translation. Cette cinématique enrichie permet de mieux capturer le comportement des matériaux à microstructure complexe. Les milieux de Cosserat trouvent des applications variées, et récemment, une extension de la théorie 2D de Cosserat a été utilisée pour modéliser en 3D les phénomènes de localisation de bande de cisaillement (Khoei et al., 2010).

La modélisation des fissures pose un défi majeur pour les analyses classiques par éléments finis en raison de la nécessité de calculer des dérivées spatiales, qui ne sont pas définies au niveau des discontinuités telles que les fissures. Pour surmonter cette limitation, la théorie périodynamique

(PD), proposée par Silling (2000), a émergé comme une approche non locale continue prometteuse. La PD remplace les équations aux dérivées partielles de la mécanique continue classique par des équations intégrales, qui restent valides en présence de discontinuités. Dans cette théorie, chaque point matériel interagit avec ses voisins dans un rayon fini, ce qui permet de considérer la PD comme une version à plus grande échelle de la dynamique moléculaire. De nombreuses études ont démontré l'efficacité de la théorie PD pour résoudre des problèmes mécaniques complexes (Madenci&Oterkus, 2016; Amani et al., 2016; Fan et al., 2016).

1.5 Effet d'échelle et durabilité des structures en béton

1.5.1 Impact de l'effet d'échelle sur la fissuration due au retrait et au fluage

L'effet d'échelle influence significativement la fissuration induite par le retrait et le fluage dans le béton. Dans les grandes structures, le retrait endogène et thermique est souvent plus important en raison de l'hydratation prolongée et de la dissipation thermique plus lente, augmentant le risque de fissuration précoce (Bažant, Z. P., & Planas, J. (1998). De plus, le fluage, qui est une déformation lente sous charge constante, peut être moins prononcé dans les grands éléments en raison d'un rapport surface/volume plus faible, affectant la redistribution des contraintes et potentiellement la propagation des fissures à long terme (Neville, A. M. (2011)). Ainsi, la taille de l'élément influe sur l'amplitude des contraintes de retrait et la capacité de relaxation via le fluage, déterminant le risque .

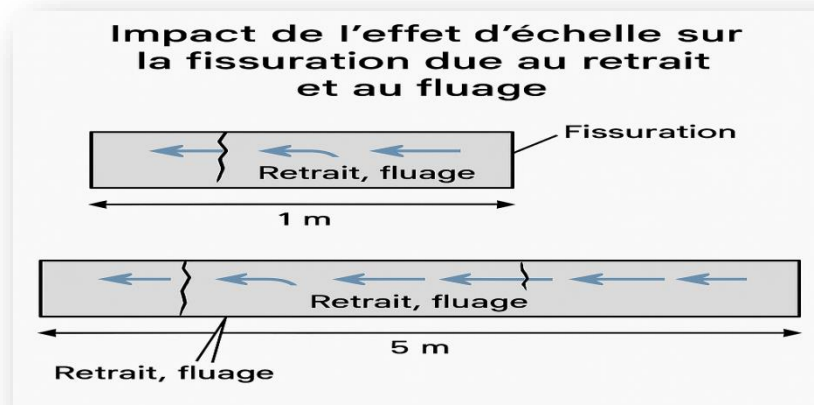


Figure 1-17 : impact de l'effet d'échelle sur la fissuration due au retrait et au fluage

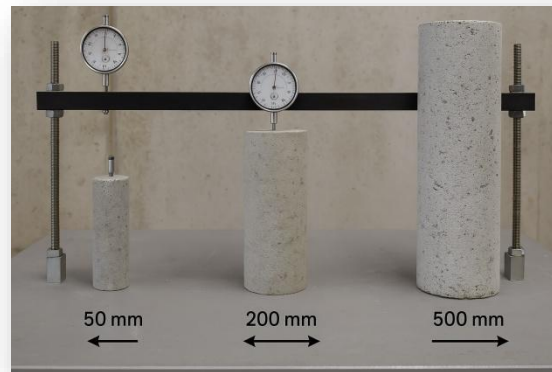


Figure 1-18 : Essai de retrait/fluage sur différentes tailles d'éprouvettes.

1.5.2 Effet d'échelle sur la propagation des fissures sous l'effet des cycles de gel-dégel

L'effet d'échelle influence la propagation des fissures causées par les cycles de gel-dégel dans le béton. Dans les éléments de plus grande taille, la pénétration du front de gel est plus lente et les gradients de température au sein du matériau sont moins uniformes que dans les petits éléments (Powers, T. C. (1945)). Cette différence de gradient peut entraîner des zones plus ou moins saturées en eau et des pressions hydrauliques variables lors du gel, affectant la localisation et la propagation des fissures. De plus, la couche de surface ("peau" du béton) peut présenter une microstructure différente du cœur en raison des conditions de cure et de l'évaporation, ce qui peut influencer sa résistance initiale au gel-dégel et la manière dont les fissures se propagent à l'échelle de l'élément (Fagerlund, G. (1977)). Ainsi, la taille de l'élément module la distribution des contraintes internes dues au gel et la susceptibilité à la fissuration progressive.

1.5.3 Influence de la taille des éprouvettes sur la caractérisation de la résistance à la corrosion

La taille des éprouvettes a une influence notable sur la caractérisation de la résistance à la corrosion, car des échantillons plus grands peuvent présenter une hétérogénéité matérielle accrue, des gradients de concentration d'agents corrosifs moins uniformes et un comportement de fissuration induite par la corrosion différent de celui des petites éprouvettes (Mindess, S., Darwin, D., & Young, J. F. (2003)). Par conséquent, la standardisation de la taille des éprouvettes est essentielle pour la comparabilité des résultats, et l'effet d'échelle doit être considéré lors de l'extrapolation des données de laboratoire au comportement des structures réelles.

1.6 Application spécifiques de l'effet d'échelle dans le génie civil

L'effet d'échelle a des applications spécifiques cruciales en génie civil, notamment dans la conception et l'analyse de grands ouvrages tels que les barrages en béton, où la résistance à la

rupture et la fissuration sont fortement dépendantes de la taille de la structure (Bažant, Z. P., & Planas, J. (1998). Il influence également le comportement des ponts et des grands éléments

préfabriqués, où la prédiction précise de la résistance à la flexion et au cisaillement nécessite de considérer la diminution de la résistance nominale avec l'augmentation des dimensions (Collins, M. P., & Mitchell, D. (1991). La prise en compte de l'effet d'échelle est donc essentielle pour garantir la sécurité et la durabilité de ces infrastructures de grande envergure.

1.6.1 Effet d'échelle dans les ponts et les grands structures

L'effet d'échelle joue un rôle significatif dans le comportement des barrages en béton, en particulier en ce qui concerne leur résistance à la rupture et leur fissuration. Contrairement aux petites éprouvettes de laboratoire, les grands volumes de béton présents dans les barrages sont plus susceptibles de contenir des défauts et des hétérogénéités, ce qui peut entraîner une diminution de la résistance nominale apparente à mesure que la taille augmente (Bažant, Z. P., &

Planas, J. (1998). De plus, la fissuration, qu'elle soit due au retrait thermique important dans les masses de béton, aux charges hydrostatiques ou aux sollicitations sismiques, est influencée par l'échelle de la structure, car la propagation des fissures et le mode de rupture peuvent varier considérablement entre un petit échantillon et un barrage de plusieurs dizaines voire centaines de mètres de haut. La prise en compte de l'effet d'échelle est donc cruciale pour assurer la stabilité et la sécurité à long terme de ces ouvrages massifs.

1.6.2 Effet d'échelle dans les éléments préfabriqués

Bien que la préfabrication assure une qualité de fabrication, l'effet d'échelle est une considération incontournable pour les éléments en béton de dimensions variées. Qu'il s'agisse de petites poutres ou de grands panneaux et voussoirs, leur taille influence leur comportement mécanique à la rupture. Les éléments préfabriqués de grande taille présentent une résistance nominale inférieure en flexion, cisaillement et traction comparativement à des éprouvettes réduites (Bažant & Planas, 1998). Cette sensibilité à la taille impose une évaluation minutieuse des contraintes induites lors de la manipulation et du transport pour éviter tout dommage. De même, la performance des assemblages entre ces grands éléments doit être analysée en tenant compte de l'effet d'échelle sur la distribution des charges et la capacité portante globale de la structure.

1.7 Conclusion

L'effet d'échelle dans les structures en béton est un domaine d'étude fondamental en génie civil, car il influence directement la sécurité et la performance des ouvrages. Ce phénomène complexe se manifeste par une variation des propriétés mécaniques du béton, telles que la résistance à la rupture et la rigidité, en fonction de la taille de la structure. Cette variation est principalement due à l'hétérogénéité du béton, un matériau composite dont les propriétés dépendent de la distribution des granulats et de la microstructure du ciment.

L'importance de l'effet d'échelle réside dans sa capacité à influencer la capacité portante des structures. Par exemple, une grande poutre en béton peut présenter une résistance à la rupture différente de celle d'une petite poutre, même si elles sont fabriquées avec le même matériau. Cette différence peut avoir des conséquences importantes sur la conception et l'évaluation de la sécurité des structures.

Les recherches sur l'effet d'échelle visent à comprendre les mécanismes à l'origine de ce phénomène et à développer des modèles numériques capables de prédire le comportement des structures à différentes échelles. Ces modèles sont essentiels pour la conception de structures sûres et durables, ainsi que pour l'évaluation de la capacité portante des ouvrages existants.

En outre, la compréhension de l'effet d'échelle est cruciale pour le développement de nouveaux matériaux de béton plus performants. En ajustant la composition du béton et la distribution des granulats, il est possible de contrôler l'effet d'échelle et d'améliorer les propriétés mécaniques des structures.

En résumé, l'effet d'échelle est un phénomène complexe et important qui doit être pris en compte dans la conception, l'analyse et l'évaluation des structures en béton. Les recherches dans ce domaine sont essentielles pour garantir la sécurité et la durabilité des ouvrages en béton.

CHAPITRE 2.

**Analyse mésoscopique de
l'effet d'échelle dans les
poutres en béton**

2.1 Introduction

Ce chapitre présente une analyse numérique de l'effet d'échelle sur les mécanismes de rupture dans les structures en béton. Notre étude s'appuie sur une campagne expérimentale, réalisée par Rojas Solano (2012) à l'Université de Pau et des Pays de l'Adour (UPPA). Dans cette campagne expérimentale quatre tailles de poutres en béton comportant deux géométries distinctes d'entaille ($\alpha = 0.20$ et $\alpha = 0.50$) ont été étudiées.

Une approche de modélisation à l'échelle mésoscopique a été adoptée pour simuler le comportement du béton. Le modèle d'endommagement isotrope régularisé de Fichant a été utilisé pour représenter la rupture des poutres entaillées. Cette étude vise à analyser l'effet d'échelle, via une approche mésoscopique, sur le comportement global et local du matériau. Deux lois d'effet d'échelle ont été appliquées : la loi SEL (Size Effect Law) de Bažant et une approche basée sur le critère MMTS (Modified Maximum Tangential Stress). Les courbes force-CMOD (Crack Mouth Opening Displacement) obtenues numériquement ont été comparées aux résultats expérimentaux pour validation. Enfin, l'évolution de la contrainte tangentielle le long du processus de fissuration a été analysée afin de caractériser la longueur de la zone (FPZ, Fracture Process Zone).

2.2 Modélisation mésoscopique du béton

Pour comparer efficacement les réponses globales du béton avec les données expérimentales, particulièrement en termes de fissuration, une approche mésoscopique du béton numérique a été adoptée. Cette approche de modélisation, dont les fondements remontent aux travaux pionniers de Roelfstra et al. (1985), permet une représentation fiable de la structure hétérogène du béton, en modélisant explicitement la matrice et le squelette granulaire (Nguyen et al., 2010 ; Saliba et al., 2012 ; Grondin & Matallah, 2014).

2.2.1 Caractéristiques des poutres testés expérimentalement

Une série de tests expérimentaux a été effectuée dans les travaux de thèse de (Rojas Solano, 2012) sur des poutres homothétiques et géométriquement similaires en flexion trois points. Quatre tailles de poutres faites d'un même matériau avec deux longueurs d'entaille différentes ($\alpha=0.2$ et $\alpha=0.5$) ont été considérées. Les poutres nommées FN (Fifth Notch) et HN (Half Notch) correspondent aux éprouvettes avec le rapport entaille/ hauteur de $\alpha=0.2$ et $\alpha=0.5$ respectivement. Toutes les poutres présentent un rapport $S/D = 2.5$ avec S la distance entre appuis et D est la hauteur de la poutre. L'épaisseur est maintenue constante à 50 mm pour tous les échantillons. Les dimensions des poutres FN et HN, les efforts moyens au pic du chargement et les contraintes nominales sont présentées dans les tableaux suivants (Tableau 2-1 et Tableau 2-2) :

Tableau 2-1 : Dimensions des poutres HN ($\alpha=0.5$), forces moyennes et contraintes nominales.

D (mm)	b (mm)	S (mm)	L (mm)	a (mm)	F Moyenne(KN)	σ_N (Mpa)
400	50	1000	1400	200	5,0957	0,95544375
200	50	500	700	100	2,9811	1,1179125
100	50	250	350	50	1,6317	1,223775
50	50	125	175	25	0,9786	1,4679

Tableau 2-2 : Dimensions des poutres FN ($\alpha=0.2$), forces moyennes et contraintes nominales.

D (mm)	b (mm)	S (mm)	L (mm)	a (mm)	F Moyenne(KN)	σ_N (Mpa)
400	50	1000	1400	80	13,867	2,6000625
200	50	500	700	40	7,6861	2,8822875
100	50	250	350	20	4,4969	3,372675
50	50	125	175	10	2,477	3,7155

La figure 2-1 illustre les caractéristiques géométriques des poutres testées. L'évolution du chargement en fonction du l'ouverture d'entaille CMOD sur toutes les éprouvettes des deux géométries est représentée sur la figure 2-2.

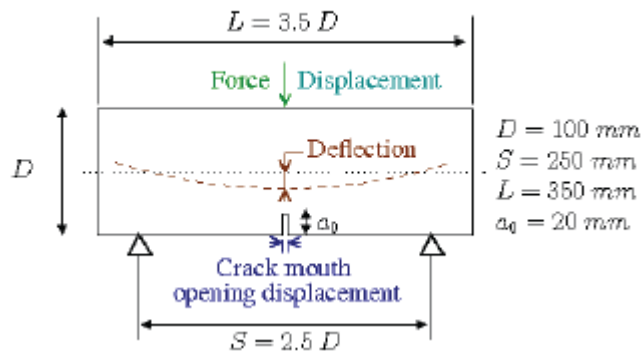
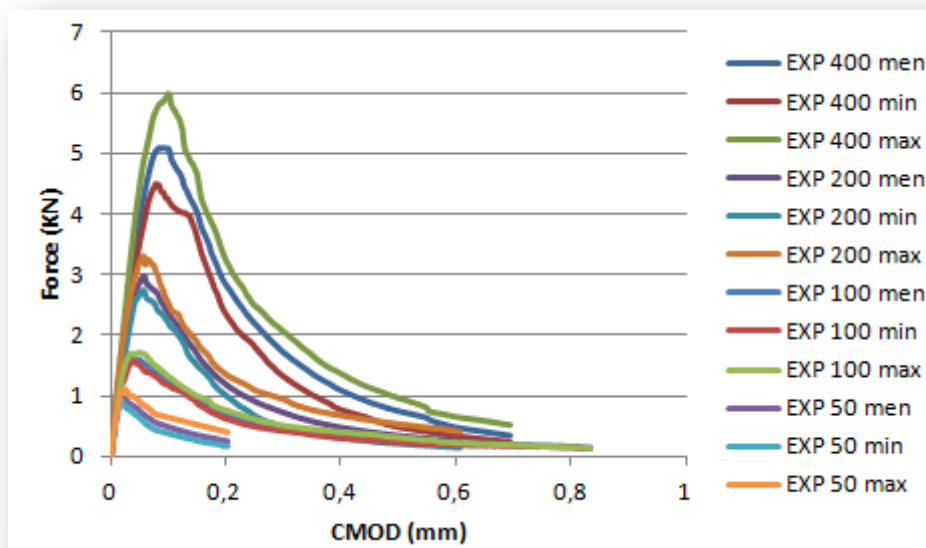
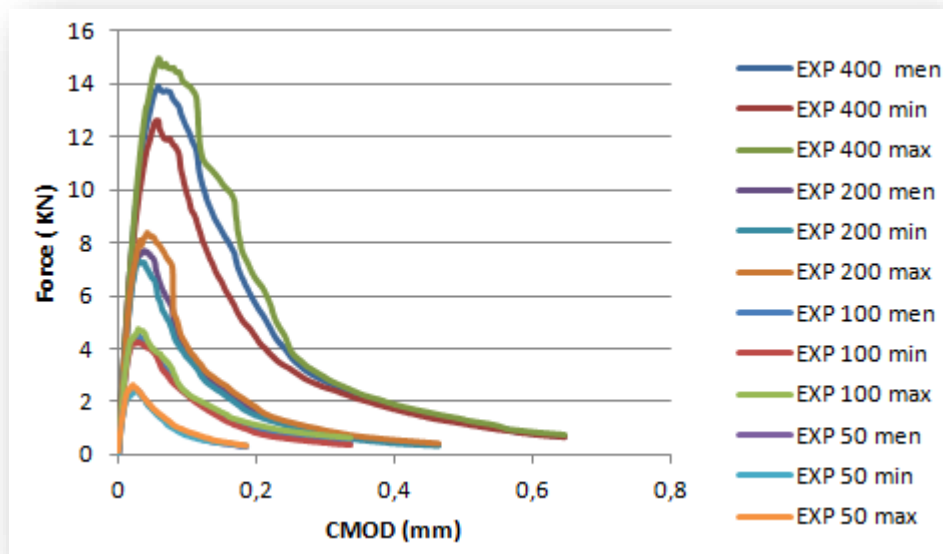


Figure 2-1: Détails de la géométrie des poutres étudiées expérimentalement.



(a)



(b)

Figure 2- 2 : Résultats expérimentaux Forces-CMOD, a) poutres HN et b) poutres FN.

2.2.2 Approche mésoscopique adoptée et simulation des poutres entaillées

Cette étude utilise une approche de modélisation mésoscopique pour simuler le comportement de poutres en béton testées expérimentalement. La simulation est réalisée en 2D avec un maillage d'éléments finis sous l'hypothèse des contraintes planes. Le béton est modélisé comme un matériau biphasique, constitué de granulats et de mortier, distribués de manière aléatoire. Seuls les granulats de taille supérieure à 5 mm sont représentés explicitement sur une grille discrète, tandis que les plus petits sont intégrés à la matrice de mortier. La distribution des granulats suit la courbe granulométrique expérimentale. Une procédure numérique, "@meso", développée dans Cast3M, combine deux approches existantes pour générer une répartition spatiale aléatoire des phases sur la base d'une grille en EF..

Les propriétés mécaniques de chaque phase sont prises en compte, et un modèle d'endommagement isotrope est utilisé.

Dans cette étude, la zone de transition interfaciale (ITZ) n'est pas explicitement modélisée, bien que son rôle dans les mécanismes de fissuration soit connu.

Néanmoins, l'influence de cette auréole de transition sur le comportement global du matériau a été analysée et discutée par Grondin et Matallah (Grondin & Matallah 2014).

2.2.3 Paramètres du modèle et maillage éléments finis

La Figure 2-3 illustre le maillage utilisé pour les simulations des poutres entaillées, réalisées à l'aide du code éléments finis Cast3M. Le maillage, constitué d'éléments quadrangles linéaires (QUA4), présente des tailles variables, avec une discrétisation plus fine dans la zone centrale autour de l'entaille, où l'endommagement est attendu. Cette zone mésoscopique, de 5 cm de largeur de part et d'autre de l'entaille et s'étendant sur toute la hauteur du ligament, est raccordée aux zones macroscopiques par un maillage progressif, assurant une transition en douceur. Le choix d'éléments linéaires se justifie par l'objectif d'étudier l'influence de la représentation mésoscopique sur les champs cinématiques et statiques. Un comportement élastique linéaire est adopté pour les parties macroscopiques afin de réduire le temps de calcul. Les propriétés mécaniques des granulats et du mortier, utilisées dans les simulations, sont détaillées dans le Tableau 2-3

Tableau 2-3: Paramètres utilisés dans la modélisation mésoscopique

Constituants	f_t (MPa)	E (GPa)	G_f (N/m)
Mortier	3,5	30	55
Granulats	6	70	85

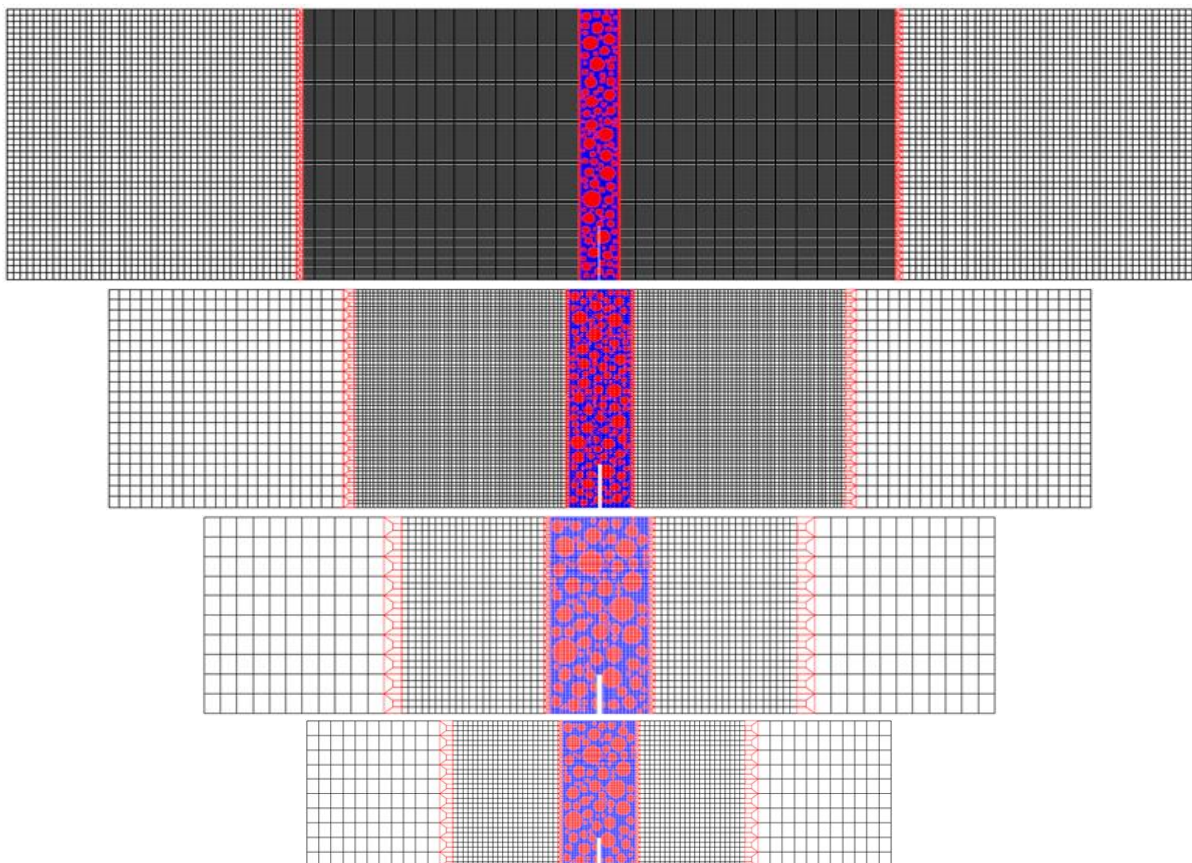


Figure 2-3: Maillage Macro/Méso des poutres.

2.3 Caractérisation des paramètres de rupture via les lois d'effet d'échelle

2.3.1 Loi classique de Bazant

La loi d'effet d'échelle de Bazant, une loi déterministe fondée sur une approche énergétique-statistique (Bazant, 1984 ; Bazant & Planas, 1997), décrit la relation entre la résistance à la traction d'un matériau et la taille d'une structure homothétique entaillée. Mathématiquement, cette loi s'exprime par l'équation suivante :

$$\sigma_N = \frac{Bf_t}{\sqrt{1+\frac{D}{D_0}}} \quad (2.1)$$

Où σ_N représente la contrainte nominale, f_t la résistance à la traction du matériau, B une constante adimensionnelle, D_0 une longueur constante et D la hauteur de la poutre. Dans le contexte d'une poutre en flexion trois-points entaillée, la contrainte nominale peut être déterminée à partir de l'effort maximal P_{max} à l'aide d'une formule spécifique, permettant ainsi d'appliquer la loi de Bazant à des cas pratiques.

$$\sigma_N = \frac{3 P_{max} S}{2 b D^2} \quad (2.2)$$

2.3.2 L'approche MMTS

Ayatollahi (Ayatollahi et Akbardoost, 2012) a introduit le modèle de Contrainte Tangentielle Maximale Modifiée (MMTS) pour analyser l'effet d'échelle dans les matériaux quasi-fragiles soumis au mode I.

Ce modèle représente une amélioration du critère de Contrainte Tangentielle Maximale (MTS) initialement développé par Erdogan (Erdogan 1963). Son principe fondamental repose sur l'hypothèse selon laquelle l'amorçage de la propagation de fissure en mode I se produit lorsque la contrainte nominale atteinte à l'extrémité de la Zone de Processus de Fissuration (FPZ) dépasse la résistance à la traction intrinsèque du matériau, conformément aux travaux fondateurs de (Hillerborg et al. 1976).

La complexité des équations différentielles de l'élasticité plane rend difficile la détermination analytique des distributions de contraintes et de déformations à la pointe de la fissure. Pour simplifier ces calculs, l'utilisation de la fonction de contrainte d'Airy (Φ) permet de déterminer les champs de contraintes et de déformations au voisinage du front de fissure. Les séries de Williams (Williams, 1952, 1957), une représentation de Φ , ont révélé la singularité universelle $1/\sqrt{r}$ pour les problèmes de fissures élastiques, jouant un rôle crucial dans le développement de la Mécanique Linéaire Élastique de la Rupture (MLER).

Le long de la fissure, la contrainte normale, équivalente à la contrainte tangentielle en coordonnées polaires, est un paramètre clé dans l'analyse de la propagation de la fissure.

$$\sigma_{\theta\theta}(r, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n}{2} A_n r^{\frac{n}{2}-1} \left[\left(\frac{n}{2} + 1 \right) \cos \left(\frac{n}{2} - 1 \right) \theta - \left(\frac{n}{2} + (-1)^n \right) \cos \left(\frac{n}{2} + 1 \right) \theta \right] \quad (2.3)$$

qui donne pour $q = 0$ (mode I) la relation suivante:

$$\sigma_{\theta\theta}(r, \theta = 0) = \frac{A_1}{\sqrt{r}} + 3A_3\sqrt{r} + 5A_5r^{3/2} + \dots \quad (2.4)$$

Contrairement au modèle MTS initialement proposé par Erdogan (1963) qui se limitait au premier terme de la série de Williams, le modèle MMTS (Modified Maximum Tangential Stress)

d'Ayatollahi et Akbardoost (2012) enrichit la description du champ de contraintes en incorporant les termes d'ordre supérieur de cette série. En particulier, le terme A_3 est intégré à la fois dans le critère de rupture et dans le calcul de la longueur de la Zone de Processus de Fissuration (FPZ). Cette approche permet d'affiner significativement la représentation du champ de contraintes au voisinage des singularités mécaniques.

Dans le modèle MMTS, la propagation de la fissure se produit lorsque la contrainte tangentielle atteint la résistance à la traction du matériau à une distance critique r_c de la pointe de la fissure. Cette distance critique est interprétée comme la longueur de la FPZ. En résumé, le modèle MMTS offre une description plus précise du comportement de la fissure en considérant les termes d'ordre supérieur de la série de Williams, ce qui permet une meilleure prédiction de l'effet d'échelle dans les matériaux quasi-fragiles.

$$\sigma_{\theta\theta}(r, \theta = 0) = f_t \quad \Leftrightarrow \quad \frac{A_{1c}}{\sqrt{r_c}} + 3A_{3c}\sqrt{r_c} = f_t \quad (2.5)$$

En s'appuyant sur la Mécanique Linéaire Élastique de la Rupture (MLER), le premier terme A_1 de la série de Williams est directement lié au facteur d'intensité de contrainte critique K_{IC} . Ce facteur, considéré comme une propriété intrinsèque du matériau (Owen & Fawkes, 1983), représente la résistance du matériau à la propagation de fissures. Par conséquent, l'équation (2.5) peut être reformulée en exprimant A_1 en fonction de K_{IC} , ce qui permet d'établir un lien direct entre les contraintes à la pointe de la fissure et la résistance du matériau à la rupture.

En d'autres termes, K_{IC} quantifie la capacité d'un matériau à résister à la propagation d'une fissure sous une charge appliquée. Ainsi, en intégrant K_{IC} dans l'équation (2.5) via le terme A_1 , on peut évaluer la probabilité de rupture d'un matériau en fonction des contraintes présentes à la pointe de la fissure alors :

$$\frac{K_{IC}}{\sqrt{2\pi r_c}} + 3A_{3c}\sqrt{r_c} = f_t \quad (2.6)$$

Afin d'utiliser cette équation pour étudier l'effet d'échelle, les termes A_1 et A_3 doivent être normalisés (rendus adimensionnels) comme suit :

$$A_1 = \sigma_n \sqrt{D} A_1^* \quad (2.7)$$

$$A_3 = \frac{\sigma_n}{\sqrt{D}} A_3^* \quad (2.8)$$

Dans cette équation, σ_n représente la contrainte nominale, également appelée résistance nominale à la charge maximale, et D est la hauteur de la poutre. Les termes A_1^* et A_3^* sont des facteurs de normalisation sans dimension qui dépendent de la géométrie de la poutre, plus précisément du rapport entre la longueur de la fissure et la hauteur de la poutre (a/D) et du rapport entre la portée et la hauteur de la poutre (S/D). En substituant les expressions normalisées de A_1 et A_3 dans l'équation (2.6), on obtient une expression qui permet de calculer la contrainte nominale en tenant compte de l'effet d'échelle et de la géométrie de la poutre s'écrit :

$$f_t = \frac{k_c}{\sqrt{2\pi r_c}} \left(1 + 3 \frac{A_3^* r_c}{A_1^* w} \right) \quad (2.9)$$

En remplaçant les termes A_1 et A_3 dans (2.9), la loi d'effet d'échelle autrement dit la relation entre la résistance nominale et la taille d'échantillon

$$\sigma_N = \frac{f_t}{\frac{A_1^* \sqrt{D}}{\sqrt{r_c}} \left(1 + 3 \frac{A_3^* r_c}{A_1^* D} \right)} \quad (2.10)$$

L'évolution de la longueur de la zone de processus de rupture (FPZ) r_c en fonction de la hauteur d'échantillon s'obtient en résolvant l'équation (2.10) qui donne

$$r_c = \left(\frac{f_t \sqrt{2\pi} \pm \sqrt{2\pi f_t^2 - 12 \frac{A_3^* K_C^2}{A_1^* D}}}{6 \frac{A_3^* K_C}{A_1^* D}} \right)^2 \quad (2.11)$$

Dans le cadre de la loi d'effet d'échelle de Bazant, on observe que la longueur de la Zone de Fissuration Plastique (FPZ) se stabilise et tend vers une valeur constante (c_f) lorsque la taille de l'échantillon augmente considérablement. Pour décrire l'évolution générale de cette FPZ en fonction de la taille de l'échantillon, Ayatollahi et Akbardoost (en 2012) ont proposé l'expression suivante :

$$r_c = \frac{A}{1 + \frac{B}{D}} \quad (2.12)$$

à partir de l'équation (2.12) on détermine A et B en utilisant une régression linéaire. La formulation MMTS proposée pour tenir compte de l'effet d'échelle est donnée par:

$$\sigma_N = \frac{f_t}{A_1^* \sqrt{\frac{D+B}{A} \left(1 + 3 \frac{A_3^* A}{A_1^* D+B} \right)}} \quad (2.13)$$

La loi d'effet d'échelle de Bazant (Bazant & Kazemi, 1990) permet d'évaluer l'énergie de rupture G_f et la longueur de fissure équivalente c_f . Selon ces auteurs, la longueur de la Zone de Fissuration Plastique (FPZ) est une zone de microfissuration non linéaire, caractérisée par une "longueur de contrainte effective". La longueur de fissure élastique équivalente est la somme de la longueur de l'entaille initiale (a_0) et d'une longueur c_0 représentant la FPZ. La limite de cette longueur pour de grands échantillons c_f correspond à la distance entre la pointe de l'entaille et la pointe de la fissure équivalente dans le cadre de la mécanique linéaire élastique pour un échantillon infiniment large $c_f = \lim_{d \rightarrow \infty} c$

L'énergie de rupture peut être reliée au facteur d'intensité de contrainte via la relation d'Irwin

avec

$$K_{Ic} = \sqrt{G_f \tilde{E}}, \quad (2.14)$$

Les expressions des paramètres de rupture G_f et c_f sont données par

$$G_f = \frac{B^2 f_t^2}{c_N^2 E} D_0 g(\alpha_0), \quad c_f = \frac{g(\alpha_0)}{g'(\alpha_0)} D_0 \quad (2.15)$$

$$\text{Avec } g(\alpha_0) = \pi \alpha_0 c_N^2 (F(\alpha_0))^2, \quad c_N = \frac{3S}{2D}$$

En utilisant la loi d'effet d'échelle de Bazant, les valeurs des paramètres constants B et D_0 sont obtenues par une analyse de régression linéaire, comme décrit dans les travaux de Bazant et al. (1991). Le Tableau 2-4 présente un récapitulatif des paramètres de rupture qui ont été déterminés en appliquant cette loi d'effet d'échelle.

Tableau 2-4 :Détermination des paramètres de rupture et de fissuration avec la loi classique d'effet.

	D0 (mm)	B	g	g'	Cf (mm)	Gf (N/m)	Kic Mpa m^{0.5}
PoutresFN	341	1	8.0408	44.59	61.49	72.70	1.722
PoutresHN	250.16	0.3855	41.66	266.488	39.11	41.067	1.294

Suite à l'application de la loi d'effet d'échelle, les paramètres de rupture sont ensuite quantifiés en utilisant le modèle MMTS. Le Tableau 2-5 fournit les valeurs spécifiques du facteur d'intensité de contrainte, de la valeur critique du terme A₃, ainsi que de la longueur de la FPZ, pour différentes tailles de poutre étudiées

Tableau 2-5: Paramètres de rupture selon le modèle MMTS

D(mm)	P(N)	σ_N (Mpa)	K_c (Mpa.m^{0.5})	A₃	r'_c (mm)
FN 50	2,477	3,7155	0,6226778	-8.009022412	3,497531
FN 100	4,4969	3,372675	0,799329	-0.472134624	5,765167
FN 200	7,6861	2,8822875	0,966051	-0.304970180	8,726655
FN 400	13,867	2,6006	1,23272	-0.184305820	14,5141254
HN 50	0,9786	1,4679	0,5774106	-13,55897609	2,41000000
HN 100	1,6317	1,223775	0,680735	-8.702927331	3,680000
HN 200	2,9811	1,1179125	0,879470	-5,259109220	6,3822777
HN 400	5,0957	0,95544375	1,06296	-3,355329477	9,870000

Pour le modèle MMTS, les expressions approchées des premier A_1^* et troisième termes A_3^* adimensionnels sont dérivées en utilisant le principe de superposition (Timoshenko & Goodier, 1951). Les termes A_3 et k_c sont calculés à l'aide des équations (2.8) et (2.7) respectivement, tandis que la longueur de la FPZ (r_c) est obtenue via l'équation (2.11). Enfin, les constantes A et B figurant dans l'équation (2.12) sont déterminées par une analyse de régression linéaire.

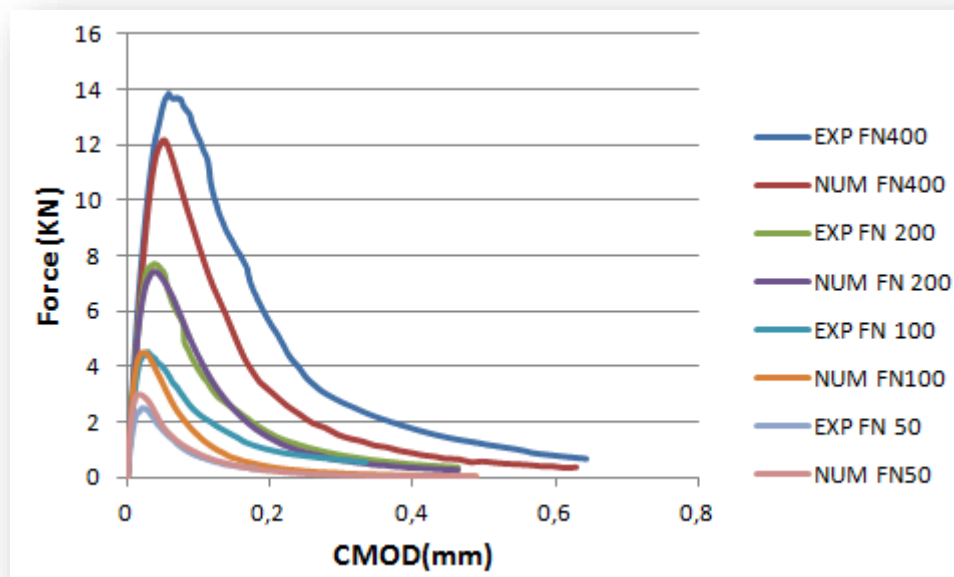
2.4 Analyse numérique mésoscopique de l'effet d'échelle

2.4.1 Effet d'échelle sur le comportement global

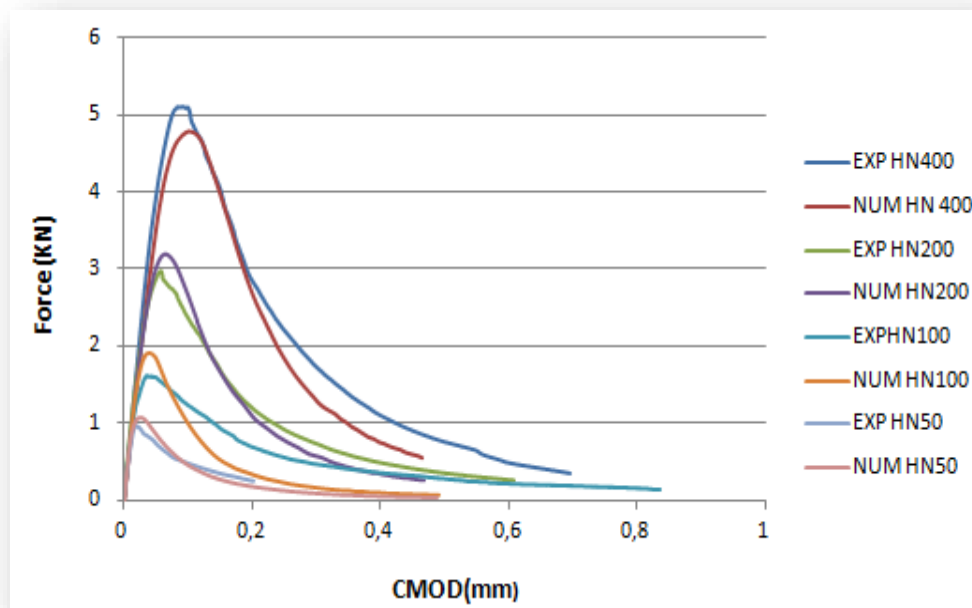
Ce paragraphe présente les résultats des simulations numériques réalisées à l'échelle mésoscopique pour analyser le comportement mécanique global de poutres entaillées.

Les courbes Force-Ouverture d'entailles obtenues par l'approche mésoscopique sont comparées avec les résultats expérimentaux (Figure 2-3). La comparaison montre que le comportement global est bien reproduit.

L'effet d'échelle sur le pic de chargement est globalement bien reproduit à l'échelle mésoscopique. Ces résultats attestent de la capacité de la combinaison du modèle d'endommagement avec l'approche mésoscopique à reproduire le comportement mécanique réel du béton.



(a)



(b)

Figure 2- 3: Courbes Force-CMOD pour les poutres 400, 200, 100 et 50mm, FN et HN.

2.4.2 Effet d'échelle sur la contrainte nominale

Le phénomène d'effet d'échelle se traduit par une variation significative de la contrainte nominale d'une structure en fonction de ses dimensions caractéristiques. Cette dépendance dimensionnelle trouve son origine dans la distribution non-uniforme des contraintes au voisinage des singularités géométriques. La résistance nominale, définie comme le maximum de contrainte nominale atteint au cours du chargement, constitue un paramètre clé pour quantifier cet effet. Dans le cas d'une poutre en flexion trois points, ayant une hauteur D , une portée S et une épaisseur b , et soumise à une charge P , la contrainte nominale peut être exprimée par la théorie des poutres comme suit :

$$\sigma_N = \frac{3PS}{2bh^2} \quad (2.16)$$

La dimension des poutres étudiées et les charges au pic ainsi que les contraintes nominales correspondantes issues des résultats expérimentaux et numériques sont résumées sur le Tableau 2-6.

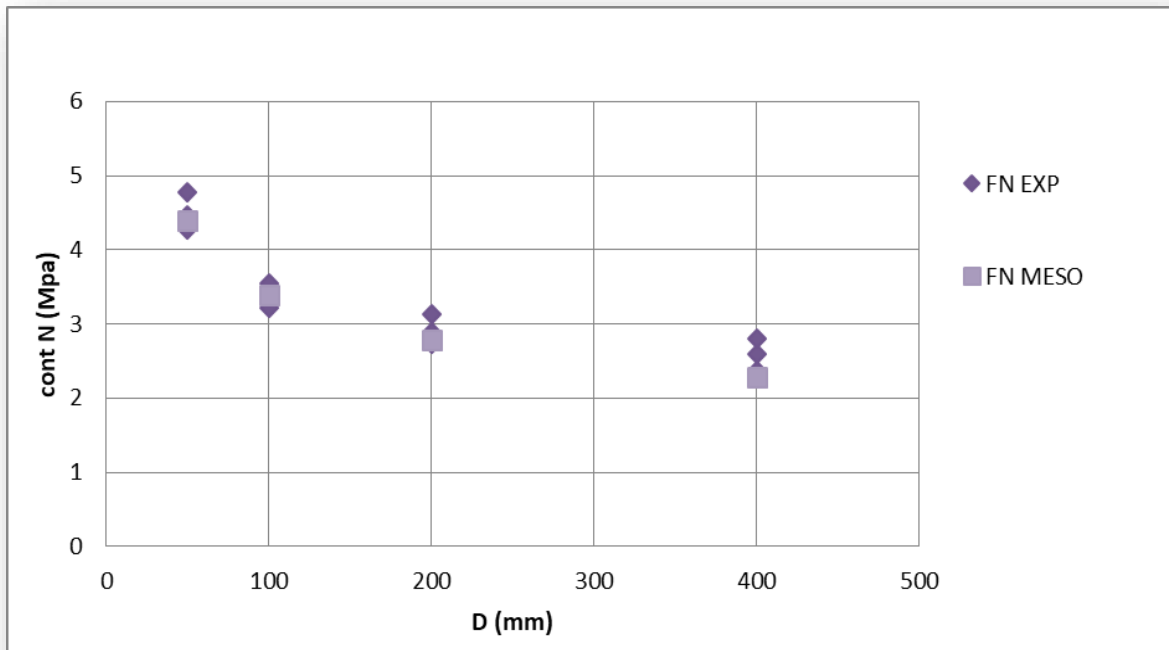
Tableau 2-6: Dimension de poutre HN et FN, les charges au pic et contraintes nominales (Expérimentales et Numériques).

Dimension (L×D×b)(mm)	S (mm)	a (mm)	Exp		Mésos	
			P (N)	σ_N (Mpa)	P (N)	σ_N (Mpa)
D(1400×400×50)	1000	80	4496.0756	0.843014175	4789.4	0.8980125
			5095.74795	0.9554527406	4998	0.937125
			5970.2687	1.119425381	5029.5	0.94303125
D(700×200×50)	500	40	2741.2794	1.027979775	2956.1	1.1085375
			2981.13251	1.117924691	3024.2	1.134075
			3287.1187	1.232669513	3177.6	1.1916
D(350×100×50)	250	20	1576.9974	1.18274805	1791.9	1.343925
			1631.71673	1.223787548	1865	1.39875
			1711.951	1.28396325	2057.5	1.543125
D(175×50×50)	125	10	932.7714	1.3991571	1054.5	1.58175
			978.6185	1.46792775	1074.7	1.61205
			1113.9386	1.6709079		

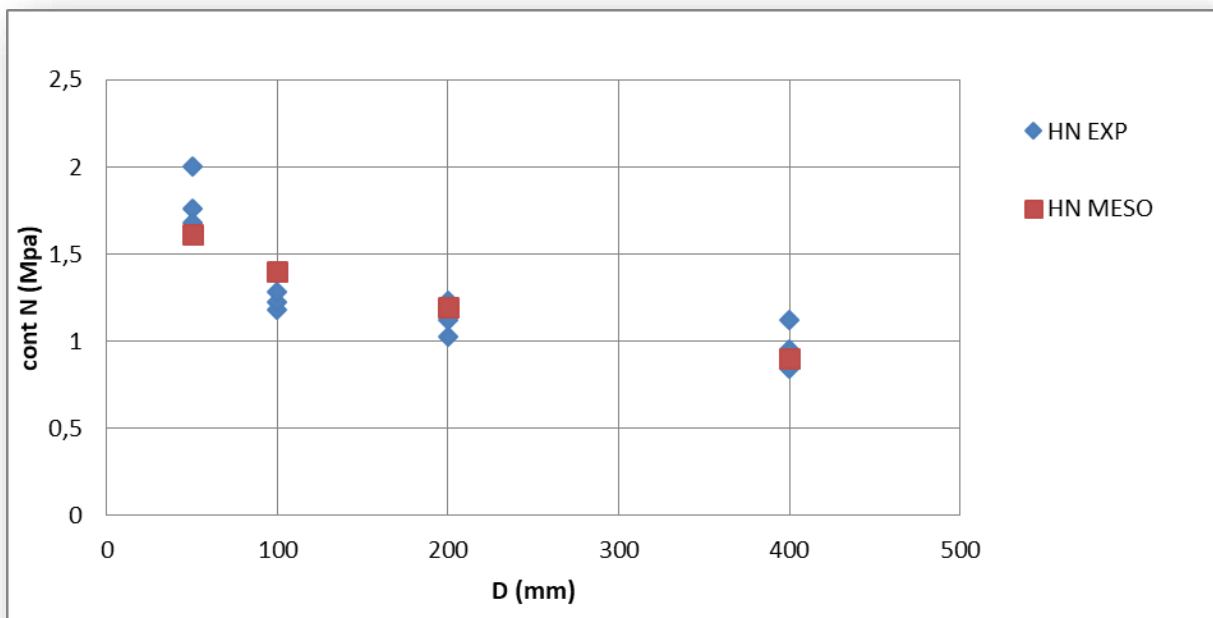
Dimension (L×D×b)(mm)	S (mm)	a (mm)	Exp		Mésos	
			P (N)	σ_N (Mpa)	P (N)	σ_N (Mpa)
D(1400×400×50)	1000	80	12612.0386	2.364757238	12136	2.2755
			13869.9913	2.600623369	12647	2.3713125
			14930.933	2.799549938	12805	2.4009375
D(700×200×50)	500	40	7304.0838	2.739031425	7191.1	2.6966625
			7686.09524	2.882285715	7412.2	2.779575
			8345.5086	3.129565725	7423.7	2.7838875
D(350×100×50)	250	20	4282.3753	3.211781475	4511.4	3.38355
			4499.0723	3.374304225	4573.8	3.43035
			4730.4626	3.54784695	4602.3	3.451725
D(175×50×50)	125	10	2372.695	3.5590425	2849.7	4.27455
			2477.02551	3.715538265	2924.5	4.38675
			2655.2584	3.9828876		

L'existence d'un effet d'échelle sur la résistance de structure faite d'un matériau quasi-fragile est désormais clairement établie par de nombreuses observations expérimentales. Notre analyse préliminaire démontre que l'approche numérique adoptée permet de reproduire correctement ce phénomène physique. Comme l'illustre la Figure 2-4, on observe une décroissance significative de la contrainte nominale avec l'augmentation de la hauteur des poutres. Les résultats des simulations mésoscopiques présentent par ailleurs un excellent accord quantitatif avec les données expérimentales, validant ainsi l'approche numérique employée. Cette corrélation

confirme la capacité du modèle à capturer les mécanismes physiques responsables de l'effet d'échelle dans le matériau béton.

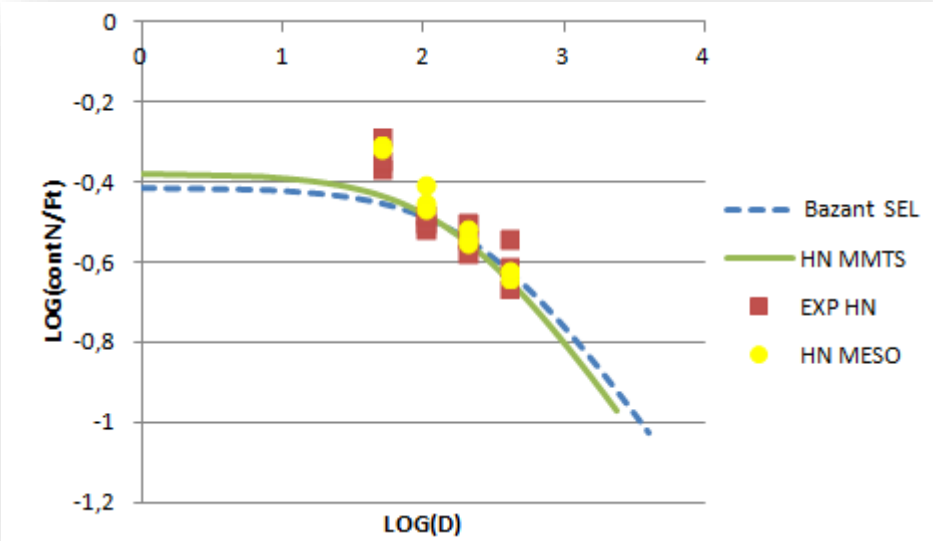


(a)

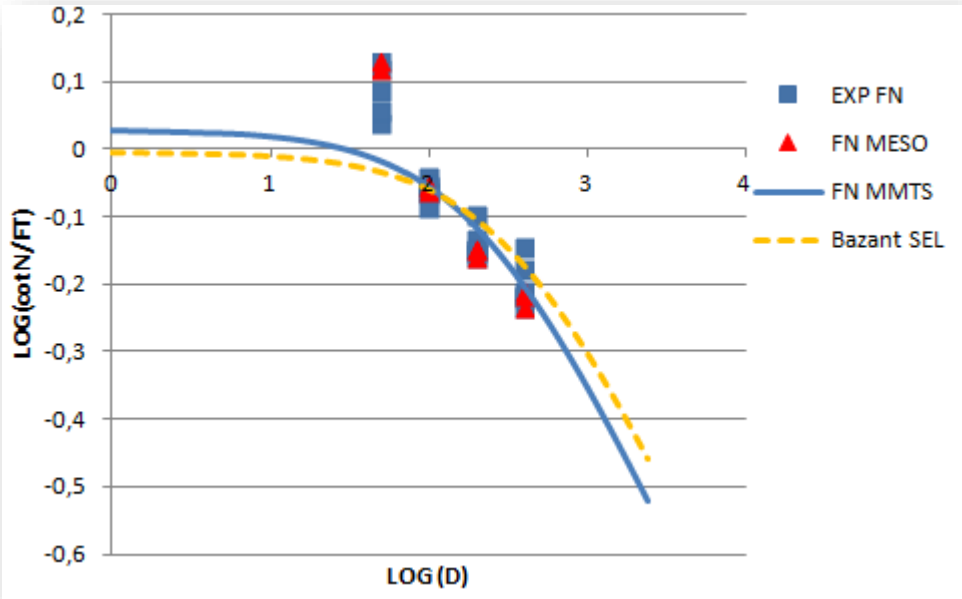


(b)

Figure 2-4: Effet d'échelle sur la contrainte nominale des poutres HN et FN (Exp-Num).



(a)



(b)

Figure 2- 5: Comparaison loi d'effet d'échelle de Bazant, MMTS, résultats expérimentales et Mésos.

La figure 2-5 présente une analyse de l'effet d'échelle sur la contrainte nominale normalisée (σ_N/f_t) en fonction de la taille caractéristique (D), représentée dans une échelle logarithmique. Les résultats montrent que les deux lois d'effet d'échelle de Bazant et du modèle MMTS sont en bon accord avec les résultats expérimentaux et numériques.

Pour les petites tailles dont le $\log(D)$ est faible, le rapport $\sigma_N/f_t \approx 1$ ce qui caractérise une rupture plastique ou l'effet d'échelle n'est pas considéré. Tandis que pour les grandes tailles de poutres le rapport σ_N/f_t s'approche d'une droite inclinée de pente 1/2 qui caractérise la rupture fragile ou l'effet d'échelle est bien marqué.

Les résultats expérimentaux et numériques obtenus pour les poutres de 100, 200 et 400 mm présentent un excellent accord avec les prédictions théoriques de la loi de Bazant et du modèle MMTS. Ces résultats obtenus dans la zone de transition entre les régimes plastique et fragile, démontre clairement le caractère quasi-fragile du comportement mécanique des poutres étudiées.

Une observation remarquable concerne les poutres de 50 mm. Pour la configuration FN, le rapport $\sigma_N/f_t \approx 1.2$, aussi bien en résultats expérimentaux que numériques, indique que la contrainte nominale atteint pratiquement la résistance en traction du béton. Ce résultat suggère l'absence d'effet d'échelle à cette échelle réduite, révélant plutôt un comportement de type plastique. La même observation est confirmée par les poutres HN 50mm, où le rapport $\sigma_N/f_t \approx 0.38$ s'aligne précisément sur la droite théorique du comportement plastique. Ces observations démontrent que pour des structures de très faibles dimensions, les effets d'échelle deviennent négligeables au profit d'une réponse mécanique dominée par la plasticité.

Théoriquement, la loi SEL de Bazant prévoit une diminution de la contrainte nominale avec augmentation de la taille, cette loi suppose une fissure unique dominante, ce qui n'est pas réaliste pour les petites poutres ou les défauts sont multiples et interactifs. Le modèle MMTS, en intégrant les effets locaux (redistribution des contraintes autour des microfissures) prévoit une résistance un peu plus élevée que bazant pour les petites échelles.

Trois causes peuvent justifier à l'absence de l'effet d'échelle pour la poutre de hauteur 50 mm. Premièrement le béton peut présenter un comportement pseudo-plastique pour les poutres de petites tailles (fissuration diffuse au lieu de propagation critique), la taille des granulats de 5-20mm est comparable à $h=50$ mm, se qui peut bloquer les fissures et augmenter la résistance apparente. Un confinement locale peut aussi expliquer l'absence de l'effet d'échelle (absence de réduction de σ_N/f_t) pour cette taille.

2.5 Effet d'échelle sur la FPZ

Dans cette partie on propose de caractériser l'évolution de la Zone de Processus de Fissuration (FPZ) via les modèles théoriques existants dans la littérature, puis établir une analyse comparative de leurs prédictions. La variation numérique de la FPZ sera aussi examinée.

2.5.1 Formules analytiques d'évolution de la FPZ

Plusieurs formules théoriques ont été développées dans la littérature pour déterminer la variation de la longueur de la Zone de Processus de Fissuration (FPZ) en fonction de la taille de l'échantillon, en se basant sur divers critères de rupture. Bazant et Kazemi (1990), en s'appuyant sur un critère énergétique, ont proposé une équation qui exprime la variation de la longueur effective de la FPZ en fonction de la dimension de la poutre. En utilisant la loi d'effet d'échelle

de Bazant, une valeur limite de la longueur de la FPZ, notée c_f est obtenue pour des échantillons de très grande taille ($D \rightarrow \infty$).

Dans Bazant et al (Bažant et al. 1991), l'équation qui exprime la variation de la longueur de la FPZ en fonction de la dimension de poutre a été donnée par

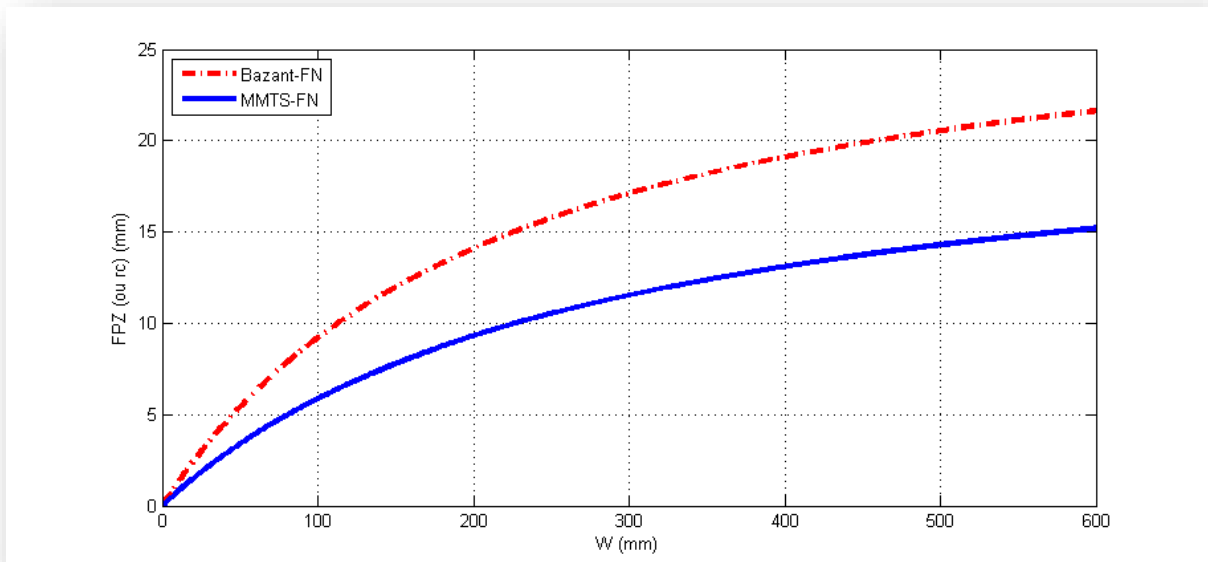
$$c = c_f \frac{g(\alpha_0)}{g(\alpha)} \left(\frac{g(\alpha)}{g(\alpha_0)} - \frac{c}{D} \right) \quad (2.17)$$

D'autres chercheurs, tels Ayatollahi et Akbardoost (2012), ont proposé des formules alternatives pour décrire la variation de la longueur de la Zone de Processus de Fissuration (FPZ) en fonction de la taille de l'échantillon. Ces deux approches reposent sur la théorie d'enrichissement du champ de contraintes.

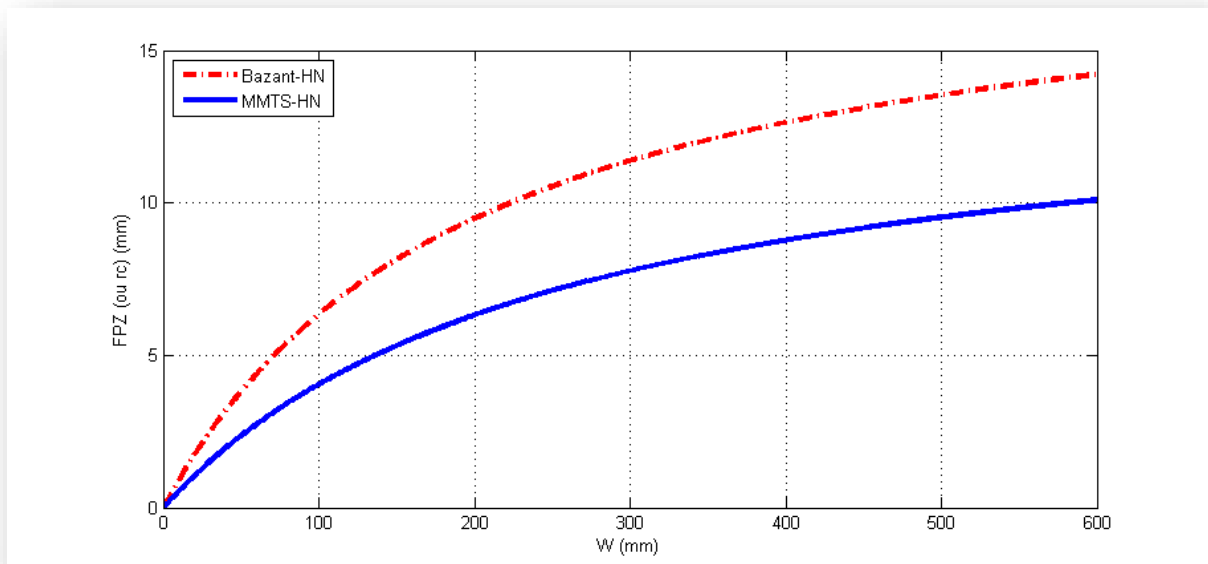
Il est important de rappeler ici l'équation du modèle MMTS pour la variation de la longueur de la FPZ, qui a été présentée précédemment.

$$r_c = \left(\frac{f_t \sqrt{2\pi} \pm \sqrt{2\pi f_t^2 - 12 \frac{A_3^* K_C^2}{A_1^* D}}}{6 \frac{A_3^* K_C}{A_1^* D}} \right) \quad (2.18)$$

Dont r_c correspond à c dans l'équation de Bazant



(a)



(b)

Figure 2-6: Evolution de la longueur de la FPZ selon le modèle Bazant -MMTS, (a) poutres FN, (b) poutre HN.

Sur la Figure 2-6 un écart considérable est visualisé entre le résultat de l'évolution de la FPZ par la théorie de Bazant et celle du modèle MMTS. Cependant, les deux lois théoriques montrent un effet d'échelle significatif pour les petites fissures, mais s'atténue pour les grandes structures.

2.5.2 Analyse numérique mésoscopique de la variation de la FPZ

La modélisation mésoscopique a démontré son efficacité à reproduire le comportement global du béton (courbe force-CMOD et effet d'échelle), ce qui reflète une bonne description de son comportement à l'échelle locale. Dans ce paragraphe, nous proposons d'étudier l'évolution de la *Fracture Process Zone* (FPZ) en utilisant l'approche mésoscopique.

Notre méthodologie s'appuie sur les bases de la mécanique de la rupture et les modèles cohésifs. L'évolution de la contrainte tangentielle le long du chemin de fissure constituera un rôle central dans notre analyse. Le chemin de la fissure est obtenu en utilisant l'approche OuvFiss.

Numériquement, à partir d'un calcul élément fini, on obtient les valeurs des contraintes perpendiculaires aux lèvres de la fissure, ensuite ce champ de contraintes est exprimé dans le

repère de coordonnées polaires pour obtenir les contraintes tangentielles. La valeur maximale de la contrainte tangentielle $\sigma_{\theta\theta}$ correspond à la résistance à la traction ($\sigma_{\theta\theta} = f_t$). Du point de vue numérique, comme dans le cas des modèles cohésifs (Cusatis & Schauffert 2009), la longueur de la FPZ est définie comme la longueur de la zone cohésive c.-à-d. la distance entre la contrainte à la pointe de la fissure égale à la résistance à la traction et celle d'amorçage de la fissure.

En plus, on définit la longueur de la FPZ complètement ouverte comme étant la distance entre la zone de la fissure à contrainte libre (lorsque la contrainte tangentielle s'annule) et la contrainte à la pointe de la fissure égale à la résistance à la traction (voire Figure 2-7).

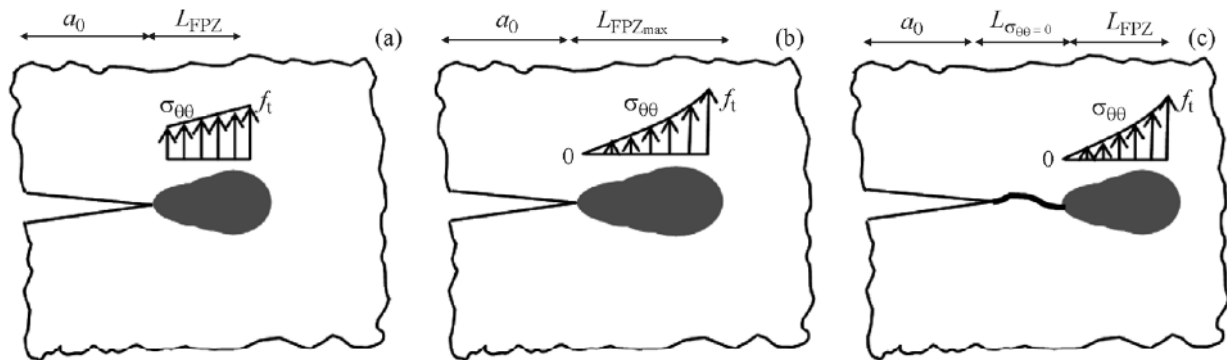


Figure 2-7 Propagation de la FPZ et extension de la fissure : initiation de la FPZ (a), ouverture complète (b), propagation de la fissure (c).

La Figure 2-8 présente l'évolution de la contrainte tangentielle à la pointe de l'entaille pour chaque taille de poutre en fonction du chargement. La contrainte cohésive diminue progressivement avec l'avancée de la fissuration jusqu'à ce qu'elle s'annule.

La longueur de la FPZ atteint sa valeur maximale lorsque la contrainte cohésive varie entre zéro et la résistance en traction.

La FPZ complètement développée se forme à ce stade, créant une zone sans contrainte devant l'entaille, en arrière de la FPZ. Pour chaque poutre, la FPZ totalement ouverte est atteinte à différents niveaux de chargement, c'est-à-dire que la contrainte cohésive s'annule à des stades de chargement différents. Cette analyse révèle que pour les éléments structuraux de petites dimensions, le développement complet de la FPZ (ouverture totale) se produit systématiquement après l'atteinte de la charge maximale.

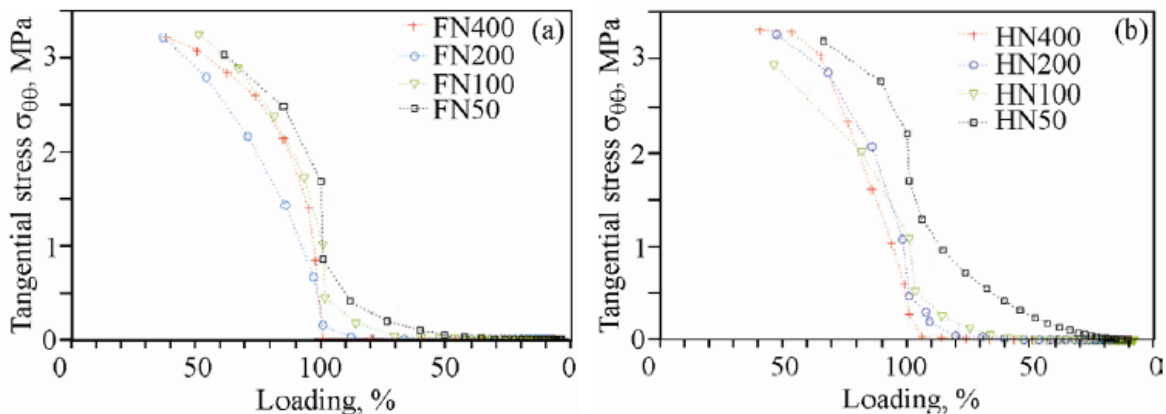
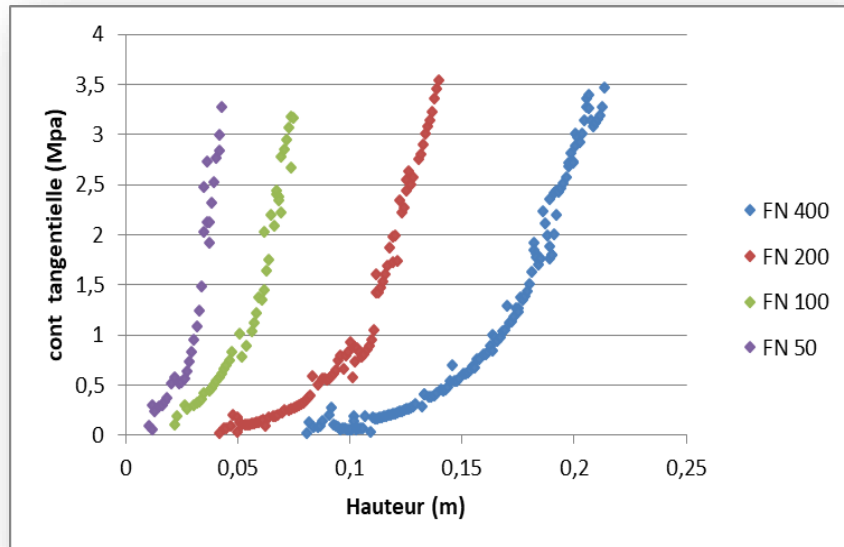
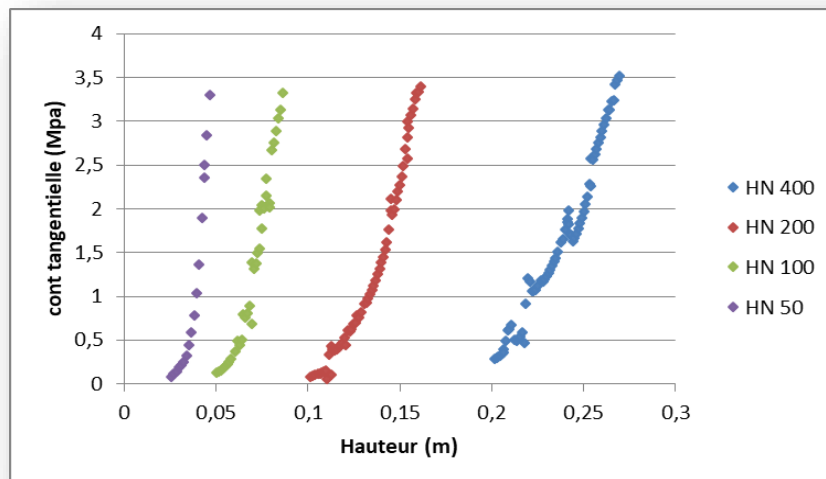


Figure 2-8 : Evolution de la contrainte tangentielle à la pointe de l'entaille en fonction des pas de chargement pour les poutres FN (a) et HN (b).



(a)



(b)

Figure 2-9 : Variation de la contrainte tangentielle en fonction de la hauteur (FN-HN).

Un autre résultat intéressant est représenté sur la figure 2-9. Cette figure présente l'évolution de la contrainte tangentielle le long de la fissure en fonction de la hauteur de la poutre. Pour les poutres HN, la FPZ atteint son ouverture complète à :95% du post-pic pour HN400, 80% du post-pic pour HN200, 67% du post-pic pour HN100 et à 22% du post-pic pour les petites poutres HN50 alors que pour les poutres FN la FPZ totalement ouverte se forme au pic de charge pour FN400, 90% du post-pic pour FN200, 70% du post-pic pour FN100 et à 50% du post-pic pour les petites poutres FN50.

2.6 Conclusion de chapitre

L'objectif principal de ce chapitre était d'étudier numériquement l'effet d'échelle sur la rupture des structures en béton. Cette étude s'est appuyée sur des simulations numériques mésoscopiques utilisant un modèle d'endommagement isotrope régularisé.

Dans un premier temps, l'effet d'échelle a été analysé sur la réponse globale et le comportement local (caractérisation de la FPZ). Les résultats des simulations obtenus reflètent la capacité de l'approche mésoscopique et du modèle d'endommagement à reproduire le comportement mécanique réel du béton.

CHAPITRE 3.

**Analyse de l'effet d'échelle du
béton en traction direct**

3.1 Introduction de chapitre

Lorsqu'on étudie le comportement mécanique des poutres, on pense souvent en priorité à la flexion. Dans ce cas, une partie de la poutre supérieure est comprimée, tandis que la fibre inférieure est tendue. Or, cette compression peut poser problème. D'un point de vue expérimental, elle est à l'origine d'instabilités locales, comme le flambement ou l'écrasement du matériau, ce qui complique l'interprétation des résultats.

Numériquement, comme nous l'avons constaté dans le chapitre 2 de ce mémoire, les poutres présentant un ligament trop petit sont soumises à un problème de confinement dû aux contraintes de compression exercées sur la fibre supérieure. Ces contraintes perturbent l'évolution de la *Process Zone* (FPZ), une difficulté qui peut être évitée en recourant à des simulations en traction directe. Dans ce chapitre, nous proposons d'étudier des poutres entaillées soumises à une traction directe, en adoptant la même stratégie de modélisation mésoscopique avec un modèle d'endommagement. Une première analyse de l'effet d'échelle ainsi qu'une caractérisation de la FPZ seront examinées.

3.2 Principes de la traction directe

Dans le cadre de l'étude de l'effet d'échelle appliqué aux structures en béton, la traction directe constitue un outil expérimental essentiel pour caractériser de manière isolée la résistance en traction d'un matériau quasi-fragile. Contrairement aux essais indirects (comme la flexion ou la traction par fendage), la traction directe permet d'obtenir une distribution homogène des contraintes normales, facilitant ainsi l'analyse des mécanismes de rupture et l'identification de paramètres sensibles à la taille de l'éprouvette.

3.2.1 Spécificités liées au béton

Le béton étant un matériau quasi-fragile, il présente une faible résistance en traction ainsi qu'une rupture brutale, précédée par la formation d'une zone de processus de rupture (FPZ). Cette zone est fortement influencée par l'échelle : plus l'échantillon est grand, plus la fissuration devient instable et localisée. L'essai de traction directe s'avère donc indispensable pour étudier l'évolution de la FPZ en fonction de la taille des éprouvettes, analyser l'influence de l'échelle sur la résistance maximale et la dissipation d'énergie, et enfin, pour calibrer des modèles de comportement dépendants de la taille, tels que les approches énergétiques de la rupture ou les modèles non locaux.

3.2.2 Intérêt pour l'effet d'échelle

L'essai de traction directe joue un rôle essentiel pour analyser l'influence de l'échelle sur le comportement mécanique des matériaux quasi-fragiles, tels que le béton.

En fournissant un état de contrainte uniaxial et uniforme dans la zone centrale de l'éprouvette, il permet d'isoler la réponse intrinsèque du matériau à la traction, sans les complications induites par les gradients de contraintes présents en flexion. Cette simplification est essentielle pour analyser comment la taille de l'éprouvette influence les mécanismes de rupture, notamment la formation et le développement de la zone de processus de rupture (FPZ).

3.3 Comportement du béton en traction

Le béton présente un comportement fragile en traction, avec une résistance bien inférieure à celle observée en compression. Sous sollicitation de traction, la rupture intervient généralement dès que la contrainte atteint la résistance en traction du matériau, conduisant à une fissuration brutale. Cette fragilité est principalement liée à la faible résistance de la matrice cimentaire et à la présence de microfissures initiales. Cependant, avant la rupture complète, une phase de microfissuration progressive peut être observée, marquée par le développement d'une Fracture Process Zone (FPZ) autour de la fissure principale. Dans cette zone, l'endommagement local du matériau entraîne une dissipation d'énergie par microfissuration. L'étude de ce comportement est essentielle pour comprendre les mécanismes de rupture et améliorer la modélisation des structures en béton, notamment via des approches mésoscopiques prenant en compte l'hétérogénéité du matériau.

Avant de passer à l'étude numérique, une description du comportement mécanique du béton en traction est présentée ci-dessous :

3.3.1 Comportement pré-rupture

En début de chargement, le béton réagit de manière quasi-linéaire, jusqu'à l'apparition de microfissures localisées. Ces fissures prennent naissance aux interfaces entre les granulats et la pâte de ciment, qui représentent des zones de faiblesse. Avant la rupture, le béton présente donc un comportement élastique fragile, sans véritable phase plastique.

3.3.2 Initiation de la fissuration

Dès que la contrainte atteint un seuil critique, des fissures macroscopiques apparaissent et se propagent rapidement. Contrairement aux matériaux ductiles, la fissuration du béton ne s'accompagne pas d'un allongement significatif ou d'un écoulement plastique. La fissuration est brutale et localisée, ce qui rend la mesure de la résistance en traction délicate.

3.3.3 Zone de processus de rupture (FPZ)

Lors de la propagation d'une fissure, une zone particulière appelée zone de processus de rupture (FPZ) se développe à la pointe de la fissure. Cette zone est marquée par l'apparition de microfissures diffuses, une redistribution progressive des contraintes internes et une dissipation d'énergie due à l'endommagement progressif du matériau.

La FPZ joue un rôle déterminant dans l'analyse de l'effet d'échelle. En effet, sa longueur caractéristique permet d'expliquer pourquoi les petites structures présentent souvent un comportement ductile, tandis que les grandes tendent vers un comportement plus fragile.

Dans le cadre des simulations numériques, la FPZ peut être représentée à l'aide de différentes approches. Parmi celles-ci, on trouve les lois d'endommagement locales ou non-locales, les modèles à zones cohésives (ou éléments joints), ainsi que les formulations basées sur l'énergie de rupture.

3.4 Modélisation numérique du béton sous CAST3M

3.4.1 Objectifs de la modélisation

Cette étude vise à caractériser l'effet d'échelle sur le comportement du béton en traction directe à travers une approche numérique mésoscopique sous CAST3M. Quatre poutres de géométrie similaire et de hauteurs variables (50 mm, 100 mm, 200 mm et 400 mm) sont simulées sous chargement axial.

Cette analyse vise principalement à évaluer l'influence de la taille des éprouvettes sur la résistance mécanique, le processus de fissuration et l'évolution de l'endommagement.

3.4.2 Conditions aux limites

Dans la configuration adoptée, une extrémité de la poutre est entièrement encastree, c'est-à-dire que tous les degrés de liberté (déplacements et rotations) y sont bloqués. L'autre extrémité repose sur un appui simple horizontal, bloqué uniquement en translation verticale mais libre de se déplacer horizontalement. Le chargement est introduit sous forme d'un déplacement imposé progressif à l'extrémité libre, ce qui assure un contrôle précis du chargement et une meilleure stabilité numérique durant la phase de fissuration.

3.4.3 Suivi et exploitation des résultats

Dans cette partie, le comportement global des poutres est initialement analysé. Les résultats de simulation courbes force-déplacement obtenus par l'approche mésoscopique sont représentés sur la Figure 3-1.

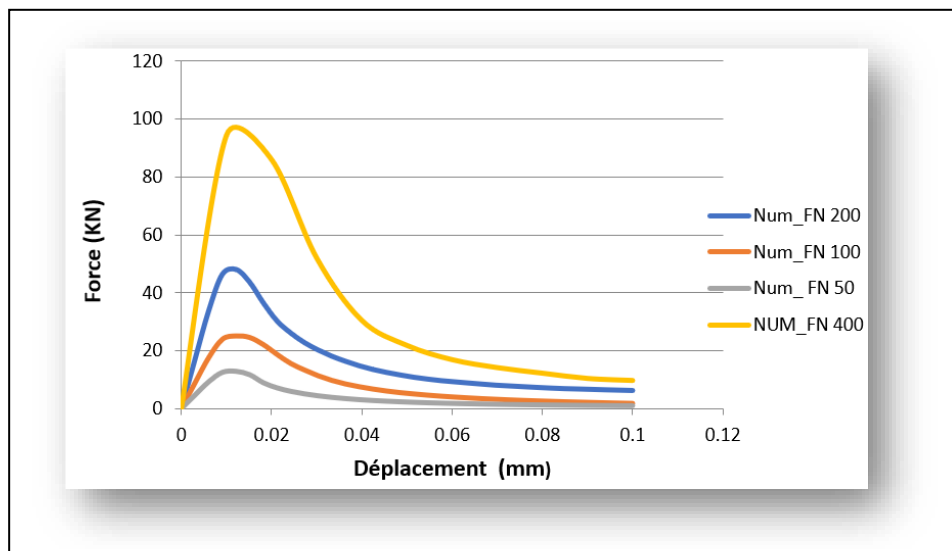


Figure 3-1 : Courbe de la force en fonction du déplacement pour les poutres FN

Le comportement global est bien reproduit. L'effet d'échelle sur le pic de chargement et le post pic est globalement bien reproduit à l'échelle mésoscopique. Ces résultats attestent de la capacité de la combinaison du modèle d'endommagement avec l'approche mésoscopique à reproduire le comportement mécanique du béton réel.

Une analyse complémentaire de l'effet d'échelle sur la contrainte nominale est illustrée sur la Figure 3-2 et la Figure 3-3.

La contrainte nominale en traction est donnée par la relation suivante:

$$\sigma_N = F/S \quad (3.1)$$

Avec σ_N est la contrainte normale, F la force appliquée, S la surface de la section transversale.

Tableau 3-1 : Dimensions des poutres FN, forces et contraintes nominales.

D (mm)	S (mm ²)	F (KN)	σ_N (Mpa)
400	40000	94.3862	2.359655
200	20000	48.0554	2.40277
100	10000	25.0666	2.50666
50	5000	12.8597	2.57194

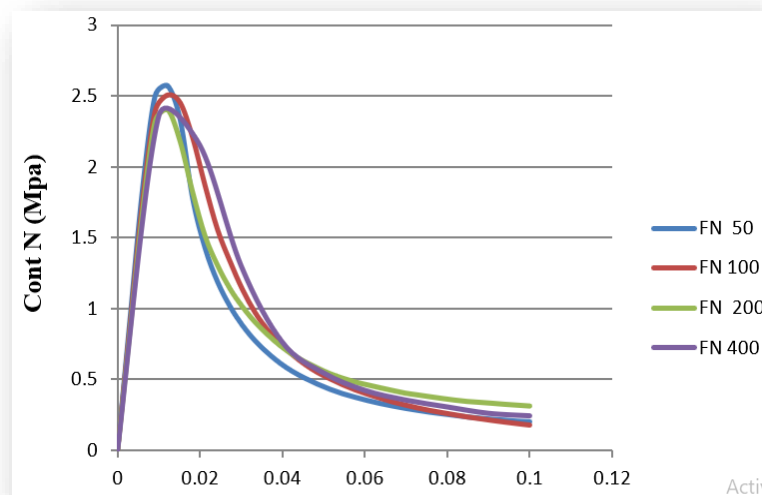


Figure 3-2 : Courbes Contrainte nominale-déplacement obtenues par simulation numérique en traction directe.

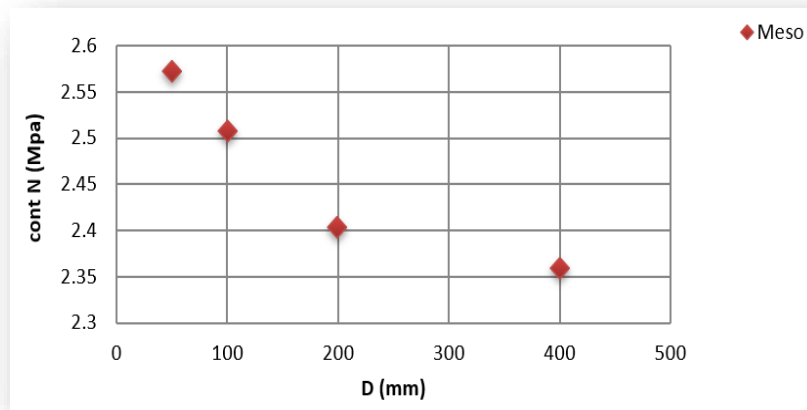


Figure 3-3 : Effet d'échelle sur la contrainte nominale.

L'effet d'échelle est globalement bien observé sur la Figure 3-2 et la Figure 3-3. La valeur de la contrainte nominale diminue progressivement avec l'augmentation de la hauteur de poutre D.

3.4.4 Evaluation de la FPZ

Dans cette partie, nous proposons de caractériser la longueur de la Fracture Process Zone (FPZ) en adoptant la même stratégie que celle utilisée au chapitre 2. Les distributions de contraintes tangentielles le long de la fissure, mesurées respectivement au pic de charge et en fin de chargement, sont présentées sur la figure 3-6 et la figure 3-7. Cette approche permet une analyse cohérente avec les résultats précédents tout en fournissant des données quantitatives sur l'évolution de la zone endommagée.

Les cartes d'endommagements et d'ouvertures de fissure à la fin du chargement sont présentées sur les figures suivantes

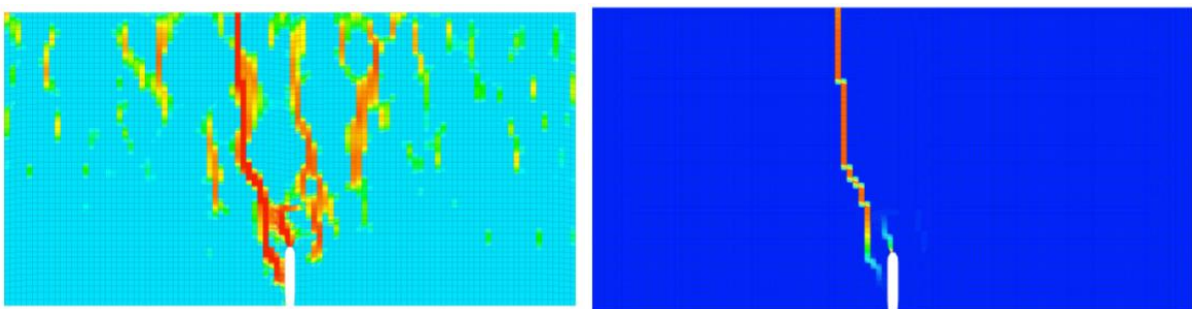


Figure 3-4: Carte d'endommagement et d'ouverture de fissure-Poutre h=50mm.

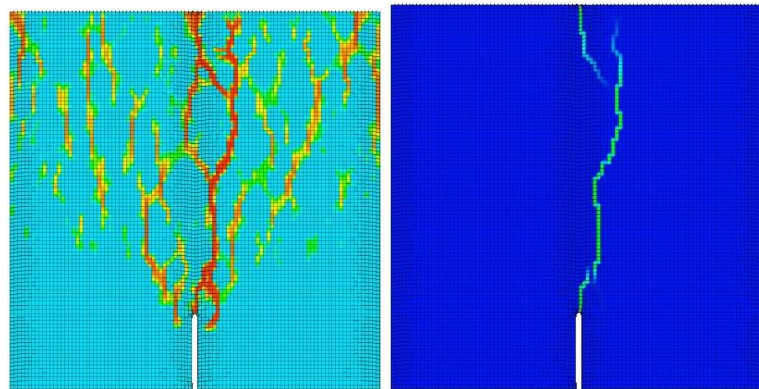
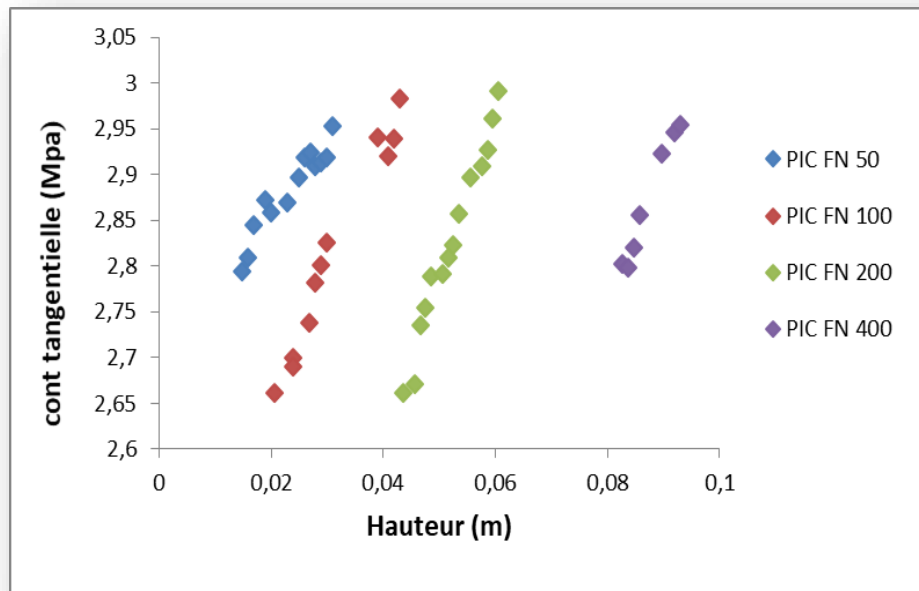
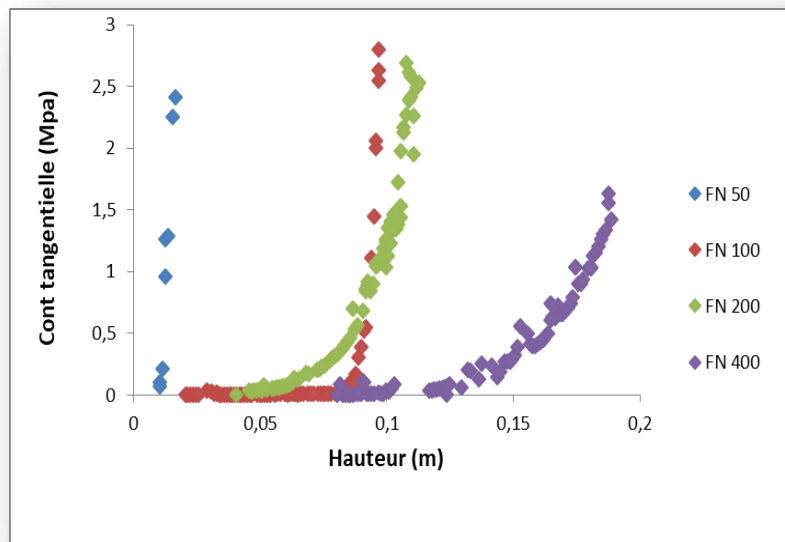


Figure 3-5: Carte d'endommagement et d'ouverture de fissure-Poutre h=100mm.



(a)

Figure 3-6 : Variation de la contrainte tangentielle en fonction de la hauteur au pic du chargement.



(b)

Figure 3-7 : Variation de la contrainte tangentielle en fonction de la hauteur à la fin du chargement.

Les résultats observés sur la figure 3-6 peuvent attester que la longueur de la FPZ n'est pas complètement développée au pic du chargement pour toutes les tailles de poutres testées. Alors que le résultat sur la figure 3-7 montre bien qu'à la fin du chargement les longueurs de La FPZ sont bien développées.

3.5 Comparaison des résultats de l'effet d'échelle: Flexion /traction

La flexion trois points est une méthode couramment utilisée pour évaluer la résistance et la ductilité des poutres en béton, tandis que la traction directe permet une observation plus directe du comportement en rupture. Ces deux essais font intervenir des états de contrainte et de fissuration différents, ce qui peut influencer la manifestation de l'effet d'échelle.

Après avoir attesté la présence de l'effet d'échelle sur les poutres en béton dans le cas d'un état de contraintes en flexion trois points et en traction directe nous proposons ici une comparaison entre l'état de développement de la FPZ dans les deux cas des états de chargement (flexion et traction).

La Figure 3-8 montre une comparaison de la contrainte nominale en fonction de la hauteur de poutres obtenues numériquement pour les deux états de chargement. L'effet d'échelle en flexion trois points est plus visible que dans le cas de la traction.

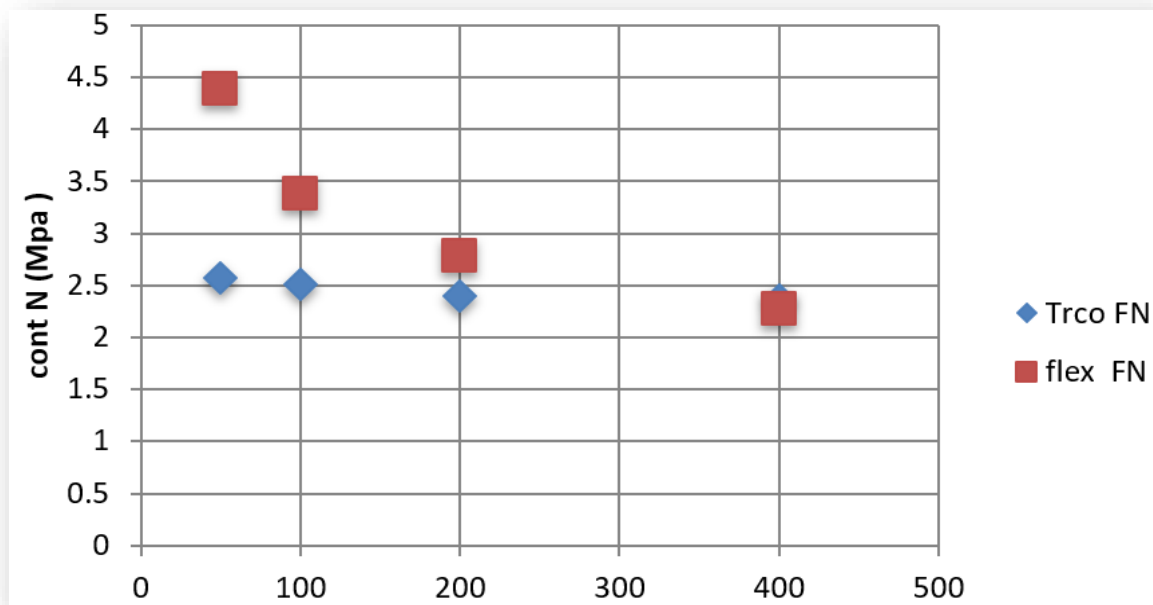


Figure 3-8: Comparaison de la Contrainte nominale en fonction de la hauteur de poutre (flexion/traction).

3.6 Conclusion de chapitre

Les résultats d'une analyse préliminaire de l'effet d'échelle sur des poutres en béton soumises à la traction directe ont été présentés dans ce chapitre. Contrairement aux prédictions théoriques, qui anticipent une Fracture Process Zone (FPZ) complètement développée au pic de chargement, les observations montrent qu'en l'absence de contraintes de compression (typiquement présentes en flexion), la FPZ ne se forme pas intégralement à ce stade. Cette divergence soulève des questions importantes sur les mécanismes d'endommagement en traction pure et met en lumière la nécessité d'approfondir l'étude des conditions aux limites et de la cinétique de microfissuration. Cependant, un effet d'échelle plus prononcé est observé en traction directe. Cela est lié à la nature du comportement fragile du béton en traction (rupture instantanée sans redistribution).

Conclusion générale

Conclusion générale

Le béton est un matériau complexe dont l'hétérogénéité intrinsèque (présence de granulats, pores et microfissures) engendre des comportements mécaniques non linéaires, particulièrement lors de la fissuration. Cette particularité rend son étude expérimentale délicate, surtout pour les structures de grandes dimensions où les mécanismes de rupture deviennent difficiles à caractériser. L'effet d'échelle, qui traduit l'influence de la taille sur la résistance et la durabilité, constitue ainsi un enjeu critique dans la conception des ouvrages massifs en béton, nécessitant des approches théoriques et numériques adaptées.

Une étude numérique de l'effet d'échelle dans les structures en béton a été réalisée dans ce mémoire. L'étude numérique repose sur une approche de modélisation à l'échelle mésoscopique. Deux lois analytiques de l'effet d'échelle (la loi de Bazant et le modèle MMTS) ont été utilisées pour la caractérisation des paramètres de rupture.

Les résultats de comparaison des deux modèles théoriques Bazant et modèle MMTS ont montré un bon accord avec les résultats expérimentaux et numériques.

La comparaison des courbes Force-CMOD expérimentales et numériques, a montré la capacité de la combinaison de l'approche mésoscopique avec le modèle d'endommagement à reproduire l'effet d'échelle.

L'effet d'échelle a bien été observé en flexion comme en traction directe, cependant en traction l'effet d'échelle est plus prononcé qu'en flexion.

Contrairement aux prédictions théoriques, qui anticipent une Fracture Process Zone (FPZ) complètement développée au pic de chargement, les observations montrent qu'en l'absence de contraintes de compression (typiquement présentes en flexion), la FPZ ne se forme pas intégralement à ce stade.

Bibliographie

Aissaoui, N. (2018). *Apport de la modélisation mésoscopique dans la prédiction de la fissuration des structures en béton : Aspects énergétiques et effets d'échelle* [Doctoral thesis, Université Aboubakr Belkaïd Tlemcen].

Alam, S.Y., Loukili, A., Grondin, F. (2012). Suivi de l'effet d'échelle sur l'ouverture des fissures dans le béton par corrélation d'image numérique. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16(7), 818–836.

Alam, S.Y., Saliba, J., Loukili, A. (2014). Étude de la fissuration du béton par techniques combinées de corrélation d'image numérique et d'émission acoustique. *Construction and Building Materials*, 69, 232–242.

Alam, S.Y. et al. (2015). Effet de la taille structurelle sur la fissuration du béton armé étudié par corrélation d'image numérique et émission acoustique. *Engineering Fracture Mechanics*, 143, 17–31.

Amani, J. et al. (2016). Formulation périodynamique pour la fracture thermo-plastique. *International Journal of Impact Engineering*, 87, 83–94.

Ayatollahi, M.R., Akbardoost, J. (2012). Size effects on fracture toughness of quasi-brittle materials – A new approach. *Engineering Fracture Mechanics*, 92, 89–100.

Ayatollahi, M.R., Nejati, M. (2011). An over-deterministic method for calculation of coefficients of crack tip asymptotic field from finite element analysis. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 34, 159–176.

Aydin, A.C., Arslan, A., Gul, R. (2007). Simulation mésoscopique du comportement différé des matériaux à base de ciment. *Computational Materials Science*, 41, 20–26.

Azevedo, N.M., Lemos, J.V., Almeida, J.R. (2008). Influence de la déformation des granulats sur la modélisation discrète de la rupture du béton. *Engineering Fracture Mechanics*, 75(6), 1569–1586.

Barenblatt, G.I. (1962). Théorie mathématique des fissures en équilibre en rupture fragile. *Advances in Applied Mechanics*, 7, 55–129.

Bažant, Z.P. (1976 à 2005). Travaux fondamentaux sur la rupture et l'effet d'échelle dans les matériaux quasi-fragiles. Divers articles dans *Journal of Engineering Mechanics*, *ACI Materials Journal*, *Engineering Fracture Mechanics*.

Bažant, Z.P., Jirásek, M. (2002). Formulations intégrales non locales en plasticité et endommagement. *Journal of Engineering Mechanics*, 128(11), 1119–1149.

Bažant, Z.P., Oh, B.H. (1983). Théorie de la bande de fissure pour la rupture du béton. *Materials and Structures*, 16, 155–177.

Bažant, Z.P., Planas, J. (1997). *Rupture et effet d'échelle dans le béton et autres matériaux quasi-fragiles*. CRC Press.

- Bažant, Z.P., Yu, Q.** (2009). Loi universelle de l'effet d'échelle et influence de la profondeur de fissure sur la résistance. *Journal of Engineering Mechanics*, 135(2), 78–84.
- Benkemoun, N. et al.** (2016). Étude mésoscopique de l'essai de fendage : effet d'échelle et énergie de rupture. *Engineering Fracture Mechanics*, 168, 242–259.
- Caballero, A., Carol, I., Lopez, C.M.** (2006). Analyse 3D mésoscopique de la fissuration du béton. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures*, 29(12), 979–991.
- Carpinteri, A. et al.**(1989, 1994, 2007). Contributions à la théorie fractale et critiques de la théorie statistique de l'effet d'échelle.
- Cedolin, L., Poli, S.D., Iori, I.** (1983). Détermination expérimentale de la zone de processus de fissuration dans le béton. *Cement and Concrete Research*, 13(4), 557–567.
- Cusatis, G. & Schaufert, E.A.** (2009). Cohesive crack analysis of size effect. *Engineering Fracture Mechanics*, 76(14), 2163–2173.
- Dupray, F. et al.** (2009). Modèle mésoscopique du comportement du béton sous confinement. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 33(11), 1407–1423.
- Farnam, Y. et al.**(2015). Analyse des signaux d'émission acoustique dans le béton endommagé. *Cement and Concrete Composites*, 60, 135–145.
- Frémond, M., Nedjar, B.** (1995). Endommagement dans le béton : formulation à gradient. *International Journal of Solids and Structures*.
- Grégoire, D., Salaün, M., Pijaudier-Cabot, G.** (2013, 2015). Caractérisation expérimentale de la FPZ dans le béton par émission acoustique et modélisation.
- Matallah, M., La Borderie, C.** (2016). Modélisation 3D du couplage fissure-perméabilité dans le béton. *IA-FraMCoS*.
- Matallah, M., La Borderie, C., Maurel, O.** (2010). A practical method to estimate crack openings in concrete structures. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 34, 1615–1633.
- Muralidhara, S. et al.**(2010). Taille de la zone de processus de fissuration dans le béton par émission acoustique. *Construction and Building Materials*, 24(4), 479–486.
- Nallathambi, P., Karihaloo, B.L., Heaton, B.S.** (1984). Influence de la taille des éprouvettes sur la ténacité de rupture du béton. *Magazine of Concrete Research*, 36(129), 227–236.
- Otsuka, K., Date, H.** (2000). Zone de processus de fissuration dans les éprouvettes en béton. *Engineering Fracture Mechanics*, 65, 111–131.
- Peerlings, R. et al.** (1996). Modèle d'endommagement à gradient pour matériaux quasi-fragiles. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 39, 3391–3403.
- Pijaudier-Cabot, G., Bažant, Z.P.** (1987). Théorie de l'endommagement non local. *Journal of Engineering Mechanics*, 113(10), 1512–1533.

Roelfstra, P.E., Sadouki, H., Wittmann, F.H. (1985). Le béton numérique : modélisation mésoscopique. *Matériaux et Constructions*, 18, 327–335.

Rojas Solano, L.B. (2012). *Endommagement non-local, interactions et effets d'échelle* [Doctoral thesis, Université de Pau, France].

Rossi, P. et al. (1994). Scale effect on concrete in tension. *Materials and Structures*, 27(8), 437–444.

Saliba, J. et al. (2012, 2016). Études expérimentales et numériques du béton par émission acoustique et modélisation mésoscopique.

Silling, S.A. (2000). Théorie périodynamique : reformulation de la mécanique de l'élasticité. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*.

Van Mier, J.G.M. (2012). *Rupture du béton : une approche multi-échelle*. CRC Press.

Weibull, W. (1939, 1951). Théorie statistique de la résistance des matériaux. *Royal Swedish*