

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A. Mira - BEJAIA  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Civil

## Mémoire de fin de cycle

*Spécialité : Génie Civil*

*Option : Structures*

*Thème :*

### ETUDE DU COMPORTEMENT D'UN TIRANT EN BÉTON ARMÉ

Réalisé par :

M<sup>me</sup> : BOUCHIBANE Kenza

M<sup>lle</sup> : BOULANOUAR Thiziri

Encadré par :

M. MEZHOUD DJILALI

Membre de juré :

M. GUECHARI lounis

M. KERNOU nassim

Année Universitaire

2022/2023

## *Remerciement*

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à Allah pour nous avoir donné la force et l'inspiration nécessaires pour mener à bien ce travail de recherche.*

*Nous souhaitons également exprimer notre gratitude envers notre encadreur, Dr. Djillali MAZHOUD, qui a été d'un soutien constant tout au long de ce parcours. Leur expertise, leur guidance et leur disponibilité ont grandement contribué à la réussite de ce mémoire.*

*Nous adressons nos remerciements spéciaux à Monsieur Dr. Abdelmadjid SI SALEM, maître de conférences habilité à l'université de Tizi Ouzou pour son aide précieuse notamment dans la modélisation numérique.*

*Un immense merci aux membres du jury qui ont consacré leur temps et leurs connaissances pour évaluer notre travail. Leurs commentaires et suggestions constructives ont été d'une valeur inestimable et ont permis d'enrichir notre mémoire.*

*Nous souhaitons également exprimer notre reconnaissance envers tous les enseignants du département de génie civil. Leurs enseignements et leur dévouement ont contribué à notre formation académique et à l'acquisition des connaissances nécessaires pour réaliser ce travail.*

*Enfin, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers nos parents pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements et leur amour inconditionnel. Leur présence et leur confiance ont été des piliers essentiels tout au long de ce parcours.*

*Nos remerciements vont également à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Votre soutien et vos encouragements ont été inestimables.*

# Dédicace

Je dédie ce mémoire à des personnes qui sont une source de lumière et de soutien dans ma vie

À mes chers parents, Houria et Layachi, vous êtes la lumière de ma vie. Votre amour inconditionnel, vos sacrifices et votre soutien constant ont été les piliers de ma réussite. Je vous suis infiniment reconnaissant.

À mon cher frère, Massinissa, tu as été une véritable inspiration pour moi. Ton soutien indéfectible, tes encouragements et ta conviction en mes capacités m'ont poussé à poursuivre mes études. Grâce à toi, j'ai pu atteindre mes objectifs.

À mon fidèle ami et compagnon, Moussa, ta confiance inébranlable et ton soutien indéfectible ont été un pilier essentiel de mon parcours. Ta patience infinie, tes encouragements constants et ta présence à mes côtés ont été d'une valeur inestimable. J'aimerais également exprimer ma gratitude envers ta famille, qui m'a accueilli avec chaleur et générosité.

À ma binôme et ma sœur, Kenza, nous avons partagé les meilleurs moments et surmonté les pires épreuves ensemble. Ta présence, ton soutien et notre complicité ont été des éléments clés de mon parcours académique ainsi que toute sa famille qui m'a tout le temps considéré comme leur fille.

À mes tantes et oncles, merci pour votre amour, vos conseils et surtout vos doua votre soutien inconditionnel. Votre présence dans ma vie a été précieuse et inspirante.

À tous mes cousins et cousines, votre soutien et vos encouragements ont été d'une grande importance pour moi. Merci d'avoir été là tout au long de mon parcours.

Enfin, à toutes mes amitiés, merci d'avoir été présentes à mes côtés. Votre soutien, votre amitié et vos encouragements ont contribué à rendre ce parcours mémorable.

THIZIRI

## Dédicace

J'ai le plaisir de dédier ce travail à :

Mes chers parents, Baya et Lyazid, qui ont toujours été à mes côtés, m'encourageant et me soutenant tout au long de ces années d'études. Je leur exprime ma profonde gratitude pour les efforts considérables qu'ils ont consentis et les moyens qu'ils ont déployés pour me voir réussir dans mes études.

À mon cher frère, Ali, avec qui j'ai partagé de nombreux moments d'enfance. Je lui témoigne toute mon estime pour l'aide qu'il m'a apportée, son soutien réconfortant et son encouragement constant.

À mes chères sœurs, Sonia, Tiziri, Celina, Thellili et Melissa, pour leur amour, leur soutien inconditionnel et leurs encouragements.

À mon cher conjoint, Walid, celui qui m'a soutenue, encouragée et sacrifié avec moi. À lui, je témoigne toute ma gratitude avec tendresse.

À ma chère binôme, Thiziri, pour les merveilleux moments que nous avons partagés depuis le début de notre parcours, pour ton aide et ton soutien précieux durant les moments difficiles.

À ma nièce, Cidra, qui illumine ma vie de sa présence.

En hommage à mes grands-pères, je dédie cette dédicace à mes grandes-mères.

À mes oncles, Mohamed et Azedine, pour leur sincérité, leur gentillesse, leur amour et leur tendresse. Ils m'ont éternellement soutenu durant tout mon parcours.

À mes chers cousins et cousines.

À mes chères tantes.

À toute ma famille, y compris ma belle-famille.

À mes chers amis, qui ont toujours été là pour moi.

À la famille de ma binôme, pour leur aide et leur soutien.

Et enfin, à tous ceux et celles qui me témoignent de l'affection et de la considération.

Kenza

## Résumé

Ce mémoire de Master en génie civil se concentre sur la modélisation et la simulation des tirants en béton armé afin de comprendre leur comportement sous des charges de traction. L'étude est réalisée à l'aide du logiciel ABAQUS, en utilisant des éprouvettes en béton armé de section carrée de 100 mm de côté et de longueurs variables. Les tirants sont constitués d'une seule barre centrale et sont encastrés d'un côté et soumis à un effort de traction de l'autre. L'objectif principal de cette recherche est de caractériser le comportement des tirants en analysant la courbe contrainte-déformation et en étudiant l'adhérence acier-béton. Une étude paramétrique est réalisée en variant les longueurs des tirants et les diamètres des armatures pour évaluer leur impact sur la résistance et la ductilité des éléments. Les modèles de simulation développés permettent de prédire le comportement des tirants sous différentes conditions de chargement et de mieux comprendre l'interaction entre l'acier et le béton.

Mots-clés : tirant, simulation, béton armé, « tension stiffning »

## Summary

This Master's thesis in Civil Engineering focuses on the modeling and simulation of reinforced concrete tie rods to understand their behavior under tensile loads. The study is conducted using the ABAQUS software, using reinforced concrete specimens with a square cross-section of 100 mm on each side and varying lengths. The tie rods consist of a single central bar and are fixed on one side and subjected to tensile forces on the other. The main objective of this research is to characterize the behavior of the tie rods by analyzing the stress-strain curve and studying the steel-concrete bond. A parametric study is conducted by varying the lengths of the tie rods and the diameters of the reinforcements to assess their impact on the strength and ductility of the elements. The developed simulation models allow predicting the behavior of the tie rods under different loading conditions and gaining a better understanding of the interaction between steel and concrete.

Keywords: tie-rods, simulation ,reinforced-concrete ,crack width

## ملخص

يتركز هذا رسالة الماجستير في الهندسة المدنية على نماذجه ومحاكاة قضبان الربط المسلحة بالخرسانة لفهم سلوكها تحت الأحمال الشديدة. يتم إجراء الدراسة باستخدام برنامج ABAQUS، باستخدام نماذج خرسانية مسلحة ذات مقطع مربع بطول 100 ملم في كل جانب وأطوال متنوعة. تتكون قضبان الربط من قضيب واحد مركزي وتكون ثابتة من جهة وتعرض لقوة شد من الجانب الآخر. الهدف الرئيسي لهذا البحث هو توصيف سلوك قضبان الربط من خلال تحليل منحنى التوتر -التشوه ودراسة التصاق الفولاذ -الخرسانة. يتم إجراء دراسة معلمية بتغيير أطوال قضبان الربط وأقطار التسليح لتقييم تأثيرها على قوة ومرونة العناصر. يسمح نماذج المحاكاة المطورة بتوقع سلوك قضبان الربط تحت ظروف تحميل مختلفة وفهم أفضل للتفاعل بين الفولاذ والخرسانة.

الكلمات المفتاحية: المحاكاة، الخرسانة المسلحة، عرض التشقق.

# Table des matiers

*Remerciements.*

*Dédicace.*

*Résumé & Abstract.*

*Sommaire.*

*Liste des figures.*

*Liste des tableaux.*

*Table des abréviations et symboles.*

*Introduction générale*.....01

## *Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le comportement du béton et de l'acier*

1	Introduction.....	3
2	Comportement et modélisation du béton .....	3
2.1	Historique .....	3
2.3	Composition du béton : .....	4
2.4	Comportement expérimental du béton .....	5
2.4.1	Comportement en traction .....	5
2.4.2	Comportement en Compression .....	9
3	Comportement et modélisation de l'acier .....	11
3.1	Classification des aciers pour le béton armé .....	13
3.2	Le comportement de l'acier : .....	13
3.3	Loi de comportement de l'acier modifier .....	14
4	Béton armé .....	16
5	Adhérence acier-béton .....	17
5.1	Historique essais normalisé .....	17
5.2	Essai de traction (pull out test).....	18
5.3	Essai de flexion (Beam test).....	18

6	Conclusion .....	19
---	------------------	----

## ***Chapitre II : Comportement des tirants et loi d'adhérence acier-béton***

1	Introduction.....	20
2	Définition d'un tirant en béton armée .....	20
3	Comportement type d'un tirant en béton armé et diagramme fictif de l'acier :.....	21
3.1	Comportement d'un tirant .....	21
3.2	Diagramme fictif de l'acier pour un tirant.....	22
3.3	Modélisations de lois de comportement d'un tirant .....	22
3.3.1	Modèles multilinéaires :.....	23
3.3.1.1	Modèle de Rabich .....	23
3.3.1.2	Modèle d'Espion : .....	24
3.3.1.3	Modèle de Van der Veen.....	25
3.3.2	Modèles hyperboliques :.....	25
3.3.2.1	Modèle de Rao et Rostasy.....	26
3.3.2.2	Modèle hyperbolique du CEB .....	26
4	Méthodologie de détermination de la réponse de l'acier dans le béton .....	27
5	Essais sur les tirants.....	27
5.1	Essai de tirant de Goto [32].....	28
5.2	Essai de tirant de Desmettre (DESMETTRE, 2011) .....	30
5.3	Essai de tirant de clément (1987).....	32
5.4	Essai tirant de Daoud (DAOUD, 2003).....	34
6	Courbes ( $\tau - g$ ) entre acier et béton adoptées par le Comité Européen du Béton :.....	35
7	Conclusions.....	37

## ***Chapitre III : Modélisation d'un tirant avec Abaqus***

1	Introduction.....	38
2	Simulation avec ABAQUS .....	38
2.1	Présentation de logiciel abaqus .....	38

2.2	Bases de l'interface d'ABAQUS/CAE (Complete ABAQUS Environnement).....	39
2.3	Définition du modèle à simuler.....	41
2.3.1	Dimensionnement et géométrie du tirant modélisé.....	41
2.3.2	Présentation des étapes suivies dans la simulation .....	42
3	Conclusion .....	52
<b>Chapitre IV : Validation des résultats et discussion</b>		
1.	Introduction.....	52
2.	Validation du modèle proposé.....	53
3.	Etude paramétrique.....	55
3.1	Effet de la longueur des tirants .....	55
3.1.1	Courbes contrainte-déformation.....	56
3.1.2.	Cartographies de l'évolution des dommages en traction dans le béton .....	58
4.	Contribution du béton tendu (tension stiffening) .....	61
5.	Conclusion .....	62
<b>Conclusion général</b> .....		63
<b>Références bibliographiques</b> .....		65

# La liste des figures

## Chapitre I

Figure I.1. Les différents constituants du béton destiné à la construction [6].....	5
Figure I .2. Courbes expérimentales du béton en traction selon peterson [6].....	6
Figure I.3.courbes de traction d'éprouvettes en béton selon Hughes et Chapman [7].....	7
Figure I.4. Courbe contrainte-déformation Traction. [8, 9] .....	8
Figure I.5. Courbes contrainte-déplacement GOPALARATNAM85 [10].....	8
Figure I.6. essai de compression uni axial [6].....	9
Figure I.7. comportement du béton en compression [42].....	9
Figure I.8. Comportement cyclique du béton en compression simple [43] .....	10
Figure I.9. Loi de comportement d'un acier naturel [14].....	11
Figure I.10. Loi de comportement d'un acier écroui [14].....	12
Figure I.11. Diagramme de calcul des aciers naturels d'après le BAEL [15].....	12
Figure I.12.diagramme charge-déformation (comportement réel de l'acier) [12].....	13
Figure I.13. Diagramme de calcul des aciers naturels d'après le BAEL [13].....	14
FigureI.14. réponse de l'acier en traction dans le béton [31].....	15
Figure I.15. modélisation diverses de la loi de comportement de l'acier modifier.....	15
Figure I.16. loi de comportement du béton armée.....	16
Figure I.17. Essai de traction (pull out test) [24,25].....	18
Figure I.18.effet d'arrachement et de formation de bielles comprimées selon Caquot.....	19

## chapitre II

Figure II.1.différente phase du comportement d'un tirant.....	21
Figure II.2.loi de comportement fictive du tirant selon RABICH.....	23
FigureII.3.loi de comportement fictive bilinéaire selon ESPION.....	24
FigureII.4. loi de comportement fictive de VAN DER VEEN.....	25
FigureII.5. loi comportement fictive selon [RAO76], [ROS76] et [CEB85].....	26
Figure II.6.comportement globale réel d'un tirant en béton armée(FARRA).....	28
Figure II.7. Dispositif de l'essai de Goto.....	29
Figure II.8. Section longitudinale d'un tirant fissuré.....	30
Figure II.9. Réseau de fissures internes.....	30
Figure II.10.Montage de l'essai de tirant et instrumentation caractéristique.....	31

Figure II.11. Espacement des fissures- champ de déplacement obtenu par analyse par corrélation d'image, essai de tirant de desmettre.....	32
Figure II.12.caractéristique géométrique du tirant de clément.....	32
Figure II.13.distrubution des jauges dans le tirant de clément.....	33
Figure II.14. Courbes expérimental force-déformation : (a)avec jauges « béton » (b) avec jauge « acier ».....	34
Figure II.15. Tirants réalisés par Daoud avec différents diamètres et différents type du béton [35] .....	35
Figure II.16. Courbes contrainte/déformation sur l'acier d'après Daoud.....	35
Figure II.17. courbe $\tau$ -g adoptées par le CEB.....	36

### chapitre III

Figure III.1. Quelques formes complexes possibles à programmer sur ABAQUS.....	39
Figure III.2. Présentation de l'interface ABAQUS .....	40
Figure III.3. Dimensionnement et géométrie de tirant en béton armé en (mm).....	41
Figure III.4. Les modules du logiciel.....	42
Figure III.5. Création de l'élément béton.....	43
Figure III.6. Création de la géométrie du béton.....	43
Figure III.7.élément béton obtenu.....	43
Figure III.8.creation de la géométrie de la barre.....	44
Figure III.9. Création du la plaque rigide pour transmettre les charges axial et vertical.....	45
Figure III.10. Élément tirant obtenue.....	45
Figure III.11. Création des propriétés de matériau béton.....	46
Figure III.12. Création des propriétés de matériau acier.....	47
Figure III.13.assemblage acier béton .....	48
Figure III.14. Assemblage acier plaque rigide.....	48
Figure III.15.création des interactions.....	49
Figure III.16.chargement appliqué sur le tirant en béton armé.....	49
Figure III.17.création de maillage (acier, béton).....	50
Figure III .18. Création de fichier job.....	51
Figure III.19. Visualisation et exploitation des résultats.....	52

## Chapitre IV

Figure IV.1. Confrontation des courbes contrainte déformation du modèle numérique et expérimental de la barre HA12.....	54
Figure IV.2. Confrontation des courbes contrainte déformation du modèle numérique et expérimental de la barre HA16.....	54
Figure IV.3.courbe contrainte déformation de la barre HA12 pour une longueur de 400mm..	56
Figure IV.4.courbe contrainte déformation de la barre HA12 pour une longueur de 500mm..	56
Figure IV.5.courbe contrainte déformation de la barre HA12 pour une longueur de 600mm..	57
Figure IV.6.courbe contrainte déformation de la barre HA16 pour une longueur de 400mm..	57
Figure IV.7.courbe contrainte déformation de la barre HA6 pour une longueur de 500mm...	57
Figure IV.8. Courbe contrainte déformation de la barre HA16 pour une longueur de 600m...	58
Figure IV.9. évaluation des dommages du HA12 pour une longueur de 400mm.....	59
Figure IV.10. évaluation des dommages du HA12 pour une longueur de 500mm.....	59
Figure IV.11. évaluation des dommages du HA12 pour une longueur de 600mm.....	59
Figure IV.12. évaluation des dommages du HA16 L=400mm.....	59
Figure IV.13. évaluation des dommages du HA16 L=500mm.....	59
Figure IV.14. évaluation des dommages du HA16 L=600mm.....	60
Figure IV.15. Contribution du béton tendu (tension stiffening).....	61

## **Liste des tableaux**

### **Chapitre I**

Tableau I.1. Caractéristique mécanique du béton.....	5
--	---

### **Chapitre III**

Tableau III.1. Tableau des unités correspondant à ABAQUS.....	39
---	----

Tableau III.2. Tableau des caractéristiques du tirant.....	41
--	----

Tableau III.3. Sensibilité de maillage.....	50
---	----

### **Chapitre IV**

Tableau IV.1. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux.....	55
--	----

## Notations principales

$\epsilon_s$	allongement relatif du béton
$\Delta\epsilon$	Ecart d'allongement relatif entre l'acier nu et le tirant sous l'effort $N_T$
$\epsilon_{sr}$	allongement relatif de l'acier à l'apparition de la première fissure
$\epsilon_{cr}$	allongement relatif du béton à l'apparition de la première fissure
$f_{c28}$	La résistance à la compression du béton à 28 jours.
$f_{ck}$	résistance caractéristique à la compression du béton sur cylindre
$f_{cm}$	résistance moyenne à la compression sur cylindre
$\sigma_e$	contrainte limite d'élasticité de l'acier
$\sigma_s$	La contrainte dans l'acier
$\sigma_{sr}$	contrainte de l'acier à l'apparition de la première fissure
$\sigma_{cr}$	contrainte effective du béton à l'apparition de la première fissure
$\sigma_{sy}$	contrainte de l'acier à l'apparition de la dernière fissure
$\tau$	contrainte d'adhérence entre l'acier et le béton
$\tau_r$	contrainte maximum d'adhérence
$E_s$	module d'élasticité de l'acier
$E_c$	module d'élasticité du béton
$N_T$	Force de traction
$A_s$	Section d'acier tendu
$\Delta l$	Allongement total du tirant
$L$	La longueur totale du tirant
$\rho$	pourcentage d'acier
$\eta$	coefficient d'équivalence entre l'acier et le béton
$g$	glissement relatif entre l'acier et le béton
$g_1$	valeur du glissement correspondant au pic de l'adhérence acier – béton
$\alpha$	Coefficient de confinement du béton

Le génie civil est une discipline qui englobe la conception, la construction et l'analyse de structures et d'infrastructures essentielles à notre société moderne. Dans ce contexte, la modélisation et la simulation des comportements des éléments de structure revêtent une importance capitale pour assurer la sécurité et la durabilité des constructions. Dans ce mémoire de Master en génie civil, nous nous penchons sur l'étude des tirants en béton armé, en utilisant le logiciel ABAQUS pour la modélisation.

Les tirants en béton armé sont des éléments utilisés pour reproduire le comportement des éléments soumis à des efforts de traction dans les constructions. Dans cette étude, nous nous concentrons sur la modélisation des tirants sous forme d'éprouvettes en béton de section carrée de 100 mm de côté et de longueurs variables. Ces éprouvettes sont armées d'une seule barre d'acier centrale, qui est soumise à un effort de traction d'un côté et est encastree de l'autre côté [47].

L'une des considérations importantes dans cette étude est l'adhérence entre l'acier et le béton. L'acier est utilisé pour sa résistance élevée à la traction, tandis que le béton apporte une résistance en compression. L'interaction entre ces deux matériaux est cruciale pour la performance globale des tirants en béton armé. Par conséquent, nous analyserons en détail l'adhérence entre l'acier et le béton, ainsi que la contribution du béton à la résistance en traction [48].

Une autre facette de cette étude consiste à déterminer la courbe contrainte-déformation, qui représente la relation entre les contraintes appliquées aux tirants et les déformations résultantes. Cette courbe nous permettra de caractériser le comportement du tirant en traction et de comprendre la modification de la loi de l'acier en traction lorsqu'il est enveloppé de béton. Une meilleure compréhension de cette relation nous aidera à affiner les modèles de comportement utilisés dans les analyses et les calculs ultérieurs [49].

L'objectif ultime de ce travail est d'élargir notre compréhension des tirants en béton armé et de leur comportement en traction. Cette connaissance approfondie nous permettra de mieux appréhender le comportement des autres éléments sollicités en traction, tels que la partie inférieure des poutres et certaines zones tendues des structures en béton armé. Ces informations seront ensuite prises en compte dans les calculs et le dimensionnement des éléments de structure en général, contribuant ainsi à une conception plus précise et plus sûre. En examinant les tirants en béton armé, nous pouvons également extrapoler nos résultats à d'autres éléments structurels, tels que la partie inférieure des poutres ou les zones tendues des structures en béton armé [50].

Comprendre le comportement de ces éléments nous permettra d'améliorer les modèles de calculs et de dimensionnement, conduisant ainsi à une conception plus précise et plus fiable des structures.

L'utilisation du logiciel de simulation ABAQUS nous offre l'opportunité de modéliser de manière réaliste le comportement des tirants en béton armé, en tenant compte des non-linéarités matérielles et géométriques. Nous pourrions ainsi reproduire les conditions réelles de chargement et d'environnement pour obtenir des résultats plus précis. L'étude paramétrique que nous envisageons de mener est essentielle pour explorer les effets de différentes longueurs de tirants et de diamètres d'armatures. En variant ces paramètres, nous pourrions observer comment le comportement du tirant évolue et identifier les facteurs influençant sa résistance et sa ductilité [51].

En conclusion, cette étude de modélisation et de simulation des tirants en béton armé à l'aide du logiciel ABAQUS constitue une contribution significative à la compréhension du comportement des éléments sollicités en traction. En analysant en détail les propriétés mécaniques, l'adhérence acier-béton et la courbe contrainte-déformation, nous serons en mesure d'améliorer les modèles de calcul et de dimensionnement des structures en béton armé [52].

# 1 Introduction

L'étude du comportement des matériaux de construction constitue un aspect fondamental de l'ingénierie civile. Parmi ces matériaux, l'acier et le béton occupent une place prépondérante en raison de leur utilisation répandue dans la construction d'infrastructures et de structures de génie civil. Comprendre le comportement de ces matériaux en traction est essentiel pour garantir la sécurité, la durabilité et la performance des ouvrages.

Ce chapitre se propose de réaliser une synthèse bibliographique approfondie sur le comportement de l'acier et du béton soumis à des sollicitations en traction. En combinant les connaissances théoriques et les résultats expérimentaux issus de différentes études scientifiques et techniques, cette synthèse vise à offrir une vision globale et détaillée des phénomènes mécaniques qui se produisent dans ces matériaux en situation de traction.

Nous commencerons par examiner les propriétés intrinsèques de l'acier et du béton qui influencent leur comportement en traction. Cette analyse mettra en évidence les caractéristiques physiques, chimiques et structurales qui confèrent à ces matériaux leur résistance et leur ductilité face aux efforts de traction.

Ensuite, nous aborderons les mécanismes de rupture et les modes de défaillance spécifiques à l'acier et au béton en traction. Nous explorerons les différentes phases de l'endommagement, depuis l'amorçage des fissures jusqu'à la ruine finale, en mettant en évidence les facteurs qui favorisent ou limitent la résistance de ces matériaux.

## 2 Comportement et modélisation du béton

### 2.1 Historique

L'histoire du béton remonte à l'époque des Romains et des Égyptiens, qui utilisaient déjà cette technique de manière empirique. Cependant, c'est avec l'invention du béton armé que le développement du béton moderne a véritablement commencé.

En 1756, l'ingénieur anglais John Smeaton [1] a réalisé le premier béton moderne en utilisant un mélange de gravillons naturels et de briques pulvérisées comme liant. Ce mélange, appelé ciment hydraulique, a marqué une avancée significative dans la fabrication du béton.

En 1824, Joseph Aspdin [2] a inventé le ciment Portland, qui est aujourd'hui le composant le plus utilisé dans la production de béton. Ce ciment a des propriétés chimiques modifiées, offrant

une résistance à la compression bien supérieure à celle des mortiers de chaux utilisés précédemment. Cependant, il présente une faible résistance à la traction.

En 1849, Joseph Monier [3] a inventé le béton armé en incorporant des barres de fer dans le béton pour renforcer les structures. Cette invention a permis au béton de supporter partiellement les contraintes de traction, ouvrant ainsi de nouvelles possibilités dans la construction. Le béton armé a été breveté en 1867.

En 1928, Eugène Freyssinet [4] a introduit le concept du béton précontraint en utilisant des fils adhérents. Ce procédé permet de renforcer le béton en appliquant une précontrainte interne, améliorant ainsi ses performances structurelles.

Au fil du temps, des progrès importants ont été réalisés dans le domaine du béton. Dans les années 1980, des bétons à haute performance ont été développés, atteignant des résistances à la compression de l'ordre de 100 MPa, voire plus de 600 MPa en laboratoire.[2]

Aujourd'hui, le béton est devenu un matériau indispensable dans le domaine de la construction en raison de ses avantages économiques et techniques. Il est largement utilisé depuis plus d'un siècle, tant dans le génie civil que dans le bâtiment, grâce à sa facilité de mise en œuvre, sa résistance en compression, sa durabilité et son coût abordable.

## **2.2 Définition**

Le béton ordinaire est un matériau de construction couramment utilisé, composé de ciment Portland, de sable, de gravier et d'eau. Il est utilisé dans la construction de diverses structures telles que des bâtiments, des ponts et des routes. Le ciment Portland, un ciment hydraulique, réagit avec l'eau pour former une substance solide et résistante. Le sable et le gravier, utilisés comme agrégats, confèrent au béton sa résistance et sa stabilité. L'eau active les réactions chimiques qui permettent au mélange de se durcir. Le béton ordinaire est souvent renforcé avec des barres d'acier pour améliorer sa résistance à la traction. En raison de sa polyvalence, de son coût abordable et de sa durabilité, le béton ordinaire est largement utilisé dans le monde entier comme matériau de construction essentiel.

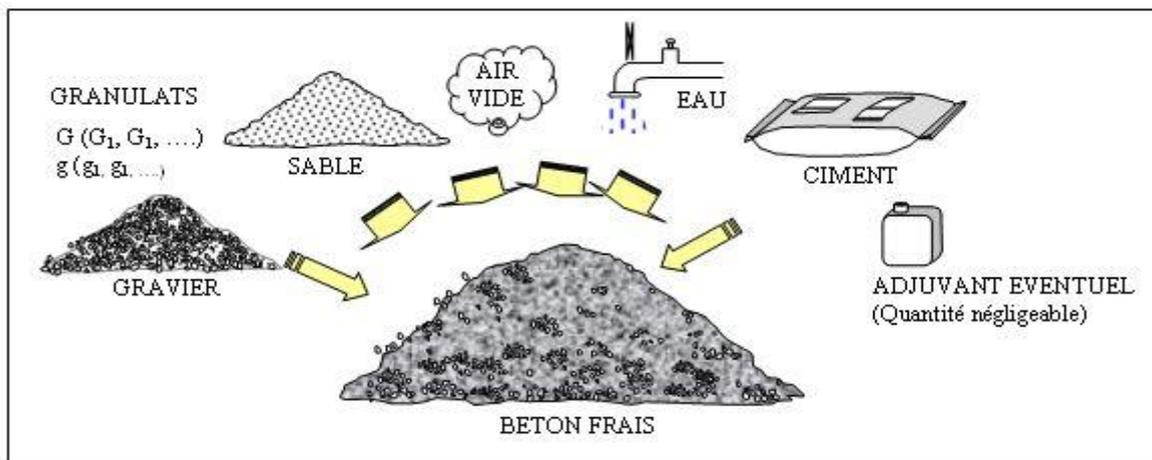
## **2.3 Composition du béton :**

Le béton est un mélange de plusieurs composants : ciment, eau, sable, gravier et, le plus souvent, adjuvants (figure I.1) qui constituent un ensemble homogène. Les composants sont très différents : leurs masses volumiques vont, dans les bétons courants, de 1 (eau) à 3 (ciment) t/m<sup>3</sup> ; les dimensions de leurs grains s'échelonnent de 0.5 μm (grains les plus fins du ciment) à 25

mm (gravillons). Mais cette liste s'allonge très vite dès que des propriétés particulières sont visées, on utilise alors des fines complémentaires ou additions minérales [4].

Les masses volumiques des bétons sont données comme suites :

- La masse volumique béton à granulats courants (normal) → 2200 à 2400kg/m<sup>3</sup>
- La masse volumique béton à granulats légers → 700 à 1500 kg/m<sup>3</sup>
- La masse volumique béton à granulats lourds → 3500 à 4000kg/m<sup>3</sup>



**Figure I.1 :** Les différents constituants du béton destiné à la construction [6].

**Tableau I.1.** Caractéristique mécanique du béton

caractéristiques	Valeur
Résistance à la compression a 28 jours ( $f_{c28}$ )	33,7MPa
Résistance moyenne à la traction a 28 jours ( $f_{ctm28}$ )	2,6MPa
Module d'élasticité du béton $E_c$	35,5GPa
Affaissement au cône d'Abrams	60mm

## 2.4 Comportement expérimental du béton

### 2.4.1 Comportement en traction

La capacité de résistance du béton en traction est très faible par rapport à celle en compression. Elle ne représente qu'un dixième de sa résistance en compression, L'emploi d'armature est alors nécessaire pour augmenter sa capacité en traction. Les efforts de traction sont plus souvent retrouvés dans les éléments fléchis.

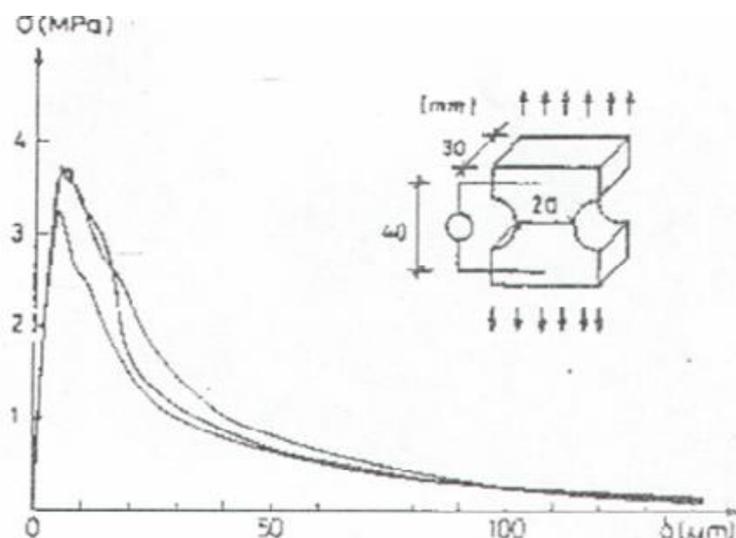
Divers chercheurs ont effectué des tests pour déterminer la **résistance** à la traction du béton qui montre un certain degré de discrétion dans les résultats. Ceci est dû au fait Comportement relativement fragile des matériaux en béton et des modèles d'essai.

Afin d'apprécier, lors d'un essai, le comportement d'un élément soumis à une traction direct, il est nécessaire de réaliser l'essai avec asservissement (en déformations contrôlées).

Avec l'évolution de la technologie (nouvelles machines plus performantes), on ne se contente plus de mesure simple de résistance puisque ces appareils nous permettent de déterminer les courbes contrainte - déformation ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) dans le domaine linéaire jusqu'à atteinte du maximum et même au-delà du pic de contrainte. Ce qui permet de mettre en évidence le comportement Post-pic et la ductilité relative du matériau, jusqu'à rupture totale.

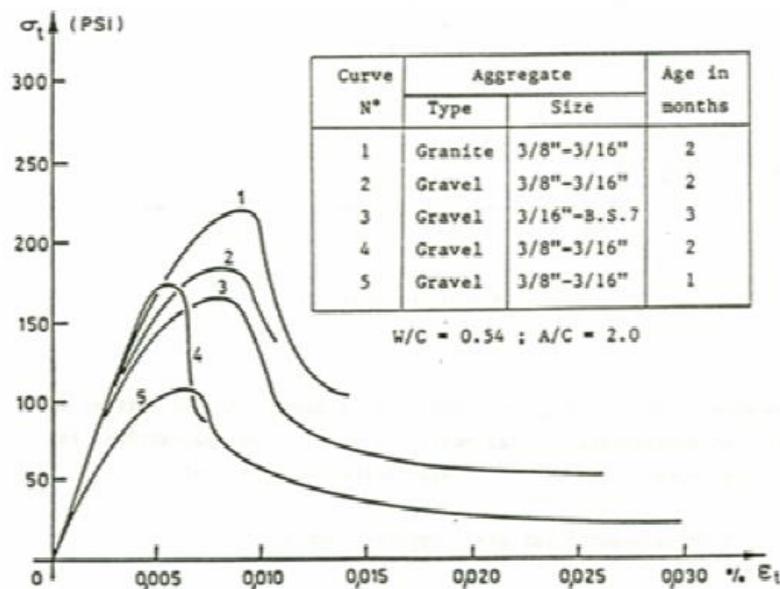
L'exemple, présenté (figure II), est le comportement type du béton en traction. Les diagrammes obtenus lors des essais, réalisés par Peterson [6], montrent l'existence de Deux phases très distinctes :

- une branche ascendante (élastique linéaire) rectiligne jusqu'au maximum de résistance,
- au-delà du pic, la courbe décroît progressivement jusqu'à s'annuler pour un déplacement nettement supérieur à celui du pic, d'où un comportement assez ductile.



**Figure I.2.** Courbes expérimentales du béton en traction selon Peterson [6]

D'autres essais du même type (figure I.3) ont été réalisés par Hughes et Chapman [7]



**Figure I.3.** courbes de traction d'éprouvettes en béton selon Hughes et Chapman [7]

Le comportement en traction du béton est caractérisé par une propagation stable et constante de fissures perpendiculairement à l'axe de chargement qui se traduit par une relation pratiquement linéaire et proportionnelle au module d'élasticité du béton, jusqu'à l'atteinte de la limite en tension. En l'absence de données expérimentales, cette limite peut être reliée à la résistance en compression et pour béton de densité normale. Cette limite représente la coalescence de microfissures pour mener à la propagation rapide d'une fissure localisée (macro fissure) qui fait diminuer drastiquement la contrainte sous déformation croissante. Il est alors généralement considéré que le béton en traction ne peut reprendre aucun effort, c'est-à-dire que la résistance en traction du béton est négligée après la fissuration [7].

- Selon Terrien, les premières dégradations apparaissent à environ 50% de la contrainte maximale. Le post-pic (phase d'adoucissement) où la contrainte chute brutalement avant de se stabiliser.

- En première phase nous avons un domaine élastique très réduit présentant une perte de raideur juste avant le pic (ft) contrainte limite en traction).

- En deuxième phase, on observe une chute brutale de la contrainte due à la rupture des éléments microstructuraux en mode I (les fissures se propagent dans un sens perpendiculaire à la contrainte principale en traction).

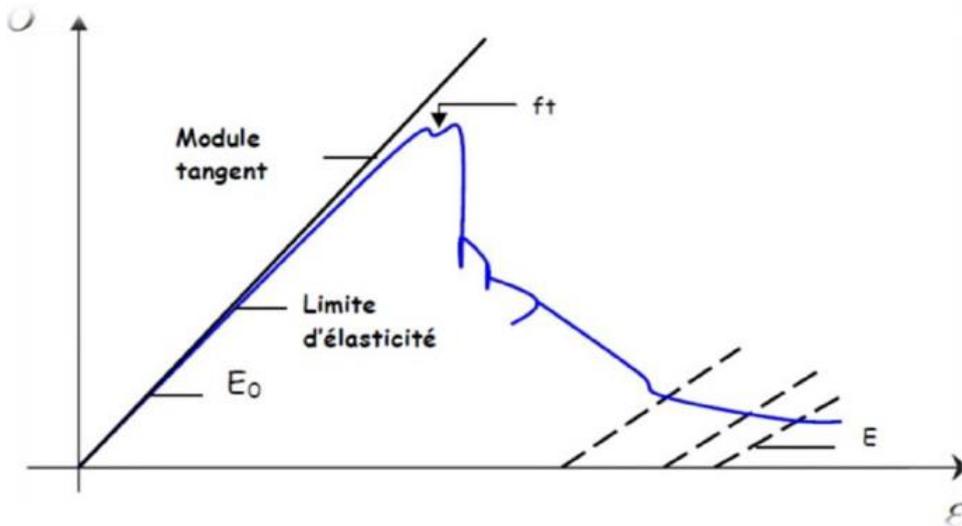


Figure I.4 : Courbe contrainte-déformation Traction. [8, 9]

➤ **Traction cyclique :**

Permet de confirmer le rôle prépondérant du développement de la microfissuration qui provoque une dégradation des caractéristiques élastiques du matériau. On note que les boucles d'hystérésis sont très faibles. La (figure I.5) suivante illustre la fragilité du béton et sa faible capacité dissipatrice en traction par des courbes d'Hystérésis restreintes

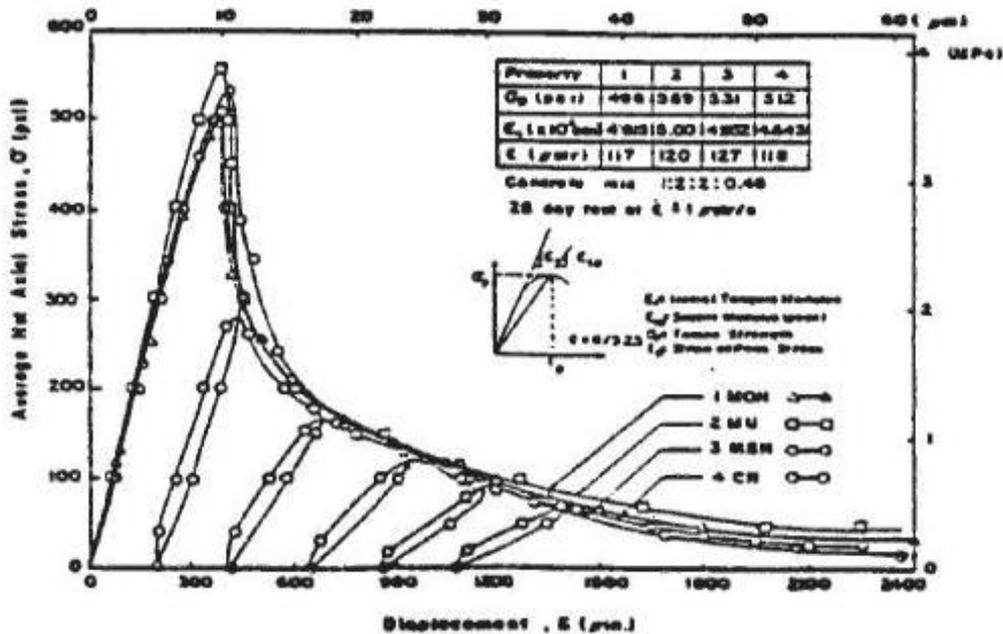


Figure I.5. Courbes contrainte-déplacement GOPALARATNAM85 [10]

## 2.4.2 Comportement en Compression

Le béton présente une bonne résistance à la compression, pour cela ce matériau est défini par la valeur de sa résistance à la compression à 28 jours ; elle est notée  $f_{c28}$  est choisie en fonction : des conditions de fabrication du béton et de la classe du ciment utilisé.

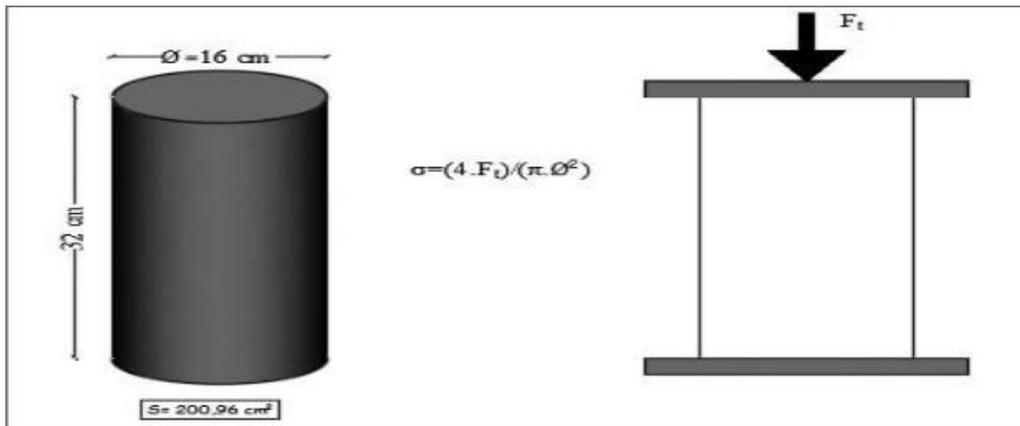


Figure I.6 essai de compression uni axial [6]

- Il est très facile de connaître la résistance en compression par l'essai d'écrasement à la presse hydraulique qui est le plus souvent appliqué sur des éprouvettes cylindriques avec une hauteur et diamètre normalisés respectivement de 32 et 16 cm.

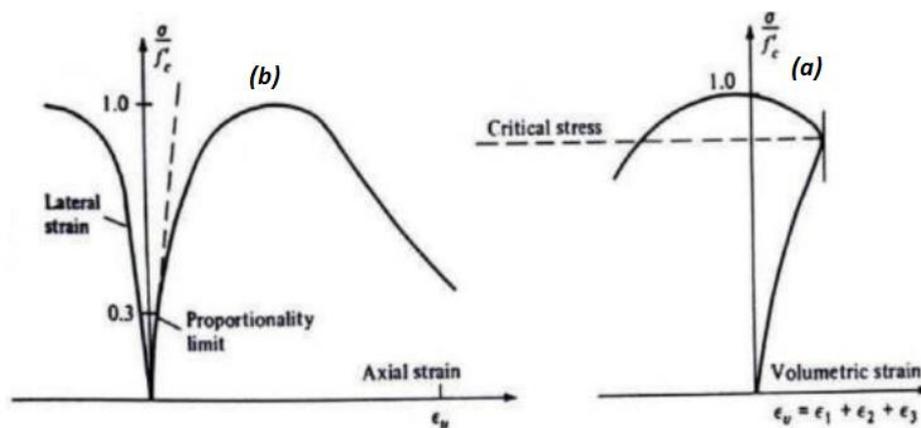


Figure I.7 comportement du béton en compression [42]

Bien que le béton soit constitué de matériaux élastiques et fragiles (granulats, pâte de ciment), son comportement en compression, que l'on traduit principalement par une relation contrainte-déformation, est non linéaire et présente une certaine pseudo-ductilité liée à la microfissuration du matériau

- Cette courbe(a) montre que la réponse est linéaire de 30% jusqu'à 40% de la limite en compression ( $f_c$ ) puis la courbe devient de plus en plus non linéaire jusqu'à 75%-90% de la limite ( $f_c$ ). Apparition de l'irréversibilité (déformation permanente).

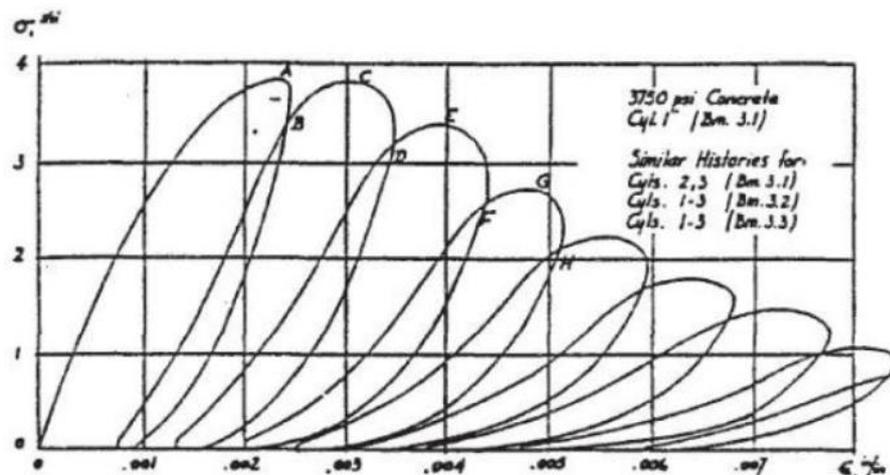
- La courbe présente un pic suivi d'une branche post-pic correspondant à un comportement adoucissant. Le coefficient de poisson évolue (Fig. I.7)

- L'altitude du pic définit la contrainte ultime qui caractérise la résistance du béton à la compression. Elle correspond à une déformation de l'ordre 2‰.

- La rupture se produit au-delà du pic avec fissuration verticale et écrasement de l'éprouvette.

- Elle correspond à une déformation de l'ordre de 3.5‰. microfissuration du matériau.

### ➤ Compression cyclique



**Figure I.8** Comportement cyclique du béton en compression simple [43]

Les microfissures qui apparaissent dans le béton après l'application d'un chargement cyclique provoquent la dégradation de ses caractéristiques élastiques. La persistance des microfissures est due à l'effet de frottement entre ses surfaces et leur non fermeture totale après déchargement. Il est aussi possible d'avoir une idée de la capacité dissipative du matériau à travers les courbes d'Hystérésis que présentent la (figure I.8) ci-dessous.

- L'essai cyclique en compression montre que les microfissures provoquent une dégradation

des caractéristiques élastiques du matériau. De plus, une apparition de boucles d'hystérésis lors des cycles charge –décharge, est également observée.

### 3 Comportement et modélisation de l'acier

L'acier est un alliage métallique dont l'élément chimique principal est le fer et l'autre élément essentiel est le carbone. L'acier utilisé dans le béton armé est une nuance tendre avec une teneur en carbone comprise entre 0,15 et 0,25 % et une nuance moyennement dure avec une teneur en carbone comprise entre 0,25 et 0,40 %. [11]

Les barres d'acier sont utilisées dans le béton armé pour compenser la faiblesse du béton à supporter les contraintes de traction. On pense généralement que l'armature n'est sollicitée qu'après la fissuration du béton. Ils présentent une ductilité remarquable après avoir atteint la limite d'élasticité et, s'ils sont correctement conçus, peuvent plier et fissurer les éléments en béton armé jusqu'à leurs limites sans défaillance catastrophique.

Généralement deux types d'acier sont utilisés pour le renforcement du béton ; l'acier naturel et l'acier écroui [14].

- Pour un acier naturel, la courbe contrainte-déformation à l'allure de la (figure I.9) ; elle est caractérisée par un palier de ductilité après l'atteinte de la limite élastique

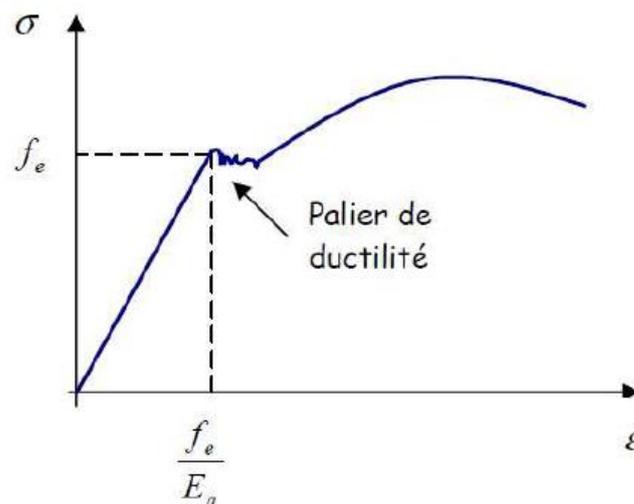


Figure I.9. Loi de comportement d'un acier naturel [14]

- La (figure I.10) suivante présente la loi de comportement pour un acier écroui. A noter que l'action d'écrouissage permet d'augmenter la limite d'élasticité en faisant

disparaître le palier de ductilité et diminuer l'allongement à rupture. La limite élastique correspond à une déformation de l'ordre de 2‰.

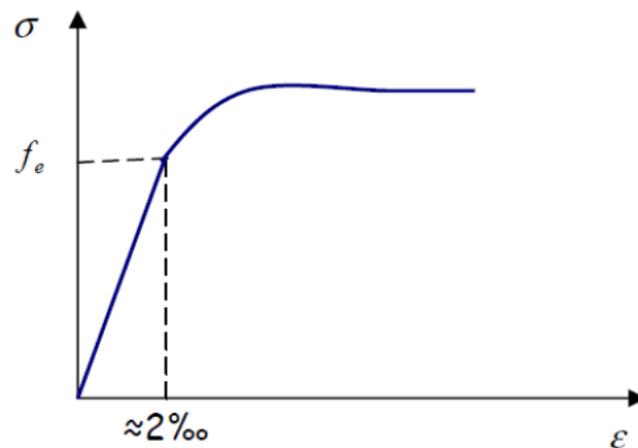


Figure I.10. Loi de comportement d'un acier écroui [14]

Pour les calculs réglementaire, le comportement des aciers est supposé élastoplastique parfait, les déformations ultimes sont fixées par le BAEL [01] à 10‰.

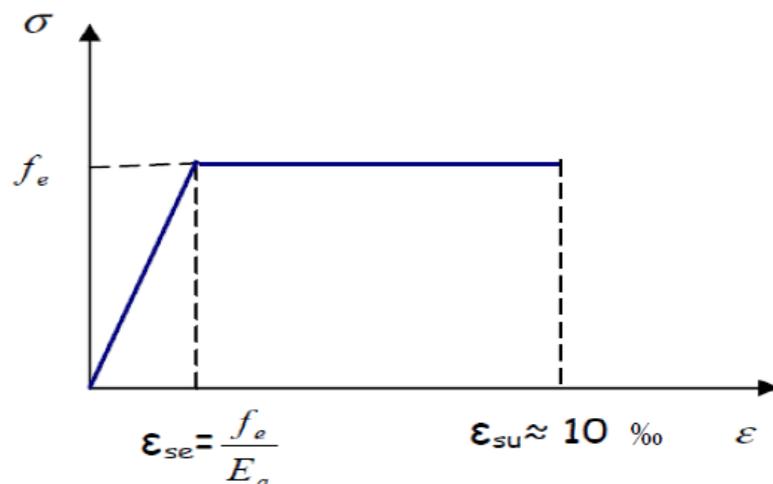


Figure I.11. Diagramme de calcul des aciers naturels d'après le BAEL [15]

### 3.1 Classification des aciers pour le béton armé

Trois classes d'acier sont distinguées :

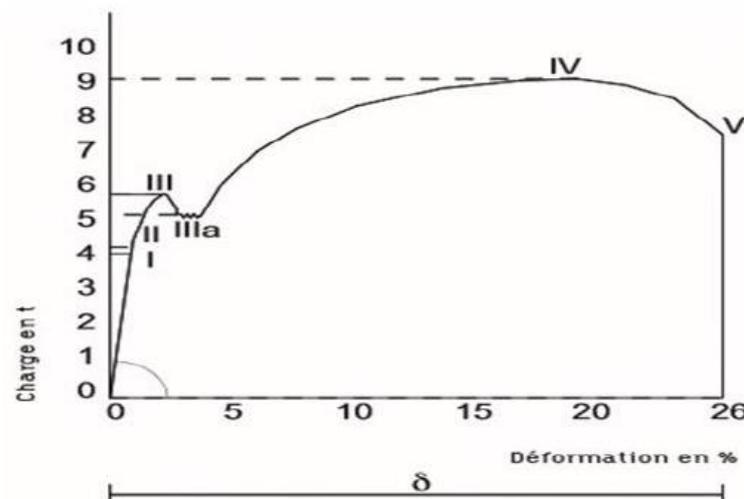
- **Les ronds lisses** : Symbole  $\Phi$  ou RL Ce sont des aciers doux, laminés à chaud et de surface lisse, ne présentant aucune aspérité. Les nuances utilisées sont les (Fe E 215) et (Fe E 235).
- **Les armatures à haute adhérence** :

Symbole HA Ils sont obtenus par laminage à chaud d'un acier naturellement dur, soit dont les caractéristiques mécaniques sont dues à une composition chimique appropriée. On n'utilise plus, en béton armé, des aciers obtenus par laminage suivi d'un écrouissage. Ces aciers existent dans les nuances Fe E 400 et Fe E 500.

- **Les treillis soudés (TS) :** Ils sont utilisés comme armature dans les dalles car cela évite l'arrimage des barres transversales et longitudinales entre elles. Les treillis soudés sont constitués par des fils se croisant perpendiculairement et soudés électriquement à leur croisement. On distingue les treillis soudés à fils tréfilés dits TSL et les treillis soudés à fils à haute adhérence dits TSHA (voir norme NF A 35-022). Leur largeur standard est de 2,40m. La longueur des rouleaux est de 50m et celle des panneaux est de 4,80m ou 6m.

### 3.2 Le comportement de l'acier :

Le comportement de l'acier est semblable en traction et en compression, contrairement au béton. La loi contrainte-déformation dépend de la nature de l'acier.



**Figure I.12.**diagramme charge-déformation (comportement réel de l'acier) [12]

D'après la figure ci-dessous, découvrez les trois étapes pour que :

- **Phase élastique (phases I et II sur le diagramme) :**

Sous l'action de la traction le long de sa section transversale, la barre d'acier s'allonge uniformément pour une certaine limite qui s'appelle la limite d'élasticité. Le phénomène est

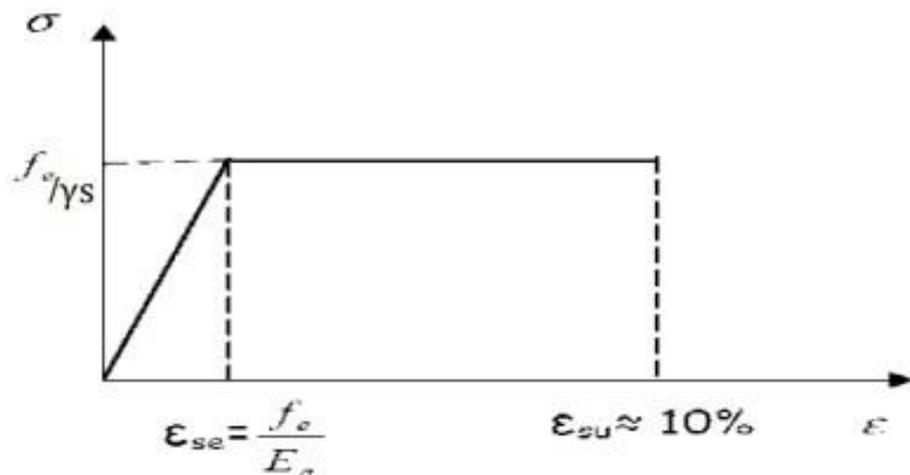
réversible : si la charge est après retrait, les barres reprennent leurs dimensions d'origine (loi de Hooke).

- **Phase plastique (phases III et IV) :**

Au-delà de la limite d'élasticité, l'allongement de la barre augmente même si la charge évolue peu, puis passe par une phase de déformation plastique (des déformations irréversibles) où une partie de l'allongement demeure permanent si la charge diminue. Ce phénomène est appelé écrouissage

- **Phase de rupture (phase V) :**

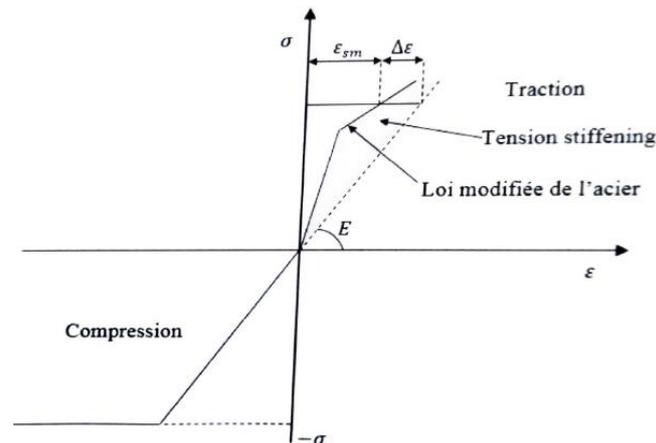
Après une phase d'allongement, la charge diminue car la section d'acier diminue. Ce phénomène est appelé « striction ». Il y a alors rupture de la barre, la déformation totale est appelée « allongement à la rupture ».



**Figure I.13.** Diagramme de calcul des aciers naturels d'après le BAEL [13].

### 3.3 Loi de comportement de l'acier modifiée

Le modèle élasto-plastique avec ou sans écrouissage semble convenir parfaitement. Néanmoins pour tenir compte de la contribution du béton tendu entre fissure (Figure I.14), on fait intervenir l'effet de « tension stiffening » qui consiste, dans ce cas à modifier la loi de l'acier en traction



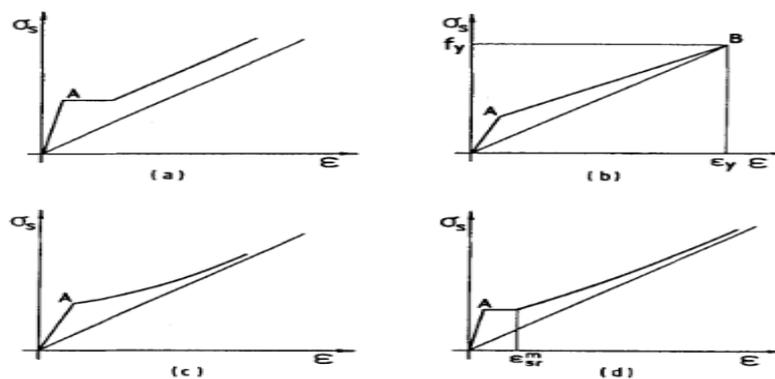
**Figure I.14** réponse de l'acier en traction dans le béton [31]

Le comportement du diagramme fictif de l'acier est gouverné par l'expression de  $\Delta\epsilon$ , qui représente la contribution du béton tendu. Les opinions de différents auteurs divergent quant à l'allure à affecter à cette courbe, notamment la valeur à attribuer à  $\Delta\epsilon$  plusieurs études a été réalisée à ce sujet et différentes expression de  $\Delta\epsilon$  ont été proposées.

J.Trinh, B.Espion et J.P jaccoud (TRAINH, 1986, ESPION, 1984, JACOOD, 1987)

Ont recensé quatre formes pour représenter le terme  $\Delta\epsilon$  comme suit :

- Lois de comportement avec  $\Delta\epsilon$  constante
- Lois de comportement avec variation linéaire de  $\Delta\epsilon$
- Lois de comportement avec variation de  $\Delta\epsilon$  en raison inverse de  $\sigma_s$
- Loi de comportement avec variation de  $\Delta\epsilon$  en raison inverse de  $\sigma_s$  accroissement de déformation pour la charge de fissuration



**Figure I.15** modélisation diversifiée de la loi de comportement de l'acier modifié

## 4 Béton armé

Les structures en béton armé sont composées principalement de deux matériaux, l'acier et le béton, qui possèdent des caractéristiques mécaniques différentes. L'acier peut être considéré comme un matériau homogène, ce qui facilite la définition de ses propriétés mécaniques. En revanche, le béton est un matériau hétérogène et ses propriétés mécaniques sont dispersées et plus difficiles à définir.

Dans le but de simplifier la conception, on considère le béton comme un matériau homogène à l'échelle macroscopique. Le principe du béton armé consiste à combiner le béton et l'acier de manière à ce que le béton absorbe les efforts de compression (et éventuellement l'acier) et que l'acier absorbe les efforts de traction.

L'association entre l'acier et le béton est possible grâce à plusieurs facteurs. Tout d'abord, il y a l'adhérence entre l'acier et le béton, qui permet la transmission des efforts entre les deux matériaux. De plus, les coefficients de dilatation de l'acier et du béton sont très proches l'un de l'autre (environ  $12.10^{-6}$ ), ce qui favorise leur compatibilité thermique. Enfin, il n'y a pas de réaction chimique nocive entre la pâte de ciment du béton et l'acier. De plus, le béton qui enveloppe l'acier le protège contre la corrosion.

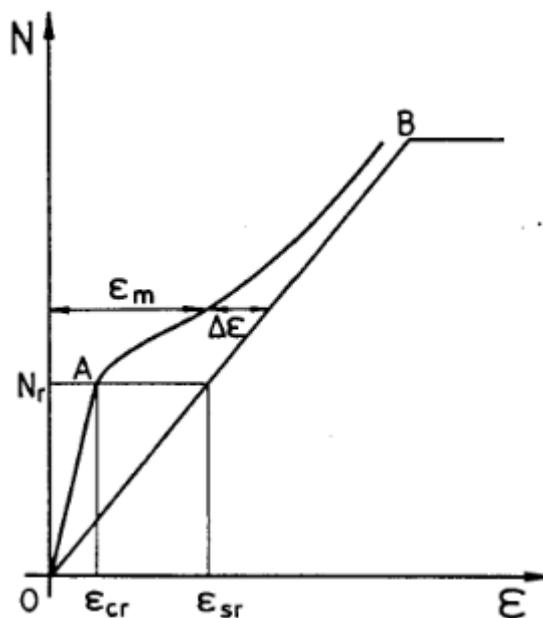


Figure I.16 loi de comportement du béton armé

## 5 Adhérence acier-béton

La capacité de l'armature à adhérer au béton est mesurée par un essai d'arrachement. Les conditions de résistance des éléments en béton armé supposent que les barres d'acier ne glissent pas dans le béton. Ce qui empêche ou limite ces glissements, c'est le phénomène d'adhérence

Cette propriété physique permet la transmission des efforts et un fonctionnement rationnel, le béton suit alors les armatures dans leurs déformations. Les justifications que nous effectuerons en ELU (du BAEL) porteront sur :

- la limitation de l'entraînement des armatures de façon à ne pas endommager le béton.
- les ancrages des extrémités de barres.
- les jonctions.
- les recouvrements.
- les coutures des barres

### 5.1 Historique des essais normalisés

Dès 1913 Abrams [16] avait procédé à des essais d'arrachement de barres enrobées de béton où il avait étudié l'influence de divers paramètres intervenant dans la liaison béton - armature.

Les premières constatations, portant sur certains paramètres intervenant dans l'adhérence acier - béton, ont été rapportées par Slater en 1920 [16].

En 1936, en étudiant la partie tendue fissurée d'une poutre fléchie, Salinger [17] a mis en évidence le mécanisme de transmission des efforts par adhérence et déduit un espacement maximum des fissures.

Avant les années 1970 et avec les moyens de l'époque, plusieurs auteurs ont étudié l'adhérence acier-béton en faisant varier plusieurs paramètres, on peut citer Menzel [18], Watstein [19], Clark [20], Chamberlin [21], Untrauer et Henry [22], Lutz et Gergely [23] La relation adhérence – glissement entre l'acier et le béton, est généralement obtenue Par l'essai d'arrachement « pull-out -test » ou l'essai par flexion « Beam -test » selon les Normes de la RILEM [24], [25]. Ces deux essais sont très utilisés en pratique.

## 5.2 Essai de traction (pull out test)

C'est un essai normalisé suivant la RILEM, caractérisé par un bloc de béton cubique d'arête égale à dix fois le diamètre de la barre soumise à l'arrachement. Cette barre centrée dans le bloc de béton, adhère sur une longueur cinq fois son diamètre. Une assise en caoutchouc permet d'éliminer l'effet de frottement (Figure I.17). L'essai est réalisé après 28 jours, On applique, alors, une force de traction croissante et, on mesure ainsi le déplacement Relatif entre l'armature et le béton grâce au capteur de déplacement placé au-dessus de L'éprouvette.

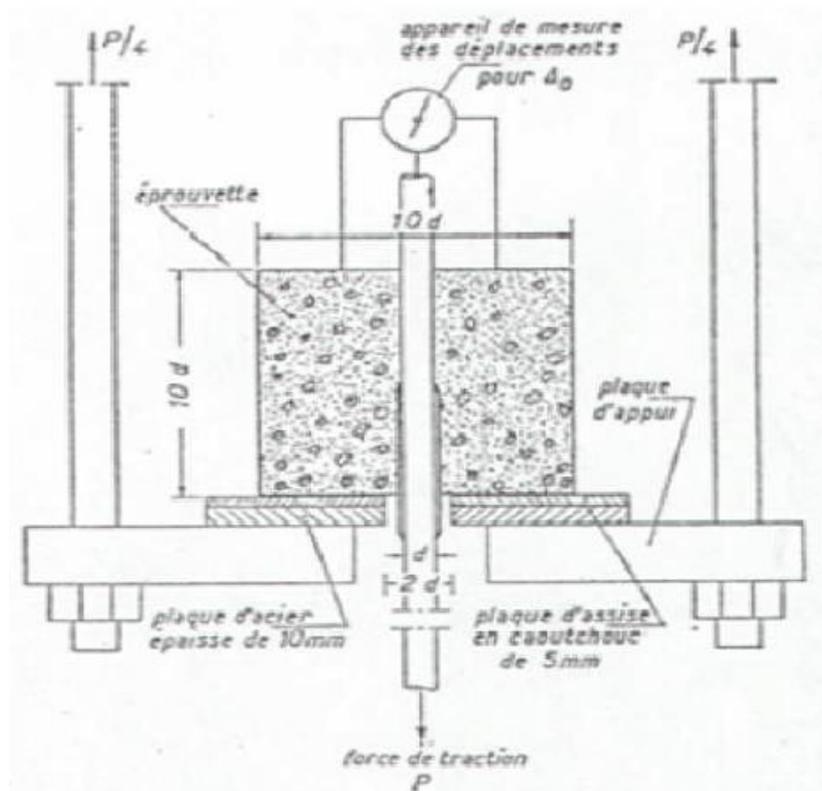


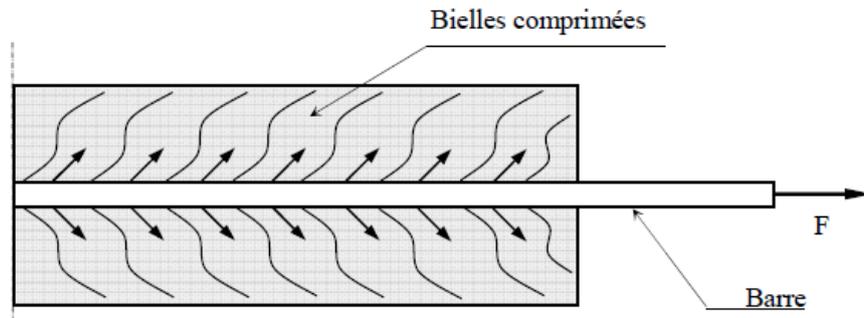
Figure I.17. Essai de traction (pull out test) [24,25]

## 5.3 Essai de flexion (Beam test)

Une poutre en béton armé est constituée de deux moitiés symétriques, Dans chaque section, l'armature de traction principale n'est adhérente que sur une longueur dix fois son diamètre. Conforme à la norme RILEM, ce test mesure le glissement relatif acier-béton et détermine la force de déchirure, c'est-à-dire la rupture d'adhérence.

Pour les deux types d'essais, la dispersion des résultats est plus élevée avec l'essai de traction, mais cette dernière donne de meilleurs résultats pour les barres de plus grand diamètre. La courbe de glissement montre également la dispersion des deux tests.

Albert Caquot a montré que l'effet d'arrachement de la barre provoque la formation de bielles obliques comprimées à  $45^\circ$  qui elles-mêmes s'appuient sur des zones de béton plus allongées (Figure I.18) [26]



**Figure I.18.** Effet d'arrachement et de formation de bielles comprimées selon Caquot

## 6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré plusieurs définitions et concepts liés aux matériaux tels que le béton, l'acier et le béton armé. Nous avons examiné leurs constituants principaux, leurs avantages distinctifs et étudié leurs comportements mécaniques ainsi que les modélisations associées.

Nous nous sommes également intéressés au comportement fictif de l'acier. Cela fait référence à une représentation simplifiée du comportement de l'acier, utilisée dans le cadre de modélisations numériques ou analytiques. Ces modèles fictifs permettent d'évaluer les performances de l'acier en fonction de diverses charges et conditions, sans prendre en compte tous les aspects complexes de son comportement réel. Ils sont souvent basés sur des lois modifiées du comportement de l'acier, qui sont adaptées pour capturer certaines caractéristiques spécifiques ou simplifier les calculs.

L'objectif de cette approche est de faciliter l'analyse et la conception des structures en béton armé en fournissant des estimations raisonnables du comportement de l'acier dans des conditions données. Cependant, il est important de noter que ces comportements fictifs sont des approximations et ne reflètent pas toujours précisément le comportement réel de l'acier. Par conséquent, il est crucial de prendre en compte les limitations et les hypothèses associées à ces modèles lors de leur utilisation.

## 1 Introduction

L'utilisation de tirants en béton armé est courante dans l'étude de nombreux ouvrages de génie civil, tels que les poutres, les dalles, les colonnes et les fondations. Les tirants jouent un rôle essentiel dans le transfert des charges et la résistance des structures. Comprendre leur comportement mécanique et l'interaction entre l'acier et le béton est fondamental pour garantir la sécurité et la performance de ces éléments structuraux.

Ce chapitre se propose d'explorer en détail le comportement des tirants en béton armé et d'étudier la loi d'adhérence entre l'acier et le béton. Nous examinerons les phénomènes mécaniques qui interviennent dans ces éléments de renforcement et les facteurs qui influent sur leur résistance et leur capacité portante.

Nous commencerons par présenter les caractéristiques des tirants en béton armé, notamment leur composition, leur configuration et leur rôle dans les structures. Nous aborderons ensuite la loi d'adhérence, qui régit l'interaction entre l'acier et le béton.

Ce chapitre vise à fournir une compréhension approfondie du comportement des tirants en béton armé et de la loi d'adhérence entre l'acier et le béton. En explorant les aspects théoriques et les applications pratiques.

## 2 Définition d'un tirant en béton armé

Un tirant en béton armé est un élément de construction en béton renforcé avec de l'acier. Il est conçu pour résister aux forces de tension et est souvent utilisé pour stabiliser les structures en appliquant une force de traction.

Les tirants en béton armé sont souvent utilisés dans les fondations des bâtiments pour éviter les mouvements et les glissements du sol. Ils sont également utilisés dans les murs de soutènement pour retenir les sols et les pentes, ainsi que dans les ponts et les tunnels pour soutenir les charges de la structure.

Pour fabriquer un tirant en béton armé, on utilise généralement des barres d'acier placées à l'intérieur d'un coffrage en béton. Le béton est ensuite coulé autour des barres d'acier pour former un élément solide et résistant. Les barres d'acier permettent de résister aux forces de tension, tandis que le béton résiste aux forces de compression.

Les avantages des tirants en béton armé sont leur grande résistance et leur durabilité, ce qui les rend idéaux pour les projets nécessitant une force de traction importante. Ils sont également relativement faciles à installer et à entretenir, ce qui en fait un choix populaire pour de nombreuses applications de construction.

### 3 Comportement type d'un tirant en béton armé et diagramme fictif de l'acier :

#### 3.1 Comportement d'un tirant

Le comportement d'un tirant est représenté par une courbe reliant la contrainte normale dans l'acier à la déformation moyenne du tirant. La courbe contrainte déformation est généralement composé de trois phases Figure II.1

- Une phase élastique linéaire, avec un comportement du tirant homogène, le béton et l'acier résistent ensemble pour équilibrer l'effort de traction.
- Une phase développement de la fissuration, qui débute dès l'apparition de la première fissure et prend fin à la stabilisation de la fissuration.
- Une phase de stabilisation de la fissuration, avec un comportement sensiblement linéaire « comportement élastique fissuré ». [31]

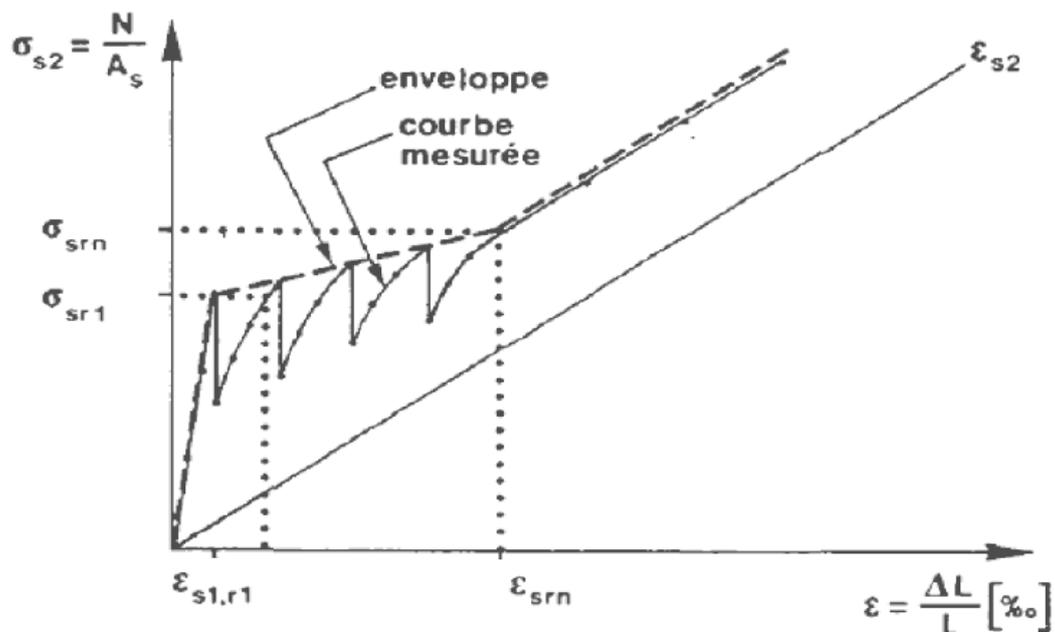


Figure II.1. différentes phases du comportement d'un tirant.

Différentes études existent dans la littérature et les auteurs décrivent le comportement du tirant de la même manière, sauf que l'allure de la courbe représentant le comportement de ces derniers diffère d'un auteur à un autre.

### 3.2 Diagramme fictif de l'acier pour un tirant

La contribution du béton tendu entre la fissuration a la rigidité du tirant, généralement appelée « tension stiffening », est exprimée par la différence entre l'expression de la relation contrainte dans l'acier-déformation correspondante est l'expression de la relation contrainte dans l'acier-déformation moyenne du tirant. Cette dernière représente l'expression du diagramme fictif de l'acier défini par la relation suivant [31]

$$\sigma_s = \frac{N_t}{A_s} = f \left( \frac{\Delta l}{l} \right)$$

Ou

$\sigma_s$ : la Contrainte dans l'acier

$\Delta l$ : allongement total du tirant

$N_t$ : Effort de traction extérieur

$l$ : longueur total du tirant

$A_s$ : section d'acier tendu

### 3.3 Modélisations de lois de comportement d'un tirant

Le comportement du diagramme fictif de l'acier dans un tirant en béton armé est régi par l'expression de  $\Delta \epsilon$ , qui représente la réduction de déformation due au béton tendu entre les fissures (ou la contribution du béton tendu). De nombreuses études ont été menées sur ce sujet et différentes expressions de  $\Delta \epsilon$  ont été proposées.

Ces études visent à modéliser avec précision le comportement de l'acier dans le béton armé, en prenant en compte les effets du béton tendu entre les fissures. Les expressions de  $\Delta \epsilon$  proposées sont basées sur des paramètres tels que la résistance du béton, la résistance de l'acier, la distance entre les fissures et d'autres facteurs influençant le comportement de la liaison.

L'objectif de ces recherches est d'obtenir une formulation appropriée pour  $\Delta \epsilon$  qui permette de prédire avec précision la réduction de déformation dans le béton tendu. Cela est essentiel pour une modélisation précise du comportement global du tirant en béton armé

### 3.3.1 Modèles multilinéaires :

Effectivement, plusieurs auteurs ont proposé des modèles multilinéaires pour décrire le comportement de l'acier dans le béton armé. Ces modèles se composent de plusieurs segments de droite successifs qui approximent la relation contrainte-déformation de la liaison.

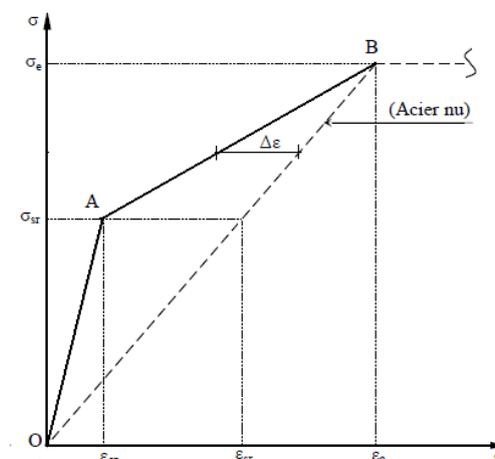
Ces modèles multilinéaires sont souvent basés sur l'idée que le comportement de la liaison acier-béton peut être divisé en différentes phases, notamment la phase élastique, la phase de fissuration et la phase de dégradation. Chaque segment de droite représente une de ces phases, avec des pentes et des points d'intersection spécifiques.

#### 3.3.1.1 Modèle de Rabich

Rabich [32] a proposé un modèle avec une variation linéaire de la contribution du béton tendu  $\Delta\varepsilon$ . Cette loi est un modèle géométrique représentant l'observation grossière des courbes expérimentales entre les points A et B, avec une diminution linéaire de  $\Delta\varepsilon$  jusqu'à atteindre  $\Delta\varepsilon=0$  pour une contrainte dans l'armature égale à la contrainte limite de l'acier. Ce modèle est composé de deux segments de droite, le premier segment joignant les points O et A représenté le tirant en phase I, élastique linéaire, le deuxième représenté par le segment joignant A et B (relation 2.1) représente la phase de comportement fissuré du tirant, comportant les deux phases de formation des fissures et de fissuration stabilisée.

$$\Delta\varepsilon = (\varepsilon_e - \varepsilon) \frac{\varepsilon_{sr} - \varepsilon_{cr}}{\varepsilon_e - \varepsilon_{cr}}$$

Le point A est le point de l'apparition de la première fissure, et le point B coïncide avec le point de coordonnées de la limite élastique ( $\varepsilon_e, \sigma_e$ ) de l'acier.



**Figure II.2.** loi de comportement fictive du tirant selon RABICH

### 3.3.1.2 Modèle d'Espion :

Le modèle d'Espion [37] est composé de trois segments de droite, illustrant le comportement du tirant en béton armé.

Espion a effectué 13 essais mais en déduisant les valeurs de  $\sigma_{cr}$  réelles directement sur les corps d'épreuve. Il a remarqué que les fissures se stabilisaient après un chargement de deux fois  $\sigma_{sr}$  ( $\sigma_{sy} = 2 \cdot \sigma_{sr}$ ). D'après l'auteur, pour des pourcentages supérieurs à 1% le point C (figure II.3) de stabilisation des fissures se situe entre A et B. après fissuration, la variation de la contribution du béton tendu ( $\Delta\varepsilon_{IIa}$ ) a une variation linéaire en phase de formation des fissures, et ( $\Delta\varepsilon_{IIb}$ ) reste constante (relation 2.2). Pour des pourcentages inférieurs à 1%,

Espion préconise l'utilisation de la loi de Rabich [32].

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\varepsilon_{IIa} = (\varepsilon_{sr} - \varepsilon_{cr}) - \frac{(\varepsilon_{sr} - \varepsilon_{cr}) - \Delta\varepsilon_{IIb}}{\varepsilon_s(c)} (\varepsilon - \varepsilon_{sr}) \quad \text{si } \varepsilon_{cr} \leq \varepsilon \leq [\varepsilon_s(c) - \Delta\varepsilon_{IIb}] \\ \Delta\varepsilon_{IIb} = \left(18 + \frac{3.55}{\rho}\right) 10^{-6} \quad \text{si } [\varepsilon_s(c) - \Delta\varepsilon_{IIb}] \leq \varepsilon \leq (\varepsilon_e - \Delta\varepsilon_{IIb}) \end{array} \right.$$

Avec  $\varepsilon_s(c) = \frac{2 \sigma_{sr}}{E_s}$  et  $\rho > 1\%$

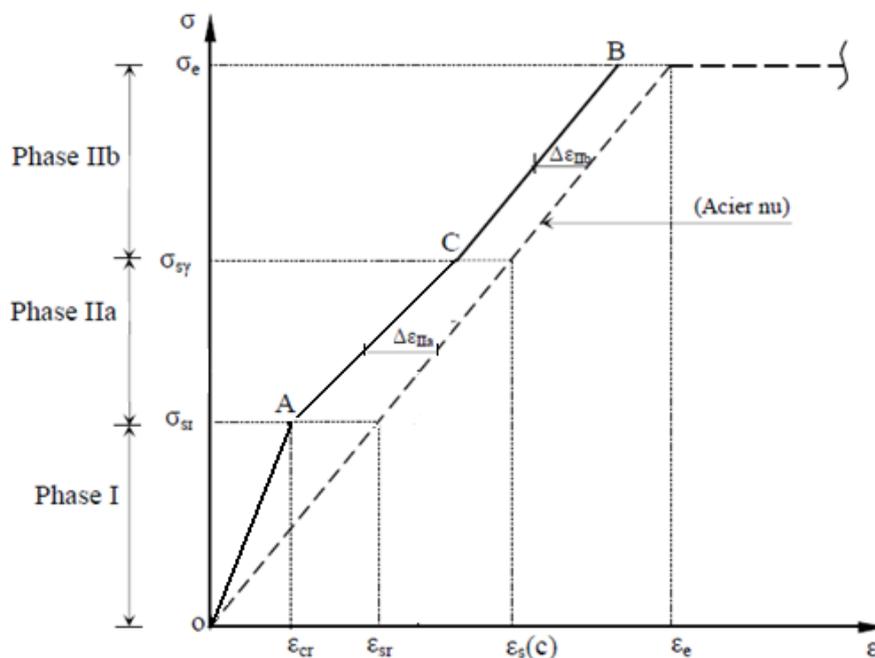


Figure II.3. loi de comportement fictive bilinéaire selon ESPION

### 3.3.1.3 Modèle de Van der Veen

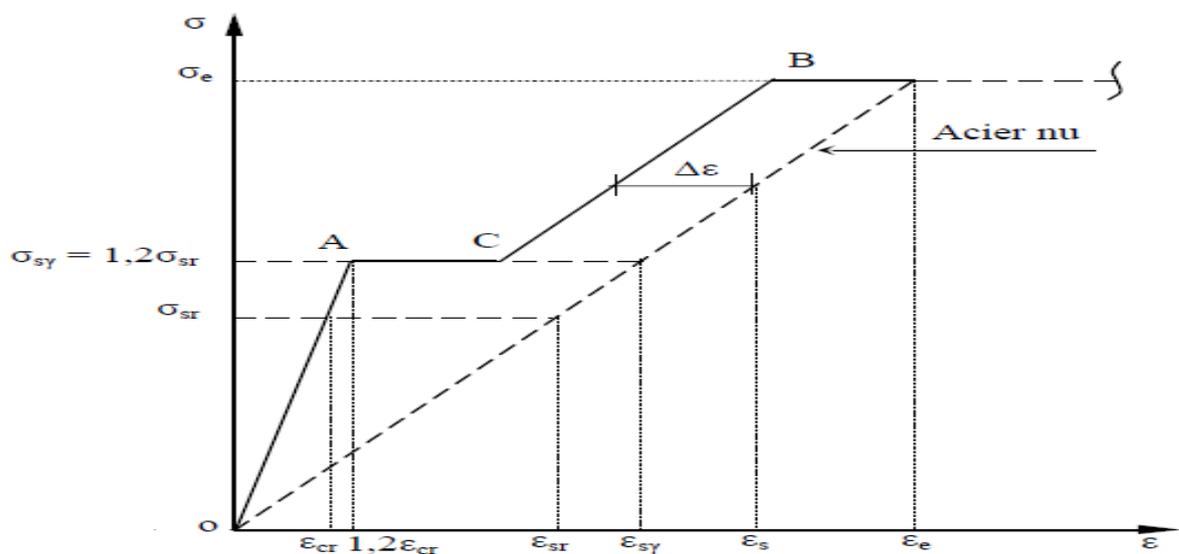
Van der Veen [38] a proposé un modèle multilinéaire plus simplifié, avec un palier horizontal au niveau de la phase de formation des fissures, la phase de la fissuration stabilisée varie linéairement avec une contribution constante du béton tendu (figure II.4).

La contribution du béton tendu est exprimée en fonction de l'exposant  $b$  de la relation d'adhérence ( $\tau = a s^b$ ). La stabilisation de la fissuration a lieu au niveau de la contrainte dans l'acier  $\sigma_{sy} = 1.2 \sigma_{sr}$  et la contribution du béton est donnée par :

$$\Delta\varepsilon = \frac{(1+b)(5+b)}{12} (\varepsilon_{sr} - \varepsilon_{cr})$$

Pour  $b=0.18$  et  $\sigma_{sy} = 1.2 \sigma_{sr}$ , on obtient :

$$\Delta\varepsilon = 0.61(\varepsilon_{sr} - \varepsilon_{cr})$$



**Figure II.4.** loi de comportement fictive de VAN DER VEEN

### 3.3.2 Modèles hyperboliques :

Les modèles hyperboliques sont des lois de comportement avec une variation de  $\Delta\varepsilon$  en raison inverse de  $\sigma_s$ . Ces modèles sont constitués de deux phases, la première décrit le comportement linéaire du tirant en stade I, la phase de formation des fissures est hyperbolique, cependant ces modèles ne définissent pas les différentes phases pour le comportement fissuré du tirant.

Rao [39], en 1976 fut le premier à proposer une loi de variation de  $\Delta\varepsilon$  en raison inverse de  $\sigma_s$ , ce modèle pour des poutres en flexion fut étendu au tirant en béton armé par Rostasy et al [ROS76]. Le CEB-FIP [CEB85], en 1985 a proposé un autre modèle plus simplifié.

### 3.3.2.1 Modèle de Rao et Rostasy

Le modèle proposé par Rao [39] est le premier de ce type valable pour les poutres en flexion simple, l'évolution de la contribution du béton tendu  $\Delta\varepsilon$  est en raison inverse avec la contrainte de l'acier  $\sigma_s$  (figure II.5).

Ce modèle, valable pour les poutres sollicitées en flexion, fut étendu au tirant en béton armé par Rostasy [40]. Ces derniers proposèrent l'expression suivante

$$\Delta\varepsilon = \frac{\sigma^2(1+n\rho)}{\rho^2 E_s \sigma_s}$$

### 3.3.2.2 Modèle hyperbolique du CEB

Cette loi retenue dans le manuel "Fissuration et Déformation" du CEB [41], propose de considérer la déformation relative du tirant comme suit :

$$\varepsilon = \varepsilon_{sr} - \Delta\varepsilon$$

$$\Delta\varepsilon = (\varepsilon_{sr} - \varepsilon_{cr}) \frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s}$$

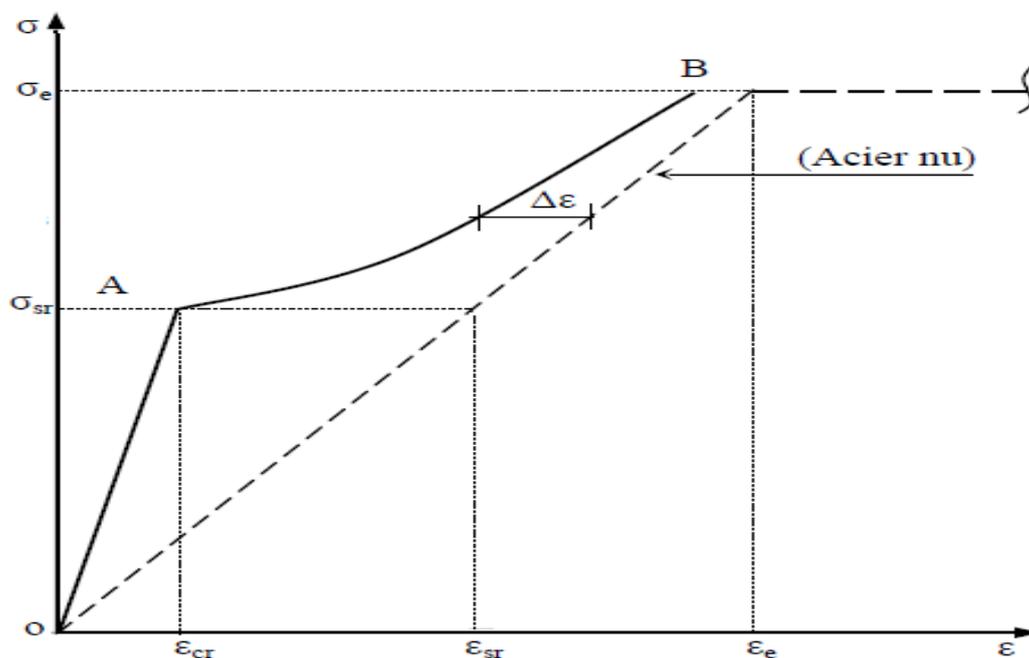


Figure II.5. loi comportement fictive selon [39], [40] et [41]

## **4 Méthodologie de détermination de la réponse de l'acier dans le béton**

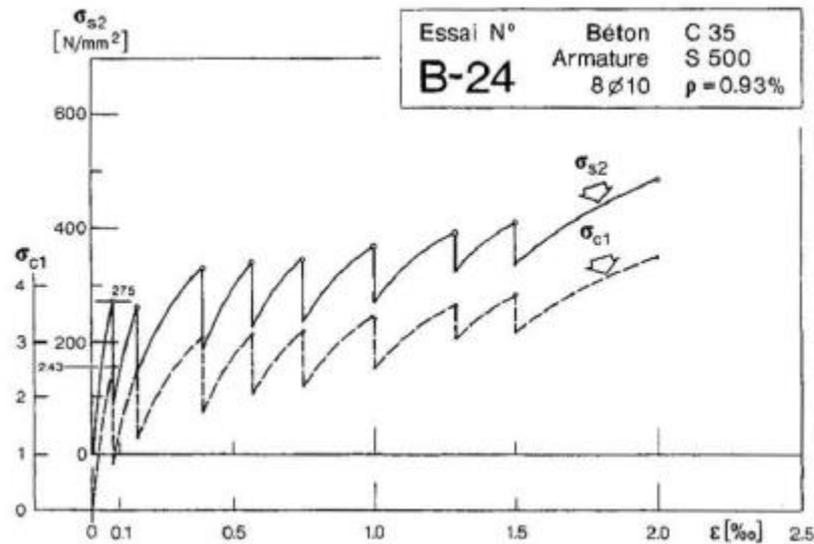
Le tirant est effectivement l'un des moyens les plus utilisés pour étudier le comportement des membrures tendues de pièces en béton armé, en particulier pour étudier les caractéristiques spécifiques de la fissuration dans le béton armé. Cela inclut la distribution, le nombre, l'espacement et l'ouverture des fissures, ainsi que la redistribution des contraintes résultant de l'évolution de la liaison acier-béton.

Les tirants permettent de soumettre une pièce de béton armé à une charge de traction et d'observer directement les effets de la contrainte sur le comportement du matériau, y compris la formation et l'évolution des fissures. Les résultats obtenus à partir de ces tests fournissent des informations précieuses sur la performance de la liaison acier-béton et permettent de mieux comprendre les mécanismes de la fissuration dans les éléments en béton armé.

De plus, les tests sur tirants offrent une méthode relativement simple et économique pour évaluer la résistance et la déformation du béton armé, ainsi que pour étudier les propriétés de la liaison acier-béton. Cela en fait un outil couramment utilisé dans la recherche et la pratique de l'ingénierie en béton armé.

## **5 Essais sur les tirants**

Les essais de tirant sont réalisés en utilisant une éprouvette cylindrique ou prismatique dans laquelle une barre d'acier (lisse ou crantée) est placée au centre du corps en béton. Les forces de traction sont ensuite appliquées aux deux extrémités de la barre. L'objectif de cet essai est de transférer les efforts de traction de la barre d'acier vers le béton en utilisant l'interface entre les deux matériaux. Cette interface, qui peut être améliorée par des méthodes d'adhérence telles que le crantage de la barre, permet de tester la capacité du béton à résister à la traction et de mesurer la résistance de l'assemblage acier-béton.[31]



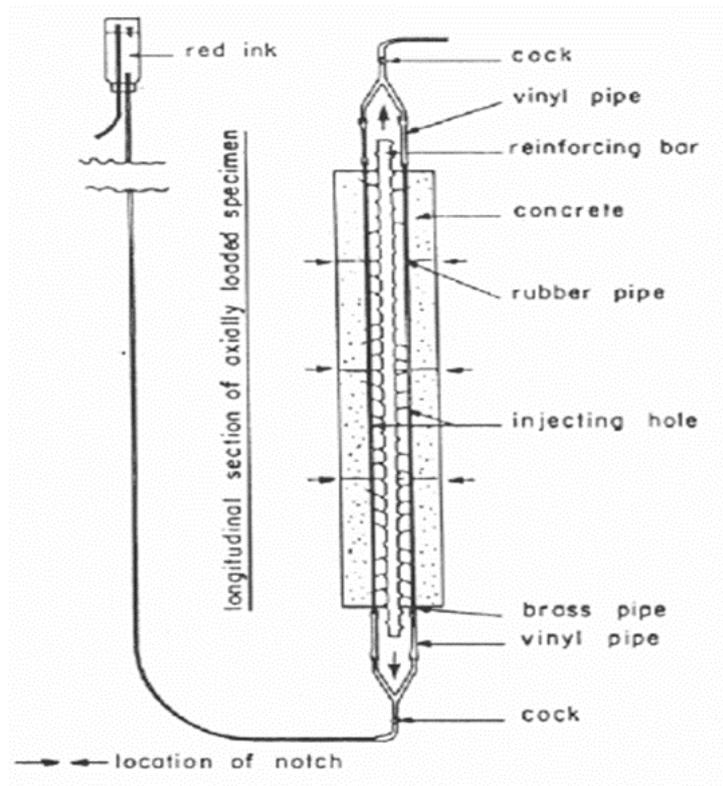
**Figure II.6.** comportement global réel d'un tirant en béton armée(FARRA)

Dans le cas de l'essai de tirant classique, il est observé que la fissuration est détectée lorsque celle-ci devient visible en surface, à un stade avancé du comportement de l'interface entre l'acier et le béton. Lors des essais contrôlés par un déplacement imposé, chaque apparition de fissure entraîne une diminution de la force normale dans le tirant. En d'autres termes, chaque fois qu'une fissure se forme, la résistance de l'assemblage acier-béton diminue, ce qui se traduit par une diminution de la force exercée sur le tirant. Cela permet de détecter et d'évaluer l'évolution des fissures tout au long de l'essai, fournissant ainsi des informations sur le comportement et la résistance de l'interface entre l'acier et le béton. (Figure II.6)

### 5.1 Essai de tirant de Goto [36]

Cette campagne d'essai consiste à étudier l'état de fissuration par l'injection d'encre dans l'éprouvette pendant le chargement. Goto a utilisé des éprouvettes de section transversale 100 mm × 100 mm et une longueur de 1 m. Une barre ronde crantée de 19 mm de diamètre a été placée au milieu. Les deux extrémités de la barre d'acier ont été soumises aux efforts de traction jusqu'à un chargement maximal dont la valeur se rapproche du seuil de résistance de l'acier. Deux conduits ont été placés parallèlement à l'axe de la barre d'acier pour injecter de l'encre dans les fissures.

Après le déchargement, le spécimen a été scié longitudinalement afin d'examiner la distribution des fissures internes (figure II.7).



**Figure II.7.** Dispositif de l'essai de Goto

Durant le chargement, la fissuration initiale consiste en un réseau de fissures radiales qui se propagent vers la surface du béton avec une inclinaison moyenne d'environ  $60^\circ$  (figure II.9). La coalescence de ces fissures va former ensuite des fissures transversales nommées "fissures primaires" qui divisent l'éprouvette en quelques petits tirants de 25 cm (voir la figure II.8). Avec l'augmentation du chargement, aucune nouvelle fissure primaire n'apparaît. Pendant cette période, l'interaction mécanique entre le béton et l'acier, qui est assurée par l'action des nervures, entraîne une formation de fissures internes autour de la barre. Plus le chargement augmente, plus les fissures internes se développent. L'interaction mécanique peut, à l'autre côté, provoquer des contraintes de traction circonférentielles qui contribuent à la création de fissures longitudinales par l'endommagement en traction du béton.

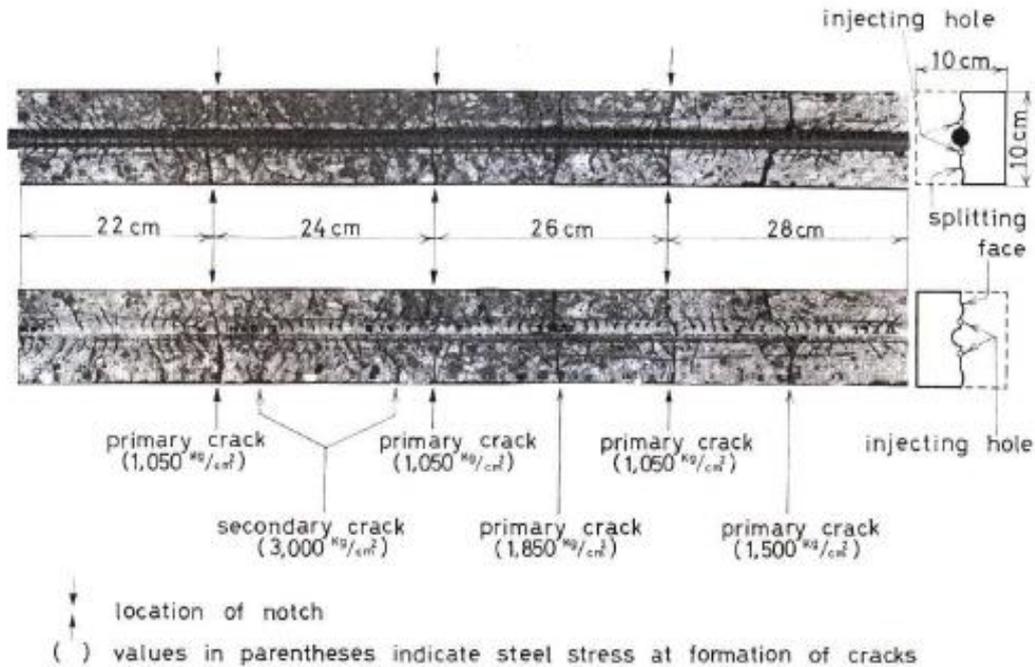


Figure II.8. Section longitudinale d'un tirant fissuré

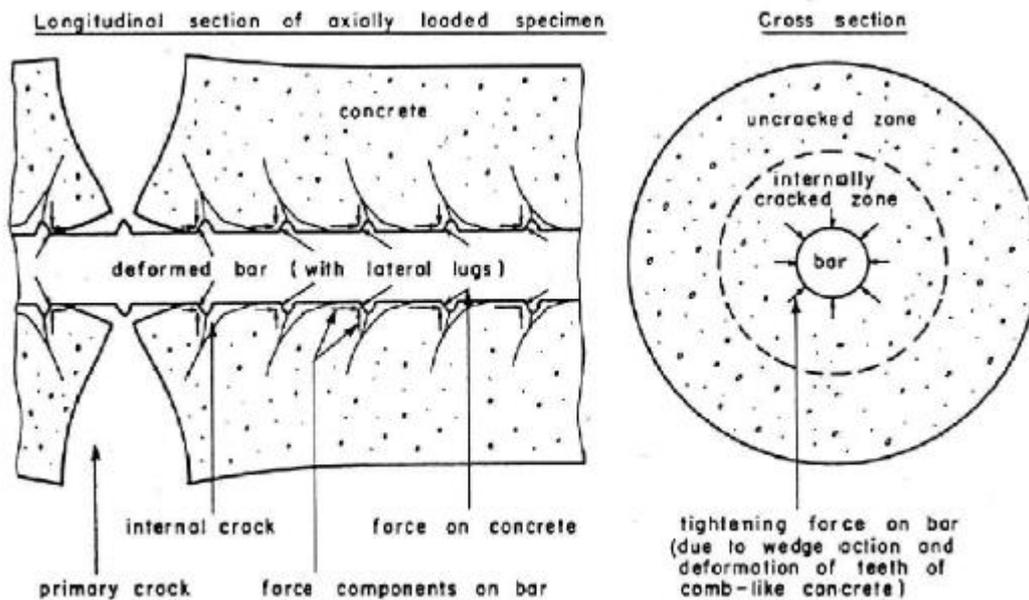


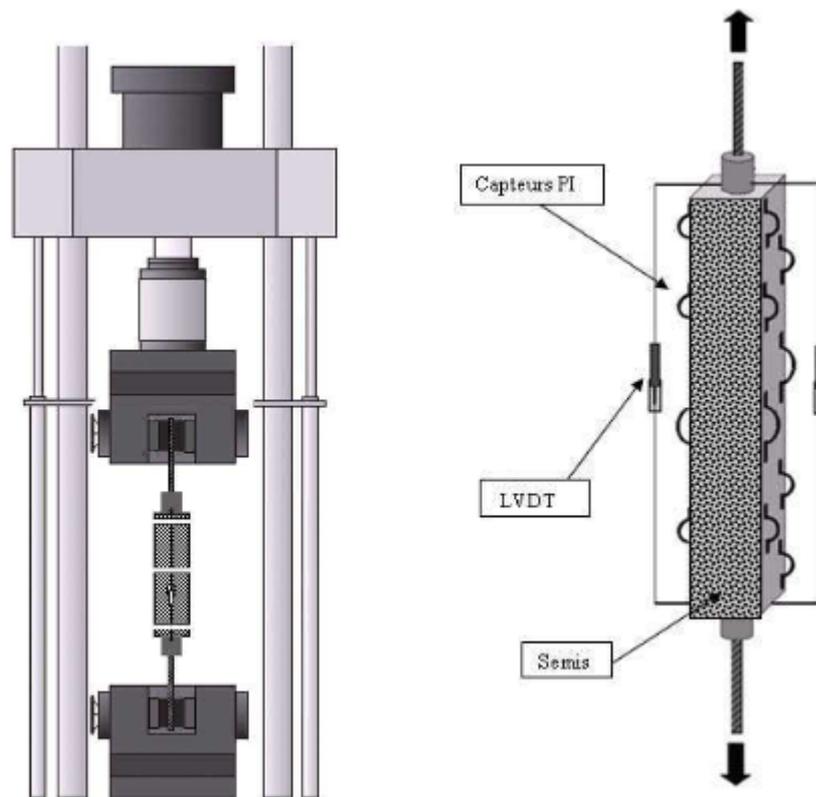
Figure II.9. Réseau de fissures internes

## 5.2 Essai de tirant de Desmettre (DESMETTRE, 2011)

Ces essais ont été réalisés dans le cadre de la thèse de Desmettre [33], au sein de l'EPM (Ecole Polytechnique de Montréal - Canada). Ils ont eu pour objectif principal d'étudier les couplages entre la fissuration et le transfert de fluide (eau) au travers des fissures. Nous nous intéressons

ici à la partie caractérisation mécanique en traction des tirants de l'étude. Ces essais sont intéressants car ils nous permettent d'obtenir les informations sur la mesure de la fissuration (nombre, ouverture, espacement de fissures).

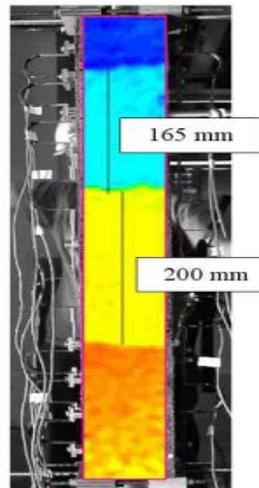
L'éprouvette est d'un tirant prismatique en béton avec une section transversale de 90 mm × 90 mm et une longueur de 760 mm, ce tirant est armé par un acier rond haute adhérence de 11,3 mm (norme canadienne). Les caractéristiques du béton étaient : la résistance à la compression  $f_c = 36,7$  MPa, la résistance à la traction  $f_t = 2,1$  MPa, le module d'Young  $E_c = 32$  GPa. (Figure II.10)



**Figure II.10.** Montage de l'essai de tirant et instrumentation caractéristique

Dans ces essais, les auteurs ont apporté un soin particulier à l'entrée de charge dans l'éprouvette. Un système de plaques d'about et de manchons permet de bien diffuser les contraintes dans l'éprouvette et favorise ainsi une multi fissuration du béton. Un soin tout aussi important a été porté à la mesure, notamment celle permettant la caractérisation de la fissuration. L'éprouvette est recouverte de capteurs Pi permettant de mesurer l'évolution des ouvertures de fissures (figure II.10). Les capteurs de déplacement LVDT ont été placés sur deux faces opposées du tirant.

L'acier dans ces essais est chargé jusqu'à la plasticité. On peut donc obtenir la rupture de l'éprouvette par fissuration externe du béton. Trois fissures dans chaque éprouvette ont été constatées (figure II.11). La création des fissures a eu lieu, pour toutes éprouvettes, à des efforts similaires, dans une plage d'efforts de 25 à 40 kN. Ce qui montre la bonne répétabilité de l'essai. Les fissures sont de l'ordre 0.4 mm avant la plastification de l'acier.

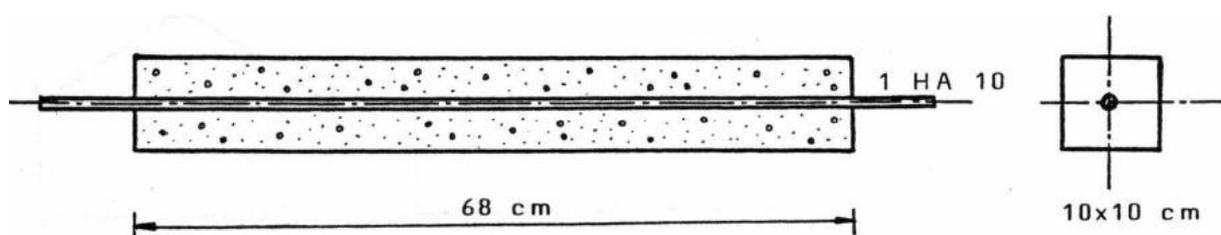


**Figure II.11.** Espacement des fissures- champ de déplacement obtenu par analyse par corrélation d'image, essai de tirant de desmettre

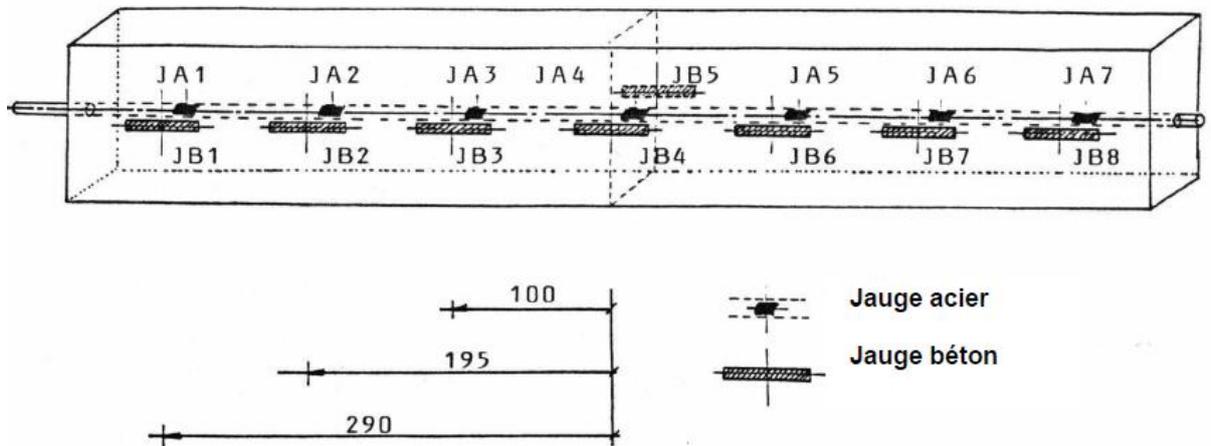
### 5.3 Essai de tirant de clément (1987)

Dans le cadre des travaux de thèse, clément [34] a réalisé un essai de tirant prismatique en micro-béton de dimension  $10 \times 10 \times 68$  cm (figure II.12) armé d'un acier de haute adhérence de 10 mm de diamètre. Pour suivre les répartitions des déformations le long de tirant, clément avait collé sept jauges de déformation sur l'acier, recouverte d'un produit de protection, et sept jauges dans le béton après coulage, positionné vis-à-vis des jauges acier (figure II.13)

Les essais de tirant ont été effectués à déplacement imposé monotone en position horizontale. L'objectif de ces tests effectués, été d'obtenir la rupture du spécimen par fissuration externe de béton, tout en restant dans le domaine élastique de l'acier.



**Figure II.12.** caractéristique géométrique du tirant de clément

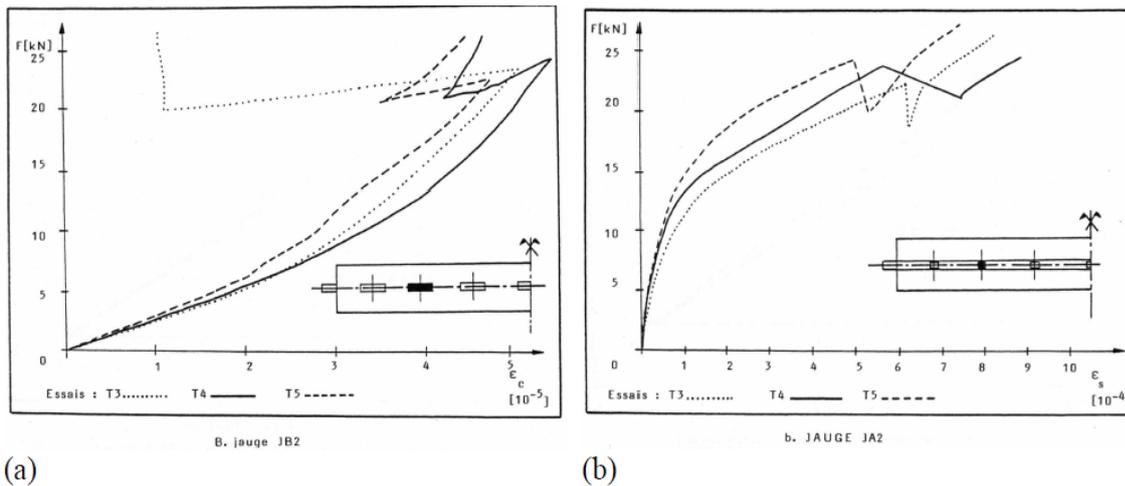


**Figure II.13.** distribution des jauges dans le tirant de Clément

Les données recueillies indiquent que le comportement du tirant est globalement symétrique avant l'apparition de la première fissure. Les jauges placées le long du tirant montrent que le béton est intact et qu'il n'y a pas de dégradation de la liaison dans la zone centrale du tirant. Cependant, un comportement non linéaire de l'interface est observé sur un quart de la longueur du tirant, ce qui indique une dégradation de la liaison.

Clément a identifié quatre phases distinctes dans le comportement du tirant (figure II.14) :

- Une première phase quasi linéaire : Durant cette phase, le tirant présente un comportement presque linéaire en termes d'effort et de déformation.
- Une deuxième phase non linéaire : Cette phase est caractérisée par une perte de rigidité du tirant due à la dégradation locale de la liaison acier-béton. Cela se traduit par une non-linéarité dans la relation contrainte-déformation.
- Une troisième phase avec une brusque chute d'effort : Durant cette phase, on observe une diminution abrupte de l'effort exercé sur le tirant, passant d'une valeur maximale à une valeur plus faible. Cela correspond à l'apparition de la fissure dans la structure.
- Une dernière phase quasi-linéaire du tirant fissuré : Après l'apparition de la fissure, le comportement du tirant devient quasi-linéaire, similaire à celui d'une barre seule soumise à la traction. Cependant, il est important de noter que les données recueillies ne permettent pas d'observer le comportement du tirant à la stabilisation des fissures, car le test a été arrêté après l'apparition de la première fissure.



**Figure II.14.** Courbes expérimental force-déformation : (a) avec jauges « béton » (b) avec jauge « acier »

#### 5.4 Essai tirant de Daoud [35]

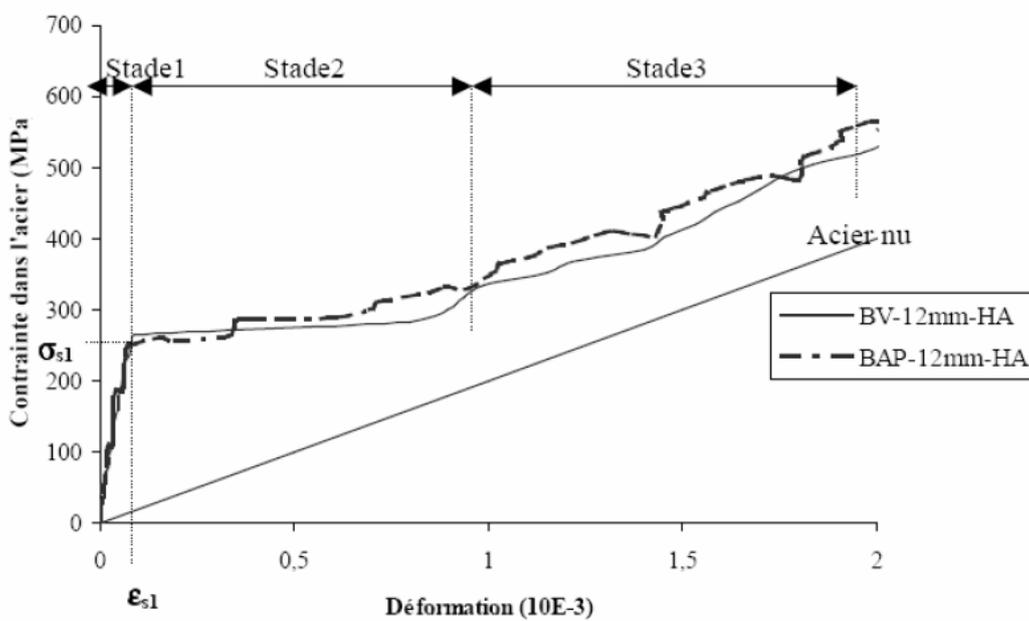
Dans une étude réalisée par Daoud [35], l'objectif principal était d'étudier le comportement de la liaison acier-béton en utilisant du béton auto-plaçant (BAP) par rapport au béton vibré (BO), en se concentrant particulièrement sur les effets de la liaison sur la fissuration. Des essais ont été réalisés sur des tirants prismatiques de dimensions  $10 \times 10 \times 100$  cm, comportant une barre d'acier placée au milieu, soit lisse, soit nervurée, avec des diamètres de 12, 16 et 20 mm. Dans cette étude, la résistance à la compression du BAP était de  $FC=42$  MPa, tandis que celle du BO était de  $FC=45$  MPa. Daoud a examiné plusieurs paramètres, tels que l'effet de la rugosité et des dimensions des barres, le type de béton utilisé, le processus de coulage, etc. De plus, en faisant varier les dimensions des barres tout en conservant la même section de béton, il a été possible d'étudier l'effet du pourcentage d'acier.

Cependant, il convient de noter que la vitesse de déformation et l'aire relative des nervures n'ont pas été fournies dans cette étude. Ces paramètres auraient pu apporter des informations supplémentaires sur le comportement de la liaison acier-béton.

Les résultats des tests effectués ont démontré qu'il n'y avait aucune influence significative du type de béton (BAP ou BO) sur la fissuration observée. Cela suggère que, dans le contexte de cette étude, l'utilisation de BAP au lieu de BO n'a pas entraîné de différences majeures en termes de comportement de fissuration dans la liaison acier-béton.



**Figure II.15.** Tirants réalisés par Daoud avec différents diamètres et différents type du béton.  
[35]



**Figure II.16.** Courbes contrainte/déformation sur l'acier d'après Daoud

## 6 Courbes ( $\tau - g$ ) entre acier et béton adoptées par le Comité Européen du Béton :

Le Comité Européen du Béton [27] a adopté les relations contraintes-glissements 1, 2, 3 et 4 entre l'acier et le béton. Ces courbes (Figure II.17) sont dérivées de barres d'acier normalisées recouvert d'essais d'arrachement du béton.

$$\tau = \tau_1 \left( \frac{g}{g_1} \right)^\alpha \quad \text{Si} \quad 0 \leq g \leq g_1 \quad (1)$$

$$\tau = \tau_1 \quad \text{Si} \quad g_1 \leq g \leq g_2 \quad (2) \quad \text{II.1}$$

$$\tau = \tau_1 - (\tau_1 - \tau_r) \left( \frac{g-g_2}{g_3-g_2} \right) \quad \text{Si} \quad g_2 \leq g \leq g_3 \quad (3)$$

$$\tau = \tau_r \quad \text{Si} \quad g \geq g_3 \quad (4)$$

La valeur de  $\alpha$  est comprise entre 0,25 et 0,40 selon le confinement du béton, et celle de pic d'adhérence  $\tau_1$  est prise égale, relation II.2

$$\tau_1 = \alpha \sqrt{f_{ck}} \quad \text{II.2}$$

Avec  $\alpha=2,5$  pour un béton confiné, sinon  $\alpha=2$ .

La contrainte normal limite de compression du béton, mesure sur cylindre a 28jours,  $f_{ck}$  est exprimée en MPA. La valeur de la contrainte résiduelle  $\tau_r$  est pris égale à  $0,20\tau_1$ .

Si la courbe modélisée (Figure II.17) des différentes phases semble assez représentative, les intervalles de variation des différents glissements ( $g_1$ ,  $g_2$  et  $g_3$ ) sont plus proches de ceux donnés par Eligehausen [28].

Ces résultats (courbes jusqu'à épuisement de l'adhérence) ne sont possibles que si le pourcentage d'acier dans le béton est très faible, généralement inférieure au ratio minimum autorisé par les différentes réglementations à travers le monde. Pour les cas courants [29,30], seule la première courbe Figure II.17 (relation II.1) est effective

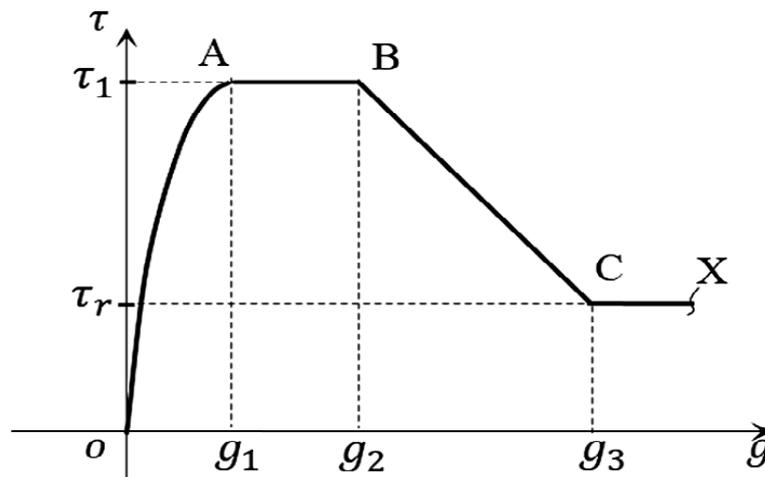


Figure II.17. courbe  $\tau$ - $g$  adoptées par le CEB

## 7 Conclusions

En conclusion, l'étude du comportement des tirants en béton armé et de la loi d'adhérence entre l'acier et le béton revêt une importance capitale dans le domaine de l'ingénierie civile. Grâce à notre exploration approfondie, nous avons pu comprendre les mécanismes complexes qui régissent le fonctionnement des tirants.

Nous avons examiné divers exemples de tirants utilisés dans des ouvrages réels, ce qui nous a permis de mettre en évidence les différentes défaillances possibles et les facteurs qui influencent leur résistance et leur capacité portante.

Nous avons également abordé en détail la loi d'adhérence entre l'acier et le béton, qui constitue un élément clé de la performance des tirants en béton armé. Cette loi d'adhérence a été étudiée à travers les principes théoriques ainsi que les méthodes de calcul et de conception utilisées dans la pratique.

Cependant, malgré les progrès réalisés dans notre compréhension des tirants en béton armé, il reste encore des défis et des opportunités de recherche à explorer.

En conclusion, ce chapitre nous a permis de développer une compréhension approfondie du comportement des tirants en béton armé et de la loi d'adhérence entre l'acier et le béton. En mettant en évidence les concepts théoriques et des exemples pratiques.

## 1 Introduction

La simulation et l'analyse numérique sont devenues presque incontournables dans l'étude du comportement des ouvrages de génie civil à l'échelle réelle en raison de leur impact direct sur la qualité et les délais de réalisation. Ils espèrent minimiser le coût de la recherche expérimentale en optimisant le nombre d'essais.

Par conséquent, dans ce chapitre, nous allons d'abord présenter le logiciel ABAQUS et son fonctionnement, puis décrire les différentes étapes impliquées dans la modélisation d'un tirant en béton armé. Le modèle géométrique du maillage et la sélection du modèle éléments finis sont générés dans l'espace tridimensionnel (3D), en tenant compte du comportement expérimental des matériaux constitutifs. L'interaction entre les différents éléments et les phases d'assemblage et de chargement de tirant sont également présentées.

## 2 Simulation avec ABAQUS

Avant d'utiliser le code de calcul de manière opérationnelle, il est essentiel d'explorer ses capacités et surtout ses limites à travers des tutoriaux qui sont à sa disposition. ABAQUS est un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes mécaniques, il est développé dans le but de simuler des phénomènes physiques. La modélisation de ces phénomènes permet de simuler correctement le comportement expérimental des matériaux et de varier certains paramètres (géométriques, rhéologiques...) afin d'en optimiser leur conception.

### 2.1 Présentation de logiciel Abaqus

Abaqus est un logiciel de simulation numérique créé par la société française DASSAULT SYSTEME. Fondé en 1978, ABAQUS, est l'un des premiers fournisseurs mondiaux de logiciels. Il est principalement utilisé pour la modélisation et l'analyse des structures mécanique et des phénomènes physiques complexe.

Ce logiciel est une solution de simulation évolutive et composé de solution d'analyse unifié, il peut simuler n'importe quelle géométrie telles que : poutres, plaques, coques et éléments spéciaux (ressorts, masses...) en deux dimensions ou en trois dimensions. (Figure III.1). ABAQUS ne gère pas les unités ; c'est à l'utilisateur d'utiliser un système d'unités cohérent [36], tel que montré sur le Tableau III.1.

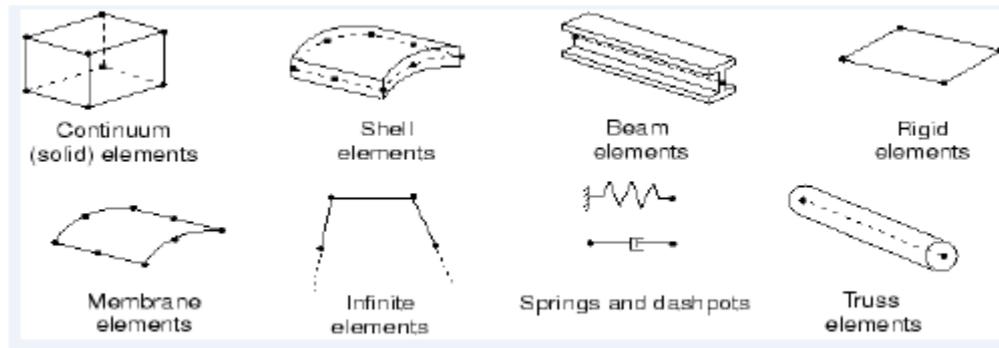


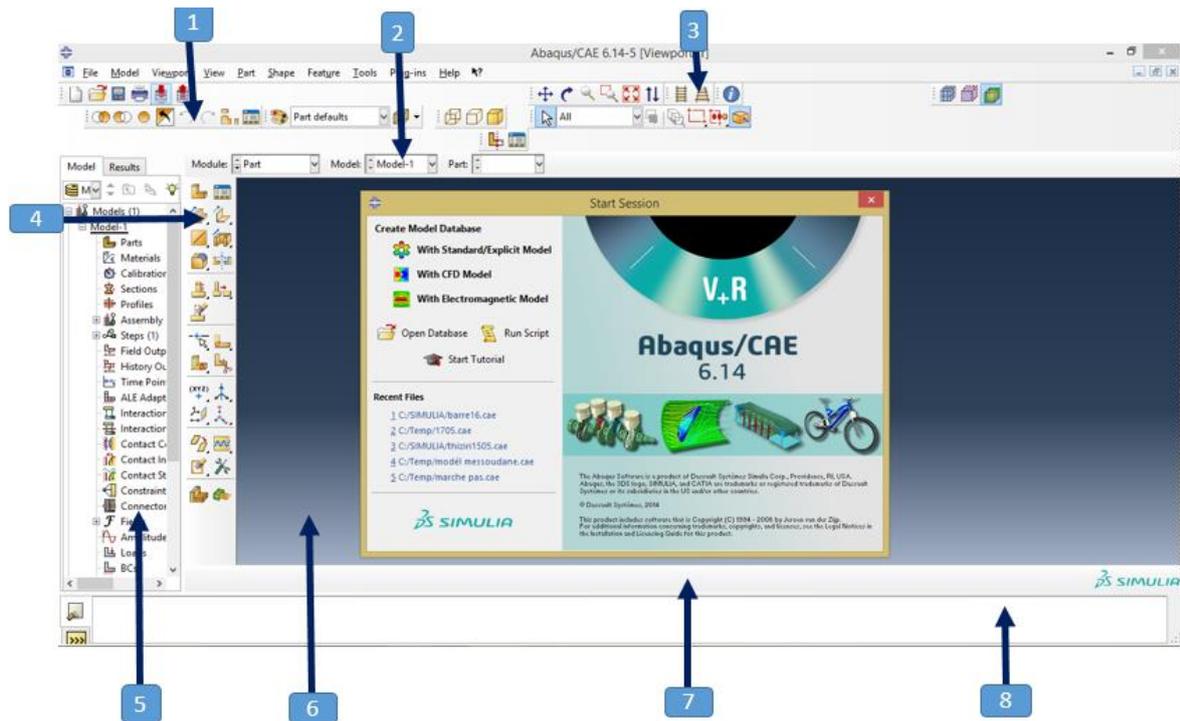
Figure III.1 Quelques formes complexes possibles à programmer sur ABAQUS

Tableau III.1. Tableau des unités correspondant à ABAQUS.

Quantité	SI	SI (mm)	US Unit(Ft)
Longueur	m	mm	$\eta$
Force	N	N	Ibf
Masse	Kg	Tonne	Slug
Temps	S	S	S
Contrainte	Pa (N/m <sup>2</sup> )	MPa	Ibf/ $\eta^2$
Energie	J	mJ	$\eta$ Ibf
Masse volumique	Kg/m <sup>3</sup>	Tonne/mm <sup>3</sup>	Slug/ $\eta^3$

## 2.2 Bases de l'interface d'ABAQUS/CAE (Complete ABAQUS Environnement)

**ABAQUS/CAE :** Une interface idéale pour la modélisation, la gestion et le post traitement des modèles dans laquelle l'utilisateur peut effectuer la totalité de la mise en donnée.



**Figure III.2.** : Présentation de l'interface ABAQUS

1- L'espace juste sous la fenêtre d'affichage graphique correspond aux messages affichés par ABAQUS lors de la modélisation ; ils permettent d'être mieux guidés dans les actions entreprises.

2. Barre horizontale d'outil, y sont disposées les icônes correspondant aux commandes les plus courantes.

3. Fenêtre d'affichage graphique.

4. Barre de menu en haut, ces menus sont relatifs au module correspondant.

5. Une troisième barre de menus déroulant permettant d'accéder aux autres modules, ou de sélectionner le modèle ou la pièce sur lesquels on souhaite travailler.

6. arbre du modèle et résultats.

7. une fenêtre en dessous sur fond blanc est utilisée pour afficher des messages informatifs : réponses à des questions posées, avertissements liés à des problèmes rencontrés, etc.

8. On dispose à gauche d'une colonne d'icône permettant d'accéder aux outils disponibles à l'intérieur du module dans lequel on se trouve

## 2.3 Définition du modèle à simuler

Notre objectif consiste à proposer et valider un modèle élément fini capable de prédire la réponse ultime d'un tirant en béton armé sous traction axiale [31]. L'objectif principal consiste à mieux comprendre les mécanismes de rupture et obtenir des résultats fiables concernant la résistance et la déformation du tirant.

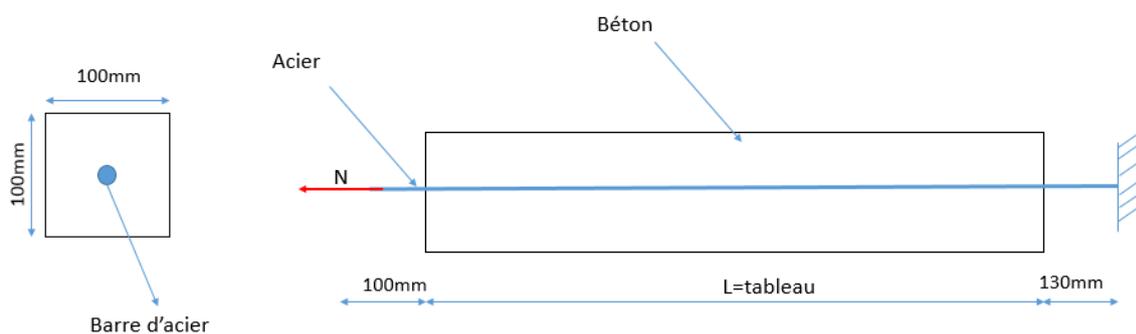
### 2.3.1 Dimensionnement et géométrie du tirant modélisé

Dans le cadre de ce travail, un tirant réel en béton armé, soumis à un chargement axial a été simulé. Le tirant modélisé illustré sur la figure III.3, présente les caractéristiques suivantes :

- Section transversale du béton 100\*100mm<sup>2</sup>

**Tableau III.2.** Caractéristiques du tirant.

Diamètre de la barre(mm)	Longueur de béton (mm)	Longueur de barre d'acier (mm)
<b>HA12</b>	400	730
	500	
	600	
<b>HA16</b>	400	730
	500	
	600	



**Figure III.3.** Dimensionnement et géométrie de tirant en béton armé en (mm).

### 2.3.2 Présentation des étapes suivies dans la simulation

Le logiciel est divisé en modules indépendants les uns des autres, à savoir : le module Part ; Module Property ; Assembly ; Step; Interaction ; Load ; Mesh ; Job et Visualisation.

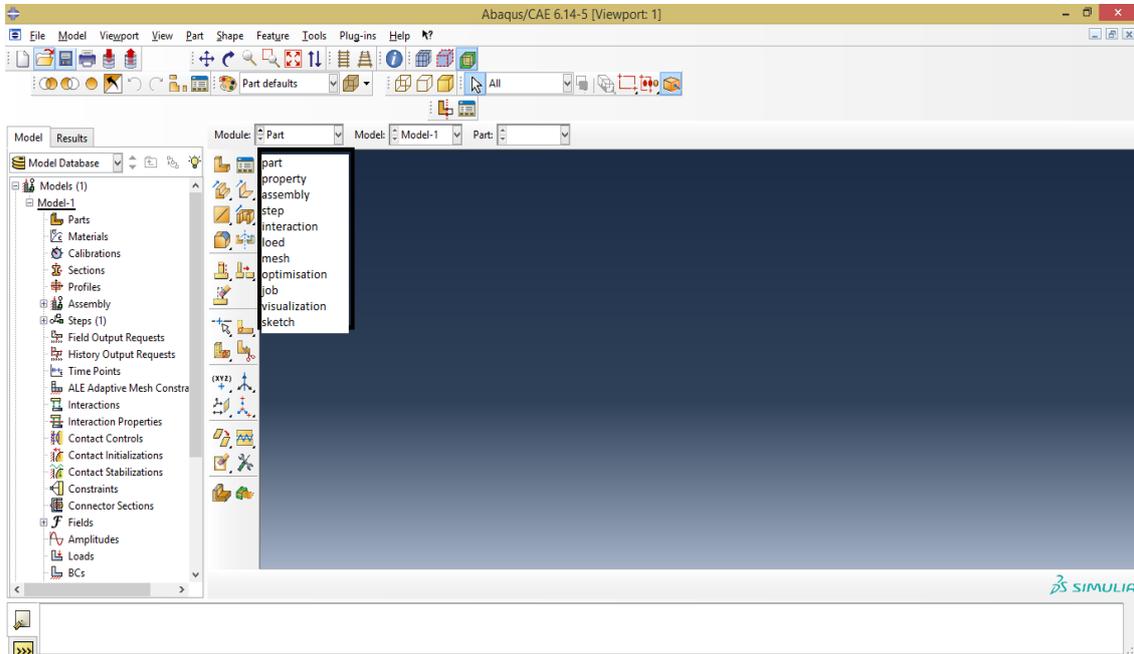


Figure III.4. Les modules du logiciel.

#### La géométrie des éléments (module part) :

Dessiner le modèle :

Dans cette première étape, tous les éléments de tirant sont créés grâce aux outils du module « Part ».

Pour créer la géométrie de tirant on va suivre les étapes suivantes :

Le béton on l'a créé avec un modèle 3D, on utilisant «deformable, solid, Extrusion »

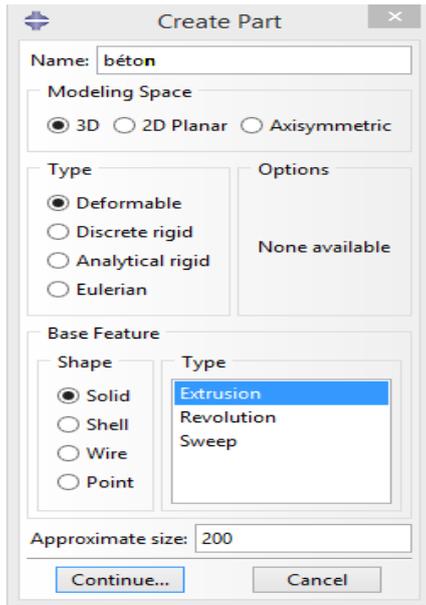


Figure III.5 création de l'élément béton

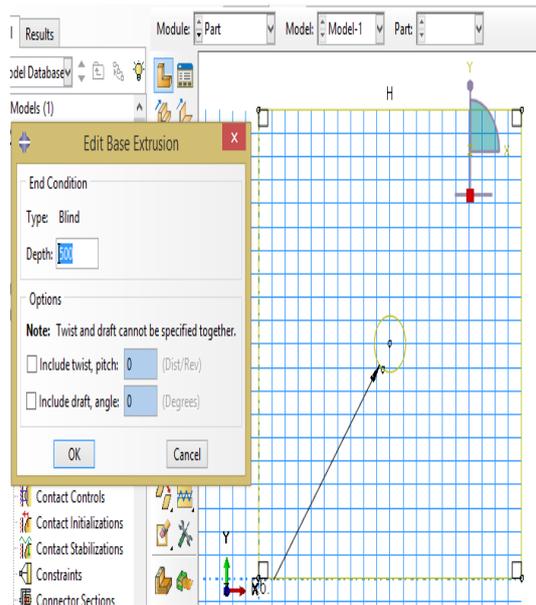


Figure III.6. Création de la géométrie du béton

Ensuite nous avons dessiné avec « creat lignes » un carré de dimension (100,100) mm, au milieu de ce dernier on va crée un cercle de diamètre 12mm pour un HA12 → DONE

On obtient le modèle suivant :

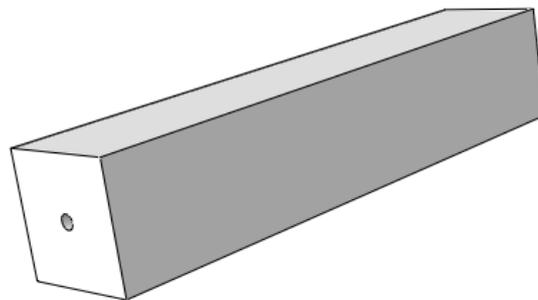


Figure III.7.élément béton obtenu.

- La barre d'armature longitudinale a été créée par un modèle 3D déformable, solid, extrusion On obtient le modèle suivant :

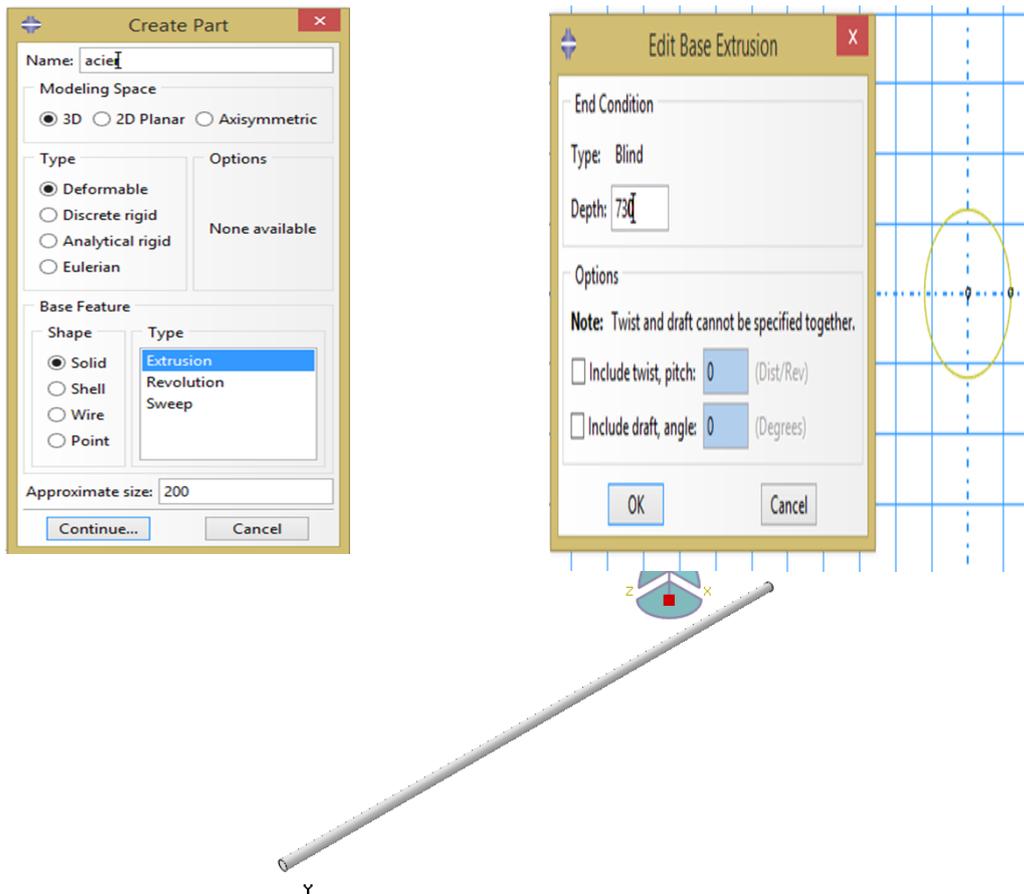
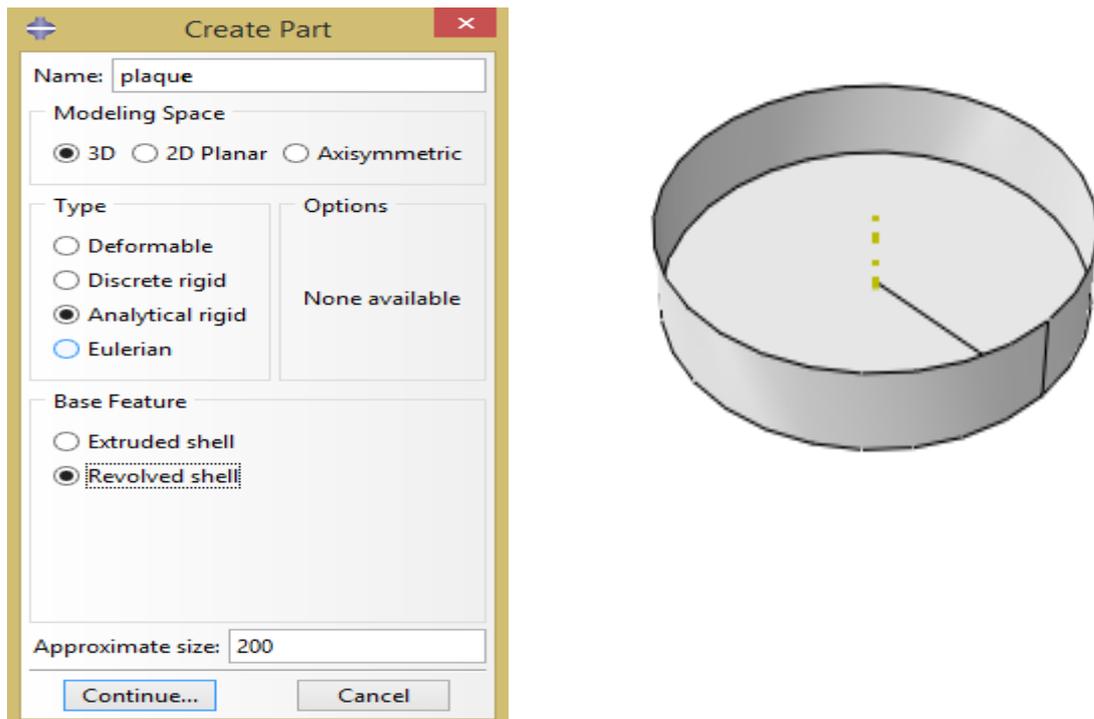


Figure III.8. creation de la géométrie de la barre

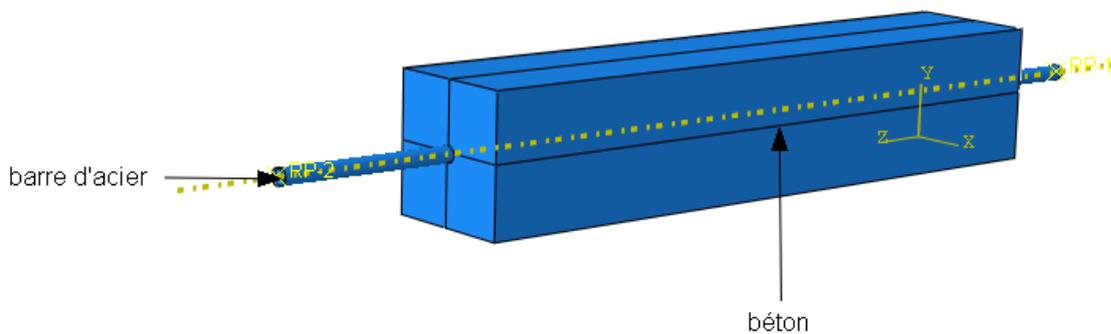
- Les deux plaques rigides qui assure la transmission des charges axial sont créé avec un modèle de 3D analytique rigide → « shel révolution » ensuite dessinée avec « creatlignes » et dimensionnée

On obtient la figure suivante :



**Figure III.9.** Création de la plaque rigide pour transmettre les charges axiale et verticale

On obtient ce modèle de tirant suivant :



**Figure III.10.** Élément tirant obtenue.

### **Propriétés des matériaux (Module Property)**

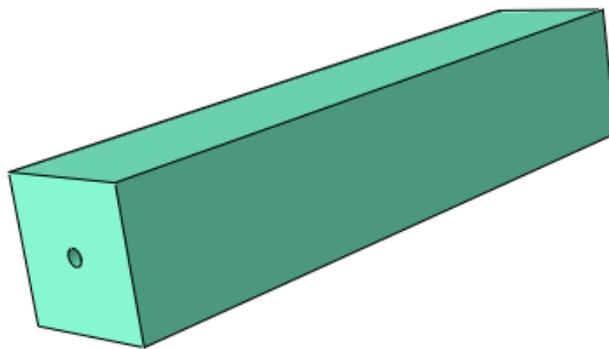
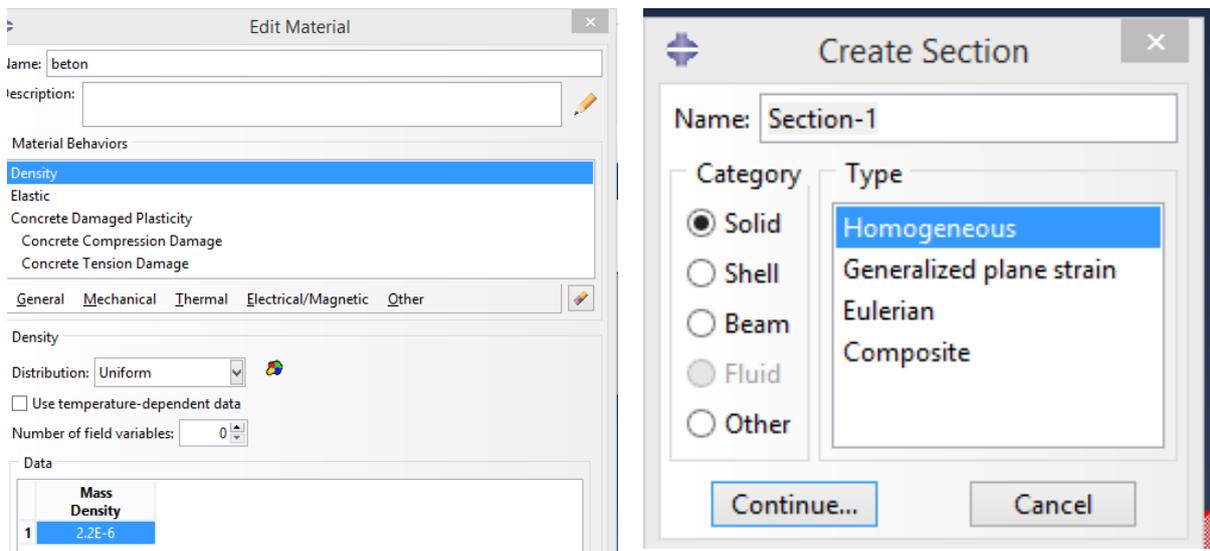
Ce module est important dans la modalisation numérique, c'est-à-dire, élaborer toutes ses propriétés intrinsèques de chaque matériau. Pour notre travail on a utilisé deux modèles numériques intégrés dans ABAQUS pour le béton, acier.

Le béton : comportement élasto-plastique endommageable ;

L'acier : comportement élasto-plastique avec écrouissage cinématique et isotrope ;

- Créé le matériau 
- Créé les sections sur lesquelles appliquer ces matériaux 
- Affecter (assimiler) les matériaux aux sections correspondantes 

Création matériau béton :



**Figure III.11.** Création des propriétés de matériau béton

Création matériau acier :

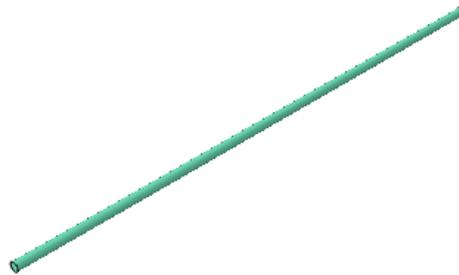
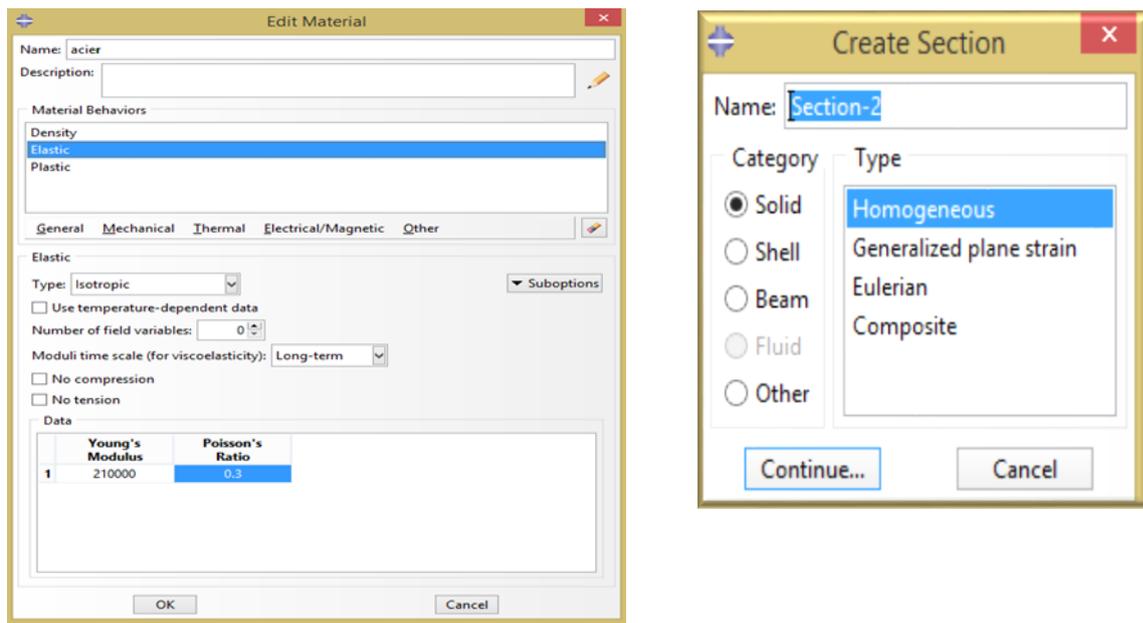


Figure III.12. Création des propriétés de matériau acier

### Assemblage du modèle (module assembly)

Dans ce modèle on rassemble toutes les pièces géométriques avec « Creat instance », on peut répéter chaque part crée plusieurs fois et lui faire des translations et rotations s'il est nécessaire jusqu' à voir notre modèle.

- On commence par assemblage acier-béton
- Puis assemblage de barre d'acier avec la plaque rigide

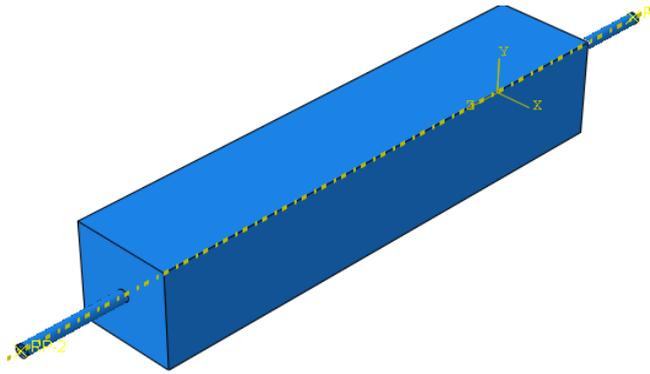


Figure III.13. assemblage acier béton

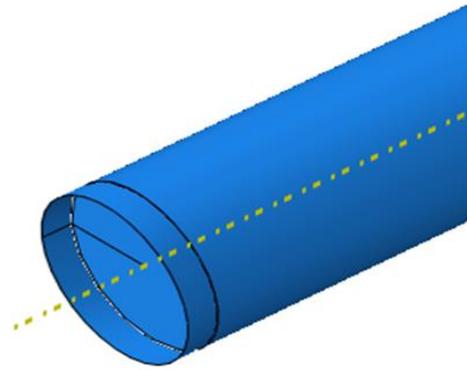


Figure III.14. Assemblage acier plaque rigide

### Module Steps

L'utilisateur définit tous les critères de calcul utilisés par ABAQUS dans le module Job. En particulier il détermine l'incrément, valeur du pas de temps, et la valeur du temps final qui est un temps « virtuel », temps sans unité. Il faut définir les deux types de sortie qui sont : des sorties de type champ « Field output requests » qui fournissent des valeurs à un instant donné et des sorties de type historique « history output requests » qui vont donner l'évolution d'une grandeur au cours du temps.

Pour notre simulation on a choisi un calcul « dynamique explicite » car il est plus efficace et plus rapide dans le calcul. On a travaillé avec une période = 1 s, déterminé en vérifiant le critère énergétique pour un chargement statique.

### MODULE INTERACTION :

Grâce ce module, il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, dans cette simulation on a considéré :

- Un contacte surfacique entre l'acier et le béton, on la définit avec « **TIE** »
- Un contracte parfait entre le point de référence et la plaque rigide avec « **rigid body** »
- Un contacte surfacique entre la plaque rigide et la barre d'acier avec « **TIE** »

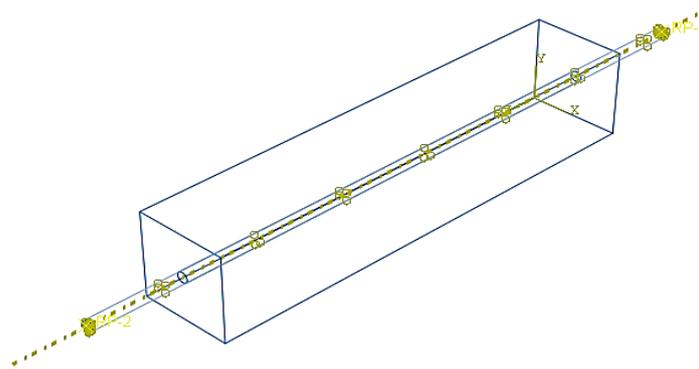


Figure III.15. création des interactions

**MODULE LOAD :**

L'utilisateur définit le système à partir de « CreateBoundary Condition » et de « CreateLoad ». Les conditions aux limites à appliquer sont les suivantes :

- 1) Encastrement dans le point de référence RP2
- 2) Un chargement statique piloté en déplacement multiplié par l'amplitude qu'on a défini pour avoir un chargement statique

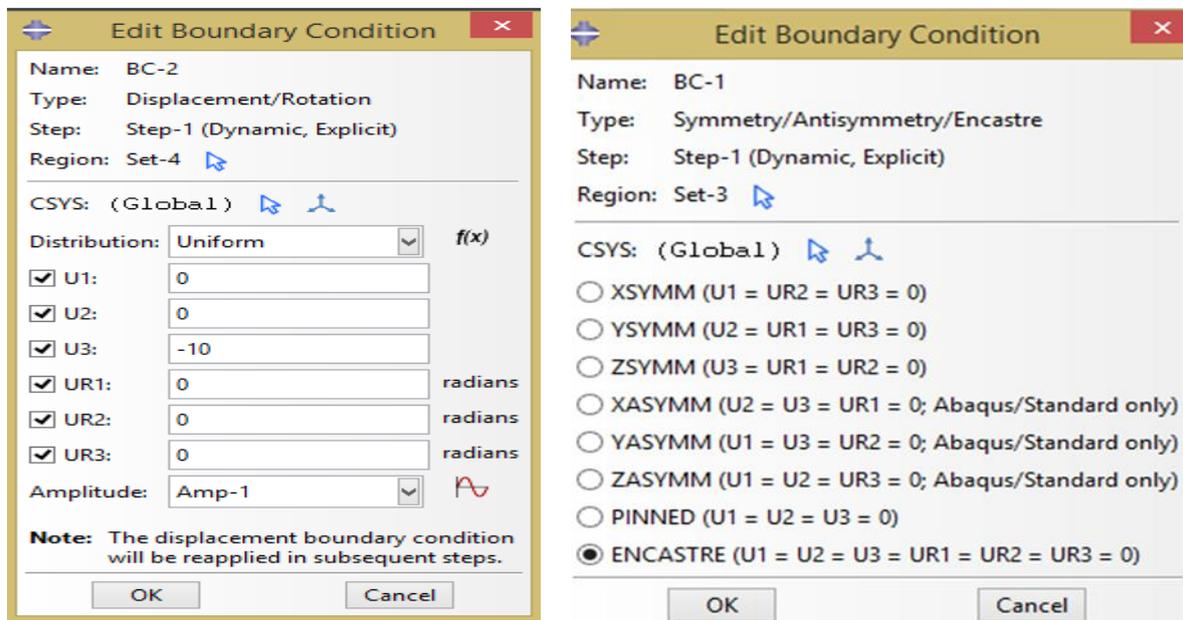
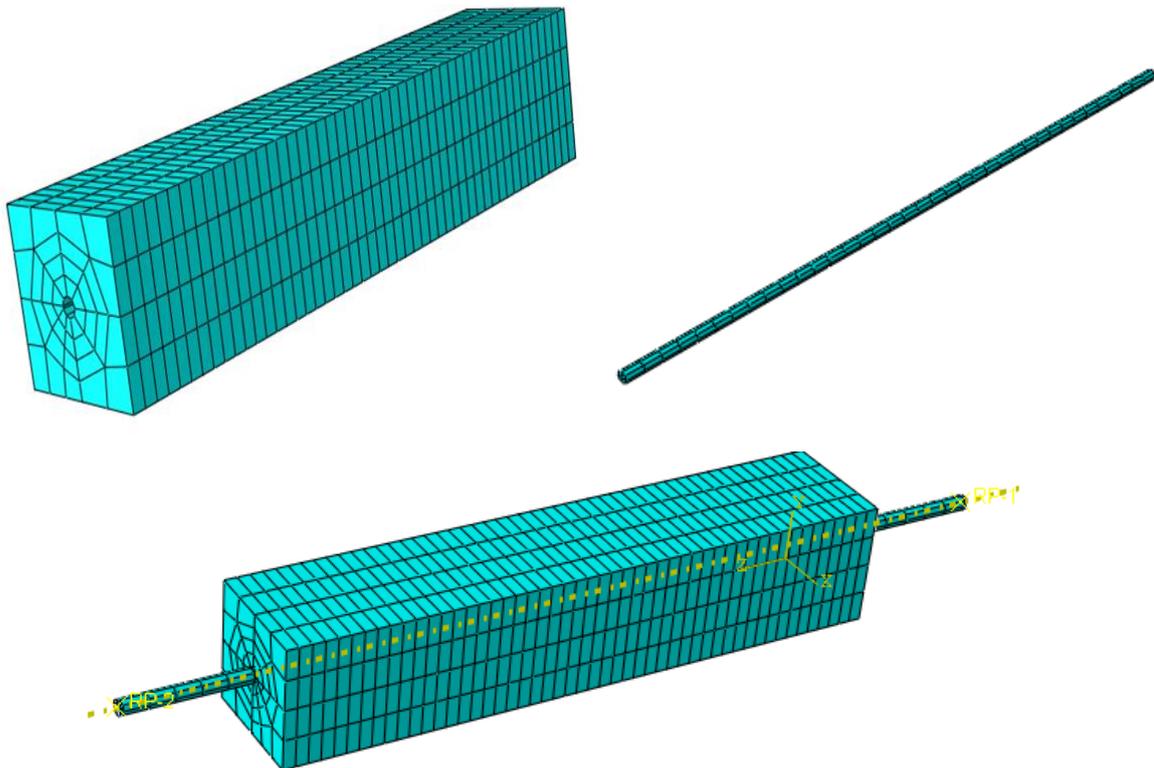


Figure III.16. chargement appliqué sur le tirant en béton armé

## MODULE MESH

Le module Mesh contient des outils qui nous permettent de générer un maillage d'éléments finis. En effet, le maillage repose essentiellement sur deux critères : les éléments de maillage (par exemple, hexaédriques, cubiques, tétraédriques dans « Mesh contrôle ») et la complexité topologique de chaque pièce. Il est possible aussi de mailler différemment une même pièce pour mettre en exergue les surface les plus déformables.



**Figure III.17.** création de maillage (acier, béton)

### Sensibilité de maillage

Une étude de sensibilité du maillage pour le tirant en béton armé renforcé est réalisée, l'objectif est de définir la dimension optimale des éléments finis choisis qui permet de mieux converger vers la solution exacte. À cet effet une étude comparative est réalisée, lors de la simulation, cette dernière est effectuée avec des dimensions variées à savoir : 30mm, 25 mm, 20mm, 15 mm, 10 mm, 5 mm.

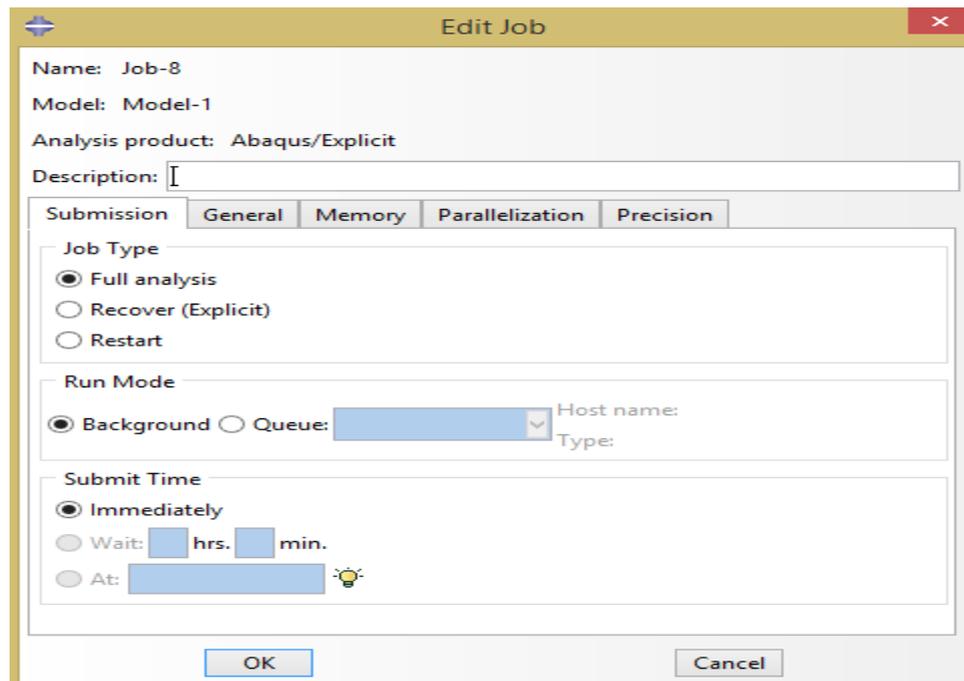
**Tableau III.3.** Sensibilité de maillage

Maille(mm)	30	25	20	15	10	5
Force $\times 10^4$ (N)	4.322	4.361	4.297	4.314	4.192	4.331

Les éléments de tirant sont maillés des éléments finis de 5 (mm) dans les trois directions de l'espace, ce qui assure un maillage très raffiné.

### **MODULE JOB :**

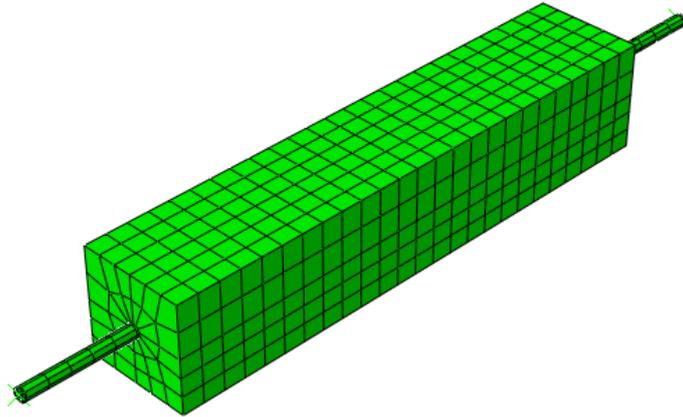
Le « lancement » du calcul est classique. Figure III.17, Après avoir lancé le calcul, vous pouvez suivre l'évolution du procès en cliquant sur Monitor : vous pouvez ainsi avoir en temps réel l'évolution des incréments de chargement et apprécier la convergence des calculs.



**Figure III .18.** Création de fichier job

### **Visualisation des résultats (Module visualization)**

L'utilisateur consulte le résultat du calcul numérique dans « Results » : soit par la visualisation des déformations dans « Field output » comme les déformations, les contraintes, la vitesse ou les forces ; soit par les courbes dans « History Output » comme l'énergie cinétique ou l'énergie totale de l'ensemble du modèle, l'énergie de dissipation ou des déformations.



**Figure III.19.** Visualisation et exploitation des résultats

### 3 Conclusion

Ce chapitre présente une introduction au logiciel de calcul ABAQUS, ainsi qu'un résumé des principales étapes pour la création de nos modèles. Grâce à cette plateforme, nous avons pu réaliser des simulations du comportement non linéaire d'un tirant en béton armé.

Les matériaux constitutifs ont été modélisés en utilisant des modèles numériques intégrés dans le code ABAQUS. Pour le béton, nous avons utilisé un modèle élasto-plastique qui permet d'évaluer la réponse ultime et de représenter l'évolution des dommages afin de déterminer le mode de rupture des spécimens étudiés. De même, un modèle élasto-plastique a été utilisé pour représenter l'acier.

En utilisant ces modèles, nous avons pu analyser de manière précise et réaliste le comportement du tirant en béton armé, en tenant compte des non-linéarités et des déformations plastiques des matériaux. Cette approche nous a permis de mieux comprendre les mécanismes de rupture et d'obtenir des résultats fiables concernant la résistance et la déformation du tirant dans différentes conditions de chargement.

L'utilisation du logiciel ABAQUS a donc été essentielle pour mener à bien cette étude, en fournissant les outils nécessaires pour modéliser et simuler de manière précise le comportement des matériaux constitutifs du tirant. Les résultats obtenus grâce à ces simulations nous permettent d'avoir une meilleure compréhension des performances du tirant en béton armé et peuvent servir de base solide pour la conception et l'optimisation de structures similaires.

## 1. Introduction

Ce chapitre se focalise sur la présentation et l'interprétation des résultats issus de simulations numériques effectuées sur des tirants en béton armé. Pour assurer la fiabilité de cette étude numérique, une validation a été réalisée en se basant sur des travaux existants dans la littérature, en utilisant le logiciel ABAQUS. Les résultats obtenus, tant au niveau du comportement global que local, seront présentés et examinés à l'aide de graphiques illustrant les variations de contrainte et de déformation.

De plus, des études paramétriques seront menées en utilisant le modèle développé spécifiquement pour cette étude. Il est important de souligner que la courbe de contrainte-déformation, qui représente le comportement simulé de l'acier enrobé de béton en traction, sera la même, que l'on applique une contrainte imposée ou un déplacement imposé. Cette constatation démontre la cohérence du modèle utilisé lors des simulations.

L'analyse approfondie des résultats permettra d'acquérir une meilleure compréhension du comportement des tirants en béton armé soumis à un effort de traction. Les graphiques de contrainte-déformation fourniront des informations précieuses sur les performances structurales et les niveaux de déformation des tirants. De plus, les études paramétriques permettront d'explorer l'influence de divers facteurs tels que la longueur des tirants, le pourcentage d'armature ou les conditions de chargement sur le comportement global des structures.

Ces résultats numériques contribuent à améliorer notre compréhension du comportement des tirants en béton armé et peuvent servir de base pour la conception et l'optimisation de structures similaires. Cependant, il est essentiel de prendre en compte les limitations et les hypothèses du modèle numérique utilisé, ainsi que les conditions spécifiques de chaque situation réelle, afin de procéder à une interprétation appropriée des résultats obtenus.

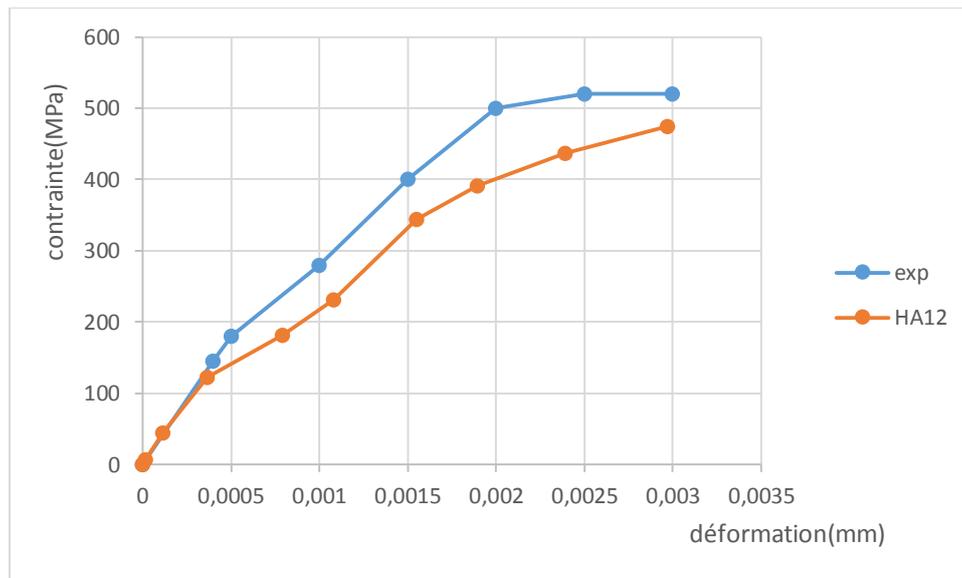
## 2. Validation du modèle proposé

Étant donné que notre modèle numérique à éléments finis et le modèle expérimental issu de la revue de littérature de MEZHOUD [31] partagent la même géométrie et sont constitués de matériaux aux propriétés identiques, nous visons à effectuer une comparaison rigoureuse entre les résultats numériques et expérimentaux.

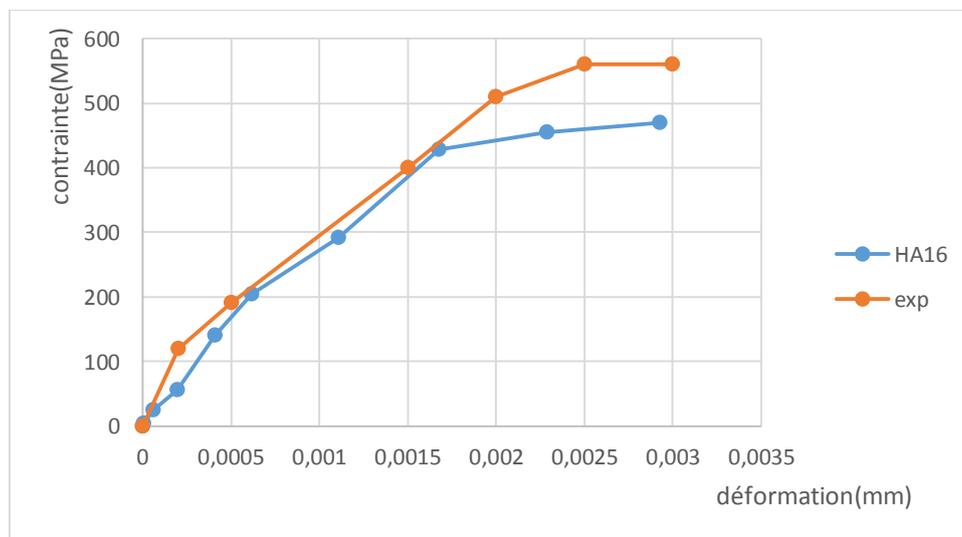
Dans le but de valider la fiabilité de notre approche numérique, nous soumettons nos prévisions, à la fois qualitatives et quantitatives, du comportement des structures étudiées à une confrontation avec les observations expérimentales réalisées par MEZHOUD [31]. Pour

l'évaluation quantitative, nous avons choisi de suivre et de comparer l'évolution des paramètres identifiés expérimentalement, notamment le déplacement vertical et les capacités portantes.

Cette démarche de comparaison vise à évaluer la concordance entre les résultats obtenus à partir de notre modèle numérique et les données expérimentales existantes. En cas de convergence satisfaisante, cela renforcerait la crédibilité de notre approche et fournirait une base solide pour l'utilisation future du modèle numérique dans des scénarios similaires.



**Figure IV.1.** Confrontation des courbes contrainte déformation du modèle numérique et expérimental de la barre HA12



**Figure IV.2.** Confrontation des courbes contrainte déformation du modèle numérique et expérimental de la barre HA16

- Les résultats numériques sont très proche des résultats expérimentaux pour les deux types de tirants. Il est important de noter que les simulations numériques peuvent présenter une certaine incertitude et peuvent ne pas reproduire exactement les conditions réelles.
- Les valeurs de déformation maximale semblent cohérentes entre les résultats expérimentaux et numériques pour les deux types de tirants. Les déformations sont similaires pour HA12 et HA16.

Les résultats de ces vérifications sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.1.** Comparaison des résultats numériques et expérimentaux

	expérimentaux		Numérique	
	$\sigma_{max}(MPa)$	$\varepsilon_{max}(mm)$	$\sigma_{max}(MPa)$	$\varepsilon_{max}(mm)$
HA12	520	0.0025	475.18	0.00297
HA16	560	0.0025	468.94	00029

### 3. Etude paramétrique

Dans cette partie, les graphiques contrainte-déformation obtenus lors de la simulation numérique des dommages et contraintes sont discuté et interprétés.

#### 3.1 Effet de la longueur des tirants

Dans cette étude, nous examinons l'impact de la longueur sur le comportement d'un tirant en béton armé. Pour ce faire, nous comparons les résultats obtenus avec trois longueurs différentes, en utilisant des bétons ordinaires d'une résistance moyenne à la compression de 30 MPa.

Les tirants en béton armé ont une section de 100 x 100 mm<sup>2</sup> et des longueurs variables (400, 500 et 600 mm). L'acier utilisé est de type S400, avec une contrainte limite  $f_e$  de 400 MPa et un module d'élasticité  $E_s$  de 210 GPa.

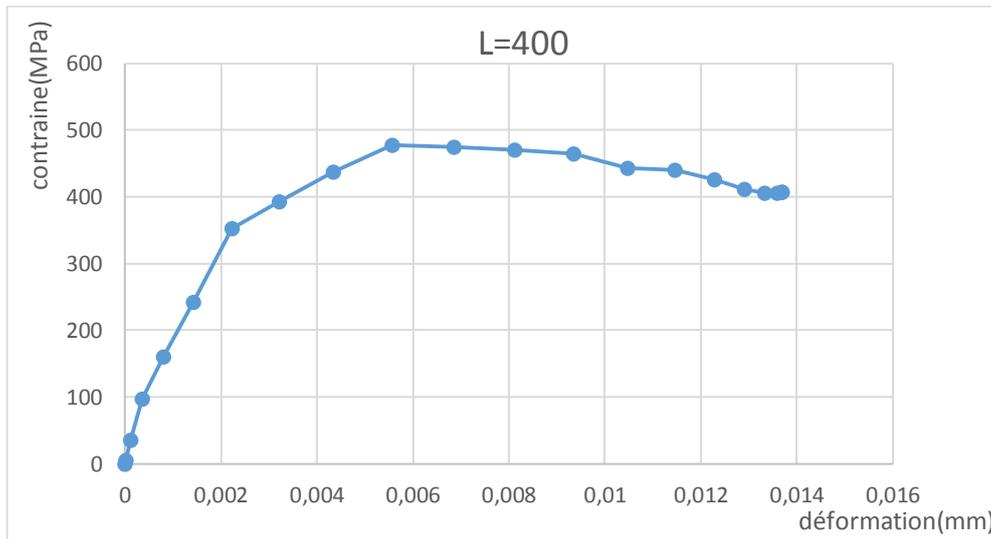
L'objectif de cette étude est d'analyser comment la variation de la longueur du béton influe sur le comportement des tirants. En examinant ces paramètres, nous cherchons à mieux comprendre l'interaction entre le béton et l'acier, ainsi que l'effet de la longueur du béton sur la réponse globale du système de renforcement.

### 3.1.1 Courbes contrainte-déformation

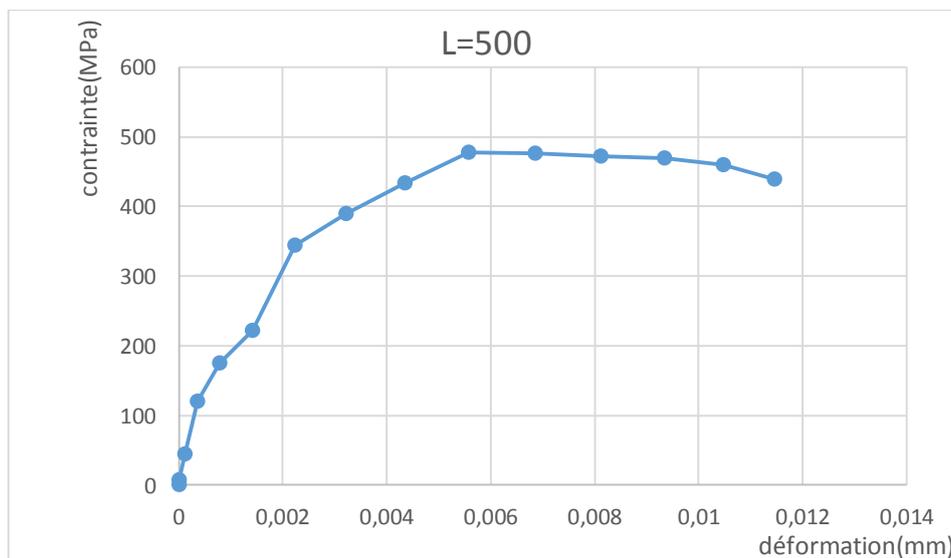
Les courbes contrainte-déformation obtenues pour les différents tirants sont représentées ici

#### a. Tirant avec une barre HA12

Ici on représente les courbes obtenues pour les tirants de longueurs 400, 500 et 600 armés d'une barre HA12



**Figure IV.3.** courbe contrainte déformation de la barre HA12 pour une longueur de 400mm



**Figure IV.4.** courbe contrainte déformation de la barre HA12 pour une longueur de 500mm

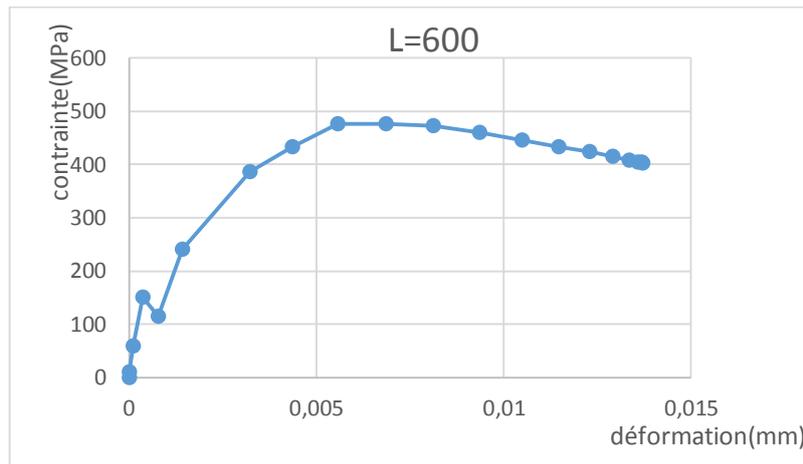


Figure IV.5. courbe contrainte déformation de la barre HA12 pour une longueur de 600mm

**b. Tirant avec une barre HA16**

Ici on représente les courbes obtenues pour les tirants de longueurs 400, 500 et 600 armés d'une barre HA16

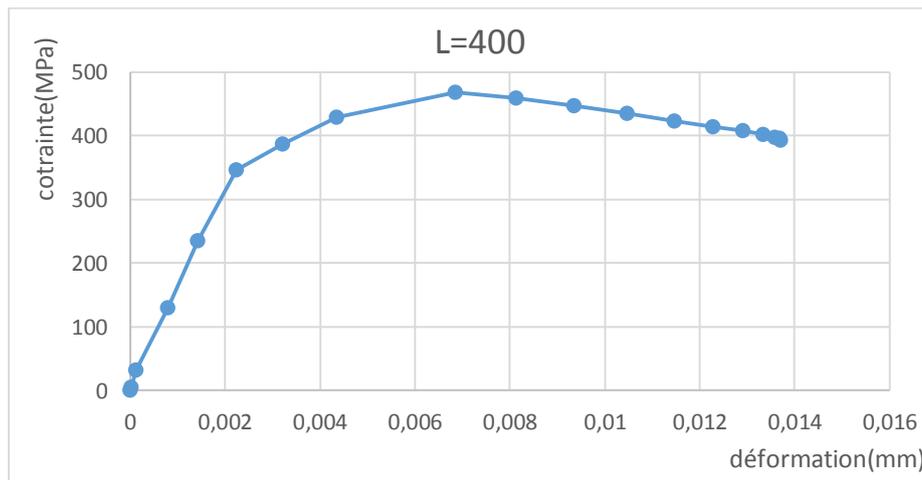


Figure IV.6. courbe contrainte déformation de la barre HA16 pour une longueur de 400mm

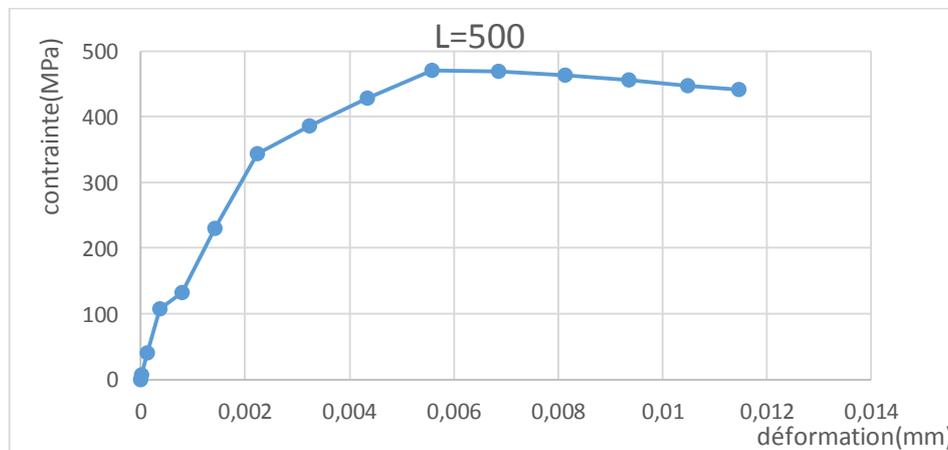
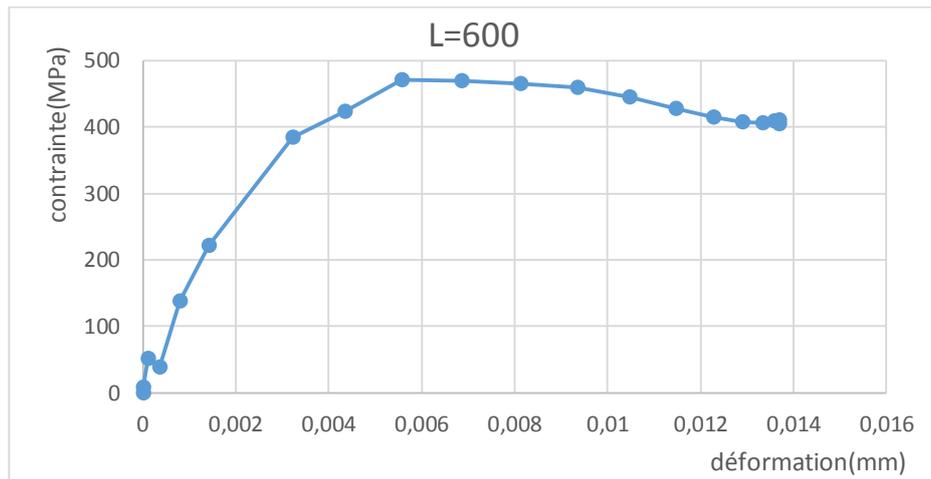


Figure IV.7. courbe contrainte déformation de la barre HA16 pour une longueur de 500mm



**Figure IV.8.** Courbe contrainte déformation de la barre HA16 pour une longueur de 600mm

Pour la première longueur,  $l=400$ , aucun signe de fissuration n'a été observé. Cela indique que le tirant en béton armé a conservé son intégrité structurelle même sous une charge importante. La courbe de contrainte-déformation montre une réponse linéaire élastique, suivie d'une déformation accrue sans atteindre le seuil de fissuration.

Pour la longueur  $L=500$ , des fissures légères commencent à apparaître sur le tirant en béton armé. La courbe de contrainte-déformation montre une augmentation de la déformation avec une légère diminution de la contrainte. Cela suggère une certaine dégradation de la performance du tirant, mais sans compromettre sa capacité portante globale.

En revanche, pour la longueur  $L=600$ , des fissures plus prononcées sont observées sur le tirant en béton armé. La courbe de contrainte-déformation montre une déformation significative accompagnée d'une baisse notable de la contrainte. Cela indique une dégradation plus importante de la résistance du tirant et suggère un risque accru de défaillance structurelle.

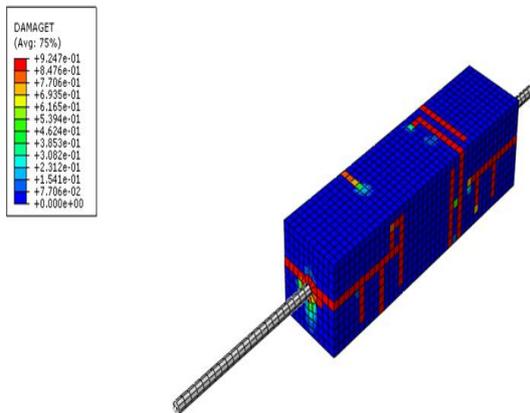
Ces résultats mettent en évidence l'influence de la longueur du tirant en béton armé sur son comportement structural. Ils soulignent l'importance de prendre en compte la longueur lors de la conception et de l'évaluation des performances des éléments de renforcement. Ces observations servent de référence pour l'optimisation des futurs projets de génie civil.

### 3.1.2. Cartographies de l'évolution des dommages en traction dans le béton

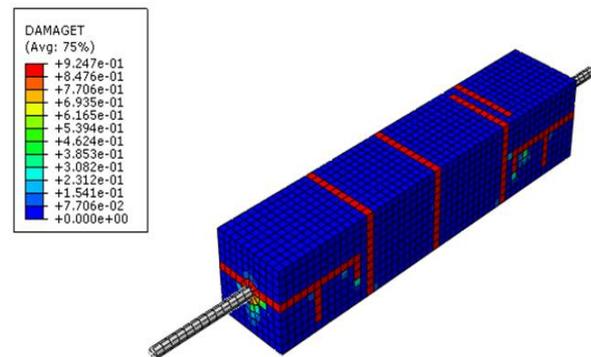
Les cartographies de l'évolution des dommages en traction et des contraintes dans les armatures obtenus lors de la simulation numérique de modèles sont présentées et discutées dans cette section.

**a. Tirant avec une barre HA12**

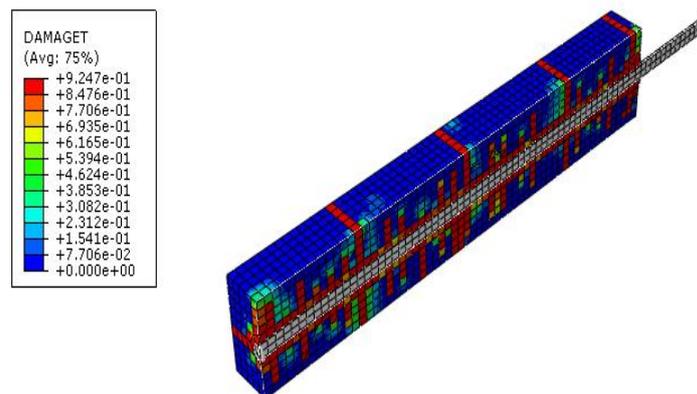
Dans cette section on représente les cartographies obtenues pour les tirants de longueurs 400, 500 et 600 armés d'une barre HA12



**FigureIV.9.** évaluation des dommages du HA12 pour une longueur de 400mm



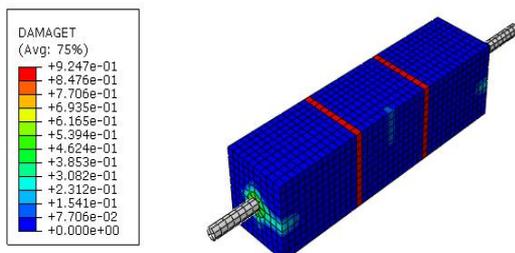
**FigureIV.10.** évaluation des dommages du HA12 pour une longueur de 500mm



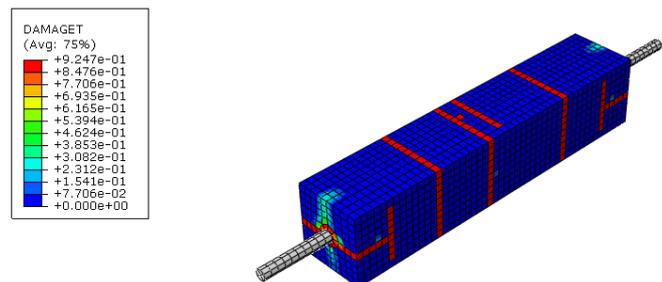
**FigureIV.11.** évaluation des dommages du HA12 pour une longueur de 600mm

**b. Tirant avec une barre HA16**

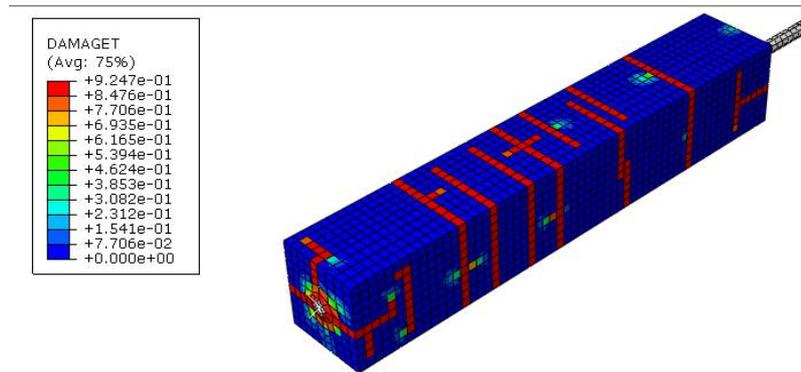
Dans cette section on représente les cartographies obtenues pour les tirants de longueurs 400, 500 et 600 armés d'une barre HA16



**FigureIV.12.** évaluation des dommages du HA16 L=400mm



**FigureIV.13.** évaluation des dommages du HA16 L=500mm



**FigureIV.14.** évaluation des dommages du HA16 L=600mm

L'analyse de l'évolution des dommages de la configuration révèle que le tirant présente un niveau d'endommagement plus prononcé, qui se propage le long de sa longueur. Cette observation est directement liée à la longueur du tirant. En effet, plus la longueur est importante, plus la transmission des charges de l'acier vers le béton est significative, ce qui entraîne une augmentation des dommages. Cette tendance est clairement illustrée dans les figures, où l'on peut observer en rouge la répartition et la concentration des dommages, avec une distribution latérale qui témoigne de l'apparition de fissures mineures et majeures.

Il est important de souligner que l'augmentation des dommages avec la longueur du tirant met en évidence l'importance de prendre en compte cette variable dans la conception et l'évaluation des performances des éléments de renforcement. Une plus grande longueur expose le tirant à des contraintes accrues, ce qui peut entraîner des fissures plus importantes et une détérioration structurelle plus marquée. Cette observation souligne la nécessité de surveiller attentivement les tirants de plus grande longueur afin de prévenir tout risque de défaillance et de garantir leur durabilité et leur intégrité structurelle.

### Remarque

*Le paramètre « pourcentage d'armature » représenté par le diamètre des barres n'est pas discuté ici car les résultats obtenus pour les différents pourcentages sont presque identiques et les différences ne sont pas significatives. Cela est sûrement dû au petit écart entre ces pourcentages.*

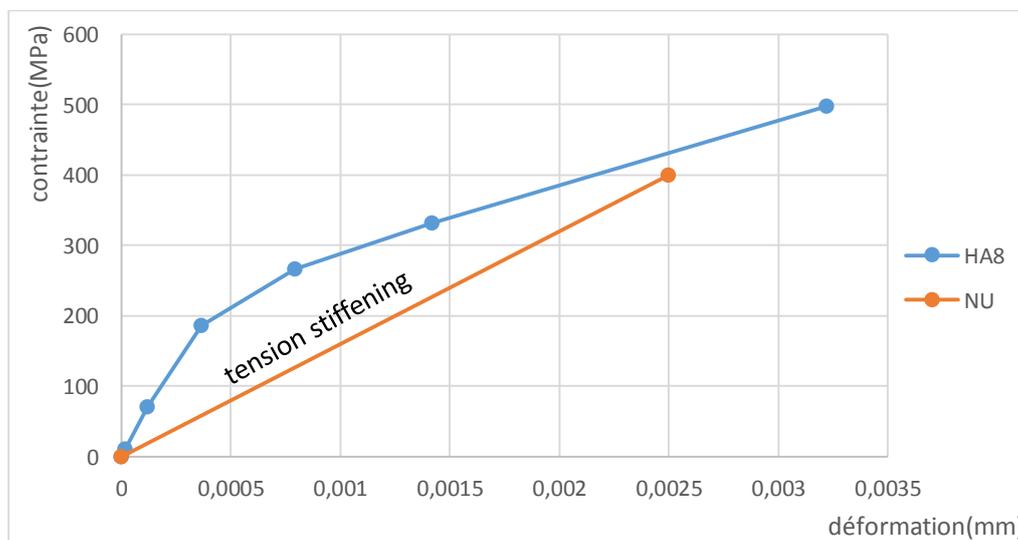
#### 4. Contribution du béton tendu (tension stiffening)

Ce concept définit la contribution du béton entre les fissures à la rigidité du tirant. Il englobe l'ensemble des phénomènes intervenant dans cette contribution, notamment :

- la loi réelle du béton tendu,
- la distribution et l'espacement des fissures,
- la présence des armatures, leurs diamètres et leur disposition,
- l'interaction acier - béton (problèmes d'adhérence).

Dans le but d'étudier la contribution du béton tendu sur le comportement d'un tirant, nous considérons un tirant en béton armé ayant une section de 100 x 100 mm<sup>2</sup> et une longueur de 600 mm. Nous utilisons un béton ordinaire avec les caractéristiques suivantes : une résistance à la compression  $f_c$  de 30 MPa et une résistance en traction  $f_t$  de 2,9 MPa.

Le tirant est renforcé avec une seule barre de haute adhérence d'un diamètre de 8 mm. L'acier utilisé est de type S400, avec une limite d'élasticité  $f_e$  de 400 MPa et un module élastique  $E_s$  de 210 GPa. Les résultats obtenus pour la courbe contrainte-déformation sont présentés sur la Figure IV.16.



**Figure IV.15.** Contribution du béton tendu (tension stiffening)

La courbe présentée offre une représentation significative du comportement du tirant en fonction de la contrainte appliquée et de la déformation résultante, mettant en évidence l'effet de la contribution du béton tendu, également connu sous le nom « **effet tension stiffening** ». Cette courbe met en évidence de manière claire la modification du comportement de l'acier enrobé de béton en raison de l'enrobage du béton. Plus précisément, en examinant la courbe pour le tirant HA8, on peut observer un recul de la limite élastique, ce qui suggère une

déformation plus importante du tirant. De plus, une deuxième phase sensiblement linéaire se manifeste, indiquant une réponse différente de l'acier sous l'influence de l'enrobage du béton environnant.

## 5. Conclusion

Les figures présentent une corrélation entre la longueur des éléments en béton armé et l'apparition de fissures. Une observation intéressante est que lorsque la longueur augmente, la distribution des contraintes dans le béton semble également augmenter. Cela peut s'expliquer par une plus grande surface de contact entre le béton et l'acier, ainsi que par une plus longue distance de transmission des efforts, ce qui favorise une meilleure répartition des charges grâce à l'adhérence entre l'acier et le béton.

Cependant, il est important de noter que cette augmentation de la distribution des contraintes dans le béton est également associée à l'apparition de fissures. Ces fissures peuvent être le résultat de contraintes excessives exercées sur le béton en raison des charges appliquées. Lorsque les contraintes dépassent la capacité du béton à les supporter, des fissures se forment pour relâcher cette tension excessive et prévenir une défaillance structurelle.

Ces observations soulignent l'importance de trouver un équilibre entre la longueur des éléments en béton armé et leur capacité à supporter les contraintes de manière uniforme. Une conception adéquate et des mesures de renforcement appropriées, telles que l'utilisation de barres d'armature ou de précontrainte, peuvent aider à minimiser les contraintes excessives et à prévenir l'apparition de fissures préjudiciables à la structure.

Les observations faites démontrent l'importance de considérer l'interaction entre l'acier et le béton dans l'évaluation du comportement global du tirant en béton armé. L'effet tension stiffening, illustré par la Figure IV.16, met en évidence les changements de comportement et les propriétés mécaniques qui se produisent lorsque les deux matériaux travaillent ensemble.

Après avoir analysé les résultats de l'étude sur le comportement des tirants en béton armé, plusieurs conclusions importantes peuvent être tirées :

1. L'utilisation du logiciel ABAQUS a permis une modélisation précise du comportement du tirant, prenant en compte les non-linéarités et les déformations plastiques des matériaux constitutifs (béton et acier). Cela a permis de mieux comprendre les mécanismes de rupture et d'obtenir des résultats fiables concernant la résistance et la déformation du tirant.
2. L'observation des figures a révélé une corrélation entre la longueur des éléments en béton armé et l'apparition de fissures. Une plus grande longueur du tirant entraîne une plus grande distribution des contraintes dans le béton, ce qui peut favoriser une meilleure répartition des charges. Cependant, cette augmentation de la distribution des contraintes est également associée à l'apparition de fissures, résultant de contraintes excessives sur le béton.
3. Une conception adéquate et des mesures de renforcement appropriées sont nécessaires pour trouver un équilibre entre la longueur des éléments en béton armé et leur capacité à supporter les contraintes de manière uniforme. L'utilisation de barres d'armature ou de précontrainte peut aider à minimiser les contraintes excessives et à prévenir l'apparition de fissures préjudiciables à la structure.
4. L'interaction entre l'acier et le béton joue un rôle crucial dans le comportement global du tirant en béton armé. L'effet de « tension stiffening » met en évidence les changements de comportement et les propriétés mécaniques qui se produisent lorsque les deux matériaux travaillent ensemble.
5. L'analyse de l'évolution des dommages a montré que le tirant présente un niveau d'endommagement plus prononcé le long de sa longueur, en raison de la transmission des charges de l'acier vers le béton. Une plus grande longueur expose le tirant à des contraintes accrues, ce qui peut entraîner des fissures plus importantes et une détérioration structurelle plus marquée.
6. Le paramètre du pourcentage d'armature, représenté par le diamètre des barres, n'a pas été discuté dans cette étude, car les résultats obtenus pour les différents pourcentages étaient presque identiques et les différences n'étaient pas significatives. Cette constatation peut être attribuée à un écart minime entre ces pourcentages, ce qui indique

## *Conclusion générale*

---

que le diamètre des barres d'armature n'a pas d'impact significatif sur les performances du tirant étudié.

En résumé, cette étude approfondie du comportement du tirant en béton armé a permis de mieux comprendre les mécanismes de rupture, les contraintes excessives et l'importance de la longueur des éléments. Les résultats obtenus constituent une base solide pour la conception et l'optimisation de structures similaires, en mettant l'accent sur la nécessité d'une conception adéquate, de mesures de renforcement appropriées et d'une surveillance attentive pour assurer la durabilité et la sécurité des tirants en béton armé.

En guise de conclusion, plusieurs perspectives prometteuses peuvent être envisagées pour approfondir les connaissances sur les tirants en béton armé et améliorer leur conception. Quelques-unes de ces perspectives comprennent l'étude de l'effet des charges dynamiques, l'exploration de matériaux de renforcement alternatifs, l'optimisation de la géométrie des tirants, l'évaluation du comportement à long terme, la validation expérimentale et l'application spécifique dans des domaines de construction. Ces avancées permettraient d'enrichir les connaissances actuelles et de fournir des recommandations plus précises pour l'utilisation optimale des tirants en béton armé dans différentes applications.

- [1] - ARMY TM. "Appendix E : Guidelines for the évaluation of existent matériels [en ligne], Sismique Design Guidelines for Upgradant Existions Buildings". Nagy NAVFAC P355.2, 1988. Disponible sur:<http://www.usace.army.mil/inet/usacedocs/armytm/tm5-809-10->
- [2] - Jean -Pierre Adam ; " La Construction romaine. Matériaux et techniques ". Sixième édition. Grands manuels picards, 2011
- [3] - BREYSSE D., ABRAHAM O : "Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton". Association Française de Génie Civil. Editeur : Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. 1er Edition, 556p. ISBN : 285978-405-5. 2005.
- [4] - E. Freyssinet : "Progrès pratiques des méthodes de traitement mécanique des bétons ", Deuxième Congrès de l'Association internationale des ponts et charpentes, octobre 1936.
- [5] - SAAD M, (2011) « Influence du pourcentage d'acier sur le comportement post-Fissuration du béton armé en traction » Thèse de docteur d'état Université MOULOUD MAMMARI de Tizi Ouzou
- [6] Peterson P.E., «Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials», Report TVBM-1006; Lund institute of technology, Sweden, 1981. ez ductile.
- [7] Hughes B. P., Chapman G. P., «The complete stress-strain curve for concrete in tension», Bulletin de la RILEM, 30, 95-97, 1966
- [8] ADAM et NEVILLE.M : "Propriétés des bétons". Editions Eyrolles, Paris, 2000
- [9] ROTILIO.J. D (1998) : "Contribution des actions variables aux déformations à long terme des ponts en béton". Thèse de doctorat ; Université libre de Bruxelles, Belgique
- [10] V. S. GOPALARATNAM, S. P. SHAH ; " Softening response of plain concrete in direct tension ", ACI Journal, May - June 1985
- [11] Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T. et Lam, L. (2002). "FRP strengthened RC structures", John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 245p.
- [12] -Glannoum W.M, (1998): "Size effect on Sears straight of reinforced concrete beams". Mémoire de master école normale supérieure de Cachan.
- [13] -B.A.E.L. Règles et techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en Béton armé aux états limite, fascicule 62 du CCTG, règlement français.

- [14] - IGUETOULENE.F (2011) ; « modélisation non linéaire des structures triangulées »Thèse de MAGISTER, Université MOULOUD MAMMERI de Tizi Ouzou
- [15] -BAEL Règles et techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en Béton armé aux états limite, fascicule 62 du CCTG, règlement français
- [16] -Abrams D.A., «Test of Bond Between Concrete and Steel», University of Illinois Bulletin, Vol. XI, No. 15, December 1913.
- [17] - Slater W. A., Richart F. E. and Scofield. G. G., «Test of Bond Resistance Between Concrete and Steel», U. S. Bureau of Standards Notes, Dec. 1920.
- [18] - Saliger R., «Acier à haute résistance dans le béton armé», Association Internationale des Ponts et Charpentes, deuxième congrès, Berlin – Munich, 1-11, octobre 1936.
- [19] - Watstein D., «Distribution of Bond Stress in Concrete Pull-Out Specimens», A.C.I. Journal, vol. 18, No. 9, pp. 1041-1052, May 1947.
- [20] - Clark A. P., «Bond of Concrete Reinforcing Bars», A.C.I. Journal, Vol. 21, No. 3, pp. 161-184, November 1949
- [21] - Chamberlin S. J., «Spacing of Spliced Bars in Tension Pull- out Specimens», A.C.I. Journal, Vol. 24, No. 4, pp. 261-274, December 1949.
- [22] Lutz L.A., Gergely P., «Mechanics of Bond and Slip of Deformed Bars in Concrete», A.C.I. Journal, vol. 64, No. 11, 1967.
- [23] - Untrauer R. E. and Henry R. L., «Influence of Normal Pressure on Bond Strength», A.C.I. Journal, Vol. 62, No. 5, pp. 577-586, May 1965
- [24] RILEM, «Essai portant sur l'adhérence des armatures du béton-1- Essai par flexion», Recommandation RILEM/CEB/FIB - RC5, Matériaux et constructions, Vol. 6, N°32, 1978.
- [25] RILEM, «Essai portant sur l'adhérence des armatures du béton-1- Essai par traction», Recommandation RILEM/CEB/FIB – RC6, Matériaux et constructions, Vol. 6, N° 32, 1978.
- [26] Abdelmadjid SI SALEM (2016) ; Développement d'une poutre en béton-composite : analyse expérimentale et modélisation ; Thèse de doctorat de l'université de Tizi Ouzou

[27] CEB-FIP Model Code. Comité Euro-international du Béton-Fédération Internationale de la Précontrainte. London : Thomas Telford Ltd ; 1990. p. 1993.

[28] - Eligehausen R, Popov EP, Bertero VV. Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations. Proceeding of 7th European Conference on Earthquake Engineering; 1982. p. 69–80

[29] - Saad M, Kachi MS, Bouafia Y, et al. Influence du pourcentage d'acier sur le comportement du béton tendu fissuré: Calcul de l'ouverture des fissures par le biais de "l'acier fictif" [Steel percentage Influence on the cracked tensioned concrete behavior: crack opening calculation by means of "fictitious steel"]. Eur J Environ Civ Eng. 2010;14(3):303–327.French.

[30] - Saad M, Bouafia Y, Kachi MS. Contribution à l'évaluation d'ouverture des fissures dans les éléments en béton armé [Contribution to evaluation of cracks opening in reinforced concrete elements]. Ann Bâtiment Public Ed ESKA. 2014;130:1214–1224.French.

[31] - Mezhoud D. Prise en compte du comportement fictif de l'acier dans les zones tendues du béton armé. Thèse de doctorat de l'université A/Mira de Bejaia , 2018.

[32] Rabich R., "Beitrag zur Berechnung der Formänderung –Gen von Stahl beton bauteilen unter Berücksichtigung der Risbildung". Helft 4, pp 184-187, 1969

[33] - Desmettre C., Contribution à l'étude de la perméabilité du béton armé sous sollicitations statiques et cycliques, Thèse de doctorat, école Polytechnique de Montréal, 2011.

[34] -clément, Jean-Luc. Interface acier-béton et comportement des structures en béton armée: caractérisation modélisation. Thèse doctorat. Paris 6

[35] -DAOUD ,Atef. Etude expérimentale de la liaison entre l'acier et le béton auto plaçant: contribution a la modélisation numérique de l'interface . Thèse de doctorat .Toulous, INSA

[36] - Goto Y., Cracks formed in concrete around deformed tension bars, Journal of the American Concrete Institute, vol. 68, pp. 244-251, 1971.

[37] - Espion B., Provost M. et Halleux P., "Rigidité d'une zone tendue de béton armé". Matériaux de construction, vol. 18, N° 105, pp 185-191, Mai – Juin 1985.

- [38] -Van der Veen C., "cryogenic bond stress – slip Relationship". Ph. D. thesis, Delft University of Technology, 1990
- [39] -Rao P.S., "die denglagen zur brechung der bei statisch unbestimten stahl beton konstruktionen im plastischen breich autretenden umlagerungen der schnittkraft" , D.A.F.St., Berlin, Heft 177, 1976.
- [40] -Rostasy S.F., Kosh R., Leonard F., "Regarding minimum reinforcement against pressure on exterior walls of reinforced light concrete". Bulletin N° 267, D.A.F.St, Berlin, 1976.
- [41] -Comité Euro-international du béton, "Cracking and déformations". Bulletin d'information N° 158, 1985.
- [42] - B. P. SINHA, K. H. GERSTLE, L. G. TULIN ; " Stress - strain relations for concrete Under cyclic loading ", ACI Journal, V.61, N°2, Feb. 1964.
- [43] -BACHIR KABAILI “Analyse de séisme Boumerdes”, Juin 2003 et RPA,1st international conférence on sustainable built environnement infrastructure in devloping countries ENSET,oran (Algeria),october 12/14/2009.
- [44] S. Djenad, S. Ait Taleb, A. Si Salem and M. A. Bouzidi “*NLFEA based design optimization of GFRP strips in partially confined concrete*” Procedia Structural Integrity (2022) 37 321-329
- [45] S. Medjmadj, A. Si Salem and S. Ait Taleb. Experimental behavior of plaster/cork functionally graded core sandwich panels with polymer skins. *Construction and Building Materials* 344 (2022) 128257
- [46] C. Ali Ahmed, A. Si Salem, S. Ait Taleb and K. Ait tahar. Experimental behavior and reliability of pre-damaged concrete columns externally repaired with FRP spiral strips under axial compression/ *World journal of engineering* 2022 <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/WJE-06-2022-0248/full/html>
- [47] A. Si Salem, S. Djenad and S. Ait Taleb. Experimental Axial Compressive Behavior of Partially Confined Concrete Columns with Combined External and Internal FRP Strips. *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM)*, 2022 Volume 21, Pages 356-362
- [48] S. Ait Taleb, S. Medjmadj and A. Si Salem. Modeling the Nonlinear Behavior of Predamaged Reinforced Concrete Beams Retrofitted with Bonded and Jacketed FRP Sheets.

The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM), 2022 Volume 21, Pages 288-294

[49] Si Salem A, Ait Taleb Souad & Ait tahar K « *Static and dynamic behavior of composite concrete-based beams with embedded Polymer/FRP Components* » Procedia Engineering, 114C, 2015, 173-180.

[50] S. Ait Taleb, Abdelmadjid Si Salem & Kamal Ait tahar “*Behaviour of a new graded beam reinforced with externally bonded composite sheets*”, European Journal of Environmental and Civil Engineering, 21(9), 2016 1171-1185.

[51] S. Ait Taleb, A. Si Salem and K. Ait tahar. “*Bending and shear behavior of a composite beam strengthened and double-confined with FRP-jacket*”, Procedia Engineering, 114(C), 2015, Pages 165-172.

[52] S. Ait Taleb, A. Si Salem and K. Ait tahar. “Experimental and theoretical modeling coupled to a reliability approach for flexural failure prediction in hybrid composite beams” Asian Journal of Civil Engineering (2020) 21:495–504

[53] S. Djenad et al. Finite element modeling of partially-confined concrete and RC columns with embedded hexagonal-FRP strips under axial and horizontal loading. Structures 54 (2023) 369–385

[54] Si Salem, A., et al: Experimental and statistical investigation of a new concrete-composite beam with encased polymer tube wrapped by FRP, Frontiers of Structural and Civil Engineering. 9(2), 154–162 (2015).

[55] Si Salem. A, Ait Taleb. S and Ait tahar. K. « *A finite element approach for predicting the flexural response of light weight FRP-Concrete beams under cyclic loading* » Applied Mechanics, Behavior of Materials, and Engineering Systems, Lecture Notes in Mechanical Engineering, (2017), 355-363

---

## *Chapitre I*

# *Synthèse bibliographique sur le comportement du béton et de l'acier*

---

---

## *Chapitre II*

# *Comportement des tirants et loi d'adhérence acier-béton*

---

---

## *Chapitre III*

### *Modélisation d'un tirant avec Abaqus*

---

---

## *Chapitre IV*

### *Validation des résultats et discussion*

---

---

# *Introduction générale*

---

---

## *Conclusion générale*

---