

République Algérienne Démocratique 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

Mémoire de Fin d'Etude

En vue de l'obtention du diplôme

Master Académique en Génie civil

Spécialité : Structure

Thème

***Simulation numérique des cylindres en béton à base
des déchets de verre confinés.***

Proposé et dirigé par

KHELOUI. Fatma

Réalisé par

BENKACI Kahina

Membres de Jury

Mme CHAHOUR. Kahina
Mme BOUZBOUJA. Fatma
Mme. KHELOUI. Fatma
Mr.SI SALEM. Abdelmadjid

UMMTO
UMMTO
UMMTO
UAMB

Présidente
Examinatrice
Promotrice
Invité

Promotion 2018-2019



REMERCIEMENTS

Avant tout je remercie le bon Dieu tout puissant qui m'a donné force, courage et patience pour élaborer, préparer, et présenter ce modeste travail.

*Je tiens à exprimer toute ma gratitude et ma parfaite considération à ma promotrice, **Mme KHELOUI Fatma** pour sa disponibilité permanente, ses orientations, sa modestie, sa sympathie, et son soutien durant toute la période de réalisation de mon travail de recherche et d'avoir mis à ma disposition tous les moyens possibles pour travailler dans les meilleures conditions.*

*Je remercie vivement **Mr ALMANSBA Madjid** et **Mr SI SALEM Abdelmadjid** d'avoir consacré énormément de leurs temps pour répondre à mes interrogations et me permettant ainsi de résoudre les problèmes rencontrés dans ABAQUS, et je les remercie aussi pour leurs conseils, leur gentillesse et leur encouragement.*

*Je remercie aussi **Mme AKMOUSSI Ourdia** pour le soutien moral, conseils et orientations forts appréciés.*

*Je tiens à remercier les doctorants **Mr BENCHABEN.T, NEKMOUCHE.A**, et **Mr DJADOUN.T** pour leurs aides, leurs orientations et leurs conseils.*

je remercie également les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner ce travail et de l'enrichir par leurs propositions.



Dédicaces

Je dédie ce travail à :

A MES CHERS PARENTS

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez.

Puisse dieu, le très haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

A mes chers frères, Ali, Youva et ma sœur bien aimée, Ouardia pour leur soutien et leurs encouragements.

A toi rahim, je te remercie pour tes sacrifices, ton soutien moral et ta gentillesse.

A tous mes amis (es) sans exception

Résumé

Le recyclage et la valorisation des déchets sont aujourd'hui considérés comme une solution d'avenir afin de répondre au déficit entre production et consommation et de protéger l'environnement. Plusieurs déchets peuvent être recyclés et utilisés dans le domaine de génie civil, l'incorporation des déchets de verre dans la matrice béton nous permet de pérenniser et préserver les ressources naturelles et de protéger l'environnement.

Les matériaux composites sont largement utilisés dans le confinement des colonnes en béton pour répondre aux besoins d'amélioration de leurs performances mécaniques. Les différentes techniques et modèles de confinement par collage de ces matériaux composites rapportés dans la littérature scientifique ont confirmés que la pression latérale du confinement est en fonction des caractéristiques géométriques et mécaniques des composites.

Notre travail consiste à étudier, par simulation numérique sous Abaqus, le comportement sous compression, des cylindres en béton à base des déchets de verre confinés par un matériau composite, le tissu utilisé issu lui aussi de l'industrie de récupération. Les matériaux constitutifs sont modélisés suivant des modèles numériques à savoir : le modèle « *Concrete Damaged Plasticity* » qui permet de tenir compte de la dissymétrie du comportement non linéaire du béton en compression et en traction, couplé avec l'endommagement pour représenter l'évolution des fissures, et un modèle élastique orthotrope pour prédire la réponse des composites.

Dans cette étude, on a considéré trois types de confinement à savoir : confinement totale, confinement partiel circulaire et le confinement partiel hélicoïdale, et dans le cas du confinement circulaire on fait varié les caractéristiques géométriques (largeur, épaisseur et espacement), les résultats numériques obtenus en termes d'évolution des contraintes et des variables d'endommagement montrent une amélioration en matière de résistance et de ductilité des spécimens étudiés.

Table des matières

Résumé

Abstract

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Principales notations

Introduction générale	1
------------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur les bétons

I.1 Introduction	4
I.2 Historique	4
I.3 Définition	5
I.4 Les composants du béton	6
I.4.1 Le ciment	6
I.4.2 Les granulats	6
I.4.3 L'eau	8
I.4.4 Les adjuvants	8
I.5 Différentes types de béton	9
I.5.1 Bétons Hautes Performances (BHP)	9
I.5.2 Bétons à base de résines	9
I.5.3 Bétons légers	10
I.5.4 Les bétons autoplaçants (BAP)	10
I.5.5 Bétons de fibres	10
I.5.6 Bétons lourds	10
I.5.7 Bétons apparents	11
I.5.8 Les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP)	11
I.6 Domaines d'applications	11
I.7 Caractéristiques physiques et mécaniques	12
I.7.1 Caractéristiques physiques	12
I.7.2 Caractéristiques mécaniques	12
I.7.2.1 Résistance à la compression	12

I.7.2.2 Résistance à la traction	13
I.8 Conclusion	14
Références bibliographiques	15

Chapitre II : Les déchets dans le béton

II.1 Introduction.....	16
II.2 Définition de Déchet.....	16
II.3 Gestion des déchets.....	16
II.4 Recyclage des déchets	16
II.5 Technique de recyclage	17
II.6 Déchets utilisés dans le domaine du Génie Civil	17
II.6.1 Laitiers	17
II.6.2 Sous-produits provenant des centrales thermiques	18
II.6.3 Déchets	19
II.7 Recyclage des déchets de verre	21
II.7.1 Définition du verre	21
II.7.2 Poudre de verre	21
II.7.3 Le verre dans les bétons	22
II.7.4 Réaction alcali-silice du verre	22
II.7.5 Réaction pouzzolanique du verre	23
II.8 Conclusion	24
Références bibliographiques	25

Chapitre III : Renforcement des structures

III.1 Introduction	26
III.2 Définitions	26
III.3 Nécessité de la réhabilitation d'une structure	26
III.4 Techniques de renforcement et de réparation des structures en béton armé.....	27
III.4.1 Réparation des fissures	27
III.4.2 Adjunction d'armatures d'aciers	28
III.4.3 chemisage en béton armé	28
III.4.4 Chemises en acier	29

III.4.5 Tôles collées	29
III.4.6 Précontrainte additionnelle	30
III.4.7 Béton projeté	31
III.5 Renforcement des structures à l'aide des matériaux composites	32
III.5.1 Généralité sur les matériaux composites	32
III.5.2 Exemples de matériaux composites	32
III.6 Les fibres les plus utilisées.....	34
III.7 Matrice polymère	35
III.8 Mise en œuvre des composites de renfort en Génie Civil	35
III.9 Exemples de renforcement des éléments structuraux à l'aide de matériaux composites :	
III.9.1 Les poutres	38
III.9.2 Les dalles	39
III.9.3 Les colonnes	39
III.10 Études antérieures sur le confinement de béton par matériaux composites	40
III.11 Comportement du béton confiné	45
III.12 Conclusion.....	47
Références bibliographiques	48

Chapitre IV : Simulation numérique

IV.1 Introduction	51
IV.2 Présentation générale d'ABAQUS	51
IV.3 Les principales composantes de la fenêtre d'ABAQUS	52
IV.4 Rappel des actions pour créer un modèle Abaqus	53
IV.5 Modélisation par éléments finis Abaqus CAE	54
IV.5.1 Dimension et géométrie	54
IV.5.2 Propriétés et assemblage	57
IV.5.3 Maillage et modèle élément fini	60
IV.5.4 Gestion du contact	63
IV.5.5 Chargement et conditions aux limites	65
IV.5.6 Gestion des résultats : STEP et JOB.....	67
IV.6 Modélisation du comportement des matériaux.....	68

IV.6.1 Modèle élasto plastique endommageable pour le béton	68
IV.6.1.2 Comportement en traction	69
IV.6.1.3 Comportement cyclique uni-axial	71
IV.6.2 Un modèle élastique-Orthotrope pour les composites	73
IV.6.3 Critère de rupture des composites	73
IV.6.4 Paramètres des modèles	74
IV.7 Les variantes pour le confinement circulaires	74
IV.8 Conclusion	76
Références bibliographiques	77

Chapitre IV : Présentation des résultats et interprétations

V.1 Introduction	78
V.2 Résultats de l'analyse numérique	78
V.2.1 Confrontation des contraintes en compression	78
V.2.2 Comportement global des cylindres en compression	79
V.3 Influence du confinement	79
V.3.1 Évaluation des contraintes	80
V. 3.2 Evolution des déformations	84
V.3.3 Evolution des dommages.....	87
V.4 Confrontation des courbes	89
V.5 Influence de la géométrie des bandes de tissu dans le confinement circulaire.....	91
V.5.1 Influence de l'espacement des bandes	91
V.5.2 Influence de la largeur des bandes	92
V.5.3 Influence de l'épaisseur des bandes	93
V.6 Comparaison entre la meilleure variante et le modèle 1	94
V.6.1 Evolution des contraintes.....	95
V.6.2 Evolution des déformations	96
V.6.3 Evolution des dommages.....	97
V.6.4 Confrontation des courbes	98
V.7 Conclusion	99
Conclusion générale	100

Liste des figures :

Figure I.1: Schématisation des constituants du béton	6
Figure I.2 : Les granulats	7
Figure I.3 : Essai de compression uni axiale	12
Figure I.4 : Comportement du béton à la compression	13
Figure II.1: Transformation des déchets de verre en poudre de verre	22
Figure II.2: Représentation schématique d'un mécanisme possible entraînant des dégâts lors de la réaction alcali-silice	23
Figure II.3: Indices d'activité pouzzolanique du verre utilisé dans des conditions différentes	24
Figure III.1: Chemisage en béton armé	28
Figure III.2: Chemisage en acier	29
Figure III.3: Dimensions des spécimens d'essai	29
Figure III.4: Renforcement d'un viaduc par tôles collées	30
Figure III.5: précontrainte additionnelle	31
Figure III.6 : Béton projeté	31
Figure III.7: Composition d'un PRF	33
Figure III.8: Organigramme des différentes familles de fibres	34
Figure III.9 : Armatures de FRP utilisées dans la construction	35
Figure III.10: Organigramme des différentes familles de matrice	35
Figure III.11: Illustration renforcement par plats consolidés à fibres de carbone	36
Figure III.12 : Illustration renforcement par stratification au contact avec FRPC	36
Figure III.13: Les méthodes typiques d'envelopper le «PRF» pour les colonnes en B.A	37
Figure III.14: Enroulement filamentaire	37
Figure III.15 : Renforcement par chemisage avec une coquille préfabriquée	38
Figure III.16: poutres en BA renforcées par matériaux composites	39
Figure III.17: Renforcement d'une dalle travaillant dans les deux sens par des lamelles en «PRF»	39
Figure III.18: Confinement de colonnes	40

Figure III.19 : Modes de rupture des spécimens	41
Figure III.20 : Effet de confinement sur le comportement du béton	42
Figure III.21 : Dimensions de colonne et configuration d'enveloppe	42
Figure III.22: Courbes contraintes-déformations des cylindres	43
Figure III.23: Courbe contrainte-déformation des bielles	44
Figure III.24: Changement de section de la colonne	44
Figure III.25 : Modes de rupture des colonnes confinées avec CFRP	45
Figure III.26. Courbes contraintes déformations d'un béton confiné et non confiné .	46
Figure III.27 : Effet de la pression de confinement sur le comportement du béton ..	47
Figure IV.1: Présentation de l'interface ABAQUS	52
Figure IV.2: la géométrie du cylindre	55
Figure IV.3: la géométrie des discs	55
Figure IV.4: la géométrie des cerces	56
Figure IV.5: la géométrie de l'hélice	56
Figure IV.6: la géométrie de la coque	57
Figure IV.7: Béton témoin (non confiné)	58
Figure IV.8: Béton avec ajouts (15PV10SV)	58
Figure IV.9 : Confinement Partial Circulaire	59
Figure IV.10 : Confinement Partial Hélicoïdal	59
Figure IV.11 : Confinement Totale	60
Figure IV.12 : Maillages adoptés pour les différents des éléments	62
Figure IV.13: Courbes contrainte-déformation pour les 4 configurations de maillage	63
Figure IV.14 : Modélisation du contact: Béton-Disque	64
Figure IV.15: Modélisation du contact: Béton-Composite	65
Figure IV.16: application des conditions aux limites	66
Figure IV.17: application du chargement	66
Figure IV.18 : Le module STEP	67
Figure IV.19 : Le module JOB	68
Figure IV.20 : Réponse du modèle à la compression simple	69

Figure IV.21 : Comportement du béton soumis à une traction uni axiale	70
Figure IV.22 : Cycle uni-axial de chargement (traction-compression-traction)	72
Figure IV.23 : Pli d'un matériau composite orthotrope	73
Figure V.1: histogramme de confrontation des résultats expérimentaux, numériques	78
Figure V.2 : contrainte-déformation béton témoin et béton ajout	79
Figure V.3 : Évolution des contraintes dans BNC.....	80
Figure V.4 : Évolution des contraintes dans le BPCC et le composite.	81
Figure V.5 : Évolution des contraintes dans le BPCH et le composite.	82
Figure V.6 : Évolution des contraintes dans le BTC et le composite.....	83
Figure V.7 : Évolution des déformations dans BNC.	84
Figure V.8 : Évolution des déformations dans BPC.....	85
Figure V.9 : Évolution des déformations dans BTC.....	86
Figure V.11 : Évolution des dommages dans le BPCC	87
Figure V.12 : Évolution des dommages dans le BPCH.....	88
Figure V.13 : Évolution des dommages dans le BTC.	88
Figure V.14: Confrontations des courbes (σ – ϵ) : type de confinement.....	89
Figure V.15: Histogramme des contraintes en fonction de type de confinement.....	90
Figure V.16 : Confrontation des courbes (σ – ϵ) : variation d'espacement.....	91
Figure V.17: Histogramme des contraintes en fonction de la variation d'espacement	91
Figure V.18 : Confrontation des courbes (σ – ϵ) : variation de largeur.....	92
Figure V.19 : Histogramme des contraintes en fonction de la variation de largeur	93
Figure IV.20 : Confrontation des courbes (σ – ϵ) : variation d'épaisseur.....	93
Figure IV.21: Histogramme des contraintes en fonction de la variation d'épaisseur .	94
Figure V.22 : Évaluation des contraintes.....	95
Figure V.23 : Évaluation des déformations.	96
Figure V.24 : Évolution des dommages	97
Figure V. 25 : Confrontations des courbes (σ – ϵ) : modèle1 et modèle 2.....	98
Figure V. 26 : Histogramme des contraintes: modèle1 et modèle 2.....	98

Liste des tableaux

Tableau I.1: Ordre de grandeur en proportions	6
Tableau I.2: Les granulats les plus utilisés	7
Tableau I.3 : type d'adjuvant en fonction de sa propriété	9
Tableau IV.1: Les différentes lois utilisées pour le modèle adopté pour le béton	72
Tableau IV.2: Paramètres utilisés pour définir le comportement du béton	74
Tableau IV.3: Paramètres du modèle numérique des composites PP	74
Tableau IV.4: Configuration pour les variations des cerces	75

Principales Notations

f_{cj}	La résistance à la compression du béton à j jours.
f_{c28}	La résistance à la compression du béton à 28 jours.
f_{tj}	La résistance caractéristique du béton à la traction a j jours.
f_{cc}	Résistance à la compression du béton confiné.
f_{c0}	Résistance à la compression du béton non confiné.
f_l	Pression de confinement latérale.
ϵ_{cc}	Déformation axiale maximale du béton confiné.
ϵ_{c0}	Déformation axiale maximale du béton non confiné.
E_1, E_2	Modules d'élasticité du tissu
ν_{12}	Coefficients de Poisson du tissu
G_{12}	Module de cisaillement du tissu de verre.
E	Module de cisaillement du tissu de verre.
Ψ	Angle de dilatation du béton sous compression axiale.
a_f	Rapport entre contrainte bi-axiale/uni-axiale du béton.
d_t	Variables d'endommagement de traction.
d_c	Variables d'endommagement en compression.
f_c	Force de compression du béton.
FRP	Polymère Renforcé de Fibres.
GFRP	Glass Fiber reinforced polymer (polymère renforcé de fibres de verre).
PRFV	Polymère Renforcé de Fibres de verre.
PRFC	Polymère Renforcé de Fibres de carbone
PRFA	Polymère Renforcé de Fibres d'Aramide

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction Générale

Devant les besoins sans cesse croissant des ressources en matériaux et aux exigences et conditions de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire et pertinent de prospecter et étudier toutes les possibilités et opportunités de réutilisation et de valorisation des déchets et sous-produits industriels dans le domaine de génie civil.

Le béton a toujours été considéré comme le matériau de construction le plus utilisé dans les ouvrages de génie civil, il a mérité sa place par sa simplicité de fabrication, sa facilité de mise en place et ses performances mécaniques, mais à côté de ces avantages, le béton a un énorme impact sur l'environnement.

Pour fabriquer des milliards de tonnes de béton chaque année, il faut autant de ressources naturelles. Bien évidemment, cette fabrication demande une grande quantité de ciment qui rejette dans l'atmosphère une tonne de CO_2 pour chaque tonne de ciment fabriqué. En fin, la démolition et la dégradation des structures en béton créent également des problèmes pour l'environnement. Ces inconvénients montrent bien que le béton nécessite des améliorations.

Une solution qu'on propose dans ce mémoire est la réutilisation des déchets de verre dans la fabrication du béton et cela a pour objectif :

- D'éliminer les déchets précités par recyclage d'où protection de l'environnement.
- Remplacer une certaine quantité du ciment et du sable dans la composition du béton par la poudre verre et le sable de verre.
- Réduire la production du ciment, diminuer et éliminer l'émission de dioxyde (CO_2) dans l'atmosphère.

Ce béton confectionné sur la base de déchets de verre sera par la suite confiné par collage externe avec un tissu issu lui aussi de l'industrie de récupération (confinement externe).

Les premières recherches sur l'application de ces nouveaux matériaux destinée aux ouvrages de génie civil, plus particulièrement aux poteaux en béton datent de 1980, très répandus dans la nature, légère et performante, ils constituent un renfort intéressant offrant au béton une meilleure résistance à la fatigue, à la corrosion et des propriétés mécaniques les plus élevées possibles.

Le confinement des colonnes de béton se réalise à l'aide d'enveloppement partiel circulaire ou hélicoïdal ou bien d'enveloppement total en matériaux composites qui pouvant modifier le comportement axial et radial du béton confiné.

Les principaux objectifs de ce travail de recherche sont résumés comme suit :

- L'amélioration de la résistance à la compression du béton à base des déchets de verre confiné avec dans bandes de composites en polypropylène.
- La comparaison entre les trois types de confinement (confinement total, confinement partiel circulaire et confinement partiel hélicoïdal) des cylindres en béton à base des déchets de verre.
- Optimisation des caractéristiques géométriques des bandes PP (largeur, épaisseur et espacement) dans le cas du confinement partiel circulaire.

Pour répondre à la problématique posée, nous avons scindé le mémoire en deux grandes parties :

La première partie est une synthèse bibliographique composée de trois chapitres :

Le premier chapitre présente les Généralités sur les bétons: dans ce chapitre nous avons défini le matériau béton ainsi que ses composantes puis on a présenté les différents types de ce dernier.

Dans le deuxième chapitre « Les déchets dans le béton » on a défini les déchets, la gestion des déchets et leur recyclage. Puis on a résumé les déchets utilisés dans le domaine du génie civil et l'utilisation des déchets de verre dans le béton ainsi les réactions qui se produisent entre ces derniers.

Le troisième chapitre « Renforcement des structures » présente les techniques de renforcement principalement par confinement et de réparation des structures en béton armé à l'aide des matériaux composites. On a aussi présenté une généralité sur ces matériaux et leur mise en œuvre, accompagné des exemples de renforcement des éléments structuraux. On a terminé ce chapitre par une étude antérieure portant sur le confinement de béton.

La deuxième partie de ce mémoire est consacrée à la modélisation numérique du comportement mécanique du matériau confectionné. Elle comporte deux chapitres :

Le quatrième chapitre « modélisation numérique » est totalement dédié à la simulation numérique basée sur la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel Abaqus. Il donne un aperçu sur les modules utilisés : de la génération de la géométrie jusqu'au lancement du calcul. Les principales étapes de la simulation et les variantes de l'étude considérées sont aussi présentées.

Le dernier chapitre « Résultats et discussions » présente les résultats de la simulation numérique sous forme de cartographies, courbes contrainte déformation et histogrammes qui décrivent le comportement du béton confiné et non confiné (de référence). Une analyse est ensuite réalisée pour mettre en évidence l'apport de ce confinement en termes de résistance.

Pour finir, dans la conclusion générale nous avons résumé l'ensemble des résultats obtenus dans ce travail, en mettant en évidence les points les plus essentiels de cette recherche.

Chapitre I: Généralités sur les bétons

I.1 Introduction:

De nos jours, le béton fait partie de notre cadre de vie, il est devenu irremplaçable dans le domaine de la construction, pour des raisons économiques et techniques. Simple en apparence mais il est en réalité très complexe, avec une diversité d'applications et de méthodes de formulations. C'est le matériau le plus utilisé au monde: environ 7 milliards de mètres cubes de béton sont mis en œuvre annuellement. La qualité et le potentiel du matériau béton dans la structure dépend bien sûr, des matériaux de base qui entrent dans la formulation mais également des opérations de: malaxage, mise en œuvre, vibration et cure (protection contre la dessiccation). Il s'agit de déterminer la meilleure qualité du béton qu'on puisse obtenir.

I.2 Historique:

L'histoire du béton montre que sa technique, bien fixée empiriquement par les Romains, avec la chaux grasse et la pouzzolane, a évolué seulement au 19^{ème} siècle, après l'apparition des chaux hydrauliques et des ciments. L'ingénieur *Bélidor*, auteur de l'architecture hydraulique (1737) étudia la composition du béton et introduisit le mot béton dans son sens actuel.

L'invention de la chaux hydraulique par *Louis Vicat* en 1817, celle du ciment Portland par *Aspdin* en Ecosse en 1824 et l'installation des premiers fours par Pavin de Lafarge au Teil en France en 1830 préparent l'avènement du béton [1].

A l'origine, le béton était constitué d'un mélange de trois matériaux : le ciment, les granulats et l'eau. Dans la plupart des cas, le ciment était du ciment Portland obtenu par mélange homogène d'argile et de calcaire, ou d'autres matériaux contenant de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer, cuit à la température de clinkérisation puis broyé. Par la suite, de petites quantités d'adjuvants chimiques ont été ajoutées au mélange afin d'améliorer certaines des propriétés du béton à l'état frais ou durci. Plus tard, d'autres matériaux de nature inorganique ont été utilisés dans le béton, pour des raisons économiques dans la plupart des cas. Ces substances inorganiques sont moins coûteuses que le ciment portland en raison de leur disponibilité à l'état naturel.

Au 20^{ème} siècle, le béton se développera considérablement avec l'évolution de ses techniques: usage croissant des adjuvants, béton prêt à l'emploi, matériel de mise en œuvre, mise au point du béton précontraint en 1928 par *Eugène Freyssinet*, ouvrant ainsi la voie à une envolée de l'audace architecturale (ouvrages d'art, bâtiments, etc.).

Dans les années quatre-vingt et quatre-vingt-dix, les études relatives aux bétons à hautes performances ont montré le rôle néfaste de l'excès d'eau dans les bétons. La réduction de cette quantité d'eau, par l'emploi de floculats et par correction de

l'empilement granulaire via les ultrafines, a conduit aux gains de résistance allant jusqu'à 200 MPa et de durabilité.

De nos jours, l'étendue des exigences possibles a augmenté de façon spectaculaire. Par exemple, l'affaissement au cône d'Abrams varie de 0 pour les bétons de démoulage immédiat à plus de 25 cm pour les bétons autoplacants. De même, les résistances requises à 28 jours en compression peuvent s'échelonner depuis des valeurs modestes, de l'ordre de 10 MPa pour certains bétons de masse, à des valeurs très élevées, supérieures à 200 MPa et plus pour certains produits spéciaux préfabriqués.

Aujourd'hui, en totale continuité avec les bétons à hautes performances, c'est un changement d'objectifs constituant une véritable révolution culturelle que proposent les bétons autoplacants. L'étude du matériau n'est plus seulement gouvernée par l'amélioration de la résistance et de la pérennité. Toutefois ces dernières propriétés restent calées à des niveaux équivalents ou supérieurs à celles des bétons courants. Nous disposons actuellement de bétons particulièrement fluides qui peuvent être mis en œuvre sans vibration et qui sont devenues prioritaires. Ces bétons ont été initialement mis au point par des chercheurs de l'université de Tokyo dans les années 1980 [2]. Il s'agit des bétons autoplacants (BAP) utilisés pour les coulages d'éléments verticaux (poteaux, voile) et des bétons autonivelants (BAN) destinés aux éléments horizontaux (dalles de compression, dallages, chapes flottantes). Les BAP sont utilisés entre autres pour réaliser des éléments de structure préfabriqués, des réservoirs, des plates-formes de pont, des colonnes architecturales et ainsi que des ancrages pour de grands ponts [3].

I.3 Définition :

Le béton est un matériau hétérogène multiphasique poreux constitué d'un mélange de granulats et d'une pâte, elle-même constituée à partir de ciment, d'eau et éventuellement d'ajouts.

Chaque constituant joue un rôle bien défini. Les granulats constituent le squelette en principe inerte du béton, lui confèrent sa compacité, participent à sa résistance mécanique et atténuent les variations volumiques (retrait) lors du durcissement. La pâte de ciment est le siège des réactions d'hydratation des constituants qui conduisent aux processus de prise et de durcissement et la transforment en matrice liante. Le béton, matériau évolutif, connaît des transformations physico-chimiques et structurales tout au long de sa vie [4].

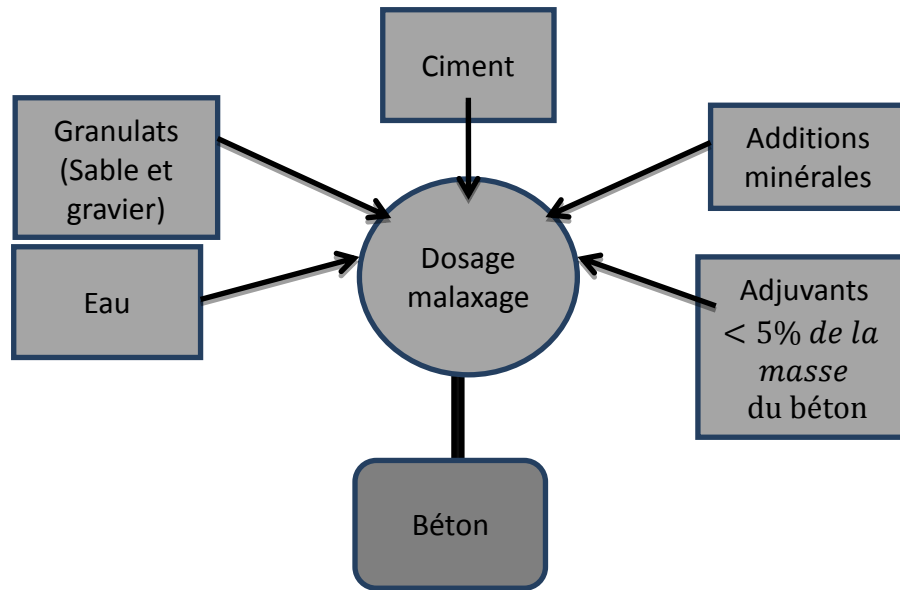


Figure I.1: Schématisation des constituants du béton.

Tableau I.1: Ordre de grandeur en proportions.

	Eau %	Air %	Ciment %	Granulats %
Volume	14-22	1-6	7-14	60-75
poids	5-9	\	9-18	63-85

I.4 Les composants du béton :

Le béton est composé de plusieurs constituants:

I.4.1 Le ciment:

Les ciments sont des poudres fines obtenues par la cuisson à haute température (vers 1450°C) et le broyage d'un mélange minéral (calcaire + argile en général). Ces poudres constituées de sels minéraux anhydres instables (en particulier silicates et aluminates de chaux) forment avec l'eau une pâte capable par « hydratation » de faire prise et de durcir progressivement (plus ou moins rapidement d'ailleurs) d'où le nom de liants hydrauliques par opposition avec « liants aériens » (à base de chaux grasse et maigre) qui peuvent durcir qu'au contact de l'air [5].

I.4.2 Les granulats:

Le granulat est constitué d'un ensemble de grains minéraux qui selon sa dimension (comprise entre 0 et 125 mm) se situe dans l'une des 7 familles suivantes: fillers, sablons, sables, graves, gravillons, ballast, enrochements. [6]



Figure I.2 : Les granulats. [6]

Les granulats sont obtenus en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origine alluvionnaire terrestre ou marine, en concassant des roches massives (calcaires ou éruptives) ou encore par le recyclage de produits tels que les matériaux de démolition. Leur nature, leur forme et leurs caractéristiques varient en fonction des gisements et des techniques de production. Les granulats les plus usuels pour la fabrication des mortiers et des bétons sont élaborés à partir de roches d'origine alluvionnaire (granulats roulés ou semi-concassés) ou à partir de roches massives (granulats concassés).

La taille d'un granulat répond à des critères granulométriques précis. Les granulats sont classés en fonction de leur granularité (distribution dimensionnelle des grains) déterminée par analyse granulométrique à l'aide de tamis. Le granulat est désigné par le couple d/D avec d : dimension inférieure du granulat et D : dimension supérieure du granulat

Tableau I.2 : Les granulats les plus utilisés [6]

Familles	Dimensions	Caractéristiques
Fillers	0/D	$D < 2$ mm avec au moins 85 % de passant à 1,25 mm et 70 % de passant à 0,063 mm
Sables	0/D	$d = 0$ et $D \leq 4$ mm
Graves	0/D	$D \geq 6,3$ mm
Gravillons	d/D	$d \geq 2$ mm et $D \leq 63$ mm
Ballasts	d/D	$d = 31,5$ mm et $D = 50$ ou 63 mm

Les intervalles d/D et $0/D$ sont appelés classes granulaires.

Un granulat, est fonction de sa nature et de son origine:

- **Naturel** : d'origine minérale, issus de roches meubles (alluvions) ou de roches massives, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage).
- **Artificiel** : d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des transformations thermiques ou autres.

- **Recyclé** : obtenu par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments.

I.4.3 L'eau :

L'eau est un des ingrédients essentiels du béton, elle intervient à toutes les étapes de la vie du matériau par ses propriétés physico-chimiques et mécaniques. L'eau introduite dans le béton lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère au béton frais des propriétés rhéologiques permettant son écoulement et son moulage et une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation. Le rapport E/C est un critère important des études de béton ; c'est un paramètre essentiel de l'ouvrabilité du béton et de ces performances : résistance à la compression, durabilité. Toutes les eaux ne peuvent pas être utilisées pour gâcher le béton. Certes, l'eau potable distribuée par le réseau du service public est toujours utilisable mais, de plus en plus souvent, nous sommes placés devant la nécessité d'utiliser une eau non potable. La norme XP P 18-303 [Afnor, 2002], a permis de préciser à quelles conditions une eau est utilisable.[3]

I.4.4 Les adjuvants:

Ainsi que le définit la norme NF EN 934-2, un adjuvant est un produit dont l'incorporation à faible dose (inférieure à 5 % de la masse de ciment) aux bétons, mortiers ou coulis lors du malaxage ou avant la mise en œuvre, provoque les modifications recherchées de telle ou telle de leurs propriétés, à l'état frais ou durci. Sont donc exclus du domaine des adjuvants au sens de la norme, les produits ajoutés au moment du broyage du clinker ou les produits dont le dosage dépasserait 5 % du ciment. L'utilisation des adjuvants pour la production de béton de structures doit respecter les exigences de la norme NF EN 206-1.

La norme NF EN 934-2 classe les adjuvants pour bétons, mortiers et coulis, suivant leur fonction principale. On peut distinguer trois grandes catégories d'adjuvants:

- **ceux qui modifient l'ouvrabilité du béton** : plastifiants-réducteurs d'eau, Super plastifiants (anciennement fluidifiants) ;
- **ceux qui modifient la prise et le durcissement** : accélérateurs de prise, accélérateurs de durcissement, retardateurs de prise ;
- **ceux qui modifient certaines propriétés particulières** : entraîneurs d'air, générateurs de gaz, hydrofuges de masse. [6]

Tableau I.3 : Type d'adjuvant en fonction de sa propriété [6]

Choix du type d'adjuvant en fonction de sa propriété								
PROPRIÉTÉ	ADJUVANTS	Réducteurs d'eau	Plasifiants	Superplasifiants	Accélérateurs de durcissement	Accélérateurs de prise	Retardateurs de prise	Entraîneurs d'air
Ouvrabilité		+	+				+	
Temps de prise					-	+		
Résistances	court terme (3 jours)	+	+	+	+	-	-	
	long terme (> 28 jours)	+	+		=	+	-	
Air occlus							+	
Résistance au gel du béton durci	+						+	
Compacité	+	+	+					
État de surface		+					+	
Perméabilité sous pression hydraulique			-					-

I.5 Différentes types de béton :

Le béton varie en fonction de la nature des granulats, des adjuvants, des colorants, des traitements de surface, et peut ainsi s'adapter aux exigences de chaque réalisation, par ses performances et par son aspect.

I.5.1 Bétons Hautes Performances (BHP) :

L'additif au fascicule 65 a défini les « bétons à hautes performances » comme présentant une résistance caractéristique à la compression à 28 jours (f_{c28}) supérieure à 50 MPa et un rapport pondéral E/C inférieur à 0.40.

Leurs principales propriétés sont :

- Sur le béton frais, une maniabilité accrue.
- Sur le béton durci: augmentation des caractéristiques mécaniques; grande imperméabilité à l'air et à l'eau; grande résistance aux agents agressifs, grande résistance à l'abrasion, meilleure tenue aux cycles de gel/dégel. [7]

I.5.2 Bétons à base de résines :

Ces résines sont des produits synthétiques qui présentent, entre autres propriétés, une remarquable adhésivité, en présence d'un catalyseur, elles durcissent plus au moins rapidement par polymérisation (association de molécule identiques engendrant des molécules plus grosses). Ils sont employés comme liants pour confectionner certains bétons. Parmi les résines mieux adaptées, on distingue:

- Les résines polyester: provenant de l'industrie charbonnière.
- Les résines époxydes: issue de la chimie de pétrole.[7]

I.5.3 Bétons légers :

L'intérêt des bétons légers réside dans le gain important qu'on peut réaliser sur le poids propre de l'ouvrage. Les bétons légers présentent des masses volumiques qui vont de 800 à 2000 kg/m³, contre 2000 à 2600 kg/m³ pour un béton classique. Cette qualité est également recherchée dans les bétons isolants thermiques, la conductivité variant dans le même sens que la densité. Les bétons légers sont obtenus en jouant sur la composition (bétons caverneux) ou sur l'emploi de matériaux allégés (type argile expansée, polystyrène expansé, liège). [8]

On peut également créer des vides par une réaction provoquant un dégagement gazeux ; c'est le cas du béton cellulaire. [9]

I.5.4 Les bétons autoplaçants (BAP) :

Les BAP se caractérisent par leur hyper fluidité qui permet une mise en place sans recours à la vibration. Ils ont des compositions granulométriques fortement chargées en éléments fins. Des adjuvants de type superplastifiants ou plastifiants réducteur d'eau sont utilisés systématiquement.[9]

I.5.5 Bétons de fibres :

Un béton fibré est un béton dans lequel sont incorporées des fibres. À la différence des armatures traditionnelles, les fibres sont réparties dans la masse du béton, elles permettent de constituer un matériau qui présente un comportement plus homogène. Les bétons fibrés font l'objet de méthodes spécifiques de dimensionnement pour des applications structurelles (dalles, voussoirs, pieux, etc.). Des méthodes d'optimisation de leur formulation ont été spécialement développées. On distingue trois grandes familles de fibres [9]:

- **Les fibres métalliques** : acier, inox, fonte (amorphe).
- **Les fibres organiques** : polypropylène, polyamide, acrylique, kevlar, aramide, carbone mélange polypropylène/polyéthylène ;
- **Les fibres minérales** : verre, basalte, mica.

I.5.6 Bétons lourds :

La fabrication de béton lourds a déjà été, depuis longtemps, envisagée mais l'emploi de ces bétons était très limité (contreponds de certains ponts basculants). Les bétons

lourds ne diffèrent essentiellement des bétons classiques sauf par les granulats employés (sable 0/3mm, gravillon 3/7mm, gravier 7/15 et 15/30). [7]

I.5.7 Bétons apparents :

Les propriétés architecturales du béton permettent de jouer sur les trois facteurs de l'apparence:

- la teinte est apportée par le choix des composants (ciments, sables, gravillons et éventuellement pigments);
- l'aspect résulte de la variété des matériaux et de leur traitement, qui donnent à la surface du béton une texture plus ou moins lisse, des reliefs qui font jouer la lumière;
- la forme a pu se développer dans toute sa variété grâce à la plasticité du béton et à l'emploi de coffrages ou de matrices qui permettent de mouler le béton au gré de l'imagination du concepteur. [9]

I.5.8 Les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP) :

Les bétons fibrés à ultra hautes performances, outre leur durabilité absolue, se distinguent par leur extrême résistance à la compression et leur ductilité. L'évolution des BFUP par rapport aux Bétons à Hautes Performances (BHP) se caractérise par:

- leurs très grandes résistances en compression mais aussi en traction
- leur composition spécifique et leur fort dosage en ciment (700 à 1000 kg/m³) et en adjuvants
- leur squelette granulaire spécifique et l'optimisation de leur empilement granulaire
- une teneur en eau beaucoup plus faible;
- la présence de fibres (à un taux élevé de l'ordre de 2 à 3 % en volume). [9]

I.6 Domaines d'applications :

➤ Le bâtiment

Le béton tient une place essentielle dans l'urbanisme moderne. Cela semble normal lorsqu'on considère sa participation dans la construction de logements : pour les murs, 80 % des techniques en individuel, plus de 90 % en collectif pour les structures ; pour les planchers le béton est pratiquement le matériau idéal. Le béton s'est également largement imposé dans les autres secteurs de la construction: bureaux, hôpitaux, locaux scolaires, ainsi que dans les grands édifices publics et les bâtiments industriels.

➤ Les travaux publics

Les progrès techniques, et en particulier l'évolution des caractéristiques du béton, permettent de réaliser des portées atteignant plusieurs centaines de mètres, des implantations dans les sites les plus difficiles (les barrages, les ponts, les routes,...) [9]

I.7 Caractéristiques physiques et mécaniques :

I.7.1 Caractéristiques physiques (masse volumique) :

- La masse volumique béton à granulats courants (normal) $\rightarrow 2200 \div 2400 \text{ kg/m}^3$
- La masse volumique béton à granulats légers $\rightarrow 700 \div 1500 \text{ kg/m}^3$
- masse volumique béton à granulats lourds $\rightarrow 3500 \div 4000 \text{ kg/m}^3$

I.7.2. Résistance à la compression :

Le béton est un matériau qui présente une bonne résistance à la compression, pour cela ce matériau est définie par la valeur de sa résistance à la compression à 28 jours ; elle est notée f_{c28} est choisie en fonction : des conditions de fabrication du béton et de la classe du ciment utilisé et de son dosage en m^3 .

L'essai de compression est utilisé pour déterminer les caractéristiques mécaniques (Résistance à la compression, module d'élasticité E et le coefficient de poisson) et la loi de comportement du béton. Cet essai s'effectue sur des éprouvettes normalisées, de forme cylindrique de hauteur $H=32\text{cm}$ et de diamètre $d=16\text{cm}$. La charge de rupture F est la force maximale enregistrée au cours de l'essai. [10]

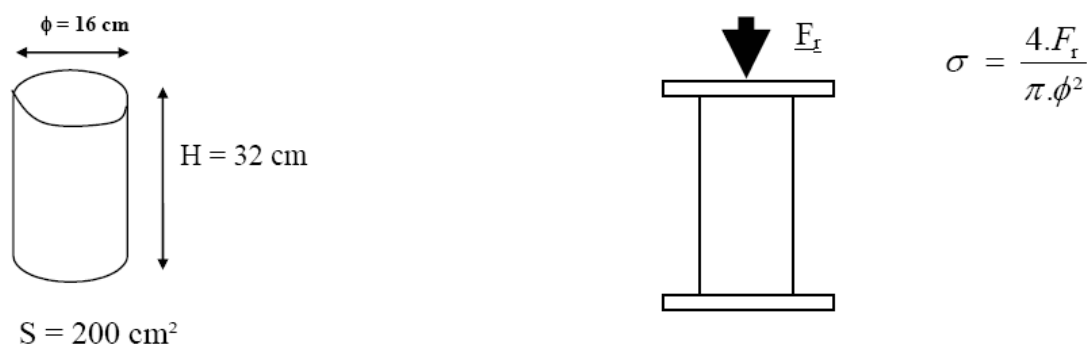


Figure I.3 : Essai de compression uni axiale.

Le comportement du béton en compression uni-axiale est donné sous forme d'une courbe.

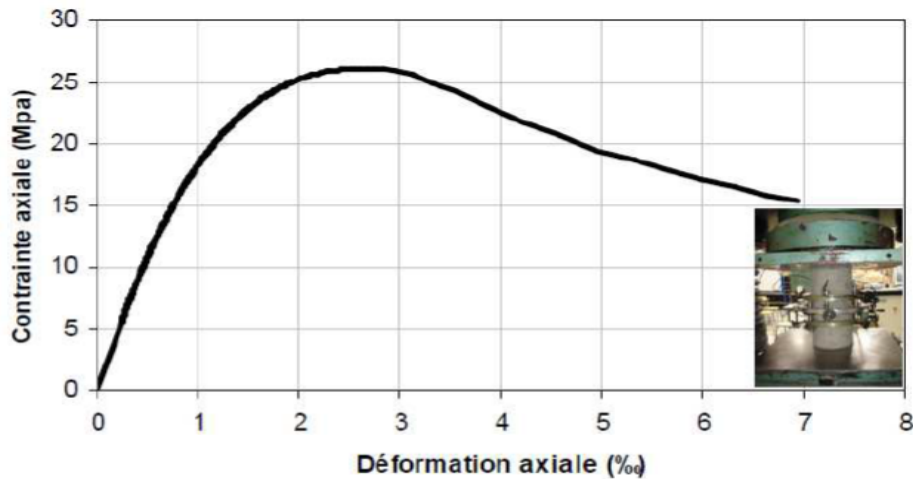


Figure I.4 : Comportement du béton à la compression [11].

Évaluation de la résistance à la compression avec l'âge du béton :

- Pour des résistances $f_{c28} \leq 40$ MPa.

$$f_{cj} = \frac{j}{4.76 + 0.83j} f_{c28} \quad \text{si } j \leq 28j \quad (I.1)$$

$$f_{cj} = f_{c28} \quad \text{si } j > 28j \quad (I.2)$$

- Pour des résistances $f_{c28} > 40$ MPa.

$$f_{cj} = \frac{j}{1.4 + 0.95j} f_{c28} \quad \text{si } j \leq 28j \quad (I.3)$$

$$f_{cj} = f_{c28} \quad \text{si } j > 28j \quad (I.4)$$

f_{cj} : La résistance à la compression à j jour.

f_{c28} : La résistance à la compression à **28** jour ; On appelle aussi la résistance caractéristique du béton. [10]

I.7. 3 Résistance à la traction :

La mesure directe de la résistance à la traction par un essai de traction axiale étant délicate on a recours à deux modes opératoires différents :

- Flexion d'éprouvettes prismatiques non armées.
- Fendage diamétral d'une éprouvette cylindrique (essai Brésilien).

La résistance caractéristique à la traction du béton à j jours, notée f_{tj} , est conventionnellement définie par les relations : [10]

$$f_{tj} = 0.6 + 0.006 f_{cj} \quad \text{si} \quad f_{c28} \leq 60 \quad (I.5)$$

$$f_{tj} = 0.275 f_{cj} \quad \text{si} \quad f_{c28} > 60 \text{MPa} \quad (I.6)$$

I.8 Conclusion :

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans monde aussi bien pour les constructions civiles qu'industrielles. A travers ce chapitre on a présenté et définit les notions liées à ce matériau, présenter ses principaux constituants, les différents types existants ainsi le domaine d'application et on a terminé par les caractéristiques physiques et mécaniques.

Références bibliographiques

- [1] **CIMBETON**, «Les bétons: formulation, fabrication et mise en œuvre, 2006; Paris.
- [2] **OUCHI M.** State-of-the-art report on self-compactability evaluation, Concrete Engineering Series, N°30, Japan, pp. 111-120, 1999.
- [3] **Sidi Mohammed El Amine BOUKLI HACENE**, ‘‘Contribution à l’étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen’’ Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, 2009.
- [4] **Kahina HADDAD**; Caractérisation des paramètres influençant la durabilité des matériaux cimentaires à base de matériaux de recyclages’’ Thèse de doctorat, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. 2018.
- [5] **GEORGES DREUX** "Nouveau guide du béton " Edition Eyrolles 1976.
- [6] **fiches techniques Tome 1** " Les constituants des bétons et des mortiers" Cim béton centre d’information sur le ciment et ses application Édition septembre, 2005,
- [7] **[George DREUX et Jean FESTA** "Nouveau guide du béton" Septième Edition Eyrolles 1995.
- [8] **MOHELLEBI Samira** " Caractérisation et Modélisation des paramètres physico-hygro-mécaniques d’un béton léger à base de granulats composites" Thèse de doctorat Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [9] **Fiches techniques Tome 2** " Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre" " Cimbéton centre d’information sur le ciment et ses application, Réédition janvier 2013.
- [10] **LAKHDARI Loubna et MAAMOURI Ghania** « Optimisation numérique des paramètres de confinement des cylindres en béton par des bandes composites » mémoire de fin d’étude université de Bejaia 2018.
- [11] **Oubraham C**, « Simulation du comportement instantané et différé d’une zone fléchie en béton armé » ; Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.

Chapitre II : Les déchets dans le béton

II.1 Introduction:

L'élimination de certains déchets est un enjeu important, Une des solutions proposée est d'envisager l'utilisation de ces déchets comme granulats ou comme poudre dans les bétons.

En général, le recyclage des déchets dans une utilisation comme granulats pour la confection des bétons de structure permet d'une part d'assurer une économie des ressources naturelles, de réduire les coûts des matériaux, et les émissions de gaz à effet de serre, et d'autre part d'améliore la qualité du béton de construction puisque les propriétés de certaine granulats améliorent les performances des bétons, et plus particulièrement les poudres qui sont utilisés pour remplacer les ajouts cimentaire classiques ou bien un certaine pourcentage de ciment.

II.2 Définition de Déchet:

Un déchet tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon (loi française du 1975 du code de l'environnement).[12]

Et selon l'article n°3 de la loi Algérienne n°01-19 du décembre 2001, « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, et plus généralement toute substance, ou produit et tout bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer »

II.3 Gestion des déchets:

La gestion des déchets est la collecte, le transport, le traitement, la réutilisation ou l'élimination des déchets, habituellement ceux produits par l'activité humaine, afin de réduire leurs effets sur la santé humaine ou l'environnement. L'accent a été mis, ces dernières décennies, sur la réduction de l'effet des déchets sur la nature et l'environnement et sur leur valorisation. La gestion des déchets concerne tout les types de déchets, qu'ils soient solides, liquides ou gazeux, chacun possédant sa filière spécifique. Les manières de gérer les déchets diffèrent selon qu'on se trouve dans un pays développé ou en voie de développement, dans une ville ou dans une zone rurale, que l'on ait affaire à un particulier, un industriel ou un commerçant. [11]

II.4 Recyclage des déchets :

Le recyclage est le procédé de traitement des différents types de déchets et des sous-produits qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. Il constitue une activité importante dans les pays développés. Le recyclage a deux conséquences écologiques bénéfiques: la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. C'est une des

activités économiques de la société de consommation. Certains procédés sont simples et bon marché mais, à l'inverse, d'autres sont complexes, coûteux et peu rentables. [12]

II.5 Technique de recyclage :

II.5.1 Procédés de recyclage :

Il existe trois grandes familles de techniques de recyclage: chimique, mécanique et organique. Le recyclage dit « chimique » utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants. Le recyclage dit « mécanique » est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour broyer. Le recyclage dit « organique » consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais et du carburant tel que le biogaz.

II.5.2 La chaîne de recyclage :

- **Collecte de déchets**

Les opérations de recyclage des déchets commencent par la collecte des déchets. Les déchets non recyclables sont incinérés ou enfouis en centres d'enfouissement techniques. Les déchets collectés pour le recyclage ne sont pas destinés ni à l'enfouissement ni à l'incinération mais à la transformation. La collecte s'organise en conséquence. La collecte sélective, dite aussi séparative et souvent appelée à tort tri sélectif est la forme la plus répandue pour les déchets à recycler. Le principe de la collecte sélective est le suivant : celui qui crée le déchet le trie lui-même. À la suite de la collecte, les déchets, triés ou non, sont envoyés dans un centre de tri où différentes opérations permettent de les trier de manière à optimiser les opérations de transformation. Le tri manuel est une de ces opérations.

- **Transformation**

Une fois triés, les déchets sont pris en charge par les usines de transformation. Ils sont intégrés dans la chaîne de transformation qui leur est spécifique. Ils entrent dans la chaîne sous forme de déchets et en sortent sous forme de matière prête à l'emploi.

- **Commercialisation et consommation**

Une fois transformés, les produits finis issues du recyclage sont utilisés pour la fabrication de produits neufs qui seront à leur tour proposés aux consommateurs et consommés, pour être en fin de vie, à nouveau jetés, récupérés et recyclés. [12]

II.6 Déchets utilisés dans le domaine du Génie Civil :

II.6.1 Laitiers :

- **Laitier de haut fourneau**

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la transformation du minerai de fer en fonte brute. Le laitier est ensuite refroidi lentement à l'air libre et donne un

matériau cristallin et compact connu sous le nom de «laitier refroidi à l'air» ou bien il est refroidi rapidement et traité au moyen de jets d'eau pour obtenir un matériau léger désigné sous le nom «laitier expansé». Le laitier refroidi à l'air est approprié comme granulats pour le béton. La stabilité volumique, la résistance aux sulfates et la résistance à la corrosion par les solutions de chlorure font que le béton de laitier armé convient pour plusieurs applications. [13]

- **Laitier d'acier**

Ce laitier est formé par l'élimination des impuretés contenues dans la fonte brute. Il est riche en phosphate ou en calcium et contient du silicate bi-calcique métastable; il est donc utilisé uniquement comme matériau de remblai pour les routes. Normalement, ce laitier est stocké en piles pendant une période allant jusqu'à un an avant d'être utilisé. L'utilisation de ces laitiers est assez peu répandue en raison de problèmes de stabilité dimensionnelle. Des procédés de vieillissement/maturation se sont développés afin de maîtriser cette instabilité et des initiatives de valorisation, notamment en génie civil. Aussi, les risques environnementaux associés à l'utilisation des laitiers dans certaines filières sont encore peu connus.

II.6.2 Sous-produits provenant des centrales thermiques :

Dans les centrales électriques anciennes, les résidus de la combustion de houille sont désignés sous le nom de « mâchefer ». Dans les centrales modernes, on utilise du charbon broyé ou pulvérisé pour la production de vapeur. Les petites particules qui sont transportées par les gaz de combustion sont recueillies par précipitation électrostatique ou par un autre moyen quelconque. Les particules sont appelées « cendres volantes ». Certaines particules de cendres forment des scories qui tombent au fond du four. Dans les fourneaux à température élevée, il se produit également des résidus fondus appelés laitier de charbon. [13]

- **Mâchefer**

Le mâchefer contient une proportion considérable de charbon non brûlé et d'autres impuretés. Il est utilisé principalement pour la fabrication de blocs de béton. Étant donné que le mâchefer contient des sulfates et des chlorures, il n'est pas recommandé pour le béton armé. Ce matériau risque de devenir de plus en plus rare à mesure que les centrales électriques anciennes passent à la combustion de charbon pulvérisé. A la sortie du four d'incinération les mâchefers sont généralement humides et contiennent des éléments grossiers (ex : verre, ferrailles, gros imbrûlés). Ils sont classés en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques en 3 catégories:

- ✓ Mâchefers de catégorie « V » à faible fraction lixiviable (fraction d'éléments solubles dans un solvant);
- ✓ Mâchefers intermédiaires de catégorie « M »;
- ✓ Mâchefers avec forte fraction lixiviable de catégorie « S ».

- **Scories**

Ces résidus constituent environ 2,5 % de la production totale de cendres. On prévoit que plus le charbon sera utilisé, plus on aura de cendres. La composition chimique des scories de combustion américaines est semblable à celle des cendres volantes, sauf que les scories ont une plus forte proportion d'alcalis et de sulfates. Les scories de charbon et le laitier de charbon peuvent être utilisés comme granulats légers.

- **Cendres volantes**

Les cendres volantes pourraient constituer de très bons granulats légers, mais elles ne sont pas beaucoup utilisées. Elles sont issues de la combustion du charbon pulvérisé et poussé dans la chambre de combustion d'un four par des gaz d'échappement. Et sont préférables à beaucoup d'autres granules légers étant donné qu'elles donnent une combustion plus efficace, du fait que le carbone contenu dans les cendres produit la quantité de chaleur nécessaire pour éliminer l'humidité des boulettes et pour amener les boulettes à la température de frittage. Les cendres volantes sont classifiées selon leurs teneurs en CaO et du type du charbon brûlé. [13]

II.6.3 Déchets divers :

- **Verre de récupération**

Des millions de tonnes de verre sont récupérées chaque année et une voie de recyclage du verre consiste à l'utiliser dans les matériaux de construction. Il est utilisé sous deux formes principales: les granulats (taille > 4 mm) et les poudres (taille < 4 mm). Les granulats sont utilisés en remplacement des graves dans les bétons et lui procurent une résistance moindre. Les poudres (sables et fines) sont utilisées dans les mortiers en remplacement du sable mais aussi dans l'industrie du ciment pour fines.

- **Pneus usagers**

Les matériaux cimentaires ont une capacité de déformation très limitée ainsi qu'une faible résistance à la traction, ce qui les rend sensibles à la fissuration, notamment la fissuration due au retrait. A titre d'exemple, les dallages, les chaussées et plus généralement les éléments mis en place en grande surface se fissurent sous l'effet du retrait. Ainsi, l'incorporation de granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés dans un mortier confère au composite obtenu une plus grande capacité de déformation avant localisation de la macro-fissure. Il en résulte que le composite cimentaire incorporant des granulats en caoutchouc a une grande résistance à la fissuration de retrait.

- **Ciment durci**

Dans le cas où un sac de ciment est en contact avec l'eau, la poudre se cristallise. Cette recristallisation du ciment est suivie d'une réaction d'hydrolyse. Ces deux réactions

sont rapides et provoquent le durcissement du ciment. Il devient inutilisable comme liant sur le chantier. Le ciment ainsi durci devient automatiquement un déchet. Il peut être concassé et utilisé comme granulat de béton. Ce déchet est produit accidentellement ou par négligence, il est donc important d'éliminer le ciment durci et d'œuvrer pour empêcher sa production.

- **Résidus d'incinérateurs**

L'incinération des déchets domestiques et industriels entraîne la production de grandes quantités de résidus solides. Ces résidus comportent toutefois certaines matières délétères, ce qui compromet leur utilisation en tant que composants du béton. Ainsi, l'aluminium entraîne la dilatation par suite de l'évolution de l'hydrogène, les métaux ferreux font tacher le béton et les sels de plomb et de zinc solubles nuisent à la prise du ciment. La présence de verre entraîne aussi la dilatation des granulats alcalins.

- **Boues rouges**

Les boues rouges sont des résidus industriels issus du processus d'extraction d'aluminium à partir de la bauxite (procédé de Bayer). Elles sont stockées soit au fond des océans (en France, en Allemagne), soit près des usines comme au Canada. Elles sont de consistance assez plastique pour être formées en boules, chauffées à des températures de 1260 à 1310°C, elles sont transformées en granulats denses et résistants pouvant entrer dans la composition de bétons de résistances convenables.
[13]

- **Granulats recyclés issus de déchets de démolition**

Le béton constitue presque 75%, en poids de tous les matériaux de construction. Il s'ensuit donc que la plus grande partie de rebuts de démolition est constituée de béton. Par ailleurs, les sinistres fournissent des millions de tonnes de débris de béton. Aujourd'hui, les producteurs de granulats recyclés ont une politique de sélection des matériaux de démolition. Ainsi, on distingue cinq catégories de matériaux de démolition en fonction de leur nature:

- les bétons armés sans enduit ni plâtre ;
- les matériaux composés de briques, de tuiles, de graves, de pierres et de blocs rocheux, etc.
- les matériaux mélangés avec une faible teneur en plâtre, bois, plastique, etc.
- les mauvais matériaux avec une teneur en bois, plâtre, plastique : supérieure à 10%,
- les autres matériaux n'entrant pas dans les catégories précédentes.

- **Granulats de déchets de production de l'industrie du béton**

Les granulats de déchets de production ont deux origines :

- les débris de béton générés tout au long des étapes de la production; ils résultent du nettoyage des installations de fabrication et du transport du béton frais (chutes de béton); il peut également s'agir de béton provenant de gâchées non utilisées ou non utilisables.

- les produits défectueux, mal formés, partiellement cassés ou d'aspect non conforme; à ces produits défectueux s'ajoutent les produits ayant fait l'objet d'essais de résistance à la rupture. [13]

- **Sables de fonderies**

Les sables de fonderie sont des sous-produits de l'industrie de la fonderie. Dans le procédé de moulage de pièces métalliques, les fonderies utilisent un sable fin siliceux associé à d'autres matériaux tels que l'argile ou des liants organiques (résines phénoliques). Quand le sable n'est plus réutilisable pour l'industrie de la fonderie, il est mis en décharge. Les sables de fonderie sont donc susceptibles de constituer une matière première d'un coût assez faible pour la fabrication des bétons hydrauliques.

La réglementation française, en l'occurrence l'Arrêté Ministériel du 16 juillet 1991 relatif à l'élimination des sables de fonderie contenant des liants organiques de synthèse, précise les conditions de la réutilisation de ces sables: «les sables de fonderie peuvent être utilisés pour la fabrication de produits à base de liants hydrauliques si leur teneur en phénol est inférieure à 5 mg/kg de sable rapporté à la matière sèche ». [13]

II.7 Recyclage des déchets de verre :

II.7.1 Définition du verre :

Le verre est un matériau ou un alliage dur, fragile (cassant) et transparent à la lumière visible. Le plus souvent, le verre est constitué d'oxyde de silicium (silice SiO_2 , le constituant principal du sable). Parmi tous les types de verre, le plus courant est le verre sodo-calcique. Du point de vue physique, le verre est un matériau amorphe, c'est à dire non cristallin. De ce fait, il présente un désordre structural important. Sa structure microscopique est telle qu'il n'existe aucun ordre à grande distance. Il peut même être vu comme un « réseau » tridimensionnel, semblable à celui d'un cristal, mais dans lequel seul l'ordre à courte distance est conservé. [14]

II.7.2 Poudre de verre :

Cette poudre est issue de la récupération de bouteilles en verre. La poudre de verre est obtenue en sélectionnant uniquement les bouteilles de couleurs verte et blanche. Celles-ci sont nettoyées afin d'éliminer les étiquettes en papier, séchées, concassées et finement broyées (figure II.1). [15]



Figure II.1: Transformation des déchets de verre en poudre de verre.

II.7.3 Le verre dans les bétons :

Du fait de sa nature amorphe et qu'il contienne des quantités relativement appréciables de silice, le verre est en général considéré comme étant pouzzolanique s'il est broyé finement. Ainsi il pourrait être utilisé en remplacement du ciment Portland dans les bétons. Plusieurs travaux ont été conduits dans les années soixante sur l'utilisation du verre comme granulats dans les bétons. Cependant ces travaux ont montré que tous les bétons ont gonflé et fissuré. Depuis, l'idée a été en partie abandonnée. Ce n'est que depuis une quinzaine d'années que le sujet est redevenu d'actualité. En effet, pour des raisons économiques et environnementales, l'utilisation du verre recyclé dans les ciments et bétons a suscité l'intérêt d'innombrables municipalités et celles-ci ont encouragé de nouvelles études. [16]

II.7.4 Réaction alcali-silice du verre :

Le remplacement partiel du granulats naturels ou du ciment par le verre dans les bétons, améliore ses propriétés mécaniques notamment les résistances en compression. Toutefois, certains travaux conseillent l'utilisation de ce matériau, en prenant certaines précautions. Effectivement, les bétons à base de verre sont confrontés à un problème lié à leur durabilité. La silice du verre en combinaison avec les alcalins du ciment donne naissance à des produits gonflants qui entraînent l'endommagement des bétons; de même que la pouzzolanique. La réaction alcali-silice du verre dépend de différents paramètres. La bibliographie a montré que le processus de la réaction alcali-silice en général avec des granulats de verre est un phénomène complexe influencé par plusieurs facteurs.

Les paramètres qui conditionnent la réaction alcali-silice du verre :

- La taille des grains de verre

- Teneur en verre
- La porosité et la réaction alcali-silice du verre
- Les éléments mineurs et la réaction alcali-silice

La réaction alcali-silice se produit en général dans un délai de l'ordre de plusieurs dizaines années après la fabrication du béton. [13]

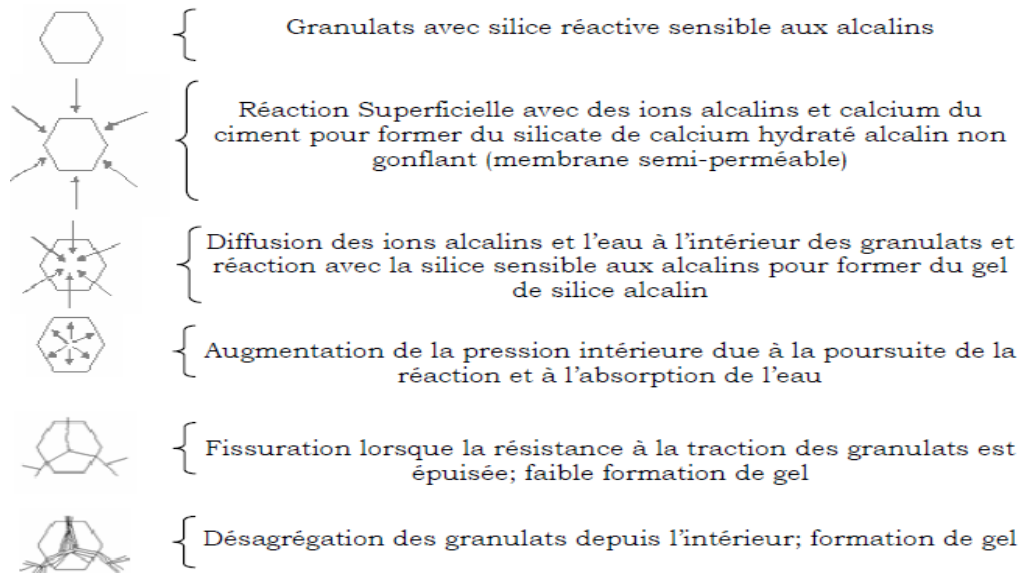


Figure II.2: Représentation schématique d'un mécanisme possible entraînant des dégâts lors de la réaction alcali-silice [17]

Différentes théories tentent d'expliquer l'origine de ces gonflements. La présence de gels d'alcali-réaction étant associée, dans le béton, à l'existence d'une fissuration anarchique et évolutive, on leur accorde volontiers des propriétés gonflantes.

II.7.5 Réaction pouzzolanique du verre :

L'activité pouzzolanique du verre a été évaluée par diverses méthodes: les tests mécaniques sur éprouvettes de mortier et béton à base de ciment ou sur des mortiers à base de chaux, ou encore tests chimiques de consommation de chaux notamment par; l'essai Chapelle, ATG, DRX.

La Figure ci-dessous présente les résultats de quelques travaux effectués entre les années 2000 et 2008 qui traitent de l'activité pouzzolanique du verre. L'indice d'activité est défini comme étant le rapport de la résistance du mélange avec verre à la résistance du mélange témoin. Il a été difficile, voire impossible, de rassembler des travaux tous faits dans des mêmes conditions. Toutefois les conclusions suivantes se dégagent nettement:

- La taille des grains de verre joue un rôle prépondérant sur l'activité pouzzolanique du verre: plus les grains de verre sont fins, meilleure est son activité pouzzolanique;

- La résistance des mortiers et bétons diminue à mesure que leur teneur en verre augmente 3. Le verre de couleur brune est le verre qui possède la plus faible activité pouzzolanique derrière le verre vert puis le verre blanc;
- Pour des résistances optimales, il est plus intéressant de substituer le sable que le ciment par le verre;
- Une température élevée joue un rôle important dans l'activation du verre;
- Le verre, compare à d'autres pouzzolanes notamment la cendre volante, développe rapidement son activité pouzzolanique;
- L'utilisation simultanée d'un verre et d'une pouzzolane en remplacement partiel du ciment pourrait conduire à des synergies intéressantes.

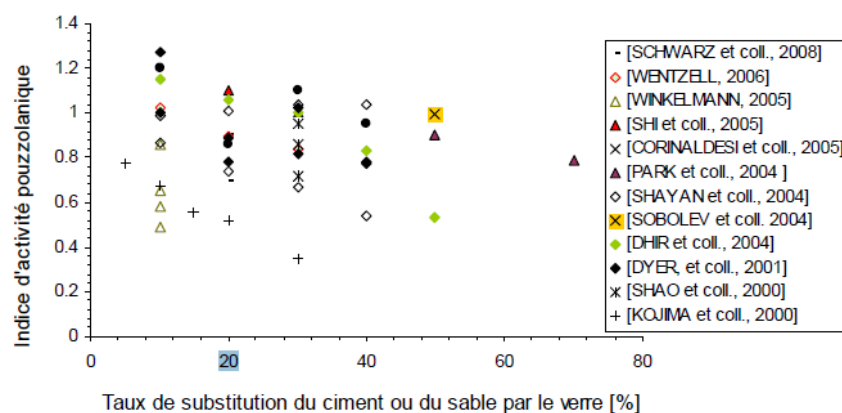


Figure II.3: Indices d'activité pouzzolanique du verre utilisé dans des conditions différentes. [13]

L'effet de l'ajout du verre a été beaucoup traité dans plusieurs travaux. Cependant, les mécanismes des réactions se manifestant en fonction de la taille des grains ont été négligés. Nous avons vu qu'en général, les pouzzolanes sont utilisées pour former des C-S-H capables de fixer des alcalins ce qui réduirait la réaction alcali-silice.

I.8 Conclusion :

Le béton est un matériau qui est souvent perçu comme un lieu potentiel pour les déchets, en raison de sa nature composite et parce qu'il est largement utilisé. Ce qui signifie que si un déchet peut être utilisé dans le béton, alors certainement de grandes quantités de celui-ci peuvent être recyclées.

Références bibliographiques

[12] **BOURMATTE Nadjoua** " granulats recyclés de substitution pour bétons hydrauliques : béton de démolition - déchets de briques - déchets de verre" Thèse de doctorat Université des Frères Mentouri Constantine, 2017.

[13] **MAMERY Serifou** " Béton à base de recyclats : « Influence du type de recyclats et rôle de la formulation" Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 2013.

[14] **AMARNI-Akila** " Valorisation des déchets de verre dans les bétons étude expérimentale" mémoire de fin d'étude, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou 2015.

[15] **Bahia Arab, Rachid Mehaddene, Yacine Bouchnab** " Substitution du ciment CPA par la poudre de verre dans les mortiers à hautes performances" Laboratoire Géo-matériaux, Environnement et Aménagement, Université Mouloud Mammeri, Déchets Sciences et Techniques-N°75- 2017.

[16]**Rachida IDIR** ; ' 'Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique' ', Université de Toulouse, 2009.

[17] **SPRUNG, S. et SYLLA, H. M,** "Course of the alkali/ Silica Reaction in concrete with different of aggregate" Allemagne, vol.51.N°6,P.334-345, (1998).

Chapitre III : Renforcement des structures

III.1 Introduction :

La réhabilitation des éléments en béton armé est un enjeu de plus en plus important, c'est un outil permettant d'assurer une vie plus longue à des ouvrages vieillissant ou changeant d'utilisation. Le choix d'une ou des méthodes de réparation et de renforcement est défini en relation étroite avec la nature et le degré d'importance des désordres constatés lors d'un diagnostic. Ce choix est tributaire de matériaux de construction utilisés, des techniques choisies, et de critères économiques...

III.2 Définitions :

➤ **Réhabilitation**

La réhabilitation structurale consiste à améliorer le niveau de performance d'un système structural ou quelques éléments de ce système. Suivant l'état de la structure endommagée, la réhabilitation peut être subdivisée en deux catégories : Réparation ou Renforcement. [18]

➤ **Réparation**

La réparation d'une construction est une opération qui consiste à lui restituer. Par des travaux appropriés, un niveau de service perdu, la baisse de niveau de service peut résulter de toutes sortes de causes : les plus fréquentes sont la dégradation progressive des propriétés des matériaux (agressions atmosphériques, modification des propriétés des matériaux) l'utilisation intensive (effet de la réparation des charges) voire abusive (utilisation au-delà des charges prévues), les accidents sinistres (chocs, incendies, séismes, etc...) [19]

➤ **Renforcement**

Le renforcement est une opération qui consiste à augmenter le niveau de service et en particulier l'augmentation de la ductilité et de la résistance d'un élément de structure pour en permettre l'utilisation dans des conditions non prévues à l'avance pendant la phase de conception et de calcul. [20]

II.3 Nécessité de la réhabilitation d'une structure :

Les causes qui peuvent induire la réhabilitation d'une structure sont nombreuses. Les plus fréquentes d'entre elles, peuvent se résumer à ce qui suit :

➤ **Accroissement des charges qui sollicitent la structure**

Tels que : Changement d'usage de la structure (exemple: bâtiment d'habitation réhabilité en centre commercial), augmentation du niveau d'activité dans la structure (exemple: anciens ponts soumis au trafic actuel) et installation de machinerie lourde dans les bâtiments industriels.

➤ **Défauts dans le projet ou dans l'exécution**

Tels que: Armature insuffisante ou mal placée, mauvais matériaux ou bien dimensions insuffisantes des éléments structurels.

➤ **Rénovation des structures anciennes**

Tels que: La prise en compte de renforts par des sollicitations non considérées au moment du projet ou de la construction (vibration, actions sismiques et autres), connaissance des insuffisances de la méthode de calcul utilisée lors de la conception, ainsi que des limitations montrées par des structures calculées durant une époque où une période et vieillissement des matériaux avec une perte des caractéristiques initiales.

➤ **Changement de la forme de la structure**

Tels que : suppression de poteaux, piliers, murs porteurs, élargissement de portées de calcul, ouverture de passages en dalles pour escaliers ou ascenseurs.

➤ **Dégâts dans la structure**

Tels que : corrosion et diminution de la section des armatures dans le béton, impacts contre la structure et incendies.

➤ **Nécessité d'améliorer les conditions en service**

Afin de diminuer les déformations et flèches, de réduire l'intensité des contraintes sur les armatures et de diminuer l'ouverture des fissures [21]. Par ailleurs, un renforcement sismique est nécessaire, lorsque des désordres survenus suite à un séisme sont observés. Ces désordres se manifestent dans le cas des ponts par l'échappement du tablier de ses appuis, la rupture fragile des piles et l'endommagement des culées, des murs de soutènement ou encore des fondations, etc. Dans le cas des bâtiments par la désolidarisation des façades, la fissuration des poutres, poteaux et dalles ainsi que la rupture des têtes de poteaux pouvant entraîner la ruine totale surtout si les poutres ont été dimensionnées plus largement que les poteaux.[22]

II.4 Techniques de renforcement et de réparation des structures en béton armé :

II.4.1 Réparation des fissures :

Les fissures fonctionnelles ne nécessitent aucun traitement dans la mesure où les sollicitations restent dans les limites prise en compte dans les calculs et que le fonctionnement réel des ouvrages est cohérent avec la modélisation initialement retenue. Si tel n'est pas le cas, il faut d'abord consolider ou modifier les éléments concernés de façon à obtenir un fonctionnement correct. Les fissures accidentelles doivent en général être traitées, surtout si leur ouverture dépasse les limites. Les choix du procédé de traitement dépend principalement de l'objectif recherché, éviter la corrosion des armatures, empêcher l'eau de traverser une paroi, corriger un défaut d'aspect extérieur, etc....Les principales solutions envisageables sont:

- **Pontage ou revêtement protecteur en surface**

Il s'agit de supprimer le défaut de protection des armatures par un revêtement, partiel ou global, imperméable ou étanche. Ces types de revêtement sont principalement des produits à base de résines plastiques appliquées en couches minces.

- **Rebouchage des fissures**

Cette solution peut être retenue pour des fissures très ouvertes. Il est cependant nécessaire de les élargir pour assurer la pénétration des produits de calfeutrement. Un dépoussiérage est effectué, le rebouchage est réalisé avec une pâte de ciment additionnée de résines ou avec des mastics adéquats.

- **Injection des fissures**

Cette opération nécessite le nettoyage préalable des fissures au moyen d'un jet d'eau sous pression éventuellement additionné d'un détergent, selon le produit injecté, coulis de ciment ou résines synthétiques, les fissures doivent être humidifiées ou au contraire parfaitement sèches.[23]

II.4.2 Adjonction d'armatures d'aciers :

Il s'agit d'enlever le béton dans les zones où les aciers sont corrodés. Les armatures existantes, conservées doivent être bien soignées, afin éviter une continuité de leurs dégradations. Les armatures complémentaires doivent s'opposer à la fissuration et contribuer à la résistance. La liaison s'effectue par scellement tout en respectant les longueurs de recouvrement. La géométrie d'origine doit être régénérée avec des mortiers pour augmenter l'adhérence et la résistance mécanique de sections finales.

II.4.3 chemisage en béton armé :

Le chemisage en béton armé consiste en une augmentation considérable des sections par la mise en œuvre d'un ferrailage additionnel à l'ancien élément et d'un nouveau béton d'enrobage pour favoriser l'accrochage, ce dernier sera mis en œuvre après la confection du coffrage.

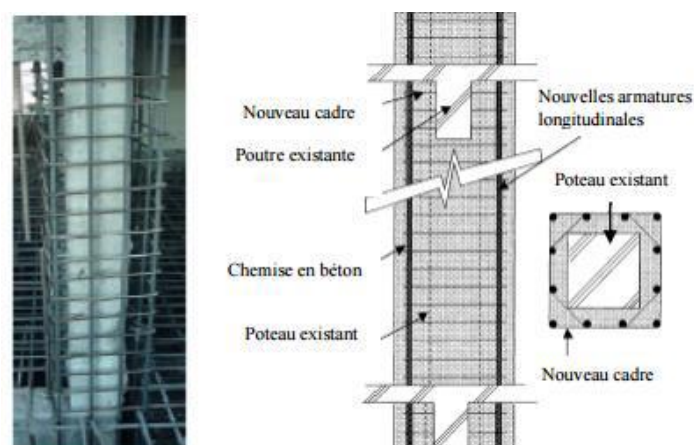


Figure III.1: Chemisage en béton armé. [45]

II.4.4 Chemises en acier :

Le renforcement des poteaux avec des chemises en acier permet d'améliorer la résistance sismique. Toutefois, cette technique est coûteuse et exigeante en main-d'œuvre. Compte tenu de la grande efficacité de cette technique et de son coût, les chemises en acier pourraient être utilisées dans les installations industrielles possédant un nombre restreint de poteaux. Cependant, dans le cas des bâtiments types où plusieurs poteaux doivent être renforcés, cette technique s'avère trop onéreuse. [21]



Figure III.2: Chemisage en acier [18]

- Peu de recherches ont été effectuées sur le renforcement des assemblages poteau-poutre des bâtiments plus anciens. Le renforcement au moyen de chemises en acier ondulées semble être un moyen efficace de renforcer les assemblages poteau-poutre. Toutefois, cette technique a été développée dans un but particulier, c'est à dire pour des assemblages poteau-poutre sans dalles de plancher. Les systèmes de dalles employés dans les structures de bâtiments ordinaires rendraient difficiles les opérations de renforcement des assemblages poteau-poutre.

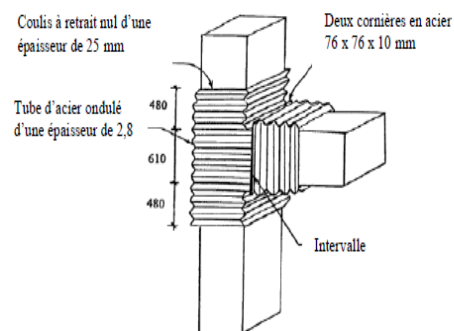


Figure III.3: Dimensions des spécimens d'essai [46]

II.4.5 Tôles collées :

Le renforcement de structure par plaques métalliques consiste à coller des tôles en acier d'épaisseur allant de 0,5 à 1 mm sur les faces tendues de structures en béton armé. Pour que l'adhérence entre l'acier et la colle ait une bonne tenue, les tôles utilisées doivent subir un découpage, sablage..., la colle utilisée est une résine époxyde. Quelques problèmes se posent lors de l'utilisation de tôles extérieures tels que : Sensibilité de l'acier à l'oxydation, difficulté de mise en flexion locale de la tôle au voisinage des fissures qu'elle recouvre, nécessité d'un collage sous pression (vérins), impossibilité de généraliser cette technique à des surfaces importantes (masses manipulées trop importantes). [24]



Figure III.4: Renforcement d'un viaduc par tôles collées. [47]

II.4.6 Précontrainte additionnelle :

Cette technique consiste à renforcer une structure à l'aide de câbles de précontrainte ou de torons gainés graissés généralement disposés à l'extérieur du béton. La précontrainte additionnelle introduit dans la structure des sollicitations complémentaires pour compenser les défauts de dimensionnement ou de conception ou des efforts supplémentaires. Les nouveaux câbles doivent, en apportant de la compression re-comprimés les zones tendues, sans ajouter d'excès de contraintes dans les zones comprimées. Cette technique permet d'améliorer la pérennité des ouvrages, de renforcer des ouvrages en béton (en particulier des ouvrages en béton précontraint dont les câbles présentent des problèmes de corrosion) et d'augmenter la capacité structurale des ouvrages. Elle peut s'appliquer à tous types de structures existantes en béton armé ou en béton précontraint. [25]



Figure III.5: précontrainte additionnelle. [25]

II.4.7 Béton projeté :

Le béton projeté est un béton mis en œuvre à l'aide d'une lance, par projection sur une paroi sous l'impulsion d'un jet d'air comprimé. La technique consiste à :

- malaxer et homogénéiser les constituants (ciment, granulats, adjuvants, fibres...) à l'état sec ou en incorporant l'eau de gâchage ;
- transporter le mélange par des canalisations avec l'aide d'une pompe ;
- projeter le matériau sur le support à revêtir grâce à un jet d'air comprimé.

Il existe deux techniques de projection: par voie sèche ou par voie mouillée. La différence entre les deux techniques est liée à la manière dont l'eau de gâchage du béton est introduite (soit lors du malaxage du béton, soit lors de l'application du béton). [25]

II.4.7.1 Projection par voie sèche :

Le mélange sec (granulats, ciment et éventuellement accélérateur de prise et adjuvants) est fabriqué dans un malaxeur puis propulsé par de l'air comprimé vers la lance de projection. Cette lance est associée à une lance de projection d'eau (et éventuellement d'accélérateur de prise sous forme liquide).

II.4.7.2 Projection par voie mouillée :

Le mélange comprenant l'eau est stocké après malaxage dans une trémie. Il est ensuite pompé jusqu'à la lance de projection et projeté grâce à l'air comprimé. [25]

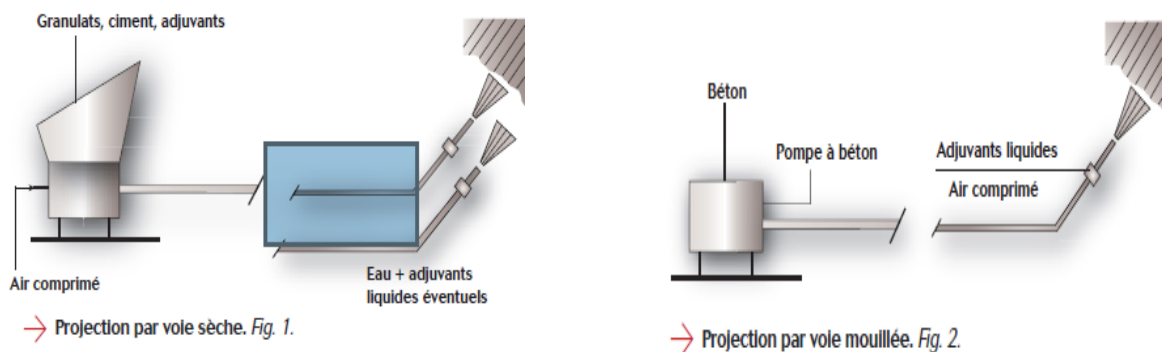


Figure III.6 : Béton projeté. [25]

II.5 Renforcement des structures à l'aide des matériaux composites:

II.5.1 Généralité sur les matériaux composites :

Dans un sens large, le mot " composite " signifie, constitué de deux ou plusieurs parties différentes. Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Dans un sens plus précis, un matériau composite utilisé dans la réparation des structures est par définition, toute matière première comportant un renfort sous forme filamenteuse et nécessite l'association intime d'au moins deux composants: le renfort et la matrice, qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser, ce qui introduit la notion d'un agent de liaison. Contrairement aux matériaux classiques dont on connaît à l'avance les caractéristiques mécaniques, celles des composites ne sont réellement connues qu'après fabrication, car on réalise en même temps, le matériau et le produit bien définis.

Actuellement, les composites à matrice organique représentent plus de 99% des matériaux composites; toutefois, il existe également des composites à matrice inorganique (métallique ou céramique) dont la diffusion reste encore marginale.

Les principaux constituants des matériaux composites reçoivent des additifs ou charges pour assurer une adhérence suffisante entre le renfort fibreux et la matrice; ils permettent également de modifier l'aspect ou les caractéristiques de la matière à laquelle ils sont ajoutés: les pigments de coloration, l'isolation thermique ou acoustique. [23]

II.5.2 Exemples de matériaux composites :

- **Les polymères renforcés de fibres (PRF)**

Forment un sous-groupe des matériaux composites, sont constitués de deux phases : une phase continue qui est la matrice, généralement ductile mais possédant une résistance et une rigidité faibles, assure la protection des fibres et le transfert des efforts vers ces dernières, plus rigides et plus résistantes. Son rôle consiste donc à maintenir les fibres en place, de transmettre et de distribuer les sollicitations mécaniques extérieures au renfort, de fournir un support latéral agissant contre le voilement des fibres sous compression et de les protéger contre l'abrasion mécanique et les conditions environnementales et une phase discontinue constituée de renforts ou fibres qui assurent la fonction mécanique (résistance) [26]

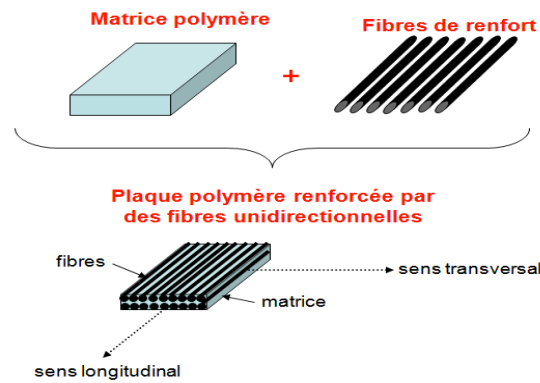


Figure III.7: Composition d'un PRF. [26]

Les plaques de FRP sont des laminés (ou stratifiés) constitués d'un certain nombre de couches appelés plis. Un pli est une couche de fibres ou de fibres tissées, imprégnées dans une matrice. Lorsque les plis sont empilés les uns sur les autres dans une combinaison d'orientation définie à partir des propriétés mécanique désirées, le produit s'appelle alors laminé. Les FRP sont manufacturés sous différentes formes, comme des feuilles minces, barres ou de profilés. Chacun de ces produits convient à une utilisation très spécifique dans le domaine de l'engineering. La plus importante caractéristique des FRP est leur rapport résistance-poids élevé. On peut facilement produire un FRP dont la résistance à la traction est supérieure à celle de l'acier, et cela pour une masse correspondant à moins de 10% de l'acier.[27]

▪ Fibres de renfort

Les fibres supportent la majorité des contraintes mécaniques et assurent la résistance et la rigidité du composite. Elles travaillent essentiellement en traction et se trouvent sous forme de mèches, de tissus ou de mats. Les trois grandes familles de fibres utilisées dans les applications industrielles sont le carbone, le verre et l'aramide. Malgré un coût très élevé, les fibres de carbone restent les fibres les plus utilisées pour le renforcement structurel des ouvrages de génie civil, car elles présentent les performances mécaniques les plus intéressantes associées à une faible densité. [26]

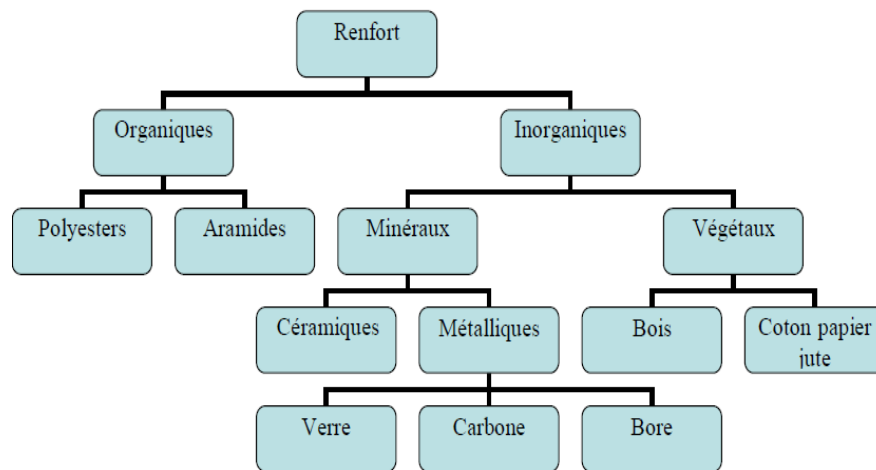


Figure III.8: Organigramme des différentes familles de fibres. [23]

III.6 Les fibres les plus utilisées :

III.6.1 Fibres de verre :

Les fibres de verre sont les renforts les plus utilisés, surtout en Amérique du Nord, parce qu'elles offrent des performances mécaniques intéressantes et que leur coût est relativement bas. Elles présentent également une bonne résistance à l'humidité et à la corrosion. Il en existe cinq catégories (C, Dy E, R et S), le verre E étant le plus répandu. Les composites à base de fibres de verre possèdent une résistance mécanique relativement élevée. Cependant, leurs applications structurales sont souvent limitées par leur faible module d'élasticité. De plus, certaines limites à l'utilisation de ces fibres sont imposées afin d'éviter les réactions alcali-granulats avec le béton. [28]

III.6.2 Fibres d'aramide :

Les fibres d'aramide, qui ont une masse volumique très faible, sont celles qui possèdent la plus grande résistance spécifique. Elles sont souvent mieux connues sous le nom commercial de « Kevlar », lequel est fabriqué en trois catégories (29,49 et 149). Les composites à base de fibres d'aramide résistent bien aux chocs et à la fatigue. Ils ont par contre une faible résistance à la compression et leur coût est très élevé. [28]

III.6.3 Fibres de carbone :

Les fibres de carbone, grâce à leurs excellentes propriétés mécaniques, sont celles qui possèdent le plus grand potentiel d'applications en génie des structures. Ces fibres sont composées de plus de 90% de carbone. Dans la fibre, les groupes d'atomes de carbone sont liés de façon continue dans la direction de la fibre. Elles peuvent être classées en plusieurs grades selon leurs propriétés mécaniques et en deux types selon la longueur des fibres (courtes et continues). Les fibres continues sont utilisées pour fabriquer, entre autres, des tendons de précontrainte et des câbles de suspension.

Les composites à base de fibres de carbone ont tendance à être moins fiables sous des charges de compression. La résistance et le module en compression sont généralement plus faibles que les propriétés en tension. Les propriétés en compression sont également plus sensibles aux défauts de fabrication, donc nécessitent un contrôle de qualité plus strict. Par conséquent, ces composites seront le plus souvent utilisés de manière à ce qu'ils soient sollicités en tension. [28]



Figure III.9 : Armatures de FRP utilisées dans la construction. [28]

III.7 Matrice polymère :

La matrice permet de lier les renforts entre eux, de les protéger de l'abrasion et de l'environnement, de répartir les contraintes et de les transmettre aux renforts par l'intermédiaire de l'interface. La transmission de l'effort est principalement assurée par les contraintes de cisaillement qui se développent dans la matrice entre les fibres.

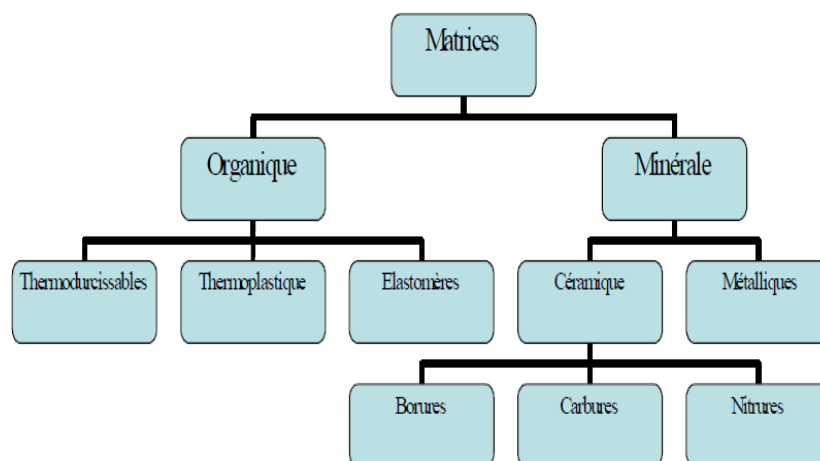


Figure III.10: Organigramme des différentes familles de matrice. [23]

III.8 Mise en œuvre des composites de renfort en Génie Civil :

Les composites utilisés actuellement en renforcement extérieur de béton en génie civil sont disponibles sous deux formes différentes :

- **Collage de plats consolidés**



Figure III.11: Illustration renforcement par plats consolidés à fibres de carbone

Des fines lamelles de polymère renforcé de fibres rigides fabriquées en usine généralement par pultrusion sont collées à la surface du béton avec une résine pâteuse polymérisant à température ambiante. Toutes les formes auxquelles les fibres peuvent s'adapter sont possibles, depuis les plats, des équerres, des L, ou des formes en I. Il s'agit majoritairement de composites carbone/époxy. Ces matériaux ont l'avantage sur les plats métalliques d'être beaucoup plus légers. Toutefois comme les plats métalliques, ces lamelles ne peuvent être utilisées que pour des surfaces planes et la technique de pose ne permet que difficilement de maîtriser l'épaisseur de la colle. [29]

- **Stratification au contact**



Figure III.12 : Illustration renforcement par stratification au contact avec FRP carbone [29]

Des tissus secs de fibres de renfort souples sont imprégnés directement sur le site lors de l'application sur la structure au moyen d'une colle liquide durcissant à température ambiante. La zone à renforcer est au préalable induite d'une couche de résine primaire liquide. Après marouflage, une dernière couche de résine de fermeture peut être appliquée comme protection supplémentaire avec le milieu extérieur et améliorer la durabilité du composite. L'encollage sur site se fait généralement à la main, même si certains essais d'automatisation d'enrobage de colonne ont déjà été effectués. [29]

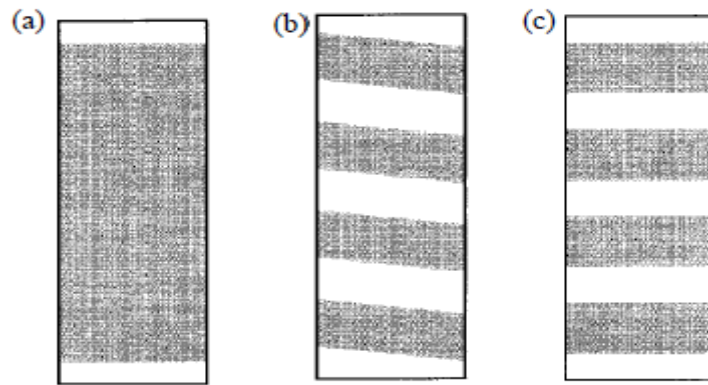


Figure III.13: Les méthodes typiques d'envelopper le «PRF» pour les colonnes en B.A. [29]

(a) Confinée totalement, (b) partiellement en spirale continue, (c) partiellement confinée en anneaux discrets.

Dans les deux techniques, des résines durcissant à température ambiante sont utilisées, limitant les propriétés du renforcement de par la température de transition vitreuse assez basse, autour de 80°C, de ces types de résines. De plus dans les deux procédés, plusieurs couches de tissus ou de lamelles peuvent être superposées afin de répondre au besoin du renforcement. [29] En plus de ces techniques de base, plusieurs techniques spéciales ont été développées.

- **Enroulement filamentaire**

Le principe de l'enroulement filamentaire est semblable à celui de la stratification directe, sauf que la technique de l'enroulement filamentaire utilise la fibre continue au lieu des tissus ou des lanières afin que l'enroulement des filaments puisse être traité automatiquement au moyen d'une machine contrôlée par ordinateur. Une telle technique permet la précision de l'épaisseur du «PRF», l'orientation de la fibre et le control de la fraction du volume ce qui mène à une meilleure performance. [30]

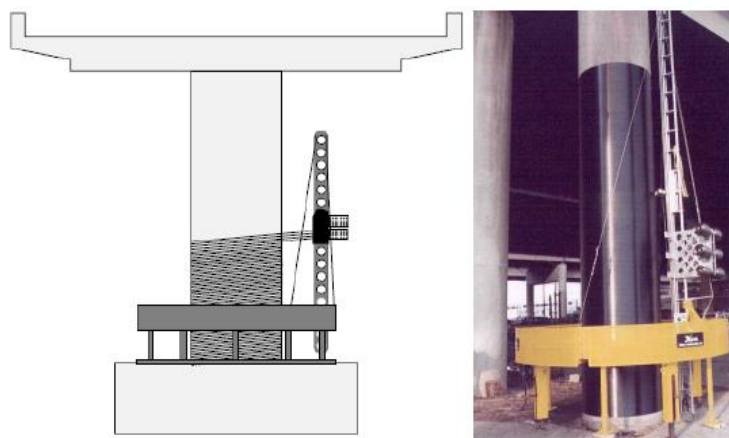


Figure III.14: Enroulement filamentaire [48]

- **Chemisage par coquille préfabriquée en «PRF»**

Les colonnes et poteaux en B.A peuvent aussi être renforcés en utilisant des chemises en «PRF» sous forme de coquilles préfabriquées. Les coquilles sont fabriquées sous

conditions contrôlées en utilisant la fibre en voile ou bondes avec l'imprégnation de résine effectuée avant l'installation. Pour un confinement efficace, un contact total entre la colonne et la coquille en «PRF» est essentiel. Cela peut être assuré soit en liant la coquille à la colonne par adhésives ou en injectant un coulis ou mortier de ciment dans l'espace entre la coquille et la colonne. [30]

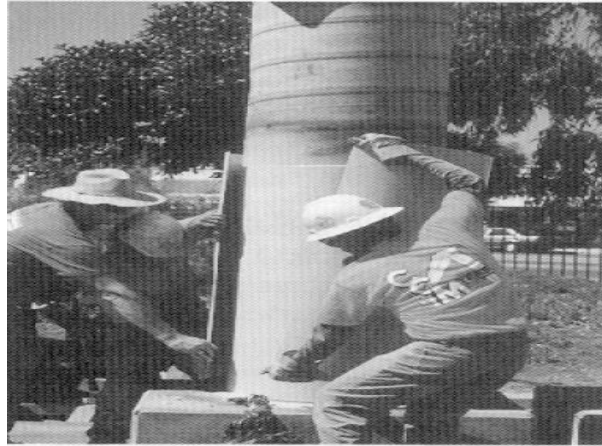


Figure III.15 : Renforcement par chemisage avec une coquille préfabriquée. [48]

En général le «PRF» avec une stratification au contact, paraît être la méthode la plus populaire car elle possède des avantages pratiques tels que la flexibilité et la facilité de mise en œuvre. [21]

III.9 Exemples de renforcement des éléments structuraux à l'aide de matériaux composites :

III.9.1 Les poutres

Le renforcement vis à vis la résistance à la flexion d'une poutre en béton armé simplement appuyée en utilisant les composites «PRF» est généralement réalisé par collage externe des lamelles «PRF» sur le support de la poutre concernée.

Avant l'application de la lamelle «PRF», le support doit être préparé. Le but de la préparation d'une surface adéquate est d'enlever la couche faible de la surface du béton et d'exposer la totalité du béton pour améliorer la liaison avec le «PRF», et de fournir une surface uniforme. [31]



Figure III.16: poutres en BA renforcées par matériaux composites. [31]

III.9.2 Les dalles

La procédure de base de renforcement des dalles simplement appuyées par «PRF» est de coller des bandes ou des lamelles «PRF» sur la face tendue de la dalle. Pour les dalles travaillant dans les deux sens on utilise des lamelles croisées, 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. [30]



Figure III.17: Renforcement d'une dalle travaillant dans les deux sens par des lamelles en «PRF» [30].

III.9.3 Les colonnes

La détérioration des colonnes et les exigences de réhabilitation sismiques requièrent un renforcement qui peut être procuré par un confinement additionnel, afin d'assurer une résistance et une capacité de déformation adéquate. Différents matériaux peuvent être utilisés soit les plaques d'acier, les câbles en composite et les feuilles en composite. Pour les poteaux, l'effet de confinement fourni par l'enveloppe externe provient des forces de pression radiales générées par la courbure de l'enveloppe. Celle-ci étant soumise à des efforts de tension dus à la dilatation latérale du béton.

Les enveloppes de matériaux composites appliquées aux colonnes augmentent le confinement du béton. Jusqu'à ce jour, les expériences conduites par des chercheurs

ont démontré une augmentation significative en ductilité et en résistance reliée à l'utilisation d'enveloppe de composites. Les bénéfices de cette technique de renforcement sont multiples: augmentation de la ductilité (en raison du confinement, le béton se rompt à un plus haut niveau de déformation qu'un béton non confiné), l'augmentation de la résistance (la pression latérale exercée par l'enveloppe de composites augmente la résistance en compression du noyau du béton et de la section de béton constituant l'enrobage), l'application aux colonnes de différentes géométries (la flexibilité des composites permet d'envelopper les colonnes de différentes géométries sans diminution de leur moment d'inertie), la légèreté (la faible densité des composites simplifie la construction et réduit les coûts de mise en œuvre) mais aussi la durabilité (la fibre de carbone, résistent très bien aux variations de température aux cycles de gel dégel et à l'humidité).

Les méthodes de renforcement des colonnes existantes en béton armé 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 « *Confinée* » complètement par des tissus «PRF» avec une ou plusieurs couches. Elle peut être aussi partiellement enveloppée « *Confinée* » en utilisant des bandes «PRF» sous forme d'une spirale continue ou des anneaux discrets. Dans le cas des colonnes en béton armé renforcées avec des matériaux composites, les «PRF» développent une résistance aux déformations dues aux charges axiales, qui résulte d'un confinement des contraintes développées dans le béton, ce qui améliora à la fois l'effort et la contrainte de compression ultime du béton.[30]



Figure III.18: Confinement de colonnes. [21]

III.10 Études antérieures sur le confinement de béton par matériaux composites :

Le phénomène de confinement de béton a été le sujet d'un certain nombre de travaux au cours des 100 dernières années. Cette partie présente une revue de littérature des

résultats de travaux antérieurs reliés à la réhabilitation et le renforcement de colonnes en béton et de divers modèles développés.

▪ **Fardis et Khalili (1982) [32]**

Ils ont réalisé des essais de compression uni-axiale sur des cylindres de dimensions $\varnothing 76 \text{ mm} \times 152 \text{ mm}$ et $\varnothing 102 \text{ mm} \times 204 \text{ mm}$ confiné avec des enveloppes différentes de tissus de matériaux composites à base de fibres de verre. Les chercheurs ont constaté une amélioration de la résistance à la compression et de la ductilité. Ils s'inspirent des formules de *Richart et al.* (1928). pour établir deux modèles qui permettent d'estimer l'augmentation de la résistance à la compression du béton confiné.

▪ **Saafi et autres (1999) [33]**

Ils ont conduit des études expérimentales pour évaluer les performances des colonnes de béton confinées avec des tubes de CFRP et de GFRP. Les variables d'essai ont inclus le type de fibres, l'épaisseur du tube et la résistance à la compression du béton. Ils ont constaté que les colonnes renforcées par les tissus en fibres de carbone ou en fibres de verre montrent un accroissement de la résistance et la ductilité comparées à celles des spécimens non confinés. Le taux d'accroissement dépend de l'épaisseur du tube, des propriétés mécaniques du tube composite et de la résistance du béton témoin.

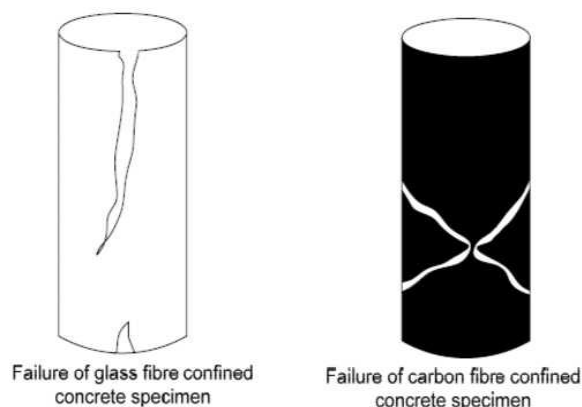


Figure III.19 : Modes de rupture des spécimens [33]

▪ **Xiao et Wu (2001) [34]**

Ils ont mené une étude de réhabilitation de trois spécimens de dimensions : $\varnothing 610 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$ enveloppées avec des coques en composite préfabriqué GFRP. Les coques sont placées sur la circonférence des colonnes en séquences, puis collées ensemble formant ainsi une enveloppe continue. Les spécimens sont soumis à un chargement horizontal et à une force de compression. Ils ont noté une amélioration de la capacité portante de la colonne réhabilitée qui a atteint celle de la section de référence.

▪ **Fam et Rizkalla (2001) [35]**

Ils ont examiné 12 cylindres tubulaires hybrides d'un élanement longueur/diamètre de 2,2 sous la compression axiale. Les essais ont visés: 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.

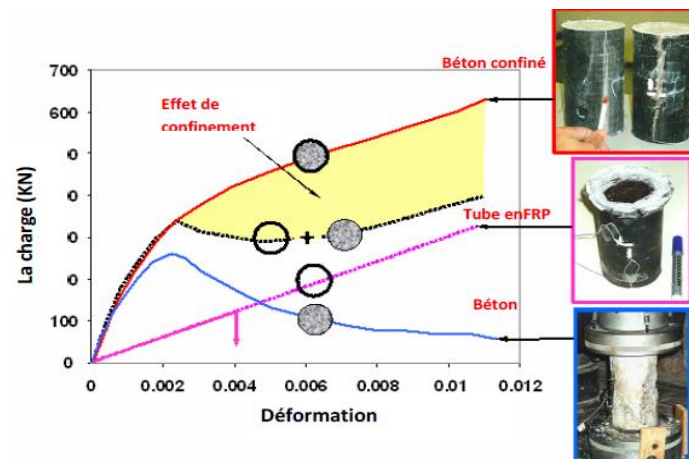


Figure III.20.Effet de confinement sur le comportement du béton [35]

▪ **Matthys et autres (2005) [36]**

Ils ont présenté les résultats de huit colonnes axialement chargées confinées par FRP. Les variables considérées ont inclus le type de FRP (CFRP, GFRP, et polymère de tissu-renforcé hybride contenant une combinaison des fibres en verre et de carbone), l'enveloppement complet ou partiel et l'orientation de fibre (circulaire et hélicoïdal).

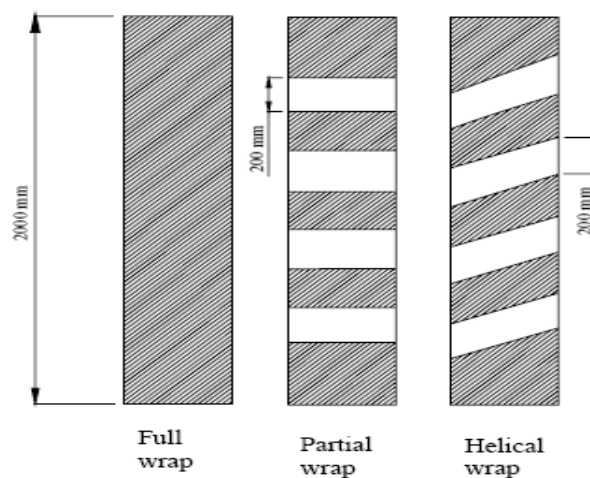


Figure III.21 : Dimensions de colonne et configuration d'enveloppe. [36]

La comparaison entre les résultats expérimentaux 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 ces colonnes ont montré (augmentation de la résistance et la ductilité, confinement partiel enregistre une faible augmentation de résistance comparativement au confinement total, la résistance dépend de la quantité et de la résistance à la traction de l'enveloppe de FRP).

▪ **Benzaid et al. (2010) [37]**

L'étude a porté sur l'effet du confinement par enveloppes en CFRP, en considérant différents nombres de plis allant de 1 à 3 plis, sur des cylindres en béton. Les cylindres en béton armés ont été confectionnés en introduisant 4 HA12 comme armatures longitudinales et 3 ϕ 8 mm comme armatures transversales avec un espacement de 140 mm. Les résultats montrent une augmentation de la résistance à la compression et de la ductilité en fonction de l'augmentation du nombre de plis de CFRP.

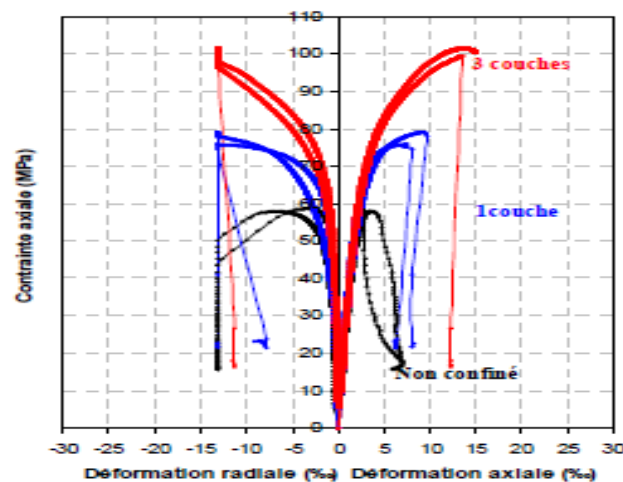


Figure III.22: Courbes contraintes-déformations des cylindres [37]

▪ **F. Taouche-Kheloui, K. Ait tahar et N.E.Hannachi (2012) [38]**

Des bielles de béton confiné conçues à partir de grille métallique en forme de losange au nombre de six ont été réalisées en vue de connaître l'apport du confinement de ce béton dans le comportement au chargement choisi. L'essai de compression réalisé sur les bielles de diamètre ϕ 6mm et de hauteur 20mm nous a permis de caractériser la résistance en compression, la Figure III.22 représente la courbe contrainte-déformation.

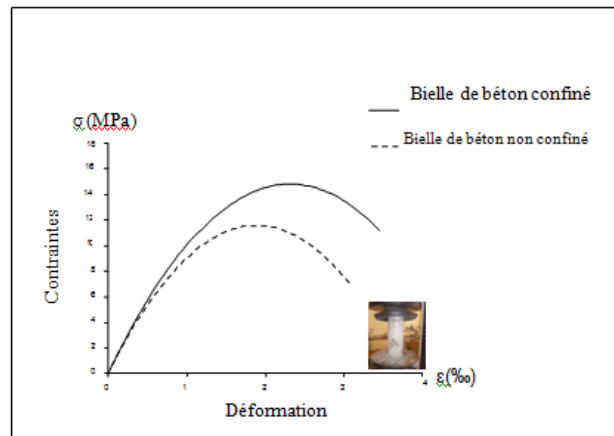


Figure III.23: Courbe contrainte-déformation des bielles. [38]

Comparativement à la bielle de béton non confinée, la bielle confinée de grille métallique présente un gain en résistance de l'ordre de 50% ainsi qu'une déformation plus étendue avant rupture donc un effet de ductilité plus important ce qui représente un apport fort significatif et représentatif.

▪ **Thong et al. (2013) [39]**

Ils ont testé 60 colonnes, en béton armé, de 800mm de hauteur ayant une section carrée de 150 mm de côté. Chaque spécimen est armé de 4 barres longitudinales Ø12mm et 4 barres transversales lisses Ø6mm, 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. La figure III.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 suivante.

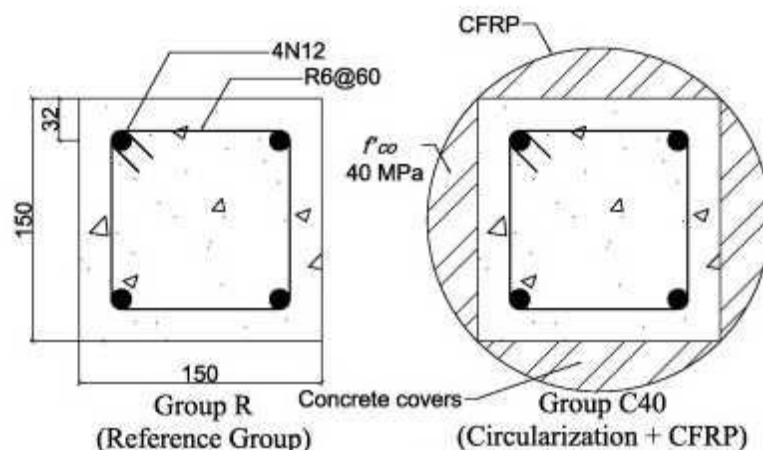


Figure III.24: Changement de section de la colonne. [39]

▪ **[Ali Ahmed et al C](2015) [40]**

Ils ont testé l'effet du confinement par bandes hélicoïdales de PRFV. Ainsi, des éprouvettes cylindriques de dimensions Ø150x300 mm ont été confinées en

considérant deux paramètres qui sont la largeur de la bande composite ainsi que le pas de l'hélice formé autour du cylindre. 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.

▪ **Zain Saeed et al. (2016) [41]**

Les auteurs se sont intéressés à l'évaluation de la performance du confinement avec un CFRP, à haute résistance, de cylindres en béton présentant de faibles résistances caractéristiques à la compression. Les paramètres considérés dans cette recherche, sont la faible résistance caractéristique du béton non confiné (12,41 MPa et 16,55 MPa) et l'épaisseur de l'enveloppe de CFRP (1 et 2 plis). La figure suivante montre le mode de rupture des spécimens confinés.



Figure III.25 : Modes de rupture des colonnes confinées avec CFRP[41]

Les résultats obtenus montrent que le confinement avec CFRP peut améliorer d'une façon appréciable la résistance et la déformation ultime même de cylindres en béton à faible résistance caractéristique. Il a été constaté que les gains en résistance atteignent 70,9% et 121,81% (pour 1 et 2 plis). Ainsi, les structures en béton qui présentent des déficiences sismiques, peuvent retrouver leurs états d'origine et même survivre à d'autres séismes grâce à l'amélioration de la résistance et de la ductilité obtenue après leur réparation avec des FRP.

III.11 Comportement du béton confiné :

Dans le souci essentiel de déterminer un renforcement dans les structures de béton pour augmenter la capacité portante, la déformabilité (ductilité) ou pour améliorer le comportement de l'ouvrage à l'état de service, des recherches expérimentales ne cessent d'être entreprises par des spécialistes dans ce sens. Des différentes techniques

de renforcements sont apparues, celle qui fait l'objet de notre étude est la technique de confinement du béton par des matériaux composites. [42]

Le confinement du béton se réalise à l'aide d'enveloppes en matériaux composites à base de fibres de verre, de carbone et d'aramide et autres. Les composites offrent des modules d'élasticité et des rigidités variés pouvant modifier le comportement axial et radial du béton confiné. Sous l'action d'une charge de compression axiale, le béton présente une déformation latérale, Cette déformation engendre une fissuration qui ne cesse d'augmenter jusqu'à la rupture du béton. Lorsque le béton est retenu latéralement (par collage de composites) de façon à réduire, voire empêcher cette déformation, sa résistance à la compression ainsi que sa ductilité augmentent. La Figure III.26 présente les courbes typiques contraintes déformations pour des bétons confinés et non confinés. Le confinement augmente en général deux caractéristiques du béton: la résistance en compression et la déformation correspondant à la contrainte ultime de compression. [42]

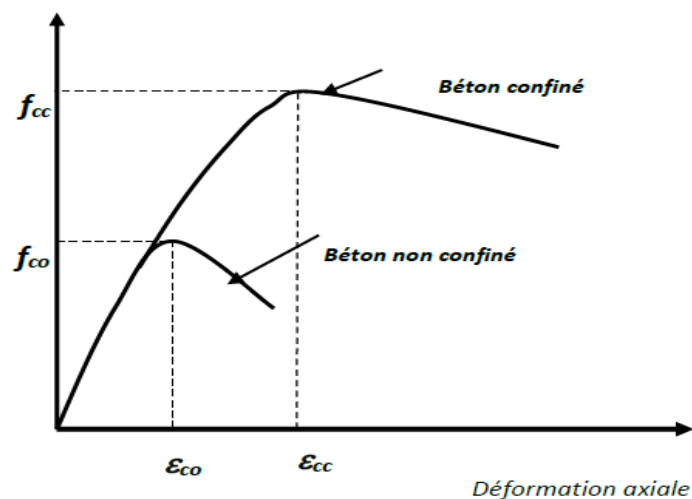


Figure III.26. Courbes contraintes déformations d'un béton confiné et non confiné [43]

La Figure III.26 montre l'effet de la pression de confinement sur le comportement en compression du béton. *Richart, Brantzaeg et Brown* [43], 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 la propagation de ces fissures, de ce fait on aura une augmentation de la résistance et de la ductilité du béton confiné.

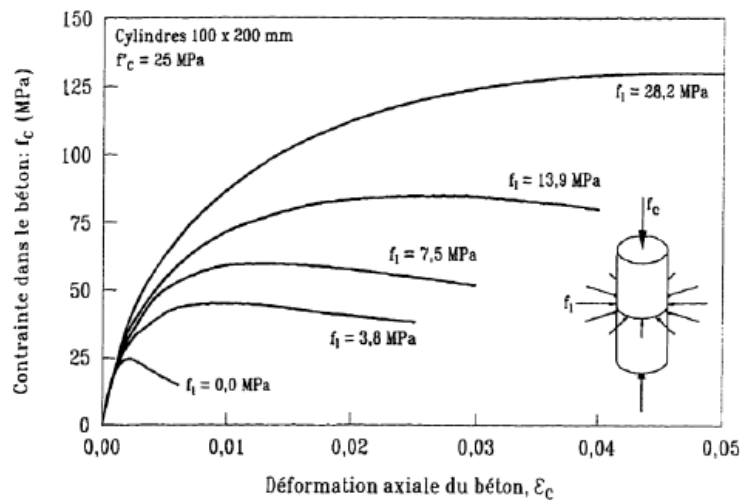


Figure III.27. Effet de la pression de confinement sur le comportement du béton [44]

III.12 Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté les différentes techniques utilisées pour le renforcement ou la réparation des structures en béton armé. La technique la plus répandue est l'utilisation des matériaux composites car elles présentent d'excellentes performances et se sont révélés être nettement plus efficaces, fiables et compétitives. Jusqu'à ce jour, les expériences conduites par des chercheurs ont démontré l'intérêt de ces matériaux (Augmentation de la ductilité et de la résistance, application aux colonnes de différentes géométries, légèreté, durabilité, etc...).

Références bibliographiques

- [18] **KASSOUL Amar**, « Réhabilitations des constructions en béton armé ». Vulnérabilité et Réhabilitation des Structures, Master Génie Civil – 2015.
- [19] **FARSI mohamed-naboussi**, « réparation et/ou renforcement des ouvrages », Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique, Algérie Équipement.
- [20] **MADI Rafik , GUENFOUD Mohamed**, « Techniques de renforcement des bâtiments en béton armé vis-à-vis du séisme », Laboratoire LGCH, Université Guelma, Algérie.
- [21] **BENZAID Riad**, « Contribution à l'Étude des Matériaux Composite dans le Renforcement et la Réparation des Éléments Structuraux Linéaires en Béton. Thèse de doctorat, Université MENTOURI Constantine, 2010.
- [22] **ALI AHMED Chafika ,** « Optimisation des paramètres de réhabilitation, par les matériaux composites, des structures endommagées : Techniques –expérimentation et modélisation », Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2016
- [23] **BOUKHEZAR Mohcene**, « Réhabilitation et renforcement des poutres au moyen des matériaux composites ». Thèse de doctorat, Université MENTOURI Constantine, 2009.
- [24] **BOUZEBOUDJA Fatma**, « Poinçonnement de dalles armées de tissus composites », Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2017
- [25] **Solution béton**, « Les solutions techniques pour la réparation et le renforcement des ouvrages de génie civil en béton, Construction Moderne / Annuel Ouvrages d'art 2011. P15-22.
- [26] **HOUHOU Nouredine**, « 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, Université Paris-Est, 2012.
- [27] **BEDDIAR Abdelhakim**, « Renforcement des poutres en béton armé à l'aide de matériaux composites étude théorique et numérique », Mémoire magister, Université Mohamed Khider de Biskra. 2004.

[28] **ROCHETTE Pierre**, « Confinement de colonnes courtes en béton de section carrée ou rectangulaire avec des matériaux composites », Mémoire de maîtrise en science appliquées, Université Sherbrooke Québec, Canada, 1996.

[29] **HALLONET Anne**, « Développement et caractérisation d'un matériau composite à base de fibres de lin : application au renforcement de structures en béton par collage externe », Matériaux. Université de Lyon, 2016.

[30] **BENZAID Riad, MESBAH HabibAbdelhak, CHIKH Nasr-Eddine**, « Contribution à l'Étude des Matériaux Composites dans le Renforcement et la Réparation des Éléments Structuraux Linéaires en Béton ». Éditions Universitaires Européennes, 2010.

[31] **ZEIN EL ABIDINE Ould El Hacem**, « Renforcement du béton par les matériaux composites », Mémoire de Master Académique, Université de Tébessa. 2016.

[32] **FARDIS, M.N. et KHALILI, H.H.** «FRP-encased concrete as a structural material», Magazine of Concrete Research, Vol. 34, No. 121, pp. 191-202, 1982.

[33] **SAAFI, M; TOUTANJI, A. H; and Li, Z;** « Behaviour of Concrete Columns Confined with Fiber Reinforced Polymer Tubes», ACI Materials Journal, Vol. 96, No. 4, Ju1.-AUG., 500-509 pp, 1999.

[34] **XIAO Y, Wu H.** “Concrete stub columns confined by various types of FRP jackets”. Proceedings of the international conference on FRP composites in Civil Engineering, Hong Kong, China; 2001.

[35] **FAM, A. Z., et RIZKALLA, S. H.,** « Behavior of axially loaded concrete-filled circularfiber-reinforced polymer tubes», ACI structural Journal, Vol. 98, No. 3, pp 280-289; 2001.

[36] **Matthys, S., TOUTANJI, H., AUDENAERT, K. and 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

[37] **BENZAID Riad, MESBAH Habib, CHIKH Nasreddine**« Performances des colonnes en béton confiné avec des enveloppes externes en composites PRFC », 2010.

[38] **Fatma.Taouche-Kheloui**, « Modélisation du comportement à la fatigue d'éléments de construction en béton de fibres », Thèse de doctorat en génie civil, Université Mouloud Mammeri, 2012.

[39] **Thong M. Pham, Le V. Doan, Muhammad N.S. Hadi**. «Strengthening square reinforced concrete columns by circularisation and FRP confinement. Construction and Building Materials ». Volume 49, 2013, Pages 490–499.

[40] **ALI AHMED C, AITTAHAR K**. “Behavior of concrete cylinder confined with helical composites strips”. *Procedia Engineering* ,volume 144,2015,pp 157-164.

[41] **Zain Saeed H, Qaiseruz Zaman Khan, HAMMAD Anis Khan, FAROOQ Rashid**, “Experimental investigation of stress–strain behavior of CFRP confined Low Strength Concrete(LSC) cylinders”. *Construction and Building Materials*. Vol 104, 2016, pp 208–215.

[42] **SHEIKH, S.A. and UZUMERI, S.M**. «Strength and ductility of tied concrete columns», *Journal of Structural Division*, Vol. 106, No. 5, pp. 1079-1102, 1980.

[43] **Richart, F.E., BRANDTZAEG, A. and BROWN, R.L**. «A Study of the failure of concrete under combined compressive stresses», *University of Illinois, Engineering Experimental Station, Urbana, Bulletin no 185*, 104 p.1928.

[44] **YOUNG Q, QIN Q, ZHENG D**, «analytical and numerical investigation of interfacial stress of FRP-concrete hybrid structure». *Composite structure*, 2002.

[45] **Fukuyama, H. et Sugano, S.** (2000) “Studies Japanese seismic rehabilitation of concrete buildings after the Hyogoken-Nanbu Earthquake”, *Cement and Concrete Composites*, Vol.22, pp. 59-79.

[46] **Ghobarah, A., Aziz, T. S. et Biddah, A.** (1996) “Seismic rehabilitation of reinforced concrete beam-column connections”, *Earthquake Spectra*, Vol. 12, No. 4, pp. 761-780.

[47] **Luyckx, J.** (1999) “Composites à fibres de carbone dans le génie civil”, *Technique de l'ingénieur, Traité Plastiques et Composites*, AM 5 620.

[48] **Monti, G.** (2003) “Seismic upgrade of reinforced concrete columns with FRP”, *Technical report, Teheran*, 22 July 2003, 29 p.

Chapitre IV : Simulation numérique

IV.1 Introduction :

Dans le domaine de la recherche industrielle privée ou publique (construction automobile, aéronautique, spatial, génie civil), des techniques de simulation et d'analyse numérique de phénomènes physiques se sont beaucoup développées ces dernières années et ont contribué grandement à améliorer la productivité des industriels et la vie de tous les consommateurs.

La simulation numérique par éléments finis des problèmes de mécanique est aujourd'hui une réalité scientifique, qui permet de mettre au point des études en réduisant le recourt à la méthodologie expérimentale et empirique d'erreur-correction qui est beaucoup plus coûteuse. Ainsi les logiciels de conception et de calculs assistés par ordinateur ont pris un grand essor le marché, leur apport est très considérable en termes de performances et de productivité. Ces logiciels permettent de générer des structures, ses caractéristiques et celles du problème étudié, ensuite ils prédisent le comportement de cette structure (déformations, ruptures, plastification...) et enfin ils permettent de traiter ces résultats afin d'en sortir des données utilisables et exploitables.

IV.2 Présentation générale d'ABAQUS :

ABAQUS est un code de calcul par éléments finis (MEF) créé en 1978 par *Hibbit, Karlsson* et *Sorensen* (HKS). Il est utilisé pour simuler la réponse physique des pièces ou des structures soumises à des chargements mécaniques, thermiques, du contact, de l'impact ou d'autres conditions.

C'est un logiciel très complet permettant de faire des analyses linéaires ou non linéaires, statiques ou dynamiques. Le module ABAQUS/CAE est une interface dans laquelle l'utilisateur peut définir toutes les propriétés de son analyse (géométrie des différentes pièces, propriétés mécaniques, choix des éléments, choix de l'intégration de la matrice de rigidité, choix du mode de résolution). Pour la résolution des analyses, il existe deux modules ABAQUS/Standard et ABAQUS/Explicit.

Le premier est un module utilisant des schémas de résolution implicite dits classiques pour des analyses statiques comme la méthode *Newton-Raphson* ou la méthode de Risks (méthode de longueur d'arc). Il peut aussi résoudre implicitement des problèmes dynamiques notamment avec la méthode de Newmark.

Le second utilise une méthode de résolution explicite pour l'intégration temporelle des problèmes dynamiques. Cette méthode est encore assez nouvelle dans le domaine du génie civil. Elle permet notamment une meilleure prise en compte des problèmes à forte non-linéarité matérielle et est donc particulièrement adaptée pour les matériaux adoucissants. Avec :

- ❖ **Abaqus / CAE** vous pouvez rapidement et efficacement créer, modifier, surveiller, diagnostiquer et visualiser d'analyse avancée

- ❖ **Abaqus / Standard** utilise une technologie de solution idéale pour des événements dynamiques et statiques à faible vitesse où les solutions de stress très précises sont d'une grande importance
- ❖ **Abaqus / Explicit** est un produit d'analyse par éléments finis qui est particulièrement bien adapté pour simuler de brefs événements dynamiques transitoires tels que la résistance aux chocs de l'automobile, et de l'impact balistique.

IV.3 Les principales composantes de la fenêtre d'ABAQUS :

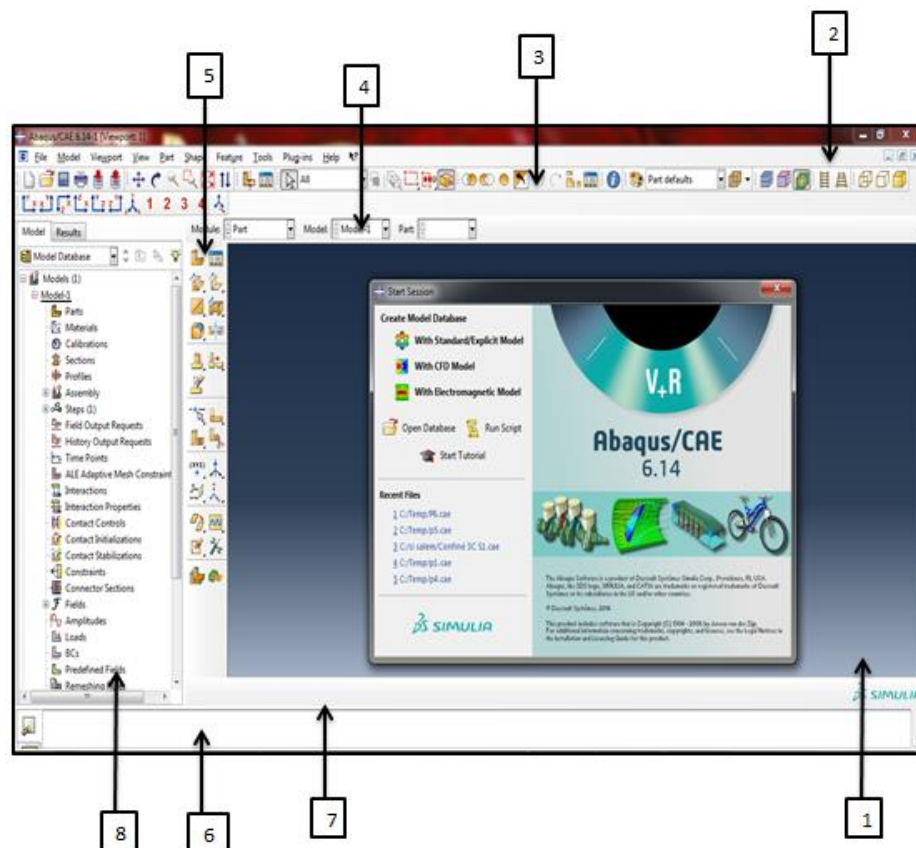


Figure IV.1: Présentation de l'interface ABAQUS.

1. Fenêtre d'affichage graphique.
2. Barre de menu en haut, ces menus sont relatifs au module correspondant.
3. Barre horizontale d'outil, y sont disposées les icônes correspondant aux commandes les plus courantes, c'est-à-dire les commandes d'ouvertures et de sauvegarde de fichiers, et les commandes réglant l'affichage des vues (perspective, ombrage, zoom, etc.).
4. Barre de menus déroulant permettant d'accéder aux autres modules, ou de sélectionner le modèle ou la pièce sur lesquels on souhaite travailler.
5. On dispose à gauche d'une colonne d'icone permettant d'accéder aux outils disponibles à l'intérieur du module dans lequel on se trouve

6. L'espace juste sous la fenêtre d'affichage graphique correspond aux messages affichés par ABAQUS lors de la modélisation ; ils permettent d'être mieux guider dans les actions entreprises.
7. Une fenêtre en dessous sur fond blanc est utilisée pour afficher des messages informatifs : réponses à des questions posées, avertissements liés à des problèmes rencontrés, etc.
8. Arbre du modèle et résultats.

IV.4 Rappel des actions pour créer un modèle Abaqus :

- **Dessiner le modèle:** le module **PART** permet de créer tous les objets géométriques nécessaires au problème, soit en les dessinant dans Abaqus/CAE, soit en les important d'un autre logiciel de dessin. Dans le cas d'une modélisation tridimensionnelle :
 - Dessiner le profil 2D (l'esquisse) de la forme voulue.
 - Le développer en 3D.
 - Rajouter les détails manquants (chanfreins...).
- **Affecter les propriétés matériau à l'objet:** le module **PROPERTY** permet, comme son nom l'indique, de définir toutes les propriétés matérielles d'un objet géométrique ou d'une partie de ces objets.
 - Créer le matériau 
 - Créer les sections sur lesquelles appliquer ces matériaux 
 - Affecter les matériaux aux sections correspondantes 
- **Assembler le modèle:** le module **ASSEMBLY** permet d'assembler les différents objets géométriques créés dans un même repère de coordonnées global. Un modèle Abaqus contient un seul assemblage.
 - créer les instances 
 - les positionner dans le repère général
 -
- **Définir les étapes d'analyse:** Le module **STEP** permet aussi de définir toutes les requêtes pour le post traitement on peut par exemple créer un STEP pendant lequel des forces ou des conditions aux limites sont appliquées; et un STEP pendant lequel ces forces et/ou conditions aux limites ne sont pas appliquées.
- **Créer les interactions entre les instances:** le module **INTERACTION** permet de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, elles peuvent être de différentes natures mécaniques, thermiques ou

autres. Il faut savoir qu'Abaqus ne prend en compte que les interactions explicitement définies, la proximité géométrique n'étant pas suffisantes, la procédure de spécification des interactions est la suivante :

- Créer les surfaces
 - Définir les types de contacts
 - Associer des surfaces avec des types de contact
- **Appliquer les conditions aux limites et les chargements:** le module **LOAD** permet de spécifier tous les chargements, conditions aux limites et champs. Il faut que les chargements et les conditions limites soient dépendants des Steps, par exemple une force est appliquée au Step 1 mais inactive au Step 2.
- Définir les étapes d'application
 - Définir les types de CL et/ou chargement
- **Mailler le modèle:** le module **MESH** contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage éléments finis sur un assemblage
- Partitionner le modèle.
 - Choisir les techniques de maillage.
 - Choisir les types d'éléments.
 - Discrétiser le modèle.
 - Mailler le modèle
- **Créer et soumettre un calcul :** 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 post-trait et les résultats demandés.
- **Visualiser les résultats :** le module **VISUALIZATION** permet de visualiser le modèle et les résultats, les courbes de charges, les déformations...

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.

IV.5 Modélisation par éléments finis Abaqus CAE:

IV.5.1 Dimension et géométrie :

Les modèles analysés sont composés des cylindres en béton pleins déformables selon la norme NFP18-406 [49] avec une hauteur de 32cm et un diamètre de 16cm et de deux disques rigides d'un diamètre de 20 cm. ces cylindres seront confinés avec un tissu de polypropylène de trois manières différentes :

- **Modèle 1 :** des cerces de largeur 5 cm et un diamètre de 16 cm avec un espacement de 4 cm.

- **Modèle 2** : une bande sous forme d'une hélice à 4 tours pendant que sa largeur est de 5 cm.
- **Modèle 3** : une coque de diamètre de 16 cm et une hauteur de 32 cm.

Après avoir créé ces pièces, elles seront assignées par leurs matériaux correspondant ensuite assemblés pour avoir les modèles cités précédemment.

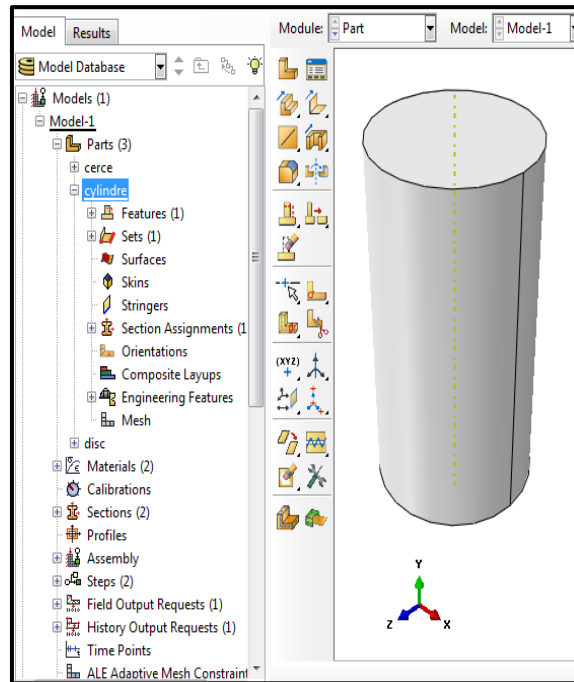


Figure IV.2: La géométrie du cylindre.

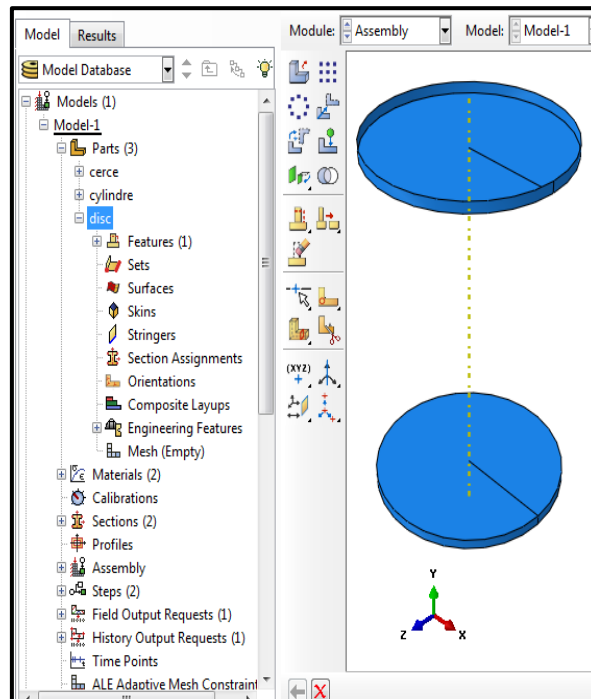


Figure IV.3: La géométrie des disques

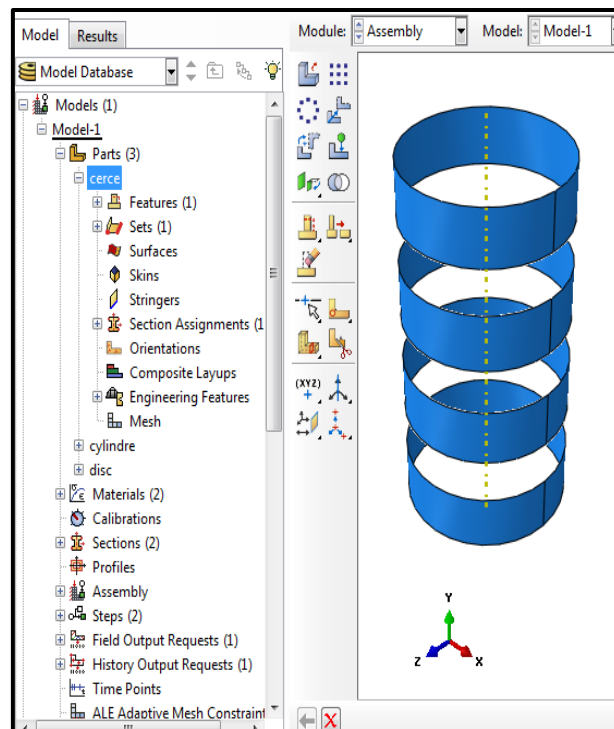


Figure IV.4: La géométrie des cerces.

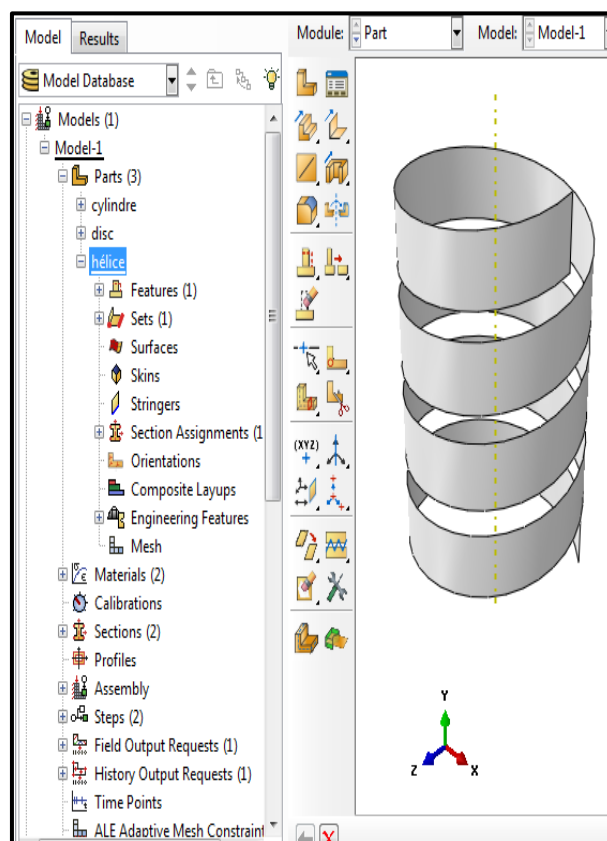


Figure IV.5: La géométrie de l'hélice

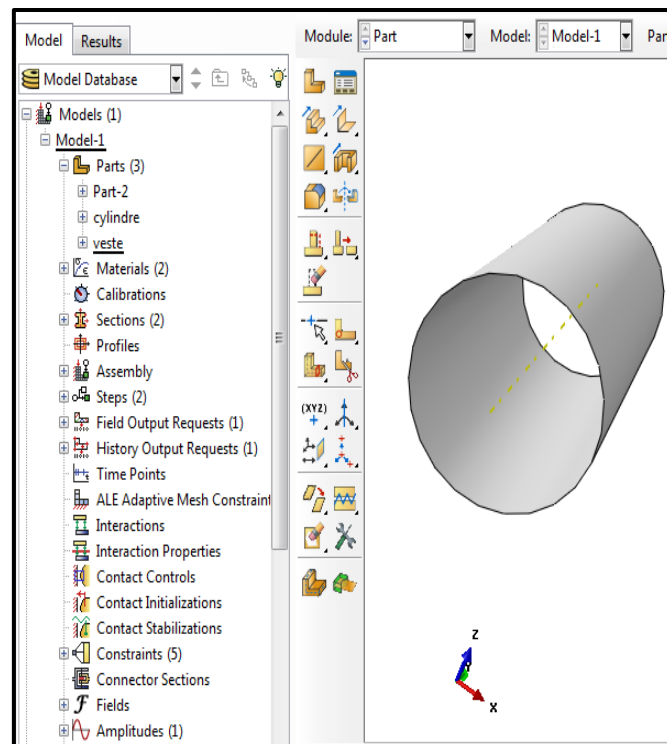


Figure IV.6: La géométrie de la coque.

IV.5.2 Propriétés et assemblage :

Après avoir créé les pièces, elles seront assignées par leurs matériaux correspondant (béton, composite) qu'on a défini leurs caractéristiques dans le module **propredty**, en précisant les sections sur lesquelles ces matériaux sont appliqués, afin de prendre en compte tous les paramètres d'étude et de valider le modèle élément finis proposé.

- Ensuite on importe ces pièces dans le module **assembly** pour les assembler dans un même repère global, et cela on supposant une liaison parfaite pour tous les éléments modélisés.

Dans cette partie le choix des variantes d'étude s'imposent, les figures si dessous illustrent les différents assemblages :

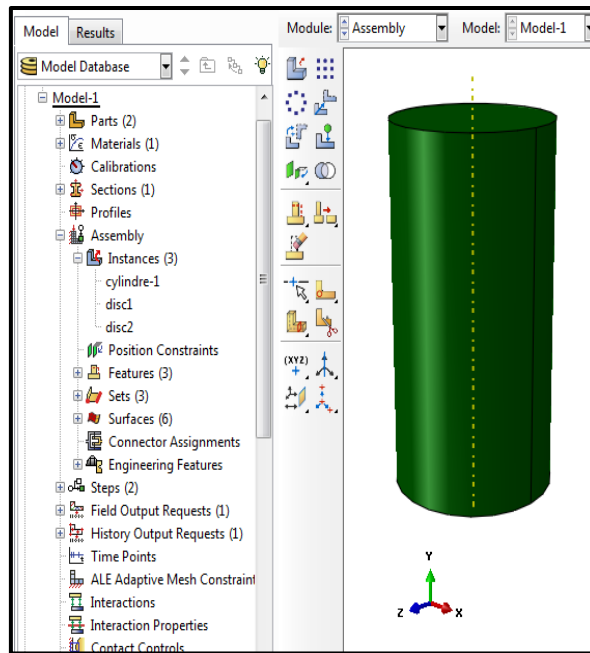


Figure IV.7: Béton témoin (non confiné).

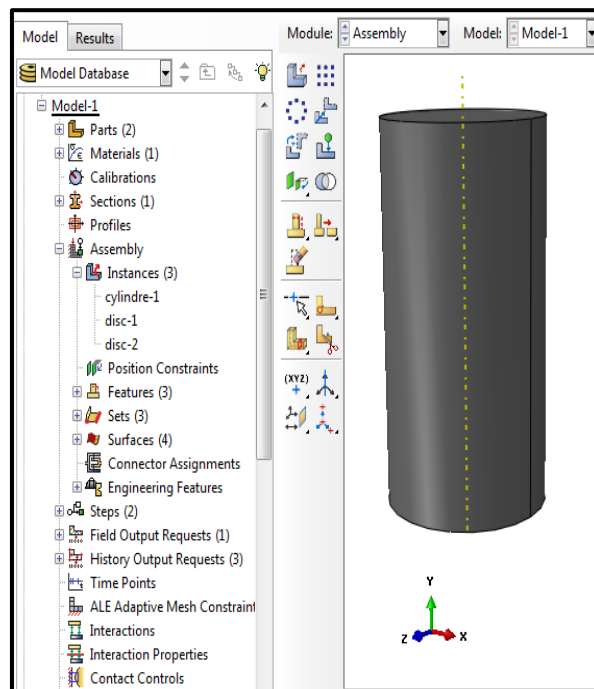


Figure IV.8: Béton avec ajouts (15PV10SV).

On a confiné le béton avec ajouts (15 % poudre de verre et 10% sable de verre) avec du tissu polypropylène (PP) de trois manières différentes comme le montre les figures suivantes :

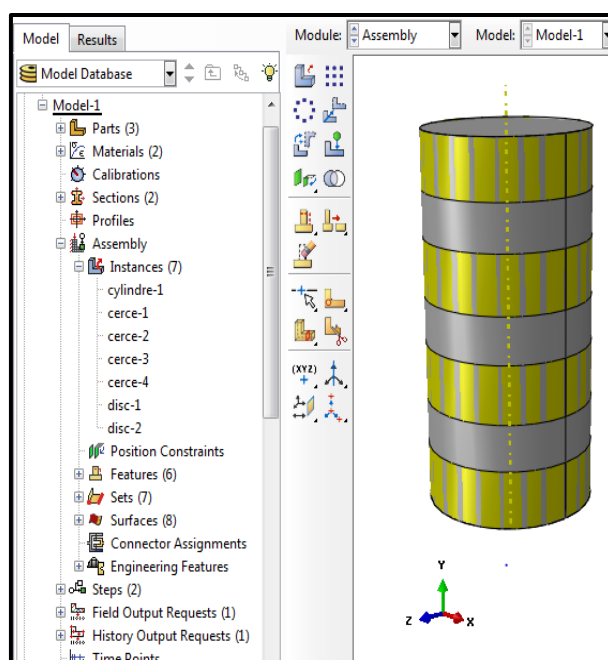


Figure IV.9 : Confinement Partiel Circulaire.

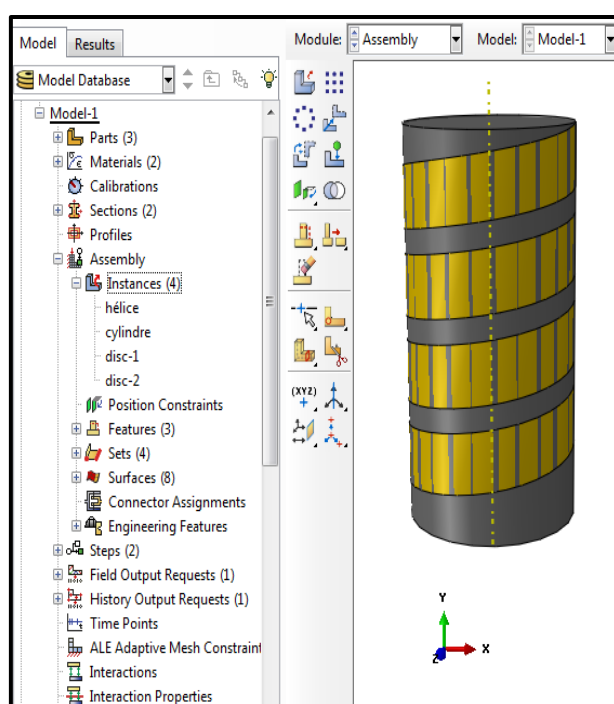


Figure IV.10 : Confinement Partiel Hélicoïdal.

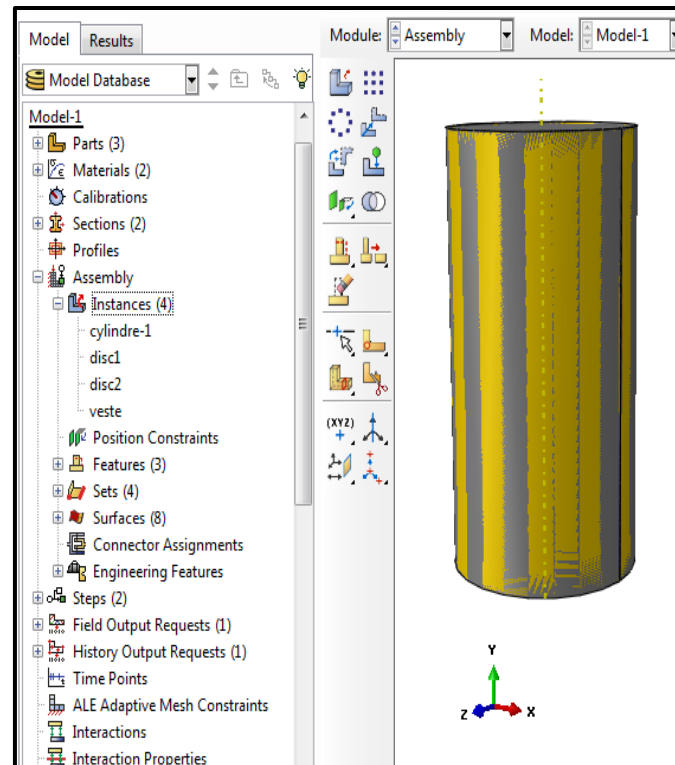


Figure IV.11 : Confinement Totale.

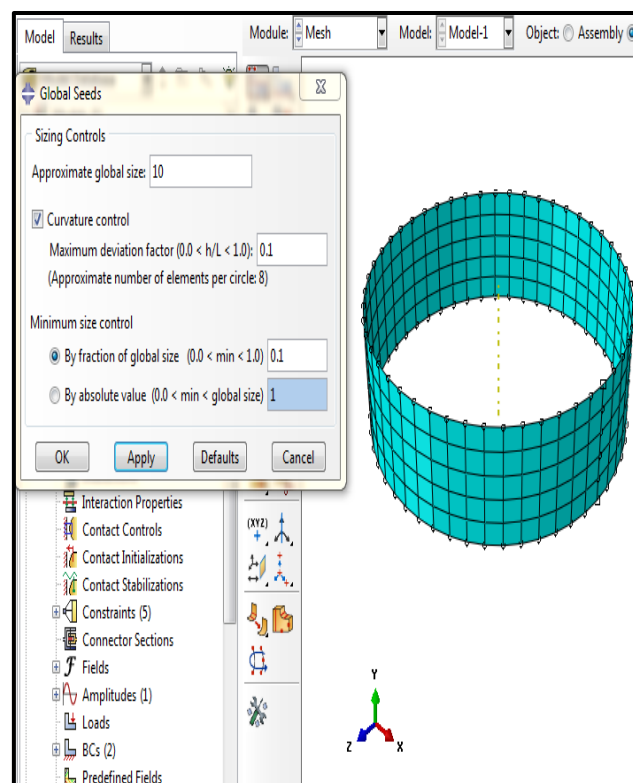
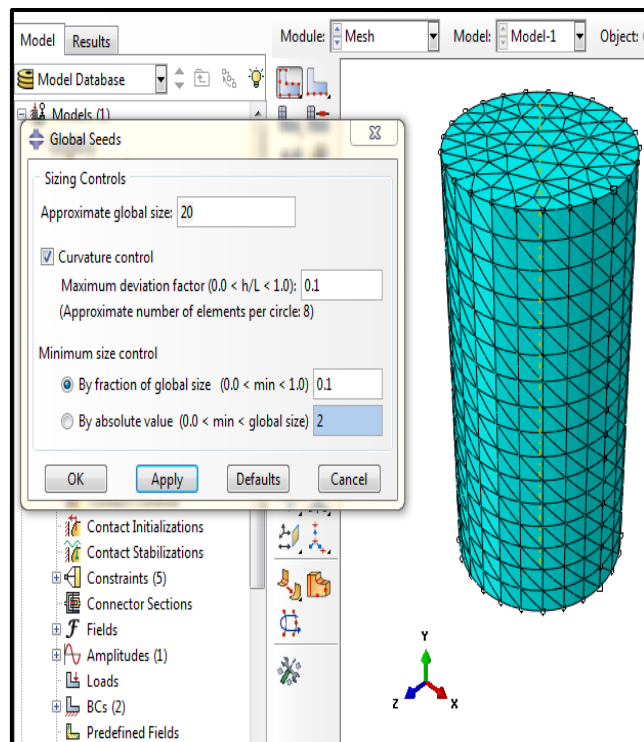
IV.5.3 Maillage et modèle élément fini :

Dans le module MESH nous intégrons le maillage à notre ensemble. Et pour aboutir à des résultats numériques cohérents on adopte un maillage raffiné seulement dans les zones susceptibles de développer des phénomènes significatifs, le reste de la structure est alors maillée plus grossièrement.

Il est possible de choisir la technique de maillage, le type d'éléments et leur forme (exemple : hexaédriques, cubiques, tétraédrique...), Mais l'utilisation d'éléments de même taille, nous affranchit de l'influence de leur taille sur les résultats numériques. De plus, la densité de notre maillage doit être optimale, afin de réduire, autant que possible, la taille du problème et le temps d'exécution.

Le maillage adéquat des différentes pièces constituant notre modèle:

- **Le cylindre de béton:** est maillé avec des éléments à 3 dimensions qui sont des éléments tétraédriques de 20 mm de côté, présentant huit nœuds ayant chacun 3 degrés de liberté.
- **Le tissu composite:** est maillé avec des éléments surfaciques quadrilatéraux de 10 mm de côté, présentant quatre nœuds ayant 8 degrés de liberté.



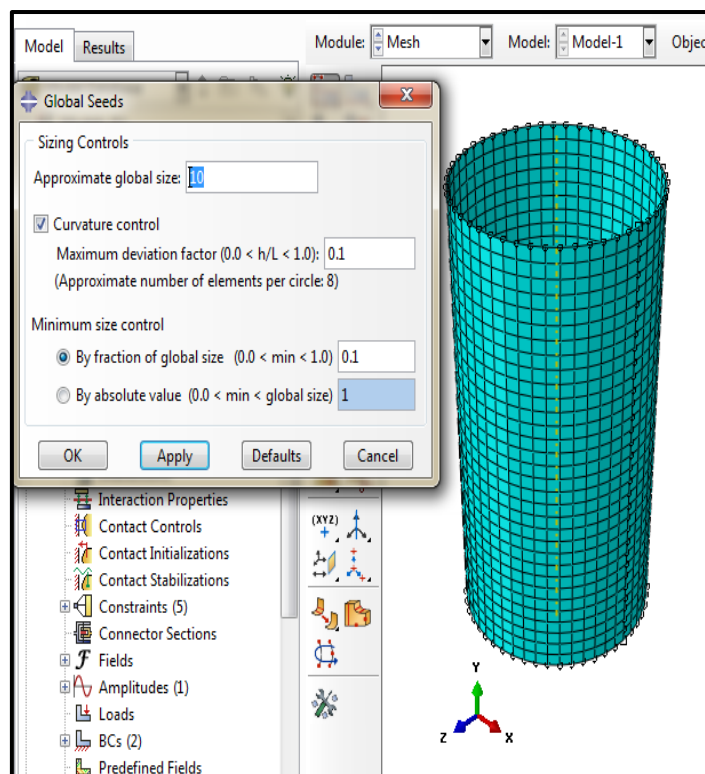
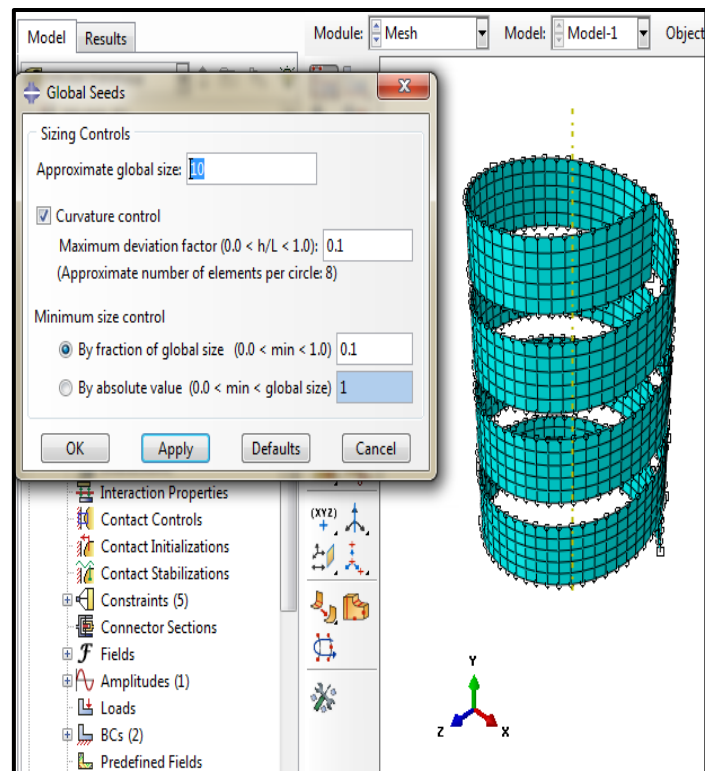


Figure IV.12 : Maillages adoptés pour les différents des éléments.

Une étude de sensibilité du maillage est réalisée, l'objectif est de définir la dimension optimale des éléments finis choisis qui permet de mieux converger vers la solution exacte. A cet effet une étude comparative est réalisée, lors de la simulation d'un cylindre soumis à un chargement axial jusqu'à la rupture, l'étude est réalisée avec des éléments finis tétraédriques de dimensions variées à savoir : 30 mm, 25 mm, 20 mm, 15mm et 10mm.

La Figure IV.13 montre les contraintes des cylindres en compression obtenu à travers l'évolution du chargement extérieur appliqué en (MPa) en fonction de la déformation jusqu'à la rupture pour les variantes de dimensions des éléments finis considérées. On constate que les variantes considérées convergent pratiquement vers la même réponse, qui commence à se stabiliser pour une dimension d'élément fini de 20mm, ce qui explique le choix du maillage adopté.

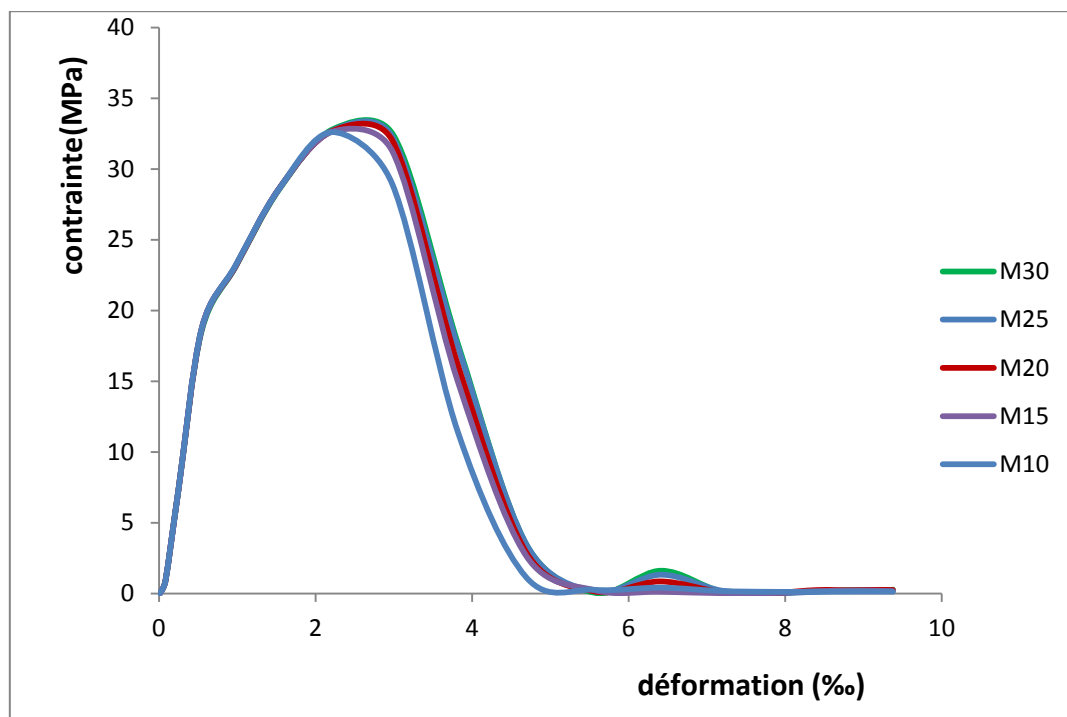


Figure IV.13: Courbes contrainte-déformation pour les 5 configurations de maillage.

IV.5.4 Gestion du contact :

Dans cette étape nous allons définir le contact entre les différentes pièces et cela se fait par la création des interactions entre celles-ci. Un contact se fait généralement entre un corps rigide et la pièce déformable et s'effectue entre deux surfaces qui appartiennent en général à deux corps différents. La procédure de spécification des interactions est la suivante : 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.

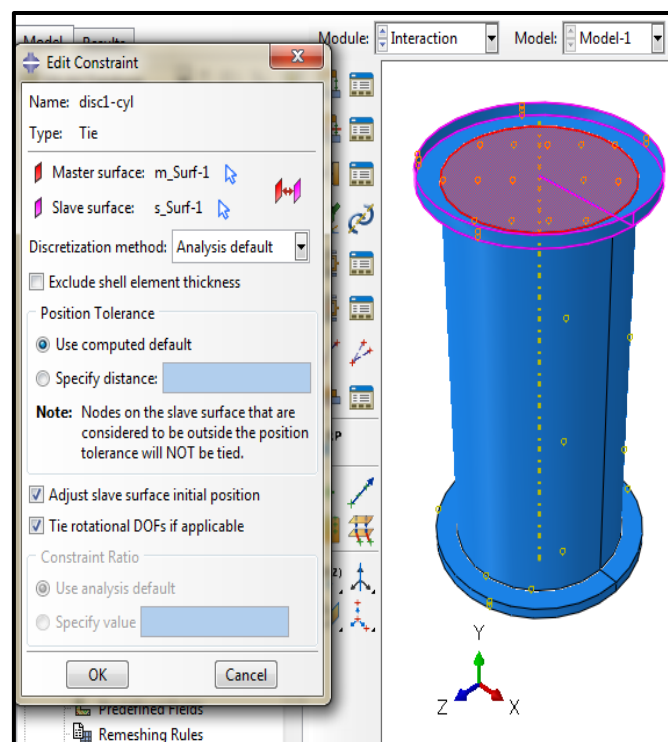
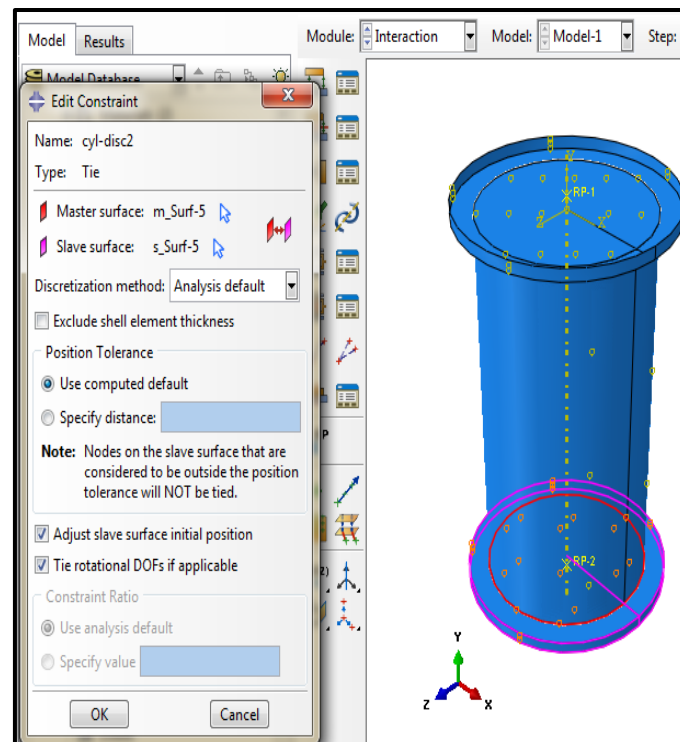


Figure IV.14 : Modélisation du contact: Béton-Disque.

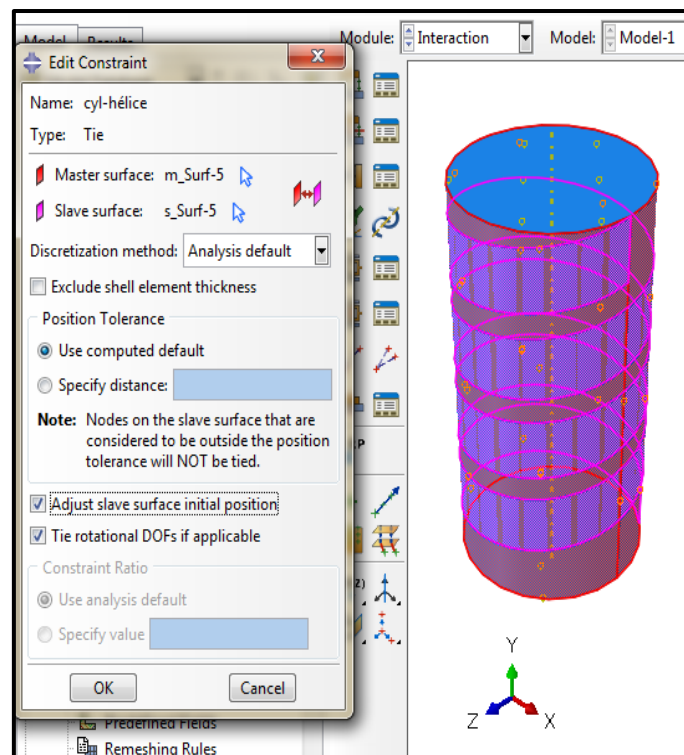
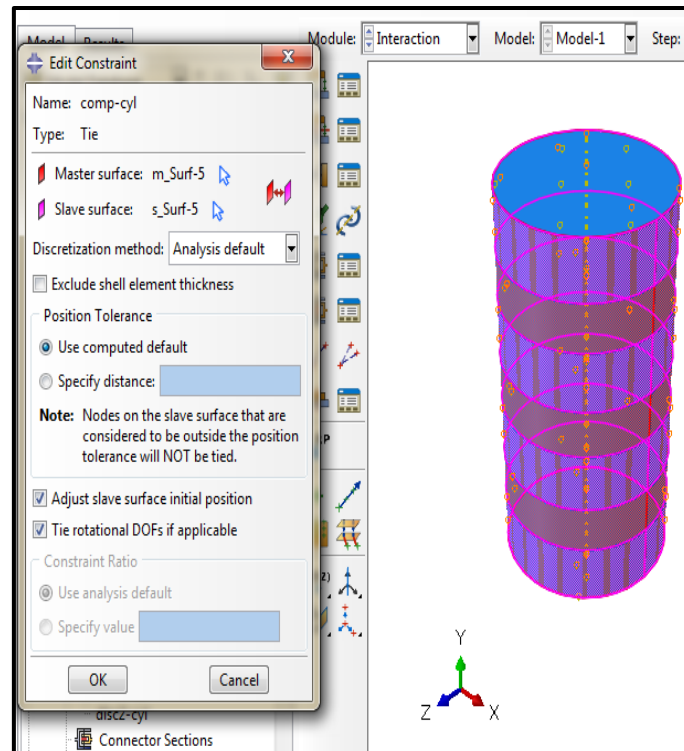


Figure IV.15 : Modélisation du contact: Béton-Composite.

IV.5.5 Chargement et conditions aux limites:

Comme les essais réalisés au laboratoire et avec des conditions de chargement similaires, pour les introduit On clique sur le module **Load**. Dans notre modèle étudié

l'axe y du système des coordonnées coïncide avec l'axe du cylindre. Par conséquent, les conditions aux limites considérées sont :

- ❖ Une extrémité du cylindre qui correspond à une position $Y = 0$, a été encastree. Tous les degrés de liberté sur cette surface ont été bloqués.
- ❖ Une charge axiale de compression monotone jusqu'à la rupture a été appliquée sur l'autre surface qui correspond à une position $Y = 32$ cm.

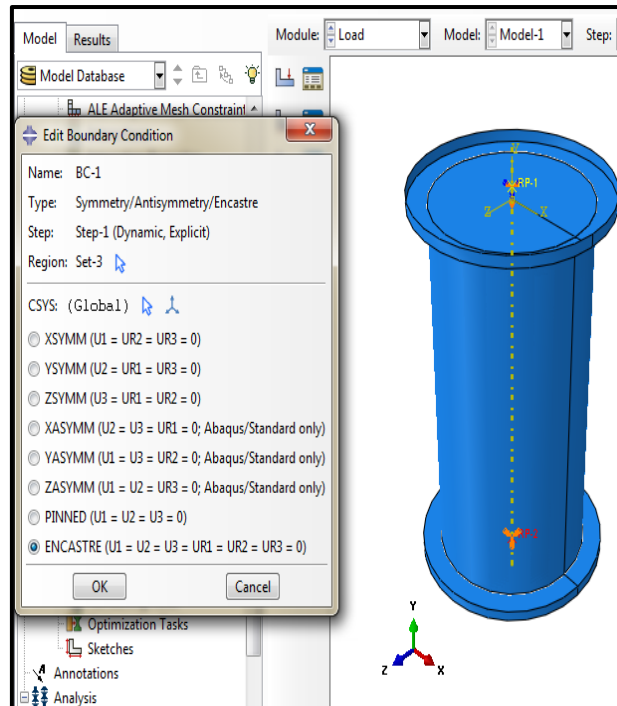


Figure IV.16: Application des conditions aux limites.

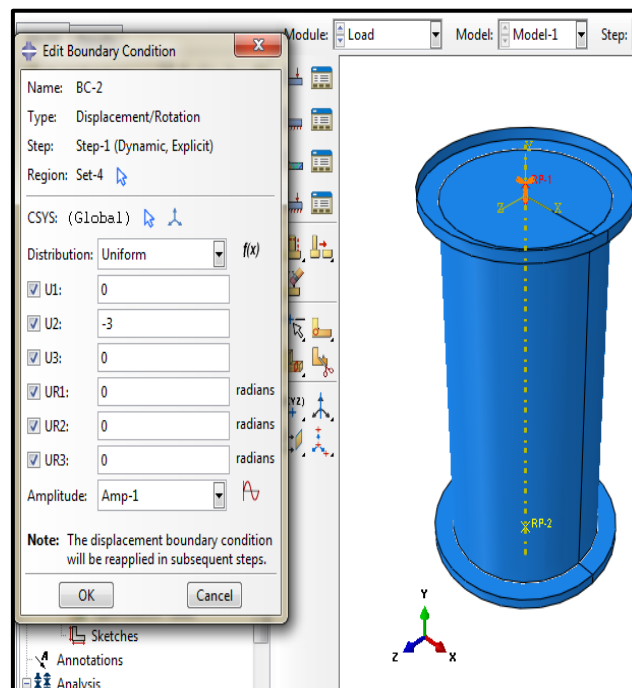


Figure IV.17: Application du chargement.

IV.5.6 Gestion des résultats : STEP et JOB:

Dans le module « *step* », nous créons une procédure dynamique, explicite, il permet aussi de définir toutes les requêtes pour le post traitement on peut par exemple créer un STEP pendant lequel des forces ou des conditions aux limites sont appliquées ; et un STEP pendant lequel ces forces et/ou conditions aux limites ne sont pas appliquées. C'est également dans le module qu'on précise les sorties désirées. Il y a 2 types de sorties : des sorties de type *champ* (Field output requests) qui fournissent des valeurs à un instant donné et des sorties de type historique (history output requests) qui vont donner l'évolution d'une grandeur au cours du temps.

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 post-traiter les résultats demandés.

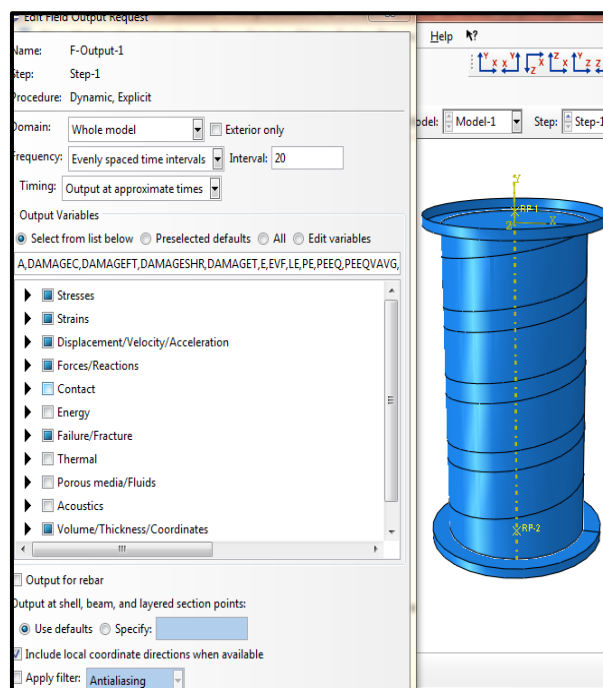


Figure IV.18 : Le module STEP

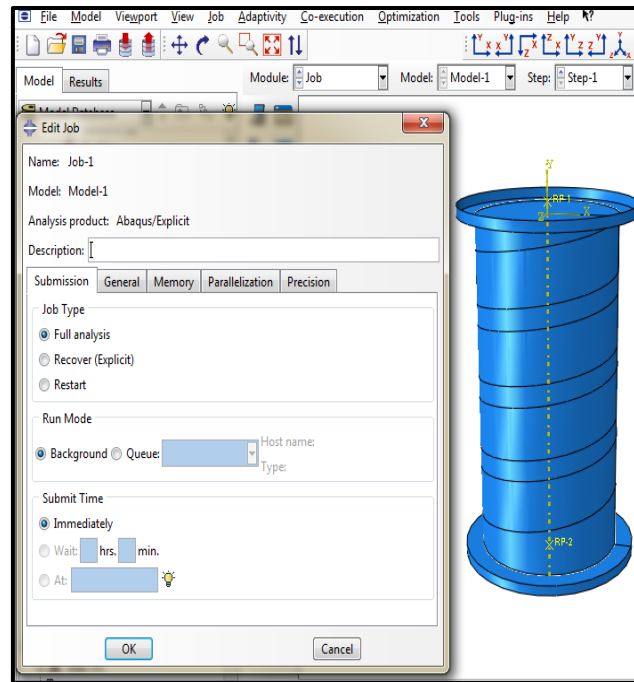


Figure IV.19 : Le module JOB.

Une fois que le calcul est terminé, les résultats d'analyse seront affichés par le module visualisation et cela sous forme graphique ou numérique.

IV.6 Modélisation du comportement des matériaux:

L'utilisation des modèles éléments finis disponibles dans la littérature est nécessaire pour trouver la réponse réelle de la structure considérée sous des sollicitations extérieures, en se basant sur des données phénoménologiques qui décrivent le comportement des matériaux constituant notre structure (béton et matériaux composites)

IV.6.1 Modèle élastoplastique endommageable pour le béton :

Le modèle numérique *Damaged plasticity for concrete and other quasi-brittle materials* intégré dans le code élément finis Abaqus permet de décrire le comportement anélastique de béton et d'autres matériaux quasi-fragiles dans tous les types de structures, ce modèle est un modèle de dommages, continu, basé sur la plasticité, pour le béton. Il suppose que les deux principaux mécanismes de défaillance sont la fissuration par traction et le broyage en compression du béton, Ce modèle se réfère à $\tilde{\epsilon}_t^{pl}$, $\tilde{\epsilon}_c^{pl}$ en tant que déformations plastiques équivalentes en traction et en compression, respectivement

IV.6.1.1 comportement à la compression

Sous un chargement de compression uni-axiale le béton possède un comportement ductile, la réponse est linéaire jusqu'à la valeur de la limite élastique (partie 1 de la

Figure III.20). Dans le domaine plastique, la réponse est généralement caractérisée par un écrouissage (Partie 2) suivi d'adoucissement (partie 3) au-delà de la contrainte de rupture. Le béton contient des microfissures qui commencent à se développer et se propager jusqu'à l'atteinte de la fissuration globale du béton (rupture).

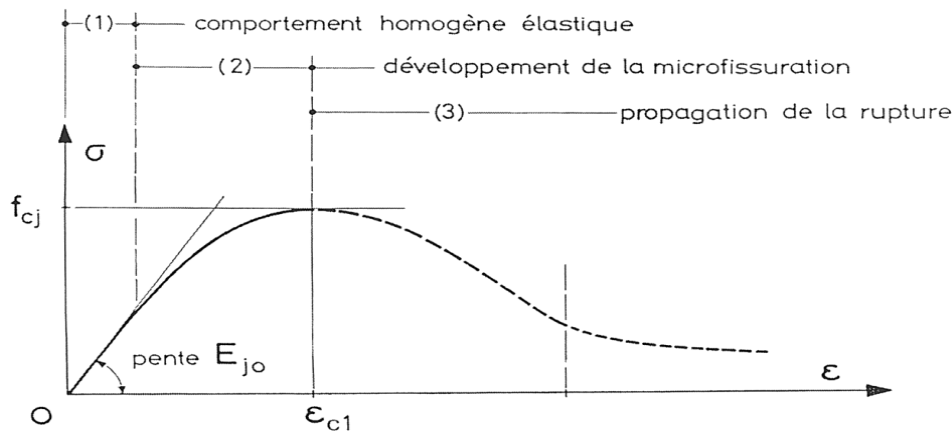


Figure IV.20 : Réponse du modèle à la compression simple.[50]

Pour des charges relativement faibles, le béton reste dans le domaine élastique, c'est-à-dire que les déformations sont les résultats des mouvements quasi réversibles d'atomes.

Pour des sollicitations plus importantes, la rupture a lieu rapidement d'où le caractère fragile de ce matériau. C'est le phénomène de la décohésion pâte-grains qui donne alors lieu à des déformations permanentes et de ruptures. Des glissements apparaissent dans les cristaux des grains, contribuant eux aussi à la déformation permanente qui se produit à volume constant [51].

IV.6.1.2 Comportement en traction

Dans le cas de la traction uni-axiale le comportement général du béton est quasi-fragile, sa représentation est donnée sur la figure III.21 la courbe contrainte-déformation suit une relation linéaire élastique jusqu'à ce que la valeur de la contrainte de rupture soit atteinte. La contrainte de rupture correspond à l'apparition de microfissures dans le béton. Au-delà de cette contrainte, la formation de micro fissures est représentée macroscopiquement avec une réponse de ramollissement de contrainte-déformation, qui induit à la localisation des déformations dans le béton.

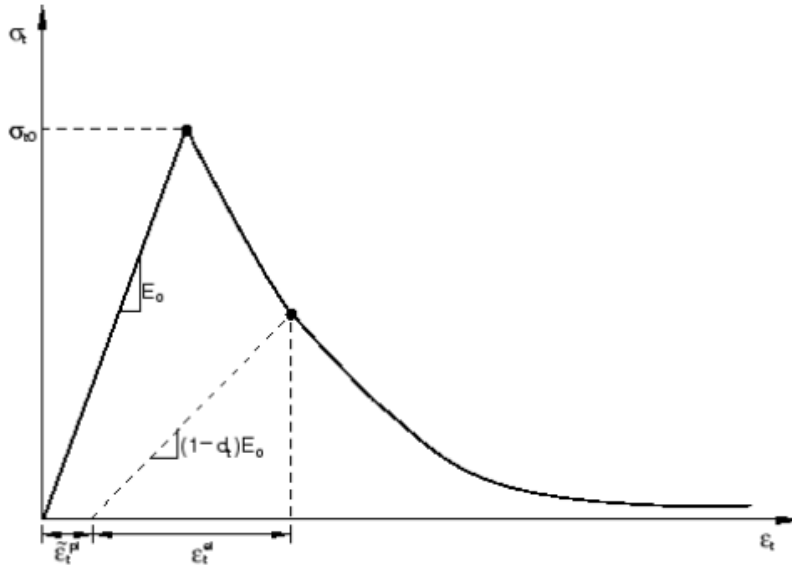


Figure IV.21 : Comportement du béton soumis à une traction uni axiale.[50]

Ces figures montrent que, lorsque l'échantillon du béton est déchargé de tout point de l'adoucissement de la direction générale des courbes contrainte-déformation, la réponse de déchargement est affaiblie. La rigidité élastique du matériau est endommagée ou dégradée. La dégradation de la rigidité élastique est caractérisée par deux variables de dommage d_t et d_c qui sont supposées être des fonctions des déformations plastiques, la température est variables prédéfinis:

$$d_t = d_t(\tilde{\varepsilon}_t^{pl}, \theta, f_i), (0 \leq d_t \leq 1) \quad \text{III.1}$$

$$d_c = d_c(\tilde{\varepsilon}_c^{pl}, \theta, f_i), (0 \leq d_c \leq 1) \quad \text{III.2}$$

Les variables d'endommagement peuvent prendre des valeurs de 0 ce qui représente un matériau sain (rigidité initiale) et 1 ce qui représente l'endommagement totale du matériau (une perte totale de rigidité). Pour décrire le caractère irréversible des déformations ε^p , la théorie de la plasticité est utilisée. La partition de la déformation totale est effectuée en une partie élastique et une partie plastique.

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^{el} + \dot{\varepsilon}^{pl} \quad \text{III.3}$$

La relation contrainte-déformation est définie par :

$$\sigma = (1-d) D_0^{pl} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) D^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl})$$

Avec :

D_0^{pl} : Rigidité élastique initiale non endommagée du matériau.

D^{el} : Rigidité élastique endommagée.

d : Variable d'endommagement scalaire (ou de dégradation d'énergie).

σ : Tenseur de contrainte effective. L'utilisation du principe de la contrainte effective conduit à une relation liant la contrainte réelle à la contrainte effective, avec E_c et σ_c : Module de Young instantané et la contrainte maximale en compression.

IV.6..1.3 Comportement cyclique uni-axial

Dans des conditions de chargement cyclique uni-axial, les mécanismes de dégradation sont assez complexes, impliquant l'ouverture et la fermeture de micro-fissures formées précédemment, ainsi que leur interaction. Expérimentalement, on constate une certaine récupération de la rigidité élastique lorsque la charge change de signe lors d'un test cyclique uni-axial. L'effet de récupération de la rigidité, également appelé «effet unilatéral», est un aspect important du comportement du béton sous chargement cyclique. L'effet est généralement plus prononcé lorsque la charge passe de la tension à la compression, ce qui provoque la fermeture des fissures de traction, ce qui permet de récupérer la rigidité en compression.

Le module élastique sera alors donné par :

$$E = (1 - d) E_0$$

Avec :

E_0 est le module initial (non endommagé) du matériau.

$$(1-d) = (1-S_t d_c) (1-S_c d_t)$$

Où S_t et S_c sont des fonctions de l'état de contrainte qui sont introduites pour modéliser les effets de récupération de la rigidité associés aux inversions de contrainte. Ils sont définis selon

$$S_t = 1 - w_t r * (\sigma_{11}) \quad ; \quad 0 \leq w_t \leq 1$$

$$S_c = 1 - w_c (1 - r * (\sigma_{11})) \quad ; \quad 0 \leq w_c \leq 1$$

Où :

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

w_t et w_c , sont des facteurs pondéraux décrivant les propriétés relatives au recouvrement de rigidité du matériau. Ils prennent leurs valeurs dans l'intervalle [0,1], de manière à ce que lorsque le chargement passe de la traction vers la compression $w_t = 0$: le matériau recouvre la rigidité en compression lors de la fermeture des fissures. Ce qui n'est pas le cas lorsque le chargement passe de la compression à la traction, une fois

que l'éclatement de microfissures se produit, auquel cas $w_c = 1$ comme indiqué sur la figure IV.22.

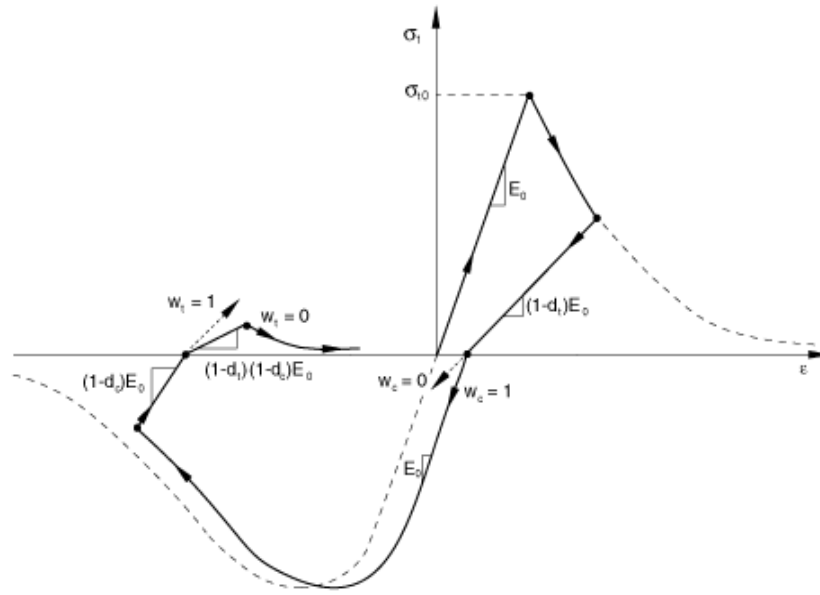


Figure IV.22 : Cycle uni-axial de chargement (traction-compression-traction).

Tableau IV.1 : Les différentes lois utilisées pour le modèle adopté pour le béton.

Noms	Equations
Contraintes effectives en Traction	$\bar{\sigma}_t = \frac{\sigma_t}{(1-d_t)} = E_0(\epsilon_t - \epsilon_t^{pl})$
Contraintes effectives en compression	$\bar{\sigma}_c = \frac{\sigma_c}{(1-d_c)} = E_0(\epsilon_c - \epsilon_c^{pl})$
Contrainte post élastique : Partie écrouis en compression	$\sigma_{c(2)} = \frac{E_c \frac{\epsilon_c}{f_c} - (\epsilon_c / \epsilon_{c1})^2}{1 + (E_c \frac{\epsilon_{c1}}{f_c} - 2) \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}}} f_c$
Contrainte post élastique : Partie adoucissante en compression	$\sigma_{c(3)} = \left(\frac{2 + \gamma_c f_c \epsilon_{c1}}{2 f_c} - \gamma_c \epsilon_c + \frac{\gamma_c \epsilon_c^2}{2 \epsilon_{c1}} \right)^{-1}$
Contrainte post élastique en traction	$\frac{\sigma_t(w)}{f_t} = \left[1 + (c_1 w / w_c)^3 \right] e^{-c_2 \frac{w}{w_c}} - \frac{w}{w_c} (1 + c_1^3) e^{-c_2}$
Dommages en compression	$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E_c^{-1}}{\epsilon_c^{pl} (1/b_c - 1) + \sigma_c E_c^{-1}}$
Dommages en traction	$d_t = 1 - \frac{\sigma_t E_c^{-1}}{\epsilon_t^{pl} (1/b_t - 1) + \sigma_t E_c^{-1}}$

IV.6.2 Un modèle élastique-Orthotrope pour les composites :

Les matériaux composites ont un comportement particulier, ceci est dû essentiellement à deux facteurs : le premier résulte de son comportement anisotrope dans les couches élémentaires et le deuxième facteur dérive de la stratification qui consiste en l'empilement de plusieurs couches.

Généralement, les tissus sont constitués de fils unidirectionnels croisés à 90°, les uns dans le sens chaîne, les autres dans le sens trame. Ces couches possèdent trois plans de symétrie orthogonaux deux à deux, et se comportent d'un point de vue élastique comme un matériau orthotrope.

Les directions selon la chaîne et la trame forment les directions principales (1 et 2) du matériau.

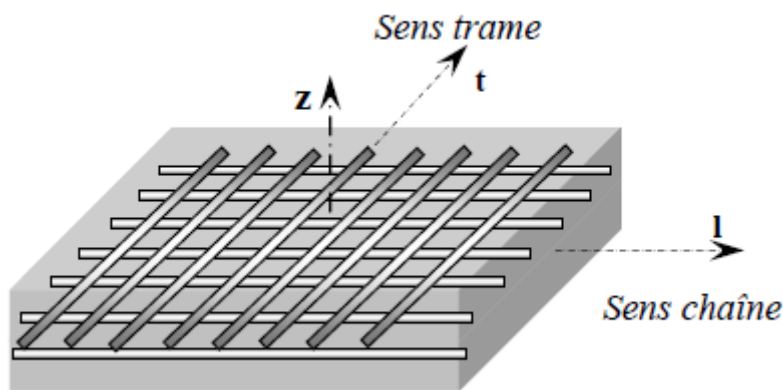


Figure IV.23:Pli d'un matériau composite orthotrope. [52]

IV.6.3 Critère de rupture des composites :

Les critères de rupture interactifs permettent d'avoir une évaluation de la résistance mécanique des composites. La ruine des matériaux composites n'est pas initiée par un unique mécanisme d'endommagement élémentaire, mais elle est la conséquence de l'accumulation de plusieurs modes de dégradation [53].

Dans notre étude, le critère interactif de *Hill-Tsai* [54] est utilisé, puisque les critères de la contrainte maximale et de la déformation maximale ne prennent pas en compte les interactions entre les contraintes principales et les déformations principales et supposent que les mécanismes élémentaires de la rupture sont des phénomènes indépendants.

Ce critère est surtout utilisé pour les composites à fibres continues unidirectionnelles. Il suppose que le point qui correspond à $\sigma_{11} = \sigma_{22} = Y$, $\sigma_{12} = 0$ est sur la surface de rupture. Il y a donc ruine du matériau lorsque les contraintes normales σ_{11} et σ_{22} atteignent la tension ultime transversale. L'état limite de contraintes n'est pas atteint tant que l'inégalité est vérifiée.

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

IV.6.4 Paramètres des modèles :

Tableau IV.2 : Paramètres utilisés pour définir le comportement du béton.

Paramètres		Dénomination
Notations	Valeur	
$f_c(\text{MPa})$	33.68	Contrainte en compression
$f_{c0} = 0.6f_c(\text{MPa})$	20.208	Contrainte élastique en compression
$f_{t0} = 0.6 + 0.06f_c(\text{MPa})$	2.6208	Contrainte maximale en traction
$E = 11000(f_c)^{1/3}(\text{MPa})$	36387	Module de Young instantané
ν	0.267	Coefficient de poisson
Ψ	32°	Angle de dilatation sous compression axiale.
$a_f = \sigma_{b0} / \sigma_{c0}$	1.16	Rapport entre contrainte bi-axiale/uniaxiale
a_e	0.1	Paramètre du potentiel d'écoulement

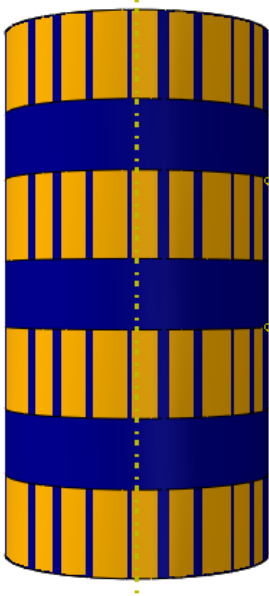
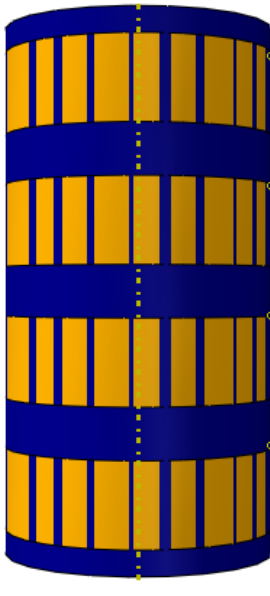
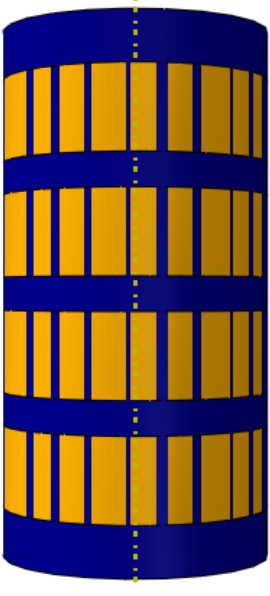
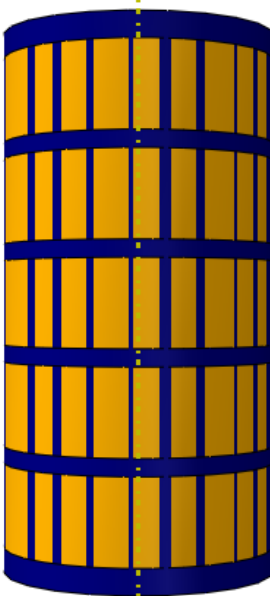
Tableau IV.3 : Paramètres du modèle numérique des composites PP

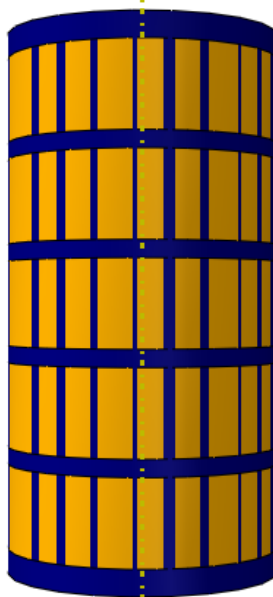
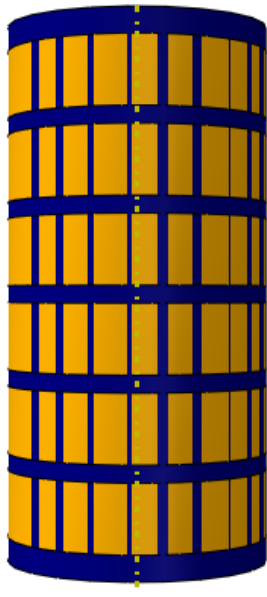
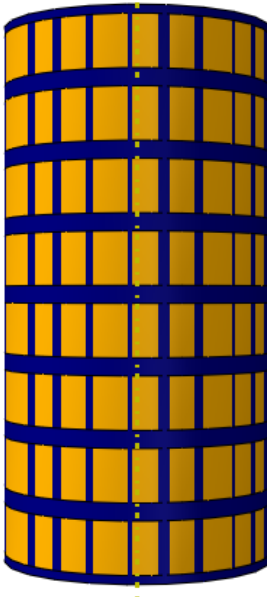
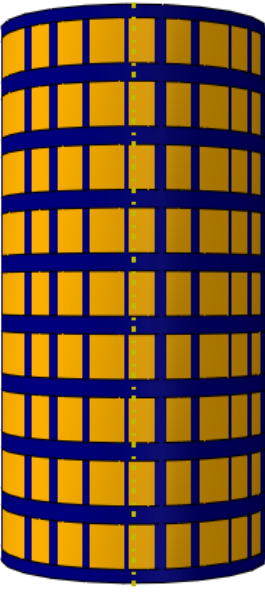
Paramètres	Valeur	Dénomination
$E_1(\text{MPa})$	80000	Module de Young longitudinal
$E_2(\text{MPa})$	15000	Module de Young transversal
ν_{12}	0.295	Coefficient de poisson : plan longitudinal/transversal
$G_{12}(\text{MPa})$	400	Module de cisaillement sur le plan transversal

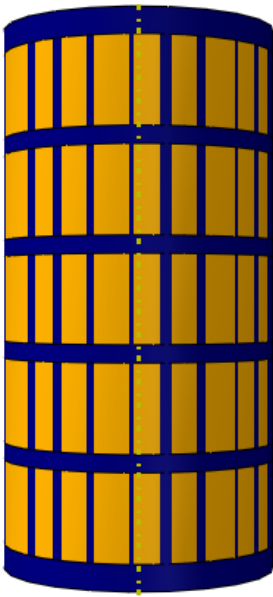
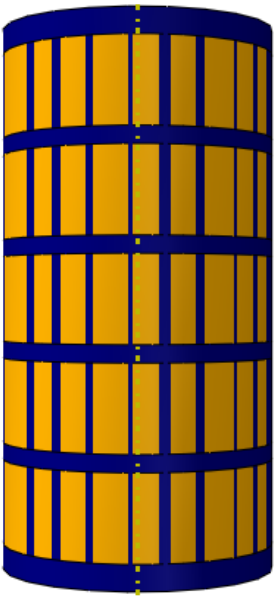
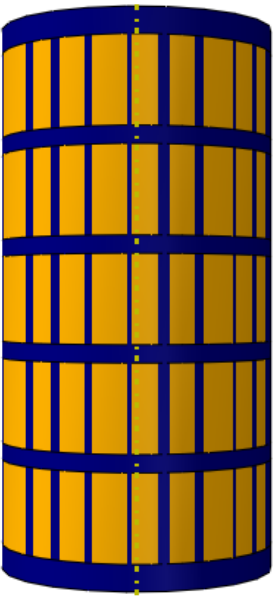
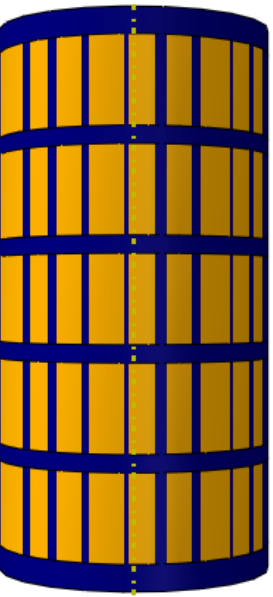
IV.7 Les variantes pour le confinement circulaires :

- Largeur des cerces ;
- Espacement entre les cerces ;
- Épaisseur des cerces.

Tableau IV.4: Configuration pour les variations des cerces.

Variation de l'espacement entre les cerces (largeur=50mm, épaisseur=1mm)			
ES=40mm	ES=30mm	ES=20mm	ES=10mm
			

Variation de la largeur des cerces (espacement=10mm, épaisseur=1mm)			
L=50mm	L=40mm	L=30mm	L=25mm
			

Variation de l'épaisseur des cerces (largeur=30mm, espacement=10mm)			
Ep=1mm	Ep=2mm	Ep=3mm	Ep=4mm
			

IV.8 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté la procédure numérique, qui nous a permis de simuler le comportement non linéaire des cylindres en béton confinés partiellement et totalement avec un tissu composite sous chargement axial de compression. Les actions principales permettent de créer la géométrie et les conditions aux limites du modèle ainsi que le fonctionnement du code de calcul Abaqus sont soigneusement résumés. Les matériaux constitutifs sont modélisés à travers des modèles numériques intégrés dans code ABAQUS à savoir : Un modèle élasto-plastique pour le béton et un modèle élastique orthotrope pour les composites.

Références bibliographiques

[49] Association française de normalisation, « Essai pour béton durci », Norme européenne norme française NF, Partie 1 confection et conservation des éprouvettes ISSN 0335-3931, Octobre 2001.

[50] REYNOUARD Jean Marie, PIJAUDIER-Cabot Gilles, « Comportement mécanique du béton. Hermès Sciences, pp.1, 2005.

[51] ADAM et NEVILLE.M « Propriétés des bétons » Éditions Eyrolles, Paris, 2000.

[52] SI SALEM Abdelmadjid, « Développement d'une poutre en béton-composite: analyse expérimentale et modélisation » Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2016.

[53] BERTHELOT J.M. « Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures » Edition. Lavoisier, 2005.

[54] TSAI. W. HA S.S., Miyano Y., Tay T.E., « Strength & Life of Composites », edition Aero & Astro, Stanford, USA, 2009.

Chapitre V: Résultats et discussion

V.1 Introduction :

A travers ce chapitre nous allons présenter et interpréter les résultats obtenus à l'issue des simulations numériques menée sur le comportement mécanique des cylindres confinés par collage partiel (en cerces, en hélices) et total des bandes composites sur les faces externes. Les résultats des différentes simulations en termes d'évolution des contraintes, des déformations et d'évolution des variables d'endommagement des différents cylindres sont présentés et discutés, sous forme de graphiques contrainte-déformation, de cartographies et d'histogrammes.

V.2 Résultats de l'analyse numérique:

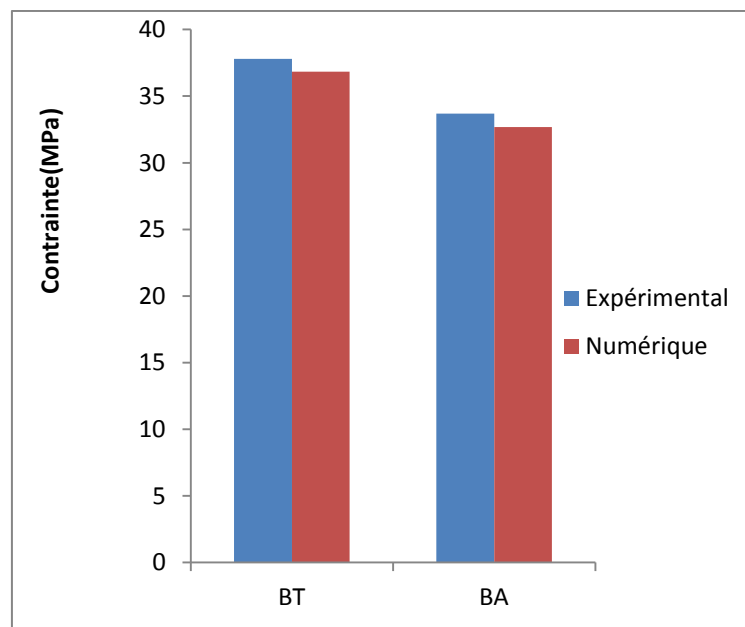
V.2.1 Confrontation des contraintes en compression :

Le modèle élément fini, pour le béton témoin et béton avec ajouts, proposé est validé à travers des confrontations avec les résultats expérimentaux, elles ont pour objectif de valider les apports observés dans les simulations, notamment dans l'analyse des phénomènes observés tels que les paramètres mécaniques intrinsèques (contraintes).

La figure suivante montre un histogramme des résistances maximales du béton témoin (sans ajouts) et du béton avec ajouts de verre obtenue par la simulation numérique et l'analyse expérimentale.

BT : Béton Témoin

BA : Béton Ajout



FigureV.1: histogramme de confrontation des résultats expérimentaux, numériques.

Une bonne concordance, en termes de contrainte est observée entre les résultats expérimentaux et les résultats de la simulation numérique à base d'éléments finis. En effet, l'erreur enregistrée pour le béton témoin (de référence) est de l'ordre de 2.55% et pour le béton avec ajout est de 2.99 % ce qui est fort satisfaisant.

V.2.2 Comportement global des cylindres en compression:

Une confrontation des courbes contraintes-déformations des différents spécimens d'étude est illustrée sur la figure V.2. Cette confrontation met en évidence les caractéristiques mécaniques des cylindres témoins et des cylindres avec ajouts de déchets de verre en termes de capacité portante et de ductilité.

La figure suivante présente les courbes contrainte-déformation du béton témoin et le béton avec ajout (15% poudre de verre substitution du ciment et 10% sable de verres substitution du sable) obtenus par la simulation numérique

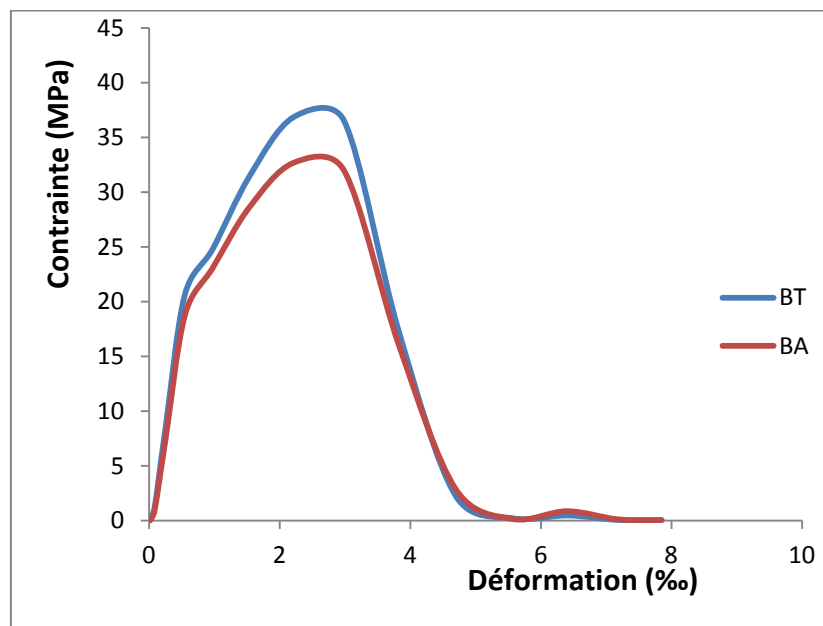


Figure V.2 : contrainte-déformation béton témoin et béton ajout

Les Figures V.1 et V.2 montrent qu'en ajoutant les déchets de verre au béton la résistance à la compression diminue légèrement (constat déjà établi par d'autres recherches). A cet effet on propose de reprendre cette chute de résistance par le confinement de ce béton par un tissu issu lui aussi de l'industrie de récupération des déchets.

V.3 Influence du confinement :

Dans cette partie, on a étudié le confinement du béton avec déchets de verre en prenant en compte plusieurs variantes telles que: le type de confinement, les dimensions du tissu ainsi que sa disposition sur la matrice béton. Trois variantes de confinement sont traitées telles que le confinement total, confinement partiel par des cerces et un confinement partiel en hélices. Les cartographies des contraintes, des déformations, des dommages ainsi que les courbes contraintes- déformations obtenus lors de la

simulation numérique, pour les cylindres de béton non confiné et les cylindres de béton confiné avec les trois types de confinement, sont présentées au fur et à mesure. On a adopté la notation suivante pour les différentes variantes de confinement:

BNC: Béton non confiné

BPCC: Béton partiellement confiné « Cerces »

BPCH: Béton partiellement confiné « Hélice »

BTC: Béton totalement confiné

V.3.1 Évaluation des contraintes :

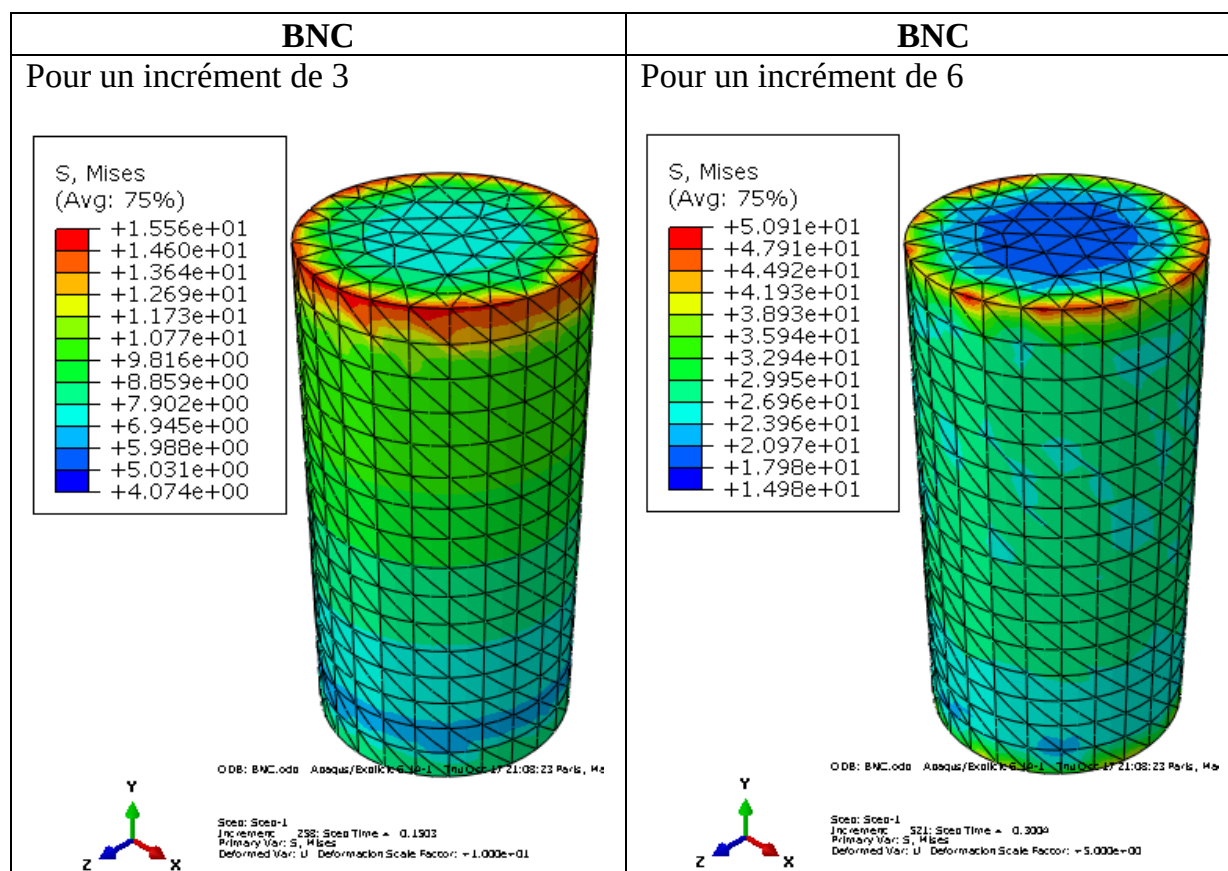


Figure V.3 : Évolution des contraintes dans BNC

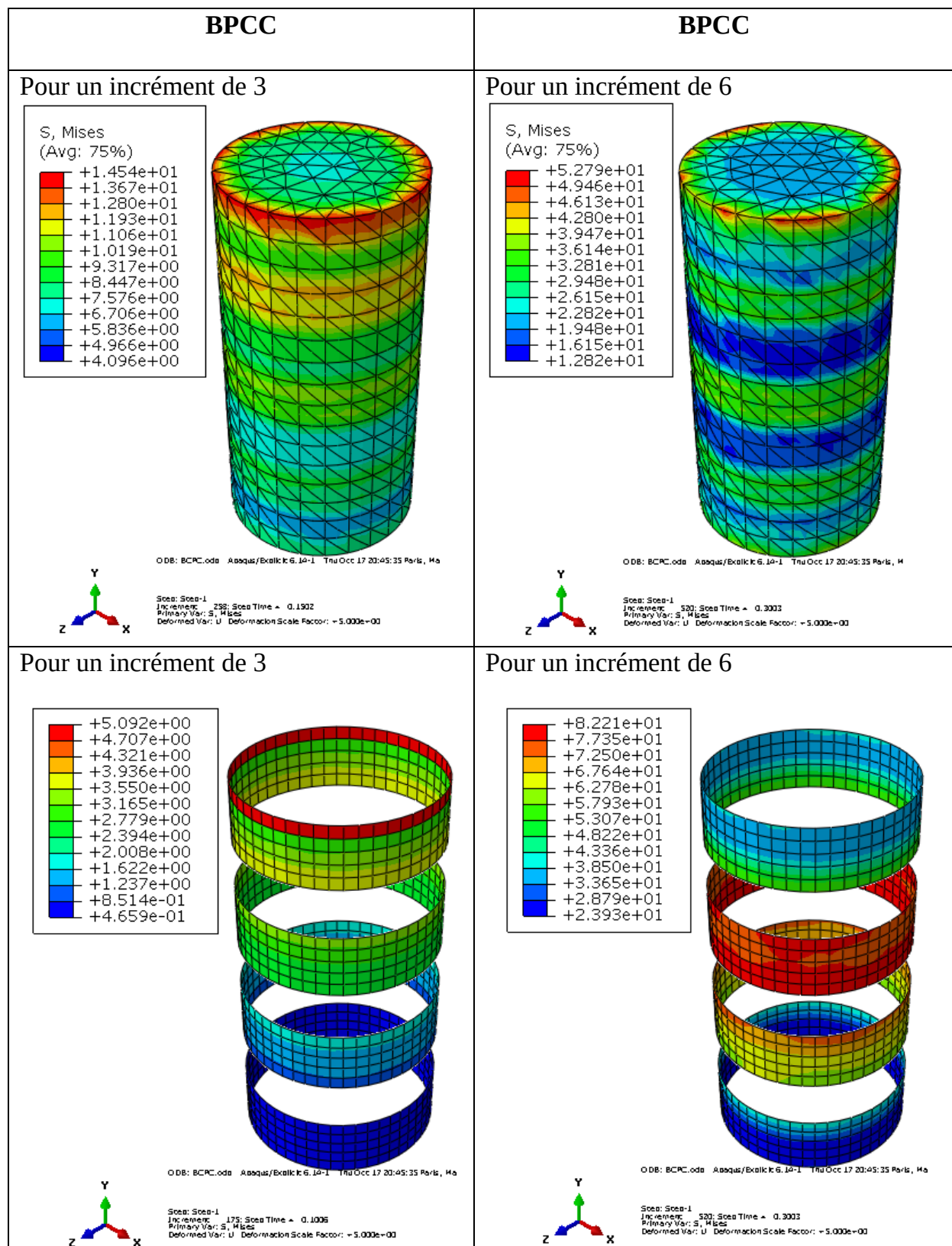


Figure V.4 : Évolution des contraintes dans le BPCC et le composite.

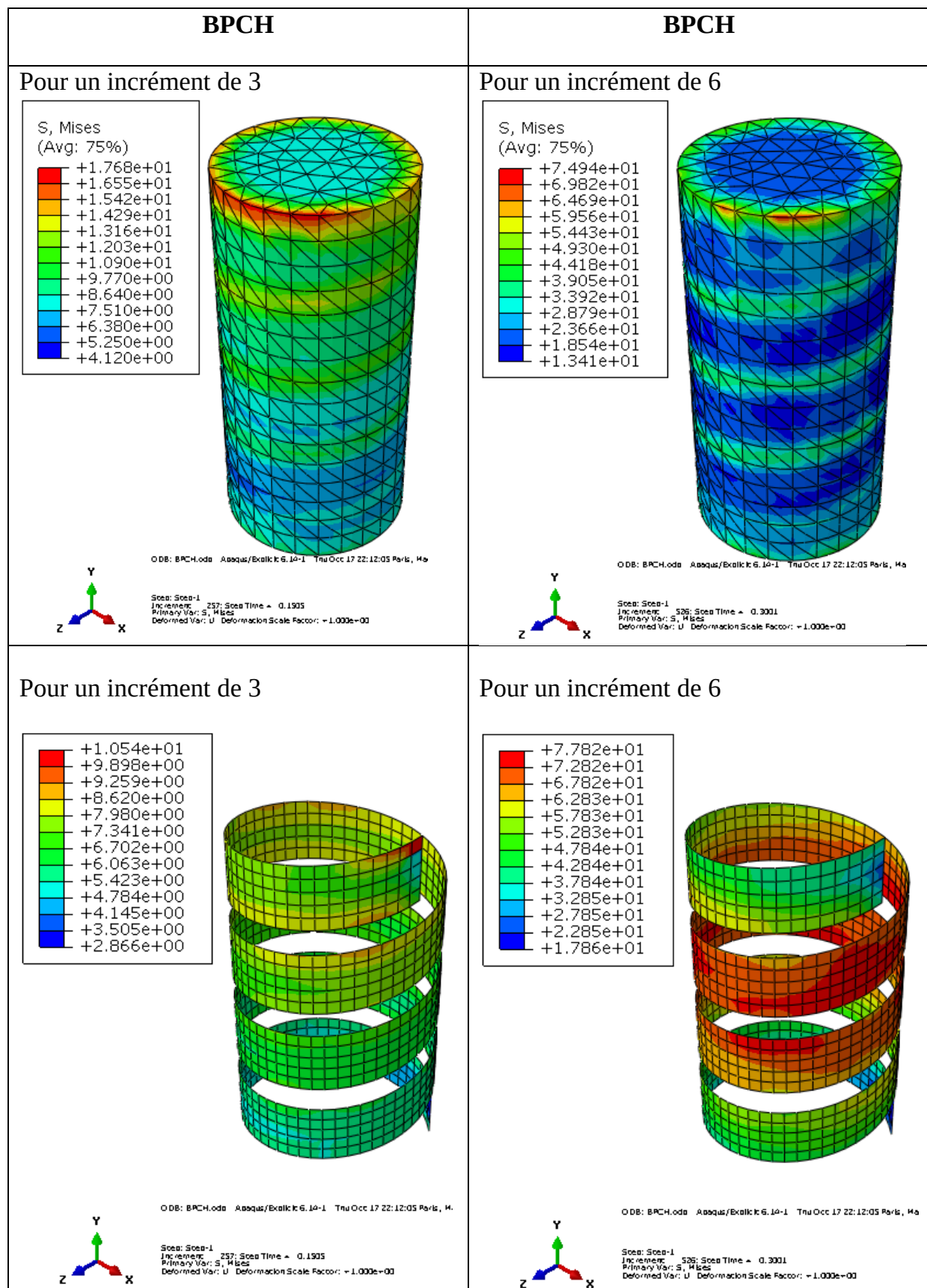


Figure V.5 : Évolution des contraintes dans le BPCH et le composite.

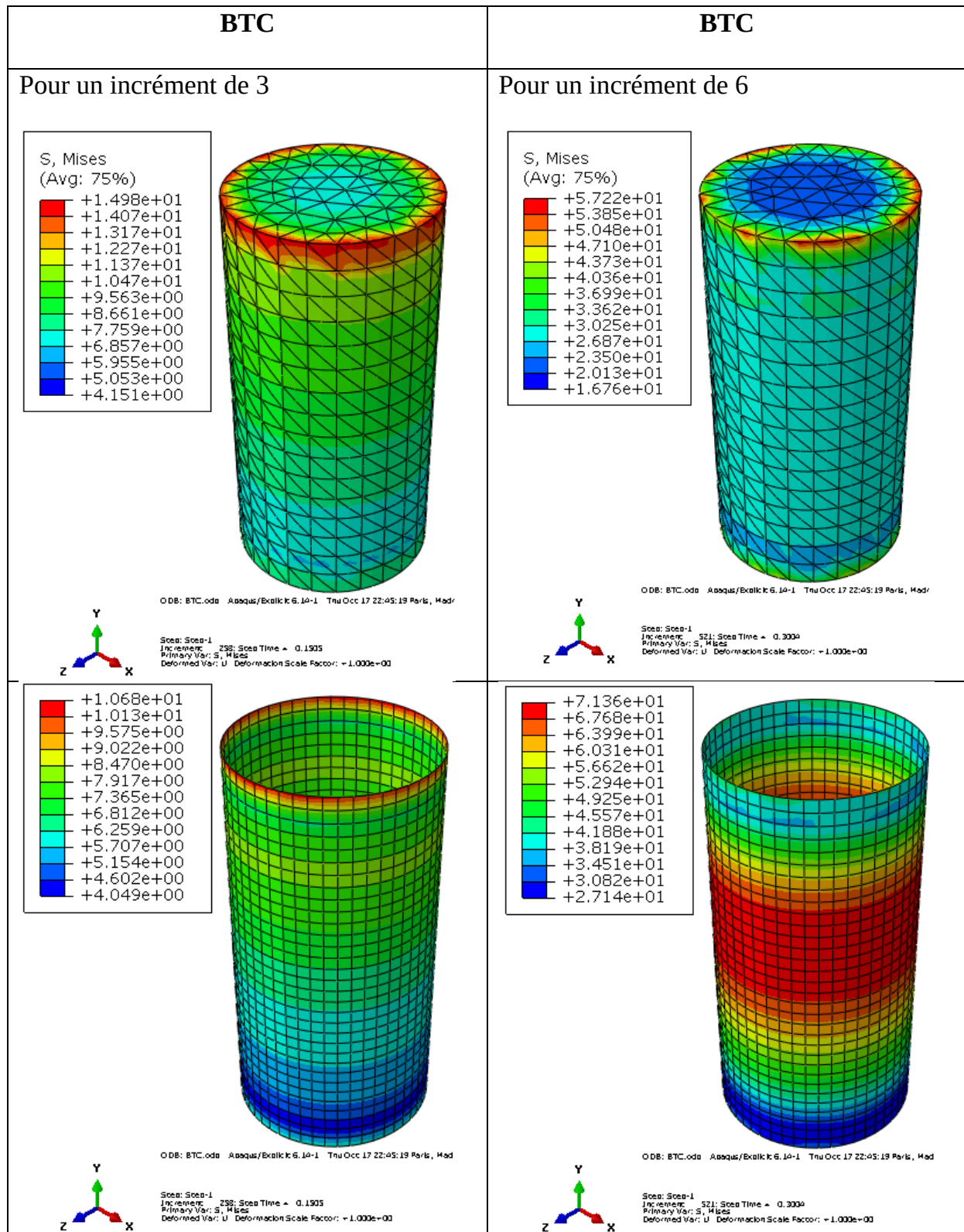
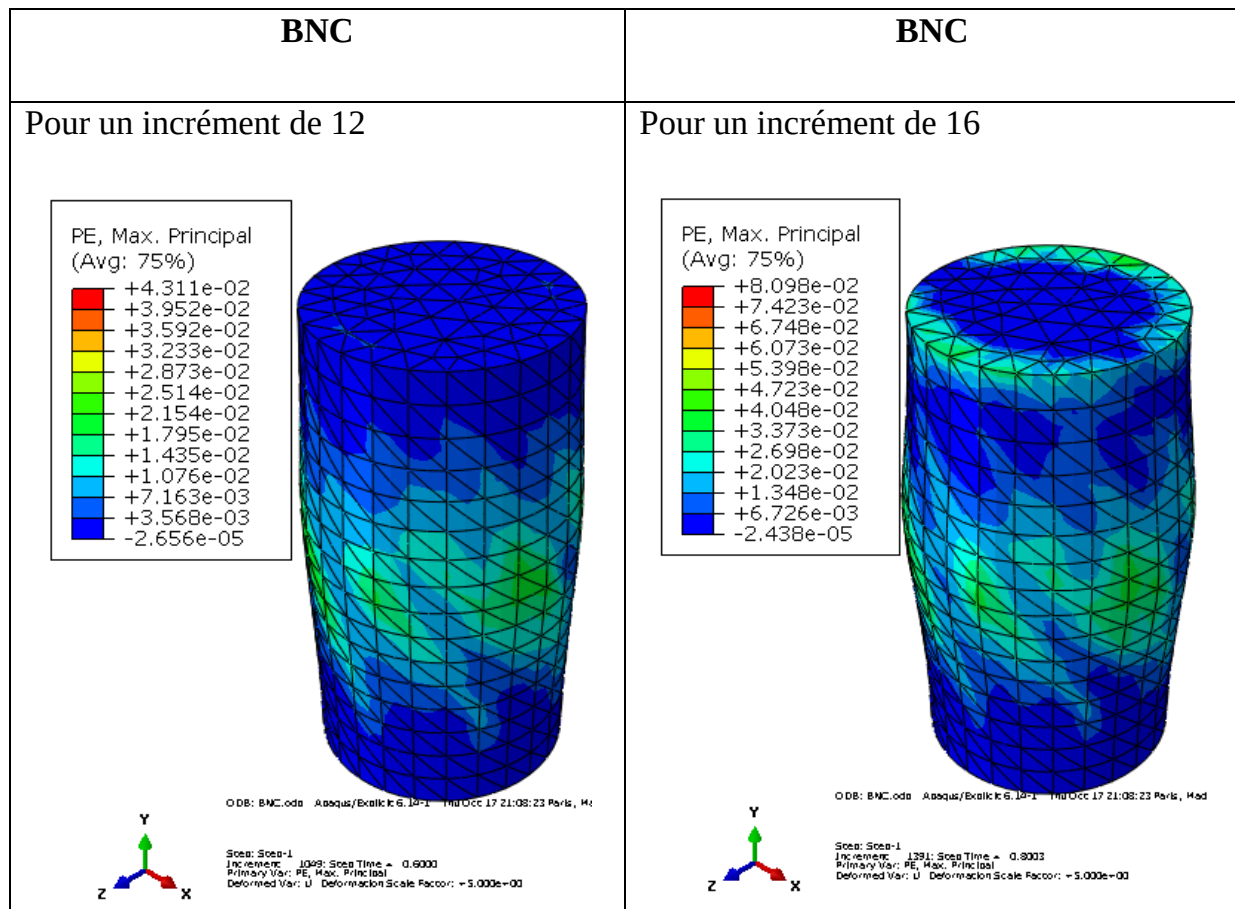


Figure V.6 : Évolution des contraintes dans le BTC et le composite.

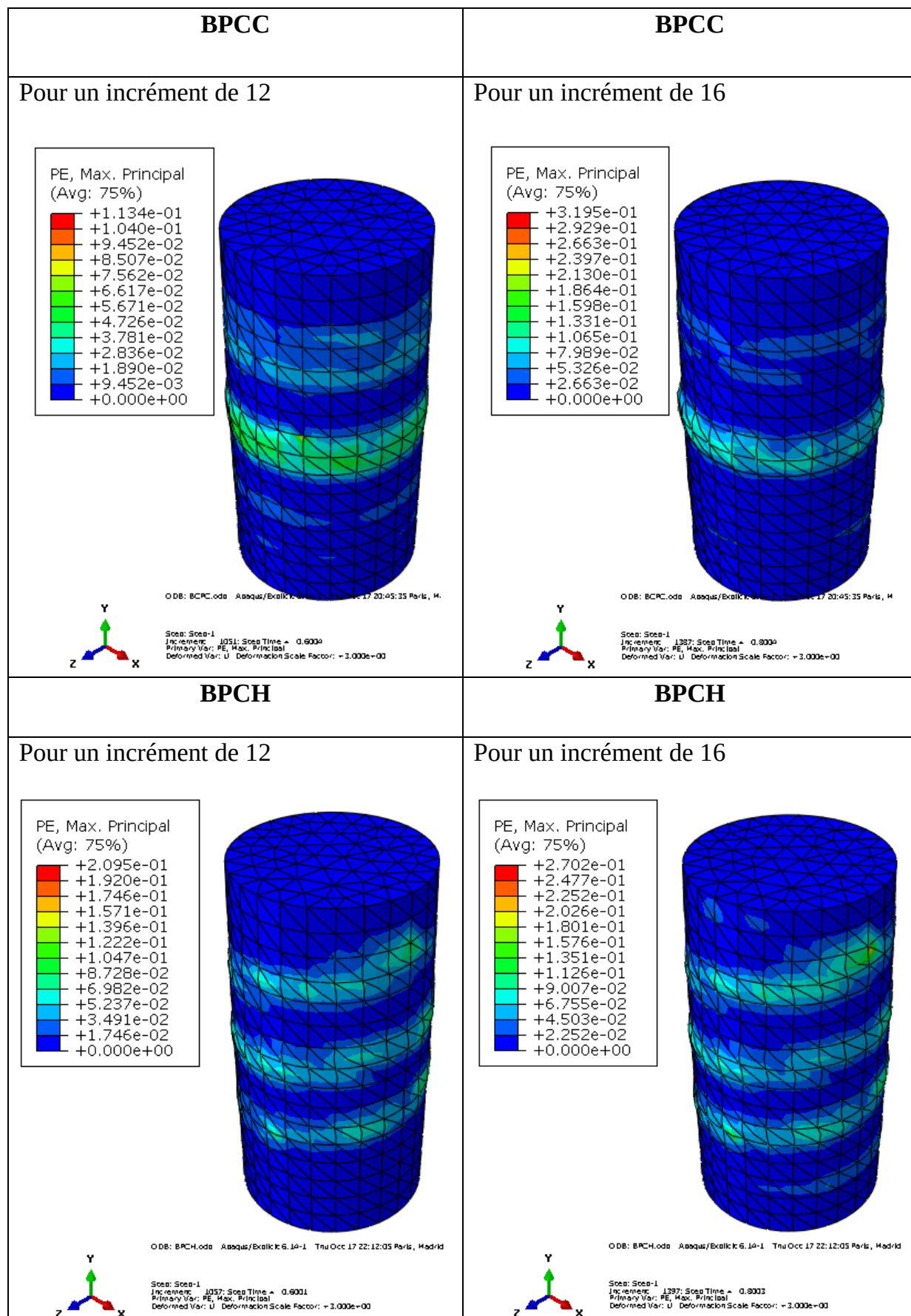
Les figures précédentes illustrent l'évolution de la distribution des contraintes dans les cylindres partiellement et totalement confinés et les cylindres non confiné ainsi que le composite. On observe que l'évolution du champs de contrainte dans le cylindre non confiné est rapide, l'élément atteint la phase de densification des fissures après un

temps de chargement très court, l'élément analysé soumis à un effort axial connaît des concentrations du champs de contraintes dans la région centrale engendrant l'ouverture des fissures, qui provoquera par la suite la rupture de l'élément. Ces contraintes sont limitées par la présence du confinement, dans le cas du confinement partiel, elles se concentrent dans les régions non confinées. Les contraintes élevées dans le composite engendre une pression supplémentaire sur le cylindre ce qui augmente les contraintes du béton confinés.

V. 3.2 Evolution des déformations



FigureV.7 : Évolution des déformations dans BNC.



FigureV.8 : Évolution des déformations dans BPC.

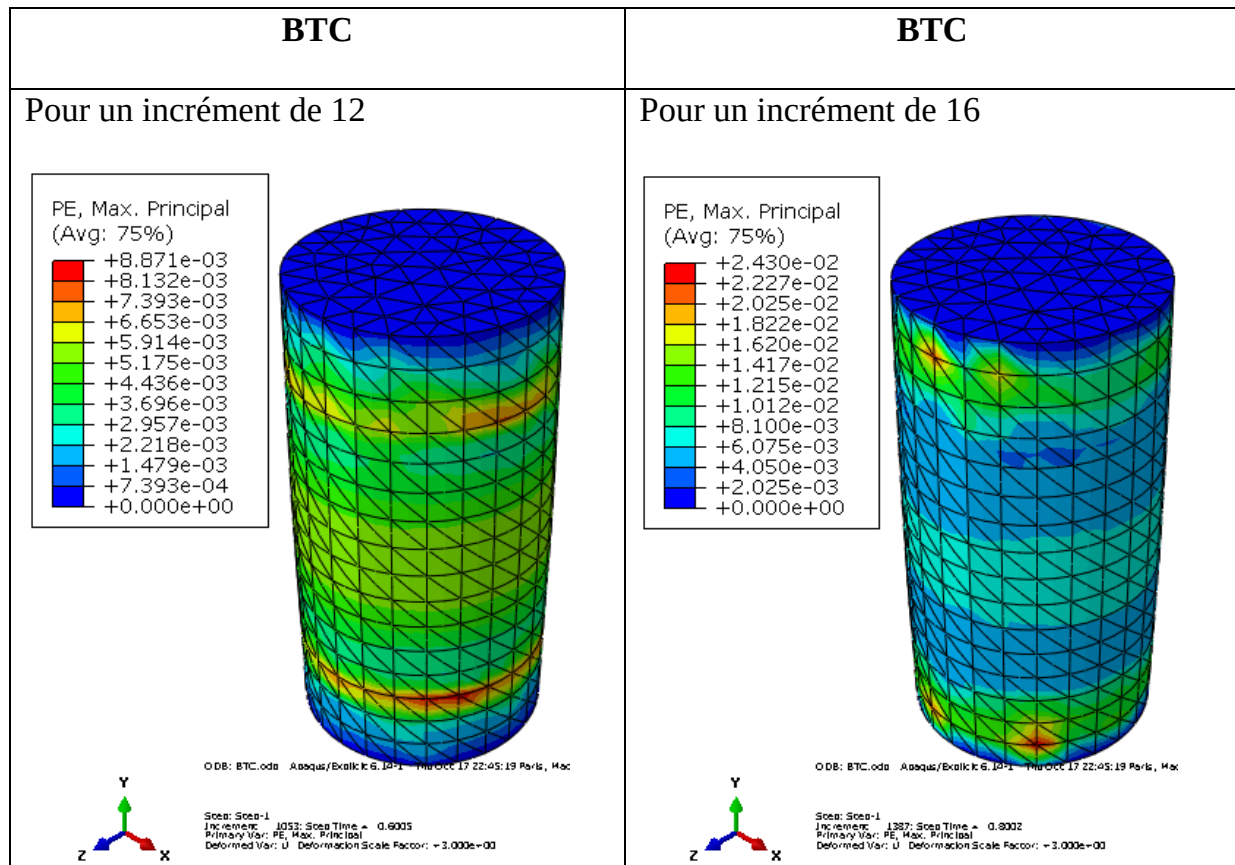


Figure V.9 : Évolution des déformations dans BTC.

La figure ci-dessus illustre l'évolution des déformations dans les cylindres non confinés et confinés, dans le cas du béton non confiné, les déformations se propagent progressivement sur toute la hauteur du cylindre et on remarque un gonflement latéral sur sa partie centrale, par contre dans le cas du béton confiné, le gonflement est empêché, grâce à la mobilisation de la pression latérale de confinement exercée par le tissu. Dans le béton confiné partiellement avec des cerces une concentration des déformations entre deux cerces dans la zone centrale est observée et des zones de resserrement le long de la trajectoire de l'hélice apparaissent. Béton confiné totalement, les bandes enroulées sur toute la hauteur du cylindre bloquent l'expansion (la dilatation) latérale du béton et réduit ainsi les déformations cela s'explique par la compaction du béton qui ferme les réseaux capillaires.

V.3.3 Evolution des dommages :

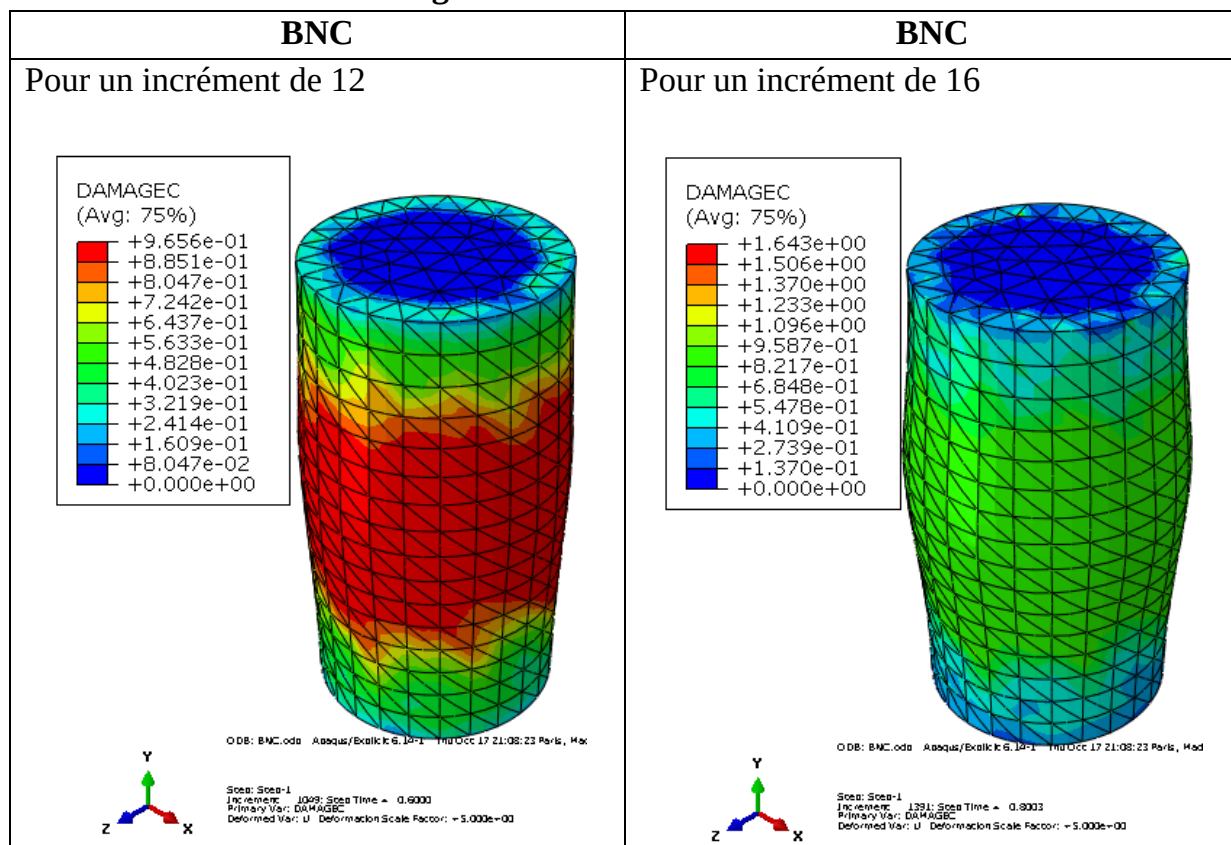


Figure V.10 : Évolution des dommages dans le BNC.

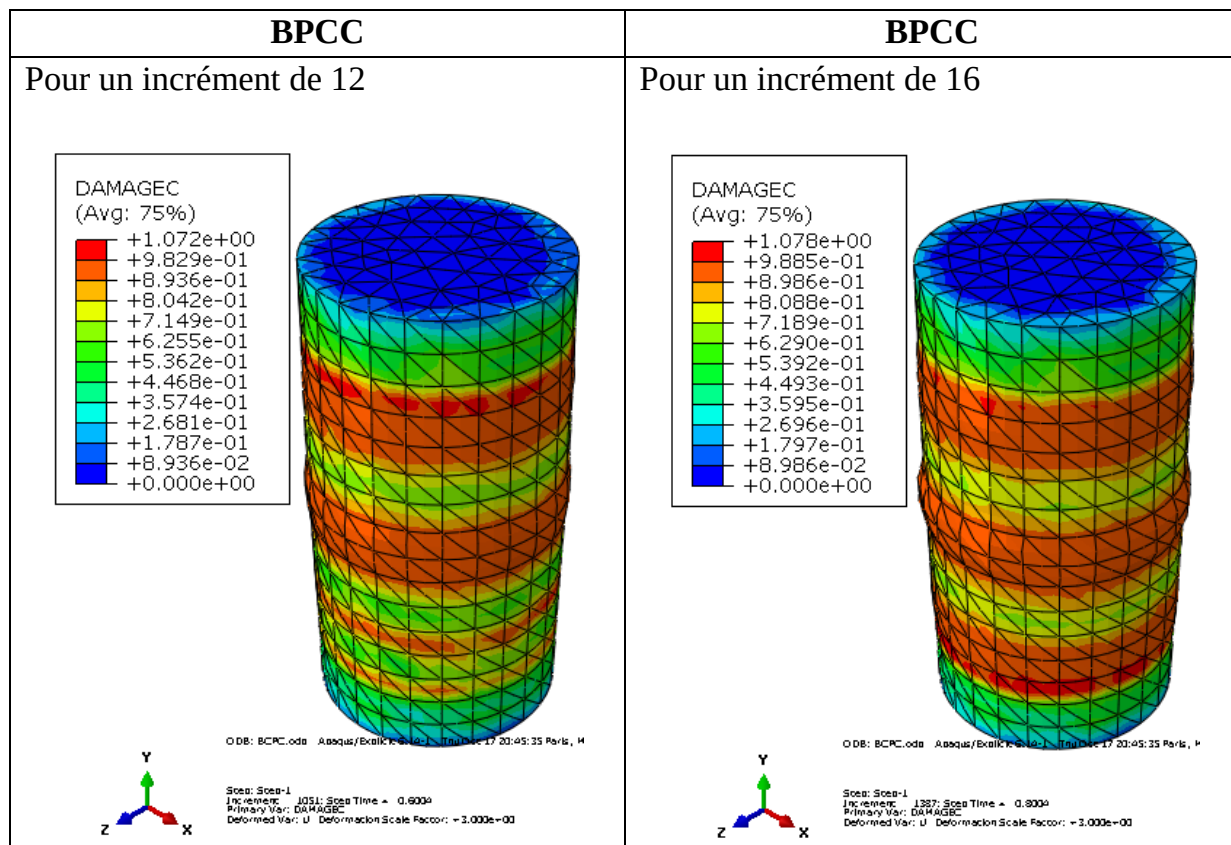


Figure V.11 : Évolution des dommages dans le BPCC

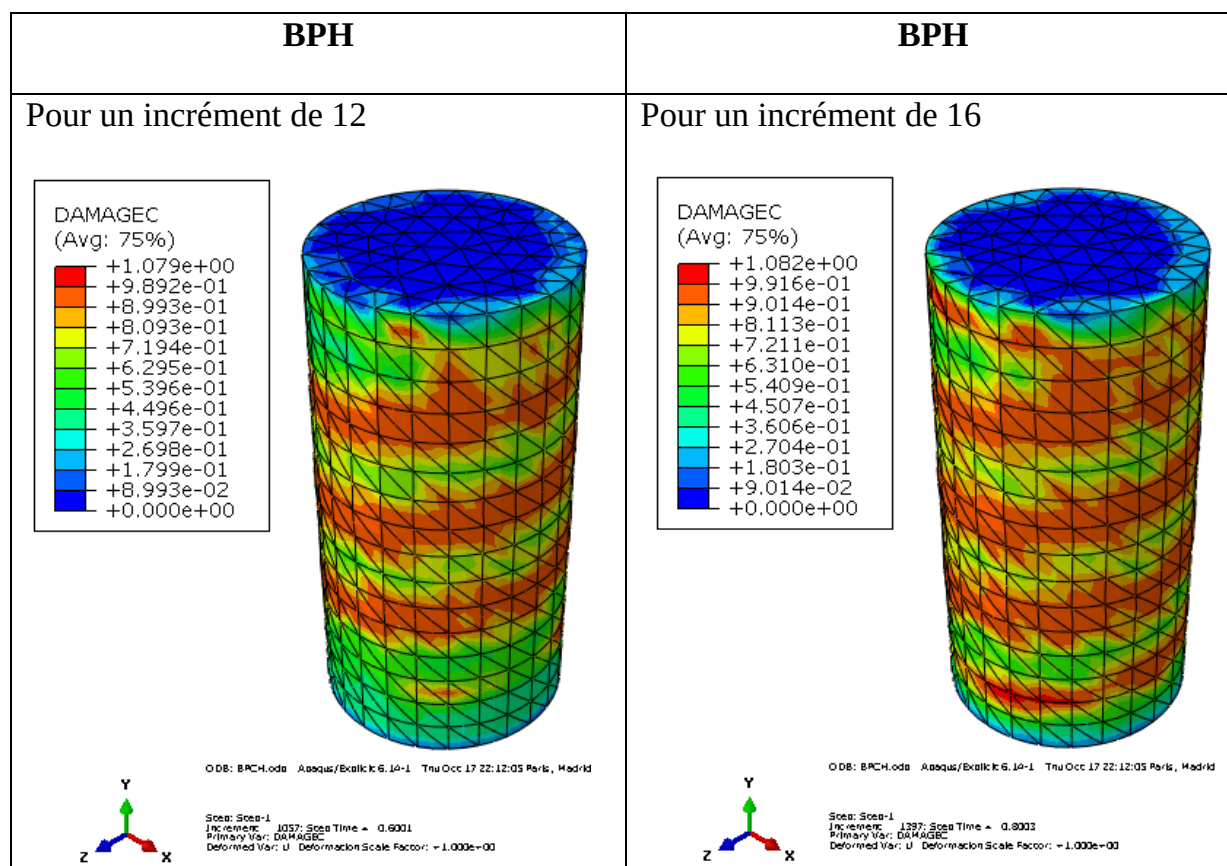


Figure V.12 : Évolution des dommages dans le BPH

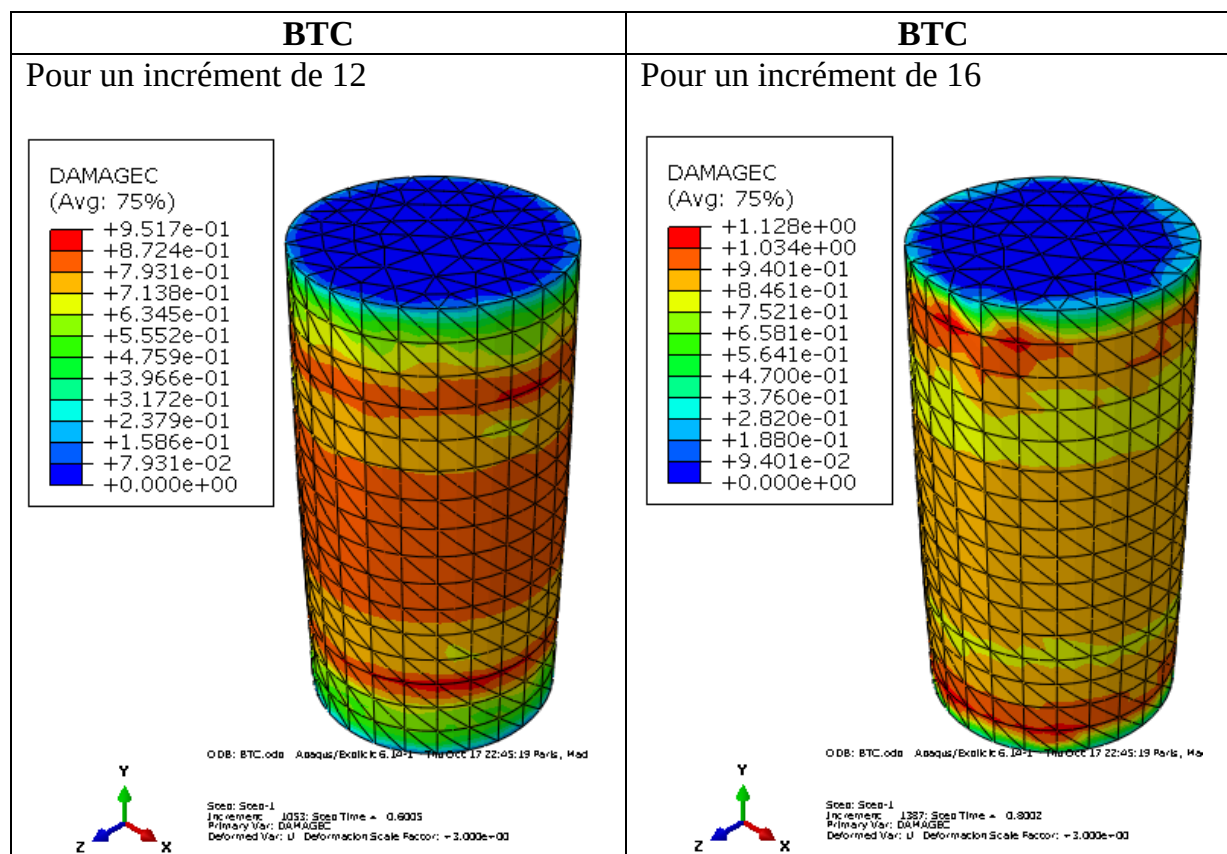


Figure V.13 : Évolution des dommages dans le BTC.

Les figures illustrent l'état d'endommagement des cylindres non confinés et confinés. Sous le même taux de chargement, le cylindre non confiné connaît un endommagement plus important comparativement aux cylindres confinés. En plus dans le cas du confinement total les dommages sont moins importants que ceux constatés dans le cas du confinement partiel ceci peut être s'expliquer d'une part, par l'augmentation de la résistance du béton confiné et par le fait que les débris du béton qui restent emprisonnés à l'intérieur du confinement total, créant ainsi une butée supplémentaire contre les pressions latérales.

V.4 Confrontation des courbes :

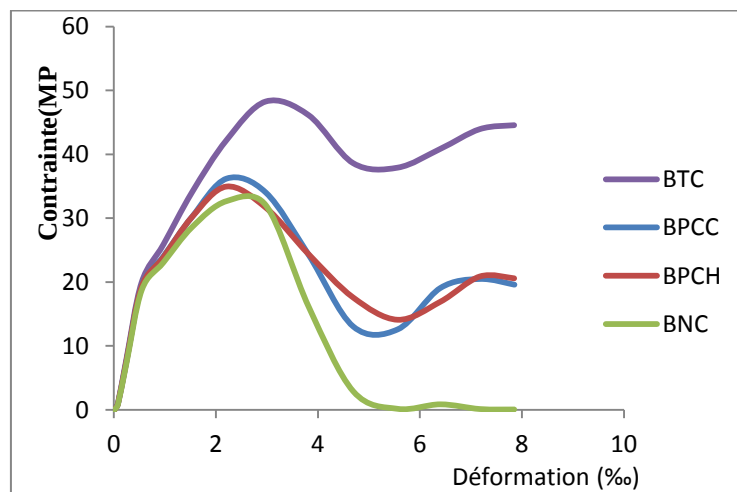


Figure V.14: Confrontations des courbes (σ - ϵ) : type de confinement.

La confrontation des courbes contraintes – déformations obtenues par la simulation numérique pour les cylindres non confinés et confinés, montre:

- Une phase de comportement identique à celui d'un matériau homogène et élastique, celle-ci se traduit par une relation linéaire entre la contrainte σ et la déformation ϵ . Les quatre courbes sont confondues dans cette zone. A la fin de la première zone il se produit un point de transition qui indique que la fissure du béton a eu lieu. À ce stade, les bandes de composites commencent à développer un effet de confinement.
- Le béton non confiné atteint une contrainte maximale de 32.66MPa, correspondante à une déformation de 2.2‰, au-delà de cette valeur on remarque une dégradation de la contrainte jusqu'à la rupture par contre les contraintes des cylindres confinés continuent à augmenter au-delà de la valeur maximale du béton non confiné.
- Dans le cas du confinement totale le béton développe une résistance de 48.27MPa en la comparant à la résistance du béton non confiné on aura un

apport en terme de résistance de 47.8%. Par contre le modèle confiné partiellement avec des cerces atteint une résistance de 36.20MPa avec un apport de 10.84%. D'autre part le béton confiné partiellement avec une hélice atteint une résistance de 34.95MPa et un apport de 7.01%.

- Quant- à la troisième phase celle-ci se traduit par une courbe décroissante avec une courbure plus étendue pour le béton confiné, le tissu dans ce cas réagit, de plus en plus pour pouvoir s'opposer efficacement à l'ouverture des fissures et à leur propagation dans le béton, en reprenant le maximum d'effort possible. Cette phase se termine par la « ruine » des spécimens, cette ruine est prématurée dans le cas du béton non confiné comparée au béton confiné.
- En termes de ductilité les trois types de confinement ont présentés une amélioration comparativement au béton non confiné et on remarque que cette amélioration était mieux dans le cas du confinement total. Un effet de ductilité plus important ce qui représente un apport fort significatif et représentatif.

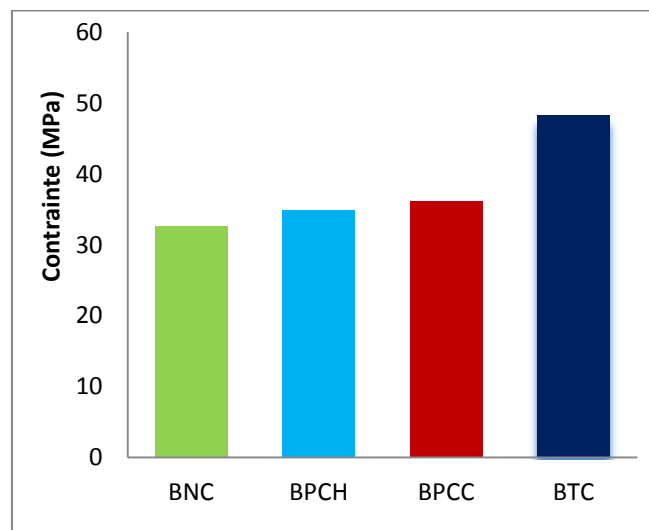


Figure V.15: Histogramme des contraintes en fonction de type de confinement.

La comparaison des résultats de cette première série de la simulation montre que le confinement du béton au moyen d'enveloppe de tissu polypropylène est une technique efficace pour augmenter la résistance et la ductilité du béton.

Cependant, la configuration de l'enveloppe a une influence considérable sur l'efficacité du confinement fourni par le composite. Dans le cas des cylindres avec enveloppement partiel, une augmentation faible de résistance a été obtenue cela due à la pression de confinement relativement faible comme une section du béton est non confiné. Le confinement hélicoïdal a montré une augmentation faible de résistance comparativement au confinement circulaire. Ceci est dû au fait que les fibres ne sont

plus alignées d'une manière optimale pour retenir l'expansion latérale du béton. Le confinement le plus efficace est le confinement total qui a présenté une bonne augmentation de la résistance et de ductilité du béton.

Donc on peut dire l'augmentation de la résistance et la ductilité du béton dépend de disposition et de la quantité de l'enveloppe utilisée pour confiner le cylindre.

V.5 Influence de la géométrie des bandes de tissu dans le confinement circulaire:

Dans cette partie on va présenter les courbes contrainte-déformation des différentes variantes dans le cas du confinement circulaire puis on présente les cartographies des contraintes, des déformations et des dommages pour la meilleure variante qu'on utilisera pour la comparaison avec le premier modèle (largeur 50mm, épaisseur 1mm et espacement 40mm)

V.5.1 Influence de l'espacement des bandes :

Les courbes contrainte-déformation des cylindres confinés et non confiné sont présentées sur la figure suivante en faisant varier l'espacement entre les cerces, pour une largeur de la bande de 50mm et une épaisseur de 1mm.

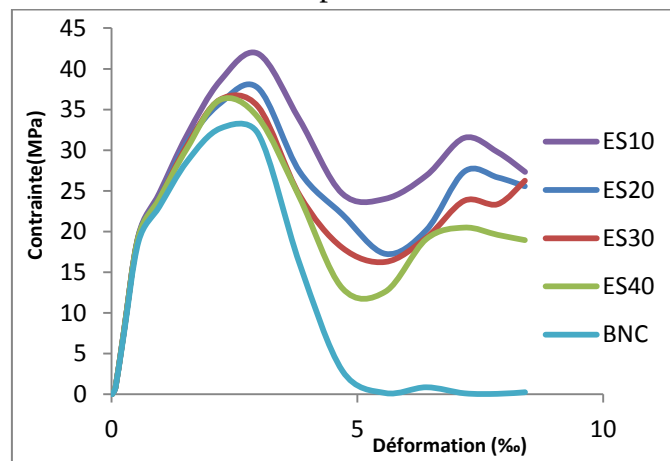


Figure V.16 : Confrontation des courbes ($\sigma - \varepsilon$) : variation d'espacement

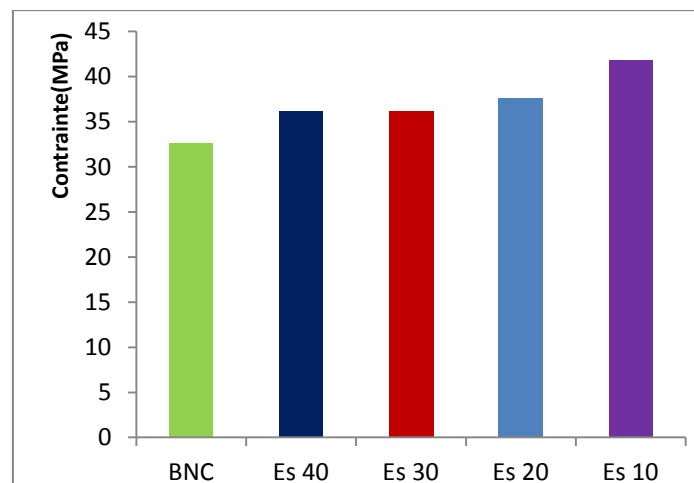


Figure V.17: Histogramme des contraintes en fonction de la variation d'espacement

Les résultats numériques ont montré une augmentation de résistance de 28.18% pour le cylindre confiné avec un espacement de 10mm entre les cerces et une augmentation de 15.25% pour un espacement de 20mm qui atteint une résistance de 37,641MPa ; par contre pour les espacements 30mm et 40mm la résistance est presque la même avec un apport de 10.88 %. En terme de ductilité on remarque une amélioration à chaque fois on diminue l'espacement entre les cerces.

La comparaison de ces résultats montre que la position optimale des cerces conditionnée par leur espacement permet d'améliorer la résistance du béton confiné sans modifier son comportement mécanique (le comportement adoucissant du béton confiné et non confiné). Par conséquent, l'espacement des cerces est proportionnellement lié à la capacité portante des cylindres confinés.

V.5.2 Influence de la largeur des bandes :

La figure suivante présente les courbes contraintes-déformations des cylindres non confiné et confiné avec une variation de la largeur des bandes pour un espacement de 10mm et une épaisseur de 1mm.

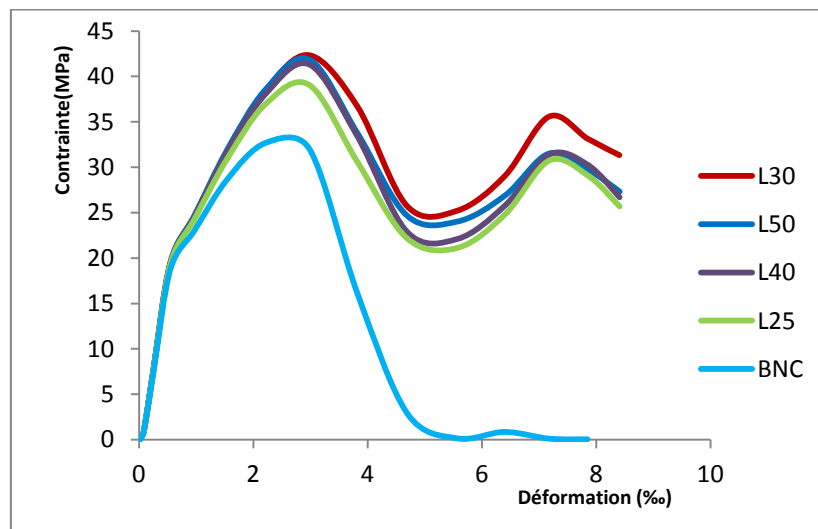


Figure V.18 : Confrontation des courbes ($\sigma - \varepsilon$) : variation de largeur

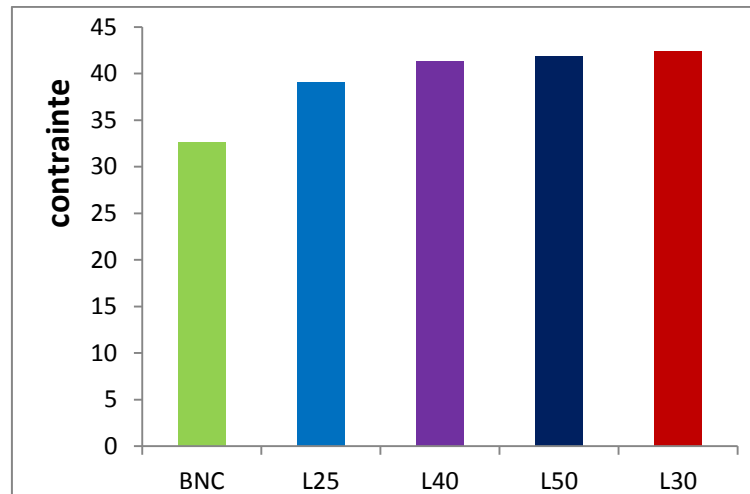


Figure V.19 : Histogramme des contraintes en fonction de la variation de largeur

L'analyse des résultats montre clairement l'amélioration en termes de résistance à la compression et de ductilité des cylindres confinés comparativement au cylindre non confiné et cela pour les quatre variations de la largeur. Cependant le cylindre confiné avec des bandes d'une largeur de 30mm présente une résistance maximale de 42,343 MPa avec un apport de 29.65 % ; Par contre le modèle confiné avec des bandes de largeur de 25mm présente la valeur de résistance minimale qui est de 39.066 MPa avec un apport de 19.61%.

V.5.3 Influence de l'épaisseur des bandes :

La figure suivante présente les courbes contraintes-déformations des cylindres non confiné et confiné avec une variation de l'épaisseur des bandes (empilement des bandes) pour une largeur de 50mm et un espacement de 10mm.

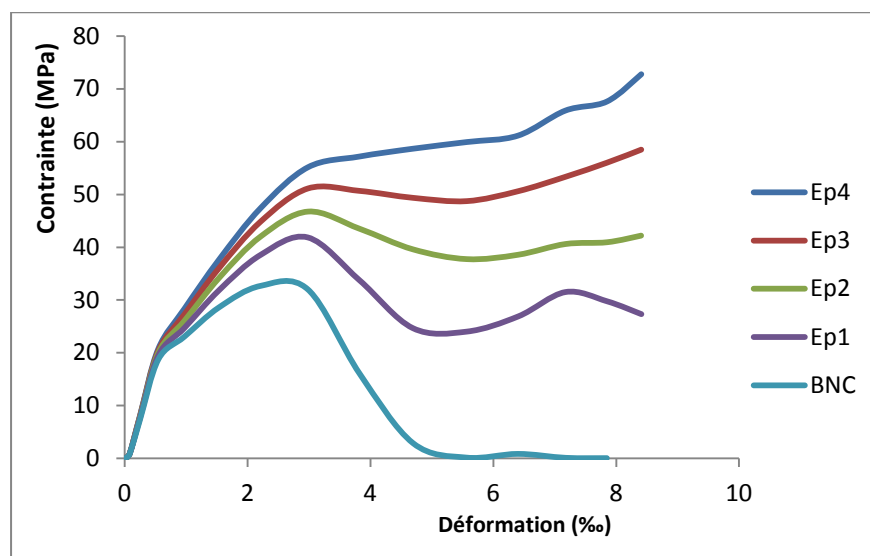


Figure IV.20 : Confrontation des courbes ($\sigma - \varepsilon$) : variation d'épaisseur

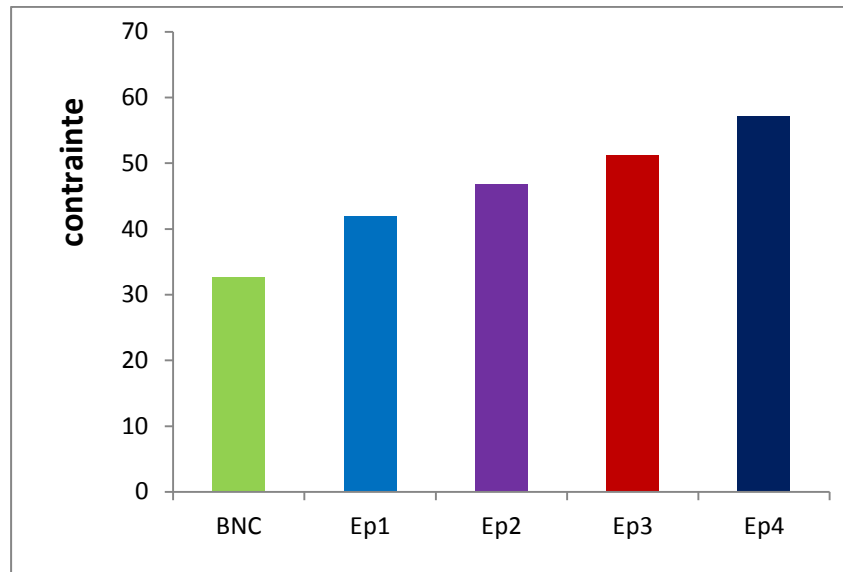


Figure IV.21: Histogramme des contraintes en fonction de la variation d'épaisseur

Les résultats numériques ont montré une augmentation de résistance à la compression de 75.06% pour le cylindre confiné avec des bandes d'épaisseur de 4mm et une augmentation de 56.57% pour une épaisseur de 3mm qui atteint une résistance de 51.136 MPa ; par contre le cylindre atteint une résistance de 46.76MPa pour une épaisseur de 2mm avec un apport de 43.17%.

D'après la comparaison de ces résultats on peut dire que la variation de l'épaisseur des cerces conduit à une amélioration de la résistance et de la ductilité du béton, et l'augmentation de la résistance des cylindres de béton confiné est proportionnelle au nombre de couches du matériau composite.

V.6 Comparaison entre la meilleure variante et le modèle 1 :

La meilleure variante en termes de résistance et de ductilité est la variante du cylindre confiné avec des bandes de largeur de 50 mm, espacement de 10mm et l'épaisseur de 4mm.

Modèle 1 : cylindre confiné avec des bandes de largeur de 50mm, espacement de 40mm et l'épaisseur 1mm

V.6.1 Evolution des contraintes :

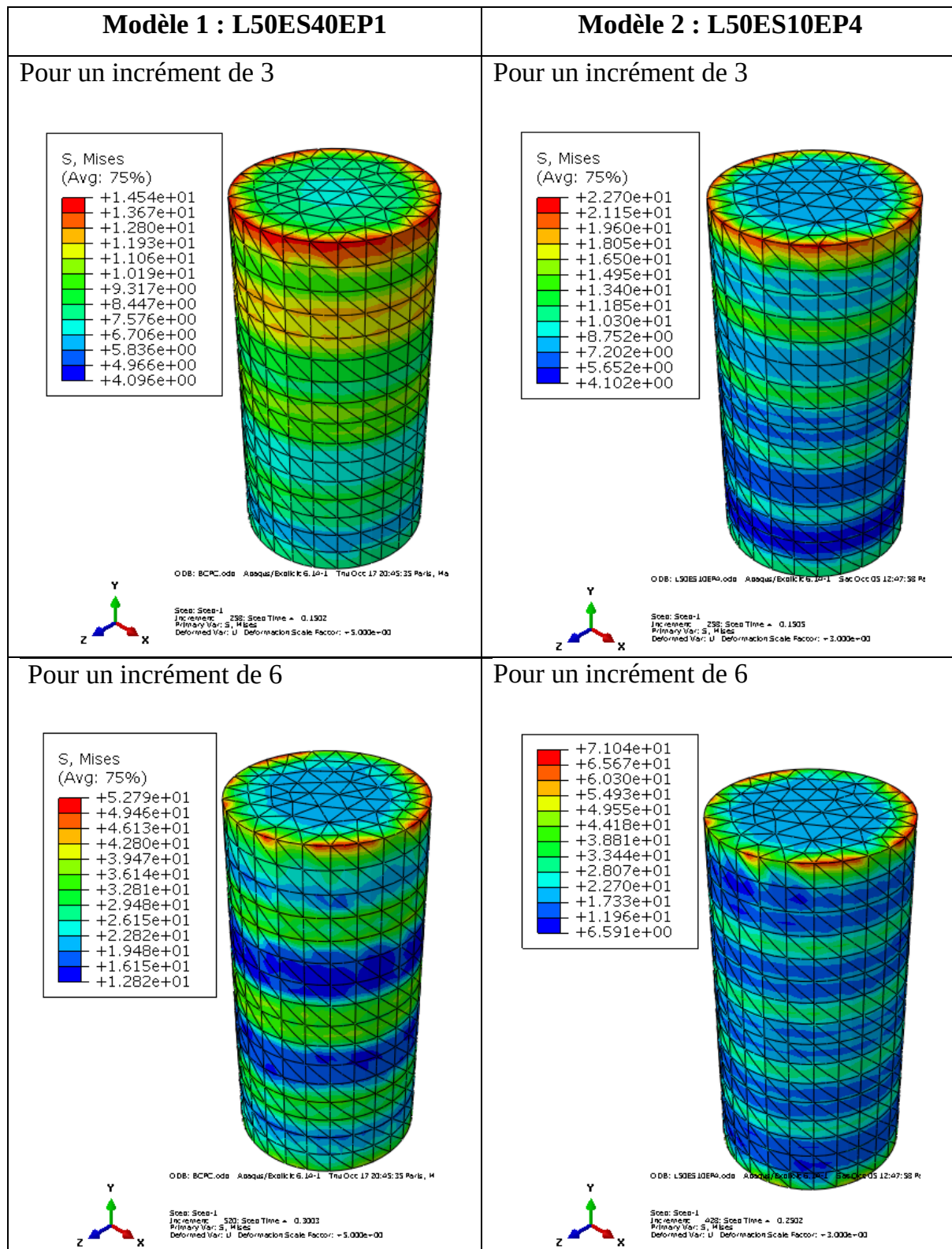


Figure V.22 : Évaluation des contraintes

On remarque que les contraintes sont limitées par la présence des cerces et que l'augmentation de l'épaisseur des cerces engendre une augmentation de la pression de confinement sur le cylindre.

La présence de l'enveloppe composite avec plusieurs empilements et avec un espacement réduit permet à la fois d'empêcher la propagation de ces contraintes et de les réduire dans la zone centrale.

V.6.2 Evolution des déformations :

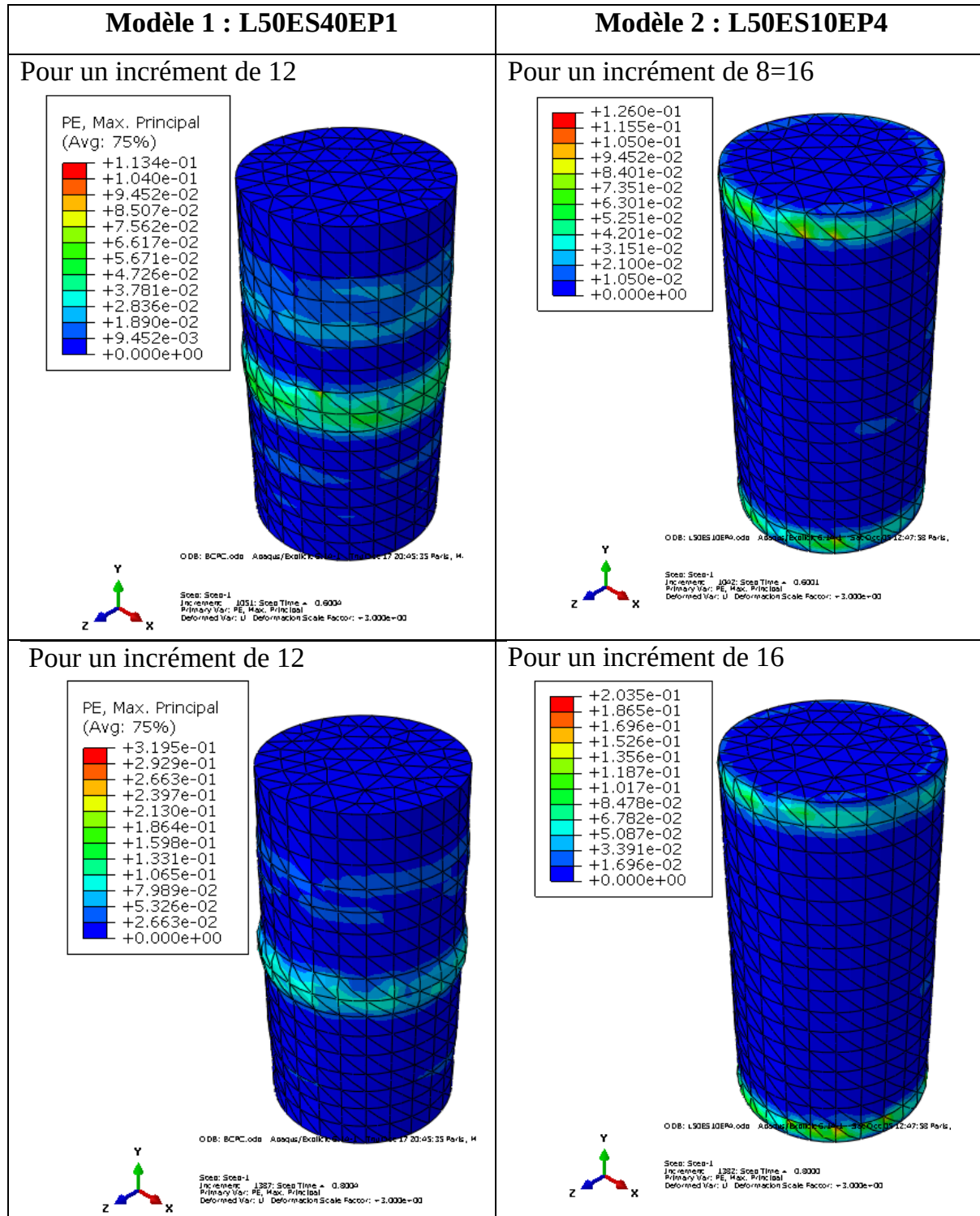


Figure V.23 : Évaluation des déformations.

La figure illustre l'évolution des déformations dans les cylindres confinés avec des cerces de L50ES40EP1et L50ES10EP4. Dans le modèle 2 la déformation radiale est limitée et réduite dans la zone centrale, en comparaison avec le modèle 1, grâce à la mobilisation de la pression de confinement latérale, qui est augmentée dans ce deuxième cas.

V.6.3 Evolution des dommages:

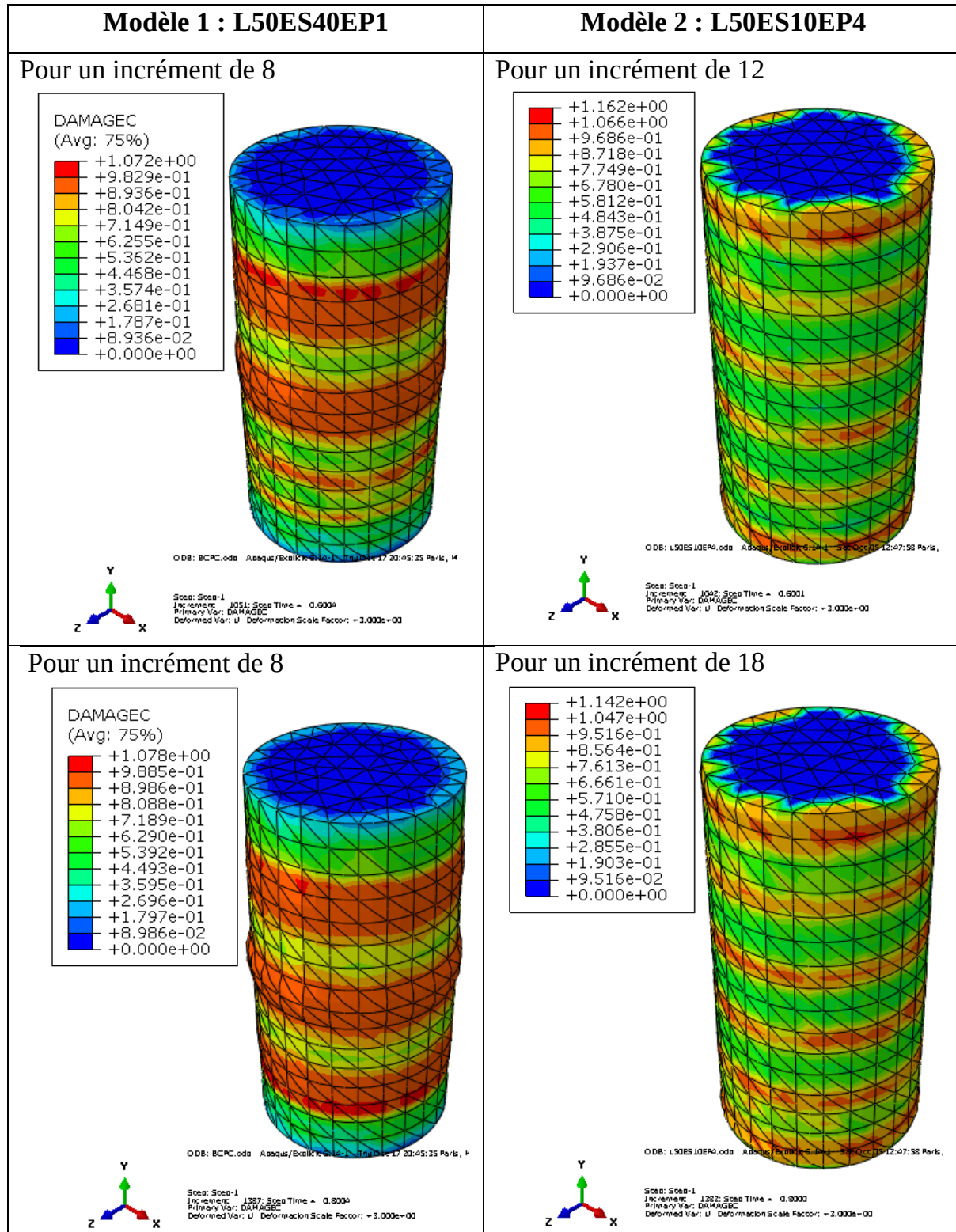


Figure V.24 : Évolution des dommages

La figure V.24 illustre l'état d'endommagement des cylindres confinés partiellement avec des cerces (deux différentes configurations). Sous le même taux de chargement, le cylindre confiné avec des cerces de L50ES40EP1 connaît un endommagement plus important comparativement au cylindre confiné avec des cerces de L50ES10EP4. Ceci peut être expliqué par l'augmentation de la résistance du béton confiné avec un taux élevé et un espacement réduit.

V.6.4 Confrontation des courbes :

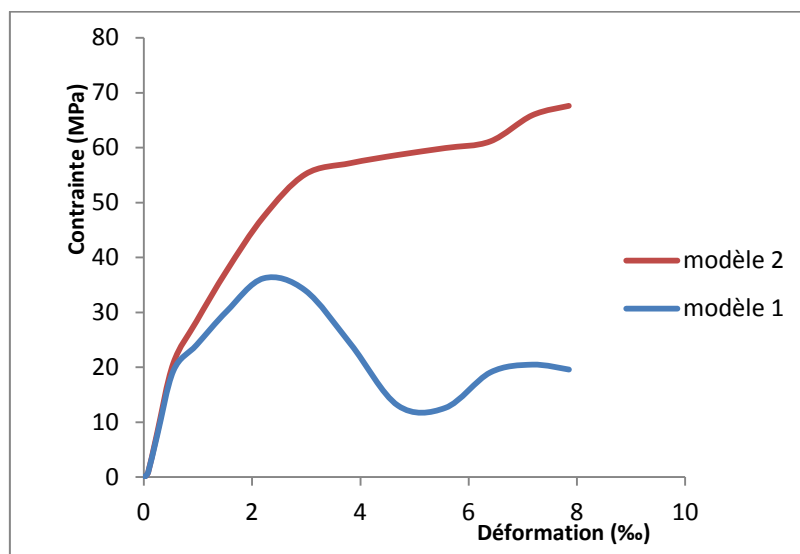


Figure V. 25. Confrontations des courbes (σ - ϵ) : modèle 1 et modèle 2.

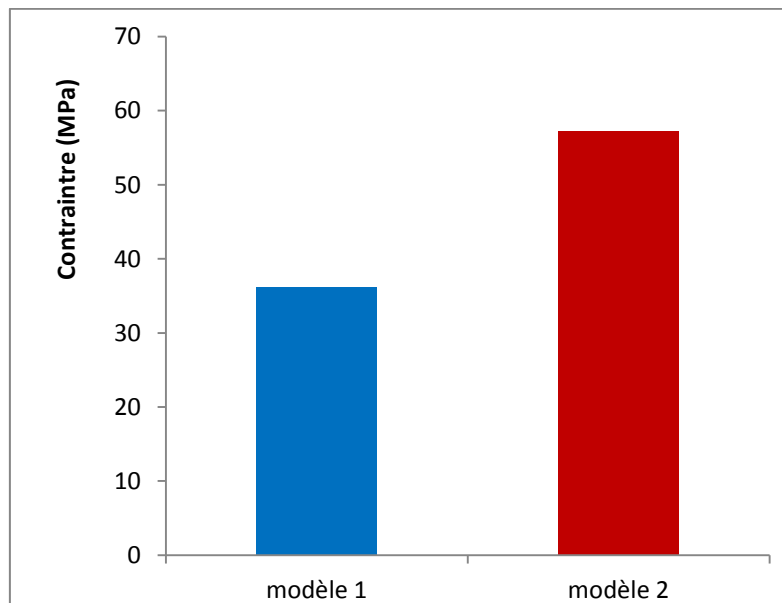


Figure V. 26. Histogramme des contraintes: modèle 1 et modèle 2

L'analyse des résultats des deux variantes montre clairement l'amélioration dans le modèle 2, le confinement du cylindre avec des cerces de largeur de 50mm,

d'espacement de 10mm et d'épaisseur de 4mm conduit à une amélioration de la résistance du béton à la compression qui atteint une valeur de 57.174MPa, cependant le comportement du cylindre devient plus ductile comparativement au modèle 1 (largeur de 50mm, espacement de 40mm et épaisseur 1mm) qui atteint une résistance de 36.201 MPa donc l'apport de l'augmentation de la résistance entre ces deux modèle est égale à 36.68%.L'augmentation de nombre de couches (empilement des cerces) et la réduction de l'espacement entre ces cerces nous a permis d'améliorer notre modèle (confinement partiel avec cerce) en terme de résistance et de ductilité.

V.7 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté et analysé les différents résultats prédits par la simulation numérique des cylindres confinés avec différentes configurations. Dans la première partie on a présenté l'influence du type de confinement à savoir le confinement total, le confinement partiel circulaire et le confinement partiel hélicoïdal, et dans la deuxième partie on a vu l'influence de la géométrie et de la disposition des bandes dans le cas du confinement circulaire.

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

- Le confinement total des cylindres augmente la résistance et la ductilité de ces derniers d'une manière plus importante qu'un confinement partiel.
- Le confinement circulaire est plus efficace qu'un confinement hélicoïdal.
- Les paramètres (espacement, nombre de couches et épaisseurs des bandes) influent sur la résistance et la ductilité du béton confiné avec cerces.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif principal de ce travail consiste à mettre en évidence, à travers une simulation numérique en utilisant le code de calcul Abaqus, le comportement mécanique des cylindres en béton à base des déchets de verre, confinés par des bandes composites d'un tissu issu de l'industrie de récupération des déchets

Les différents résultats obtenus dans ce travail de recherche, en termes de variation de contrainte en fonction de la déformation axiale selon les différentes configurations et la visualisation des cartographies d'évolution des contraintes, des déformations et des endommagements nous ont permis de formuler les conclusions suivantes :

- ❖ Le confinement par collage de matériaux composites en polypropylène permet d'améliorer considérablement la résistance et la ductilité du béton à base des déchets de verre sous chargement de compression.
- ❖ La configuration de l'enveloppe a une influence considérable sur l'efficacité de confinement fourni par le tissu polypropylène.
- ❖ La meilleure configuration entre le confinement totale, confinement partiel circulaire et le confinement partiel hélicoïdale est le confinement totale est cela en terme de résistance et ductilité.
- ❖ La disposition du tissu sur la surface des spécimens dans le cas du confinement hélicoïdale engendre une augmentation faible de résistance et de déformation axiales à la rupture comparativement aux types de confinement.
- ❖ Une amélioration en termes de résistances et ductilité est constatée en faisant varier les caractéristiques géométriques des bandes (espacement, largeur et épaisseur) dans le cas du confinement circulaire.
- ❖ Le confinement partiel circulaire avec variation de la largeur des cerces donne des résistances proches car le taux de confinement est presque le même pour toutes les variantes.
- ❖ La variation de l'espacement entre les cerces de composites permet d'améliorer la résistance du béton confiné ainsi que la ductilité, sans modifier son comportement mécanique.
- ❖ L'augmentation de l'épaisseur des bandes (empilement des bandes) permet le passage d'un comportement (fragile) adoucissant vers comportement ductile du béton confiné, avec une amélioration très nette de la contrainte de rupture.