

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté du génie de la construction

Département de génie civil



MEMOIRE DE MASTER RECHERCHE

Spécialité : Génie civil

Option : Structure et matériaux

**Simulation numérique de prismes, à section
circularisée, confinés hélicoïdalement avec des
bandes en Polymère Renforcé de Fibre (PRF).**

Présenté par :

M^{elle} Tilmatine Thiziri

Devant le jury composé de :

Mr DEHMOUS Hocine,

M^{me} ALI AHMED Chafika ,

M^{me} BOZBOUDJA Fatima,

Président

Promoteur

Examineur

Promotion : 2015/2016

REMERCIEMENTS

Au premier lieu je remercie le Dieu tout puissant de m'avoir donné le courage afin d'accomplir ce travail.

Je présente mes sincères remerciements à ma promotrice *M^{me} ALI AHMED CHAFIKA* de m'avoir pris en charge, ses orientations, sa disponibilité, son soutien, ses encouragements, durant la durée de ce travail.

Je tiens à remercier aussi *Dr SI SALEM.A* pour sa modestie, ses conseils, ses encouragements, sa disponibilité, et je le remercie pour m'avoir consacré son temps afin de m'aider durant mon travail.

Je remercie tous les enseignants de l'université *MOULOUD MAMMERI de TIZI-OUZOU* participé à ma réussite durant mon cursus.

Enfin je présente mes sincères remerciements aux membres de jury qui me feront l'honneur de juger et enrichir mon travail par leurs propositions.

DEDICACES

Je dédie ce travail à chère famille : mon père, ma mère, ma sœur *Thileli*, mon frère *Ali*, ma grand-mère *Djouher*, mes tantes et mes oncles ainsi qu'à mes amies : *Dihia*, *kahina*, *Anissa*, *nawel*, *Mouna* pour leurs soutiens, encouragements, et leurs conseils durant mon travail.

Résumé

Les structures en béton armé subissent, durant leurs durées de vie, des dégradations et des désordres qui peuvent mettre en péril la vie de leurs usagers. Elles nécessiteraient, alors un renforcement ou une réparation dans le but d'améliorer leurs performances mécaniques (résistance, ductilité, etc.) et d'assurer leur remise en conformité.

Plusieurs techniques classiques de renforcement des structures existent, dont le confinement par le collage de plaques en acier sur l'élément concerné. Cependant, vu l'inconvénient majeur de cette méthode qui est la corrosion de l'acier, les matériaux composites sont devenus la solution alternative, par excellence, à l'emploi de l'acier.

Notre travail consiste à étudier, par simulation numérique sous Abaqus, le comportement sous compression de prismes, à section circularisée, en béton confinés hélicoïdalement avec des bandes de PRFV.

Deux variables sont considérées dans cette étude, à savoir la largeur de la bande et les nombre de tours de l'hélice qu'elle forme autour des prismes modifiés.

Ce procédé de confinement a montré une nette amélioration en matière de résistance et de ductilité des spécimens étudiés

Mots Clés : confinement hélicoïdal, simulation numérique, bandes de PRFV, prismes à section circularisée.

Abstract

Reinforced concrete structures are subjected during their lifetimes, to degradations and disorders that may endanger the lives of their users. They require, strengthening or repair in order to improve their mechanical properties (strength, ductility, etc.) and to secure their compliance.

Several conventional techniques of building structures exist such as the enclosure by bonding steel plates the item. However, since the major disadvantage of this method is the corrosion of steel, composite materials have become the alternative in the use of steel.

Our study is to investigate, by numerical simulation in Abaqus, behavior under compressive load of prisms annealed section, concrete confined helically with strips of GFRP.

Two variables are considered in this study, the width of the strip and the number of turns of the helix that forms around the modified prisms.

The confinement process showed a marked improvement in terms of strength and ductility of the studied specimens

Keywords: helical confinement, numerical simulation, FRP strips, prisms annealed section.

Liste des figures

Chapitre I

Figure I-1 : Comportement du béton en compression simple	06
Figure I-2: Essais de compression triaxiale	07
Figure I-3: Matériau composite	08
Figure I-4: Organigramme illustrant les principaux matériaux de renfort.....	11
Figure I-5: Organigramme illustrant les différentes familles de matrice.....	13
Figure I-6: composite stratifié.....	17
Figure I-7: Mécanismes d'endommagement observés dans un composite	18
Figure I-8: Courbe contrainte-déformation d'un béton confiné par PRF	24

Chapitre II

Figure II-1: Une poutre en béton armé renforcée par une lamelle en PRF.....	26
Figure II-2 : Courbe typiques de charge-déflexion des poutres en béton armé renforcées et non renforcées avec des matériaux composites «PRF».....	27
Figure II-3 : Renforcement d'une dalle travaillant dans les deux sens par des lamelles en «PRF»: (a) dans les deux directions, (b) concentrées en petites régions ciblées	28
Figure II-4: Les méthodes typiques d'envelopper le «PRF» pour les colonnes en B.A ; (a) enveloppée totalement en utilisant des tissus «PRF», et (b) partiellement enveloppée en utilisant des lanières «FRP» sous forme d'anneaux discrets.....	28
Figure II-5: Stratification au contact.....	29
Figure II-6: procédé de l'enroulement filamenteire.....	30
Figure II-7: Chemisage par coquille préfabriquée en PRF	30
Figure II-8: Courbes contraintes-déformations d'un béton confiné et non confiné	31
Figure II-9: Effet de la pression de confinement sur le comportement en compression du béton	32

Figure II-10 :Modes de rupture des spécimens.....	33
Figure II-11 :Courbes contrainte-déformation simplifiéesde béton confiné par FRP	34
Figure II-12 :(a) instrumentation; (b) mode de rupture des spécimens de béton enveloppés par des fibres de carbone	35
Figure II-13 :Effet de confinement sur le comportementdu béton	36
Figure II-14 :Diagramme typique contrainte-déformation de béton confiné	37
Figure II-15 -Mode de rupture des cylindres enveloppés avec fibres de verre.....	37
Figure II-16 : Mode de rupture des cylindres enveloppés avec fibres de carbone	37
Figure II-17 : Mode de rupture des spécimens	38
Figure II-18 : Modèle tri-linéaire de contrainte-déformation dans les directions axiales et latérales.....	39
Figure II-19 :Rupture de colonne partiellement enveloppée	40
Figure II-20 :L'installation expérimentale de colonne confinéePar CFRP avec une charge concentrique	41
Figure II-21 :Installation d'essai.....	43
FigureII-22 : Enveloppe de FRP: (a) Un seul type; (b) Deux types; (c) Trois types.....	43
Figure II-23 :changement de section de la colonne	45
Figure II-24 : Confinement de cylindres en béton avec des bandes hélicoïdales en PRF	46
Chapitre III	
Figure III-1 : les étapes d'une analyse sur ABAQUS.....	48
Figure III-2 : interface d'ABAQUS.....	49
Figure III-3 :la géométrie de l'hélice.....	52
Figure III-4 : géométrie du cylindre	52
Figure III-5 : introduction des propriétés des matériaux	52

Figure III-6: assemblage	53
Figure III-7 : création d'un step.....	54
Figure III-8 : les interactions.....	55
Figure III-9 : application des conditions aux limites	55
Figure III-10 : application du chargement	55
Figure III-11 : Maillage de l'hélice	56
Figure III-12 : maillage du cylindre.....	56
Figure III-13 : les prismes assemblés et leurs maillages	57
Figure III-14 : création d'un job	57
Figure III.15 : Schéma d'une structure en équilibre	58
Figure III-16 : Illustration de la méthode de Newton.....	61
Figure : III-17: Illustration de l'opérateur de différence centrale	62
Figure III-18 : Réponse du modèle à la compression simple.....	65
Figure III-19 : Réponse du modèle à la traction simple	65
Figure III-20 : Récupération de rigidité en compression.....	67
Figure III-21: Récupération de rigidité lors d'un cycle complet	68
 Chapitre IV	
Figure IV-1 : Courbes contrainte – déformation : cas du cylindre.....	69
Figure IV-2 : courbe contrainte-déformation : cas du prisme à section circularisée	71
Figure IV-3 : comparaison d'un prisme modifié à un cylindre, confinés (3 tours)	73
Figure IV-4 : comparaison d'un prisme modifié à un cylindre, confinés (4tours)	74
Figure IV-5 : comparaison d'un prisme modifié à un cylindre, confinés (5 tours)	74

Figure IV-6 : courbes contrainte -déformation : cas des cylindres confinés par des hélices de 3 tours	75
Figure IV-7 : courbes contrainte -déformation : cas circularisé confiné par des hélices de 3 tours	76
Figure IV-8: histogramme des gains en résistance (30mm)	77
Figure IV-9: histogramme des gains en résistance (3 tours).....	78
Figure IV-10 : Prisme à section, circularisée, non confiné.....	79
Figure IV-11 : Prisme à section, circularisée, confiné par 3 tours de largeur de 20mm.....	79
Figure IV-12: les cartographies des contraintes	80
Figure IV-13: Cartographie des déformations	82
Figure IV-14: les cartographies des contraintes	83
Figure IV-15 : les cartographies des déformations	85
Figure IV-16 : les cartographies de la déformé	85

Liste des tableaux

Tableau I-1 : les classes de ciment courant en fonction de la résistance R.....	04
Tableau I-2 : Caractéristiques des fibres de carbone	12
Tableau I-3 : Caractéristiques moyennes des fibres et renforts	13
Tableau I-4 : Caractéristiques moyennes des matrices thermodurcissables (TD) non renforcées	15
Tableau I-5 : Caractéristiques moyennes des matrices thermoplastiques non renforcées	16
Tableau IV-1 : Tableau des contraintes maximales et les déformations correspondantes.....	72
Tableau IV-2 : Tableau des contraintes maximales et les déformations correspondantes.....	75
Tableau IV-3 : Tableau des contraintes maximales et les déformations correspondantes.....	76
Tableau IV-4 : tableau des résistances et des gains en résistance des différents prismes modifiés.....	77
Tableau IV-5: tableau des résistances et des gains en résistance de différents prismes	78

Sommaire

Introduction Générale.....	01
Chapitre I : comportement des matériaux	
I-1-Introduction	03
I-2- Béton	03
I-2-1- Définition	03
I-2-2- Composants du béton.....	04
a-ciment.....	04
a-1- Ciment portland artificiel	04
a-2-Ciment portland composé	04
a-3-Ciment de haut fourneau.....	04
a-4-Ciment de laitier au clinker	04
b- Eau de gâchage	05
c-Adjuvants	05
d-Granulats	05
I-2-3- comportement mécanique du béton	06
I-2-3- 1-Comportement du béton en compression uni axiale	06
I-2-3-2-Comportement sous une contraint de confinement	07
I-3- Matériaux composites	07
I-3-1-Définition	07
I-3-2-Classification des matériaux composites	08

a - selon la forme des constituants	08
a-1- Composites à fibres	08
a -2- Composites à particules	08
b-selon la nature des constituants (la matrice)	08
b-1-Composites à matrice organique CMO	09
b-1-1- composites à grandes diffusion	09
b-1-2- composites à haute performance	09
b-2-composites à matrice métallique(CMM)	09
b-3-Composites à matrice céramique	10
I-3-3-Constituants des matériaux composites	10
a- Renforts (les fibres)	10
a-1- Fibres de carbone	11
a-2- les fibres de Verre	12
a-3- les fibres d'Aramide	12
b- matrices	13
b-1-Les matrices organiques	14
b-1-1-Les résines thermodurcissables	14
b-1-2- Résines thermoplastiques (TP)	15
b-2- Matrices métalliques.....	16
b-3-Matrices céramiques	17

I-3-4- structures composites	17
I-3-4-1- Stratifiés.....	17
I-3-5- Avantages et inconvénients des matériaux composites	17
I-3-6-Mécanisme de rupture des matériaux composites	17
I-3-7- Critères de la Rupture.....	18
I-3-7-1- matériaux anisotropes	19
a-Critère de la Contrainte maximale	19
b -Critere de la deformation principale	19
c-Critères interactifs.....	20
c-1-le critère de Hill	20
c-2-Critère de Tsai- Hill	21
c-3-Critère de Hoffman	21
I-3-7-2-Les matériaux isotropes	22
a-Critère de Rankine	22
b-Critère de Tresca	22
c-Critère de Von Mises	22
I-3-8- Le renforcement par Polymères renforcés de fibres « PRF »	23
I-4-Utilisation des matériaux composites « PRF » dans le génie civil	24
I-5-Courbe contrainte déformation types du béton confiné	24
I-6- Conclusion	25
 Chapitre II : confinement du béton avec PRF	
II-1- Introduction	26
II-2-renforcement de quelques éléments des structures par les matériaux composites.....	26

II-3-Méthodes de confinement des colonnes	29
II-3-1- Stratification au contact	29
I-3-2- Enroulement filamentaire	29
II-3-3- Chemisage par coquille préfabriquée en PRF	30
II-4- Comportement du béton confiné sous compression axial	31
II-5- Travaux expérimentaux effectués sur le confinement des colonnes	32
a - Saafi et al(1999)	32
b-M. Shahawy et autres (2000)	34
c-Fam et Rizkalla (2001)	35
d-Huei-Jeng Lin et Chin-Ting Chen (2001)	36
e-Karabinis et Rousakis (2002)	38
f-Chaallal et al (2003)	39
g- Matthys et autres (2005)	39
h-Hadi (2006)	41
i-Pan et al. (2007)	41
j-Kumutha et al. (2007)	42
k-G. WU et autres (2008)	42
l-Abbasnia et Ziaadiny (2009)	44
m-Thong et al. (2013)	44
n-Ali Ahmed et al C	45
II-6-Conclusion	46
 Chapitre III : Simulation Numérique	
III-1-Introduction	47
III-2-Présentation du logiciel Abacus	47
III-3-Les principales composantes de la fenêtre d'ABAQUS	48
III-4- simulation numérique	51

III-4-1-Présentation du modèle à simuler	51
III-4- 1- 1-Géométrie de modèle	51
III-4-1-2- introduction des propriétés du matériau et définition de la section	52
III-4-1-3-Assemblage	53
III-4-1-4-Creation d'un step	54
III-4-1-5-Création des interactions entre les instances	54
III-4-1-6-Application des conditions aux limites	55
III-4-1-7-Maillage du modèle	56
III-4-1-8-Lancement du calcul	57
III-4-1-9-Visualiser les résultats	58
III-5-Discretisation du principe des puissances virtuelles (PPV)	58
III-6- presentation du modele concrete damaged plasticity	64
III-6-1-comportement à la compression	64
III-6-2- comportement à la traction	65
III-6-3-La récupération de la rigidité en Comportement cyclique uniaxiale	66
III-7-Conclusion	68
 Chapitre IV : Résultats et discussion	
IV-1-Introduction	69
IV-2-Courbes contrainte-déformation, cas de la variable nombre de tours de l'hélice	69
IV-2-1- Comportement des cylindres	69
IV-2-2- Comportement des prismes à section circularisée	70
IV-2-3- Comparaison du comportement des cylindres et celui des prismes à section circularisée	73
IV-3-Courbes contrainte-déformation, cas de la variable largeur de la bande de FRP	74
IV-3-1-Comportement des cylindres	74
IV-3-2-Comportement des prismes à section circularisée	75

IV-4-Quantification les gains en résistance des prismes à section circularisée	76
IV-5- Cartographie des contraintes et des déformations	78
IV-5-1-Cartographie des contraintes	78
IV-5-2-Cartographie des déformations	81
IV-5-3-Cartographie des contraintes	83
IV-5-4-Cartographie des déformations	84
IV-5-5-Déformée	85
IV-6-Conclusion	86

Introduction Générale

Des structures en béton armé subissent, durant leurs durées de vie prévisionnelles, des dégradations et des désordres qui peuvent mettre en péril leurs occupants. Elles nécessitent de ce fait des réparations en les renforçant pour les mettre en conformité avec les règlements en vigueur.

Les méthodes classiques de renforcement et de réparation se résument au collage de plaques d'acier sur les surfaces à renforcer. Néanmoins ces méthodes se trouvent confrontées à plusieurs problèmes notamment la corrosion de l'acier. C'est vers la fin des années 80, que s'est aperçu du potentiel des matériaux composites qui présentent des performances mécaniques plus qu'intéressante. Ajouté à cela leur légèreté et leur bonne adhérence au béton. Le renforcement par collage de matériaux composites, est devenu la solution alternative à l'emploi de l'acier. Elle s'est ainsi progressivement eu déclin de la technique de réparation classique par tôles d'acier collées,[1] la technique de renforcement par collage de tissus ou de lamelles stratifiées est aujourd'hui devenue une pratique courante dont l'efficacité est reconnue dans le monde entier [2],[3].

Les Matériaux composites les plus utilisés, à cet effet, sont à matrice organique dans laquelle des fibres sont noyées.

Le renforcement des différents éléments structuraux tel que, les poteaux, les colonnes et les dalles par collage de PRF, permet la mobilisation d'une pression de confinement qui engendre la diminution des déformations latérales. Elle permet l'amélioration de la résistance et de la ductilité des éléments confinés sans augmenter leur poids. L'intérêt sera porté, dans le cadre de notre travail, sur le comportement d'éléments en béton (prismes à section circularisée et cylindres) à la compression, sous l'effet d'un confinement avec des bandes en PRFV (polymère renforcé de fibre de verre) disposées dans deux sens contraires selon une trajectoire hélicoïdale en surface du support béton.

Une simulation numérique du comportement de ces éléments est menée dans le but de montrer l'effet de ce type de confinement sur un prisme à section circularisée ainsi que l'apport de confinement quant la résistance à la compression des prismes modifiés confinés ainsi que leur ductilité. D'autant plus que ce procédé a fait ses preuves sur un cylindre en béton, où une amélioration a été constatée en termes de résistance et de ductilité.[54].

Le travail est scindé en quatre chapitres.

Introduction Générale

Dans le Chapitre I, nous avons présenté les propriétés du béton et celles des matériaux composites ainsi que les différents domaines dans lesquels ils sont utilisés.

Le Chapitre II, est consacré à la description du comportement du béton confiné. Une revue des travaux antérieurs y est également donnée.

Dans le Chapitre III, sont détaillées les étapes de la simulation numérique des prismes à section circularisée, confiné hélicoïdalement avec des bandes en PRFV.

Le Chapitre IV, donne les différents résultats de la simulation numérique, ainsi que leur discussion.

A la fin de ce travail, une conclusion générale est donnée.

Chapitre I
Le comportement des
matériaux

I-1-Introduction

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans monde aussi bien pour les constructions civiles qu'industrielles. Il est constitué essentiellement de sable, graviers, eau et ciment, ce qui fait de lui un matériau composite hétérogène. Il est caractérisé par son comportement dissymétrique en traction et en compression, de sorte qu'il présente une excellente résistance à la compression, mais une faible résistance à la traction.

Durant leurs durées de vie, les ouvrages en béton subissent des dégradations, des détériorations et des fissures qui sont dues aux différentes agressions extérieures et aux conditions d'environnement. Les principales causes de ces dégradations, sont liées aux phénomènes suivants : érosion, abrasion, chocs, action des cycles gel-dégel, altération physico-chimique du béton, retrait du béton, ...ect), ce qui engendre une dégradation et une diminution de la résistance et de la ductilité du béton. Des opérations de réparation ou de réhabilitation, de ces ouvrages, deviennent alors nécessaires, dans le but d'améliorer les performances mécaniques de ces ouvrages.

Le renforcement des éléments en béton par des matériaux composites, sert à augmenter le niveau de service des ouvrages en augmentant la ductilité et la résistance de ces éléments pour répondre à des nouvelles exigences d'exploitation ou des conditions non prévues à l'avance, pendant la phase de conception et de calcul. 35

Dans ce chapitre nous allons présenter les caractéristiques du béton et celles des matériaux composites.

I-2- Béton**I-2-1- Définition**

Le béton est un matériau hétérogène multiphasique poreux dont les constituants présentent des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques différentes. Il est constitué d'un mélange de granulats et d'une pâte, elle-même constituée par le mélange de ciment, d'eau et d'éventuels ajouts. Elle représente environ de 30% du volume total du béton.

Chaque constituant du béton a un rôle bien défini ; le ciment joue un rôle de liant hydraulique. Les granulats, qui représentent environ de 60% à 75% du volume de béton, forment le squelette du béton, lui confèrent leur compacité, participent à sa résistance mécanique et atténuent ses variations volumiques (retrait) lors du durcissement [4].

I-2-2- Composants du béton

a-Ciment

C'est un liant hydraulique, qui se présente sous forme d'une poudre minérale très fine s'hydratant au contact de l'eau, formant une pâte qui fait prise et durcit progressivement dans le temps. Il permet la cohésion des différents constituants du béton.

Les ciments courants sont constitués de clinker auquel il peut être ajouté, suivant leur type, du laitier de haut fourneau, des cendres volantes ou de la pouzzolane naturelle.

Le ciment présente plusieurs types :

a-1- Ciment portland artificiel : contient au moins 97% de clinker, le reste c'est du filler.

a-2-Ciment portland composé : contient au moins 65% de clinker le reste est de plusieurs constituant (du laitier, cendres volantes...etc.).

a-3-Ciment de haute fourneau : contient entre 60 et 75% de laitier, le reste est du clinker ou un filler dans la limite de 3% de l'ensemble des constituant.

a-4-Ciment de laitier au clinker : contient au moins 80% de laitier, le reste est de clinker ou un filler dans la limite de 3%.

Les ciments courants sont classés en fonction de leurs résistances mécaniques à la compression et sont représenté dans le tableau suivant :

Tableau I-1 : les classes de ciment courant en fonction de la résistance R

Classe des ciments	Résistance à 2 jours (Mpa)	Résistance minimale à 28 jours (Mpa)	Résistance maximale à 28 jours (Mpa)
32.5	/	≥ 32.5	≤ 52.5
32.5R	≥ 13.5	≥ 32.5	≤ 52.5
42.5	≥ 12.5	≥ 42.5	≤ 62.5
42.5R	≥ 20	≥ 42.5	≤ 62.5
52.5	≥ 20	≥ 52.5	/
52.5R	≥ 30	≥ 52.5	/

Les classes R rapides, présentent aux jeunes âges des caractéristiques mécaniques plus élevées et trouvent leurs intérêts particulièrement dans certaines circonstances.

b- Eau de gâchage :

C'est l'eau nécessaire pour l'hydratation du ciment. Elle facilite la mise en œuvre du béton. Le dosage et la qualité de l'eau a une influence sur les caractéristiques du béton, ainsi l'eau doit être propre et ne contient pas d'impuretés (matières organiques, alcalis) pour éviter le risque d'attaque chimique sur le béton de façon à modifier ses caractéristiques. Il est important de respecter le dosage en eau, au risque que le béton perde en résistance et en durabilité.

c-Adjuvants :

Les adjuvants sont des produits chimiques ou naturels, on les trouve sous forme liquide ou en poudres et poudres diluées dans l'eau, qu'on ajoute au béton frais ou durci avec un dosage faible qui ne dépasse pas 5% du poids de ciment (<5% de poids de ciment) pour modifier et améliorer les propriétés et les caractéristiques du béton.

Les adjuvants sont classés en trois types selon leurs fonctions :

-Les adjuvants qui modifient l'ouvrabilité du béton : plastifiants ou fluidifiants, réducteurs d'eau, super plastifiants.

-Les adjuvants qui modifient les temps de début et de fin de prise et du durcissement : Retardateurs de prise, les accélérateurs de prise, les retardateurs du durcissement et les accélérateurs du durcissement.

-Les adjuvants qui modifient certaines propriétés du béton : les entraîneurs d'air, les rétenteurs d'eau, les hydrofuges de masses, les produits de cure.

d-Granulats :

Les granulats sont éléments importants dans la composition du béton, ils sont constitués d'un ensemble de grains minéraux dont les dimensions varient entre 0 et 125mm. Ils peuvent être d'origine peut être naturelle ou artificielle. Ils représentent le squelette du béton puisqu'ils occupent environ 70% de son volume. Les granulats utilisés pour réaliser un béton doivent répondre à des critères de qualité et de régularité et doivent assurer un remplissage correct des coffrages et assurer un bon enrobage des armatures.

Les granulats sont classés en fonction de leur granularité, par l'analyse granulométrique, sur des tamis à mailles carrés dans une série normalisée. On distingue alors, les classes suivantes :

Fillers 0/D où $D \leq 2mm$ et contenant au moins 70% de passant à 0.063mm

Sablons 0/D où $D \leq 1mm$ et contenant moins de 10% de passant à 0.063mm

Sable 0/D où $D \leq 6.3mm$ sauf les sables pour béton où $D \leq 4mm$

Graves 0/D où $D \geq 6.3mm$

Gravillons d/D où $d \geq 1mm$ et $D \leq 31.5mm$

Cailloux d/D où $d \geq 20mm$ et $D \leq 125mm$

Les classes de granulats les plus utilisés dans la composition du béton sont les fillers, les sables, les gravillons, les graves

I-2-3- comportement mécanique du béton

Afin de mieux comprendre le comportement du béton qui est complexe, du fait de son passage de ce matériau hétérogène d'un état quasi liquide à un état solide, tout en continuant à évoluer dans le temps, nous allons nous pencher sur l'abondante littérature qui traite les principaux aspects du comportement mécanique de ce matériau. (Mazars et Bazant 1988, Terrien 1980).

I-2-3- 1-Comportement du béton en compression uni axiale

Afin d'évaluer la résistance et le comportement du béton à la compression, des essais d'écrasement sont conduits sur des éprouvettes normalisées en béton à l'aide d'une presse hydraulique. Les éprouvettes sont généralement de dimensions $\varnothing 16cm \times 32 cm$, d'une aire de $200 cm^2$.

L'allure générale de la courbe contrainte –déformation est donnée par la figure I-1

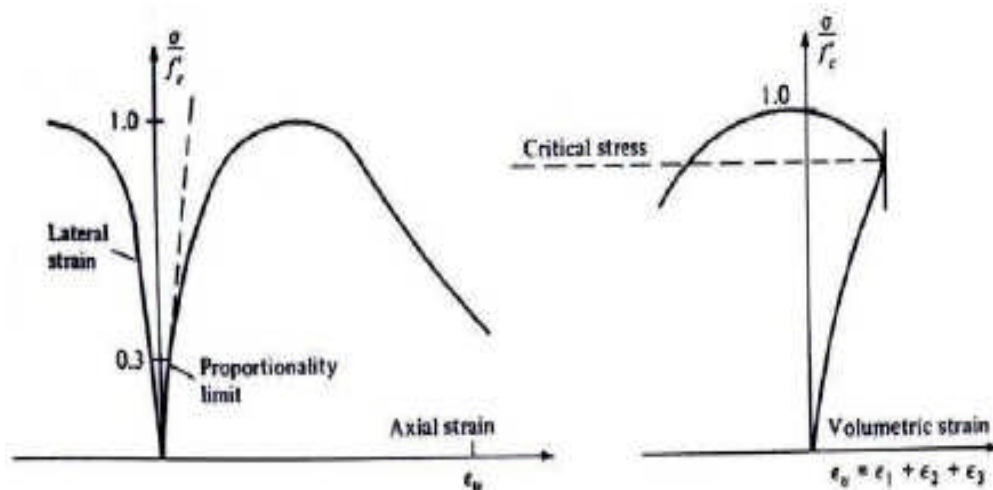


Figure I-1 Comportement du béton en compression simple[5].

La courbe est subdivisée en quatre phases comme suit [5]:

La phase 1 : Correspondre au comportement linéaire de béton jusqu'à 30%-40% de la limite en compression f_c

La phase 2 : A partir de ce point c.-à-d. de 30% , la courbe devient non linéaire jusqu'à 75% (allant à 90%) de la limite en compression simple f_c ce qui revient à l'apparition de l'irréversibilité des déformations.

La phase 3 : La courbe présente un pic suivi d'une branche poste- pic correspondant à un comportement adoucissant. Le coefficient de poisson évolue (figure I-1a)

La rupture apparaît progressivement au- delà du pic par coalescence de microfissure et augmentation de volume ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ sont les déformations de pression évolue -figure I-b).

I-2-3-2-Comportement sous une contrainte de confinement

Richart et al 1928, Balmer 1949, Jamet et al 1984 ont démontré que le béton présente un comportement fragile à l'application de la contrainte de confinement.

D'après la figure I-3 On constate que la réponse du béton est d'autant fragile que le confinement est important et que l'on obtient un comportement ductile pour très grands confinement.[5],[7].

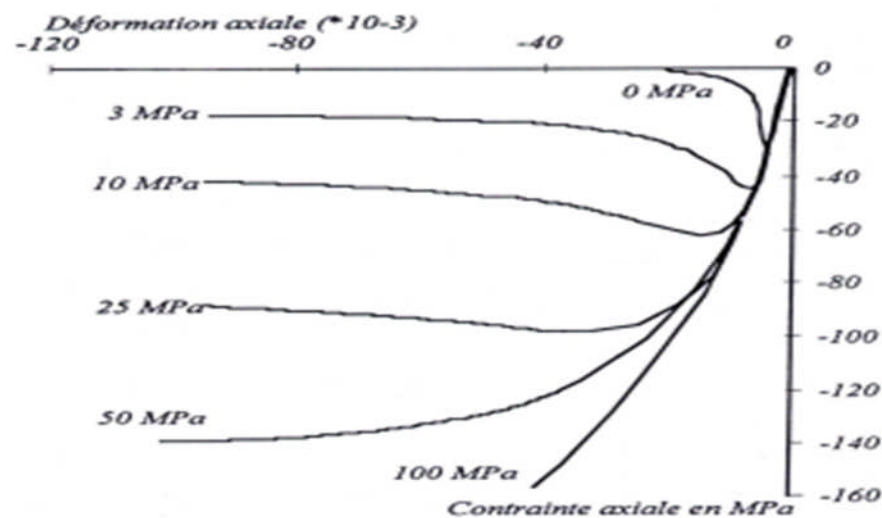


Figure I-2: Essais de compression triaxiale (Jamet & al. 1984)[6]

Ce gain de rigidité est liée à l'augmentation des contraintes au sien de la micro structure du matériau béton qui est une conséquence de la destruction des pores[5], [7].

I-3- Matériaux composites

I-3-1-Définition

Un matériau composite est un matériau hétérogène et constitué de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau de performances est supérieur à celles des constituant élémentaire qui ne les possèdent individuellement.

Les matériaux composites sont constitués d'une phase continue la « matrice » qui assure la cohésion et l'orientation des fibres et le transfert des contraintes au renfort et d'une phase discontinue qui est le « renfort » qui assure les propriétés mécaniques du composites comme la rigidité, la résistance et la dureté.[8]

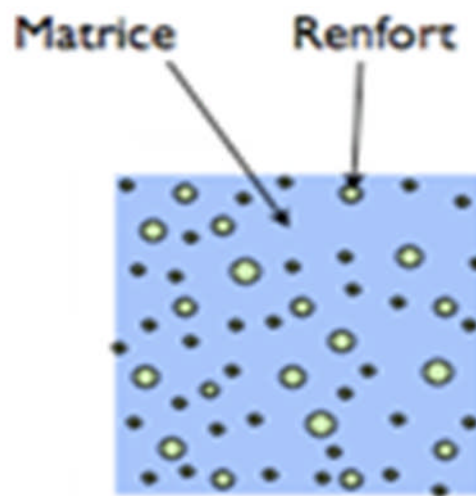


Figure I-3:Matériau composite [8].

I-3-2-Classification des matériaux composites [8]

a - selon la forme des constituants

Selon la forme des constituant, on distingue deux familles de composites :

a-1- Composites à fibres

Les fibres sont soit continues, soit discontinues, les propriétés sont modifiées par la nature des constituants, la proportion et l'orientation des fibres.

a -2- Composites à particules

Le renfort se trouve sous forme de particules, qui permettent d'améliorer la rigidité, la tenue à la température, la diminution de retrait, ect.

b-selon la nature des constituants (la matrice)

On distingue trois familles de composites qui sont classés suivant la nature de leur matrice, pour deux raisons :

- La matrice assure toutes les fonctions autres que la tenue mécanique
- Elle conditionne le choix du procédé de mise en forme.

b-1-Composites à matrice organique CMO

Ce sont les composites les plus répandus, vu leur faible coût de production. Les matrices employées dans cette famille de composites sont des résines polymères qui sont de deux types différentes : les thermoplastiques et les thermodurcissables. Pour les fibres qui peuvent être utilisées avec ces types de matrices, on peut citer : les fibres de verre, de carbone, d'aramide, et les fibres végétales.

Les composites à matrice organique sont principalement de deux types :

b-1-1- composites à grandes diffusion

Ce sont des composites à base de fibres de verres courtes noyées dans une matrice de type polymère ou bien des fibres de verre longues disposées en mats (sans orientation privilégiée). Ils ont comme avantage leur faible coût et ils représentent 95% des CMO fabriqués. Ils sont employés pour différentes pièces faiblement sollicitées.

b-1-2- composites à haute performance

Ces composites sont employés dans différents domaines tel que : l'aéronautique, le nautisme, les sports et loisirs, et dans la construction industrielle. Ils sont caractérisés par un taux de renfort de 50%. Les fibres employées dans ces composites sont longues et tissées ou empilées en plis unidirectionnels. Ces composites sont plus résistants par rapport aux matériaux conventionnels.

b-2-composites à matrice métallique(CMM)

Les composites à matrice métallique ont été élaborés pour associer les propriétés des métaux (ductilité, bonne tenue face au vieillissement et au feu) et les meilleures caractéristiques mécaniques propres aux structures composites ainsi que leur légèreté. Ces composites sont caractérisés par la matrice métallique qui possède de bonnes performances mécaniques, qui permettent d'avoir un bon comportement matriciel et de renforcer que certaines zones. Ce qui n'est pas le cas pour les matrices polymères qui sont caractérisées par leur faible résistance, et les matrices en céramique qui se caractérisent par leur fragilité.

La matrice utilisée pour les CMM est en métal léger (aluminium et ses alliages, magnésium, titane...) et le renfort noyé dans cette matrice est de deux types : soit des particules ou des fibres courtes céramiques et sont caractérisées par des performances mécaniques légèrement supérieures à celles du métal formant la matrice, ou bien des fibres

longues en céramique ou métalliques dont les propriétés sont supérieures à celles de la matrice.

b-3-Composites à matrice céramique

Ce sont des matériaux tenaces et moins fragiles comparativement aux céramiques massives qui sont, malgré leurs bonnes performances telle que : la résistance à des températures très élevée, la légèreté, la bonne stabilité mais comme tous les matériaux les céramiques possèdent des inconvénients tel que la fragilité, ce qui rend leur domaine d'application limité. C'est pour cela qu'on a recours aux CMC, où les céramiques sont enrichies de renforts, ce qui leur donne une meilleure résistance à la rupture. Les fibres utilisées ont un diamètre microscopique, il est possible de les fabriquer avec très peu de défauts, ce qui conduit à des contraintes de rupture plus élevées. Lorsque le composite se dégrade, les fissures ont tendance à suivre les interfaces situées entre les fibres et la matrice au lieu de se propager dans les fibres ; au lieu de rompre brutalement, le matériau se « désassemble » donc progressivement.

Les matériaux composites à matrice céramiques sont utilisés dans les applications à très haute température et dans l'aéronautique militaire et l'industrie spéciale et dans la conception d'organes haut de gamme comme des disques ou plaquettes de freins, mais leur utilisation est limitée vu leur coût de revient qui est très élevé.

I-3-3-Constituants des matériaux composites

Les matériaux composites sont constitués principalement d'une phase discontinue, le renfort qui est noyé dans une phase continue, la matrice. Parfois des charges sont rajoutés dans le but d'améliorer les propriétés du composite.

a- Renforts (les fibres) [9]

Les renforts assurent la tenue mécanique des composites (la résistance, la rigidité et la dureté) tel que la rigidité des matériaux composites dépend de la résistance de la fibre, le module d'élasticité de la fibre. Les renforts sont utilisés aussi pour améliorer certaines propriétés physiques (tenue à la température, résistance au feu, résistance à l'abrasion, conductivité électrique). Les renforts peuvent avoir plusieurs géométries et différentes natures (organique ou minérale).

La résistance et le module d'élasticité en tension dans le sens longitudinal d'un matériau composite sont les caractéristiques les plus importantes pour lesquelles la fibre du composite est choisie.

La rigidité des matériaux composites dépend principalement de:

- la résistance de la fibre,
- le module d'élasticité de la fibre,
- l'épaisseur du composite,
- le ratio fibre/matrice.

L'organigramme ci-dessous, résume les principales fibres utilisées comme renforts.

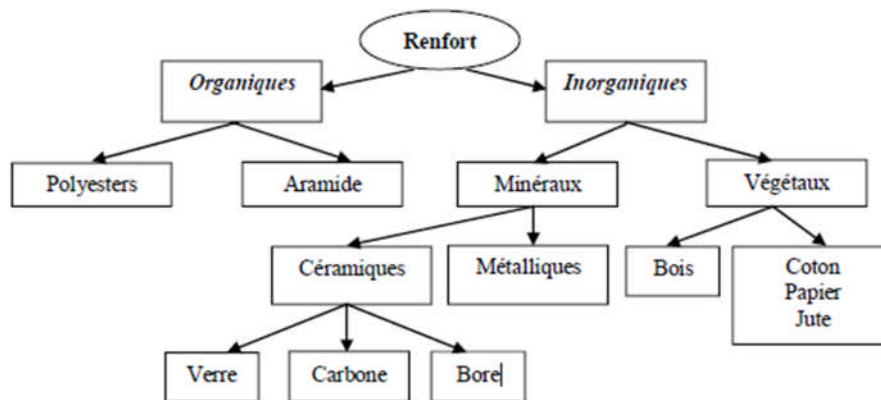


Figure I-4 : Organigramme illustrant les principaux matériaux de renfort [10].

Parmi les fibres les plus utilisées dans le génie civil, les fibres de carbone, de verre et d'aramide.

a-1- Fibres de carbone

Sont caractérisées par plusieurs propriétés intéressantes telles que :

- une grande résistance,
- faible masse volumique,
- une grande résistance à l'usure et à la fatigue,
- grande stabilité dimensionnelle et thermique,
- grande résistance à la corrosion vis-à-vis des acides, des bases, des sels et des produits organiques.[11]

Les fibres de carbones possèdent un haut module d'élasticité variant de 200 à 800 GPa et un allongement ultime allant de 0.3 à 2.5%, et sont de bons conducteurs électriques et thermiques mais elles ont un mauvais comportement au choc.[12]

On distingue deux types de fibres de carbone, les fibres de carbone à haute résistance issues de mise en œuvre par carbonisation et des fibres de carbone à haut module issues, d'une fabrication par graphitisation.

Les caractéristiques des fibres de carbone sont données dans le tableau suivant :

Tableau I-2 : Caractéristiques des fibres de carbone [9].

Caractéristiques	fibres de carbone haute résistance (HR)	fibres de carbone haut module (HM)
Pureté en carbone	97 à 98 %	99 %
Masse volumique ³ (kg/m ³)	1800	2100 à 2200
Résistance en traction (MPa)	3000 à 5000	2500 à 3000
Module en traction (GPa)	environ 250	environ 500

a-2- les fibres de Verre

Les fibres de verre sont à base de Silice (SiO₂) combiné avec d'autres éléments, elles sont fragiles et possèdent une rupture brutale et une déformation élastique [13]. Elles ont un module d'élasticité faible allant de 70 à 85 GPa, avec un allongement ultime de 2 à 5 %, et ont une grande densité. Elles sont aussi sensibles à l'humidité, mais lorsque le choix de la matrice est adéquat, les fibres sont protégées.[12] On distingue trois familles de fibres de verre :

- **Les fibres E** : pour les composites de grandes diffusion et les applications courantes.
- **Les fibres R** : pour les composites à hautes performances.
- **Les fibres D** : pour la fabrication des circuits imprimés (propriétés électrique).

a-3- les fibres d'Aramide

Les fibres d'aramide sont issues des polyamides aromatiques, elles possèdent des propriétés mécaniques élevées en traction et une bonne résistance au choc et à la fatigue. Les

fibres d'aramide ont des modules d'élasticité moyennement faibles variant de 70 à 200 GPa et un allongement ultime de 1.5 à 5 %. Leur utilisation dans le domaine de génie civil est limitée vu leur mauvaise tenue en température et leur sensibilité à l'humidité [12],[13].

Tableau I-3 : Caractéristiques moyennes des fibres et renforts [14].

Renforts	Diamètre du filament (µm)	Masse volumique (kg.m ⁻³)	Module d'élasticité longitudinal (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique °C ⁻¹
	d	Mv	E	G	k	C _r	A	α
Verre E	16	2 600	74 000	30 000	0,25	2 500	3,5	0,5*10 ⁻⁵
Verre R	10	2 500	86 000		0,2	3 200	4	0,3*10 ⁻⁵
Carbone HM	6.5	1 800	390 000	20 000	0,35	2 500	0,6	0,08*10 ⁻⁵
Carbone HR	7	1 750	230 000	50 000	0,3	3 200	1,3	0,02*10 ⁻⁵
Kevlar 49	12	1 450	130 000	12 000	0,4	2 900	2,3	-0,2*10 ⁻⁵
Bore	100	2 600	400 000			3 400	0,8	0,4*10 ⁻⁵
Silicate d'alumine	10	2 600	200 000			3 000	1,5	
Polyéthylène		960	100 000			3 000		

b- matrices

La matrice est liant qui assure la liaison et la disposition des renforts (fibres) tout en les protégeant des attaques physiques et chimiques. Elle transmet aussi les contraintes et les charges appliquées aux fibres. La classification des différents types de matrices est donnée par l'organigramme suivant :[8]

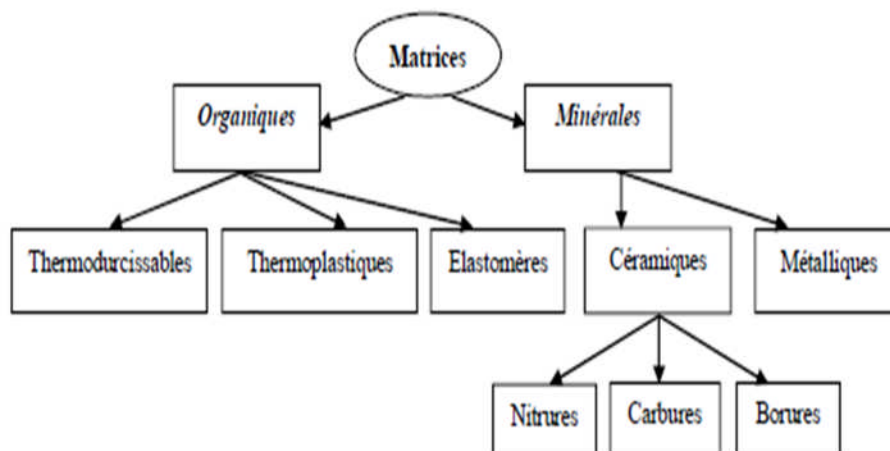


Figure I-5: Organigramme illustrant les différentes familles de matrice [10].

b-1-Les matrices organiques [8]

Les matrices les plus utilisés dans les composites sont : les thermodurcissables et les thermoplastiques qui possèdent des propriétés différentes :

b-1-1-Les résines thermodurcissables

Elles possèdent des propriétés mécaniques (résistance, rigidité), elles se trouvent sous forme d'un liquide visqueux, qui par ajout d'un durcisseur entraîne une solidification. Ces résines sont associées à des fibres longues .parmi les résines les plus utilisées (les polyesters insaturés, les époxydes, résines phénoliques, résine vinylesters,ect)[8].

➤ Les résines polyesters insaturé

Elles sont les plus utilisés dans les applications des composites à grande diffusion, elles se présentent sous forme d'une solution polyacide plus polyalcool qui se rigidifie sous l'action d'un catalyseur et de l'action de la chaleur [10].

Elles possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques (résistance chimique...etc.), et elles présentent une bonne tenue à la température, une facilité de mise en oeuvre, une bonne tenue à la température $>150^{\circ}\text{C}$, mais elles ont aussi une mauvaise tenue à la vapeur, un retrait de 6 à 15%.

Il existe plusieurs types de cette résine:

- Orthophtalique : la plus courante.
- Isophtalique : qui donne une meilleure tenue à l'humidité.
- Chlorée : apportant une auto extingüibilité .
- Bisphénol : possédant de bonnes caractéristiques chimiques et thermiques [15].

➤ Résines époxydes

Elles sont les plus utilisées dans l'aéronautique, êtres employées dans les applications des composites à hautes performances. Elles possèdent des propriétés mécaniques, chimiques et thermiques intéressantes. Elles présentent, en effet, une bonne résistance à la fatigue, un faible retrait, adhèrent très bien aux fibres. Elles présentent également une facilité de mise en oeuvre. Cependant, elles possèdent des inconvénients tels que : cout élevé, sensibilité au choc, long temps de polymérisation [13].

➤ Résine phénolique

Les résines phénoliques sont obtenues par la polycondensation du phénol et du formol, elles présentent une très bonne tenue au feu, sans fumée (d'où leur utilisation dans le ferroviaire). Elles sont fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à mettre en œuvre [14].

➤ **Résine vinylesters**

Les vinylesters sont des dérivés de polyesters et d'acide acrylique. Elles ont une bonne tenue à la fatigue et un bon comportement à la corrosion mais sont combustibles [14].

Les propriétés mécaniques des principaux types de matrices organiques sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau I-4 : Caractéristiques moyennes des matrices thermodurcissables (TD) non renforcées [14].

	Masse spécifique (kg/m ³)	Module Elasticité (Gpa)	Résistance Traction (Mpa)	Module d'allongement Rupture (%)	Tenue à la Température en Continu (°C)
Polyester	1.2	2.9-3.1	50-60	2-3	120
Epoxyde	1.1-1.4	3	50-120	3-8	150-200
Vinylester	1.1	3.4-3.5	70-85	2-5	100-140
Polyamide	1.4-1.5	4-20	30-40	<1	250-300
Phénolique	1.3	3.8-7	50	1-1.5	120-150

b-1-2- Résines thermoplastiques (TP) :

Les résines thermoplastiques sont associées à des fibres courtes et ont une structure linéaire. Ce sont des résines solides qui nécessitent une transformation à très haute température. Elles possèdent des propriétés mécaniques faibles mais elles sont ductiles donc elles résistent mieux à la fissuration [8].

Les principales matrices TP utilisées sont les suivantes : [17].

- Polyamide (PA) : ont une tenue au choc, une bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures ;
- Polytéraphthalate éthylénique et butylénique (PET, PBT) : ont une bonne rigidité, une bonne ténacité ;
- Polycarbonate (PC) : ont une bonne tenue au choc ;
- Polysulfure de phénylène (PPS) : résistent à l'hydrolyse ;
- Polyoxyméthylène (POM) : ont une bonne tenue à la fatigue ;

- Polysulfurés (PSU et PPS) : Ont une bonne stabilité chimique et à l'hydrolyse, présentent peu de fluage et une bonne tenue à la chaleur.
- Polypropylène (PP) : sont peu onéreuses et assez stables en température, mais sont combustibles.

De plus en plus, on utilise des thermoplastiques thermostables (tenue en température > 200 °C et bonnes propriétés mécaniques), en particulier les suivants :

- Polyamide-imide (PAI) ;
- Polyéther-imide (PEI) ;
- Polyéther-sulfone (PES) ;
- Polyéther-éther-cétone (PEEK).

Le tableau suivant montre les caractéristiques moyennes des matrices thermoplastiques non renforcées.

Tableau I-5 : Caractéristiques moyennes des matrices thermoplastiques non renforcées [15].

Polymère	Masse spécifique (kg/dm ³)	Résistance à la traction (Gpa)	Module de flexion (Gpa)	Tenue à la chaleur continue (°C)
Polypropylène (PP)	1,1-1,2	20-30	1-1,6	85-115
Polytéréphtalate butylénique (PBT)	1,5	45-55	2,2-2,6	120
Polytéréphtalate éthylénique (PET)	1,6	55-75	2-2,2	105-120
Polyoxide de phénylène (PPO-)	1,3	55-65	2,4-2,6	80-105
Polyoxyméthylène (POM)	1,6	60-70	7-9	95-105
Polyamides (PA)	1,3-1,4	60-90	6-9	80-120
Polyamide-imide (PAI)	1,3-1,4	195	4,9	275
Polyéther-imide (PEI)	1,5	105	3	170
Polyéther-sulfone (PES)	1,6	85	2,6	180
Polyéther-éther-cétone (PEEK).	1,5	100	3,7	>240

b-2- Matrices métalliques

L'utilisation des matrices métalliques est encore actuellement en grande partie à un stade préindustriel. Plusieurs matériaux composites tels que ; l'Aluminium et ses alliages, Nickel, Titane, présentent une bonne conductibilité électrique et thermique, une bonne tenue à des températures élevées et de plus ils possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques transverses. Leur fabrication conduit à des coûts très élevés[13].

b-3-Matrices céramiques

Les matériaux utilisés sont les carbures de silicium et de carbone. Elles sont utilisées pour la fabrication des pièces qui subissent des contraintes d'origine thermique et leur coût est très élevé [13].

I-3-4- structures composites

I-3-4-1- Stratifiés

Le stratifié est constitué de couches successives de renfort imprégné de résine. Les structures stratifiées obtenue à partir des matériaux composites sont sous forme d'empilement de nappes, unidirectionnel ou bi -dimensionnel et l'orientation des fibres est fonction des charges qu'elles doivent subir [16].

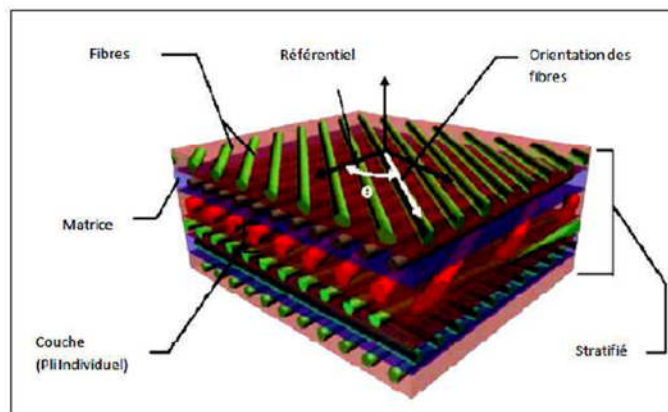


Figure I-6 : composite stratifié [17].

I-3-4-2- sandwichs

Les structures composites de type sandwichs sont constituées principalement d'une âme que se situe entre deux peaux. Les âmes sont de plusieurs types et les plus employés sont de type nid d'abeilles, âme ondulée ou mousse et pour les peaux ce sont des stratifiées

Les structures sandwichs subissent des sollicitations de flexion et de torsion, le rôle de l'âme est de reprendre et résister aux contraintes de cisaillement et de compression hors plan, par contre les peaux reprennent les sollicitations dans leurs plans [16].

I-3-5- Avantages et inconvénients des matériaux composites

Les composites sont préférés à d'autres matériaux parce qu'ils offrent des atouts liés à:

- leur légèreté,
- leur résistance la corrosion et aussi à la fatigue,

- leur insensibilité aux produits comme les graisses, les liquides hydrauliques, les peintures et les solvants,
- leur possibilité de prendre plusieurs formes, d'intégrer des accessoires et permettre la réduction de bruit,

Cependant certains inconvénients freinent leur diffusion:

- les coûts des matières premières et des procédés de fabrication;
- la gestion des déchets engendrés et la réglementation de plus en plus stricte[18].

I-3-6-Mécanisme de rupture des matériaux composites

On appelle mécanismes primaire de l'endommagement potentiel d'un matériau hétérogène, notamment les composites à base polymères soumis à une sollicitation mécanique, l'endommagement des fibres, de la matrice, ou la décohésion entre ces deux derniers.

Les premiers endommagements observés à l'échelle microscopique apparaissent au niveau de la matrice de composite aux environs de tiers de la charge à la rupture, L'endommagement des renforts ne se produit qu'au moment de la rupture. Entre ces deux stades d'endommagement, il existe un troisième qui résulte de l'interaction fibre-matrice qui est la fissuration de l'interface (figure I-7) [19].

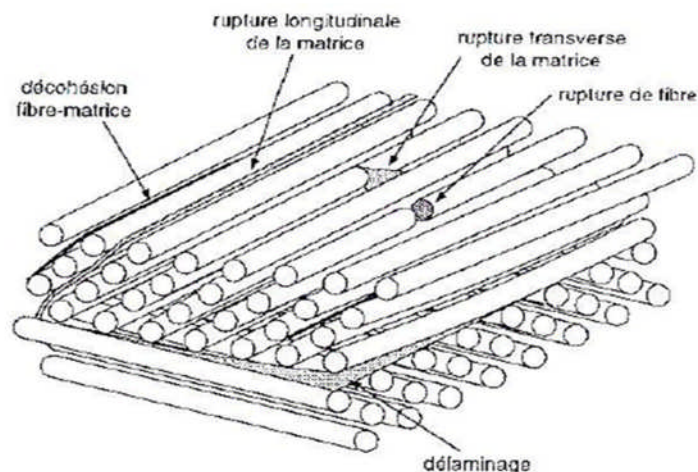


Figure I-7: Mécanismes d'endommagement observés dans un composite[19].

L'assemblage de ces divers mécanismes élémentaire conduit le matériau à la rupture finale ces mécanismes s'étendent suivant la rupture du matériau et les conditions de sollicitation imposé [19].

I-3-7- Critères de la Rupture

Les critères de rupture ont pour objectifs de permettre au concepteur d'avoir une évaluation de la résistance mécanique des matériaux.

D'une manière générale, la résistance mécanique d'un matériau correspond à une dégradation irréversible, soit à la rupture réelle du matériau, soit à la limite du domaine élastique. Ils sont classés comme suit :[9]

I-3-7-1- matériaux anisotropes [9].

a-Critère de la Contrainte maximale

Le critère de la contrainte maximale dans les axes principaux stipule que la résistance mécanique de la couche est atteinte lorsque l'une des trois contraintes planes ($\delta_L, \delta_T, \delta_{LT}$) auxquelles une couche est soumise atteint la valeur de la contrainte à la rupture correspondante.

Le critère de la contrainte maximale s'écrit sous la forme :

$$X_c < \sigma_L < X_t$$

$$Y_c < \sigma_T < Y_t$$

$$S < \sigma_{LT} < S$$

I-1

Ou :

- X_t, X_c : les contraintes à la rupture suivant l'axe longitudinal respectivement en traction et compression.
- Y_t, Y_c : La contrainte de rupture suivant l'axe transversal respectivement en traction et en compression.
- S : La contrainte à la rupture en cisaillement dans le plan de la couche où les axes longitudinal et transversal sont les axes principaux de la couche .

Si les six inéquations sont vérifiées, alors l'état de contrainte limite n'est pas atteint, dans ce cas la rupture de la couche n'est pas produite .mais si l'une de ces inéquations n'est

plus vérifiées, l'état limite est atteint la rupture se produit suivant la mécanique correspondant à la contrainte de l'inéquation non vérifiée.

Dans le cas où l'état des contraintes est exprimé dans d'autres axes de référence il faut se ramener aux axes principaux par une rotation d'angle θ .

Dans ce cas, le critère de rupture s'exprime sous la forme :

$$\begin{aligned} X_c &< \sigma_{XX} \cos^2 \theta + \sigma_{YY} \sin^2 \theta + 2 \sigma_{XY} \sin \theta \cos \theta < X_t \\ Y_c &< \sigma_{XX} \sin^2 \theta + \sigma_{YY} \cos^2 \theta - 2 \sigma_{XY} \sin \theta \cos \theta < Y_t \\ S &< (\sigma_{YY} - \sigma_{XX}) \sin \theta \cos \theta + \sigma_{XY} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) < S \end{aligned} \quad \text{I.3}$$

b -Critère de la déformation principale

Ce critère consiste à borner les déformations de façon que la résistance mécanique à la rupture lorsqu'une des déformations principales atteint la déformation à la rupture correspondante [9].

Le critère de la déformation maximale s'écrit :

$$\begin{aligned} X_{\varepsilon_c} &< \varepsilon_L < X_{\varepsilon_t} \\ Y_{\varepsilon_c} &< \varepsilon_T < Y_{\varepsilon_t} \\ S_{\varepsilon} &< \gamma_{LT} < S_{\varepsilon} \end{aligned} \quad \text{I.4}$$

Où :

X_{ε_t} (X_{ε_c}) : la déformation à la rupture en traction (ou en compression) suivant l'axe longitudinal.

Y_{ε_t} (Y_{ε_c}) : la déformation à la rupture en traction (ou en compression) suivant l'axe transversal.

S_{ε} : la déformation à la rupture en cisaillement dans le plan de la couche.

c-Critères interactifs [9]

Ils existent plusieurs critères interactifs tels que le critère de Hill, critère de Tsai Hill, et le critère d'Hoffman qui sont créés pour améliorer les critères de contraintes maximales et de déformation maximales qui ne prennent pas en compte les résultats expérimentaux et

l'existence d'interactions s entre les contraintes et les déformations dans les axes des matériaux .ils sont appliqués pour les matériaux orthotrope.

c-1-le critère de Hill :

C'est le premier critère interactif de rupture appliqué aux matériaux anisotrope,L'état limite de contrainte d'un matériau anisotrope n'est pas atteint si l'inégalité suivante est vérifiée :

La rupture du matériau se produit lorsque l'égalité suivante est vérifiée :

$$\left(\frac{\sigma_L}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{T'}}{Z}\right)^2 - \left(\frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2}\right)\sigma_L\sigma_T - \left(\frac{1}{X^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{Y^2}\right)\sigma_L\sigma_{T'} - \left(\frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{X^2}\right)\sigma_T\sigma_{T'} + \left(\frac{\sigma_{LT}}{S_{LT}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{LT'}}{S_{LT'}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{TT'}}{S_{TT'}}\right)^2 = 1 \tag{I.14}$$

Cette égalité est liée aux axes principaux (L, T, T')du matériau

Dans l'état de contrainte planes dans le plan (L,T) de la couche de matériau composite :

$\sigma_{T'} = \sigma_{LT'} = \sigma_{TT'} = 0$ Donc le critère de Hill s'écrit sous la forme simplifiée suivante :

$$\left(\frac{\sigma_L}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{Y}\right)^2 - \left(\frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2}\right)\sigma_L\sigma_T + \left(\frac{\sigma_{LT}}{S_{LT}}\right)^2 = 1$$

c-2-Critère de Tsai- Hill

Azzi V.D et Tsai S.W. ont simplifié le critère de Hill dans le cas d'un état de contrainte planes, ils ont considéré le cas des matériaux composites unidirectionnels.

Dans ce cas : $Z=Y$ et le critère s'écrit comme suit :

$$\left(\frac{\sigma_L}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{Y}\right)^2 - \frac{\sigma_L\sigma_T}{X^2} + \left(\frac{\sigma_{LT}}{S_{LT}}\right)^2 = 1 \tag{I.16}$$

Dans le cas d'une traction ou d'une compression en dehors des axes les matériaux, le critère de Tsai Hill s'écrit comme suit :

$$\frac{\cos^4\theta}{X^2} + \left(\frac{1}{S_{LT}^2} - \frac{1}{X^2}\right)\sin^2\theta\cos^2\theta + \frac{\sin^4\theta}{Y^2} = \frac{1}{\sigma_{xx}^2} \tag{I.17}$$

c-3-Critère de Hoffman

Ce critère est une généralisation de critère de Hill, il tient compte de la différence du comportement des matériaux en traction et en compression, le critère d'Hoffman considère la rupture de matériau lorsque l'égalité suivante est vérifiée : [9]

$$C_1(\sigma_T - \sigma_{T'})^2 + C_2(\sigma_{T'} - \sigma_L)^2 + C_3(\sigma_L - \sigma_T)^2 + C_4\sigma_L + C_5\sigma_T + C_6\sigma_{T'} + C_7\sigma_{TT'}^2 + C_8\sigma_{LT'}^2 + C_9\sigma_{LT}^2 = 1 \quad \text{I.18}$$

Les constants C_1 à C_9 sont des caractéristiques du matériau et reliées aux contraintes à la rupture du matériau.

Dans le cas d'un état de contrainte planes dans le plan (L, T) le critère d'Hoffman s'écrit comme suit :

$$\frac{\sigma_L^2}{X_t X_c} + \frac{\sigma_T^2}{Y_t Y_c} - \frac{\sigma_L \sigma_T}{X_t X_c} + \frac{X_c - X_t}{X_c X_t} \sigma_L + \frac{Y_c - Y_t}{Y_c Y_t} \sigma_T + \frac{\sigma_{LT}^2}{S_{LT}^2} = 1 \quad \text{I.20}$$

I-3-7-2-Les matériaux isotropes [9]

Il existe un grand nombre de critères, certains sont valables pour des matériaux isotropes fragiles (fontes, béton), d'autres, pour des matériaux ductiles (alliages cuivreux, alliages d'aluminium, aciers doux). Il n'existe pas de critères universels valables pour tous les matériaux.

a-Critère de Rankine

Ce critère s'applique plutôt aux matériaux fragiles. Ce critère considère que la limite d'élasticité (ou de rupture) est atteinte lorsqu'une, au moins, des contraintes principales atteint une valeur limite obtenue par test uni-axial, de traction ou de compression :

$$\sup(\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}) \leq \sigma_{Te} \quad \text{I-21}$$

b-Critère de Tresca

Ce critère s'applique plutôt aux matériaux ductiles. Des essais sur des matériaux ductiles confirment que le début de la plastification en traction a lieu suivant des plans inclinés à 45° par rapport à la direction de chargement. Cette direction correspond à un état de contrainte de cisaillement maximum. Si τ_e est la contrainte tangentielle de cisaillement, alors :

$$\frac{1}{2} \sup|\sigma_I - \sigma_{III}| \leq \tau_e \quad \text{Ou} \quad \sup|\sigma_I - \sigma_{III}| \leq \sigma_e \quad \text{I-22}$$

c-Critère de Von Mises

Ce critère s'applique également aux matériaux ductiles. Notant qu'un état de contrainte hydrostatique change seulement le volume et non la forme du matériau, la partie hydrostatique du tenseur des contraintes est telle que :

$$\sqrt{\frac{3}{2} \text{tr}(\sigma_D, \sigma_D)} \leq \sigma_e \quad \text{Avec} \quad \sigma_{ijD} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \text{tr}(\sigma) \delta_{ij} \quad \text{I-23}$$

Et :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} \text{tr}(\sigma_D, \sigma_D)}$$

$$\sigma_D = \sigma - \frac{\text{tr}(\sigma)}{3} \bar{I}$$

I-3-8- Le renforcement par Polymères renforcés de fibres « PRF »

Le renforcement des structures se fait pour améliorer les performances mécaniques (la rigidité, la résistance, la ductilité) de ces dernières qui se sont dégradées durant leurs durées de vie. Le renforcement peut être réalisé par plusieurs techniques, et parmi les plus utilisés, le collage des plaques en aciers sur les éléments de structures concernés. Cependant vu l'inconvénient majeur de l'emploi de l'acier qui est la corrosion, les plaques d'aciers sont remplacées par des plaques en PRF. [20]

Les PRF sont des matériaux composites constitués principalement de fibres (verre, carbone et d'aramide) ayant une grande résistance imprégné dans une matrice (polymère, vinylester, époxyde...) formant un pli et la superposition de plusieurs plis forme un laminé, l'orientation des plis peut être selon une direction (les fibres sont orienté dans une seule direction), ou selon plusieurs directions préférentielles comme les tissés, ou bien sans aucune direction préférentielle comme les mat. [20]

Les PRF possèdent des propriétés intéressantes qui peuvent être résumées comme suit : [21]

- une grande résistance à la traction (1000 à 2500 MPa),
- une rigidité de 100 à 300 GPa ,
- une faible densité,
- l'absence de la corrosion,

- une Bonne résistance à la fatigue,

Comme tous les matériaux les PRF possèdent aussi des inconvénients tels que :

- une anisotropie très marquée.
- un comportement à la rupture de type fragile.
- un prix de matière élevé comparé à celui de l'acier.

I-4-Utilisation des matériaux composites « PRF » dans le génie civil

Les matériaux composites du type polymère renforcé de fibres «PRF», vu leur performances élevées, sont utilisés dans plusieurs renforcements des structures ou des éléments structuraux tel que : le renforcement des piles de ponts, de cheminées, de poutres, de poteaux, de dalles, de colonnes de tabliers de ponts. [20]

I-5-Courbe contrainte déformation types du béton confiné

La Figure présente la courbe contrainte déformation du béton confiné par PRF dépend en grande partie du pourcentage de la surface enveloppée. Pour des niveaux de contraintes faibles, la réponse du béton confiné est semblable à celle du béton non confiné, par contre lorsque la contrainte dépasse la limite de rupture du béton ordinaire, le PRF se trouve mobilisé et la courbe présente un deuxième tronçon linéaire ascendant jusqu'à la rupture du PRF. Ceci traduit le phénomène de confinement [22].

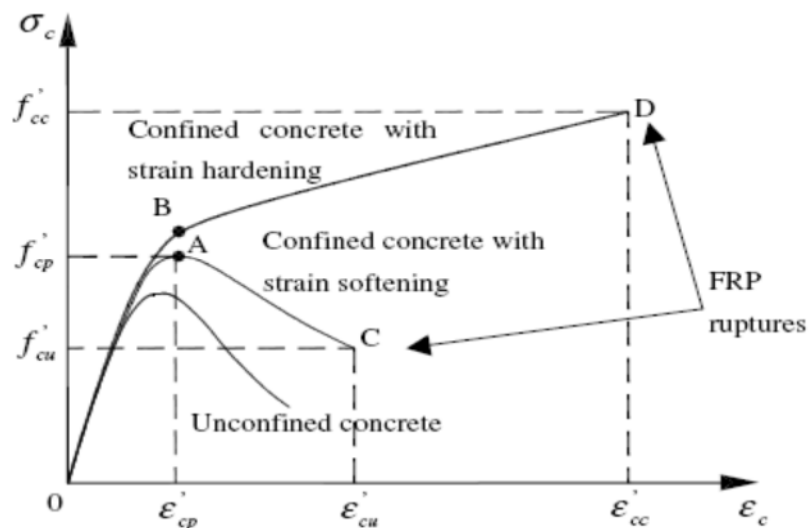


Figure I-8: Courbe contrainte-déformation d'un béton confiné par PRF[23].

Deux aspects du confinement apparaissent; lorsque le niveau de confinement est faible, les déformations engendrées avoisinent les déformations ordinaires, ce que l'on appel

couramment « softening strain » [22],[23] et lorsque le confinement est élevé, nous sommes dans ce cas, en présence de grandes déformations, on parle alors de « strain-hardening ».

I-6- Conclusion

Les différentes caractéristiques des matériaux (béton et composites) sont bien détaillées. Les composites, lorsqu'ils sont collés au béton, lui confère leurs performances plus qu'intéressantes et lui permettent de ce fait, d'améliorer son comportement face aux sollicitations auxquelles il est soumis.

Chapitre II : confinement du béton avec PRF

II-1- Introduction

Dans le but d'améliorer les propriétés mécaniques des structures en béton armé en terme de résistance , ductilité et rigidité qui se sont dégradées durant la durée de vie des ouvrages sous l'effet des sollicitations sismiques ,vieillessement et agressions de l'environnement de l'ouvrage .plusieurs techniques de réhabilitations sont apparues de réhabilitation et de renforcement des structures ou des éléments de ces derniers. le collage des éléments en aciers sur les faces des élément reste la première technique utilisée dans le renforcement des structures .cependant, l'acier présente plusieurs inconvénients, comme sa grande sensibilité à la corrosion, son poids élevé et sa grande rigidité. Plusieurs recherches sont effectuées pour trouver une solution alternative à l'utilisation de l'acier c.-à-d. Un matériau non corrosif, léger, et très résistant .les efforts consentis dans ce sens, ont abouti à la découverte des composites en PRF qui possèdent les caractéristiques requises.

II-2-renforcement de quelques éléments des structures par les matériaux composites

Le renforcement par les matériaux composites est de plus en plus utilisé au génie civil, cela est due à leurs caractéristiques intéressantes qui confèrent aux structures en béton armé leur rigidité, leur résistance et leur ductilité.

➤ Les poutres :

La poutre se calcule à la flexion ,donc le renforcement des poutre est dans le but d'améliorer la résistance à la flexion, et le renforcement par collage externe des plaques fines en PRF sur les faces dégradé de la poutre et pour avoir un bon renforcement et il faut former une surface uniforme et une bonne liaison entre les plaques en PRF et le béton pour cela il nécessaire de préparer la surface concerné en enlevant la couche faible de béton pour la rendre adéquate.[24], [25]

La figure suivante présente une poutre renforcée par des lamelles en PRF

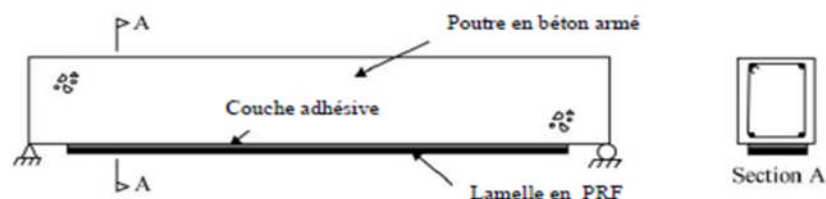


Figure II-1: Une poutre en béton armé renforcée par une lamelle en PRF [25].

Le gain de la capacité portante et la réduction de la ductilité sont les deux conséquences principales du renforcement des poutres par des plaques en PRF et la figure suivante montre ça. Comparant la poutre témoin à la poutre renforcé par PRF la poutre renforcé a enregistré un gain de force de 76 % et une réduction de la ductilité.

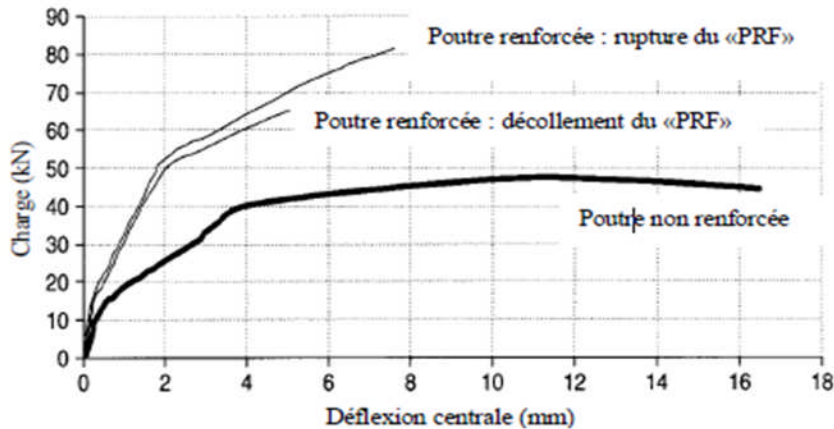


Figure II-2: Courbe typiques de charge-déflexion des poutres en béton armé renforcées et non renforcées avec des matériaux composites «PRF» [25].

➤ Les dalles

Le renforcement des dalles simplement appuyées par « PRF » se réalise par collage de bandes ou de lamelles en PRF sur la face tendue de la dalle. Pour celle travaillant dans les deux sens on utilise des lamelles croisées figure (II-3a) ou bien des « PRF » avec des fibres dans les deux directions. D'autre part, le renforcement d'une dalle en béton armé travaillant dans les deux sens peut être concentré dans la région centrale ou dans la région des moments maximaux selon les besoins de renforcement mais dans ce cas les bandes/lamelles de «PRF» sont terminées loin des bords de la dalle (Figure II-3b)[25].

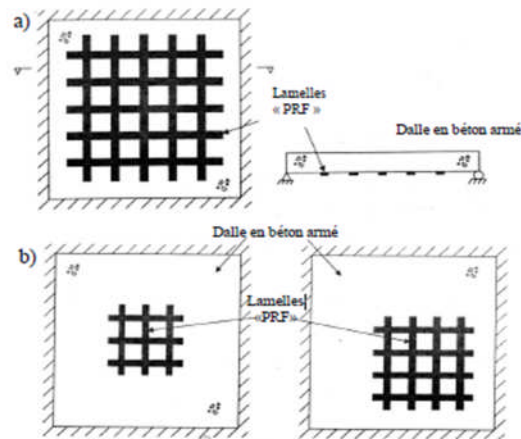


Figure II-3: Renforcement d'une dalle travaillant dans les deux sens par des lamelles en «PRF»: (a) dans les deux directions, (b) concentrées en petites régions ciblées

[25]

➤ **Les colonnes :**

Ils existent plusieurs techniques de réhabilitations des colonnes en béton armé par les matériaux composites PRF. Les méthodes de renforcement peuvent être classés en trois catégories en fonction de la méthode adoptée pour construire le composite PRF à savoir, la stratification au contact, l'enroulement filamentaire et le chemisage par coquille préfabriquée en PRF. Une colonne peut être enveloppée entièrement par des tissus PRF avec une ou plusieurs couches, ou partiellement par des bandes en PRF sous forme d'une spirale continue ou des anneaux discrets.[12]

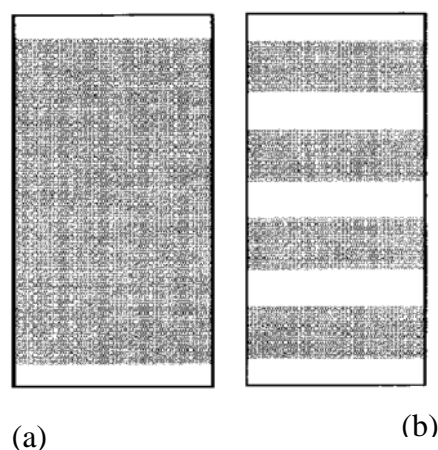


Figure II-4: Les méthodes typiques d'envelopper le «PRF» pour les colonnes en B.A ; (a) enveloppée totalement en utilisant des tissus «PRF», et (b) partiellement enveloppée en utilisant des lanières «FRP» sous forme d'anneaux discrets.[12]

II-3-Méthodes de confinement des colonnes**II-3-1- Stratification au contact**

Dans cette méthode, les draps de fibres unidirectionnelles ou tissées sont imprégnés par les résines du polymère et enveloppés ensuite autour des colonnes dans un processus de moulage au contact, avec l'orientation des fibres principales dans la direction de confinement [12].



Figure II-5: Stratification au contact. [26]

II-3-2- Enroulement filamentaire

C'est une technique effectuée pour la première fois par Fardis et Khalili en 1981, elle utilise la fibre continue pour que l'enroulement des filaments puisse être traité automatiquement par la machine contrôlée par ordinateur, cette technique se caractérise par la précision de l'épaisseur du PRF, l'orientation de la fibre et le contrôle de la fabrication du volume ce qui donne une meilleure performance [12].

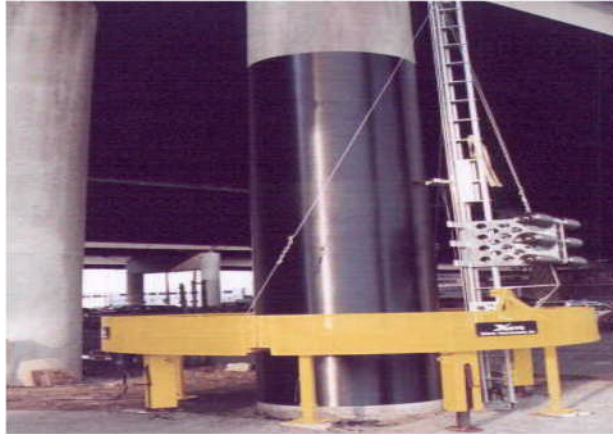


Figure II-6:procédé de l'enroulement filamentaire [27]

II-3-3- Chemisage par coquille préfabriquée en PRF

C'est une méthode utilisée pour le renforcement des colonnes et les poteaux en béton armé par des chemises sous forme de coquilles préfabriquées en PRF .Elles sont fabriquées par l'utilisation de fibres en voile ou en bandes avec l'imprégnation de résine effectuée avant l'installation .Elles peuvent être présentée sous forme de demi cercle ou de demi rectangle[27],de cercle avec une fente ou rouleaux continus[28].pour Qu'elle puissent être placées autour des colonnes

Pour avoir un confinement parfait, il est nécessaire d'assurer un contact total entre la colonne et la coquille en PRF en liant la coquille à la colonne par des adhésifs ou en injectant un coulis ou mortier de ciment dans l'espace entre la colonne et la coquille.[12]

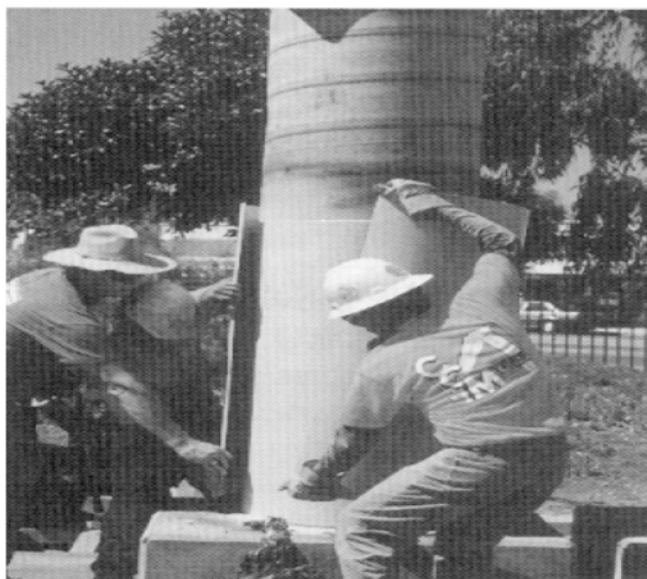


Figure II-7: Chemisage par coquille préfabriquée en PRF[30].

II-4- Comportement du béton confiné sous compression axial

Le confinement du béton par matériaux composites PRF donne des modules d'élasticité et des rigidités variés pouvant modifier le comportement axial et radial du béton confiné. Quand le béton est soumis à une compression axiale, ce dernier se déforme latéralement produisant des fissures qui se propagent avec l'accroissement de la charge ce qui conduit finalement à la rupture du béton. Si le béton est retenu latéralement cette déformation sera réduite, la résistance du béton et sa ductilité seront augmentées, ce phénomène est appelé confinement du béton

Plusieurs auteurs ont prouvé que le confinement des colonnes de béton soumises à la charge de compression axiale augmente considérablement la contrainte et la ductilité de ces colonnes [31],[22],[33],[34],[35]. La figure II-8 présente les courbes typiques contraintes déformations pour des bétons confinés et non confinés. Cette figure met en évidence les différences de comportement entre ces deux bétons.

Le confinement augmente en général deux caractéristiques du béton: la résistance en compression $f_{cc} > f_{co}$ et la déformation correspondant à la contrainte ultime de compression $\epsilon_{cc} > \epsilon_{co}$, il augmente aussi de façon considérable le pouvoir absorbant d'énergie du béton. Ainsi dans des régions sismiques, le renfort est fourni pour confiner le béton et par conséquent pour augmenter la ductilité des colonnes et des poutres *Sheikh, S. A., et Uzumeri, S. M, May* .[36]

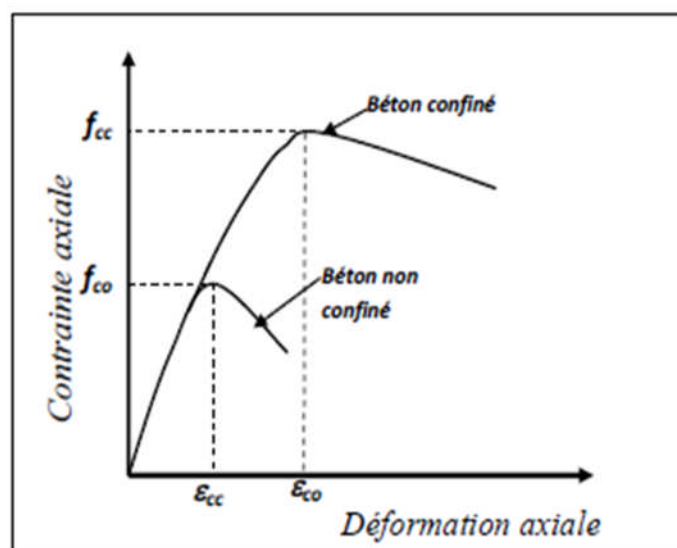


Figure II-8 : Courbes contraintes-déformations d'un béton confiné et non confiné [36] .

La figure suivante montre l'effet de la pression de confinement sur le comportement du béton sous la charge de compression axiale. *Richart, Brantzaeg et le Brown* [37], ont signalé que la pression de confinement latérale augmente considérablement la force et la rigidité des cylindres de béton et augmente la contrainte à laquelle l'effort maximal est atteint. Les pressions de confinement latérales réduisent la tendance pour l'augmentation interne de fissuration et minimisent leur propagation, de ce fait on aura une augmentation de la résistance et de la ductilité du béton confiné.[39]

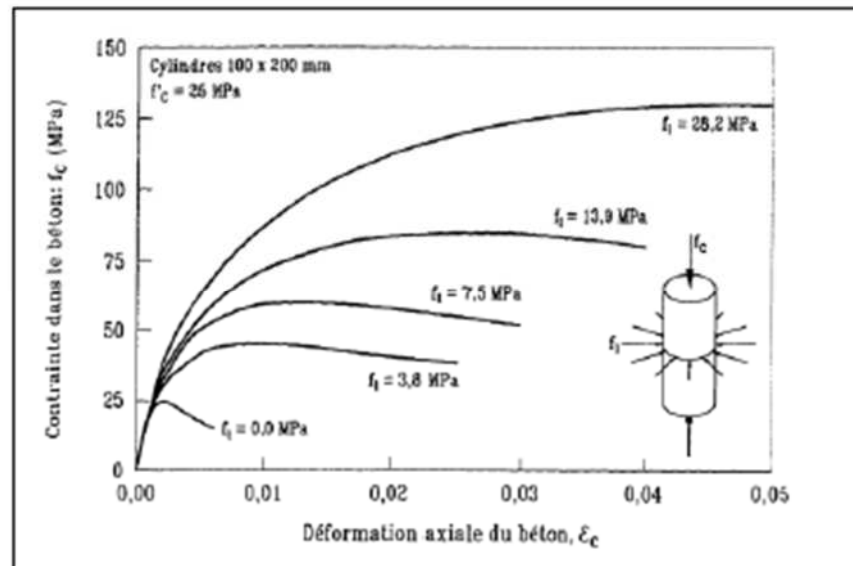


Figure II-9-Effet de la pression de confinement sur le comportement en compression du béton [38]

II-5- Travaux expérimentaux effectués sur le confinement des colonnes

Toutes les recherches et les essais effectués dans ces travaux expérimentaux ont pour but d'étudier le comportement mécanique des éléments structuraux en béton armé et particulièrement les colonnes en béton après leur réhabilitation par les matériaux composites et d'évaluer leur résistance et leur ductilité après renforcement.

a - Saafi et al(1999) [39].

Des recherches expérimentales et analytiques pour évaluer les performances des colonnes de béton confinées avec des tubes de CFRP et de GFRP, pour cela ils ont effectués des essais de compression sur 30 cylindres de dimension de 435mm de hauteur et 154 de diamètre (18 cylindres confinés par des tubes en FRP et 12 autres témoins)qui ont donné les résultats suivants :

- Amélioration de la résistance et de la ductilité dans les colonnes confinées comparativement à celle non confinée
- La rupture simultanée et soudaine du tube composite et l'écrasement du noyau de béton.

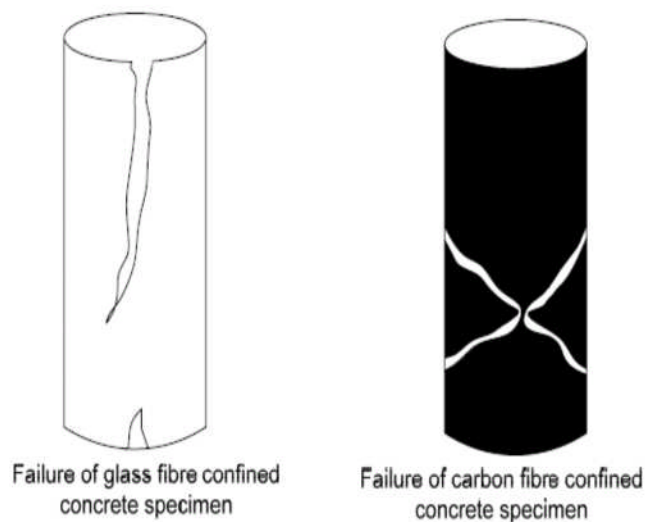


Figure II-10: Modes de rupture des spécimens [39].

La figure suivante présente la courbe contrainte déformation du béton confiné par des tubes FRP est sous forme bilinéaire dans les deux directions axiales et latérales.

La 1^{ère} zone : dans cette zone le béton pris la charge axiale, et les deux bétons confiné et non confiné ayant une même pente. une zone e transition apparaisse dans la deuxième partie de la zone bilinéaire aux niveaux de l'effort près de l'effort ultime du béton non confiné.

La deuxième pente est fonction de la rigidité du tube en FRP dans lequel le point de courbure entre les pentes se situe au niveau de l'effort légèrement plus haut que la résistance du noyau de béton non confiné.

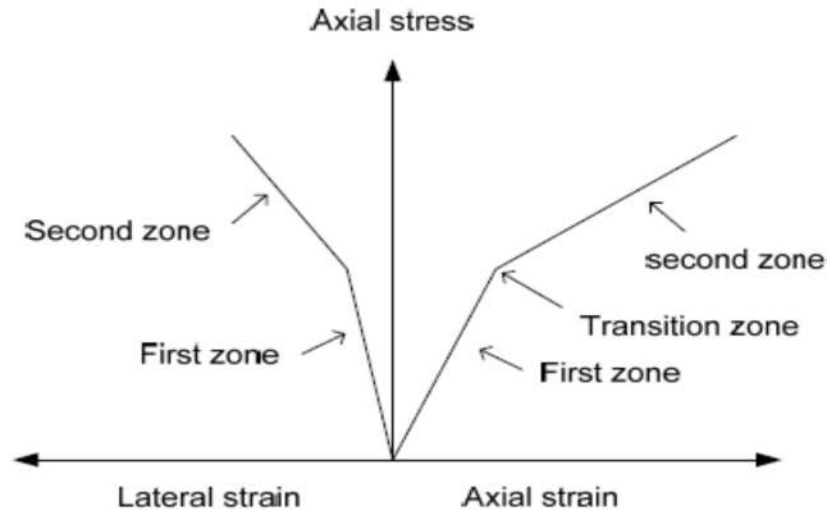


Figure II-11: Courbes contrainte-déformation simplifiées de béton confiné par FRP [39].

La formule de résistance à la compression maximale de béton confiné par FRP s'écrit comme suit :

$$f_{cc} = f_{co} \left[1 + 2.2 \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right)^{0.84} \right] \quad \text{II-1}$$

b-M. Shahawy et autres (2000) [40] ,

Ont réalisé des essais de compression axiaux sur 45 cylindres de béton confiné par fibres de carbone et 10 autres en béton témoin, de dimension de 155 mm de diamètre et de hauteur de 305mm. Le programme expérimental a considéré comme paramètres : la résistance de béton et nombre de couches des enveloppes en carbone. Ils ont utilisés deux bétons de résistance différant le premier est de résistance de 20.7 Mpa et enveloppé par 1,2,3,4 et 5 couches de tissu ,et l'autre béton est de résistance de 44 Mpa enveloppés avec 1, 2, 3, ou 4 couches. Cinq échantillons identiques ont été réalisés pour chaque cas.

Les résultats obtenus dans cette recherche sont les suivants :

- une augmentation de la résistance et de ductilité du béton en raccourcissant sa dilatation latérale.
- Le modèle de confinement par les tubes GFRP remplis du béton a montré une bonne concordance avec les résultats d'essai .

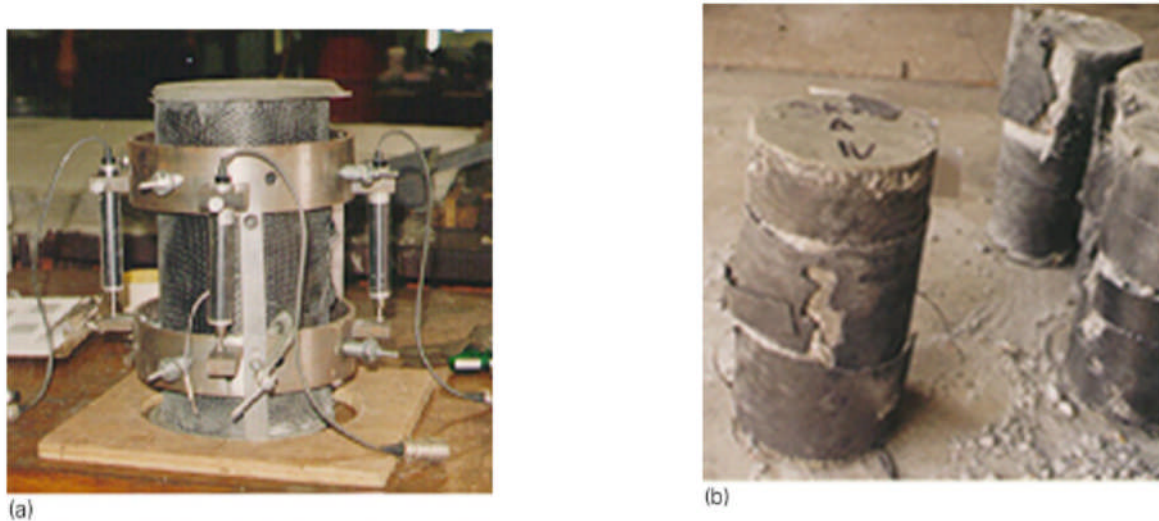


Figure II-12: (a) instrumentation; (b) mode de rupture des spécimens de béton enveloppés par des fibres de carbone[41].

c-Fam et Rizkalla (2001) [42],

Ont examiné 12 cylindres tubulaires hybrides d'un rapport longueur par rapport au diamètre de 2,2 sous la compression axiale. Les essais ont été visés pour étudier les effets de la structure en stratifié, l'effet de la configuration de la section en coupe, effet de l'état de GFRP tube/interface béton, effet des tailles de trou et l'effet de l'épaisseur des tubes. La résistance à la compression de béton varie de 37 à 58 MPa.

L'étude a décrit le comportement des tubes de GFRP remplis de béton axialement chargés ainsi que l'effets bénéfiques de confinement dans des applications pratiques et des conditions de charge réalistes. Pour évaluer l'effet bénéfique du comportement sur toute la portance des cylindres, le comportement axial mesuré (charge-déformation) a été comparé à celui obtenu par la superposition du comportement axial du tube creux de GFRP et du noyau de béton témoin (figure II-13). L'étude expérimentale a étudié trois aspects :

- tubes de GFRP partiellement remplis avec des trous intérieurs ;
- un tube dans un système de tube;
- sections composites entières où le tube et le noyau sont collés pour résister à la charge totale axiale appliquée.

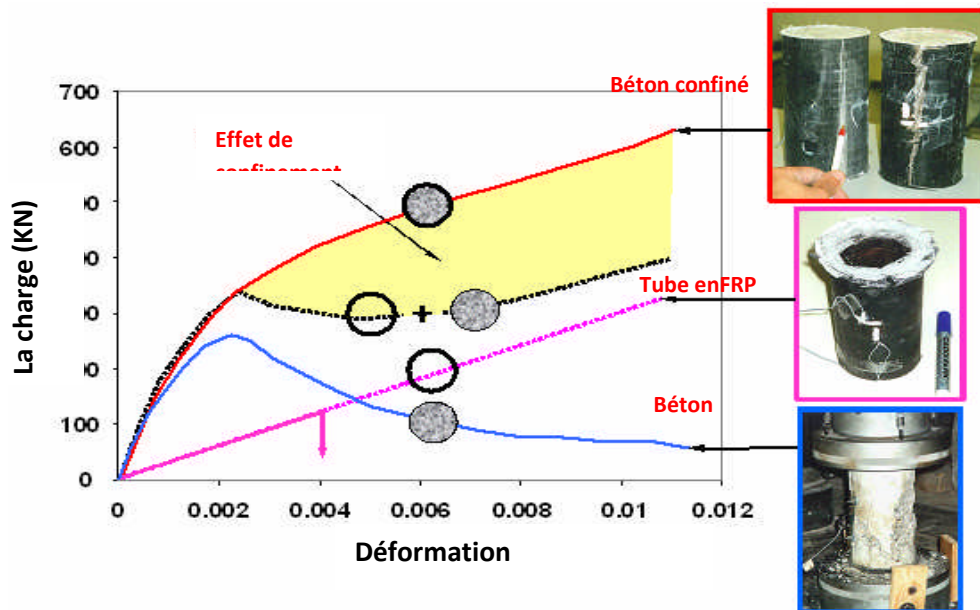


Figure II-13: Effet de confinement sur le comportement du béton [42].

d-Huei-Jeng Lin et Chin-Ting Chen (2001) [43]

Ils ont effectué une étude sur des cylindres en béton enveloppés par une ou deux couches de matériaux composites en fibre de verres ou de carbone confinés de dimensions (120 × 240) mm et d'autres de dimensions (100 × 200) mm pour évaluer la résistance de ces dernières, et ils ont considéré trois cas :

Le premier cas : c'était l'essai de résistance sur un cylindre de béton renforcé par différents nombres de couches de matériaux composites en fibres de verre ou en fibres de carbone. Les modes mécaniques de la rupture et le rapport entre la résistance de cylindre et le nombre de couches du composite sont étudiés.

- Le deuxième cas : les essais sont basés sur la résistance d'un cylindre de béton confiné à la fois par les deux types de fibres (les fibres de verre et les fibres de carbone).
- Le troisième cas : consiste à évaluer la résistance du cylindre en confinant partiellement le cylindre avec des matériaux composites en fibres de carbone et en fibres de verre.

La figure ci-dessous présente un diagramme typique contrainte-déformation d'un cylindre de béton confiné.

Au début d'application de l'effort axial sur le cylindre de béton confiné, le béton soutient le chargement. La similitude dans la pente initiale de la courbe cylindre en béton confiné et non confiné montre que la pression de confinement au début été faible. Après l'atteinte de la contrainte f_{co} et dépassant ce point la courbe contrainte-déformation aura une pente de plus en plus petite qui se développe linéairement en approchant la rupture finale.

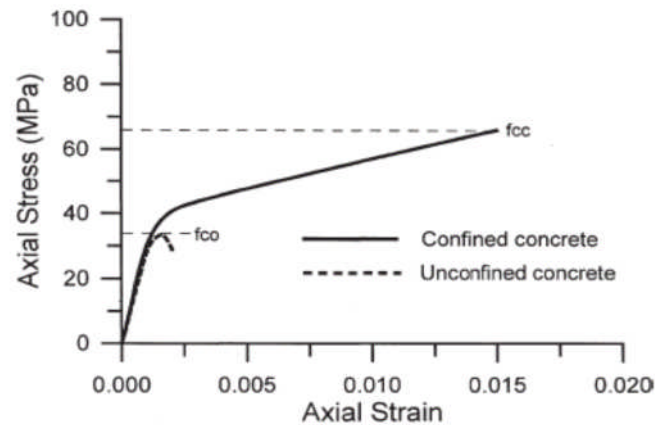


Figure II-14: Diagramme typique contrainte-déformation de béton confiné[44].

Les figures II-15 et II-16 montrent les modes de rupture des cylindres de béton enveloppés par des matériaux composites (fibres de verre et fibres de carbone).

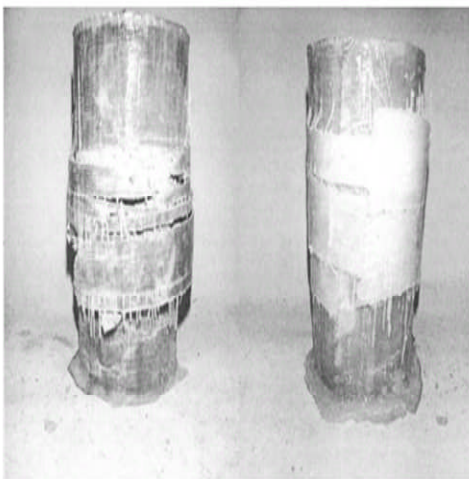


Figure II-15-Mode de rupture des cylindres enveloppés avec fibres de verre [43]



Figure II-16: Mode de rupture des cylindres enveloppés avec fibres de carbone [43]

e-Karabinis et Rousakis (2002) [42],

Ils ont effectué une étude sur 22 éprouvettes cylindriques de dimension de 200×320 mm, et ils ont utilisé deux bétons de 38.5 Mpa et un autre de 35.7 Mpa. 18 parmi les 22 cylindres sont confinés par une feuille continue de fibres de carbone FRPC avec une largeur de 300 mm et Dans chaque triade de spécimens identiques, une, deux et trois couches de feuille de carbone ont été appliquées. Après la préparation des cylindres et les envelopper par les matériaux composites, ils ont été conservés dans des conditions de laboratoire pendant plus de 12 jours après le coulage, ensuite ont été examinés à 56 jours.

Après l'étude effectuée ils ont arrivé aux résultats suivant :

- les feuilles en fibres de carbone améliorent la résistance et la ductilité du béton.
- La rigidité de matériau composite est le paramètre de conception principale.
- La rupture des spécimens enveloppés était très bruyante suivi d'une rupture explosive de la feuille de carbone, elle commença à mi hauteur des spécimens avec un développement soudain ou progressif dans les bandes de la feuille du carbone figure II-17a.

La figure II-17b montre une rupture prématurée s'est produite dans quelques spécimens dus à la rupture locale de la feuille.

La figure II-17c montre une rupture au niveau de chevauchement qui a été observé dans quelques spécimens.

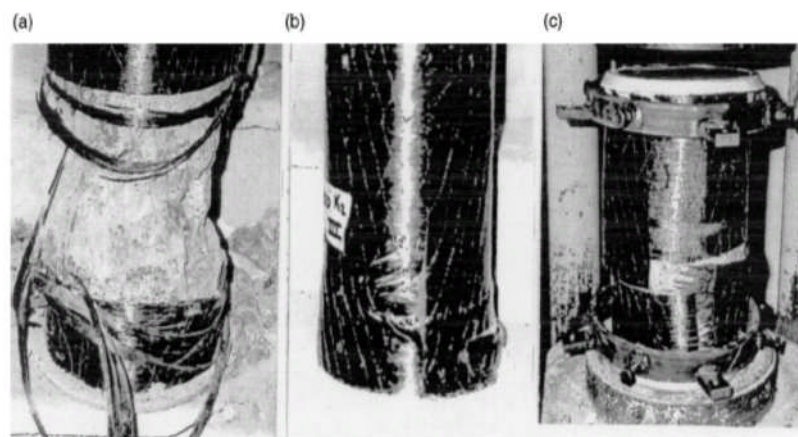


Figure II-17: Mode de rupture des spécimens[45].

Ils ont proposé un modèle simple basé sur la théorie de plasticité pour la prévision du comportement contrainte-déformation des colonnes cylindriques confinées par FRP. Les prévisions du modèle sont comparées avec les données expérimentaux et trois modèles existants. De la comparaison ils ont observé la corrélation satisfaisante des résultats expérimentaux et analytiques.

f-Chaallal et al (2003) [46]

Ont présenté un modèle de confinement pour décrire le comportement des colonnes rectangulaires en béton renforcé avec FRP collé extérieurement, soumis à l'effort axial. La dérivation du modèle proposé a été basée sur les résultats expérimentaux étendue. La dérivation du modèle proposé a été basée sur les résultats expérimentaux étendue impliquant des essais sur 90 spécimens rectangulaires représentant deux résistances de béton (21 Mpa et 41 Mpa), et cinq nombres différents des couches de FRP (0,1,2,3,4). Les résultats d'essai ont prouvé que le confinement fourni par le FRP améliore la portance et la ductilité des colonnes rectangulaires.

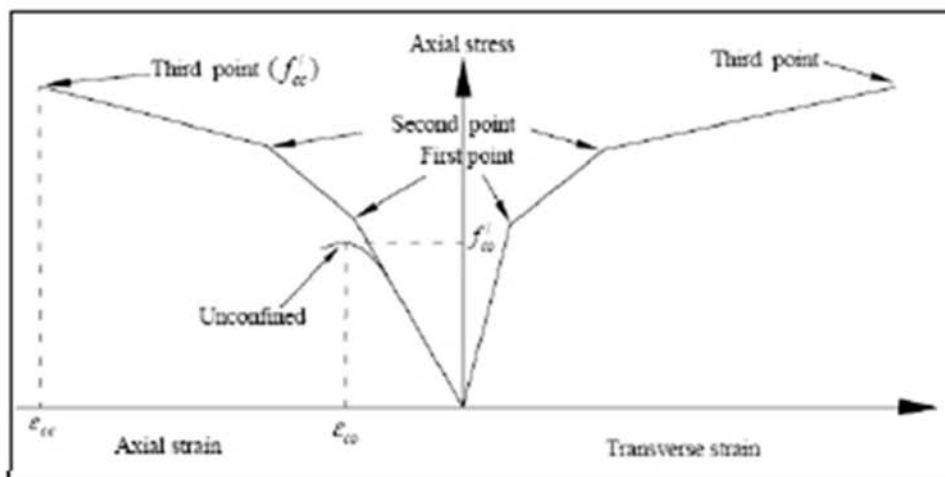


Figure II-18 : Modèle tri-linéaire de contrainte-déformation dans les directions axiales et latérales.[46]

g- Matthys et autres (2005) [47],

Ils ont effectués des essais sur 8 colonnes de 400mm de diamètre et 2 m d'hauteur chargées axialement confinées par des FRP, les paramètres considérés dans ce travail est le type de FRP (CFRP, GFRP, et polymère de tissu-renforcé hybride contenant une combinaison des fibres en verre et de carbone), le type de confinement partiel ou totale et l'orientation des fibres

La comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux des modèles existants a montré que les modèles disponibles ont été développés et basés sur les cylindres de petite taille, certains ont prévu la résistance ultime des colonnes à grande échelle assez exactement.

Les essais effectués sur les colonnes à grande échelle enveloppées et la vérification analytique effectuée aboutissent aux résultats suivants :

- le confinement du béton au moyen d'enveloppe de FRP est une technique efficace pour augmenter la résistance et la ductilité.
- les colonnes partiellement enveloppé enregistrent une faible augmentation de résistance comparativement à celle confinées totalement.
- L'enveloppement hélicoïdal a montré une augmentation faible de résistance et de déformation axiales à la rupture, comparé à l'enveloppement circulaire.

La figure suivante montre la rupture d'une colonne partiellement enveloppée.



Figure II-19:Rupture de colonne partiellement enveloppée [47].

Les essais ont abouté que les colonnes confinées par FRP présentent une capacité de charge plus élevée et une ductilité plus élevée sous un chargement concentrique et excentrique comparativement à celle renforcé avec des barres longitudinale.

h-Hadi (2006) [48]

A examiné neuf colonnes courtes en béton de résistance 57 MPa et de dimensions de 205 mm de diamètre et de 925 mm de hauteur. Trois colonnes ont été renforcées avec des barres en acier longitudinales, et trois autres ont été enveloppées avec trois couches de CFRP, et les trois dernières ont été enveloppées avec trois couches de FRP de verre E. De chaque trois colonnes, une a été examinée sous un chargement concentrique Figure II-20, une à 25 mm d'excentricité et l'autre à 50 mm d'excentricité

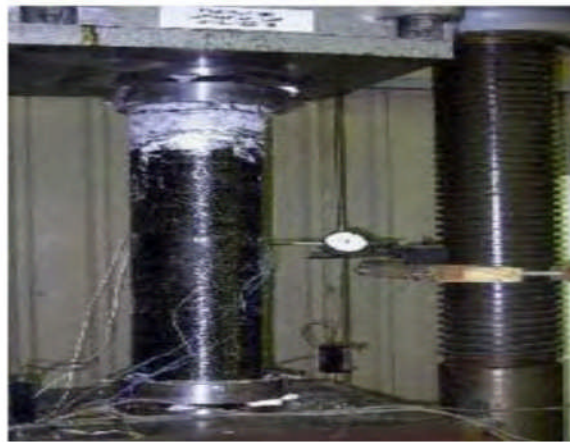


Figure II-20:L'installation expérimentale de colonne confinée par CFRP avec une charge concentrique [48].

i-Pan et al. (2007) [49]

Montre les résultats d'une étude expérimentale en compression réalisée sur six colonnes en béton armé élancé de section rectangulaire de dimension (120X150)mm modifiée en section elliptique renforcé par des composites en PRF, avec un rapport de L/b varie entre 4,5 et 17,5. d'après les résultats d'essai ils ont constaté que l'effet de l'élancement sur la charge ultime des colonnes en béton enveloppé par PRF est plus significatif que celui des colonnes en béton armé ordinaire. l'effet de renforcement diminue avec l'augmentation de l'élancement. Les auteurs ont confirmé que si la proportion de l'élancement est inférieure à 17,5 la charge ultime des colonnes enveloppées par PRF est toujours 20% plus forte que celle des colonnes en béton armé ordinaire.

j-Kumutha et al. (2007) [50]

Présente les résultats de la recherche expérimentale pour étudier le comportement des colonnes rectangulaire chargées axialement renforcées par des enveloppes en polymère renforcé de fibres de verre « PRFV ».

L'objectif de cette étude étaient comme suit :

- évaluer l'efficacité de l'enveloppe en «PRFV» renforçant des colonnes rectangulaires en béton armé,
- évaluer l'effet du nombre de couches du composite sur la charge ultime et la ductilité du béton confiné
- évaluer l'effet du rapport des dimensions de la section (a/b) sur la section du béton effectivement confiné.

k-G. WU et autres (2008) [51]

Ont étudié le comportement des cylindres de béton confinés avec un composite hybride de FRP. Un nombre de 35 spécimens cylindrique de dimensions de 150 mm de diamètre et de 300 mm de hauteur ont été examinés, trois cylindres de béton non confiné sont considérés comme des spécimens témoins, 12 autres sont confinés avec un même type de feuille de FRP et les 20 derniers sont confinés avec les feuilles hybrides de FRP. Les paramètres introduisent dans le programme expérimental sont : les types de feuilles de FRP, le nombre de couches de feuilles de FRP et les différents genres d'hybridation avec deux ou trois types de composite de FRP.

Cinq différents types de composite en FRP ont été utilisés dans ce travail : CFRP de haute résistance (CF1) ; CFRP de haut module (CF7) ; FRP Aramide (AF) ; FRP Verre (GF) ; et FRP PBO (PF). Pour utiliser des feuilles de FRP à leur pleine capacité, des essais sur celles ci ont été effectuées dans le laboratoire pour évaluer leurs propriétés mécaniques, les enveloppes de FRP ont été formées en imbibant une feuille continue de fibre utilisant la résine époxyde appropriée. Dix spécimens de chaque type de feuille de FRP ont été examinés.

Pour des cylindres confinés avec un seul type de feuilles de FRP, La longueur de recouvrement est de 100 mm figure 22a. Pour des cylindres de béton confinés en FRP hybride, les endroits de recouvrement pour différentes feuilles de FRP sont considérés en tant que distribution suivant les indications du figure22 (b) et (c). Huit jauges de déformation ont été installées pour mesurer la déformation des feuilles de FRP. Quatre des jauges ont été

localisés à la mi-hauteur pour mesurer les déformations radiales du FRP. En outre, le déplacement axial des cylindres de béton confinés par FRP a été mesuré en utilisant deux capteurs volumétriques linéaires (LVDT) avec un taux d'effort axial de 10 Kn/min.

La figure suivante montre les détails de l'installation d'essai.

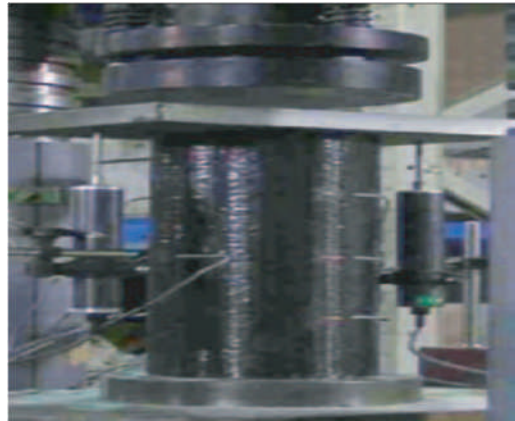


Figure II-21: Installation d'essai [51].

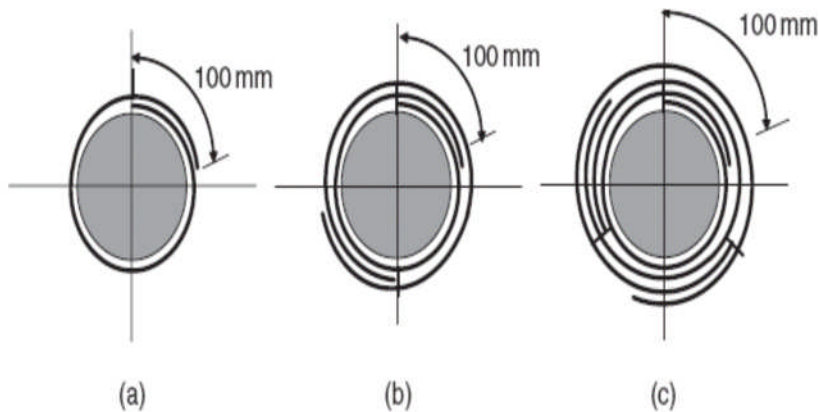


Figure II-22: Enveloppe de FRP: (a) Un seul type; (b) Deux types; (c) Trois types.[51]

L'étude réalisée sur les cylindres de béton confinés avec les composites hybrides de FRP indique que le confinement peut être efficace en augmentant la résistance, la ductilité et l'énergie de la capacité d'absorption des cylindres de béton. Basé sur les investigations et les résultats expérimentaux et analytiques, *G. WU et al* sont tiré les conclusions suivantes:

- ✓ Pour les cylindres de béton confinés avec les feuilles hybrides de FRP, le rapport hybride est très important. Si le rapport de la résistance de confinement de la haute ductilité de la feuille de FRP / basse ductilité, est bas, l'hybridation peut être inefficace, et si le rapport est trop haut, l'hybridation ne sera pas économique.
- ✓ La résistance ultime du béton confiné par FRP peut être améliorée en ajoutant une feuille de haute résistance de FRP à une feuille de haute ductilité de FRP. Le coefficient de Poisson ultime du béton confiné par FRP- hybride peut être prévu par des équations pour les spécimens confinés seulement avec des feuilles de FRP de haute ductilité. En conséquence, la déformation ultime demeure la même que pour les spécimens confinés seulement avec une feuille FRP de haute ductilité.
- ✓ Les modèles analytiques proposés pour prévoir la résistance ultime et la déformation des cylindres de béton confinés avec des composites hybrides de FRP montrent la bonne concordance avec les résultats expérimentaux. Le modèle multilinéaire suggéré peut raisonnablement prévoir la relation contrainte-déformation des cylindres de béton confinés avec FRP hybride.

I-Abbasnia et Ziaadiny (2009) [52]

ont présenté les résultats d'une série d'essais de compression axiale cyclique sur 10 Spécimens prismatiques carrés (152 x152 x 305mm) avec un rayon de coins $R=29$ mm. Les échantillons ont été soumis à divers modes de chargement cyclique pour examiner différents aspects du comportement cyclique du béton confiné avec des matériaux composites « PRF ». Les résultats des essais ont montré que la courbe enveloppe de la courbe de la courbe contrainte- déformation cyclique des spécimens prismatiques carrés en béton confinés avec des matériaux composites « PRF » est approximativement la même que celle du même béton sous chargement axiale monotone.

m-Thong et al. (2013) [53]

Ils ont testé 60 colonnes, en béton armé, de 800mm de hauteur ayant une section carrée de 150 mm de coté.

Chaque spécimen est armé de 4 barres longitudinales $\varnothing 12$ mm et 4 barres transversales lisses $\varnothing 6$ mm, espacées de 60 mm. Trois valeurs de la résistance caractéristique du béton non confiné sont considérées (40 MPa, 80 MPa et 100 MPa).

Les spécimens sont confinés avec un CFRP de 75 mm de largeur présentant une densité de fibres unidirectionnelles de 340 g/m².

La figure I-23, montre que les colonnes ont été collées à 4 segments circulaires en béton de même résistance caractéristique afin de modifier la forme de la section transversale du carré au cercle, comme indiqué par la figure I-23.

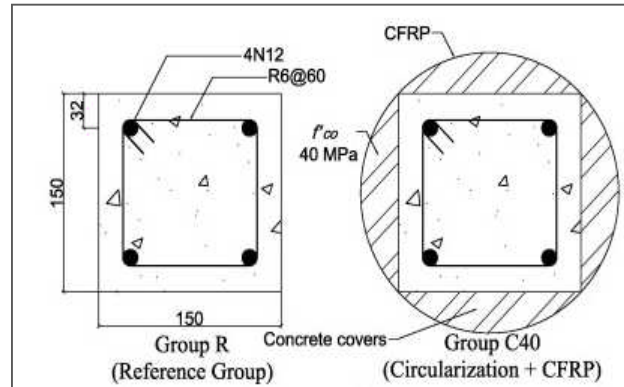


Figure II-23 : Changement de section de la colonne [53].

Les colonnes modifiées ont été par la suite enveloppées avec 3 couches de CFRP. Une série de spécimens a été soumise à une charge axiale concentrique, tandis que les autres colonnes ont été soumises à une charge excentrée.

Les auteurs ont montré que la capacité portante ainsi que la ductilité des différents spécimens testés augmentent significativement.

Il a été aussi montré que le CFRP avait le même effet de confinement sur les colonnes testées que sur les colonnes circulaires testées.

n-Ali Ahmed et al C [54],

Ce travail a porté sur le comportement, sous compression simple, de cylindres en béton confinés en vue d'une réhabilitation de structures en béton en utilisant une nouvelle technique de confinement par des bandes hélicoïdales continues de FRP à base de fibres de verre. Les gains en résistance à la compression et en ductilité ont été quantifiés et analysés en fonction de largeur de la bande de FRP et du pas de l'hélice qu'elle forme en circonférence de cylindres e béton.



Figure II-24 : Confinement de cylindres en béton avec des bandes hélicoïdales en PRF [54].

Les résultats expérimentaux ont montré une amélioration, à la fois, de la résistance à la compression et de la ductilité des éprouvettes testées. La résistance à la compression du béton est proportionnelle à la largeur de la bande et inversement proportionnelle au pas de l'hélice qu'elle forme autour du cylindre.

L'estimation de la résistance pour une quelconque variante de cette configuration de confinement est possible à partir du modèle proposé et qui est établi sur la base des résultats expérimentaux.

II-6-Conclusion

Le béton confiné présente un comportement similaire à celui du béton non confiné, lorsque le taux de confinement est faible. Dans le cas où celui-ci est élevé, le béton confiné présente, en plus de sa branche linéaire, une deuxième branche ascendante jusqu'à la rupture.

D'après les recherches antérieures, portant sur le confinement des structures, particulièrement les colonnes en béton par les matériaux composites en PRF, nous avons constaté que ce type de renforcement, améliore considérablement leur performances mécaniques notamment la ductilité et la résistance à la compression.

Chapitre III : Simulation numérique

III-1-Introduction

La simulation numérique est une réalité industrielle très utilisée dans la recherche, elle couvre plusieurs domaines tels que l'aéronautique, l'automobile, la construction civile, etc. Elle est basée sur la méthode des éléments finis qui considère toutes les hypothèses de la mécanique (l'endommagement, la rupture, l'élasticité, plasticité, la dynamique...).

La simulation numérique permet d'analyser des phénomènes physiques intervenant dans la mise en forme des pièces. La modélisation de ces phénomènes permet de simuler le comportement des matériaux et de varier certains paramètres (géométriques, rhéologiques...) afin d'optimiser le procédé.

Dans notre chapitre nous allons mener une simulation numérique sur des cylindres, des prismes de section circularisée, confinés, soumis à une charge de compression axiale.

III-2-Présentation du logiciel Abaqus

Il est créé par Hibbit, Karlsson et Sorensen en 1978, c'est un programme de simulation puissant dans le domaine de l'ingénierie. Il est basé sur la méthode des éléments finis. Il traite et résout des problèmes allant du plus simple " problème linéaire " au plus difficile " problème non linéaire ". Il est utilisé dans différents domaines tels que : la mécanique, l'électricité, la thermique, etc.

Abaqus comporte une grande bibliothèque d'éléments qui permettent de modéliser n'importe quelle géométrie, et il contient une liste étendue de matériaux. Il permet de simuler le comportement des plus typiques des matériaux comme : les métaux, le caoutchouc, les polymères, les composites, etc. Il a plusieurs codes de calcul et les plus utilisés sont : ABAQUS /standard et ABAQUS /explicit.

ABAQUS / standard : il est utilisé pour résoudre les problèmes linéaires et non linéaires de géométrie 1D, 2D, 3D et Axisymétrie.

ABAQUS / Explicite : il est utilisé pour la résolution des problèmes non linéaires transitoires, et de dynamique des structures. La résolution est basée sur la méthode explicite d'intégration en temps. Il permet également l'analyse quasi statique où il existe un comportement non linéaire important.

Une analyse complète avec ABAQUS est conduite en passant par les trois étapes suivantes : le prétraitement, la simulation et le post traitement. Ces étapes sont reliées entre elles par des fichiers comme illustré par la figure suivante :

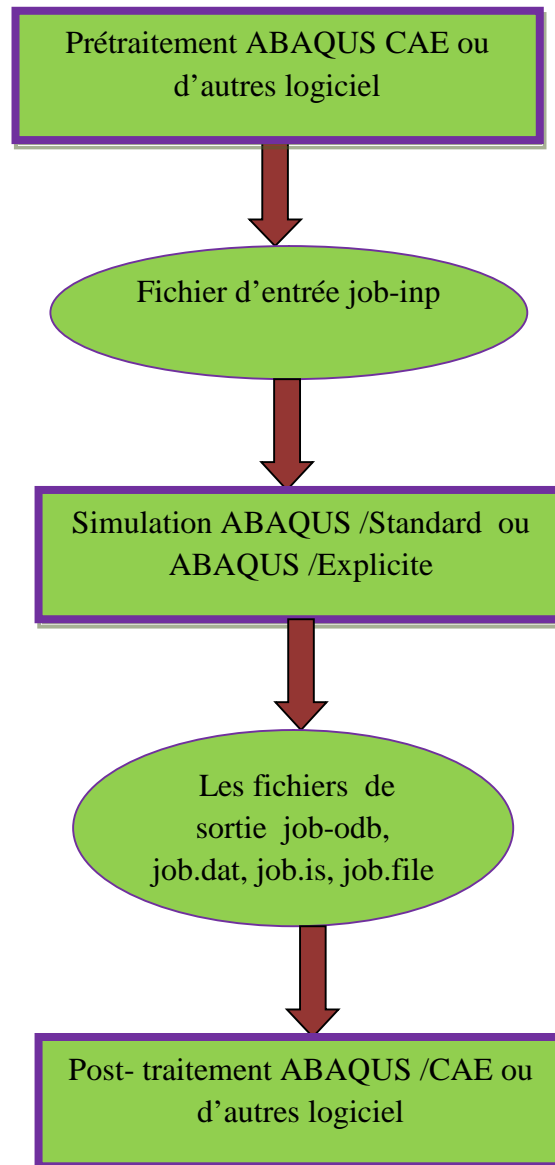


Figure III-1 : les étapes d'une analyse sur ABAQUS

III-3-Les principales composantes de la fenêtre d'ABAQUS

La fenêtre abaqus est constituée par plusieurs composants qui sont illustrés par la figure suivante :

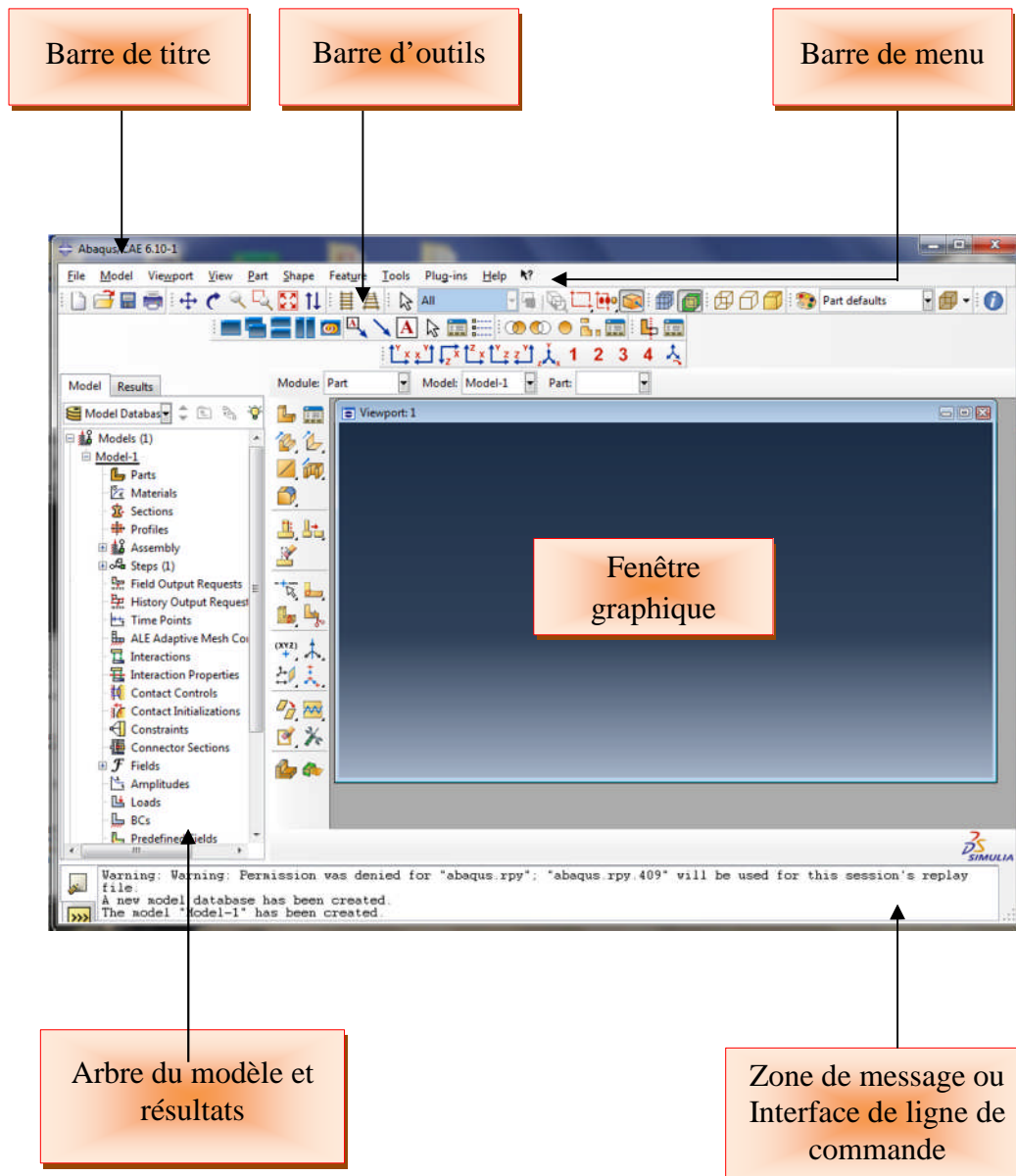


Figure III-2 : interface d'ABAQUS.

Pour faire une simulation ou une analyse d'un problème, il faut définir d'abord toutes les informations du modèle à simuler comme sa géométrie, les propriétés de la section de l'élément, les propriétés des matériaux le constituant, le chargement et les conditions aux limites. Pour cela il faut passer par une succession d'étapes dans ABAQUS :

Le module « PART »

Le module Part permet de créer tous les objets géométriques nécessaires à notre problème, soit en les dessinant dans ABAQUS CAE, soit en les important d'un logiciel de dessin tiers.

Le module « PROPERTY »

Le module Property permet, comme son nom l'indique, de définir toutes les propriétés d'un objet géométrique ou d'une partie de cet objet.

Le module « ASSEMBLY »

Ce module permet d'assembler les différents objets géométriques créés dans un même repère de coordonnées global. Un modèle ABAQUS contient un seul assemblage.

Le module « STEP »

Ce module permet de définir toutes les étapes et les requêtes pour le post traitement, c'est à dire le moment (temps) à partir duquel une force est appliquée et jusqu'à quand, il est aussi possible de créer des forces ou des conditions limites qui s'activent à des moments donnés.

Le module « INTERACTION »

Grâce ce module, il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres. Il faut savoir qu'ABAQUS ne prend en compte que les interactions explicitement définies, la proximité géométrique n'étant pas suffisante.

Le module « LOAD »

Le module Load permet de spécifier tous les chargements, conditions limites et champs. Il faut savoir que les chargements et les conditions limites sont dépendants des steps, par exemple une force est appliquée au step 1 mais inactive au step 2.

Le module « MESH »

Ce module contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage élément fini sur un assemblage.

Le module « JOB »

Une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser le module Job pour analyser ce modèle. ABAQUS va alors réaliser tous les calculs nécessaires et en tirer des résultats.

Le module « VISUALIZATION »

Ce module permet de visualiser le modèle et les résultats(les courbes de charges, les déformations, etc).

Le module « SKETCH »

Ce module permet de créer des formes bidimensionnelles qui ne sont pas associées à un objet. Il peut être utilisé pour des extrusions par exemple.

III-4- simulation numérique

III-4-1-Présentation du modèle à simuler


Notre travail consiste à simuler le comportement mécanique, sous compression axiale d'un prisme, à section circularisée, en béton confiné hélicoïdalement avec des bandes en PRF. Les bandes forment deux hélices de sens contraires en circonférence de l'élément. Deux variables sont considérées dans cette étude, à savoir la largeur de la bande et le nombre de tours de l'hélice qu'elle forme autour de l'élément.

Ainsi, les valeurs 2 ; 3 et 4 cm sont adoptés pour la largeur de la bande, pendant qu'on considère des hélices à 3 ; 4 et 5 tours.

Les prismes modifiés, ainsi simulés, ont toutes les dimensions $\varnothing 150\text{mm} \times 300\text{mm}$, le prisme initial étant de dimensions $106\text{mm} \times 106\text{mm} \times 300\text{mm}$.

Par ailleurs, la ductilité des colonnes renforcées par FRP augmente de manière significative par rapport aux colonnes de référence. Elles ont le même effet de confinement sur les colonnes testées que sur une colonne circulaire classique d'origine [50]. Il serait alors intéressant de comparer le comportement du prisme modifié confiné, à celui d'un cylindre confiné de la même manière. Ainsi, des cylindres en béton de dimension $\varnothing 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ sont simulés pour les mêmes variantes de confinement que celles des prismes à section circularisée.

III-4- 1- 1-Géométrie de modèle

Dans la liste des modules, on choisit le module **part**. En cliquant deux fois sur  **Parts**, une boîte de dialogue s'ouvre sous le nom **create part** dans laquelle est introduit le nom de la pièce à modéliser, est indiqué l'espace de travail (par exemple : 2D, ou 3D). Sous le titre Type, nous allons choisir parmi les propositions : Deformable, Discrete rigid, Analytical rigid ou Eulerien et sous le titre shape de base feature, est choisie la proposition qui convient à notre pièce, et dans la zone de la taille d'approximation on choisit la valeur qui convient.

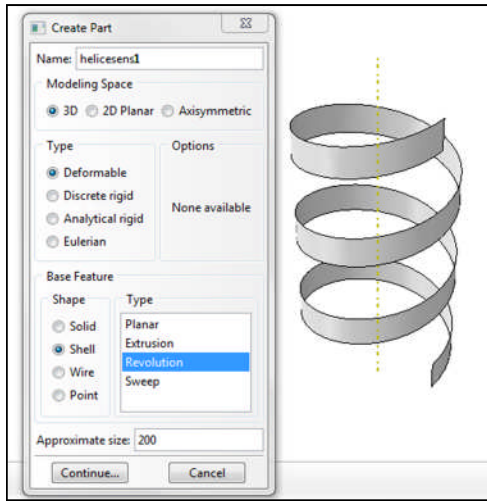


Figure III-3: la géométrie de l'hélice

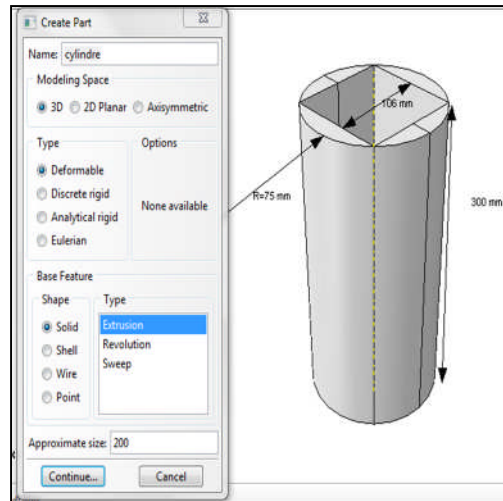


Figure III-4 : la géométrie du prisme circularisé

III-4-1-2- introduction des propriétés du matériau et définition de la section

Après la création de la pièce, les propriétés mécaniques du matériau sont introduites en précisant les sections sur lesquelles ces matériaux sont appliqués. Le module **PROPERTY** est activé à cet effet, ce qui nous permet d'introduire toutes les propriétés du matériau.

Les figures suivantes nous présentent l'introduction des propriétés des matériaux pour les éléments de notre modèle.

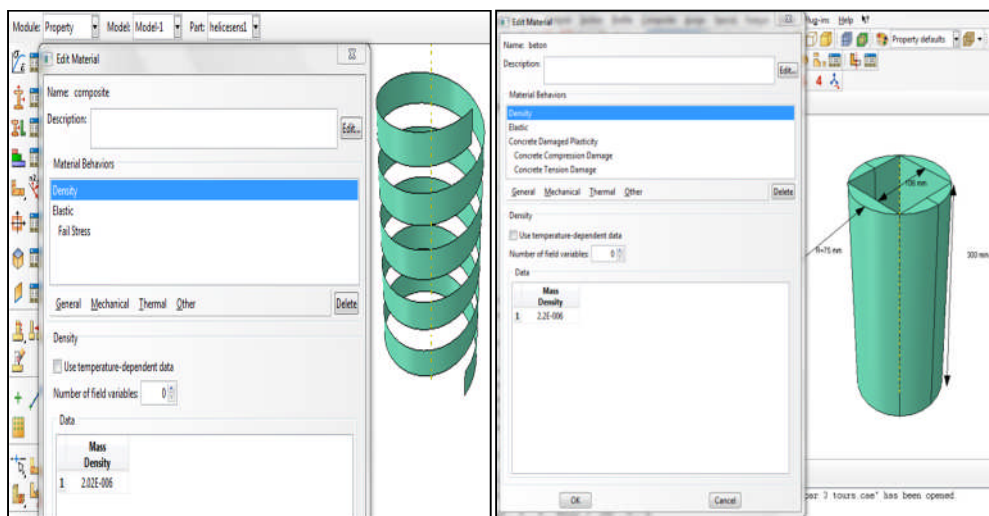




Figure III-5 : introduction des propriétés des matériaux

III-4-1-3-Assemblage

Après la création des pièces et l'introduction de leurs propriétés et des matériaux les constituant , vient l'étape de leur assemblage dans un même repère global par la creation des instances  puis l'assemblage final par .Les figures si dessous, illustrent l'étape del'assemblage pour un prisme modifié et pour un cylindre dans les deux cas :confiné et non confiné

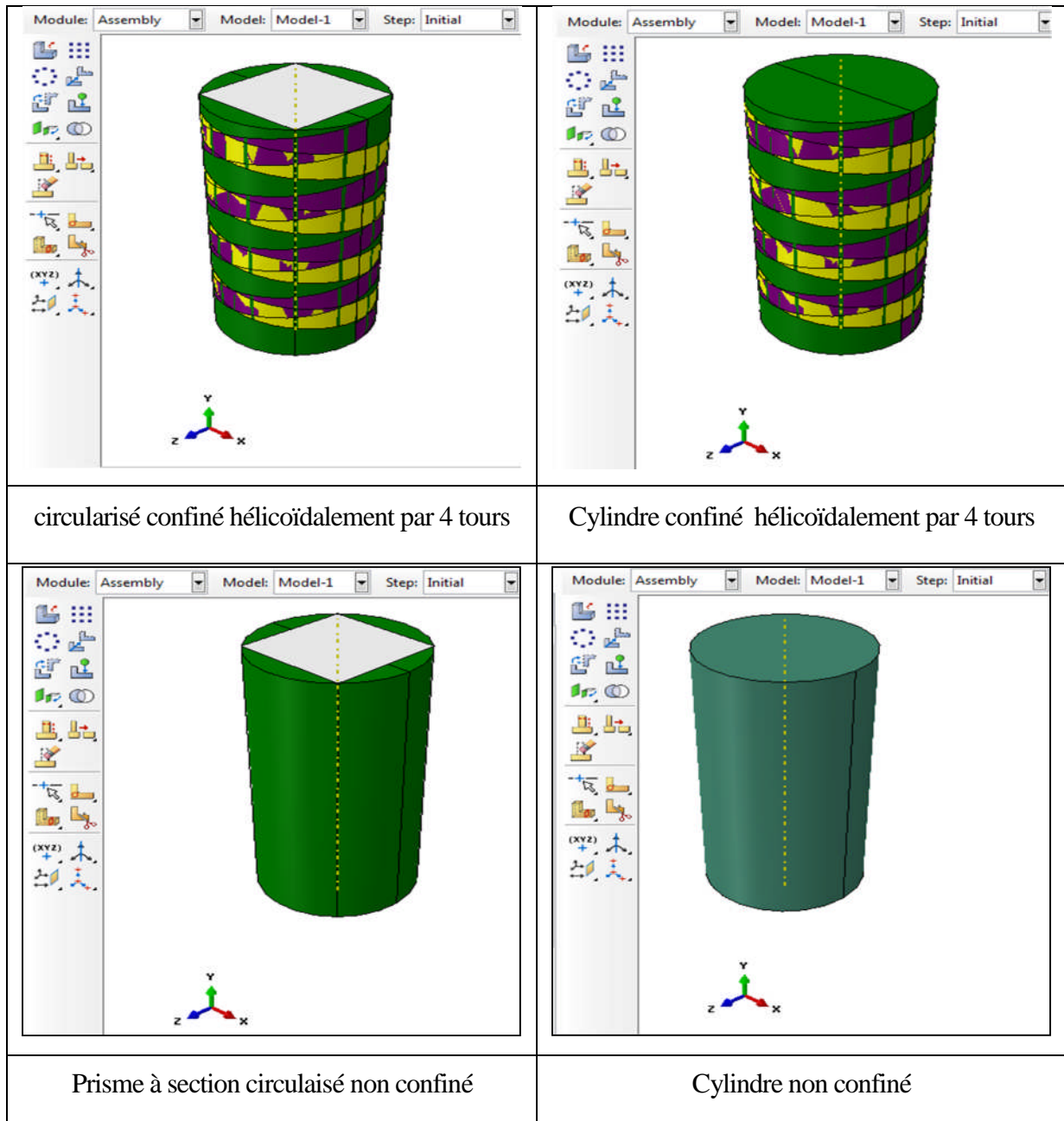
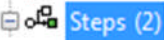


Figure III-6:assemblage

III-4-1-4-Creation d'un step

Après l'assemblage nous allons passer à la création d'un step pour chaque pièce modéliser, pour le créer nous allons choisir dans la liste des modules le module **step** en cliquant deux fois sur  et choisir dynamique ,explicite.

La figure suivante présente la création du step du prisme à section circularisée confiné hélicoïdalement par des hélices de tours.

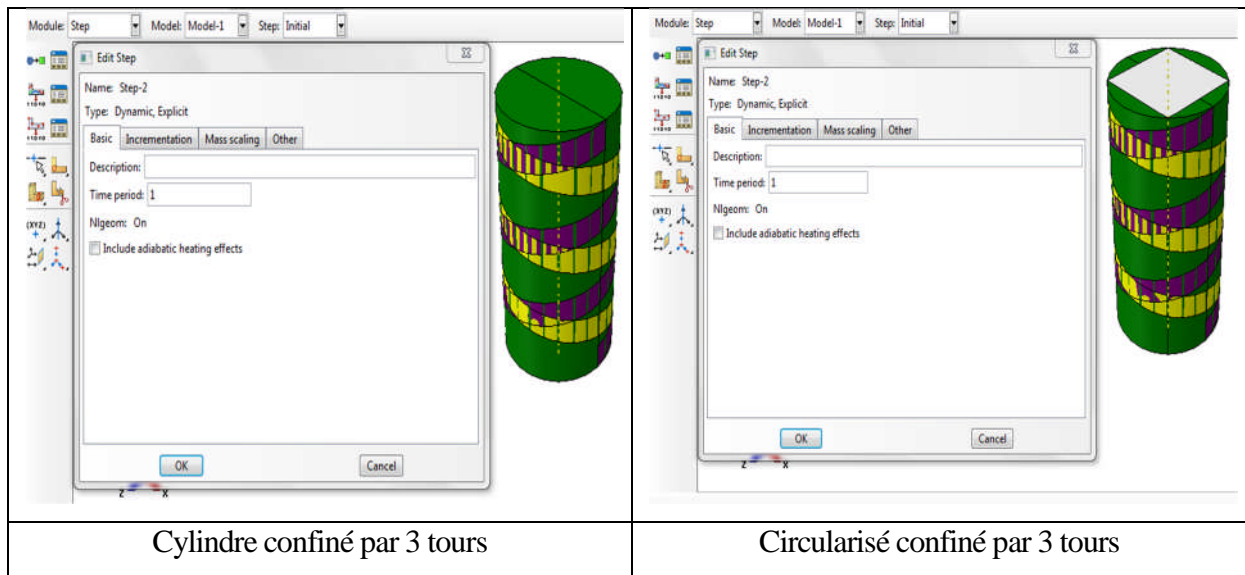


Figure III-7 :création d'un step.

III-4-1-5-Création des interactions entre les instances

La création des interactions entre les différentes pièces est importante pour définir la nature des contacts entre celles-ci .Pour ce faire,il faut aller dans le module interaction, sélectionner les surfaces, puis définir les types de contacts et les associer aux surfaces correspondantes. Nous avons supposé une parfaite adhérence entre les différentes surfaces considérées.

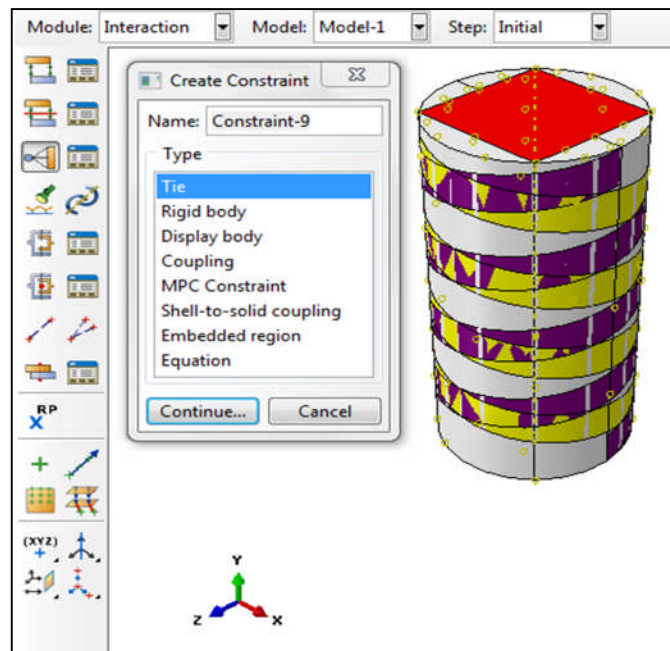


Figure III-8 : les interactions.

III-4-1-6-Application des conditions aux limites

On clique sur le module **Load**, et on introduit les conditions aux limites en déplacements et en chargement. Dans notre simulation numérique, la surface inférieure du modèle est supposée encastree, annulant ainsi, tous ses déplacements. Par ailleurs, un déplacement imposé est appliqué à la surface supérieure de l'élément.

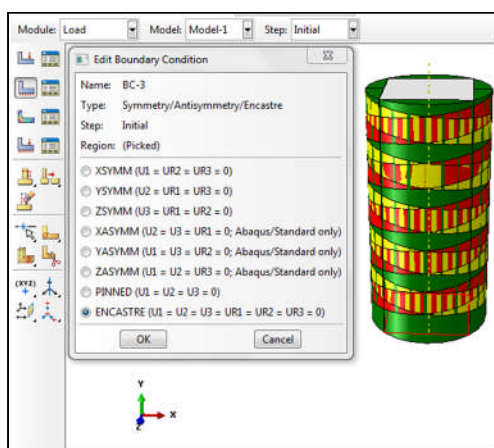


Figure III-9 : application des conditions aux limites

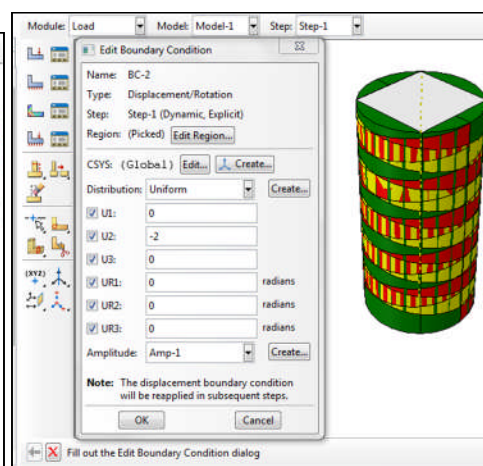


Figure III-10 : application du chargement

III-4-1-7-Maillage du modèle

Le module MESH est sélectionné dans le but de choisir le maillage adéquat des différentes pièces constituant le modèle.

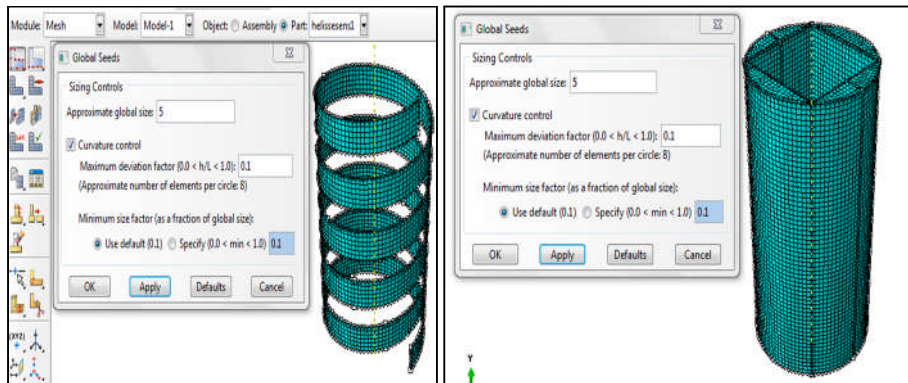
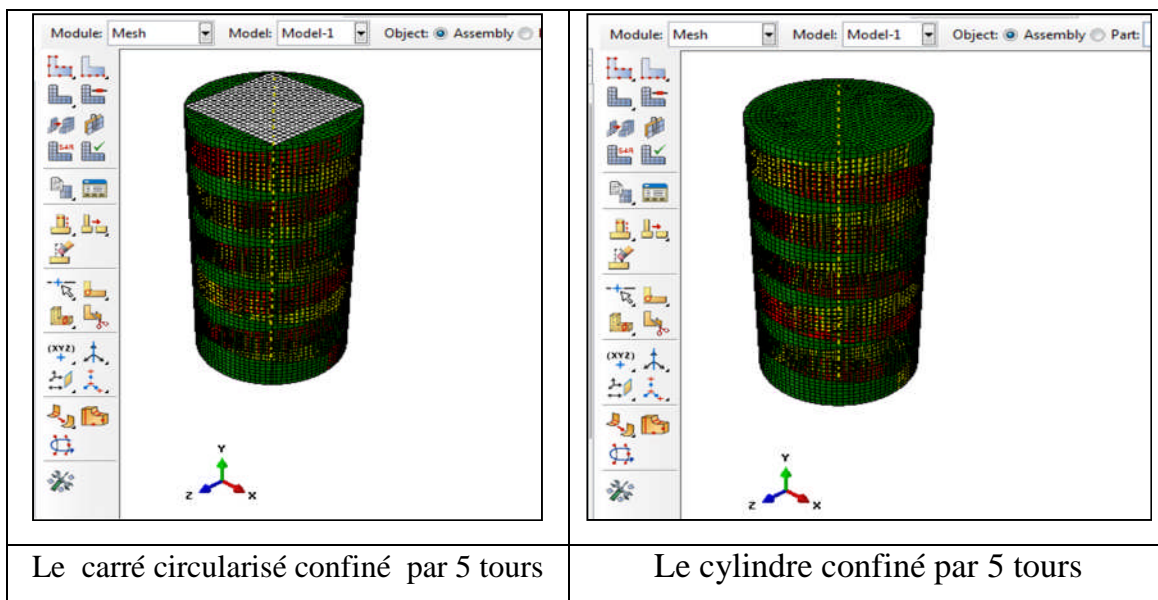


Figure III-11 : Maillage de l'hélice

Figure III-12 : maillage du cylindre

Ainsi, des éléments tétraédriques de 20 mm de coté à huit nœuds, sont utilisé pour mailler le prisme modifié, tant dis que des éléments surfaciques de 10 mm de coté à quatre nœuds, sont choisis pour le maillage de bandes en PRF.



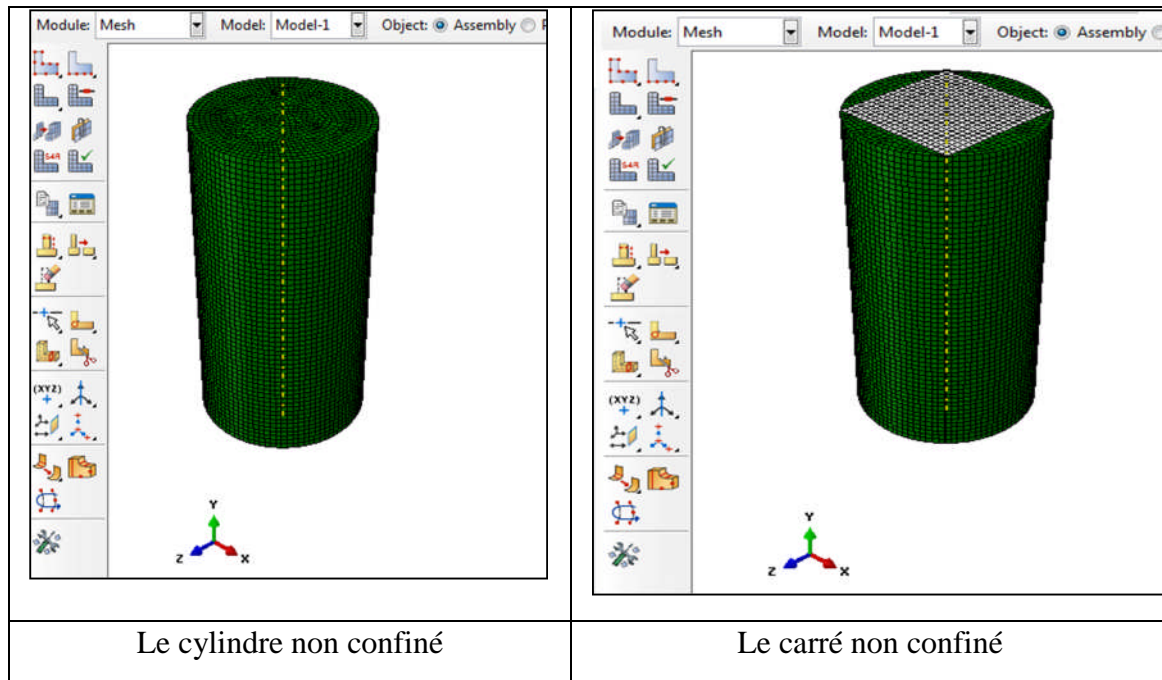


Figure III-13 : les prismes assemblés et leurs maillages.

III-4-1-8-Lancement du calcul

Une fois toutes les étapes précédentes réalisées, le calcul sera lancé à partir du module Job.

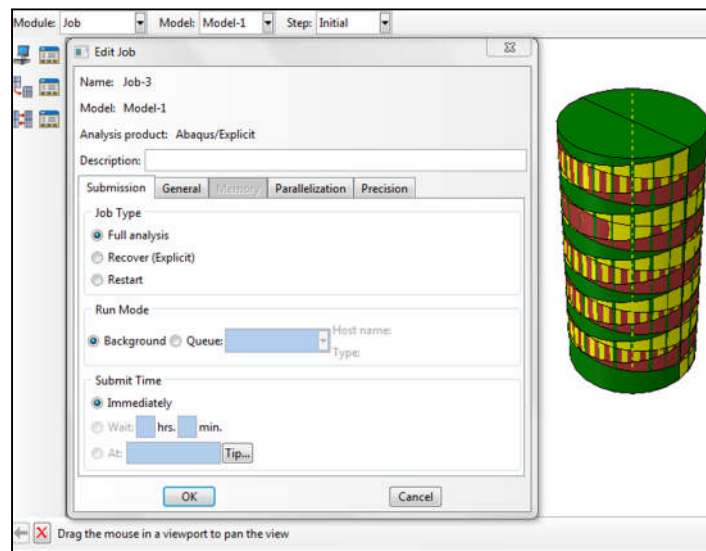


Figure III-14 : création d'un job

III-4-1-9-Visualiser les résultats

Une fois que le calcul est terminé, nous procédons à la visualisation des résultats à l'aide du module visualisation, qui nous permet d'avoir les résultats sous forme graphique ou numérique.

III-5-Discretisation du principe des puissances virtuelles (PPV)

Soit un solide en équilibre occupant à un instant donné un volume V de frontière Γ . Il est soumis, à des forces volumiques F_v et à des forces surfaciques F_s . Il est soumis à des efforts de contact F_c exercés sur la portion Γ_c . L'ensemble de ces conditions aux limites est exprimé en déplacements imposés au solide sur le domaine Γ_u .

L'équation du mouvement de chaque point matériel du solide est donnée par :

$$\overrightarrow{\text{div}}\sigma + Fv = \rho\ddot{u} \quad \text{III-1}$$

Où \ddot{u} représente la dérivée seconde du vecteur déplacement u .

Le problème consiste à déterminer le champs de contrainte $\sigma(\mathbf{X},t)$. Et le déplacement U dû à la déformation $\mathcal{E}(x,y)$ à tout instant t et en tous point x , connaissant les conditions initiales de chacun des champs.

Les champs de vitesse \dot{u} et de contraintes $\sigma(x,y)$ doivent respecter :

- Les conditions aux limites en déplacement $u=u^*$ sur Γ_u .
- Les conditions aux limites portant sur les efforts.

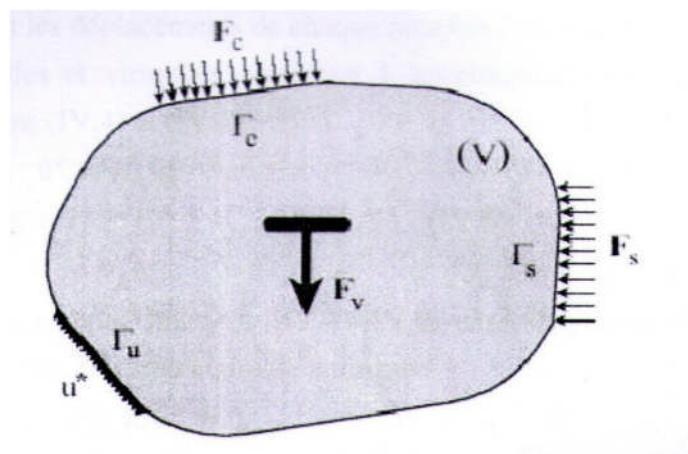


Figure III.15: Schéma d'une structure en équilibre.

La base d'une formulation éléments finis en déplacement consiste en l'introduction d'approximations spéciales de la solution. Pour développer une telle approximation, on remplace les équations du mouvement par une forme faible équivalente en la multipliant par une fonction test. La fonction test adoptée par Abaqus [55] est un champ de vitesse virtuel arbitraire $\delta\dot{u}$ suffisamment continu. Après vérification et développement des conditions aux limites $\delta\dot{u} = 0$ sur Γ_u et après le développement, nous aboutissons à l'écriture du principe des puissances virtuelles (PPV) :

$$-\int \varepsilon : \delta\dot{E} dv + \int F_v \delta\dot{u} dv + \int F_s \delta\dot{u} d\Gamma_s + \int F_c \delta\dot{u} d\Gamma_c = \int \delta\dot{u} \delta\dot{u} dv \quad \text{III-2}$$

Où $\delta\dot{E}$ est l'accroissement virtuel des taux de déformations, lié à $\delta\dot{u}$ par les relations de compatibilité :

$$\dot{E} = \frac{1}{2} [\text{grad}\dot{u} + \text{grad}\dot{u}] \quad \text{III-3}$$

La fonction est une équation non linéaire qui doit être résolue par une méthode itérative en utilisant un développement approprié. Nous présentons dans ce qui suit la procédure de linéarisation de cette fonction dans le cas de l'utilisation d'élément iso paramétriques. C'est-à-dire pour lesquels les fonctions géométriques sont confondues avec les fonctions d'interpolations.

Les déplacements réels et virtuels de tout point du solide V sont reliés aux déplacements des nœuds adjacents par des fonctions. En utilisant la méthode de galerkin

$$u^e = N_n u_n^e \quad \text{III-4}$$

$$\delta u^e = N_n \delta u_n^e \quad \text{III-5}$$

N_n : Sont les fonctions d'interpolations nodales sur l'élément « e ». Elles dépendent des coordonnées spatiales et sont exprimées dans l'espace de référence. Les vitesses réelles et virtuelles ainsi que l'accélération sont interpolées en décrivant les équations (III.4) (III.5) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{u}^e = N_n \dot{u}_n^e \\ \delta \dot{u}^e = N_n \delta \dot{u}_n^e \\ \ddot{u}^e = N_n \ddot{u}_n^e \end{array} \right. \quad \text{III-6}$$

En introduisant les approximations (III.4) (III.5) dans l'équation (III.2), nous obtenons une fonctionnelle élémentaire de la forme :

$$I_e = (M^e \ddot{u}^e + F_{int}^e + F_{ext}^e) \delta \dot{u}^e = 0 \quad \text{III-7}$$

Où M^e est la matrice masse élémentaire cohérente ou consistante dans le sens où elle est calculée avec les fonctions d'interpolations N_n de l'élément F_{int}^e est le vecteur élémentaire des efforts internes et F_{ext}^e le vecteur des forces externes de l'élément (e).

Ces trois grandeurs sont données par :

$$M^e = \int_{V_e} \rho^T N_n N_n dV \quad \text{III-8}$$

$$F_{int}^e = \int_{V_e} T B \sigma dV$$

$$F_{ext}^e = \int_{V_e} T N_n F_V D_V dV + \int_{\Gamma_s^e} T N_n F_s d\Gamma + \int_{\Gamma_c^e} T N_n F_c d\Gamma$$

Où la matrice déformation- déplacement B_n^e de l'élément (e) s'écrit comme suit :

$$B_n^e = \frac{\delta N_n}{\delta X_n} \quad \text{III-9}$$

Equilibre du système globale obtenu en assemblant les fonctionnelles élémentaires I_e sur toute la structure est de la forme :

$$I = \sum_e I_e = [\sum_e (M^e \ddot{u}^e + F_{int}^e - F_{ext}^e)] \delta \dot{u}^e \quad \text{III-10}$$

Et encore :

$$I = (M \ddot{u} + F_{int} - F_{ext}) \delta \dot{u} \stackrel{!}{=} 0 \quad \text{III-11}$$

Le système algébrique précédent est non linéaire. Il exprime l'équilibre dynamique de la structure. Sa résolution incrémentale par linéarisation sur chaque incrément de temps peut être envisagée par plus d'une méthode.

ABAQUS /STANDARD :

Nous permet de réaliser des études statiques en contraintes-déplacements, dynamiques linéaires ou non linéaires. Généralement, c'est la méthode de Newton qui est utilisée pour résoudre les problèmes non linéaires. La base de formalisation de cette méthode est la suivante : considérons qu'après i itérations sur l'incrément de temps, l'approximation de

la solution est $u(i)$. La différence entre la solution exacte et la solution après i itérations est notée $c(i+1)$. La solution exacte est donc donnée par :

$$u = u(i) + c(i+1)$$

III-12

En écrivant symboliquement le principe des travaux virtuels par une équation implicite

$$F(u) = 0$$

III-13

Cela signifie l'équilibre par rapport à la variable nodale considérée. Cette équation implicite peut être développée en série de TAYLOR en $u(i)$, ce qui donne :

$$F[u(i)] + (\partial F[u(i)] / \partial u(i)) * c(i+1) + (\partial^2 F[u(i)] / \partial u(i)^2) * c^2(i+1) + \dots = 0.$$

III-14

Si l'approximation est proche de la solution $u(i)$, alors $c(i+1)$ est petit et l'équation (III.14) peut être réduite à ces deux premiers termes donnant ainsi :

$$(\partial F[u(i)] / \partial u(i)) * c(i+1) = -F[u(i)]$$

III-15

L'équation (III.15) permet de déterminer $c(i+1)$ pour calculer l'approximation suivante $u(i+1)$.

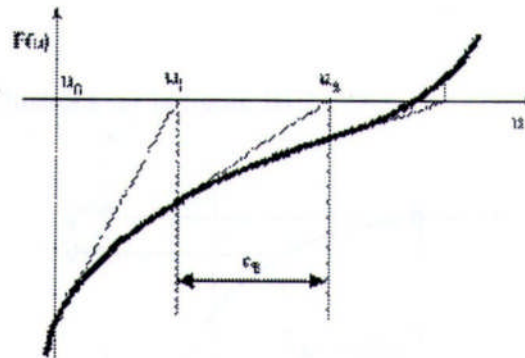


Figure III-16 : Illustration de la méthode de Newton [55].

La figure ci-dessus illustre la méthode de NEWTON qui consiste de déterminer u tel que $F(u) = 0$.

Sur cette figure on observe que la valeur nodale de l'incrément suivant utilise la matrice jacobéenne comme une pente, en partant de la valeur courante. La convergence de cette méthode est quadratique, donc rapide.

Cependant, la matrice jacobienne $\partial F [u(i)]/\partial u(i)$ peut présenter des problèmes d'existence et de singularité. Auquel cas, l'équation (III.15) est insoluble.

ABAQUS/Explicit : La version explicite est entièrement vectorisée afin d'utiliser les supercalculateurs multiprocesseurs. Bien que l'analyse soit dynamique, elle peut être utilisée moyennant quelques précautions pour accomplir des analyses quasi-statiques. Le schéma explicite implanté au sein d'ABAQUS conduit à des temps de calcul plus faible comparativement au schéma implicite nommé ABAQUS/Standard. L'algorithme explicite assure une certaine robustesse, il est plus efficace pour aboutir à un calcul complet que ABAQUS/Explicit met en œuvre un schéma d'intégration par différences centrales exprimés par les équations (III.16) et (III.17).

$$du(i + 1/2)/dt = du(i - 1/2)/dt + [(\Delta t(i + 1) + \Delta t(i)/2)] * d^2u(i)/dt^2 \quad \text{III-16}$$

$$u(i + 1) = u(i) + [\Delta t(i + 1) * du(i + 1/2)/dt] \quad \text{III-17}$$

Où du/dt est la vitesse et d^2u/dt^2 est l'accélération. L'exposant (i) indique le numéro de l'incrément. Ces équations sont illustrées sur la figure III-17

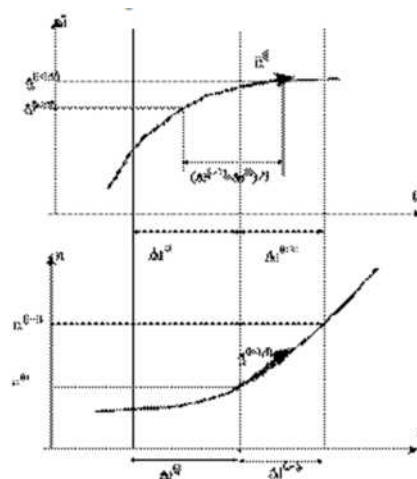


Figure : III-17: Illustration de l'opérateur de différence centrale [55]

Ce seul schéma d'intégration est combiné à une procédure dynamique. La clef de l'efficacité calculatoire de la procédure explicite provient de l'utilisation d'une matrice de

masse diagonale. Une telle forme permet un calcul rapide de l'inverse de cette matrice notamment utilisée pour la détermination de l'accélération de l'équation III-18

$$d^2u(i)/dt^2 = M^{-1} * (F(i) - I(i)) \quad \text{III-18}$$

Où M est la matrice de masse diagonale, F est le vecteur des charges appliquées et I est le vecteur des forces internes. Ainsi, la procédure explicite ne requiert ni itération, ni matrice tangente de rigidité. La procédure explicite intègre par rapport au temps en utilisant beaucoup de petits incréments de temps. Or, l'opérateur de différence centrale est conditionnellement stable. La limite de cette stabilité pour cet opérateur est donné en terme de plus grandes valeurs propres du système par :

$$\Delta t \leq 2/W_{max} \quad \text{III-19}$$

Une estimation de la plus petite valeur propre du système peut être obtenue en déterminant le mode maximum des éléments du maillage. Ainsi, l'incrément de temps permettant la stabilité est donnée par :

$$D_t = \min(L_e/C_d) \quad \text{III-20}$$

Où L_e est la dimension caractéristique des éléments et C_d est la vitesse des ondes en dilatation dans le matériau, cette vitesse est donnée par :

$$C_d = \sqrt{\left[\frac{\lambda + \mu}{\rho} \right]} \quad \text{III-21}$$

$$\text{Avec : } \lambda = K - (2/3)\mu^*$$

Le tenseur S est le tenseur des contraintes déviatrices et p est le tenseur des déformations déviatrices. P est la masse volumique du matériau. Ainsi, la procédure explicite dynamique peut effectuer un grand nombre de petits incréments pour un temps de calcul raisonnable.

La CAE (complète Abaqus environment) est l'interface graphique interactive idéale pour la modélisation, la gestion et le post traitement des modèles Abaqus. Le CAE permet d'effectuer la totalité de la mise en données, la création ou l'import de pièces, le maillage jusqu'à l'exploitation avancée des résultats

III-6- presentation du modele concrete damaged plasticity

Le modèle concret damaged plasticity signifie le modèle élasto-plastique endommageable du béton, il permet de décrire le comportement anélastique de béton par l'utilisation des concepts d'élasticité isotrope endommagé combiné avec la traction et la plasticité isotrope de la compression à la traction et à la compression.

Les deux mécanismes de rupture de ce modèle sont :

- la fissuration.
- le broyage de la matière concrète par compression.

III-6-1-comportement à la compression

La réponse du modèle à la compression uniaxiale est traduite par la courbe de la figure III-18 qui présente une partie linéaire jusqu'à la limite élastique σ_{c0} . un écrouissage dans le domaine plastique suivi d'un adoucissement au-delà de la contrainte de rupture σ_u .

La rigidité du matériau dégrade lors du chargement de béton de point d'adoucissement. La dégradation de la rigidité élastique est caractérisée par deux variables d'endommagement d_c et d_t :

$$d_t = d_t = (\tilde{\epsilon}_t^{pl}, \Theta, f_i) \quad 0 \leq d_t \leq 1 \quad \text{III-22}$$

$$d_c = d_c = (\tilde{\epsilon}_c^{pl}, \Theta, f_i) \quad 0 \leq d_c \leq 1$$

La relation contrainte déformations sous traction et compression uniaxiale sont donnée par les relations suivantes :

$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0 (\epsilon_c - \tilde{\epsilon}_c^{pl}) \quad \text{III-23}$$

$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0 (\epsilon_t - \tilde{\epsilon}_t^{pl})$$

E_0 : la rigidité élastique de matériau.

Les contraintes effectives de traction et de compression sont données par les relations suivantes :

$$\tilde{\sigma}_c = \frac{\sigma_c}{(1-d_c)} = E_0 (\epsilon_c - \tilde{\epsilon}_c^{pl}) \quad \text{III-24}$$

$$\tilde{\sigma}_t = \frac{\sigma_t}{(1 - d_t)} = E_0(\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl})$$

La Figure III-18 suivante présente la réponse uniaxiale du béton en compression :

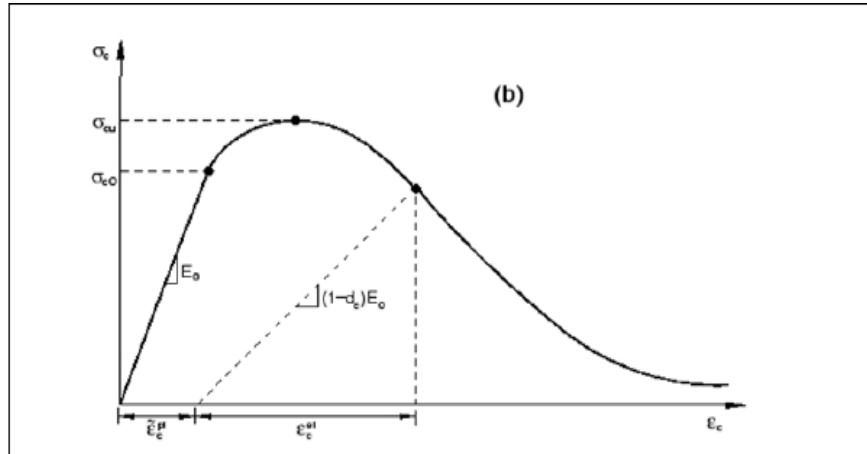


Figure III-18 : Réponse du modèle à la compression simple.[55]

III-6-2- comportement à la traction

La réponse à la traction uniaxiale est traduite par la courbe de la figure II-5 de la contrainte déformation se caractérise par deux parties, la première une linéarité élastique jusqu'à atteindre la contrainte de rupture de traction σ_t , et au-delà de cette contrainte apparition d'une chute de contrainte qui est due à l'apparition des microfissures dans le béton. Ces fissures se localisent progressivement jusqu'à la rupture de matériau.

La figure II-5 suivante présente la réponse uniaxiale du béton en traction :

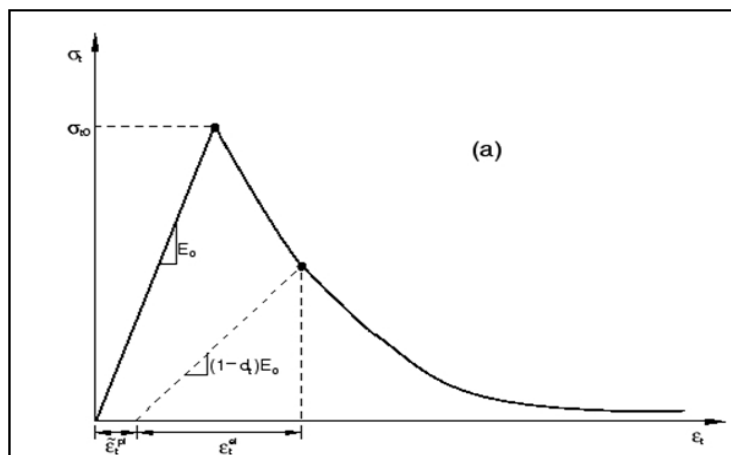


Figure III-19 : Réponse du modèle à la traction simple [55].

III-6-3-La récupération de la rigidité en Comportement cyclique uniaxiale

Le modèle *concretedamageplasticity* suppose que la récupération de rigidité observé dans l'expérimental (lorsqu'un essai d'un chargement cyclique uniaxial), est donnée en termes d'une variable scalaire de dégradation d :

$$E = (1 - d)E_0 \quad \text{III-25}$$

Où E_0 : est le module d'élasticité d'un matériau sain.

La dégradation de la rigidité (d) est en fonction, de l'état de contraintes et des deux variables d'endommagement uniaxial d_t et d_c .

Pour des chargements cycliques uniaxiales, Abaqus suppose que :

$$(1 - d) = (1 - s_t d_c)(1 - s_c d_t) \quad \text{III-26}$$

Où s_t et s_c sont des fonctions de l'état de contraintes, qui sont introduites pour modéliser les effets de récupération rigidité. Ils sont définis comme suit :

$$\begin{aligned} S_t &= 1 - W_t r^*(\sigma_{11}); & 0 \leq W_t \leq 1 \\ S_c &= 1 - W_c r^*(\sigma_{11}); & 0 \leq W_c \leq 1 \end{aligned} \quad \text{III-27}$$

Où :

$$r^*(\sigma_{11}) = H(\sigma_{11}) = \begin{cases} 1 & \text{si } \sigma_{11} > 0 \\ 0 & \text{si } \sigma_{11} < 0 \end{cases} \quad \text{III-28}$$

W_t et W_c : sont les deux paramètres qui permettent de contrôler la récupération de la rigidité à la traction et à la compression. Pour illustrer cela, prenons l'exemple en figure, où on passe d'une traction à la compression.

w_c et w_t : sont des paramètres matériels qui contrôlent la restitution de la rigidité après un cycle traction compression comme illustré sur la figure suivante :

si $w_c = 1$, le matériau a récupéré sa rigidité et retrouve son module d'élasticité initial E_0 ;

si $0 < w_c < 1$, la récupération est partielle ;

si $w_c = 0$, la récupération est nulle.

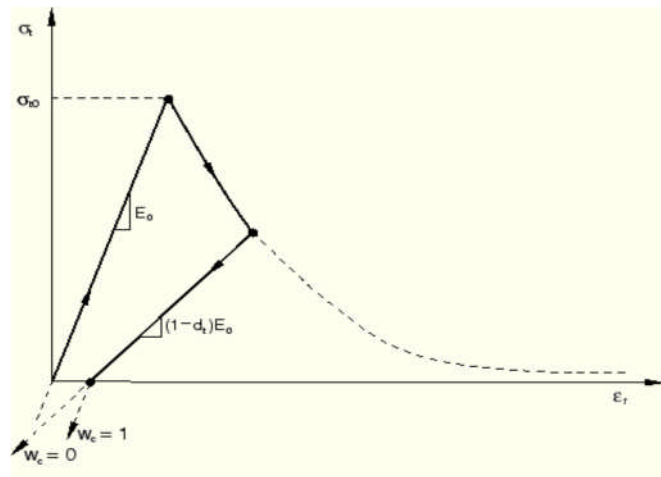


Figure III-20 : Récupération de rigidité en compression.[55]

Supposons qu'il n'y avait pas de dommages antérieurs à la compression (écrasement) dans le matériau, donc on a :

$$\varepsilon_c^{pl} = 0 \text{ et } d_c = 0.$$

III-29

$$(1 - d) = (1 - S_c d_t = (1 - (1 - W_c(1 - r^*))d_t)$$

III-30

Dans la traction :

$$(\sigma_{11} > 0), r^* = 1, \text{ par conséquent } , d = d_t$$

III-31

Dans la compression :

$$(\sigma_{11} < 0), r^* = 0$$

III-32

$$d = (1 - W_c)d_t.$$

Si $W_c = 1$ implique que $d = 0$ et , par conséquent, le matériau recouvre entièrement la rigidité à la compression (qui dans ce cas est la rigidité initiale, ($E = E_0$)).

Si, d'autre part, $W_c = 0$, implique que $d = d_t$, dans ce cas-là, il n'y a pas une récupération de rigidité.

W_t et W_c , peuvent prendre des valeur de zéro jusque à un.

La (Fig.III-21) illustre la récupération de rigidité pour un cycle de chargement uniaxiale (traction-compression-traction)

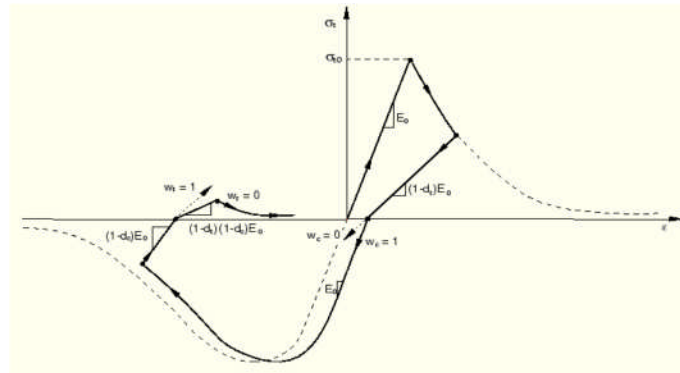


Figure III-21: Récupération de rigidité lors d'un cycle complet[55].

III-7-Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le logiciel abaqus, qui contient un ensemble de programmes, susceptibles de résoudre des problèmes mécaniques et autres qu'ils soient linéaires ou non linéaires.

Les étapes de la simulation numérique du comportement à la compression de prismes, à section circularisée ont été détaillées. Le modèle numérique est bien décrit, en matière de géométrie et de conditions aux limites.

Chapitre IV: Résultats et discussion

IV-1-Introduction

Dans ce chapitre, nous allons interpréter les résultats de la simulation numérique du comportement de différents éléments en béton dont certains non confinés, alors que d'autres sont confinés avec des bandes en PRFV. Il s'agit en effet, de prismes à section circularisée et de cylindres en béton simulés dans les deux cas : confiné et non confiné. Les éléments simulés sont soumis à une compression axiale avec un déplacement imposé de 2 mm.

La simulation numérique est conduite sous le logiciel de calcul par éléments finis Abaqus version 6.10. Les résultats obtenus sont donnés sous forme de courbes contrainte-déformation et de cartographies de contraintes et de déformations, ce qui nous permet d'examiner de près le comportement mécanique de ces éléments.

IV-2-Courbes contrainte-déformation, cas de la variable nombre de tours de l'hélice

IV-2-1- Comportement des cylindres

Les courbes contrainte-déformation des cylindres confinés et non confiné, sont tracées, en faisant varier le nombre de tours des hélices, pour une largeur de la bande de 30mm et sont données par la **figure IV-1**.

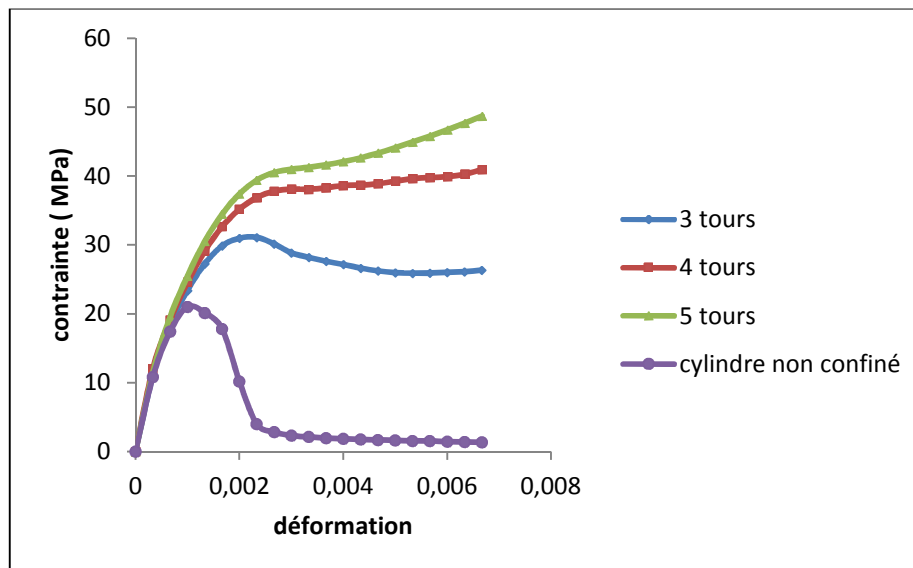


Figure IV-1 : Courbes contrainte – déformation : cas du cylindre.

La lecture des courbes contrainte-déformation de la **figure IV-1**, fait ressortir plusieurs remarques qui se résument à ce qui suit:

- ✓ Dans l'intervalle de déformation $[0, 0,001]$, les courbes des cylindres confinés à 3 tours, 4 tours et 5 tours d'hélice et celle du cylindre non confiné sont confondues. Le cylindre non

confiné atteint la contrainte maximale qui vaut 21.012 MPa, correspondant à une déformation de 0.001. Au delà de cette valeur, on remarque une dégradation de la contrainte jusqu'à la rupture. Pour les cylindres confinés, les contraintes continuent à augmenter au-delà de la valeur maximale du béton non confiné. En effet, elle atteint la valeur maximale de 30.98 MPa, correspondant à une déformation de 0.002 pour un cylindre confiné avec des hélices à 3 tours. La contrainte commence à diminuer jusqu'à atteindre la valeur de 26.32 MPa correspondant à une déformation de 0.0046. La courbe présente par la suite, un palier horizontal correspondant à la contrainte de rupture et s'étalant sur l'intervalle de déformation [0.0046, 0.0066]. Pour le cylindre confiné avec 4 tours d'hélice, la contrainte maximale atteint la valeur 37.79 MPa correspondant à une déformation de 0.0026 pour, avant d'atteindre la valeur de 40.94 MPa qui représente la contrainte à la rupture et qui correspond à une déformation de 0.0066.

Enfin, pour le cylindre confiné à 5 tours d'hélice, sa contrainte maximale atteint la valeur de 40.51 MPa correspondant à une déformation de 0.0023, alors que sa contrainte à la rupture, vaut 48.71 MPa correspondant à une déformation de 0.0066.

✓ Il apparaît clairement à la lecture du graphique, que les cylindres confinés avec des bandes de GFRP, présente une nette amélioration en termes de résistance à la compression et de ductilité par rapport au cylindre non confiné. Il ressort, également, de la comparaison des courbes pour les différentes configurations de confinement, que la résistance à la compression et la ductilité dépendent du nombre de tours de l'hélice. En effet, celles-ci augmentent à chaque fois que le nombre de tours de l'hélice augmente.

IV-2-2- Comportement des prismes à section circularisée

D'après la figure IV-2 qui représente les courbes contrainte-déformation des prismes à section circularisée, confiné par des PRFV hélicoïdalement fixant la largeur de la bande à 30 mm et variant le nombre de tours des hélices, nous pouvons constater que les prismes, à section carrée circularisée, confinés présentent un comportement, sous compression, similaire à celui des cylindres confinés. En effet les courbes des deux éléments présentent la même allure.

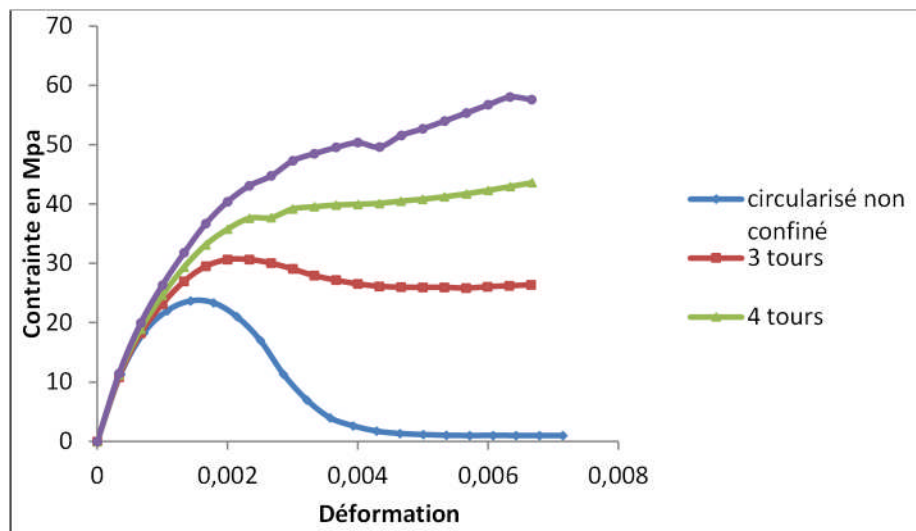


Figure IV-2 : courbe contrainte-déformation : cas du prisme à section circularisée

La courbe du prisme non confiné, atteint la contrainte maximale de 23.68 Mpa pour une déformation de 0.001. A partir de cette déformation, la courbe devient descendante ce qui revient à la diminution des contraintes jusqu'à la rupture du béton.

Dans l'intervalle de déformation [0,0.001], les courbes des différentes configurations de confinement, coïncident avec celle du prisme non confiné. Dans cet intervalle, ces courbes présentent des segments linéaires ascendants qui atteignent les contraintes maximales de 30.66MPa, 35.78MPa et 40.41MPa respectivement pour des hélices à 3 tours, 4 tours et 5 tours pour une même valeur de déformation qui vaut 0.002. A partir de cette valeur de la déformation, la courbe de 3 tours devient descendante, ce qui traduit la diminution des contraintes jusqu'à atteindre la valeur de 26.54 MPa, correspondant à une déformation de 0.004. La courbe forme par la suite, un palier horizontal, c'est le palier de la ductilité. Pour les deux autres courbes, celles de 4 tours et 5 tours, les courbes présentent une branche ascendante qui traduit une augmentation des contraintes jusqu'à atteindre les contraintes de rupture de 43.61 MPa et 57.61 MPa respectivement.

Il apparaît clairement à la lecture du graphique, que les prismes à section circularisée confinés avec des bandes de PRFV, présente une nette amélioration en termes de résistance à la compression et de ductilité par rapport au prisme non confiné. On enregistre ainsi, à titre d'exemple, un gain en résistance au pic, à la compression de 70.65 % pour un prisme modifié confiné avec des bandes de 30 mm de largeur formant des hélices à 5 tours. la déformation axiale correspondante, atteint une valeur de 0.0066, ce qui renseigne sur un gain en ductilité pour le même spécimen.

Il ressort, également, de la comparaison des courbes pour les différentes configurations de confinement, que la résistance à la compression et la ductilité dépendent du pas de l'hélice. En effet, celles-ci augmentent à chaque fois que le pas de l'hélice diminue, ou que le nombre de tours de l'hélice augmente.

L'ensemble des résultats obtenus pour différentes configurations de confinement pour les cylindres et les prismes à section circularisée, sont consignées dans le tableau IV-1.

Tableau IV-1 : Tableau des contraintes maximales et les déformations correspondantes.

cylindres	Non confiné (témoin)	Confiné par 3 tours	Confiné par 4 tours	Confiné par 5 tours
Les contraintes maximales (MPa)	21.012	30.98	37.78	40.94
Les déformations correspondantes	0.001	0.002	0.006	0.006
Les contraintes de rupture (MPa)	21.012	26.32	40.94	48.71
Les déformations correspondantes	0.001	0.006	0.0066	0.006
prismes à section circularisée	non confiné	Confiné par 3 tours	Confiné par 4 tours	Confiné par 5 tours
Les contraintes maximales	23.68	30.66	35.78	40.41
Les déformations correspondantes	0.001	0.002	0.002	0.002
Les contraintes de rupture	23.68	30.66	43.61	57.61
Les déformations correspondantes	0.001	0.0066	0.0066	0.0066

IV-2-3- Comparaison du comportement des cylindres et celui des prismes à section circularisée

La figure IV-3, montre une concordance totale entre les résultats obtenus pour un cylindre confiné avec une hélice à 3tours et un prisme à section circularisée, confiné de la même façon, ce qui prouve que les deux éléments présentent un comportement similaire en compression.

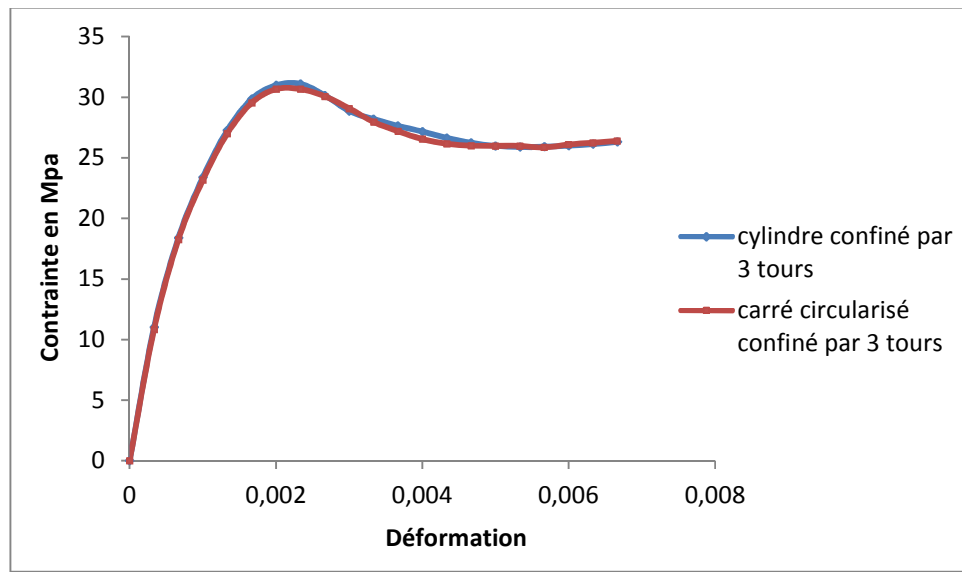


Figure IV-3 : comparaison d'un prisme modifié à un cylindre, confinés (3 tours).

Le comportement reste quasi identique pour des éléments confinés à 4 tours d'hélice, comme montré par la figure IV-3, à un degré moindre, pour des éléments confinés avec 5 tours d'hélice (figure IV- 4), puisqu'un écart avoisinant 18% est enregistré entre la contrainte à la rupture du cylindre confiné et celle du prisme, à section circularisée, confiné. Néanmoins cet écart demeure tolérable puisqu'il est inférieur à 20%.

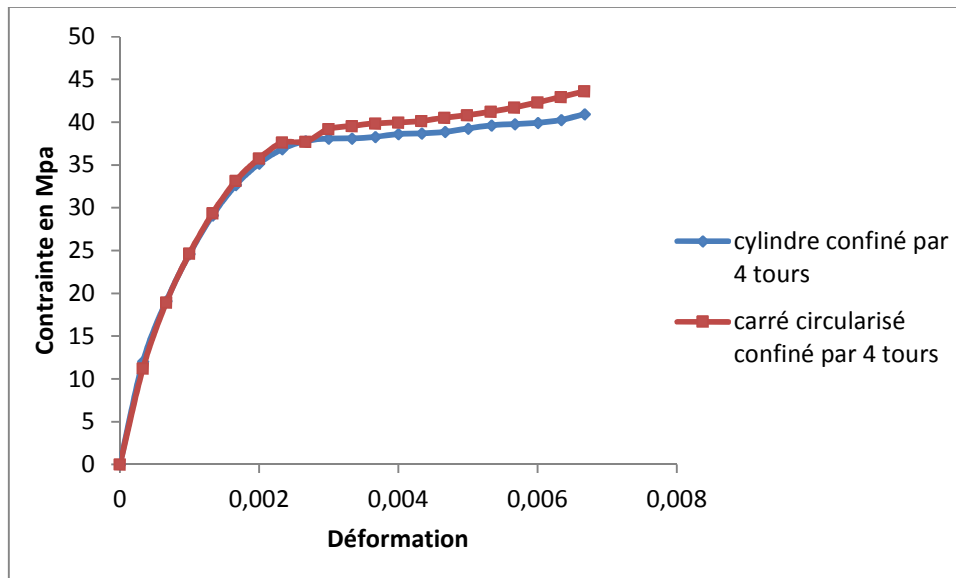


Figure IV-4 : comparaison d'un prisme modifié à un cylindre, confinés (4tours).

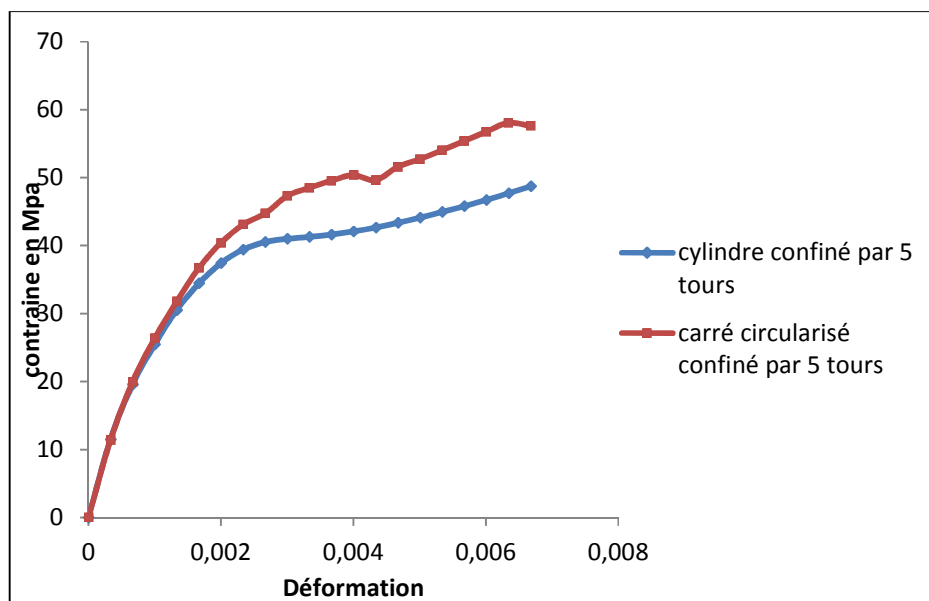


Figure IV-5 : comparaison d'un prisme modifié à un cylindre, confinés (5 tours).

IV-3-Courbes contrainte-déformation, cas de la variable largeur de la bande de FRP

IV-3-1-Comportement des cylindres

La figure IV-6 représente la courbe contrainte- déformation des cylindres confinés et non confiné tracé pour un nombre de tours d'hélice fixe, de 3tours en faisant varier la largeur de la bande (2, 3,4cm).

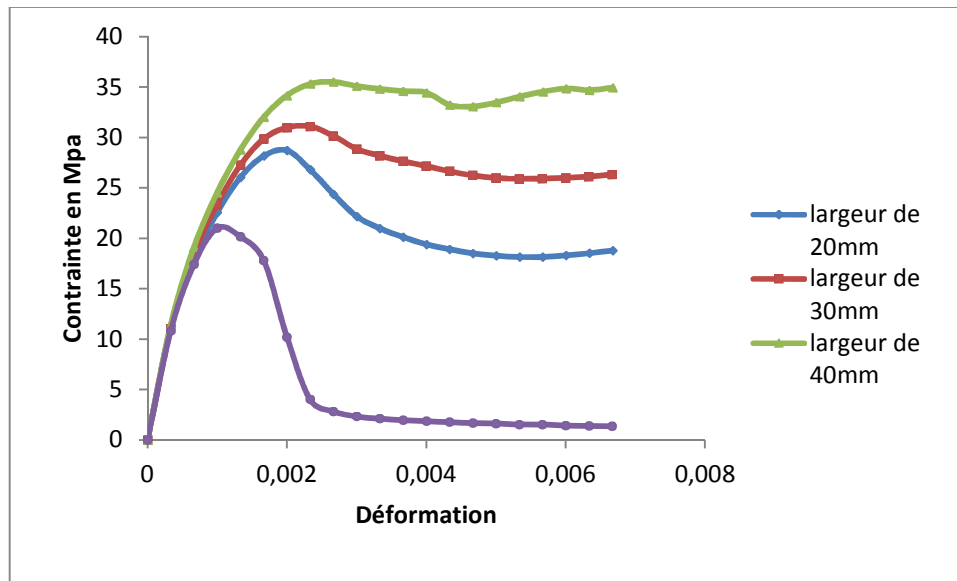


Figure IV-6 : courbes contrainte -déformation :cas des cylindres confinés par des hélices de 3 tours

La lecture des courbes contrainte-déformation de la figure IV-6, fait ressortir plusieurs remarques qui se résument à ce qui suit:

- ✓ les cylindres confinés avec des bandes de PRFV, présentent une nette amélioration en termes de résistance à la compression et de ductilité par rapport au cylindre non confiné.
- ✓ la comparaison des courbes pour les différentes configurations de confinement, montre que la résistance à la compression et la ductilité dépendent de la largeur de la bande. En effet, celles-ci augmentent à chaque fois qu'augmente la largeur de la bande.

Le tableau suivant représente les contraintes maximales et la déformation correspondante :

Tableau IV-2 :Tableau des contraintes maximales et les déformations correspondantes.

	Non confiné	20 mm	30 mm	40 mm
les contraintes maximales (Mpa)	21.012	28.70	31.096	35.49
les déformations correspondantes	0.001	0.002	0.002	0.0023

IV-3-2-Comportement des prismes à section circularisée

La figure IV-7 représente la courbe contrainte- déformation des prismes circularisé confiné et non confiné tracé à un nombre de tours d'hélice fixe est de 3 tours en variant la largeur de la bande (2, 3,4) cm.

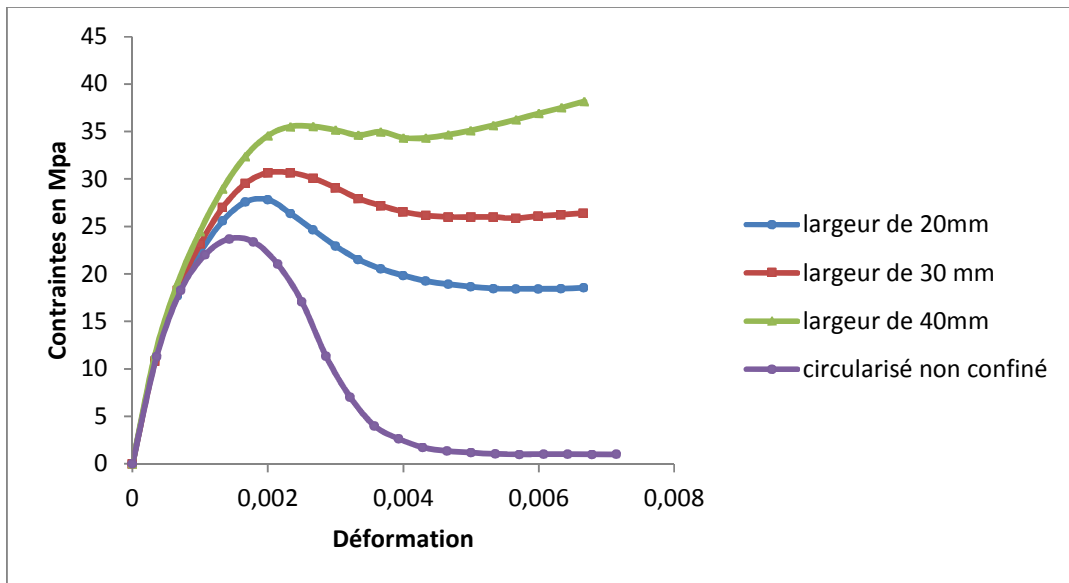


Figure IV-7 : courbes contrainte -déformation : cas circularisé confiné par des hélices de 3 tours

De la lecture des courbes contrainte-déformation de la figure IV-7, le même constat que dans le cas des cylindres.

L'ensemble des résultats obtenus pour différentes configurations de confinement pour les cylindres et les prismes à section circularisée, sont consignés dans le tableau IV-3

Tableau IV-3 : Tableau des contraintes maximales et les déformations correspondantes.

	Non confiné	20 mm	30 mm	40 mm
les contraintes maximales (Mpa)	23.68	27.57	30.66	35.52
les déformations correspondantes	0.0014	0.0019	0.002	0.002

IV-4-Quantification les gains en résistance des prismes à section circularisée

1^{er} cas : la variation de nombre de tours.

Le tableau suivant représente les différentes résistances de prismes modifiés, confinés avec des bandes de 30 mm de largeur et les gains en résistance correspondants.

TableauIV-4 : tableau des résistances et des gains en résistance des différents prismes modifiés

	résistance en Mpa	gain de résistance en %
Circularisé con confiné	23.68	/
Circularisé confiné par 3 tours	30.66	29.47
Circularisé confiné par 4 tours	43.60	84.12
Circularisé confiné par 5 tours	57.61	143.28

D'après l'histogramme représenté dans les figuresIV-8, on constate que le confinement des prismes à section circularisée, permet des gains en résistance à la compression.

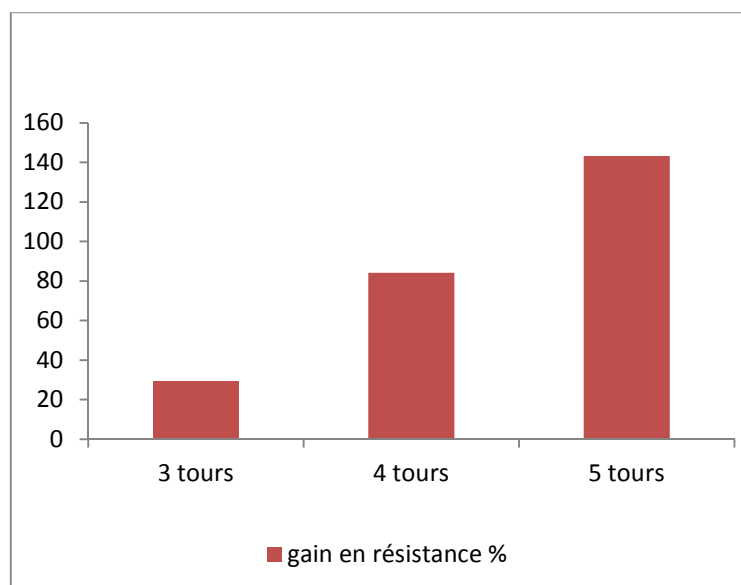


Figure IV-8: histogramme des gains en résistance (30mm)

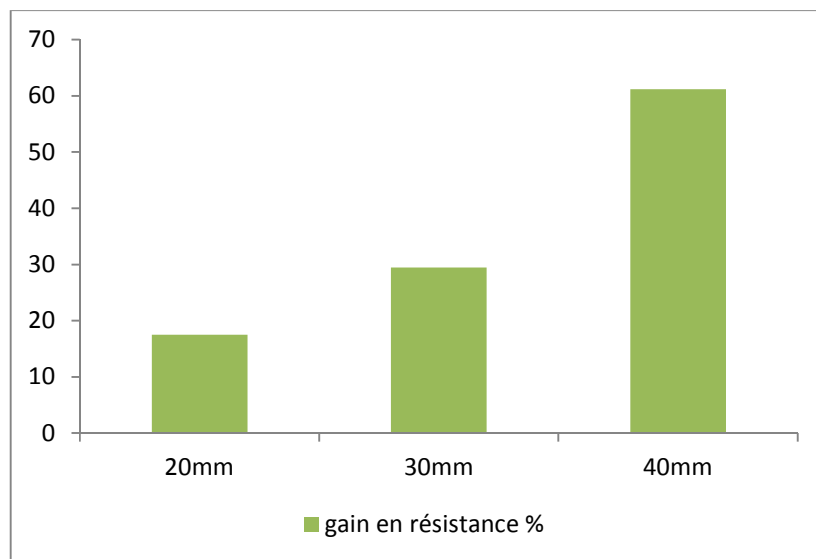
On enregistre, ainsi, des gains en résistance de 29.47%, 84.12 % et 143.28 % pour les prismes à section circularisée, confinés avec des bandes de PRFV de 30 mm formant respectivement des hélices à 3 tours, 4 tours et 5 tours.

2^{er} cas : la variation de la largeur de la bande.

Le tableau suivant représente les différentes résistances des prismes modifiés, confinés avec des hélices à 3 tours et les gains en résistance correspondants.

Tableau IV-5: tableau des résistances et des gains en résistance de différents prismes

	La résistance en Mpa	Le gain de résistance en %
Circularisé con confiné	23.68	/
Circularisé confiné par largeur de bande d'hélice de 20 mm	27.82	17.48
Circularisé confiné par largeur de bande d'hélice de 30 mm	30.66	29.47
Circularisé confiné par largeur de bande d'hélice de 40 mm	38.17	61.19

**Figure IV-9:** histogramme des gains en résistance (3 tours)

Les mêmes résultats sont constatés dans ce cas, avec des gains atteignant les valeurs de 17.48%, 29.47% et 61.19 % pour les prismes modifiés confiné avec des hélices à 3 tours, présentant respectivement, une largeur de 20mm, 30mm et 40mm.

IV-5- Cartographie des contraintes et des déformations

Les résultats sont représentés par différentes cartographies, qui regroupent celles des contraintes et celles des déformations

IV-5-1-Cartographie des contraintes

1^{er} Cas : variable nombre de tours de l'hélice (30mm).

La figure montre que dans le cas du prisme à section circularisé non confiné les contraintes se concentrent sur la hauteur de l'élément, alors que dans le cas non confiné ,elles se concentrent dans la bande en PRF.

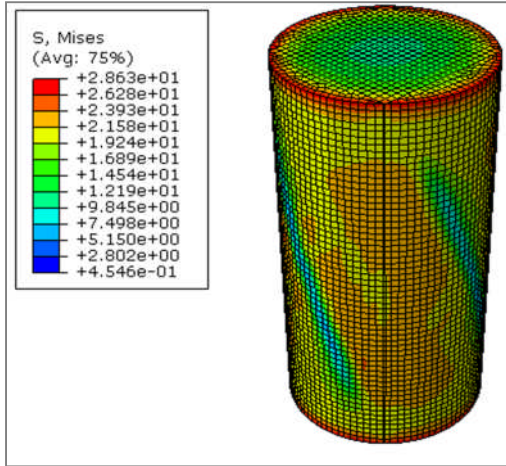


Figure IV-10 :Prisme à section, circularisée, non confiné

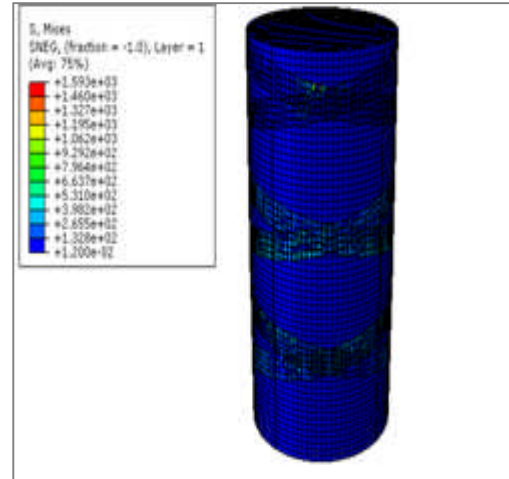
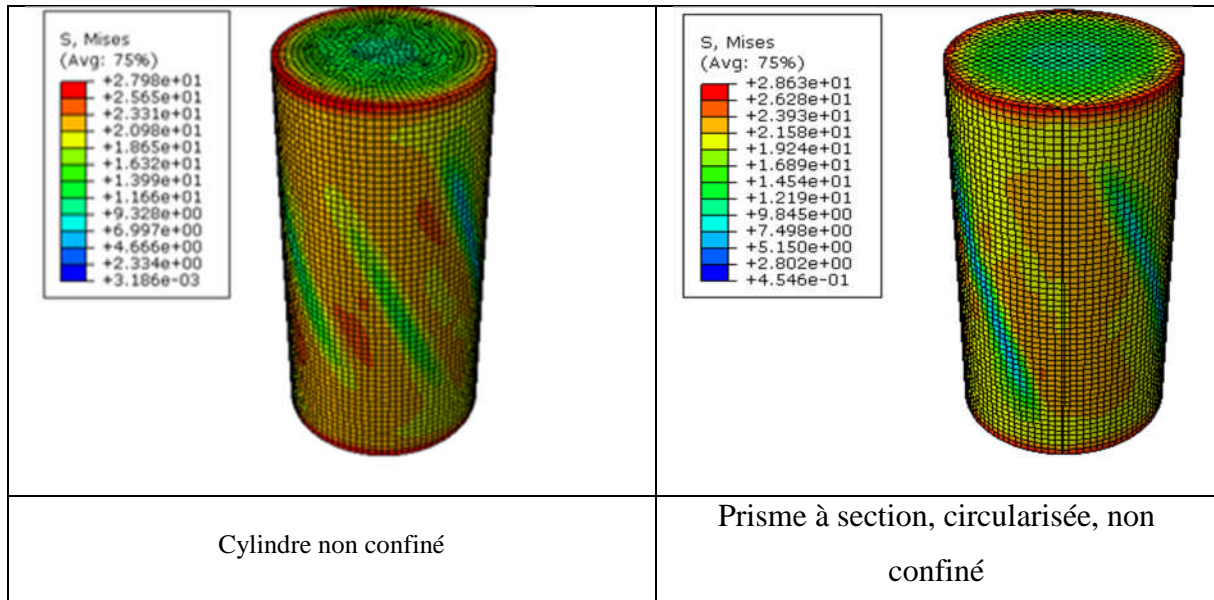


Figure IV-11 :Prisme à section, circularisée, confiné par 3 tours de largeur de 20mm

La figure suivante représente les cartographies des contraintes pour les différents éléments étudiés dans le cas non confiné et confiné en considérant différentes configurations de confinement.



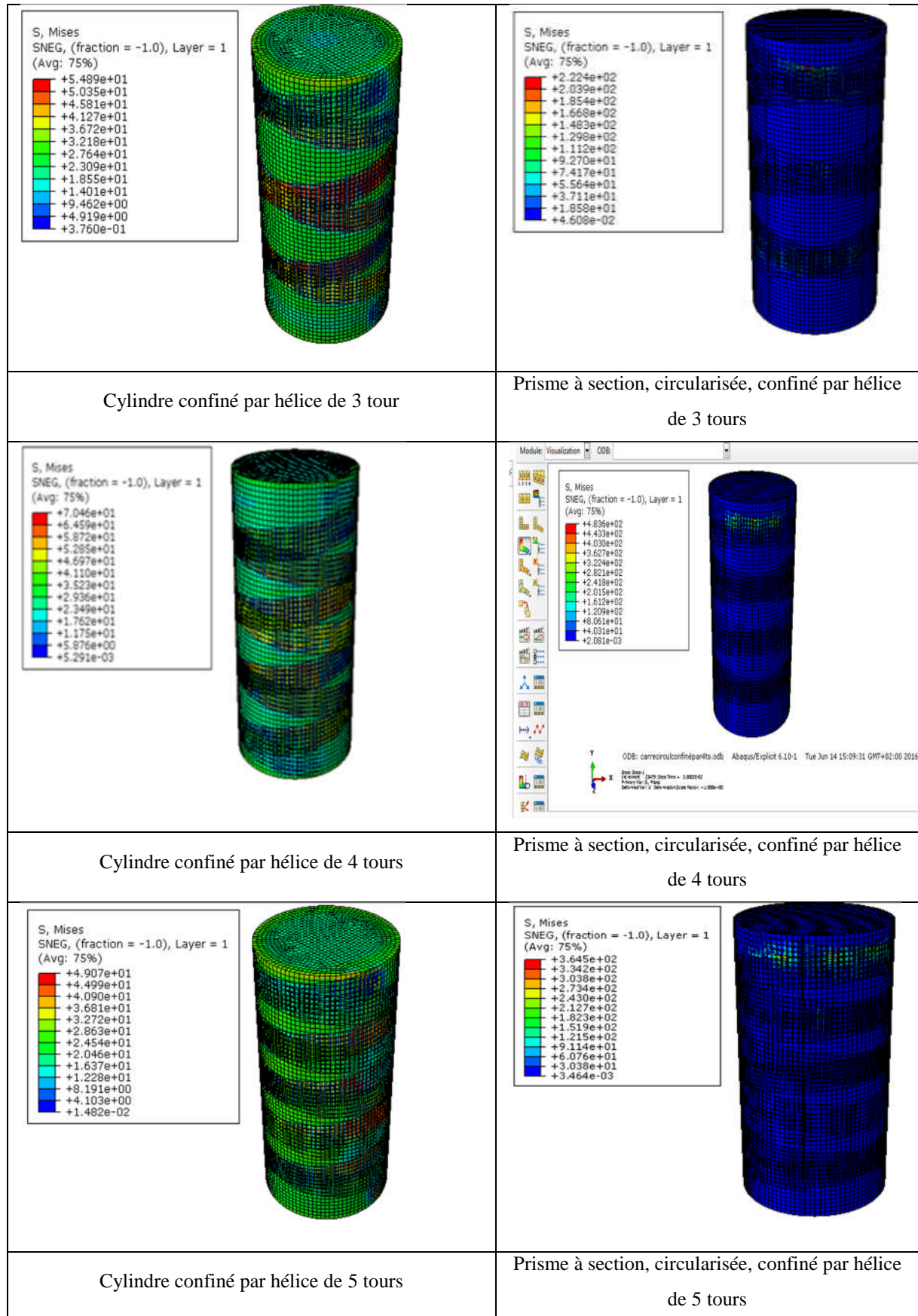
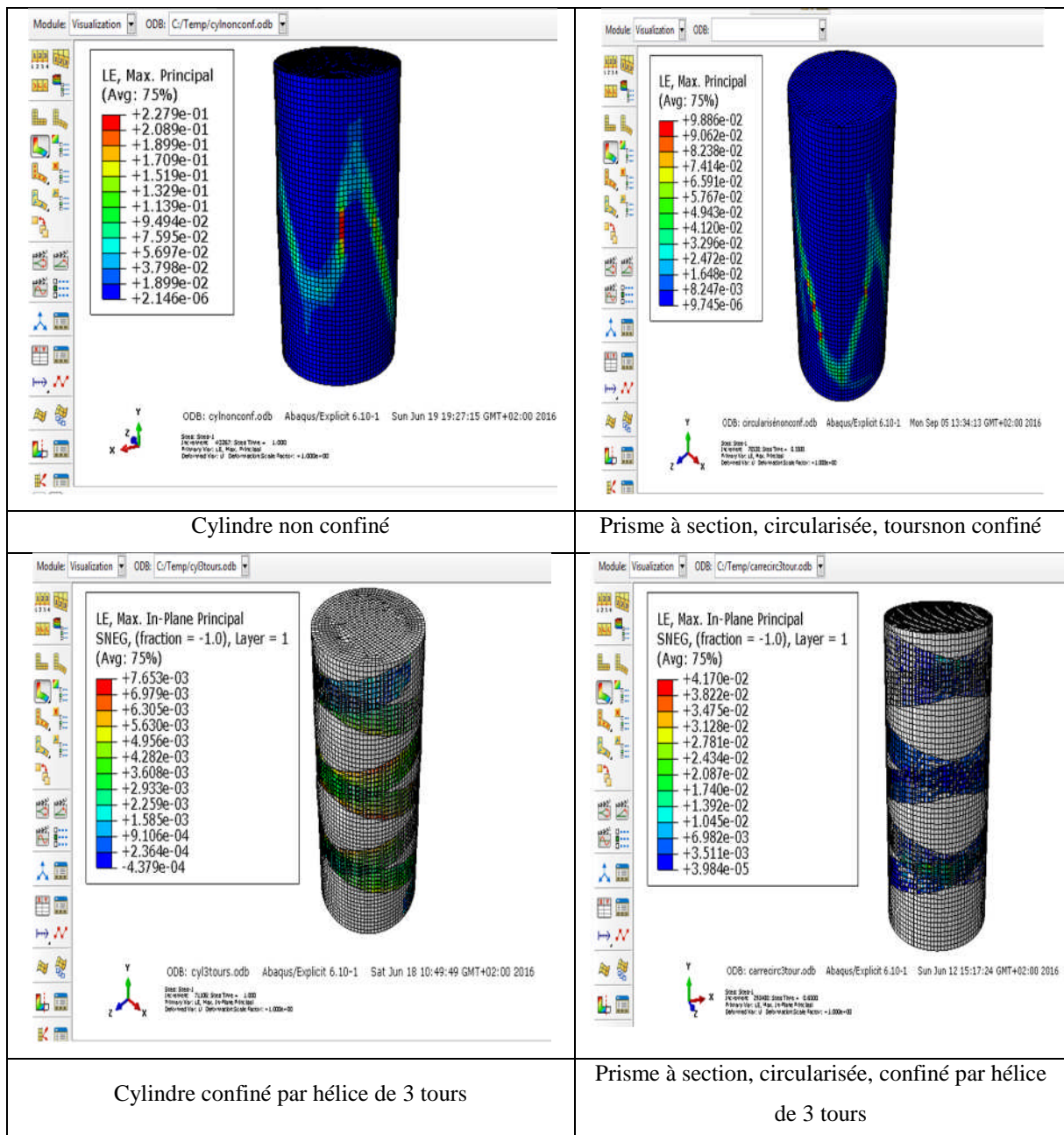


Figure IV-12: les cartographies des contraintes

D'après les figures IV-12, on remarque que les contraintes dans le cylindre non confiné, se propagent selon la hauteur du cylindre

Pour les cylindres et les prismes à section circularisée, confiné les différentes configurations, on remarque que les contraintes sont concentrées au niveau des hélices.

IV-5-2-Cartographie des déformations



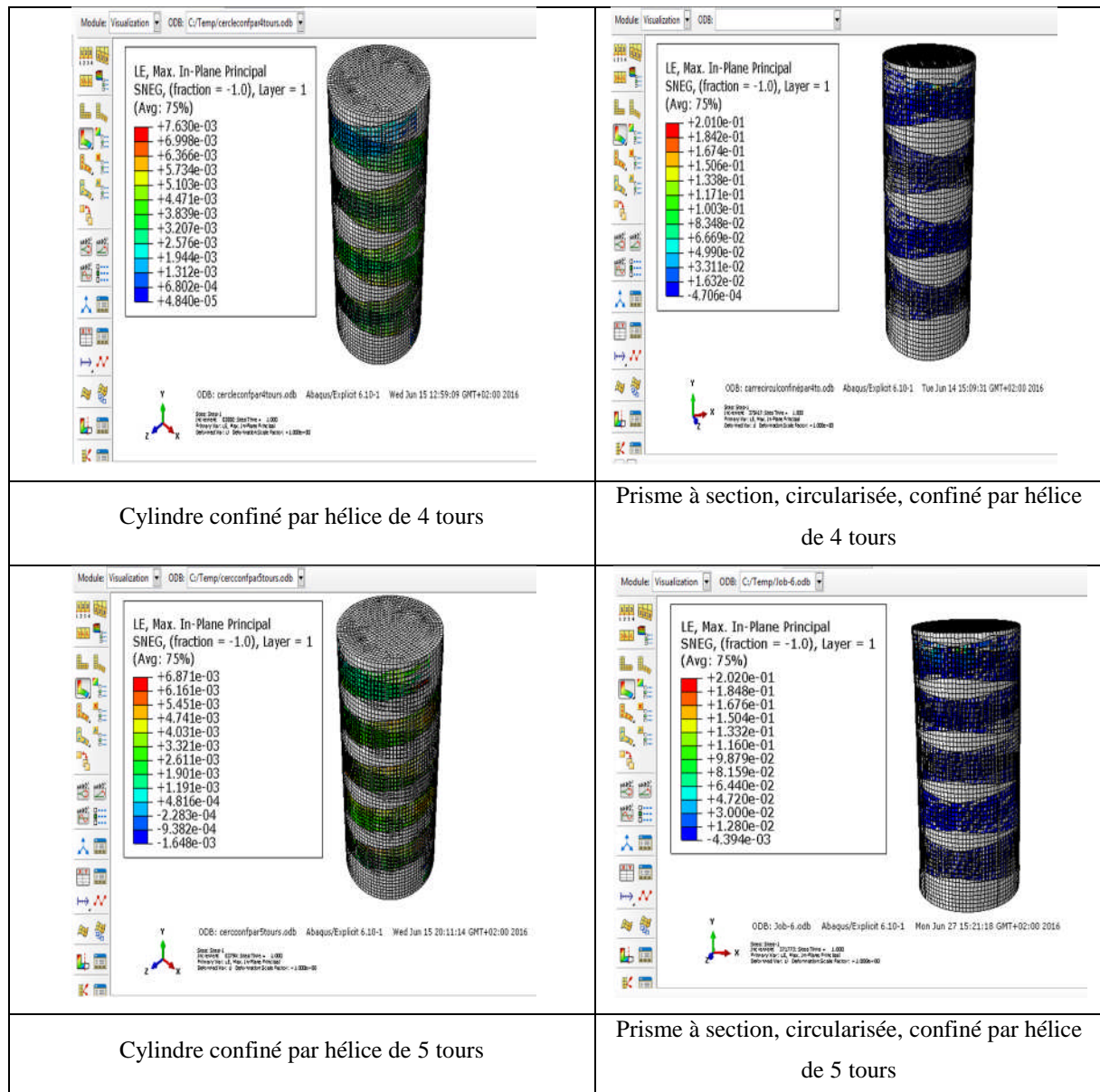


Figure IV-13: Cartographie des déformations

Pour les déformations, on remarque aussi une concentration des déformations au niveau des hélices pour les cylindres et les prismes, à section circularisée, confinés par contre pour les cartographies de déformations pour les prismes cylindriques et circularisés non confinés nous avons remarqué que les déformations sont concentrées au milieu des hélices et se propagent jusqu'au niveau de la base.

2^{ème} Cas : variable largeur de la bande de l'hélice (3 tours).

IV-5-3-Cartographie des contraintes

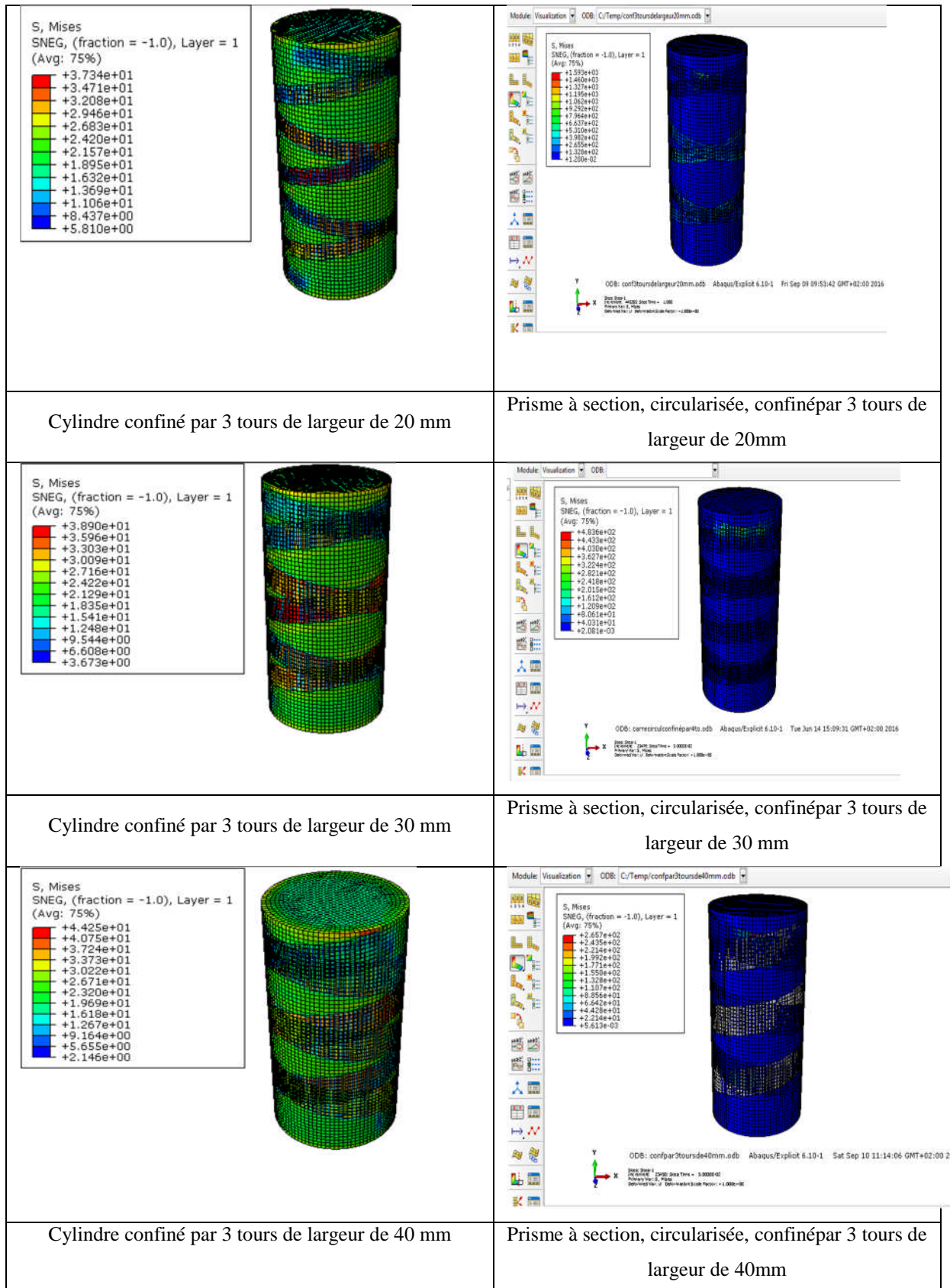
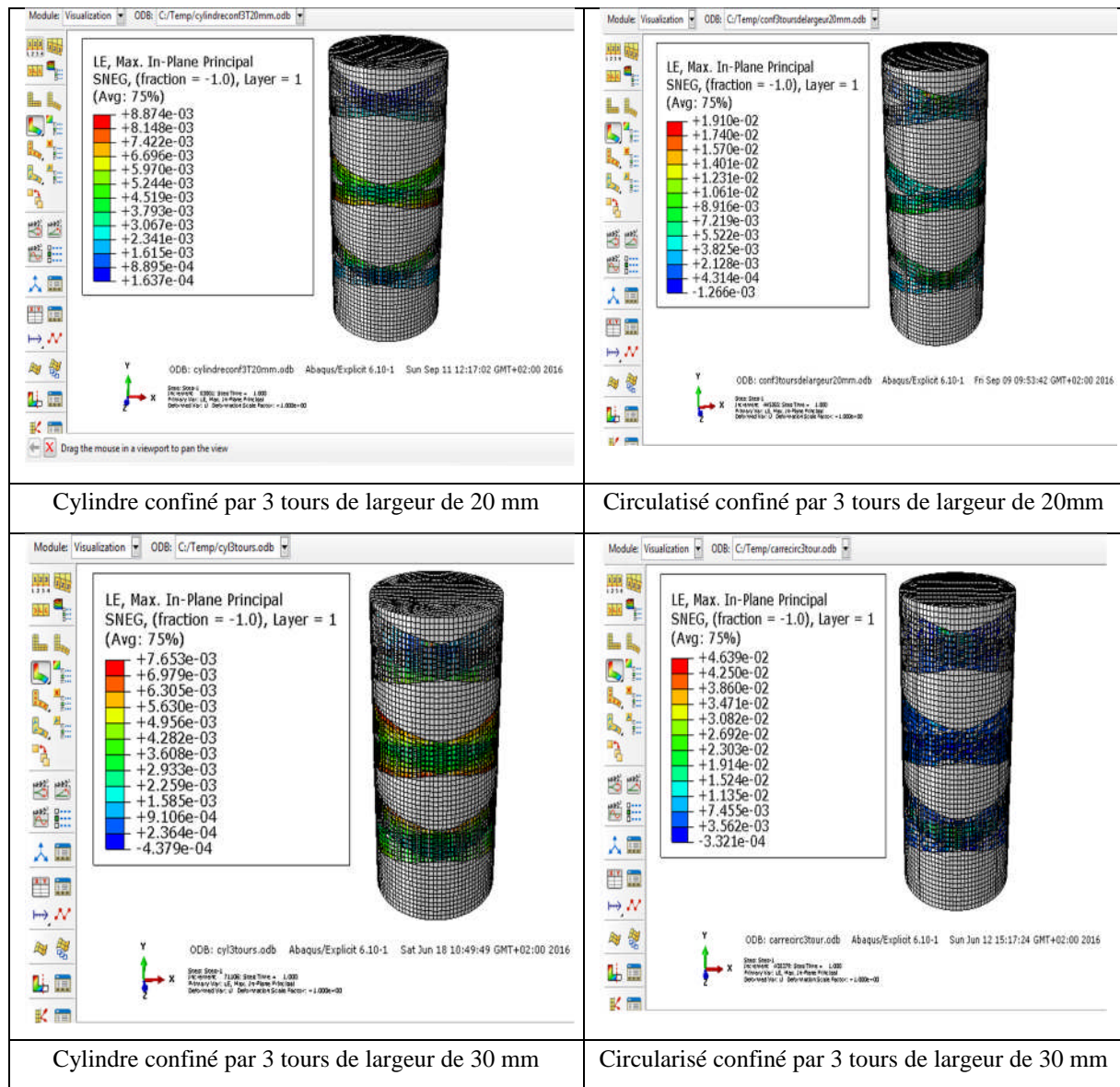


Figure IV-14: les cartographies des contraintes

Pour les cylindres et les prismes à section circularisée confinées présentés dans les différentes configurations ci-dessus, on montre que les contraintes sont toujours concentrées au niveau des hélices, lorsqu'on compare la cartographie du prisme à section circularisée non confiné à celle du prisme circularisé confiné par 3 tours de largeur de 20mm, on constate une amélioration de la résistance dans le cas du prisme circularisé confiné par 3 tours de largeur de 20mm comparativement à celle non confiné. Lorsqu'on compare aussi la cartographie de cylindre non confiné à celle confiné on remarque également qu'il y a une amélioration de la résistance dans le cas confiné.

IV-5-4-Cartographie des déformations



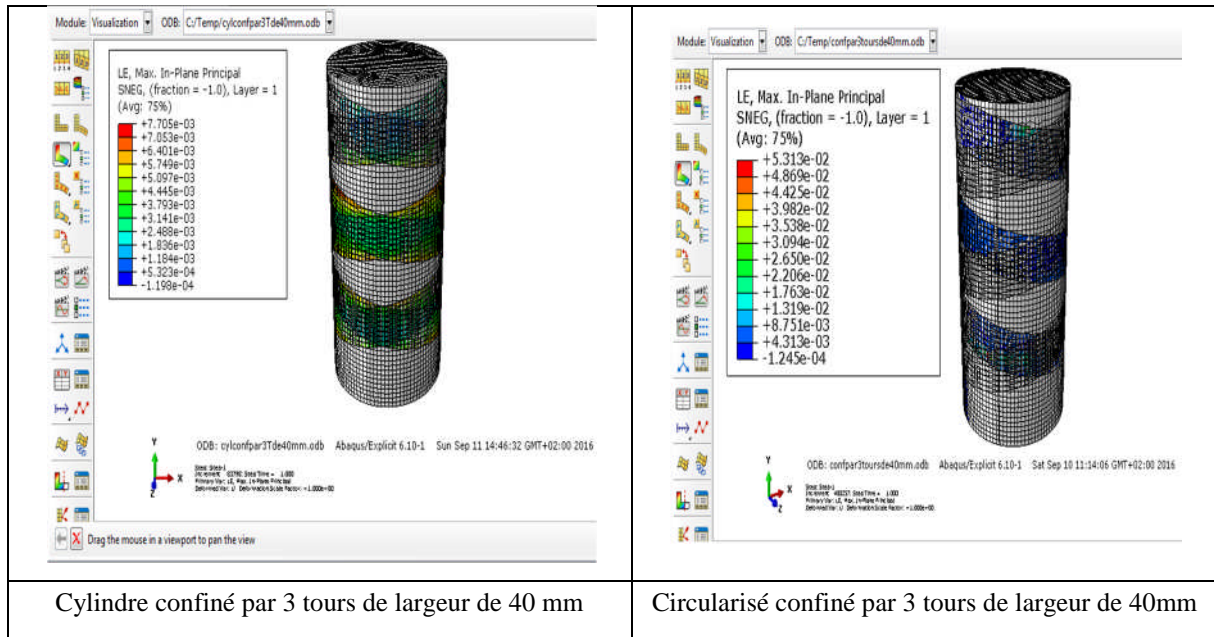


Figure IV-15 : les cartographies des déformations

Ces différentes cartographie des de deformationoions montrent que les deformations situé dans les différents prismes sont situé dans les hélices pour les prismes cylindriques et celle à section circularisé.

IV-5-5-Déformée

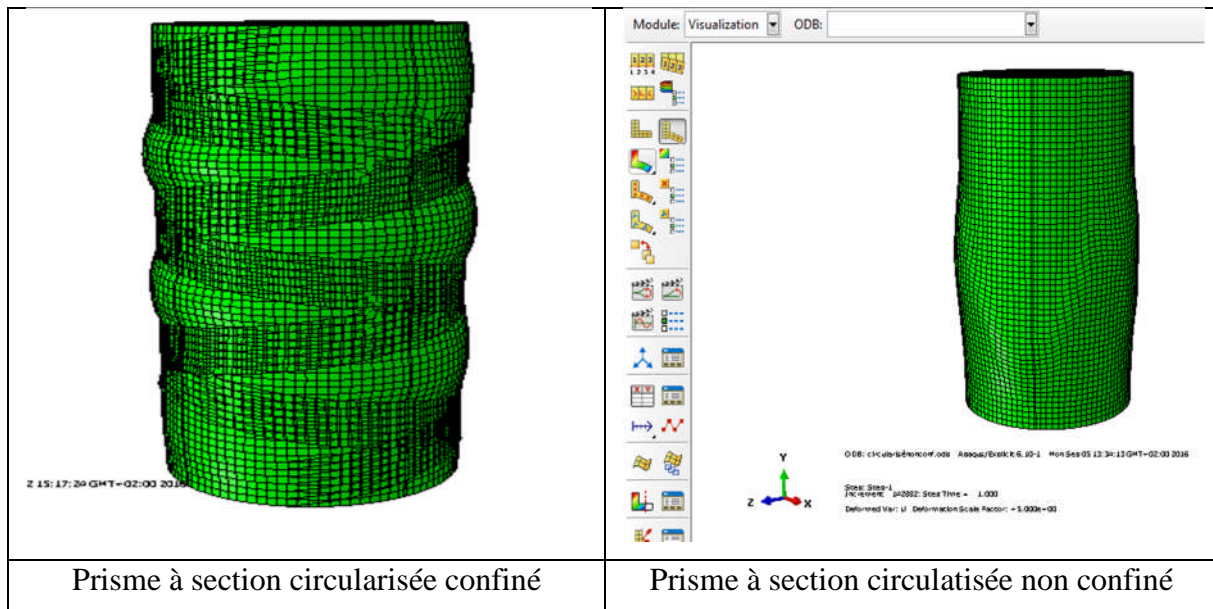


Figure IV-16: les cartographies de la déformée

D'après les cartographies de la déformée, on remarque un gonflement latéral sur la partie centrale du prisme modifié, non confiné qui est due aux déformations latérales du béton, par contre, dans le cas confiné, le gonflement est empêché, grâce à la mobilisation de la pression de confinement au sein des bandes hélicoïdales. On remarque alors, des zones de resserment au niveau du prisme modifié le long de la trajectoire des hélices.

IV-6-Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude numérique sur des prismes à section circularisée, confinés avec des bandes hélicoïdales en PRFV, cette partie d'étude a pour objectif de caractériser la résistance à la compression uniaxiale de ces différents prismes, et voir l'effet de la variation des paramètres de confinement (nombre de tours, largeur de la bande de l'hélice) sur le comportement à la compression de ces derniers. Par ailleurs, le comportement de ces prismes est comparé à celui des cylindres confinés de la même manière.

D'après les résultats obtenus on peut tirer les conclusions suivantes :

- ✓ Le confinement hélicoïdale des prismes modifiés, augmente la résistance et la ductilité de ces derniers .
- ✓ Les paramètres (nombre de tours et de la largeur de bande d'hélice) influent sur la résistance et la ductilité du béton confiné. celles-ci augmentent à chaque fois que le nombre de tours de l'hélice augmente. Elles augmentent aussi avec l'augmentation du paramètre largeur de bande.
- ✓ Les prismes à section circularisée, confinés ont un comportement à la compression identique à celui des cylindres pareillement confinés.

Conclusion Générale

Afin de mettre en évidence les effets du confinement hélicoïdal par des bandes composites à base de fibres de verre, sur le comportement du béton, une simulation numérique du comportement de prismes, à section circularisée, confinés hélicoïdalement avec des bandes en PRFV est réalisée, au moyen du code de calcul par éléments finis ABAQUS. Deux paramètres ont été considérés : la largeur de la bande composite et le nombre de tours de l'hélice qu'elle forme autour du prisme modifié.

Les résultats de cette simulation sont donnés sous forme de courbes contraintes-déformations qui traduisent la variation de la contrainte en fonction de la déformation axiale, selon les différentes configurations de confinement considérées, et sous forme de cartographies des contraintes et des déformations.

Par ailleurs, le comportement du prisme modifié est similaire à celui du cylindre confiné de la même façon.

Le confinement par des matériaux composites empêche les déformations latérales du béton et cela retarde l'apparition des fissures ce qui augmente la résistance, la ductilité et augmente la durée de vie des éléments confinés.

L'analyse des résultats obtenus montre clairement l'effet de la largeur de la bande de PRFV et du nombre de tours de l'hélice qu'elle forme autour du prisme modifié, sur la résistance à la compression et la ductilité de celui-ci. Elles augmentent, en effet, avec l'accroissement de la largeur de la bande et du nombre de tours de l'hélice.

On obtient ainsi, des gains en résistance de 29.47%, 84.12 % et 143.28 % pour les prismes à section circularisée, confinés avec des bandes de PRFV de 30 mm formant respectivement des hélices à 3 tours, 4 tours et 5 tours. Les mêmes résultats sont constatés dans ce cas, avec des gains atteignant les valeurs de 17.48%, 29.47% et 61.19 % pour les prismes modifiés confinés avec des hélices à 3 tours, présentant respectivement, une largeur de 20mm, 30mm et 40mm.

La visualisation des cartographies d'évolution des contraintes et des déplacements montre clairement que lorsque le béton est soumis à une compression uni-axiale, il connaît des concentrations de champs de contraintes dans la région centrale engendrant par la suite l'ouverture des fissures, qui conduira à la rupture de l'élément, tandis que dans le cas du cylindre confiné, l'évolution des contraintes est lente et gênée, grâce à la mobilisation de la pression latérale de confinement exercée par la bande composite.

Afin de mieux comprendre le comportement du béton confiné avec des bandes hélicoïdales continues en PRF et soumis à la compression uni-axiale, il serait intéressant dans les recherches futures de :

- ✓ Conduire des essais sur des prismes, à section circularisée ainsi confinés;
- ✓ utiliser un autre PRF à base de fibre d'autres types de composites comme le PRFC ;
- ✓ Conduire des essais sur des colonnes réelles ;
- ✓ conduire des essais avec des nombres de plis différents de la bande de PRF ;

Notations

σ_{bc} : La contrainte du béton à la compression.

f_{bc} : La limite de résistance en compression.

X_t : la contrainte à la rupture suivant l'axe longitudinal en traction.

X_c : la contrainte à la rupture suivant l'axe longitudinal en compression.

Y_t : La contrainte de rupture suivant l'axe transversal en traction .

Y_c : La contrainte de rupture suivant l'axe transversal en compression.

S : La contrainte à la rupture en cisaillement dans le plan de la couche.

X_{ϵ_t} : la déformation à la rupture en traction suivant l'axe longitudinale.

X_{ϵ_c} : la déformation à la rupture en compression suivant l'axe longitudinale.

Y_{ϵ_t} : la déformation à la rupture en traction suivant l'axe transversal.

Y_{ϵ_c} : la déformation à la rupture en compression suivant l'axe transversal.

S_{ϵ} : la déformation à la rupture en cisaillement dans le plan de la couche.

ϵ_L : la déformation principale suivant l'axe longitudinale.

ϵ_T : la déformation principale suivant l'axe transversal.

γ_{LT} : Cisaillement.

S_{LT} : est la contrainte à la rupture en cisaillement dans le plan (L, T)

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Houhou, N. (2012). Durabilité des interfaces collées béton/renforts composites: développement d'une méthodologie d'étude basée sur un dispositif de fluage innovant conçu pour être couplé à un vieillissement hygrothermique. Thèse de doctorat „Structures et Matériaux“ de l'Université Paris-Est.
- [2] Cromwell J.R., Harries K.A. and Shahrooz B.M., “Environmental durability of externally bonded FRP materials intended for repair of concrete structures”, *Construction and Building Materials* 25(5), pp. 2528-2539, (2011).
- [3] Quiertant M., “Matériaux organiques spécifiques pour la construction”, Yves Mouton (Ed.), Chapitre 23, pp. 503–525, ISTE, Londres (2011).
- [4] Rafik Affes , « Relations microstructure fissuration-perméabilité dans les milieux cimentés ».Thèse doctorat 2012.
- [5] Chen W.F, « Plasticity in reinforced concrete ».New York: McGraw-Hill Bookstore, 1982,456 p.
- [6] Jamet et al, «Triaxial behaviuor of a micro-concrete complete stress-strain for confining pressures ranging from 0 to 100 MPa».International conference on concrete under multiaxial conditions,Toulouse (france):1984.p 1236-1239.
- [7] Ramtanis, «Contribution à la modilisation du comportement multiaxial du béton endommagé avec description du caractère unilateral».Thèse de Génie civil : Université de Paris 6 E.N.S de Cachan ,1990.185p.
- [8] Lionel Gendre, « Matériaux composites et structures composites » . Université de Paris E.N.S de Cachan ,2011.
- [9] Berthelot Jean Marie, «Matériaux composites : comportement mécanique et analyse des structures». 4° édition, Lavoisier 2005 - 645p.
- [10] Berreur, L., De Maillard, B., et Nösperger, S. (2002) , « L'industrie française des matériaux Composite », Etude stratégique réalisée par Nodal Consultants pour le compte de la DiGITIP / SIM, Rapport final, Révision 2 du 13 mai 2002.

Références bibliographiques

- [11] Jean Luyckx, « Composites à fibres de carbone dans le génie civil ».Article.
- [12] Riad Benzaid, Habib Abdelhak Mesbah, Nasr-Eddine Chikh, « Contribution à l'Etude des Matériaux Composites Dans le Renforcement et la Réparation Des Eléments Structuraux Linéaires en Béton ».Thèse de doctorat2013.
- [13] Laarej Merad, « Etude par Spectroscopie Ramanet modélisation d'une résine composite RTM ». Thèse de doctorat 2010.
- [11] 14 Glossaire des matériaux composites– CARMA –Actualisation octobre 2006.
- [15] Mr. Merdas Abde-El Ghani, « Utilisation du TFC dans la réparation et le renforcement des poutres en BA ».Thèse de Magister
- [16] Gornet Laurent,« Généralités sur les matériaux composites ». version 1 . Centrale Nantes, Ecole d'ingénieur 2008 – 47p.
- [17] A. R. Blythe, Electrical resistivity measurements of polymer materials, Poly Test,4 195-209, 1984.
- [18] El Hadji Babacarly, « nouveaux MC (thermo-formable à base fibre de cellulase)Materialchemistry ».Institut national polytechnique de Grenoble _INPG 2008.
- [19] Pierre Etienne Bourbon ;J.P. Mercier ; Leif Carlson ;J.Andress « traite des matériaux ,matériaux composites à matrice organique ».Edition MASSON, 2004.
- [20] Laurent Molez ,« Le renforcement de poutres en béton armé par plaques d'acier ou de matériau composite ». janvier 2008.
- [21] Luyckx, J. « Composites à fibres de carbone dans le génie civil». Technique de l'ingénieur,Traité Plastiques et Composites, AM 5 620.1999.
- [22] G.Wu « Experimental study and theoretical analysis on strengthening concrete structures with FRP ».Phd thesis southeast, university, Nanjing, China, 2002.
- [23] G.Wu,Z.T.Lü, Z.S.Wu. «Strength and ductility of concrete cylinders confined with FRP composites ». Construction and building materials 20,134-148,2006.
- [24] Steiner, W. «Strengthening of structures with FRP strips». In: EI-Badry, M.M. (Ed.), Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, 1996 p. 407-417.
- [25] Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T. et Lam, L. « FRP strengthened RC structures», John Wiley. 2002 ,& Sons, Ltd, Chichester, UK, 2002 245 p.
- [26] WBAC: Waston Bowman Acme Corp. (2003). « Engineered solutions: composite strengthening systems», WBA 5000-02-2003, USA, 11 p.

Références bibliographiques

- [27] Balaguru, P., Nanni, A., et Giancaspro, J. « FRP composites for reinforced and prestressed concrete structures- A guide to fundamentals and design for repair and retrofit». Taylor & Francis, London, UK, 2009 334 p.
- [28] Nanni, A. et Norris, M.S. (1995). « FRP jacketed concrete under flexure and combined flexure-compression », *Construction and Building Materials*, Vol. 9, 1995 No. 5, pp.273-281.
- [29] Xiao, Y. et Ma, R. (1997). « Seismic retrofit of RC circular columns using prefabricate composite jacketing ». *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 10, p. 1357-1364.
- [30] Monti, G. (2003). « Seismic upgrade of reinforced concrete columns with FRP », Technical report, Teheran, 22 July 2003, 29 p.
- [31] SAAFI M, TOUTANJI A.H., LI Z., « Behaviour of Concrete Columns Confined with Fibre Reinforced Polymer Tubes ». *ACI Materials Journal*, Vol. 96, No. 4, Jul. Aug. 1999, 500-509 pp.
- [32] SAMAAAN M, MIRMIRAN A, SHAHAWY M. « Modeling of Concrete Confined by Fiber Composites ». *Journal of Structural Engineering*, ACSE, 124(9): 1025–1031. 1998.
- [33] KARBAHARI V.M., ECKEL D.A., « Strengthening of Concrete Column Stubs Through Resin Infused Composite Wraps ». *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 6(2), 92–107. 1993.
- [34] FARDIS MN., KHALILI HH., « FRP-encased concrete as a structural material ». *Mag Concrete Res* 1982,34(12),191-202.
- [35] TOUTANJI HA., « Stress strain characteristics of concrete columns confined with advanced fiber composite sheets ». *ACI Mater J* 1999 ; (5-6):397-404.
- [36] SHEIKH S.A., UZUMERI S.M., « Strength and ductility of tied concrete columns », *Journal of Structural Division*, ASCE, Vol. 106, No. 5, pp. 1079-1102, 1980.
- [37] RICHART F.E, BRANDTZAEG A, BROWN R.L., « A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses », University of Illinois, Engineering Experimental Station, Urbana, 1928 Bulletin no 185, p.104.
- [38] LAM L, TENG J.G., « Design-Oriented Stress-Strain Model for FRP-Confined Concrete in Rectangular Columns » *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 2003; 22; pp 1149-1186.

Références bibliographiques

- [39] SAAFI, M.; TOUTANJI, A. H.; and Li, Z.; «Behaviour of Concrete Columns Confined with Fibre Reinforced Polymer Tubes». *ACI Materials Journal*, Vol. 96, No. 4, Ju1.-AUG. 1999,500-509 pp
- [40] M. SHAHAWY, A. MIRMIRAN, T. BEITELMAN (2000). «Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns Composites: Part B». *engineering* 31 (2000) 471-480.19
- [41] Matthys, S., Toutanji, H., Audenaert, K. et Taerwe, L. (2005). « Axial load behavior of large-scale columns confined with fiber-reinforced polymer composites». *ACI structural Journal*, Vol. 102, No. 2, pp 258-267.22.
- [42] FAM, A. Z., ET RIZKALLA, S. H., (2001a). « Bihavior of axially loaded concrete-filled circular fiber-reinforced polymer tubes». *ACI structural Journal*, Vol. 98, No. 3, pp 280-289.18
- [43] HUEI-JENG LIN ET CHIN-TING CHEN. « Strength of Concrete Cylinder Confined by Composite Materials ». *Journal of reinforced plastics and composites*, Vol. 20, No. 18/2001 pp1577-1600.20.
- [44] Mirmiran, A, et Shahawy ,M, (1997). « Behavior of concrete columns confined with fiber composites ». *Journal of structural Engineering* , ASCE, Vol.123,pp.583-590.
- [45] KARABINIS, A. I., ET ROUSAKIS, T. C. « Concrete confined by FRP material: a plasticity approach». *Engineering Structures* 24 (2002) 923–932 Received 20 June 2001; received in revised form 3 January 2002; accepted 3 January 2002.
- [46] Chaallal O,Hassan M, Leblanc M. « Circular columns confined with FRP: Experimental versus predictions of models and guidelines ». *ASCE, Journal of Composites for Construction*, Vol. 10, No. 1, pp. 4-12, 2006.33.
- [47] Matthys, S., Toutanji, H., Audenaert, K. et Taerwe, L. (2005). « Axial load behavior of large-scale columns confined with fiber-reinforced polymer composites». *ACI structural Journal*, Vol. 102, No. 2, pp 258-267.22
- [48] HADI, M. N. S., (2006). “« Comparative study of eccentrically loaded FRP wrapped columns». *Composite structures*, Vol. 74, No. 2, pp 127-135.23
- [49] Pan J.L.,Xu,T.et Hu,Z.J. «Experimental investigation of load carrying capacity of the slender reinforced concrete columns wrapped with FRP», *Construction and Building Materials*, Vol. 21, pp. 1991-1996, 2007.Pan J.L.,Xu,T.et Hu,Z.J.
- [50] Kumutha, R.,Vaidyanathan, R., Palanichamy, M.S. « Behaviour of reinforced concrete rectangular columns strengthened using GFRP». *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29, pp. 609-615, 2007.

Références bibliographiques

- [51] G. WU, Z.S. WU, Z.T. LU AND Y.B. ANDO. « Structural Performance of Concrete Confined with Hybrid FRP Composites ».Journal of reinforced plastics and composites, Vol. 27, No. 12/2008 pp1323-1348.24
- [52] Abbasnia, R.,Ziaadiny,H «Behavior of concrete prisms confined with FRP composites under axial cyclic compression», Engineering Structures, Vol. 30,2009, pp. 493-505, 27.
- [53] Thong M, Pham¹, Le V,Doan, Muhammad N,S,Hadi . « Strengthening square reinforced concrete columns by circularisation and FRP confinement» .Construction and Building Materials.Volume 49, December 2013,pages 490-499.
- [54] Ali ahmed C , ait tahar K. «Behavior of concrete cylinder confined with helical composites strips.procedia Engineering » .volume 144,2015,pages 157-164
- [55] « logiciel de calcul numérique» Document Abaqus .