



Université Mohamed khider –Biskra
Faculté d'Architecture, de l'Urbanisme, de Génie Civil et de l'Hydraulique
Département de Génie civil et d'Hydraulique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies

Filière : GENIE CIVIL

Spécialité : STRUCTURE

Réf. :

Présenté et soutenu par : Lemounes Fairouz

Le:Click here to enter a date.

Analyse numérique de l'endommagement des poutres en béton armé

Jury :

Encadreur : Abdelhak khechai

Année universitaire : 2024 /2025

Remerciements

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à :

- Mon professeur encadrant **Abdelhak Khechai**, pour ses précieuses orientations et son soutien constant tout au long de la préparation de ce mémoire.
- Tous les enseignants qui ont dispensé les matières en lien avec ce sujet durant la période d'études.
- Ma famille pour son soutien indéfectible et ses encouragements tout au long de mon parcours universitaire.

Je remercie également toutes les personnes ayant contribué à la réussite de ce mémoire, en espérant que cette étude sera utile aux chercheurs dans ce domaine.

Dédicace

Au nom de Dieu, le Clément, le Miséricordieux,

Un long parcours fait d'échecs et de réussites, fière de mon combat pour réaliser mes rêves.

Un moment que j'ai toujours attendu et rêvé. Une histoire dont les chapitres sont à présent clos.

À celui qui m'a appris à donner sans attendre en retour, à celui dont je porte le nom avec fierté, à celui que Dieu a doté de noblesse et de dignité : mon cher père.

À mon bien-aimée, à la prunelle de mes yeux, au battement de mon cœur, à celle dont les prières sincères ont été le secret de ma réussite : ma chère mère.

À mes sœurs et frères.

À mes amis, sans exception.

À tous les enseignants respectés qui m'ont tendu la main.

ملخص

يتناول هذا البحث تحليل وإصلاح وتدعم العوارض الخرسانية المسلحة، مع التركيز على ظاهرة التشققات التي تؤثر بشكل كبير على ديمومة المنشآت. بعد دراسة نظرية لأهم أسباب التدهور (الهجمات الكيميائية، أخطاء التصميم، الأحمال الزائدة)، تم عرض أبرز (CFRP) تقنيات الإصلاح، مثل حقن الشقوق والتدعم باستخدام المواد المركبة، خصوصاً ألياف الكربون.

لعارض خاسعة لاختبار الانحناء بأربعة نقاط، حيث تم تحليل توزيع الإجهادات ABAQUS تم تنفيذ نمذجة عدديّة باستخدام برنامج وتطور التشققات وتقدير فعالية تقنيات التدعيم. وقد أثبتت النتائج أن النمذجة العددية أداة فعالة في التنبؤ بسلوك المنشآت وتحسين استراتيجيات الإصلاح.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة المسلحة، التشققات، الإصلاح، التدعيم، المواد المركبة، النمذجة العددية،

Abstract

This thesis focuses on the analysis, repair, and strengthening of reinforced concrete beams, with a particular emphasis on cracking, a common issue affecting structural durability. Following a literature review on the main causes of damage (chemical attacks, design errors, overloads), the study presents major repair techniques, including crack injection and reinforcement using composite materials, especially Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP).

A numerical modeling was carried out using the **ABAQUS** software on a beam subjected to four-point bending. This simulation enabled the assessment of stress distribution, crack propagation, and the effectiveness of strengthening methods. The results confirm that numerical simulation is a reliable tool for predicting structural behavior and optimizing repair strategies.

Keywords: Reinforced concrete, Cracking, Repair, Strengthening, Composite materials, Numerical modeling, ABAQUS.

Résumé

Ce mémoire traite de l'analyse, de la réparation et du renforcement des poutres en béton armé, en mettant l'accent sur la fissuration, phénomène fréquent affectant la durabilité des structures. Après une étude bibliographique des causes d'endommagement (attaques chimiques, erreurs de conception, surcharges), les principales techniques de réparation sont présentées, dont l'injection des fissures et le renforcement par matériaux composites, notamment les fibres de carbone (CFRP).

Une modélisation numérique à l'aide du logiciel **ABAQUS** a été réalisée sur une poutre soumise à une flexion à quatre points, permettant de simuler la distribution des contraintes, la propagation des fissures, et d'évaluer l'efficacité des solutions de renforcement. Les résultats confirment que la modélisation numérique est un outil pertinent pour la prédiction du comportement des structures et l'optimisation des interventions de réparation.

Mots-clés : Béton armé, Fissuration, Réparation, Renforcement, Matériaux composites, Modélisation numérique, ABAQUS.

SOMMAIRE :

CHAPITRE I.	14
<i>I.1. INTRODUCTION</i>	15
<i>I.2. FISSURES DANS LES STRUCTURES EN BETON ARME</i>	15
<i>I.2.1. Dégradation dues aux attaques chimiques</i>	16
<i>I.2.2. Fissures fonctionnelles</i> :	16
<i>I.2.3. Fissures accidentnelles</i> :	17
<i>I.3. CARBONATATION DU BETON ET LA CORROSION DES ARMATURES</i>	18
<i>I.3.1. Carbonatation du béton</i> :	18
<i>I.3.2. Corrosion des armatures</i> :	19
<i>I.4. DEGRADATIONS D'ORIGINE MECANIQUE « FISSURES FONCTIONNELLES »</i>	20
<i>I.4.1. Erreurs de conception et d'exploitation</i>	20
<i>I.4.2. Défauts d'exécution</i>	21
<i>I.4.3. Accroissement des charges sollicitant la structure</i>	21
<i>I.4.4. Modification de la forme de la structure</i>	22
<i>I.5. MECANISMES DE FISSURATIONS CAUSEES PAR UN CHARGEMENT</i>	22
<i>I.6. CONCLUSION</i> 23	
CHAPITRE II.	25
<i>II.1. INTRODUCTION</i>	26
<i>II.2. REPARATION DES FISSURES</i>	26
<i>II.2.1. Réparation des fissures fonctionnelles</i> :	26
<i>II.2.2. Réparation des fissures accidentnelles</i> :	27
<i>II.3. RENFORCEMENT DES STRUCTURES</i>	31
<i>II.3.1. Renforcement des structures par l'utilisation des tôles métalliques</i> :	31
<i>II.3.2. Renforcement des structures par l'utilisation des matériaux composites</i> :	31
<i>II.4. CONCLUSION</i> 37	
CHAPITRE III.	40
<i>III.1. INTRODUCTION</i>	40
<i>III.2. DEFINITIONS</i>	40
<i>III.3. DEFORMATION ELASTIQUE, INELASTIQUE ET PLASTIQUE D'UNE POUTRE EN BETON ARME</i> :	41

III.3.1. <i>Estimation du paramètre de dommage :</i>	42
III.3.2. <i>Critère de défaillance</i>	43
CHAPITRE IV.....	44
IV.1. <i>INTRODUCTION</i>	45
IV.2. <i>CARACTERISTIQUE GEOMETRIQUES DE LA POUTRE EN BETON ARME</i> :	45
IV.3. <i>CARACTERISTIQUE MECANIQUES DES MATERIAUX CONSTITUANT LA POUTRE</i>	47
IV.4. <i>RESULTATS DE LA MODELISATION</i>	54
IV.4.1. <i>Interprétation des résultats</i> :	58
REFERENCES.....	63

LISTE DES FIGURES :

<i>Figure I. 1 : Fissuration d'un corbeau en béton armé [3].</i>	16
<i>Figure I. 2: Fissuration de retrait « dalle en béton armé ».</i>	17
<i>Figure I. 3 : Profondeur de béton carbonaté d'une éprouvette.</i>	18
<i>Figure I. 4 : Corrosion des armatures et éclattement du béton [6].</i>	19
<i>Figure I. 5 : Mécanisme de fissuration et éclatement du béton par de la corrosion des armatures [6].</i>	20
<i>Figure I. 6 : Fissuration typique d'un mur subi à un tassement différentiel des fondations isolées.</i>	20
<i>Figure I. 7 : Fissures verticales dues aux contraintes de traction.</i>	22
<i>Figure I. 8 : Fissures verticales dues aux moments de flexion et aux efforts normaux de traction.</i>	22
<i>Figure I. 9 : Fissures verticales dues au glissement des armatures.</i>	23
<i>Figure I. 10 : Fissures inclinées dues aux effets de l'effort tranchant.</i>	23
<i>Figure II. 1 : Calfeutrement d'une fissure en utilisant une saignée rectangulaire.</i>	29
<i>Figure II. 2 : Calfeutrement d'une fissure en utilisant une gravure en V [9].</i>	29
<i>Figure II. 3 : Injection des fissures par résine.</i>	30
<i>Figure II. 4 : Colle de gaine en acier.</i>	32
<i>Figure II. 5 : Schématisation du matériau composite .</i>	33
<i>Figure II. 6 : Organigramme illustrant les principaux matériaux de renfort .</i>	33
<i>Figure II. 7 : Roving de verre .</i>	34
<i>Figure II. 8 : Tissus de verre .</i>	34
<i>Figure II. 9 : Mat de verre .</i>	34
<i>Figure II. 10 : Fibre de carbone .</i>	35
<i>Figure II. 11 : Types des matrices .</i>	37
<i>Figure II. 12 : Procédures de la mise en œuvre .</i>	38
<i>Figure III. 1 : Courbe contrainte-déformation du béton, en compression et en traction.</i>	38
<i>Figure III. 2 : Modèles pour prédire la courbe contrainte-déformation du béton en traction.</i>	40
<i>Figure III. 3 : Courbe contrainte-déformation du béton présentant les endommagements en compression et traction [13].</i>	42
<i>Figure III. 4 : Estimation du paramètre de dommage « dégradation du module de Young ».</i>	43
<i>Figure IV. 1 : Caractéristique géométriques de la poutre en béton armé.</i>	47

Figure IV. 2 : Model numérique de la poutre en béton armé (béton et armatures).....	48
Figure IV. 3 : Diagrammes de contrainte-déformation théoriques pour le béton armé et l'acier selon l'Eurocode 2.....	49
Figure IV. 4 : Diagrammes de contrainte-déformation réels, pour le béton et l'acier, utilisés dans la modélisation.....	49
Figure IV. 5 : Introduire les contraintes, paramètre d'endommagement et les déformations inélastique de compression dans Abaqus.....	50
Figure IV. 6 : Introduire les contraintes, paramètre d'endommagement et les déformations inélastique de traction dans Abaqus.....	51
Figure IV. 7 : Introduire les contraintes et les déformations plastique des armatures dans Abaqus.....	52
Figure IV. 8 : Application des conditions aux limites.....	52
Figure IV. 9 : Maillage de la poutre et les armatures.....	53
Figure IV. 10 : Distribution finale de l'endommagement de la poutre.....	54
Figure IV. 11 : Essai expérimental d'une flexion d'une poutre en béton armé « flexion à 4 points ».....	54
Figure IV. 12 : Déplacement de la poutre.....	55
Figure IV. 13 : Distributions des contraintes, déformations élastiques, déformations plastiques et fissuration : état avant l'initiation de la fissuration.....	56
Figure IV. 14 : Distributions des contraintes, déformations élastiques, déformations plastiques et fissuration : Initiation de la première fissure.....	58
Figure IV. 15 : Distributions de contraintes, déformations élastiques, déformations plastiques et fissuration : propagation des fissures.....	59

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau II. 1 : Propriétés des fibres de verre type E et S 35

Tableau II. 2 : Propriétés des fibres de Carbone HR et HM 36

Tableau IV. 1 : Caractéristique mécaniques des matériaux constituant la poutre 48.

Introduction générale

Introduction générale

Les structures en béton armé constituent l'ossature de la plupart des infrastructures modernes. Soumises à de nombreuses sollicitations mécaniques et environnementales, elles peuvent présenter divers désordres structurels, notamment la fissuration. Ces pathologies, si elles ne sont pas maîtrisées, compromettent la durabilité et la sécurité des ouvrages. La présente étude s'attache à comprendre les mécanismes de dégradation des poutres en béton armé, en mettant en lumière les principales causes de fissuration, les méthodes de réparation, ainsi que les techniques modernes de renforcement telles que l'utilisation de matériaux composites.

En s'appuyant sur une modélisation numérique via le logiciel ABAQUS, ce travail propose une analyse approfondie du comportement des poutres fissurées, avec pour objectif de prédire leur comportement, valider les stratégies de renforcement et proposer des solutions durables adaptées aux exigences actuelles du génie civil.

Nous avons structuré notre travail en quatre chapitres principaux :

- Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur les causes majeures d'endommagement des structures en béton armé, en mettant l'accent sur les mécanismes de fissuration.
- Le deuxième chapitre est consacré aux différentes techniques de réparation et de renforcement des structures, en particulier par l'injection des fissures et l'utilisation de matériaux composites comme les fibres de carbone.
- Le troisième chapitre analyse le comportement à l'endommagement des poutres en béton armé, en introduisant les notions de déformations élastiques, plastiques et les critères de défaillance.
- Le quatrième chapitre est dédié à la modélisation numérique d'une poutre soumise à un chargement en flexion, réalisée à l'aide du logiciel ABAQUS. On y détaille la géométrie, les propriétés des matériaux, le maillage, ainsi que l'interprétation des résultats obtenus.

Enfin, nous présenterons les conclusions générales de l'étude et les perspectives ouvertes par ce travail, notamment en matière d'optimisation des stratégies de renforcement.

Chapitre I.

Synthèse bibliographique sur les causes principales de l'endommagé et la fissuration des éléments en béton

I.1. INTRODUCTION

Les ouvrages en génie civil sont soumis à diverses sollicitations qui, au fil du temps, peuvent engendrer des dégradations affectant leur performance et leur durabilité. Parmi ces dégradations, les fissures constituent l'un des phénomènes les plus courants, résultant de multiples causes telles que les variations thermiques, les retraits du béton, ou encore les efforts mécaniques excessifs. L'identification précise de l'origine des fissures est essentielle pour anticiper leur évolution et mettre en place des solutions adaptées.

En outre, les attaques chimiques représentent une menace importante pour la pérennité des structures, notamment en présence d'environnements agressifs riches en agents corrosifs tels que les sulfates, les chlorures et les acides. Ces agressions peuvent altérer les propriétés des matériaux et accélérer leur dégradation, compromettant ainsi la stabilité et la sécurité de l'ouvrage.

Par ailleurs, les dégradations d'origine mécanique peuvent découler de plusieurs facteurs, notamment des erreurs de conception et d'exploitation. Une mauvaise évaluation des charges, des défauts de dimensionnement ou encore des modifications non contrôlées de l'usage d'une structure peuvent entraîner un vieillissement prématué et des désordres structurels significatifs. L'accroissement des charges, qu'il soit prévu ou non, constitue également un facteur critique pouvant entraîner des dépassements des capacités de résistance de l'ouvrage, augmentant ainsi les risques de pathologies structurelles [1].

L'analyse de ces différents modes de dégradation est indispensable pour assurer la longévité des structures et optimiser les stratégies de maintenance et de réparation. Ce chapitre se propose d'examiner en détail ces problématiques afin de mieux comprendre leurs impacts et d'identifier les meilleures pratiques de prévention et de remédiation [2].

I.2. FISSURES DANS LES STRUCTURES EN BETON ARME

La fissuration représente l'un des premiers signes visibles d'endommagement d'une structure soumise à des sollicitations mécaniques. Elle se manifeste sous différentes formes, allant de la **microfissuration**, souvent invisible à l'œil nu, jusqu'aux **lézardes** plus prononcées, qui peuvent compromettre l'intégrité structurelle de l'ouvrage. Parmi les diverses pathologies affectant le béton, les fissures constituent l'une des formes d'altération les plus fréquentes et préoccupantes (voir la figure).



Figure I. 1 : Fissuration d'un corbeau en béton armé [3].

Les dégradations dans le béton peuvent avoir **trois origines distinctes** et indépendantes l'une de l'autre :

I.2.1. Dégradation dues aux attaques chimiques

L'environnement dans lequel évolue un ouvrage peut jouer un rôle déterminant dans la détérioration du béton. Certaines fissures sont engendrées par des réactions chimiques entre le béton et des agents agressifs présents dans l'air, l'eau ou le sol. Parmi les principales causes de dégradation et la fissuration d'origine chimique, on distingue [1] :

- Carbonatation du béton et la corrosion des armatures ;
- Attaque par les sulfates ;
- L'attaque des chlorures ;
- L'attaque acide.

I.2.2. Fissures fonctionnelles :

Elles apparaissent au cours de l'exploitation de l'ouvrage et sont principalement dues aux charges appliquées et aux sollicitations extérieures [4]. Elles peuvent être causées par :

- Des efforts mécaniques excessifs résultant d'une surcharge non prévue dans la conception initiale.

- Des mouvements différentiels de fondations, générant des tensions importantes dans la structure.
- Des phénomènes de fluage ou de retrait différé du béton, entraînant des déformations progressives.
- Les effets de dilatation et de contraction thermique dus aux variations climatiques, provoquant des fissures longitudinales ou transversales.

I.2.3. Fissures accidentelles :

Elles sont directement liées aux conditions de mise en œuvre et à la qualité du matériau. Ces fissures apparaissent généralement dès les premières phases de la vie de l'ouvrage et peuvent résulter de plusieurs facteurs tels que [4] :

- Le retrait plastique ou hydraulique du béton, provoqué par une évaporation rapide de l'eau de gâchage, entraînant des tensions internes (voir la figure ci-dessous).
- Une mauvaise cure du béton, qui peut altérer son homogénéité et sa résistance.
- La ségrégation des granulats ou un dosage inapproprié des composants du béton, engendrant des hétérogénéités dans la matrice du matériau.
- Des contraintes thermiques excessives lors de la prise et du durcissement du béton, pouvant provoquer des fissurations précoces.



Figure I. 2: Fissuration de retrait « dalle en béton armé ».

I.3. CARBONATATION DU BETON ET LA CORROSION DES ARMATURES

I.3.1. *Carbonatation du béton :*

Lors de la prise du béton, l'hydratation du ciment entraîne la formation d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2), conférant au béton un pH élevé (environ 12,5) qui protège les armatures contre la corrosion. Avec le temps, la perte d'eau de gâchage crée un réseau capillaire favorisant la pénétration du dioxyde de carbone (CO_2), qui réagit avec Ca(OH)_2 pour former du carbonate de calcium (CaCO_3), un processus appelé **carbonatation** [1].

➤ **Test de réaction à la phénolphtaléine en utilisant la norme NF EN 14630 (2007) :**

Ce test permet de déterminer la profondeur de béton carbonaté par dispersion d'une solution de phénolphtaléine (indicateur coloré) sur une éprouvette en béton préalablement coupée en deux parties dans le sens de la longueur. La zone carbonatée reste incolore tandis que celles qui ne sont pas carbonatées se colorent en violet (voir la figure ci-dessous).



Figure I. 3 : Profondeur de béton carbonaté d'une éprouvette.

Pour limiter le phénomène de carbonatation et préserver la durabilité des ouvrages, plusieurs mesures peuvent être mises en place [5] :

- Utiliser un béton avec un faible rapport E/C (Eau/Ciment) afin de réduire sa porosité et donc limiter la pénétration des agents agressifs.
- Assurer un enrobage suffisant des armatures pour retarder l'atteinte de la zone acier par le front de carbonatation.
- Appliquer des traitements de surface tels que des enduits, des peintures protectrices ou des hydrofuges, afin de limiter l'absorption de CO_2 et d'humidité.

I.3.2. Corrosion des armatures :

La corrosion des armatures est un processus électrochimique qui se produit lorsque l'acier se trouve dans un environnement favorable à l'oxydation. Pour que cette réaction ait lieu, plusieurs conditions doivent être réunies :

- La présence d'un électrolyte à forte conductivité ionique, qui facilite les échanges d'ions entre les différentes zones de l'acier.
- Un environnement riche en oxygène, favorisant les réactions d'oxydation.

La vitesse de corrosion des armatures est particulièrement accentuée en présence de **chlorures**, provenant de sources telles que l'eau de mer ou les sels de dé verglaçage (voir la figure ci-dessous).

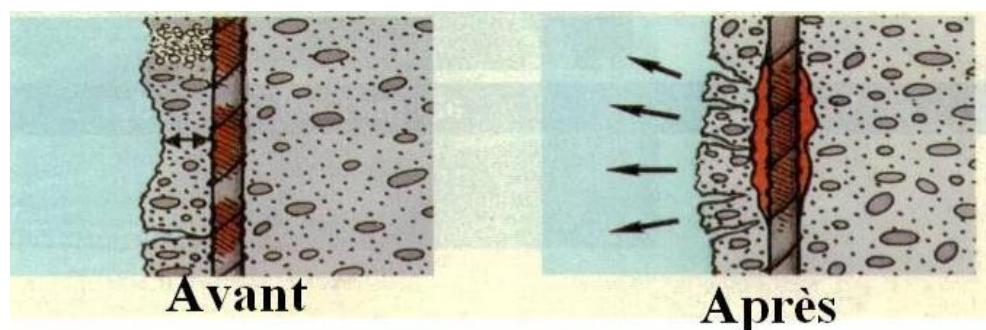
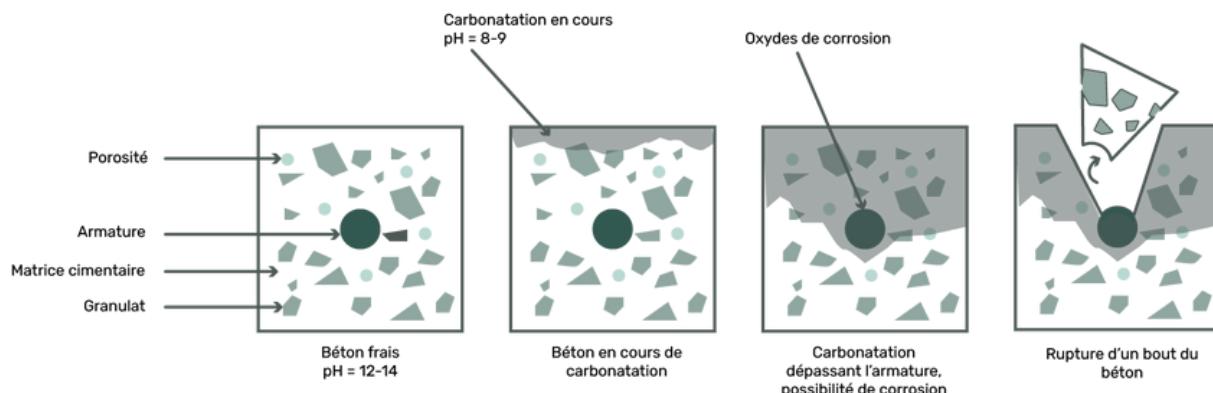


Figure I.4 : Corrosion des armatures et éclattement du béton [6].

La présence de chlorures dans le béton représente une menace majeure pour la durabilité des structures, nécessitant des mesures de prévention telles que l'utilisation de bétons à faible porosité, l'application d'inhibiteurs de corrosion ou encore l'augmentation de l'enrobage des armatures pour limiter leur exposition aux agents agressifs.

Les figures ci-dessous regroupent les mécanismes de carbonatation du béton et la corrosion des armatures et leur influence sur la fissuration et l'éclatement du béton.



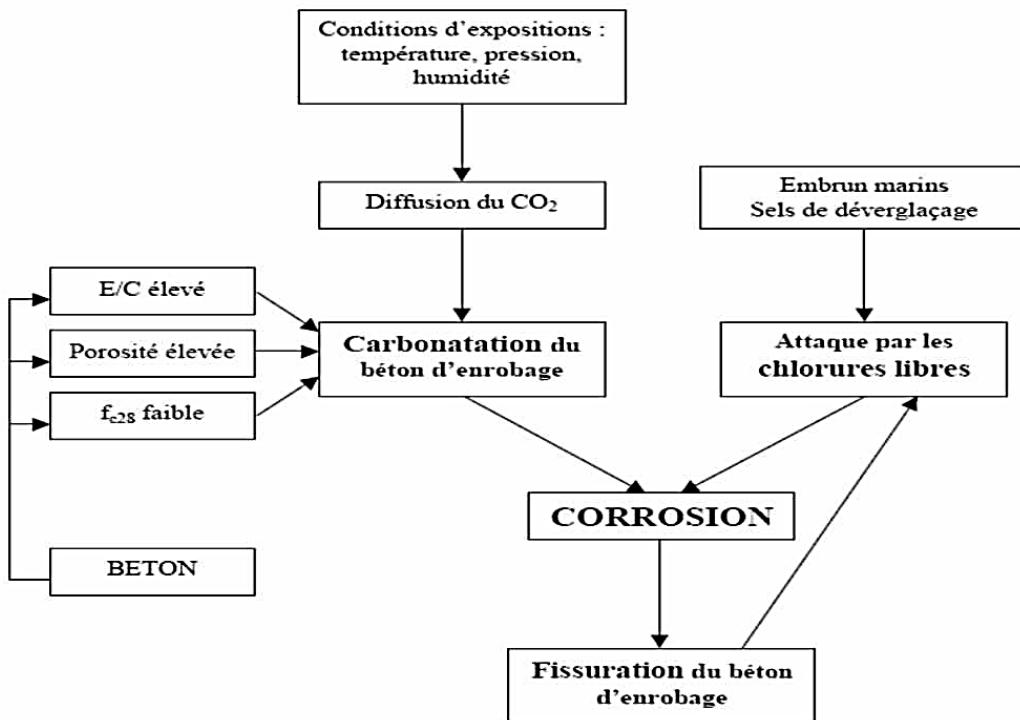


Figure I. 5 : Mécanisme de fissuration et éclatement du béton par de la corrosion des armatures [6].

I.4. DEGRADATIONS D'ORIGINE MECANIQUE « FISSURES FONCTIONNELLES »

I.4.1. *Erreurs de conception et d'exploitation*

Les erreurs de conception peuvent compromettre la durabilité et la stabilité des structures. Elles incluent notamment :

- Un tassement différentiel, dû à une mauvaise étude du sol ou à des fondations inadaptées. Ce phénomène conduit à l'apparition des fissures au niveau des murs et les éléments en béton armés (voir la figure ci-dessous).
- Une surcharge excessive, dépassant la capacité portante prévue lors du dimensionnement.
- Un manque de joints de dilatation et de retrait, entraînant des fissurations et des désordres structurels.
- Un déficit en armatures, réduisant la résistance du béton armé aux efforts de traction et de flexion.

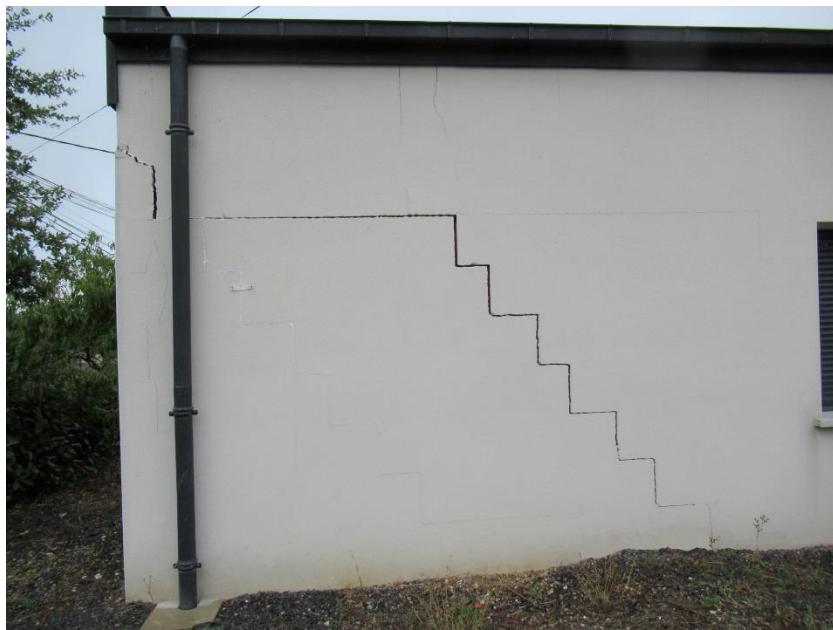


Figure I. 6 : Fissuration typique d'un mur subi à un tassement différentiel des fondations isolées.

I.4.2. Défauts d'exécution

Les défauts d'exécution résultent principalement d'une mise en œuvre non conforme aux normes et bonnes pratiques. Ils comprennent :

- Une mauvaise disposition des armatures, compromettant la résistance mécanique et la durabilité du béton armé.
- Un coffrage défectueux, pouvant entraîner des déformations ou des irrégularités dans les éléments structuraux.
- Une formulation inappropriée du béton, affectant sa résistance et sa durabilité.
- Un enrobage insuffisant des armatures, favorisant la corrosion et réduisant la protection des aciers.

I.4.3. Accroissement des charges sollicitant la structure

Une augmentation des charges appliquées peut entraîner une sollicitation excessive des éléments porteurs. Ce phénomène peut résulter de :

- Un changement d'usage de la structure (ex. : transformation d'un immeuble résidentiel en centre commercial).
- Une intensification du trafic (ex. : anciens ponts confrontés aux charges des véhicules modernes).

- L'installation de machinerie lourde dans les bâtiments industriels, augmentant les charges permanentes et d'exploitation.

I.4.4. *Modification de la forme de la structure*

Des interventions structurelles non maîtrisées peuvent altérer l'intégrité de l'ouvrage. Parmi les modifications critiques, on retrouve :

- La suppression d'éléments porteurs, tels que des poteaux, des murs ou des piliers, pouvant fragiliser l'ensemble de la structure.
- L'agrandissement des portées, modifiant la répartition des charges et générant des efforts supplémentaires.
- L'ouverture de trémies dans les planchers, pour l'installation d'escaliers ou d'ascenseurs, pouvant affaiblir la capacité portante des dalles.

I.5. MECANISMES DE FISSURATIONS CAUSEES PAR UN CHARGEMENT

Les fissures causées par une augmentation de chargement sont nombreuses et prennent naissance dans une partie ou dans l'ensemble de l'ouvrage endommagé. Dans la classification qui suit, on retrouvera les principaux dommages et leurs causes [7].

- Fissures verticales dues aux contraintes de traction provenant de l'interaction avec les remplissages (maçonnerie).

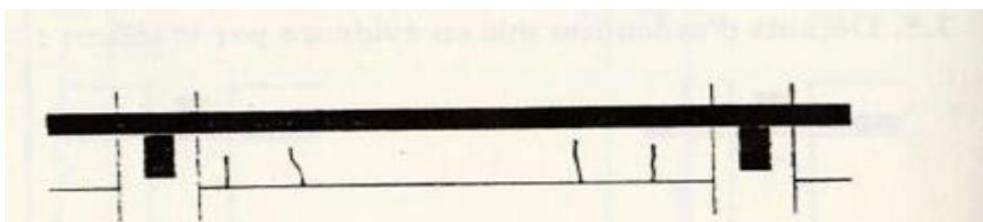


Figure I. 7 : Fissures verticales dues aux contraintes de traction.

- Fissures verticales dues aux moments de flexion et aux efforts normaux de traction.

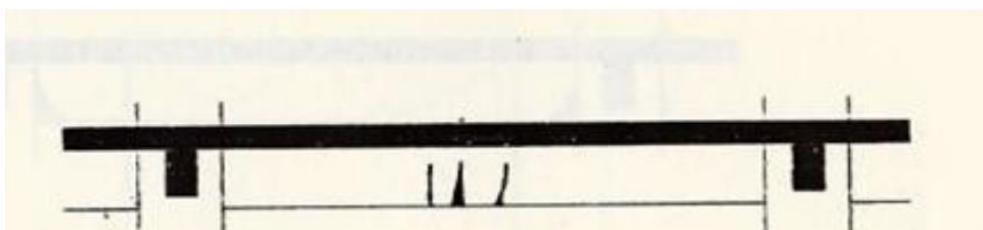


Figure I. 8 : Fissures verticales dues aux moments de flexion et aux efforts normaux de traction.

- Fissures verticales dues au glissement des armatures (destruction de l'adhérence) sous l'effet des contraintes de traction.

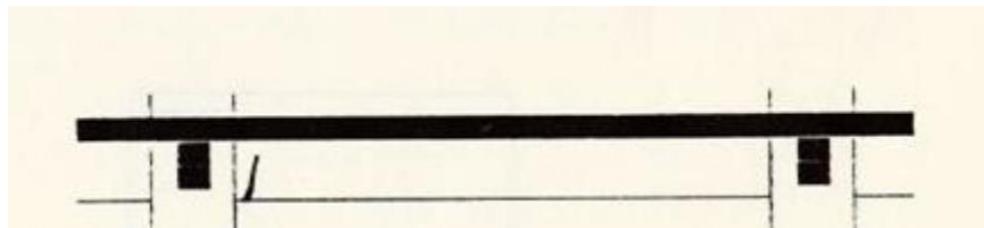


Figure I. 9 : Fissures verticales dues au glissement des armatures.

- Fissures inclinées dues aux effets de l'effort tranchant.

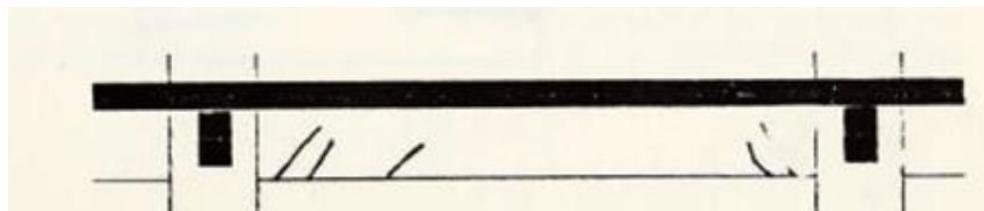


Figure I. 10 : Fissures inclinées dues aux effets de l'effort tranchant

I.6. CONCLUSION

L'analyse des dégradations affectant les structures en béton armé a mis en évidence plusieurs causes majeures de détérioration, parmi lesquelles la **fissuration**, les attaques chimiques, les erreurs de conception et d'exécution, ainsi que les surcharges et les chocs accidentels. Ces phénomènes compromettent non seulement l'intégrité structurelle des ouvrages, mais également leur durabilité et leur capacité à assurer leur fonction en toute sécurité.

Parmi ces pathologies, la fissuration des poutres constitue un problème critique, qu'elle soit d'origine **mécanique**, chimique ou due à des erreurs de mise en œuvre. En effet, les fissures peuvent évoluer dans le temps et entraîner une diminution de la capacité portante de la structure, favoriser l'infiltration des agents agressifs et accélérer la corrosion des armatures. Une intervention appropriée est donc essentielle pour restaurer l'intégrité des éléments affectés et prolonger leur durée de vie.

Le chapitre suivant sera consacré aux techniques de renforcement des poutres fissurées, en mettant particulièrement l'accent sur l'injection des fissures et le renforcement par fibres de carbone (CFRP).

Chapitre II.

**Technique de réparation et de
renforcement des structures en béton
armé**

II.1. INTRODUCTION

Avant de s'engager dans la réparation ou le renforcement d'une structure ou d'un élément de structure présentant des fissures, il est indispensable de réaliser un diagnostic précis et de déterminer les causes de ces dégradations. Ce diagnostic est très important pour choisir la méthode de réparation ou de renforcement appropriée et les matériaux à mettre en œuvre. Ce choix doit être fait en fonction de la nature et de l'ampleur des désordres constatés, tout en prenant en compte des critères économiques tels que le coût des matériaux de réparation et/ou renforcement et les techniques sélectionnées.

Le renforcement des structures, visant à les adapter à un état futur projeté, permet de les préparer à supporter des sollicitations plus élevées que celles prévues initialement. En outre, les procédés de renforcement sont souvent applicables aux travaux de réparation ou de consolidation, ce qui élargit leur champ d'utilisation.

Ce chapitre explore donc les différentes méthodes employées pour traiter les structures fissurées, en mettant un accent particulier sur les techniques modernes de réparation, telles que l'injection des fissures et le renforcement par fibres de carbone (CFRP). Nous examinerons également les critères de choix des méthodes en fonction de la nature et de l'étendue des dégradations, ainsi que les avantages et les limites de chaque approche. L'objectif de ce chapitre est de fournir une vue d'ensemble des solutions les plus efficaces pour garantir la pérennité des structures en béton armé, tout en respectant les normes de sécurité et de performance.

II.2. REPARATION DES FISSURES

II.2.1. *Réparation des fissures fonctionnelles :*

Les fissures dites fonctionnelles, qui apparaissent dans certaines zones des structures en béton armé, ne nécessitent généralement pas de traitement particulier dès lors que plusieurs conditions sont réunies : les sollicitations mécaniques et environnementales restent dans les limites prévues par les calculs de dimensionnement, et le comportement réel de l'ouvrage demeure conforme aux hypothèses retenues lors de la phase de modélisation et de conception.

Ces fissures sont souvent tolérées car elles résultent du fonctionnement normal de la structure, notamment en flexion ou en retrait, et ne compromettent ni la stabilité, ni la durabilité à court terme de l'ouvrage.

Cependant, si l'on constate un dépassement des sollicitations admissibles ou une divergence notable entre le comportement théorique et celui observé in situ par exemple, une ouverture anormale des

fissures, une évolution non prévue dans le temps, ou des signes de désordre localisé, il devient impératif d'intervenir.

La première étape consiste à analyser l'origine de ces écarts et à vérifier l'adéquation entre la conception initiale et les conditions réelles de service. En fonction des résultats de cette analyse, des mesures de renforcement, de réparation ou de modification des éléments concernés doivent être mises en œuvre afin de restaurer un fonctionnement satisfaisant de l'ouvrage, en assurant à la fois sa sécurité structurelle, sa durabilité et sa conformité aux normes en vigueur.

II.2.2. Réparation des fissures accidentelles :

Les fissures accidentelles doivent, dans la majorité des cas, faire l'objet d'un traitement approprié, en particulier lorsque leur ouverture excède les **seuils admissibles définis** lors des études de conception ou par **les normes en vigueur à savoir NF EN 1504[8]**. Ces fissures, souvent imprévues, peuvent compromettre la durabilité de l'ouvrage, favoriser l'infiltration d'eau, accélérer la corrosion des armatures ou nuire à l'aspect architectural de l'élément concerné.

Le choix du procédé de traitement dépend essentiellement de l'objectif recherché. Il peut s'agir notamment :

- D'empêcher la pénétration d'eau ou d'agents agressifs à travers une paroi fissurée,
- De restaurer ou garantir la protection des armatures contre la corrosion,
- De corriger un défaut esthétique,
- Ou encore de rétablir la continuité structurelle de l'élément concerné.

Parmi les principales solutions envisageables, nous pouvons citer :

II.2.2.1. Le pontage ou l'application d'un revêtement protecteur en surface

Cette technique vise à rétablir la barrière de protection initiale en recouvrant la zone fissurée par un revêtement étanche ou imperméable, de manière partielle ou totale. Les produits utilisés sont généralement à base de résines polymères (époxydiques, polyuréthanes, etc.) appliquées en couches minces. Ils assurent une protection durable contre les agressions extérieures tout en limitant la progression des fissures superficielles [9].

II.2.2.2. Rebouchage des fissures « Calfetrement »

Le rebouchage constitue une solution adaptée aux fissures très ouvertes, en particulier lorsqu'elles n'ont pas un rôle structurel critique mais présentent un risque de pénétration d'eau ou de corrosion localisée. Afin de garantir une bonne efficacité du traitement, il est impératif de préparer soigneusement la fissure avant le **calfetrement**.

Les fissures doivent tout d'abord être élargies de manière contrôlée afin de faciliter la pénétration du produit de rebouchage. Cette opération peut être réalisée par repiquage, meulage ou fraisage en fonction de la configuration de la fissure et de la nature du support (voir les figures ci-dessous).

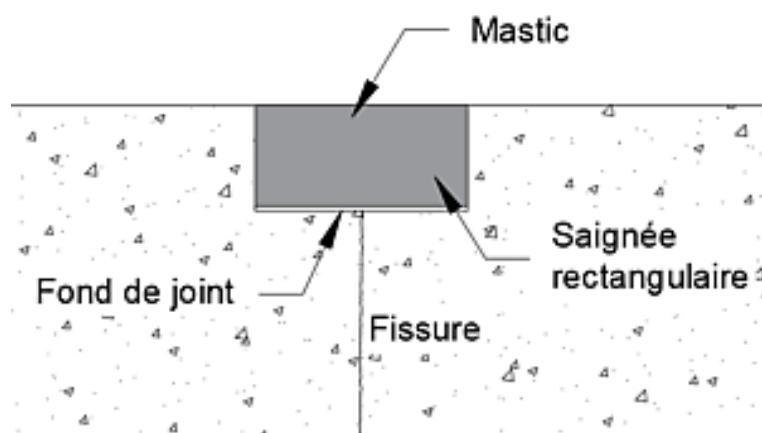


Figure II. 1 : Calfetrement d'une fissure en utilisant une saignée rectangulaire

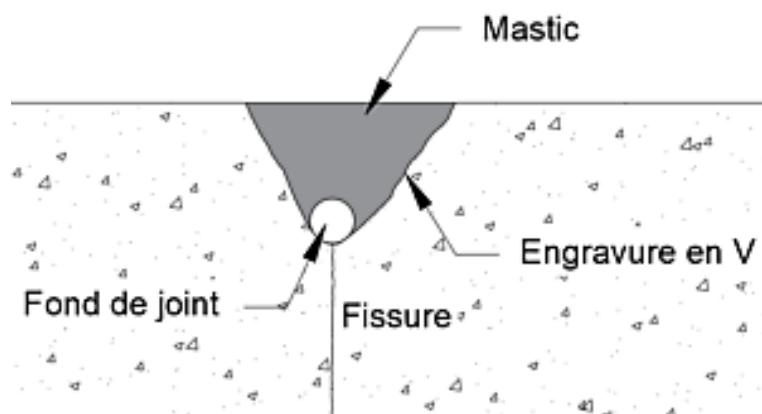


Figure II. 2 : Calfetrement d'une fissure en utilisant une engravure en V [9].

Un dépoussiérage soigneux est ensuite indispensable, généralement à l'aide d'air comprimé ou d'un lavage à eau, en veillant à ne pas saturer le support au point de compromettre l'adhérence[9].

Le produit de calfeutrement utilisé dépend de la nature et de la fonction de l'ouvrage. On utilise généralement :

- Une pâte de ciment formulée avec des résines (pour améliorer l'adhérence et la souplesse),
- Ou des mastics spécifiques (polyuréthane, acrylique, époxydique), choisis selon leur résistance aux agressions chimiques, aux mouvements différentiels et à l'humidité.

II.2.2.3. *Injection des fissures*

L'injection est une méthode plus technique, utilisée principalement pour traiter les fissures profondes, **actives** ou **traversantes**, notamment dans les ouvrages soumis à des sollicitations structurelles ou à des contraintes d'étanchéité. Elle permet de restaurer la continuité du béton, d'obturer les chemins de pénétration d'eau, et dans certains cas, de participer au renforcement local de la structure.



Figure II. 3 :Injection des fissures par résine.

Avant toute injection, un nettoyage minutieux des fissures est requis. Celui-ci s'effectue à l'aide d'un jet d'eau sous pression, éventuellement complété par un détergent ou un agent spécifique, afin d'éliminer les poussières, laitances et polluants susceptibles d'entraver l'adhérence du produit injecté.

Le choix du produit d'injection dépend de plusieurs facteurs, tels que la nature et la largeur de la fissure, son évolution dans le temps, la fonction de l'ouvrage et les conditions d'exploitation :

- Les coulis de ciment sont utilisés pour les fissures larges, non évolutives, sur structures peu sollicitées.

- Les résines synthétiques (époxy, polyuréthane, etc.) conviennent mieux aux fissures fines, aux structures sollicitées ou aux milieux agressifs.

Il est également essentiel d'adapter l'état d'humidité de la fissure au produit utilisé : certaines résines exigent un support sec, tandis que d'autres, comme certains polyuréthanes hydro-réactifs, nécessitent un support humide pour réagir correctement.

II.3. RENFORCEMENT DES STRUCTURES

II.3.1. *Renforcement des structures par l'utilisation des tôles métalliques :*

Le renforcement des structures par collage de tôles en acier, longtemps privilégié dans le secteur du bâtiment, n'a connu qu'un développement limité dans le domaine du génie civil, en raison notamment de contraintes techniques et de durabilité (voir la figure ci-dessous).





Figure II. 4 :Colle de gaine en acier.

II.3.2. Renforcement des structures par l'utilisation des matériaux composites :

Pour dépasser les limites de cette méthode traditionnelle, plusieurs groupes de recherche se sont orientés vers l'exploration de solutions alternatives, notamment l'utilisation de **matériaux composites**. Cette approche innovante, jugée plus prometteuse, vise à développer des techniques de renforcement efficaces pour les structures en béton ou en acier. Elle repose sur l'imprégnation et le collage de tissus secs constitués de fibres haute performance, tels que les Polymères Renforcés de Fibres de Carbone (PRFC), offrant une excellente résistance mécanique, une légèreté appréciable, ainsi qu'une durabilité accrue face aux agressions environnementales [10].

II.3.2.1. Définition des matériaux composite :

Selon Berthelot (2010), un matériau composite est un assemblage de deux matériaux non miscibles mais fortement adhérents, dont la combinaison permet d'obtenir des performances supérieures à celles de chaque constituant pris séparément. Il se compose de deux phases principales : **la matrice**, qui assure la cohésion, la répartition des efforts et la protection du matériau, et **le renfort**, généralement sous forme de fibres (continues ou discontinues), qui confère au composite sa résistance mécanique. L'agencement et l'orientation des fibres jouent un rôle essentiel dans l'optimisation des propriétés mécaniques du matériau [11].

II.3.2.2. *Eléments constituants d'un matériau composite :*

Un matériau composite plastique est constitué principalement de deux éléments complémentaires, le **renfort** et la **matrice** (voir la figure ci-dessous).

À ces deux composants de base peuvent s'ajouter des additifs ou charges, incorporés à la résine pour modifier certaines propriétés (comme la résistance au feu, aux UV, etc.) ou pour en réduire le coût de fabrication.

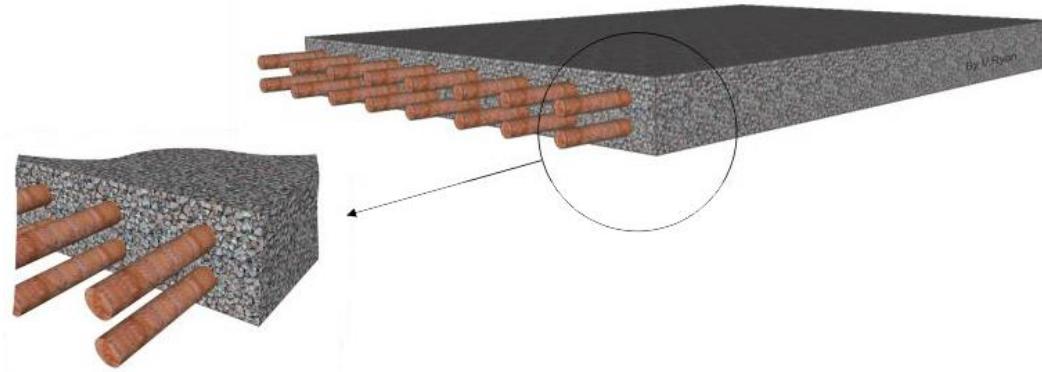


Figure II. 5 : Schématisation du matériau composite

II.3.2.3. *Renfort :*

Les matériaux de renfort apportent aux composites leurs propriétés mécaniques (rigidité, résistance, dureté) et améliorent certaines caractéristiques physiques (tenue thermique, feu, abrasion, etc.). Ils doivent être à la fois performants, légers, compatibles avec les résines, faciles à mettre en œuvre et peu coûteux. Selon les usages, ils peuvent être d'origine végétale, minérale, artificielle ou synthétique, mais sont le plus souvent utilisés sous forme de fibres, représentant généralement 30 à 70 % du volume du composite [11].

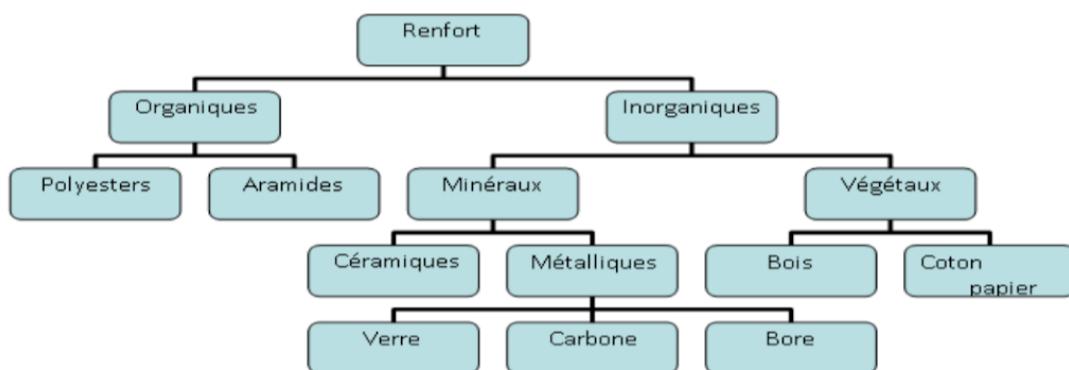


Figure II. 6 :Organigramme illustrant les principaux matériaux de renfort

➤ **Fibre de verre :**

Les renforts en fibres se présentent sous différentes formes commerciales :

- Sous forme de **roving** (fils, mèches, etc.) : le roving est un assemblage de filaments de base parallèles, regroupés sans torsion.

*Figure II. 7 :Roving de verre*

- Sous forme **de tissus** (taffetas, toile, sergé, etc.) : le tissu est obtenu par l'entrecroisement perpendiculaire de rovings. Les tissus de roving peuvent atteindre un grammage allant jusqu'à 800 g/m².

*Figure II. 8 :Tissus de verre*

- Sous forme de **mat** (à fils coupés ou à fils continus) : le mat est un voile constitué de fibres coupées ou continues, réparties aléatoirement et maintenues par un liant. Ce liant peut être à dissolution rapide ou lente dans la résine, selon l'application souhaitée.



Figure II. 9 : Mat de verre

La fibre de verre est un filament extrêmement fin, d'un diamètre d'environ 10 micromètres, obtenu à partir de silice mélangée à divers additifs. Selon leur domaine d'application, les fibres de verre sont classées en plusieurs catégories de qualité :

- **Fibres E** : utilisées pour les composites à grande diffusion (applications générales).
- **Fibres D** : destinées aux applications en électronique, notamment pour la fabrication de circuits imprimés, grâce à leur faible constante diélectrique.
- **Fibres R et S** : réservées aux composites à hautes performances, en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques.

Il existe plusieurs types de fibres de verre, chacun ayant des propriétés spécifiques selon l'usage prévu. Le tableau ci-dessous présente quelques caractéristiques comparatives des fibres de type E et de type S.

Tableau II. 1 : Propriétés des fibres de verre type E et S

Propriétés	Verre type E	Verre type S
Densité (g/cm ³)	2.45	2.49
Résistance à la traction (MPa)	3 448	4 585
Module d'élasticité (GPa)	72.4	85.5
Diamètre possible µm	3-20	8-13
Coefficient de dilatation thermique 106/°C	5.0	2.9

➤ **Fibre de carbone :**

Les fibres de carbone sont apparues au cours du siècle dernier. À l'origine, elles étaient obtenues à partir de matières organiques naturelles. Aujourd'hui, elles sont principalement fabriquées à partir de fibres polymères synthétiques, notamment le polyacrylonitrile (PAN), qui sont tressées puis carbonisées à haute température pour obtenir une structure essentiellement composée de carbone.



Figure II. 10 :Fibre de carbone

Selon leur teneur en carbone, on distingue deux types principaux :

- Les fibres de carbone, contenant entre 90 % et 98 % de carbone.
- Les fibres de graphite, dont la teneur dépasse 99 %.

Ces deux types de fibres présentent une très haute résistance à la traction ainsi qu'un module d'élasticité élevé, ce qui les rend particulièrement adaptées à la fabrication de composites à haute performance (PRF).

Les propriétés mécaniques finales, telles que la résistance et la rigidité, peuvent être ajustées durant le processus de cuisson (ou traitement thermique). Le tableau ci-dessous résume quelques propriétés caractéristiques des fibres de carbone.

Tableau II. 2 : Propriétés des fibres de Carbone HR et HM

Propriétés	Carbone HR	Carbone HM
Densité (g/cm3)	1,78	1,80
Résistance à la traction (MPa)	3 500	2 200
Module d'élasticité (GPa)	200	400
Allongement à la rupture	1.0	0.5

II.3.2.4. Matrice :

La matrice (qui peut être organique, métallique, céramique, ou une combinaison de ces matériaux), joue le rôle de liant. Elle sert à maintenir les renforts en place, à protéger ceux-ci des agressions extérieures, et à transmettre les efforts mécaniques.

Dans le cas des composites à matrice organique, également appelés plastiques renforcés, la matrice est désignée sous le nom de résine [11].

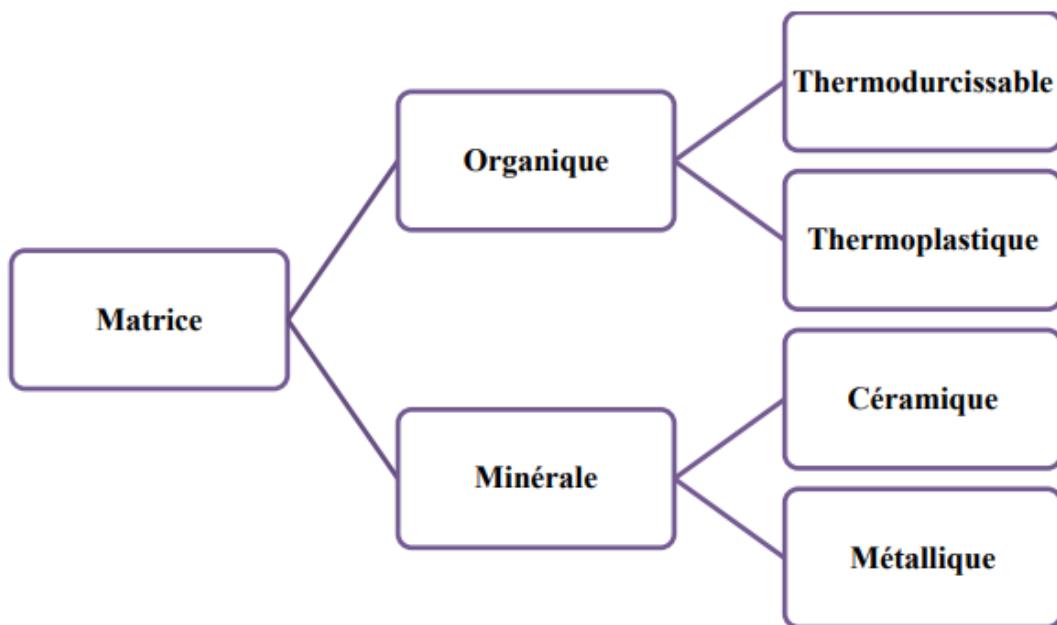


Figure II. 11 :Types des matrices

II.3.2.5. Procédures de la mise en œuvre

Dans le cas du béton, un sablage à sec est préconisé afin d'obtenir une surface rugueuse, homogène et exempte de toute contamination. L'objectif est de créer un profil de rugosité uniforme, avec des reliefs d'impact compris entre 0,5 mm et 1 mm, permettant une adhérence optimale des produits appliqués par la suite. Les poussières résiduelles, ainsi que les particules non adhérentes, sont soigneusement éliminées par brossage mécanique. Les arêtes vives sont quant à elles chanfreinées afin d'éviter toute concentration de contraintes et d'assurer une meilleure tenue des revêtements.

L'application de la résine se fait à l'aide d'un rouleau à poils, permettant d'atteindre une consommation moyenne de 0,7 kg/m². Une fois cette première couche posée, le tissu de renfort est immédiatement mis en place. Si nécessaire, plusieurs bandes peuvent être juxtaposées bord à bord pour couvrir toute la surface concernée. Une couche d'imprégnation, réalisée avec la même résine, est ensuite appliquée afin d'assurer la saturation complète du tissu et une parfaite cohésion du système. En fonction des besoins techniques et des sollicitations prévues, cette opération peut être répétée avec l'ajout d'une seconde couche de tissu de fibres composites (TFC), suivie de la même procédure d'imprégnation [10].



Figure II. 12 :Procédures de la mise en œuvre

II.4. CONCLUSION

En conclusion, la réparation et le renforcement des structures fissurées constituent des interventions techniques complexes, nécessitant une compréhension approfondie des causes des désordres, ainsi qu'une maîtrise des méthodes et matériaux disponibles. Le recours à des techniques modernes telles que l'injection des fissures ou l'utilisation de matériaux composites à base de fibres de carbone (CFRP) offre aujourd'hui des solutions performantes, durables et souvent économiquement avantageuses. Toutefois, leur mise en œuvre doit être rigoureusement adaptée au contexte spécifique de chaque projet, en tenant compte de la nature des dégradations, des contraintes d'exploitation, et des objectifs de durabilité.

Ainsi, le choix judicieux de la méthode de réparation ou de renforcement, fondé sur un diagnostic préalable précis, demeure la clé de la réussite de toute intervention. Ce chapitre a permis d'illustrer l'importance de cette démarche méthodique et de présenter un panorama des solutions actuelles, afin d'orienter les professionnels vers les pratiques les plus adaptées pour assurer la sécurité, la performance et la longévité des structures en béton armé.

Chapitre III.

**Analyse du comportement à
l'endommagement des poutres en béton
armé**

III.1. INTRODUCTION

Dans le premier chapitre, nous avons analysé en détail les principales causes pouvant conduire à la fissuration des éléments porteurs en béton armé, et en particulier des poutres. Parmi ces causes, l'augmentation des charges appliquées constitue un facteur déterminant. En effet, une sollicitation excessive peut survenir à la suite d'un changement d'usage de la structure ou de l'ajout d'équipements lourds, comme c'est souvent le cas dans les bâtiments industriels où l'installation de machinerie génère une hausse significative des charges permanentes et d'exploitation.

Face à ce type de désordre, il devient essentiel de prédire le comportement de la poutre endommagée afin de mieux comprendre les mécanismes de fissuration qui s'y développent. Cette démarche permet non seulement d'évaluer la vulnérabilité de la structure, mais également de choisir, de manière justifiée, une méthode de renforcement efficace.

III.2. DEFINITIONS

Pour définir le matériau, il est nécessaire de disposer au préalable des données contrainte-déformation du béton, en compression et en traction, comme illustré ci-dessous :

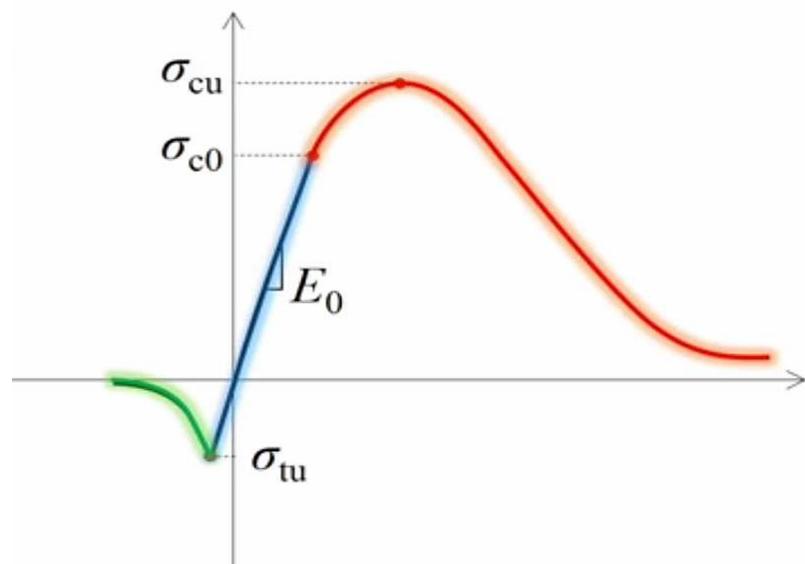


Figure III. 5 : Courbe contrainte-déformation du béton, en compression et en traction.

- Propriété élastique (réponse élastique du matériau) ;
- Propriété plastique (réponse plastique du matériau et loi d'écoulement) ;
- Propriété d'endommagement (fait référence ici à la détérioration de la raideur lors du déchargement/rechargement).

De manière générale, il est recommandé d'utiliser les données issues d'un essai sur cylindre plutôt que sur cube. Si seules les données d'un essai sur cube sont disponibles, il est possible de les ajuster en réduisant les valeurs de contrainte d'environ 20 %, soit en les multipliant par un facteur de 0.8.

De même, plusieurs expressions disponibles dans la littérature permettent de modéliser le comportement de fissuration du béton en traction, c'est-à-dire les données de contrainte en fonction de la déformation de fissuration (voir la figure ci-dessous) [12].

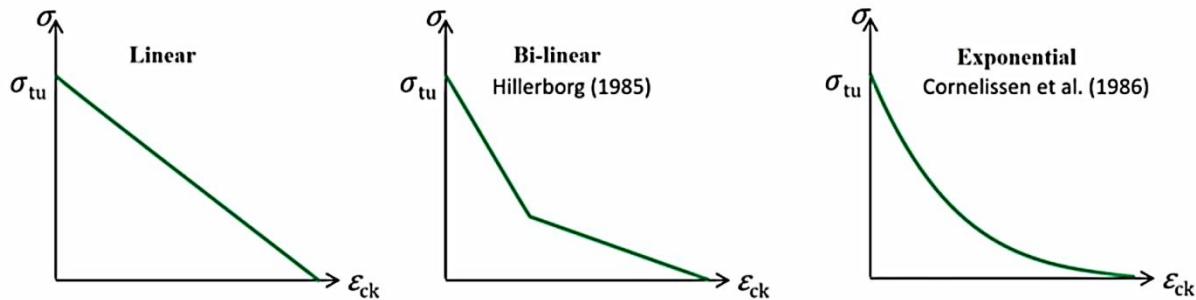


Figure III. 6 : Modèles pour prédire la courbe contrainte-déformation du béton en traction.

La forme de la branche de ramollissement n'affecte pas les résultats, tant que l'énergie de fissuration (c'est-à-dire l'aire sous la courbe) reste identique.

Dans ABAQUS, ces données doivent être fournies sous la forme suivante :

- Le module d'élasticité et le coefficient de Poisson ;
- Les données contrainte-déformation inélastique en compression ;
- Les données contrainte-déformation de fissuration en traction.

III.3. DEFORMATION ELASTIQUE, INELASTIQUE ET PLASTIQUE D'UNE POUTRE EN BETON ARME :

Le but de cette modélisation est d'étudier, à l'aide d'un modèle numérique, le comportement des poutres en béton armé sous charge de flexion. Dans cette modélisation, nous allons également étudier l'effet des déformations constatés sur le comportement futur de ces poutres. Cela permettra aussi de connaître l'influence de ces déformations sur l'état de plastification de l'élément structurel par rapport à la fissuration (voire rupture), notamment la surface inférieure de la poutre où le béton est sollicité en traction. Par conséquent, un modèle de comportement macroscopique est utilisé pour atteindre les objectifs définis.

Ce modèle couple l'élasticité non-linéaire, la plasticité et l'endommagement. Pour la partie plastique, nous avons adopté une loi élasto-plastique du comportement du béton. Dans ce modèle, la **microfissuration** (si elle existe) du matériau est représentée à l'échelle **macroscopique** comme des **déformations plastiques**.

Les modèles plastiques utilisés dans ce calcul sont ceux proposés par Hognestad et Kent et al. [13]. Les déformations plastiques de compression et de traction sont calculées par les équations suivantes :

$$\varepsilon_c^{pl} = \varepsilon_c^{in} - \frac{d_c}{(1-d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0}, \quad \varepsilon_t^{pl} = \varepsilon_t^{ck} - \frac{d_t}{(1-d_t)} \frac{\sigma_t}{E_0},$$

Les déformations plastiques ε^{pl} peuvent être calculées par les équations précédentes, en se basant sur les contraintes σ , les déformations inélastiques ε^{in} , le module de Young initial E_0 et les paramètres d'endommagement d .

Il est nécessaire de s'assurer que les valeurs des déformations plastiques sont :

- Toujours positives
- Toujours croissantes avec l'augmentation de la déformation inélastique
- Dans Abaqus, on donne (d, ε^{in}) .

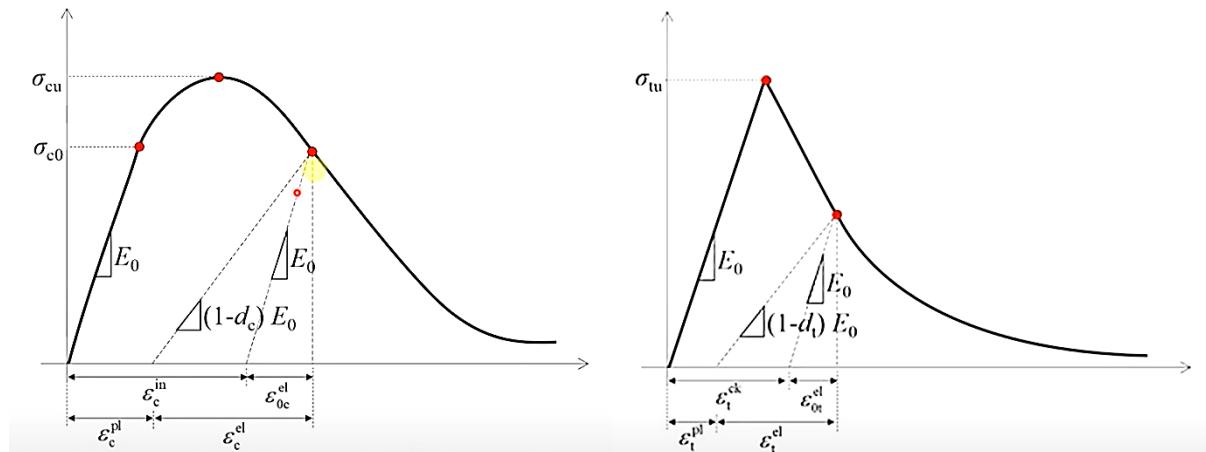


Figure III. 7 : Courbe contrainte-déformation du béton présentant les endommagements en compression et traction [13].

III.3.1. Estimation du paramètre de dommage :

Idéalement, le paramètre de dommage est déduit à partir d'un essai avec des cycles de chargement/déchargement en rampe, comme suit :

$$d_c = 1 - \frac{E_i}{E_0}$$

En l'absence de telles données, le paramètre de dommage peut être approximé comme suit :

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_i}{\sigma_{cu}}$$

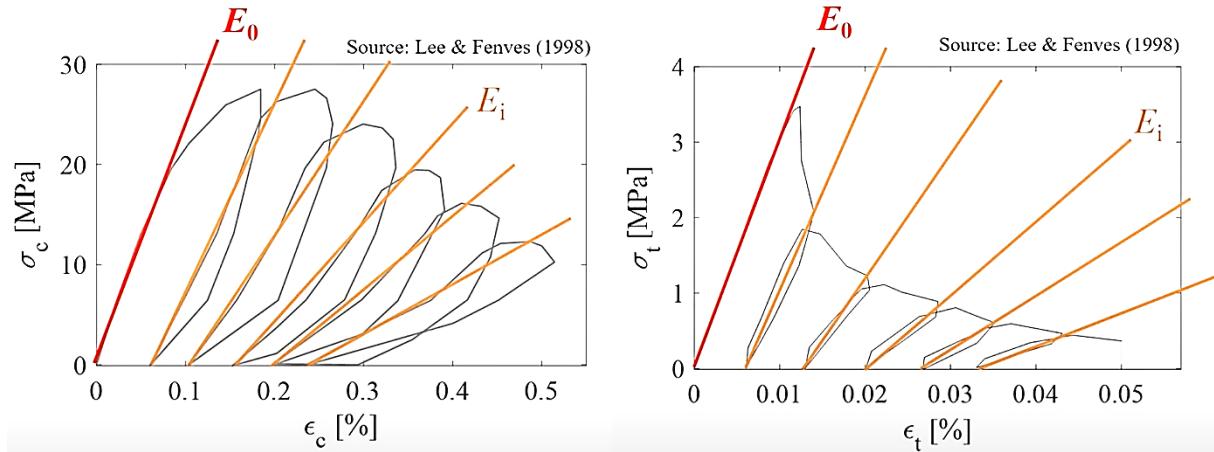


Figure III. 8 : Estimation du paramètre de dommage « dégradation du module de Young »

Les étapes de calcul :

- Lors des essais de compression et de traction sur le béton, nous obtenons les courbes contrainte-déformation (σ_c, ε_c),
- À partir de la courbe de compression, nous pouvons déterminer le module d'élasticité E_0 , $\sigma_{cu}, \varepsilon_{c0}$
- Nous calculons le paramètre d'endommagement $d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{cu}}$. Ce paramètre est 0 dans le domaine élastique (pas d'endommagement ou fissuration).
- À partir de ces données, nous pouvons aussi déterminer les déformations élastiques et inélastiques en utilisant les formules suivantes, respectivement :

$$\varepsilon_{0c}^{el} = \frac{\sigma_c}{E_0}, \quad \varepsilon_c^{in} = \varepsilon_c - \varepsilon_{0c}^{el}$$

III.3.2. Critère de défaillance

Dans cette modélisation, nous nous sommes basés sur l'un des deux critères de défaillance dits : contrainte maximale et/ou déformation maximale.

La défaillance surgit selon le critère de **contrainte/déformation maximale** quand la contrainte/déformation dans une des directions principales de l'élément dépasse la résistance/déformation admissible dans cette direction.

L'état de contrainte/déformation globale sur tout l'élément est d'abord calculé par le logiciel **ABAQUS**. Ensuite, le logiciel calcule la contrainte/déformation le long des directions principales du matériau en appliquant une transformation de coordonnées. Finalement, nous comparons pour chaque itération ces contraintes/déformations avec le critère de défaillance défini auparavant.

Chapitre IV.

Modélisation numérique d'une poutre sous chargement de flexion

IV.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, une poutre en béton armé sera modélisée numériquement jusqu'à la rupture à l'aide du logiciel Abaqus, dans le but d'analyser en détail les différentes étapes de son endommagement, d'identifier les zones critiques et de simuler avec précision son comportement structurel. La poutre sera soumise à un essai de flexion à quatre points, un type de chargement largement utilisé pour étudier le comportement en flexion des éléments en béton armé.

Ce mode de sollicitation permet de générer une zone de moment fléchissant constant entre les deux points de charge, ce qui favorise l'apparition de fissures dans la fibre tendue de la poutre, tout en limitant l'influence des zones d'appui.

La modélisation numérique visera à reproduire les phénomènes mécaniques observés expérimentalement, notamment **la formation et la propagation des fissures**, l'évolution des déformations, ainsi que les mécanismes conduisant à la ruine de la poutre. L'analyse des résultats permettra de mieux appréhender les mécanismes de fissuration du béton armé sous flexion, de déterminer les paramètres influents sur la résistance et la ductilité, et de valider, par la suite, les stratégies de renforcement les plus adaptées pour prolonger la durée de vie de ces structures.

IV.2. CARACTERISTIQUE GEOMETRIQUES DE LA POUTRE EN BETON ARME :

La poutre étudiée est un élément en béton armé de section rectangulaire, conçue pour être sollicitée en flexion à quatre points. Ses dimensions globales sont les suivantes :

- Longueur totale : **3000** mm
- Portée utile (distance entre les appuis) : **2800** mm
- Zone de moment constant (entre les deux charges appliquées) : **800** mm
- Section transversale principale : **200** mm de largeur × **500** mm de hauteur

La poutre est armée de la manière suivante :

- Armature longitudinale inférieure (zone tendue) : **3** barres de diamètre **20** mm ($3\varnothing 20$)
- Armature longitudinale supérieure (zone comprimée) : **2** barres de diamètre **10** mm ($2\varnothing 10$)
- Étriers transversaux : barres de diamètre **10** mm espacées de **200** mm ($\varnothing 10 @ 200$)

Les appuis sont représentés par des demicylindres et les charges sont appliquées verticalement au centre de plaques métalliques, générant un déplacement vertical noté δ .

Une variante secondaire de la poutre, également présente sur le schéma, montre une poutre de dimensions réduites :

- Longueur des armatures longitudinales inférieures et supérieures : **2850 mm**
- Section des cadres : **160 mm × 450 mm**.

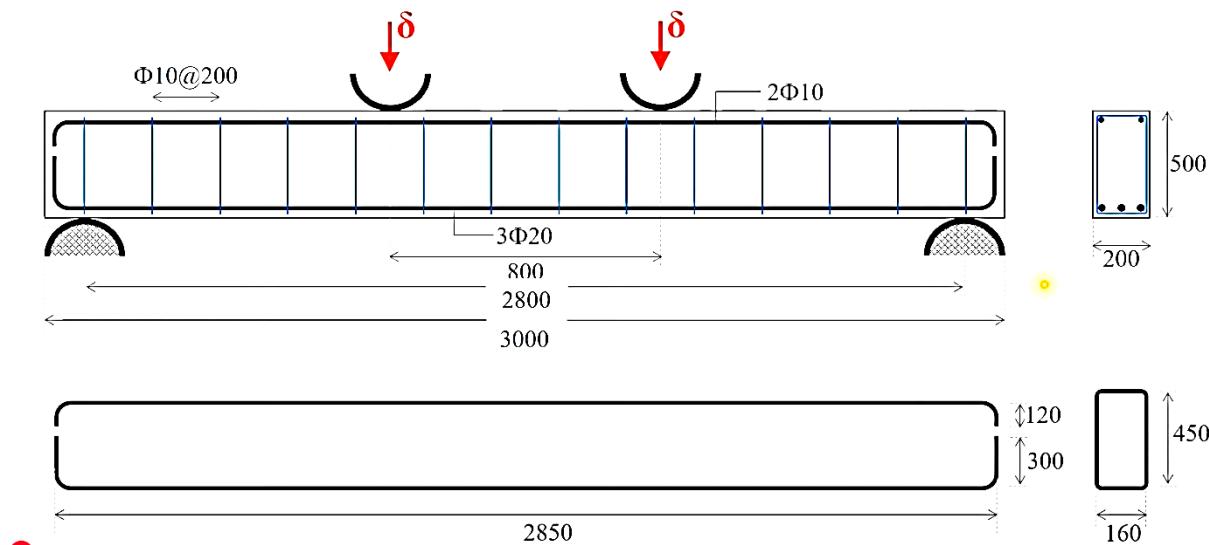
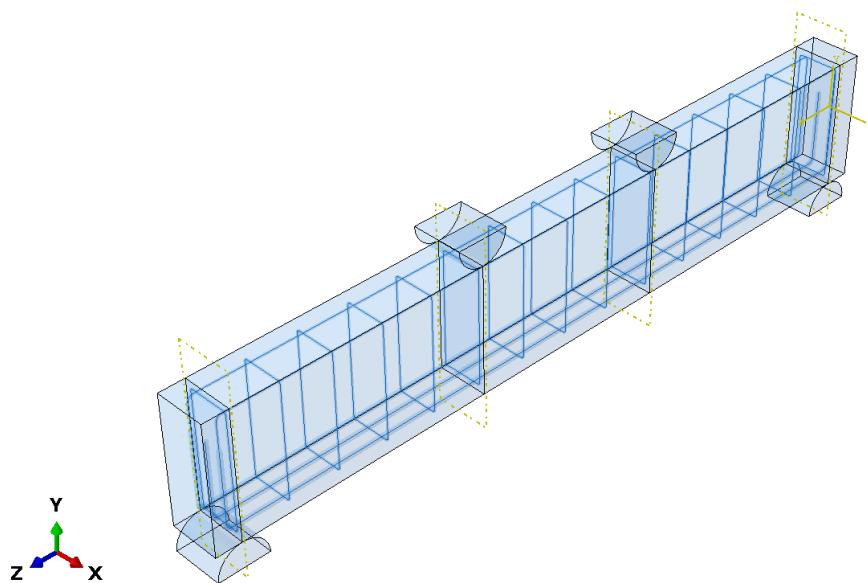


Figure IV. 16 : Caractéristique géométriques de la poutre en béton armé

Un modèle numérique a été élaboré en se basant sur les caractéristiques géométriques décrites précédemment. Ce modèle a été construit à l'aide du logiciel de simulation par éléments finis Abaqus. La modélisation adoptée est capable d'analyser séparément l'état de contrainte pour les deux matériaux (béton / acier), comme montré les figures ci-dessous :



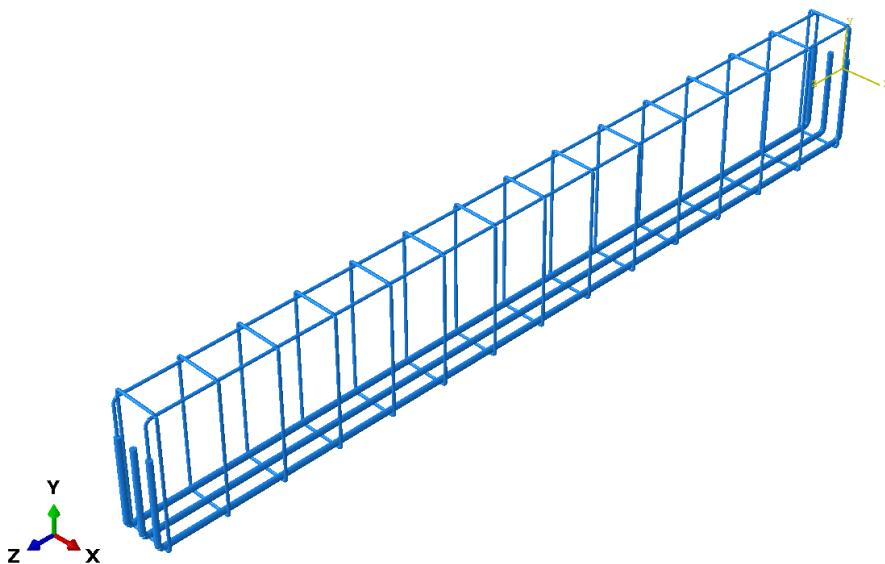


Figure IV. 17 : Model numérique de la poutre en béton armé (béton et armatures).

IV.3. CARACTERISTIQUE MECANIQUES DES MATERIAUX CONSTITUANT LA POUTRE

Le tableau et les figures ci-dessous récapitulent toutes les informations mécaniques nécessaires à la modélisation :

Tableau IV. 1 : Caractéristique mécaniques des matériaux constituant la poutre

Béton		Acier	
Résistance de compression f_{c28}	20.0 MPa	Limite d'élasticité	355 MPa
Résistance caractéristique de traction f_{t28}	2.4 MPa		
Module de déformation E_0	13235.68 MPa	Module de déformation E	200000 MPa
Coefficient de Poisson	0.18	Coefficient de Poisson	0.3
Déformation ε_{c1} (compression)	1.51×10^{-3}	Déformation élastique	1.775×10^{-3}
Déformation ε_{t1} (traction)	1.81×10^{-4}	Déformation ultime	1.78×10^{-1}
Densité	2300 kg/m ³	Densité	7850 kg/m ³

La résistance caractéristique du béton f_{c28} est 20.0 MPa. Cette valeur a été adoptée après l'évaluation des caractéristiques mécanique du béton. Par conséquent, la résistance caractéristique de traction est de l'ordre 2.4 MPa.

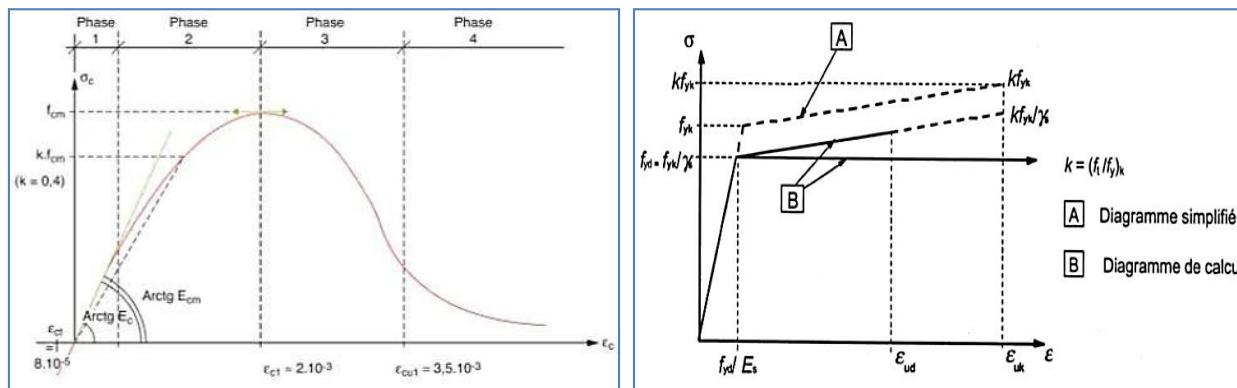


Figure IV. 18 : Diagrammes de contrainte-déformation théoriques pour le béton armé et l'acier selon l'Eurocode 2.

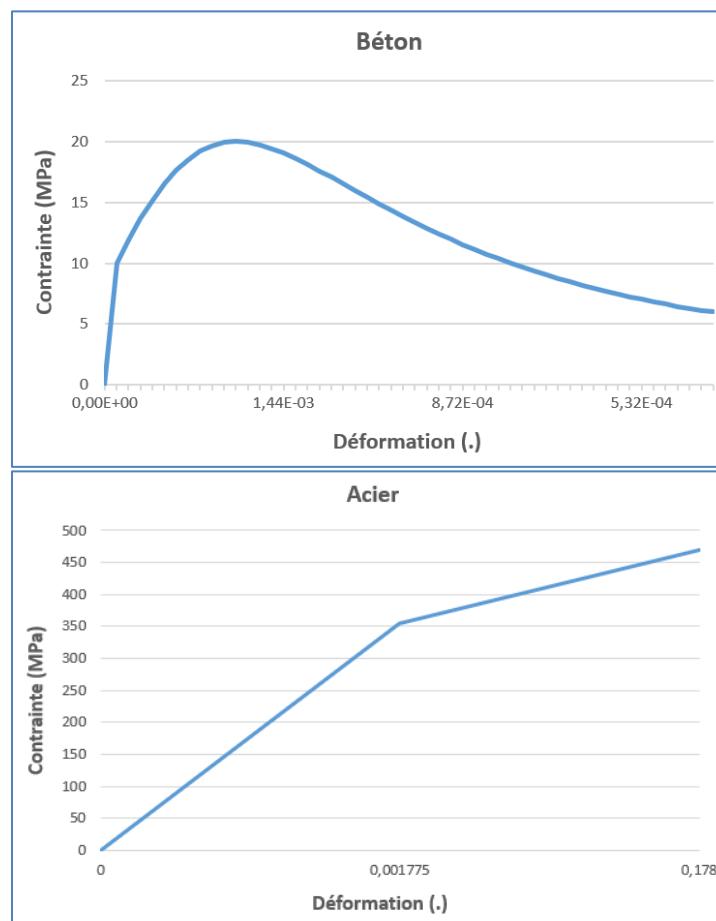


Figure IV. 19 : Diagrammes de contrainte-déformation réels, pour le béton et l'acier, utilisés dans la modélisation.

Ces caractéristiques ont été introduit à logiciel de modélisation comme montre les figures suivantes :

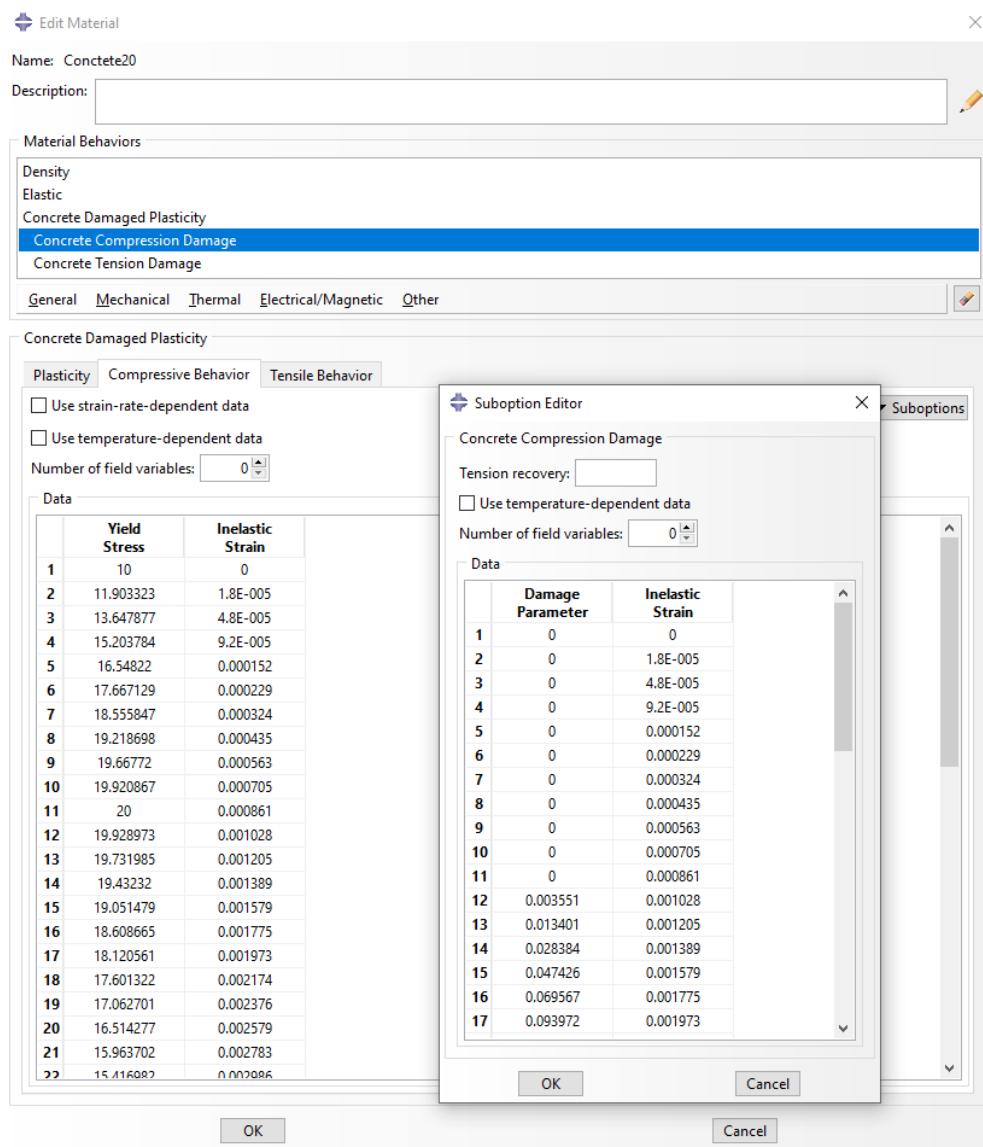


Figure IV. 20 : Introduire les contraintes, paramètre d'endommagement et les déformations inélastique de compression dans Abaqus.

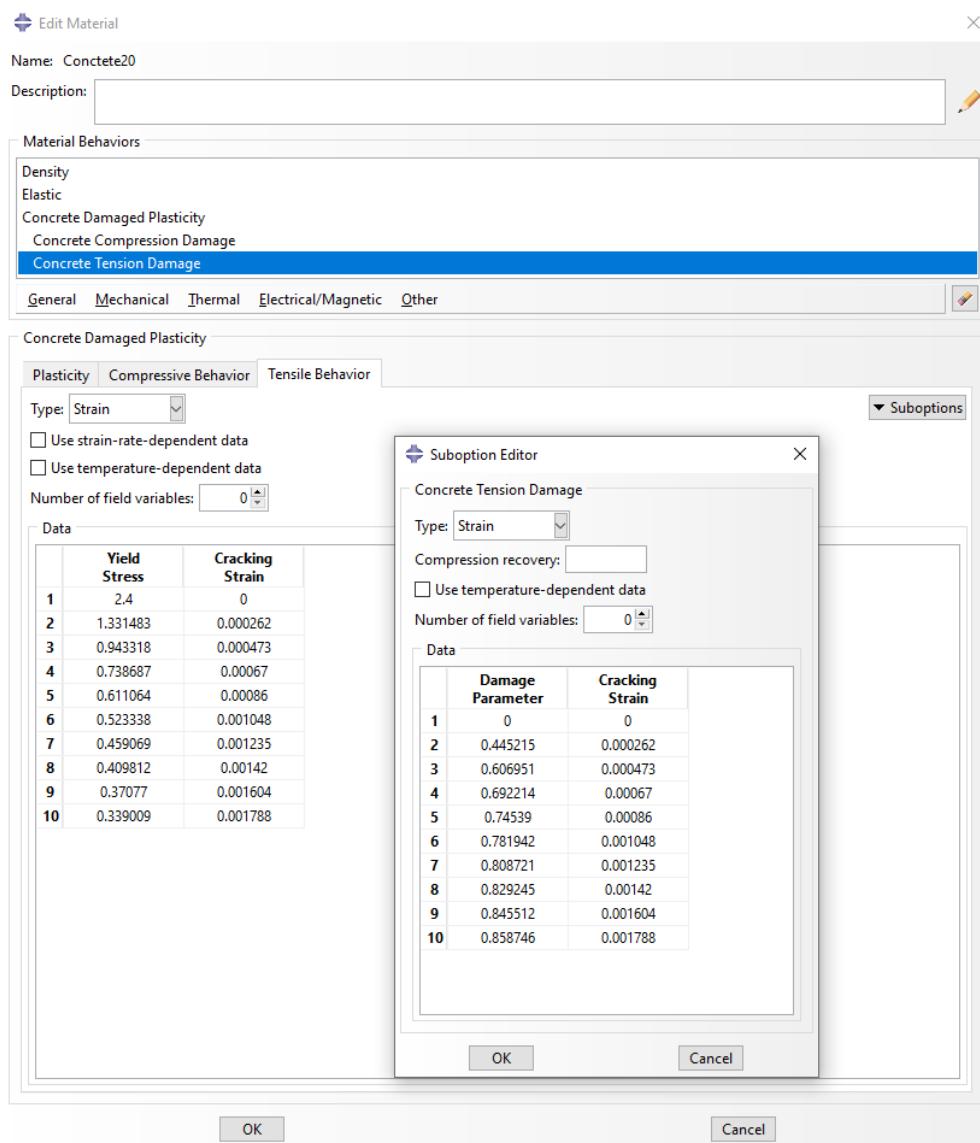


Figure IV. 21 : Introduire les contraintes, paramètre d'endommagement et les déformations inélastique de traction dans Abaqus.

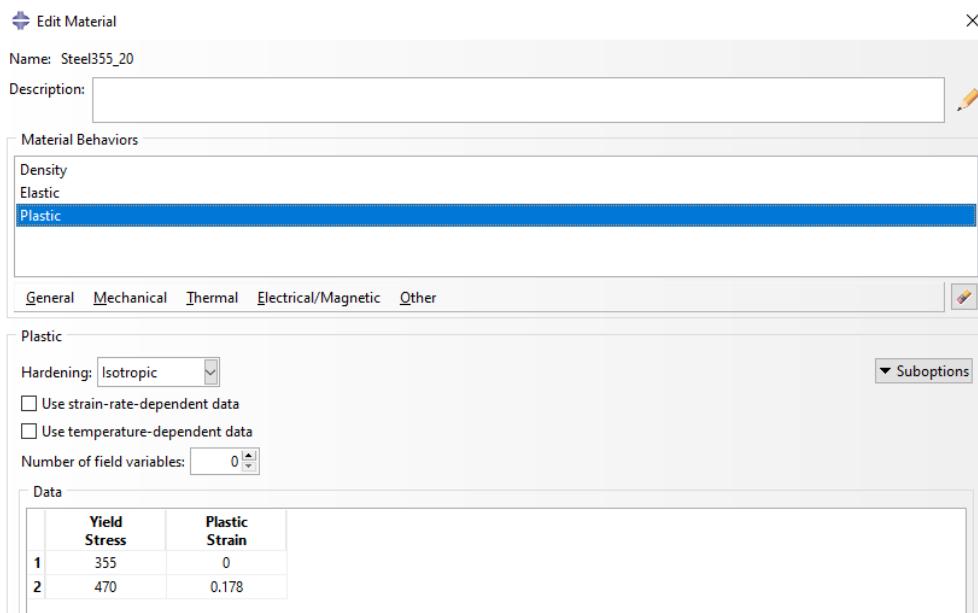


Figure IV. 22 : Introduire les contraintes et les déformations plastique des armatures dans Abaqus.

Les conditions aux limites aux appuis ont été intégrées dans l'environnement de modélisation afin de reproduire le comportement structurel réel du système étudié, notamment en simulant un encastrement au niveau des appuis. Un déplacement imposé de -10 mm a été introduit de manière progressive jusqu'à l'apparition des premières fissurations dans la poutre (voir la figure ci-dessous).

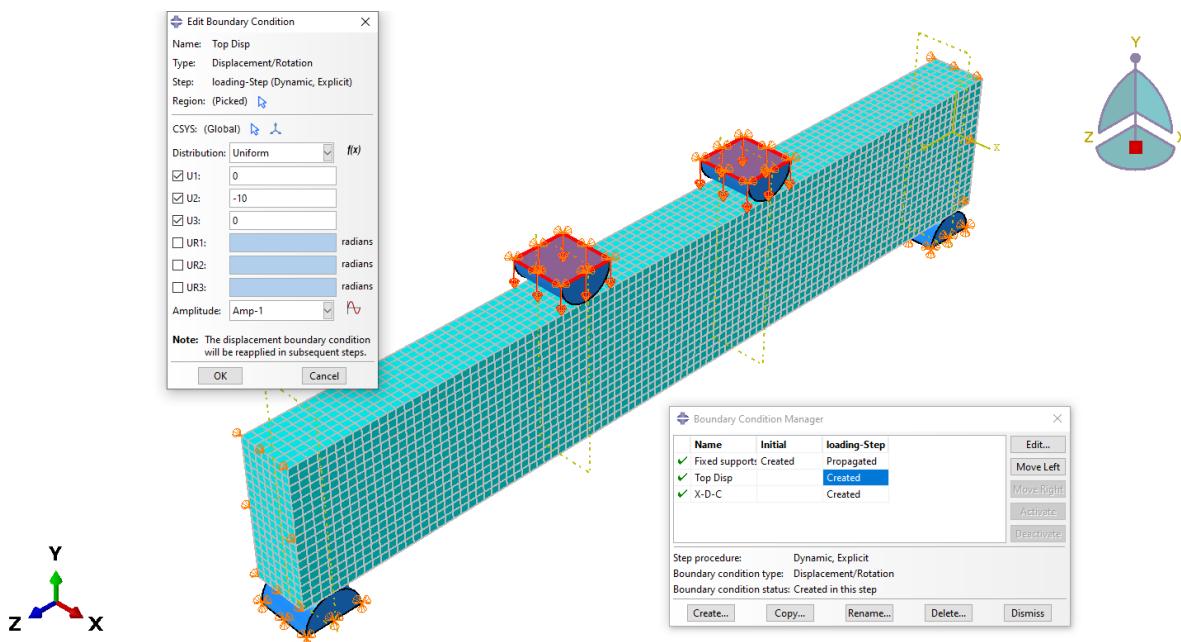


Figure IV. 23 : Application des conditions aux limites.

En ce qui concerne le maillage, la poutre a été divisée en éléments finis tridimensionnels de type C3D8, d'une dimension approximative de 30. Quant aux armatures, elles ont été modélisées à l'aide d'éléments de type barre T3D2, d'une dimension approximative de 40. En ce qui concerne le nombre d'éléments utilisés, une étude de convergence a été effectuée jusqu'à la stabilisation des résultats (voir les figures ci-dessous).

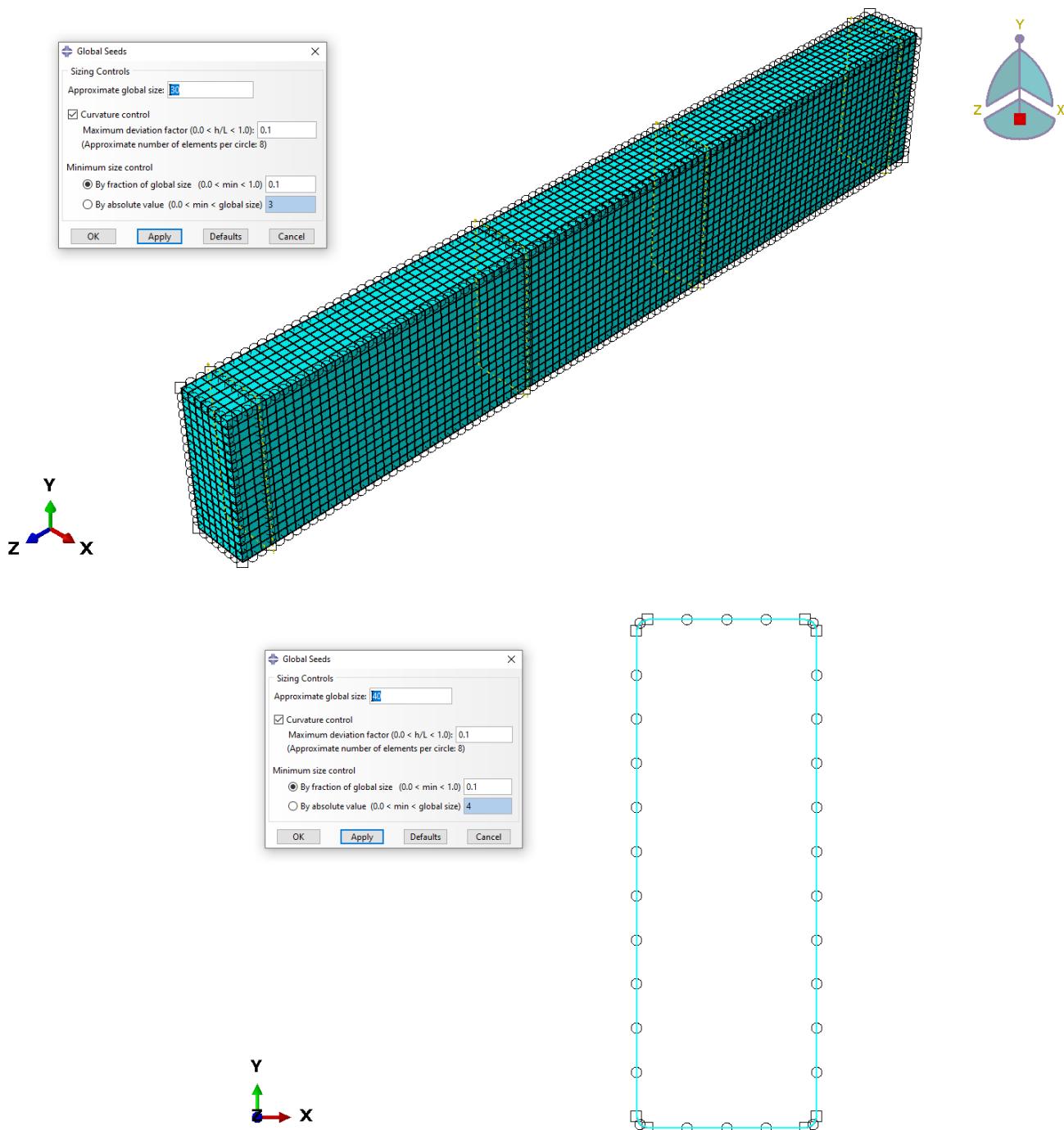


Figure IV. 24 : Maillage de la poutre et les armatures.

IV.4. RESULTATS DE LA MODELISATION

Les résultats de ce calcul sont présentés sur la Figure ci-dessous. Il est à noter que ce genre de calcul est relativement long.

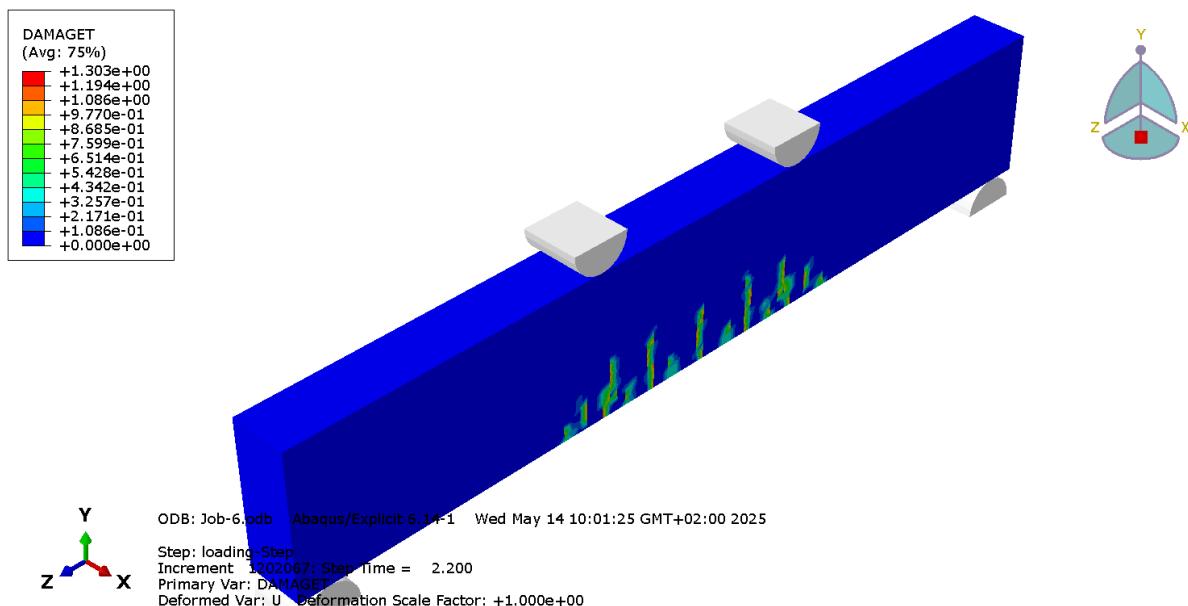


Figure IV. 25 : Distribution finale de l'endommagement de la poutre.

Sur la Figure ci-dessous, nous pouvons noter que les endommagements de la poutre sont très semblables à ceux constatés expérimentalement.



Figure IV. 26 : Essai expérimental d'une flexion d'une poutre en béton armé « flexion à 4 points ».

Les fissures déterminées en se basant sur cette modélisation sont localisées au milieu de la poutre, et ils sont pratiquement de la même forme et de la même distribution en comparant à celles constatées expérimentalement (voir la Figure ci-dessus).

En ce qui concerne les contraintes, les déformations plastiques et les fissurations, les Figures ci-dessous présentent toutes les informations nécessaires sur le béton.

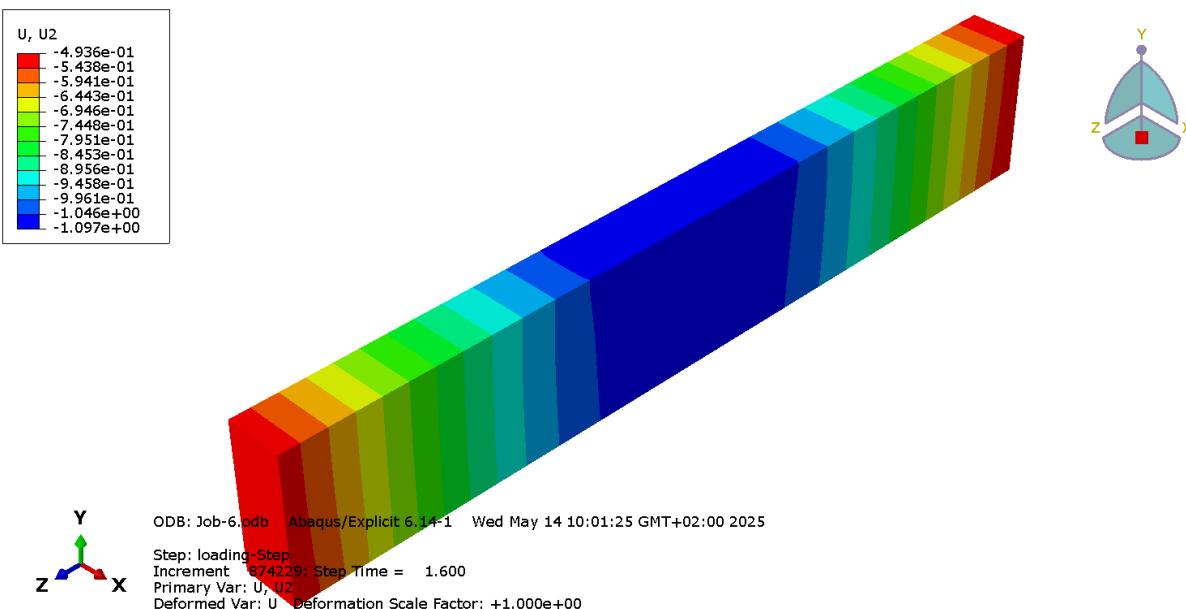
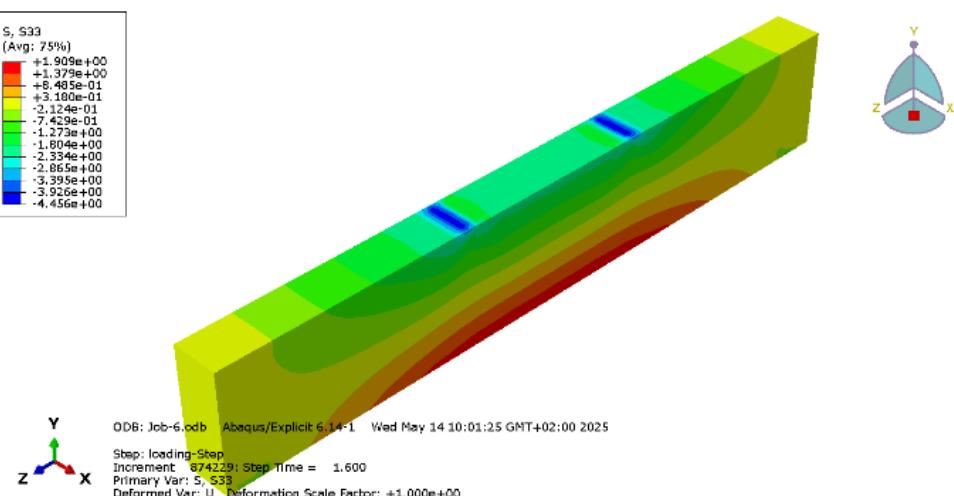


Figure IV. 27 : Déplacement de la poutre.



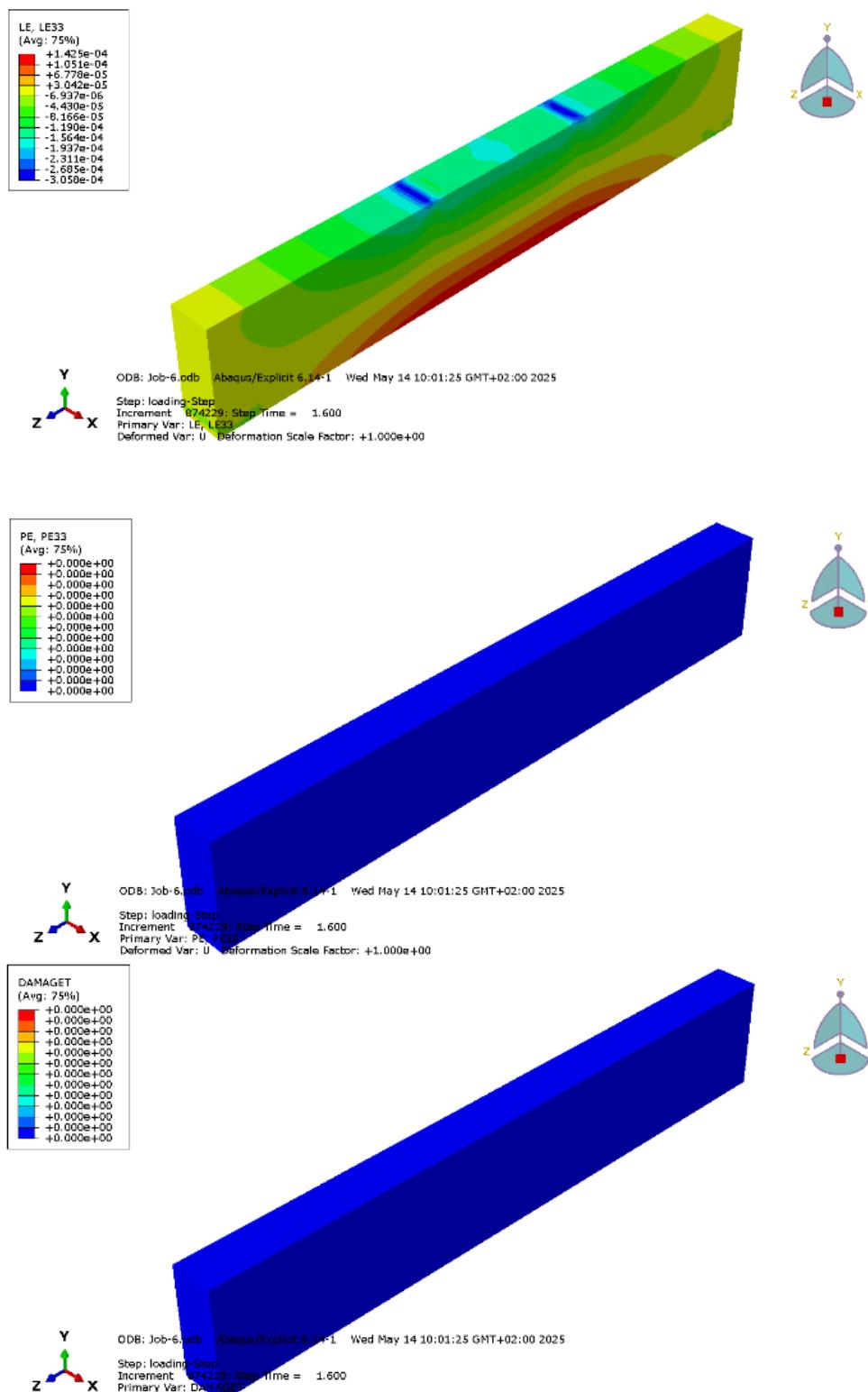
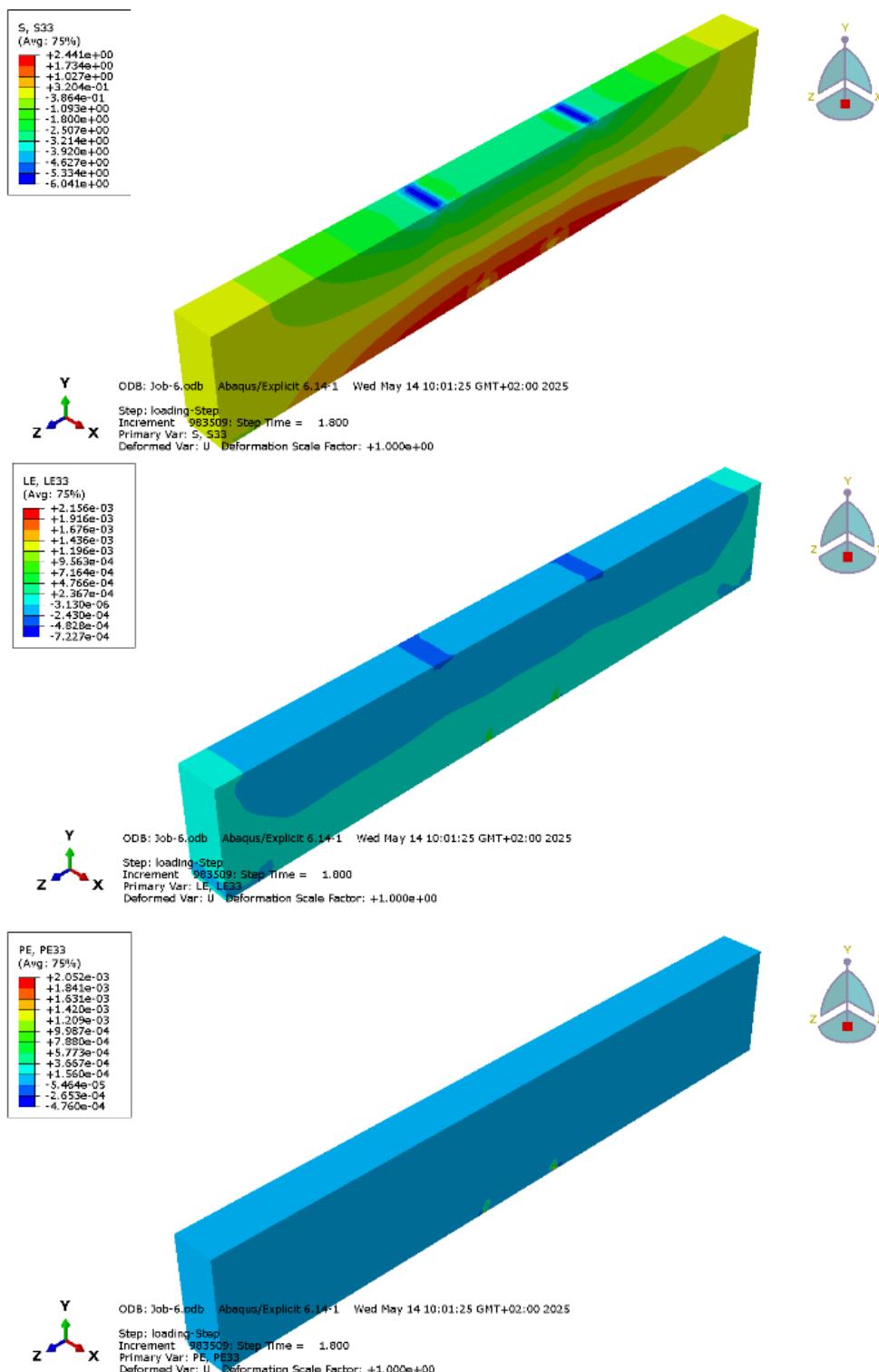


Figure IV. 28 : Distributions des contraintes, déformations élastiques, déformations plastiques et fissuration : état avant l'initiation de la fissuration.



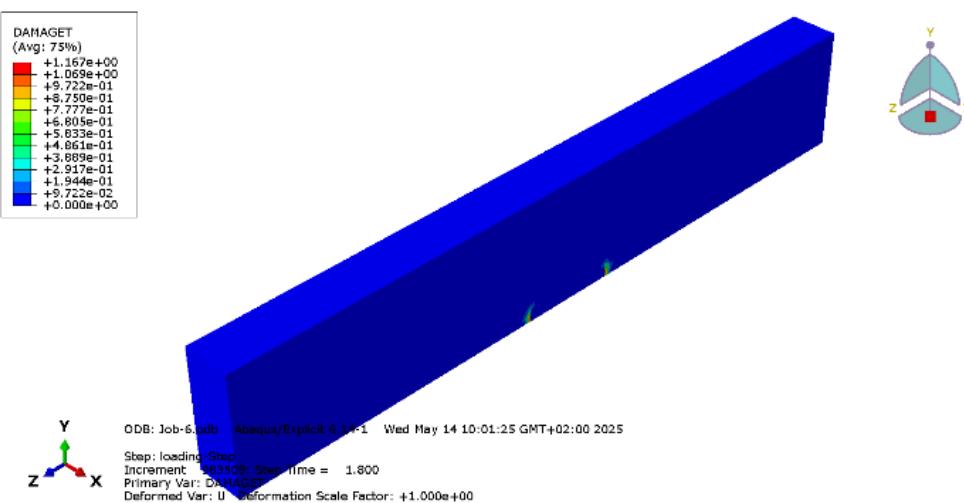
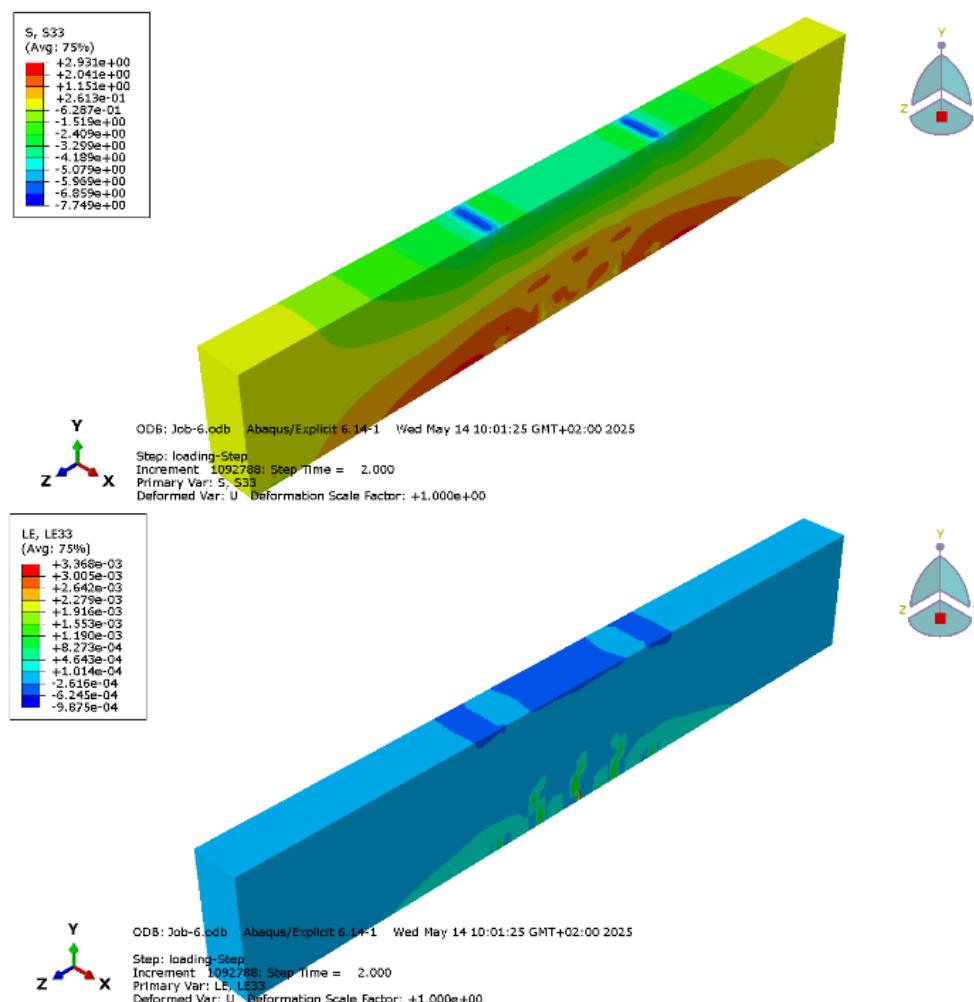


Figure IV. 29 : Distributions des contraintes, déformations élastiques, déformations plastiques et fissuration : Initiation de la première fissure.



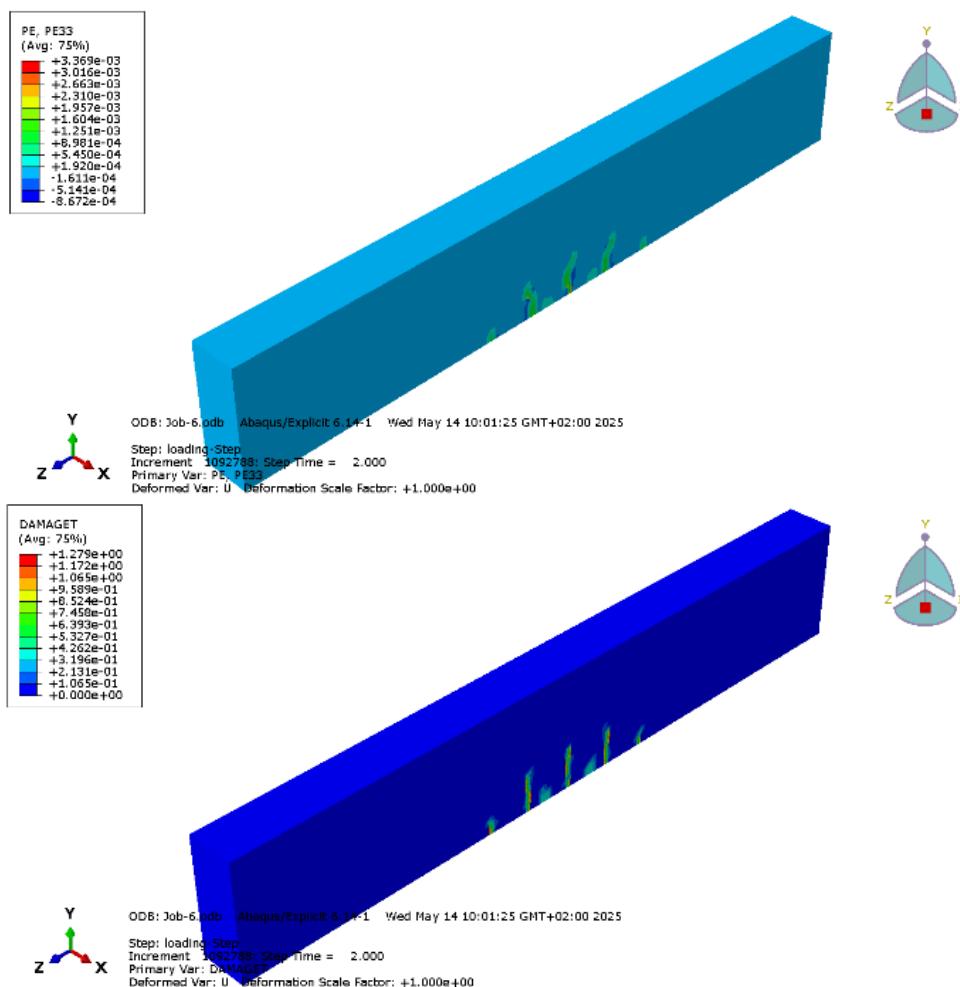
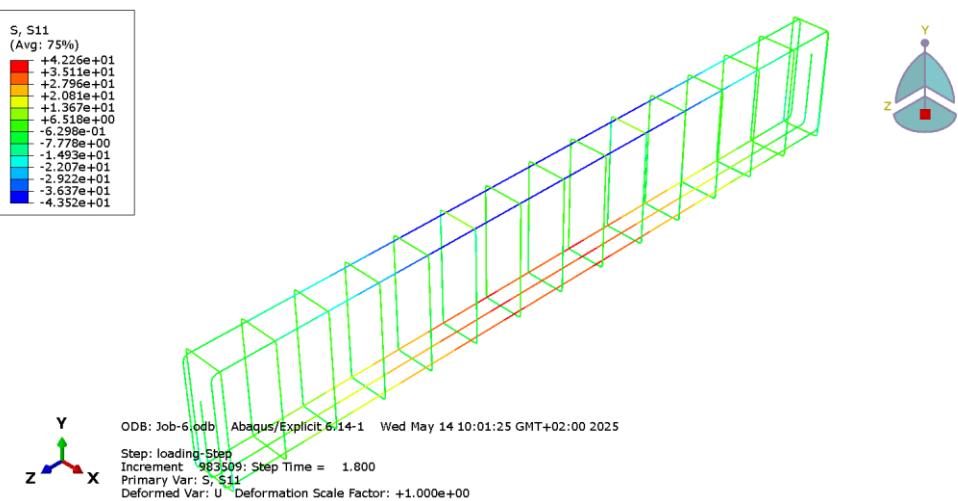


Figure IV. 30 : Distributions de contraintes, déformations élastiques, déformations plastiques et fissuration : propagation des fissures.

IV.4.1. Interprétation des résultats :

- Avant d'atteindre un déplacement de l'ordre de 1.310 mm, nous avons remarqué que la déformation élastique de traction du béton 1.425×10^{-4} est inférieure à 1.81×10^{-4} , ce qui représente la déformation limite de traction du béton. Par conséquent, dans cet état de déformation, il n'y a pas une propagation de fissuration dans la zone tendue du béton (voir Figure IV. 13). La contrainte dans la zone tendue est de l'ordre **1.909 MPa**.
- Après une contrainte de traction supérieure à **2.4 MPa**, nous pouvons noter, au milieu de la poutre où il y a une section critique, l'initiation de la première fissure dans la zone tendue du béton (voir Figure IV.14). Le déplacement correspondant est de l'ordre de 1.310 mm. L'acier dans cet état de déformation est dans le domaine élastique (voir la figure ci-dessous).



- Sur la Figure IV.15, nous pouvons remarquer le développement des fissures parallèles aux chargements imposés. Les déformations dans l'acier sont toujours élastiques et il n'y a pas de déformation plastique.

Conclusion générale

Conclusion générale

La durabilité et la sécurité des structures en béton armé représentent aujourd’hui un enjeu fondamental dans le domaine du génie civil, notamment face à l’augmentation des sollicitations, au vieillissement des infrastructures existantes et à la complexité croissante des ouvrages modernes. Ce travail a permis de développer une compréhension approfondie des différents mécanismes de dégradation des poutres en béton armé, en mettant en lumière la genèse, l’évolution et les conséquences des fissures structurelles.

L’étude bibliographique réalisée dans le premier chapitre a permis d’identifier les principales causes d’endommagement des structures : actions chimiques (carbonatation, corrosion), erreurs de conception ou d’exécution, sollicitations mécaniques excessives, ou encore défauts d’entretien. Ces pathologies sont autant de facteurs pouvant compromettre la stabilité d’un ouvrage s’ils ne sont pas diagnostiqués et traités à temps.

Face à ces désordres, nous avons examiné, dans un second temps, les principales méthodes de réparation et de renforcement des éléments endommagés. Les techniques classiques, comme le calfeutrement ou l’injection des fissures, conservent leur pertinence pour les cas simples, mais trouvent leurs limites dans les contextes plus exigeants. À cet égard, l’introduction de matériaux composites, notamment les fibres de carbone (CFRP), s’impose comme une solution innovante, offrant à la fois légèreté, résistance mécanique et durabilité exceptionnelle.

La modélisation numérique présentée dans les chapitres suivants, et réalisée à l’aide du logiciel ABAQUS, a permis de simuler le comportement d’une poutre en béton armé soumise à un essai de flexion à quatre points. Cette simulation a permis de valider les observations expérimentales, notamment en ce qui concerne l’initiation et la propagation des fissures, la répartition des contraintes, ainsi que l’évolution des déformations plastiques et élastiques. Les résultats obtenus témoignent de la puissance des outils numériques dans l’analyse des structures et la prédition de leur comportement sous charge.

Les principaux enseignements tirés de cette étude peuvent être résumés comme suit :

- Une compréhension fine des mécanismes de fissuration est indispensable pour une intervention efficace ;

- Le choix de la méthode de réparation ou de renforcement doit être fondé sur un diagnostic rigoureux et adapté au contexte de l'ouvrage ;
- Les matériaux composites, bien que plus coûteux, présentent des avantages indéniables en termes de performance et de durabilité ;
- La modélisation numérique constitue un outil précieux pour anticiper les comportements non linéaires des éléments structurels et valider les stratégies de renforcement.

Références

[1] CROSTON, Tania. Etude expérimentale du comportement d'une poutre en béton armé en flexion 3 points réparée par matériaux composites (approche probabiliste). Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, 2006.

[2] Ferahi, Ahmed Yassine;Chabou, Abdelaziz, Techniques de réparation et de renforcement des ouvrages en béton armé, 2023.

[3] <https://qualiteconstruction.com/ressource/batiment/fissuration-corbeau-beton-arme/>

[4] Jean-François LATASTE, Fissuration des ouvrages en béton armé, 2002.

[5] Norme NF EN 14630 (2007), Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais - Mesurage de la profondeur de carbonatation d'un béton armé par la méthode phénolphtaléine.

[6] Abdelhakim BEDDIAR, Renforcement des Poutres en Béton Armé à l'Aide de Matériaux Composites Etude Théorique et numérique, mémoire magister En Génie Civil, 2004.

[7] PERCHAT, Jean. Béton armé: Règles BAEL: 4. Pièces soumises à des sollicitations normales. Techniques de l'ingénieur. Construction, 1993.

[8] NF EN 1504 (205) : Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité.

[9] STRRES , Traitements des fissures par calfeutrement ou pontage et protection localisée ou création d'un joint de dilatation (2024).

[10] HAMELIN, Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites, 2011.

[11] BERTHELOT, Jean-Marie. Mécanique des matériaux et structures composites. Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancés, 2010, vol. 176.

[12] HILLERBORG, Arne. Numerical methods to simulate softening and fracture of concrete. In: Fracture mechanics of concrete: Structural application and numerical calculation. Dordrecht : Springer Netherlands, 1985. p. 141-170.

[13] VINCENT, Okafor Chinedum, CHUKWUEBUKA, Okeke Emmanuel, et ROY, Ononye. Modelling the non-linear behavior of a 3D reinforced concrete beam using the concrete damage plasticity model.