

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté de génie de la construction
Département de génie civil



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité structure, intitulé :

**Contribution à la modélisation et la prédiction du
comportement des colonnes en béton armé
endommagées et réhabilitées avec des matériaux
composites.**

Présenté par :

MERABTI Lynda

TIGHILT Thamila

Proposé et dirigé par :

Dr. SI SALEM Abdelmadjid

Soutenu devant le jury composé de :

- **President de jury: Pr KHELOUI Fatma**
- **Promoteur : Dr. SI SALEM Abdelmadjid**
- **Examinatrice : Dr BOUZBOUDJA Fatma**

2022/2023

Remerciements

Je tiens d'abord et avant tout à remercier ALLAH de m'avoir mis sur le droit chemin et qui m'a guidé à accomplir ce modeste travail.

Je tiens à remercier chaleureusement mon encadreur Mr. Si Salem Abdel Majid de m'avoir assisté tout le long de ce travail, je ne le remercie jamais assez pour ces précieux conseils, son temps, et sa valeureuse orientation sans laquelle ce modeste projet n'aurait pas abouti, ce fut un honneur et privilège d'avoir appris à ses côtés, je lui en suis profondément reconnaissant.

Mes vifs remerciements et pensées vont également à l'ensemble du personnel de la faculté de Génie de la construction.

J'adresse mes sincères remerciements aux membres du jury pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce travail, je tiens également à exprimer mes respectueux remerciements à tous nos professeurs qui ont contribué à notre formation.

Enfin, dans l'impossibilité de citer tous les noms, mais sincères remerciements vont à tous ceux et celles, qui de près ou de loin, ont permis par leurs conseils et leurs compétences la réalisation de ce mémoire.



Dédicace

À ceux qui se sont toujours dévoués et sacrifiés pour moi, ceux qui m'ont encouragé et soutenu dans la lutte contre les aléas de la vie et dans mes efforts pour donner le meilleur de moi-même, je dédie essentiellement ce mémoire à mes très chers parents.

À ma très chère sœur Faiza, son mari et mes adorables neveux: Ines, Manessa, Ahmed Ishaq et Liya, ma chère sœur Melissa ainsi qu'à mon très cher frère Karim, qui m'ont énormément aidé et à qui je témoigne toute mon affection et ma profonde admiration.

À ma belle-famille, particulièrement à ma belle-mère Djamila et à mon beau-frère.

À celui qui a su m'épauler, m'encourager et surtout être patient avec moi, mon mari Smail, à qui je témoigne tendrement toute ma gratitude.

À la lumière de ma vie, mes amours, mes joies et mes fiertés, je ne vis que pour leurs rires, leurs regards et leurs innocences. À mes deux filles Alice et Ayla, qui un jour j'espère seront fières de leur maman.

À tous ceux que j'aime et qui m'ont aidé de près ou de loin à accomplir ce modeste travail...

Lynda





Dédicace

Du profond du cœur, je dédie ce modeste travail à ma très chère mère Noura, mon très cher père Makhlouf que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A la mémoire de mes deux grand-père Mohammed et Omar à la mémoire de ma grand-mère Ouiza que dieu le miséricordieux, vous accueille dans son éternel.

A mes sœurs Ouiza, et son mari, mes frères Moumouh, Larbi, Ghiles et mes neveux Tahar Karim Wassim et ma petite nièce Alicia, et ma grand-mère Nouara

A toute ma famille et mes amis Sarah Tina Amirouche Alilou Yanis. A

mon binôme Lynda.

Et à tous ce qui ont contribué de près ou de loin pour la réalisation de ce travail, je vous remercie.

Thamila



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.
E	Module de Young instantané du béton.
Ψ	Angle de dilatation du béton sous compression axiale.
dt	Variables d'endommagement de traction.
D_n	la mesure de mécanique de l'endommagement.
D_c	Variables d'endommagement en compression.
Σ_t	Contrainte de traction. σ _c Contrainte du compression.
σ_{ij}	Composantes de la matrice de contraintes.
St et Sc	Des fonctions de l'état de contrainte.
v₁, v₂	Coefficients de Poisson du tissu de verre.
G₁₂	Module de cisaillement du tissu de verre.
f_s et f_v	composantes des forces de surface et volume.
d_s et d_v	respectivement élément de surface et volume.
F_{cm}	valeur moyenne de la résistance à la compression.
γ_c	Coefficient de sécurité qui tient compte d'éventuels défauts localisés.
V_m	fraction volumique de matrice.
M	moment fléchissent.
P	force total appliqué sur la poutre.
G_c et G_a	Module de cisaillement du béton et de la colle respectivement.
F	fonction de l'état de contrainte principale.
ε₀	Déformation initial dans le tissu (volume virtuelle).
ε_c	Déformation actuelle des fibres extrémités du béton comprimé.
K_I	facteur d'intensité des contraintes.
A	facteur dépendant de l'angle θ.
W_t et W_c	Paramètres de contrôle la récupération de la rigidité traction et à la compression.
PRF	Fibre renforce polymère (Polymère renforcé de fibres).
CFRP	Carbon Fibber reinforced polymer (polymère renforcé de fibres de carbone).
GFRP	Glass Fiber reinforced polymer (polymère renforcé de fibres de verre).

BA	Béton armé sain.
BAR	Béton armé renforcé.
BA-end	Béton armé endommagé.
D	Taut d'endommagement
B.T.C	Béton totalement comprime
B.P.C	Béton partiellement comprime
B.A	Béton arme
F_t	Force du poteau en béton totalement comprime-
F_p	Force du poteau en béton partiellement comprime-
F_{BA}	Force du poteau en béton arme
D_t/D_{BA}	Déplacement poteau total rapport de placement béton arme
D_p/D_{BA}	Déplacement poteurenforce rapportdeplacement béton arme
RAS	Réaction alcali-silice
RC	Poteau en béton arme sain
RCP	Poteau en béton arme sain renforcee partiellement
RCT	Poteau en béton arme pre endommagée totalement

Liste des figures

Figures	Titre	N° page
Figure I.1	Constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire [14].	6
Figure I.2	Types principaux de granulats	7
Figure I.3	Eprouvette normalisée	9
Figure I.4	Courbe contrainte-déformation d'un essai de compression	9
Figure I.5	Comportement du béton en traction simple [1]	10
Figure I.6	Loi de comportement d'un acier naturel [8].	11
Figure I.7	Loi de comportement d'un acier écroui [8].	11
Figure I.8	Diagramme contrainte-déformation selon le BAEL [9].	12
Figure I.9	Diagramme charge-déformation (comportement réel de l'acier) [10].	13
Figure I.10	Comportement d'une barre d'acier soumis à un essai d'arrachement [11]	14
Figure I.11	Schéma illustratif d'un matériau composite.	15
Figure I.12	Les différentes formes des fibres métalliques	17
Figure I.13	Fibres de polypropylène	17
Figure I.14	Différentes armures utilisées pour les matériaux composites tissées	18
Figure I.15	Organigramme illustrant les différentes familles de matrice	19
Figure I.16	Confrontation du comportement des composites et de l'acier	20
Figure I.17	Couche de matériau composite orthotrope	20
Figure II.1	Coffrage des poteaux selon le RPA (2003)	23

Figure II.2	Performance structurelle typique et niveau d'endommagement associé [4]	28
Figure II.3	Effondrement partiel d'un bâtiment faute de mauvaise conception (séisme Boumerdes2003)	30
Figure II.4	Fissures en «X», dislocation de la section, Rupture par écrasement du béton du au remplissage partiel [37]	30
Figure II.5	Éclatement du béton d'enrobage au niveau des zones nodales [37].	30
Figure II.6	Rupture par flambement de poteaux [38].	31
Figure II.7	Mode opératoire de renforcement par les fibres de carbone [43].	34
Figure II.8	Exemple de renforcement de colonnes par des matériaux composites [44]	35
Figure II.9	Chemisage par coquille préfabriquée en «PRF»Teng et Lam (2002) [45].	36
Figure II.10	Détails structurel de la géométrie et du ferrailage du poteau Xie et al [29].	37
Figure II.11	Schéma de renforcement des spécimens d'essai[48].	38
Figure II.12	Détails du modèle à éléments finis [48].	38
FigureII.13	Description de la technique de renforcement testée par H. Huang et al [46].	39
Figure II.14	Maillage de l'ensemble du modèle [47].	40
Figure III.1	Présentation de l'interface ABAQUS	43
Figure III.2	Dimensionnement et géométrie du poteau modélisé par Yongping Xie, et al. , en (mm).	45

Liste des figures

Figure III.3	Dimensionnement et géométrie du poteau modélisé en (mm).	45
Figure III.4	Les modules du logiciel.	47
Figure III.5	Création de poteau semelle en béton armé	48
Figure III.6	Élément poteau obtenue.	48
Figure III.7	Création des armatures sur ABAQUS	49
Figure III.8	Création des cadres	50
Figure III.9	Création des bandes composite	51
Figure III.10	Création des plaques rigides pour piloter le chargement axial et horizontal.	52
Figure III.11	Création des propriétés des matériaux (béton, acier et composites)	52
Figure III.12	Détail d'assemblage du modèle	54
Figure III.13	Création des interactions	54
Figure III.14	Chargement appliqué sur le poteau en béton armé.	55
Figure III.15	Création du maillage (poteau, acier et composites).	57
Figure III. 16	Courbe de convergence de maillage du poteau.	58
Figure III.16.	Courbe de convergence de maillage de la fondation.	60
Figure III.1	Repense du modèle ; a) à la traction simple. b) à la compression simple.	61
Figure IV.2	Confrontation des courbes (F-U); Validation du modèle non renforcé	68
Figure IV.3	Résultat de l'effet d'endommagement du béton en termes de capacité portante	71

Figure IV.4	Histogramme de la variation de la force selon le pourcentage et des apports F_t/F_{BA} et F_p/BA	74
Figure IV.5	Histogramme de la variation du déplacement selon pourcentage et des apports D_t/D_{BA} et D_p/D_{BA}	76
Figure IV.6	Représentation de l'évolution des dommages dus à la traction du poteau à base de béton et acier pré-endommagés	78

Liste des tableaux

Tableaux	Titre	N° de page
Tableau II.1	Détail de dimensionnement des sections du poteau [20].	24
Tableau II.2	Les conditions sur les armatures longitudinales [25]	24
Tableau II.3	Les conditions sur les armatures transversales [25]	25
Tableau II.4	Vérification spécifiques du ferrailage des poteaux [25]	25
Tableau III.1	Tableau des unités correspondant à ABAQUS.	42
Tableau III.2	Tableau récapitulatif des caractéristiques du poteau	47
Tableau III.1	Les différentes lois utilisées pour le modèle adopté pour le béton	66
Tableau III.2	Paramètres utilisés pour définir le comportement du béton	66

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Revue sur les matériaux (béton, acier et composites fibreux)	
I.1 Introduction	4
I.2 Le matériau béton.....	4
I.2.1 Historique.....	4
I.2.2 Définition	5
I.2.3 Avantages du béton armé.....	5
I.2.4 Composition du béton	5
I.3. Comportement expérimental du béton.....	5
I.3.1 Essais de compression	8
II.1.1.2 Essais de traction	10
I.4. Les aciers	10
I.4.2 Classification	12
I.4.3 Caractéristiques mécaniques et comportement de l'acier	12
I.5 Le béton armé	13
I.6 Les matériaux composites.....	15
I.6.1 Les fibres	15
I.6.4 Modélisation des composites	20
I.7 Conclusion	21

Chapitre II : Comportement et renforcements des poteaux

II.1 Introduction	22
II.2 Description réglementaire	22
II.2.3 Ferrailage.....	24
II.2.4 Vérifications spécifiques.....	25
II.3.1 Comportement non linéaire des poutres et des poteaux	26
II.3.2 Comportement des éléments poteaux	27
II.3.5 Définition des performances	27
II.4 Nécessité de renforcement	29
II.2 Les cause des dommages et les dégradations du béton.....	31
II. 6 Méthodologie de renforcement	32
II.7 Techniques de renforcement	35
II.8 Travaux antérieures	37
II.9 Conclusion	40

Chapitre III : Modélisation et conception proposé

III.1 Introduction	41
III.2 Simulation avec ABAQUS	41
III.2.1 Présentation du logiciel ABAQUS	41
III.2.1 Le CAE (Complete ABAQUS Environnement)	42
III.2.3. Définition du modèle à simuler.....	44
III.2.3.1 Dimensionnement et géométrie du poteau modélisé	44

III.2.4.Présentation des étapes suivies dans la simulation	48
III.2 Modélisation du comportement des matériaux.....	62
III.3.1 Modèle non linéaire pour béton	62
III.3.1.1 Loi du comportement : compression/traction.....	63
III.3.1.2.Identification des paramètres du modèle.....	66
III.4. Modèles et variantes de l'étude.....	67
III.5. Conclusion	67

Chapitre IV : Résultats, analyses et discussion

IV.1 Introduction.....	68
IV.2Confrontation et validation du modèle élément fini	68
IV.3. Effet de l'endommagement	69
IV.3.1. Poutres avec béton pré-endommagé	70
IV.4 Conclusion	80
Conclusion générale	81

Références bibliographiques

Introduction générale

L'activité sismique représente un risque naturel important ; ils ne sont pas toujours prévisibles et peuvent se produire dans de nombreux endroits sur Terre. L'impact d'une catastrophe naturelle est souvent lié à son intensité et à la densité de population du lieu où l'événement s'est produit. En fait, l'intensité des tremblements de terre a été relativement stable dans le monde au cours des dernières décennies. Cependant, la taille de la population augmente et l'urbanisation augmente.

Des études expérimentales et numériques récentes [1-5] ont montré que le comportement des poteaux en béton armé sous contrainte horizontale montre que les endroits les plus sollicités sont les zones de joint et le bas de la colonne. En fait, les structures portiques dans les zones sismiques sont construites de manière dissipative en termes d'énergie de rupture ; cette approche est connue sous le nom de "poutre forte à colonne faible", de sorte que les rotules plastiques sont conçues pour se former d'abord dans la poutre. Les nœuds représentent les régions mécaniques les plus critiques dans la dissipation de l'énergie sismique, de sorte que l'instabilité mécanique et la rupture fragile doivent être évitées pour assurer le comportement ductile relatif des ossatures poteaux-poutres.

Par conséquent, les codes du bâtiment d'aujourd'hui se concentrent sur la garantie que les structures sont fiables et sûres pour résister aux tremblements de terre. Cependant, le nouveau renforcement et la réhabilitation de toutes les infrastructures de génie civil et de travaux publics qui ne répondent pas aux exigences parasismiques représentent une priorité d'intérêt majeur.

Afin de compenser la baisse de leur résistance aux tremblements de terre, la méthode la plus couramment mentionnée pour renforcer et réparer ces éléments structuraux consiste à coller l'extérieur composite aux zones critiques sujettes à la rupture. En fait, le renforcement des poteaux en béton par des composites est réalisé en appliquant une coque entière ou discontinue avec un polymère renforcé de fibres FRP. De plus, ces techniques permettent d'obtenir des améliorations très significatives de la capacité portante ; cependant, elles présentent un inconvénient majeur, à savoir : l'interface béton-composite très importante, qui conduit à une rupture prématurée par décollement de l'interface collée.

La réparation et la réhabilitation de structures en béton armé par collage externe et/ou intégration de matériaux composites a montré une importance significative et prometteuse pour répondre aux besoins de restitution des performances mécaniques. Les recherches récentes focalisées sur le comportement des poteaux en béton armé sous chargement statique

et dynamique monotone ont montré que les endroits les plus sollicités voire les plus endommagés sont au voisinage des sommets et des bases des poteaux.

Dans cette optique, le présent travail consistera à proposer un modèle numérique pour prédire la réponse des poteaux pré-endommagés et réhabilités par le collage externe des bandes en fibre de carbone (CFRP) sous charges latérales. Le renforcement s'effectuera suivant les bielles de rupture dont le taux d'endommagement initial et la conception de disposition des renforts fera l'objet d'une optimisation. L'objectif principal de cette étude se résume sur les points suivants :

- Localiser et renforcer les zones critiques d'un poteau en BA sous charges horizontales ;
- Quantifier le taux de restitution à travers la confrontation des modèles renforcés au modèle conventionnel en termes d'endommagement et performance (courbes de capacité) ;
- Évaluer le taux d'endommagement critique permettant de restituer la rigidité ;
- Optimiser la conception de renforcement.

L'étude est réalisée à travers une simulation numérique à base des éléments finis à l'aide du logiciel ABAQUS sur des poteaux en béton armé pré-endommagés renforcés. Afin de répondre à notre problématique et atteindre nos objectifs, nous avons organisé ce mémoire en deux grandes parties. La première partie consiste en une revue bibliographique composée de deux chapitres.

Le **premier chapitre** aborde les matériaux, où nous présentons une synthèse bibliographique sur les caractéristiques et les comportements du béton, de l'acier et des matériaux composites utilisés dans notre étude. Nous examinons également leur comportement mécanique et leur modélisation numérique.

Le **deuxième chapitre** se concentre sur le comportement mécanique des poteaux. Nous commençons par une description réglementaire, puis nous examinons les comportements des éléments poteaux et leurs mécanismes de défaillance. Enfin, nous référons à quelques travaux antérieurs réalisés sur le sujet traité.

La deuxième partie est dédiée à la modélisation numérique, et elle comprend également deux chapitres.

Le **troisième chapitre** présente le modèle numérique non linéaire utilisant un logiciel d'analyse par éléments finis (ABAQUS). Nous décrivons en détail les éléments utilisés pour modéliser le béton, ainsi que les supports et les charges. De plus, nous fournissons une description approfondie des outils numériques utilisés pour résoudre les modèles.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons les résultats des modèles numériques et leur validation. Nous interprétons également ces résultats et les comparons aux résultats expérimentaux pour en évaluer leur fiabilité.

En conclusion, nous résumons les principaux résultats obtenus dans cette étude et proposons quelques perspectives pour des travaux futurs.

Chapitre I

*Revue sur les matériaux : béton, acier
et composites*

I.1 Introduction

Le matériau béton, est devenu irremplaçable dans le domaine de la construction, pour des raisons économiques et techniques. Simple en apparence, 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 [1].

La résistance à la compression du béton reste, du point de vue de l'ingénieur, la propriété la plus importante du matériau, si l'on exclut les indicateurs de durabilité [1]. La qualité et le potentiel du matériau béton dans la structure dépend bien sûr, des matériaux de base qui entrent dans sa composition mais également des opérations de : malaxage, mise en œuvre, vibration et cure (protection contre la dessiccation).

En effet, dans ce chapitre, nous allons présenter le matériau béton, ces différents composants, ainsi que les aciers de construction et les matériaux composites.

I.2 Le matériau béton

Bien qu'appelé « pierre artificielle, le béton est un matériau vivant qui se modifie tout au long de sa vie utile aussi que c'est un élément en-dommageable, au comportement non linéaire de type fragile ou quasi-fragile, dont les propriétés en traction sont les plus faibles mais il présente une très bonne résistance à la compression

I.2.1 Historique

L'histoire du béton remonte à l'Antiquité, où les Égyptiens et les Romains utilisaient des mélanges de chaux, de sable et d'eau pour construire des structures durables, comme les aqueducs et les bâtiments. Cependant, le béton moderne tel que nous le connaissons aujourd'hui a été développé au 19ème siècle.

En 1824, le ciment Portland a été inventé en Angleterre, offrant un matériau de construction plus résistant que les mélanges de chaux et de sable utilisés précédemment. En 1848, Joseph Aspdin a breveté le ciment Portland et a commencé à le commercialiser. Le béton armé, qui consiste à renforcer le béton avec de l'acier, a été développé en France dans les années 1860.

Au début du 20^{ème} siècle, le béton précontraint a été inventé par le Français Eugène Freyssinet, qui a développé une technique pour pré-contraindre le béton avec des câbles d'acier tendus avant de couler le béton. Cette technique a permis de produire des structures de béton plus légères et plus résistantes.

Au fil du temps, la composition et la technique de fabrication du béton ont continué d'évoluer, avec l'introduction d'additifs et de techniques de renforcement pour améliorer ses propriétés physiques et mécaniques. Aujourd'hui, le béton est l'un des matériaux de construction les plus couramment utilisés dans le monde, utilisé pour la construction de bâtiments, de ponts, de routes et d'autres infrastructures importantes. [3]

I.2.2 Définition :

Le béton est un matériau de construction constitué d'un mélange de ciment, d'eau, de sable et de gravier. Il est solide, durable et résistant aux intempéries, ce qui en fait un choix populaire pour les structures de bâtiments, les routes, les ponts et les barrages. Le béton peut être préfabriqué ou coulé sur place, et il est facilement adaptable pour diverses applications. Cependant, le béton est relativement lourd et nécessite une grande quantité de main-d'œuvre pour le manipuler et le mettre en place [2]

I.2.3 Avantages du béton armé :

Utilisé seul, le béton peut endurer des efforts de compression mais sa résistance aux efforts de traction est faible. Le fait de placer des barres d'acier, qui jouent le rôle d'armature, permet de pallier cette carence

I.2.4 Composition du béton :

Le béton est un mélange de plusieurs composants : ciment, eau, sable, gravier et, le plus souvent, adjuvants (figure 1.1) qui constituent un ensemble homogène. Les composants sont très différents : leurs masses volumiques vont, dans les bétons courants, de 1 (eau) à 3 (ciment) t/m^3 ; les dimensions de leurs grains s'échelonnent de 0.5 μm (grains les plus fins du ciment) à 25 mm (gravillons). Mais cette liste s'allonge très vite dès que des propriétés particulières sont visées, on utilise alors des fines complémentaires ou additions minérales [4].

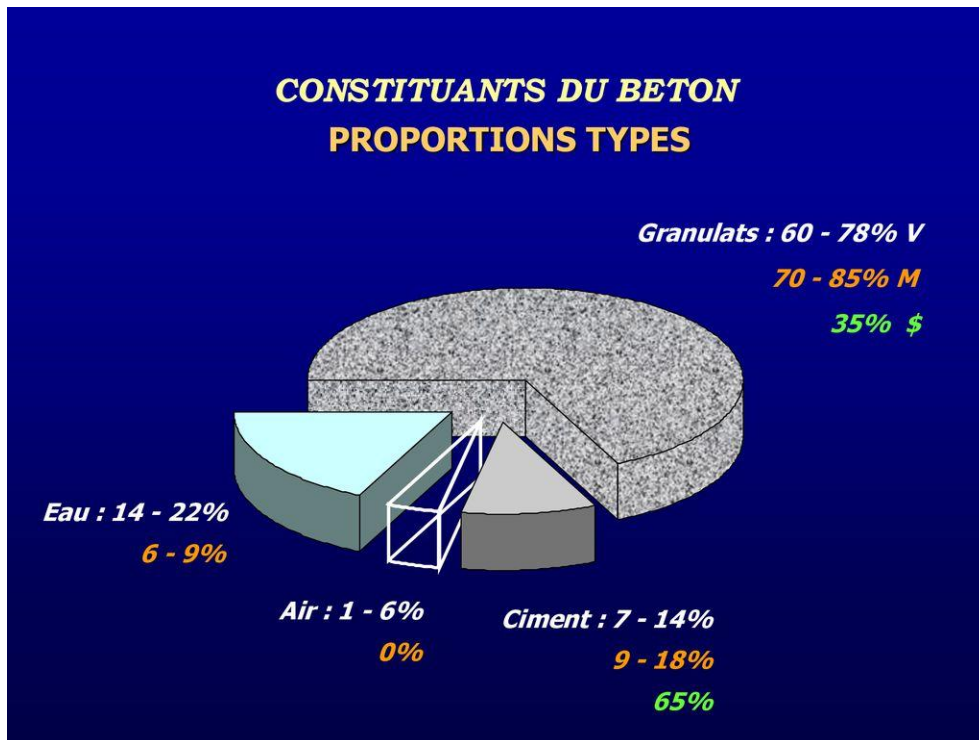


Figure I.1 : Constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire [14].

La confection d'un béton approprié à sa destination consiste, à déterminer et à optimiser la composition granulaire et le dosage des divers constituants.

Dans les bétons les plus simples, le squelette granulaire est composé de deux coupures seulement, un sable et un gravier. Le ciment et l'eau de gâchage, dont les proportions relatives en masse sont fixées par le rapport E/C, vont former, avec les adjuvants éventuels, la pâte de ciment qui constituera le liant du béton. Ce rapport E/C joue un rôle primordial durant les étapes de vie du béton, l'eau en excès le rend plus fluide à l'état frais mais diminue les résistances du béton durci. Des additions minérales (cendres volantes, fumées de silice, laitiers, fillers...) peuvent être rajoutées dans le but de modifier les propriétés du béton.

❖ Les granulats :

Le granulat est un fragment de roche naturelle ou artificielle, d'une taille inférieure à 125 mm. Les granulats sont désignés par le couple d/D, d étant la dimension inférieure et D la dimension supérieure des granulats.

❖ Types principaux de granulats :

Les Granulats Naturels : des matériaux à l'état naturel

Les Granulats Artificiels : des matériaux ayant subi une transformation industrielle thermique ou chimique (ex: le laitier, le verre, l'argile expansé, le caoutchouc, le bois...) Les Granulats Recyclés : des matériaux précédemment utilisés dans la construction (ex : le béton concassé, fraïsat routier...)



Figure I.2: Types principaux de granulats [49]

- **Le ciment :** Le ciment est un liant hydraulique c'est-à-dire : il est capable de faire prise, de durcir et de développer des résistances à l'air comme dans l'eau.

Le béton est un géo-matériau composite, composé essentiellement de ciment + eau + granulats.

Une Pâte = Ciment + Eau.

Un mortier = Ciment + Eau + Sable.

Un Béton = Ciment + Eau + Sable + Gravier.

- **L'eau de gâchage**

L'eau de gâchage est un élément essentiel pour la fabrication du béton. Elle est ajoutée lors du mélange afin d'hydrater le ciment et permet de lier les constituants du béton entre eux. L'eau rend également le mélange bien plus maniable ; ce qui facilite l'application du béton. Élément indispensable pour obtenir du béton ; l'eau utilisée doit absolument être propre et ne doit pas être ajoutée avec excès. Si ces deux conditions ne sont pas respectées ; votre béton risque d'être fragile et ses performances seront altérées.

- **Les adjuvants**

Les adjuvants sont des produits solubles dans l'eau, qui sont incorporés aux bétons à des doses qui doivent être inférieures ou égales à 5% du poids du ciment permettant d'améliorer certaines de ses propriétés [6]. Ils fournissent aux formateurs de béton une gamme étendue, variée et nuancée de possibilités pour faciliter la mise en œuvre des bétons, adapter

leur fabrication par temps froid ou chaud, réduire les coûts de mise en œuvre, améliorer les propriétés des bétons durcis, voire même lui conférer des propriétés nouvelles. Il existe plusieurs types d'adjuvant qui sont régis par la norme NFEN 934-2, mais ceux qui conditionnent l'ouvrabilité du béton sont les super plastifiants. Ce sont des polymères organiques solubles dans l'eau dont la synthèse réalisée par une opération complexe de polymérisation produit de longues chaînes de molécules de masses moléculaires élevées. Ces molécules vont s'enrouler autour des grains de ciment et conduisent suivant leur nature à une répulsion électrostatique en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains ou à une répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres [7]. Ces réactions conduisent à une défloculation et à une dispersion des grains de ciment. Ainsi, le principal effet des super plastifiants est une meilleure distribution des grains de ciment et, en conséquence, le mélange d'une plus grande quantité de ciment dans un même volume d'eau.

Les plastifiants et les super plastifiants permettent, comme décrit dans la figure 1.4, soit de réduire le dosage en eau à maniabilité constante, induisant donc un gain de résistance en compression, soit d'augmenter l'affaissement à teneur en eau constante. Les deux types de produits sont différenciés par leur efficacité en termes de réduction d'eau, les super plastifiants étant plus efficaces.

I.3. Comportement expérimental du béton

Le béton armé est un matériau composé d'acier et de béton, deux matériaux aux réponses mécaniques très différentes lorsque déformés, surtout en traction. Il est donc essentiel, dans l'objectif de bâtir un modèle de prédiction du comportement d'éléments en béton armé, de bien comprendre les hypothèses émises et les lois considérées dans la définition du comportement de chacun de ces matériaux. La résistance à la compression et à la traction du béton sont très différentes ; il importe donc de les considérer séparément.

I.3.1 Essais de compression :

Le béton présente une relative bonne résistance à la compression. Les résistances obtenues dépendent de la composition.

En général, les essais sont réalisés sur des éprouvettes normalisées, appelées 16x32, de forme cylindrique de hauteur 32 *cm* et de diamètre 16 *cm* (Figure I.3). À partir de la courbe contrainte-déformation d'un essai de compression (Figure I.4), on peut tirer les grandeurs suivantes :

- Le module de Young instantané E_{ij} .
- La contrainte maximale.
- La déformation maximale à la rupture

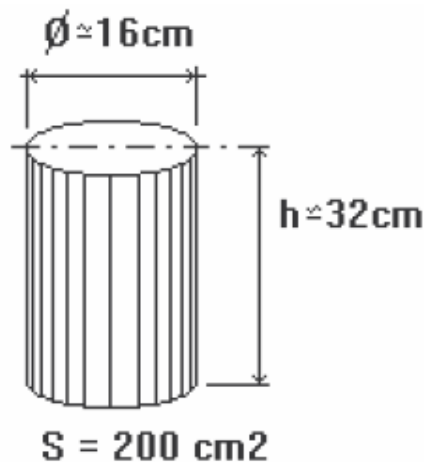


Figure I.3 : Eprouvette normalisée

Pour l'établissement des projets et dans les cas courants, un béton est défini par la valeur de sa résistance à la compression à 28 jours, dite valeur caractéristique requise. Elle est notée f_{c28} et choisie en fonction des conditions de fabrication du béton, de la classe du ciment utilisé et de son dosage au. Lorsque l'âge du béton est inférieur à 28 jours, on prend en compte pour les calculs de résistance f_{cj} , valeur caractéristique à j jours

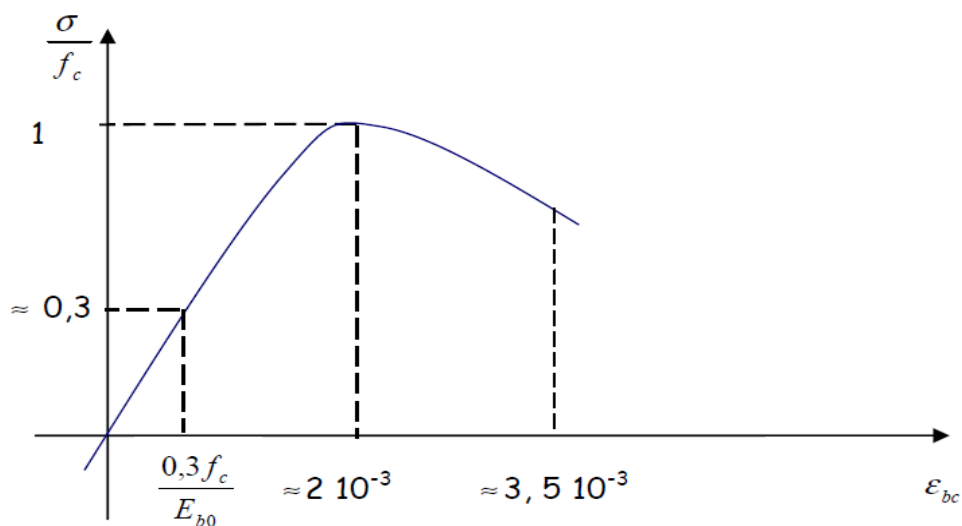


Figure I.4 : Courbe contrainte-déformation d'un essai de compression

On distingue les phases suivantes :

- La phase où le comportement est analogue à celui d'un matériau homogène et élastique, La déformation croît de façon linéaire jusqu'à environ de 30% de la contrainte ultime.
- La phase de développement de la microfissure, entre 30% et 100% de la contrainte ultime la courbe s'incurve et le comportement devient non-linéaire.
- L'atteinte du pic définit la contrainte ultime qui caractérise la résistance ultime du béton à la compression, elle correspond à une déformation de l'ordre de 2‰.
- La rupture se produit au-delà du pic, elle correspond à une déformation de l'ordre de 3.5‰.

II.1.1.2 Essais de traction :

Essais de traction : Le béton a une résistance en traction très faible par rapport à celle en compression. Le dépassement de cette résistance provoque l'apparition de fissures.

Pour les essais en traction indirecte, la déduction du comportement en traction nécessite une interprétation de l'essai via un modèle. Dans un essai de traction directe, la courbe contrainte déformation a l'allure suivante [1] :

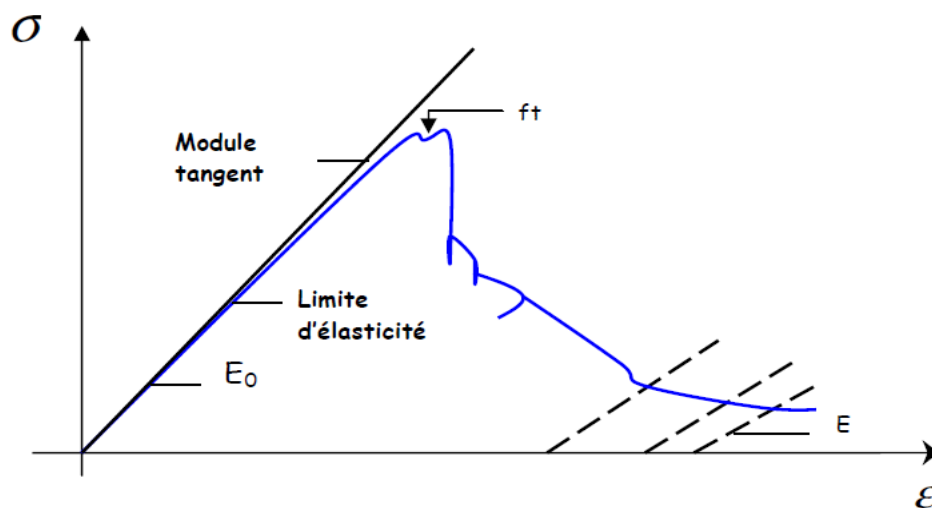


Figure I.5 : Comportement du béton en traction simple [1]

I.4. Les aciers

L'acier est introduit sous forme de barres d'armatures avant le bétonnage de l'élément d'où l'appellation du matériau béton armé. Il permet de pallier à la faible résistance du béton en traction et à sa fragilité.

L'acier présente une *très bonne résistance à la traction* (et aussi à la compression pour des élancements faibles), de l'ordre de 500MPa , mais si aucun traitement n'est réalisé, il subit les effets de la corrosion. Son comportement est ductile, avec des déformations très importantes avant rupture (de l'ordre de la dizaine de %).

Contrairement au béton, la loi contrainte-déformation de l'acier est supposé identique en compression qu'en traction, et elle dépend de la nature de l'acier. Généralement deux types d'acier sont utilisés pour le renforcement du béton ; l'acier naturel et l'acier écroui [8]. Pour un acier naturel, la courbe contrainte-déformation à l'allure de la figure I.6 ; elle est caractérisée par un palier de ductilité après l'atteinte de la limite élastique.

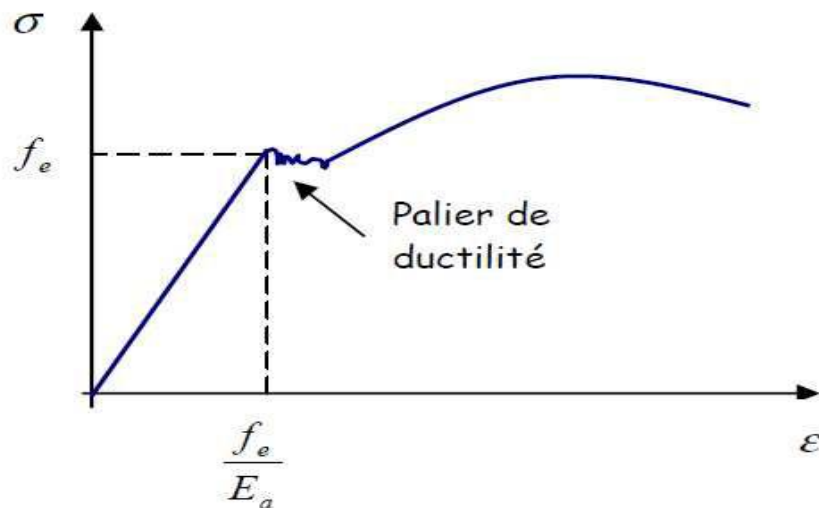


Figure I.6 : Loi de comportement d'un acier naturel [8].

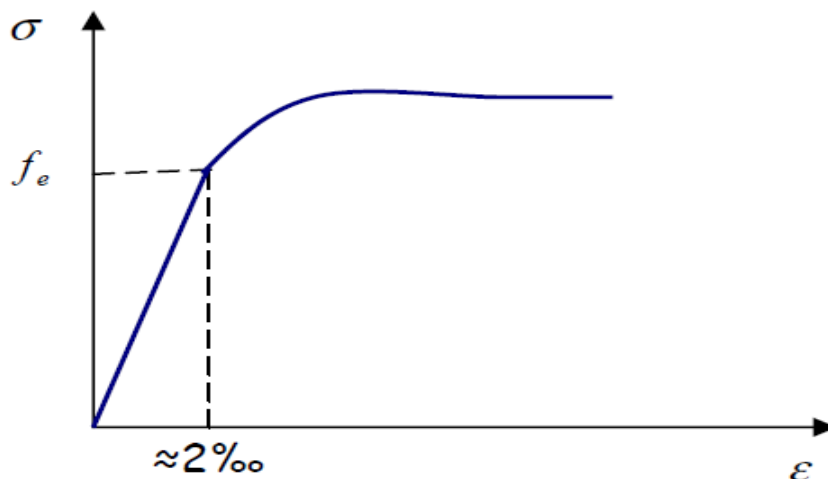


Figure I.7: Loi de comportement d'un acier écroui [8].

Pour les calculs réglementaire, le comportement des aciers est supposé élastoplastique parfait. La déformation ultime est fixée par le BAEL à 10%.

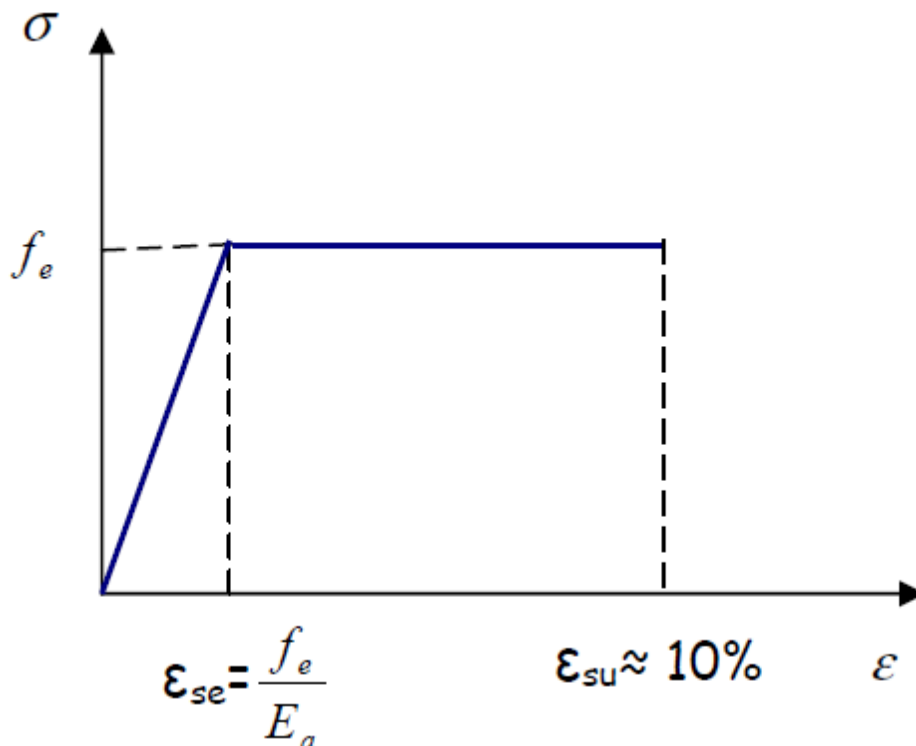


Figure I.8 : Diagramme contrainte-déformation selon le BAEL [9].

La figure II.8 suivante présente la loi de comportement pour un acier écroui. A noter que l'action d'écrouissage permet d'augmenter la limite d'élasticité en faisant disparaître le palier de ductilité et diminuer l'allongement à rupture. La limite élastique correspond à une déformation de l'ordre de 2%.

I.4.2 Caractéristiques mécaniques et comportement de l'acier

- La limite d'élasticité (f_e) est le caractère mécanique qui sert de base aux justifications, elle varie en fonction du type d'acier.
- Le module d'élasticité longitudinale (E) est pratiquement constant quel que soit l'acier utilisé et il est pris égal à : $E = 200\,000$ MPa.
- Les aciers de construction métallique sont essentiellement définis à travers leurs propriétés d'usage qui font l'objet de garanties.
- Le comportement de l'acier est semblable en traction et en compression, contrairement au béton. La loi contrainte-déformation dépend de la nature de l'acier.

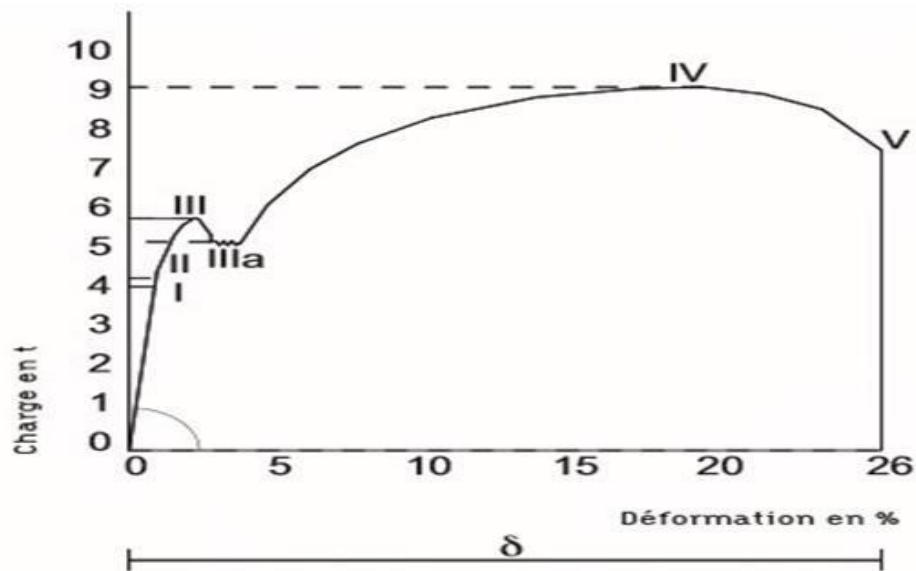


Figure I.9 : Diagramme charge-déformation (comportement réel de l'acier) [10].

Selon le diagramme suivant on trouve trois phases telles que :

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

Soumise à une traction suivant sa section, une barre en acier s'allonge uniformément jusqu'à une certaine limite, appelée limite d'élasticité. Il y a réversibilité du phénomène.

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

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

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

Après une phase d'allongement, la charge diminue car la section d'acier diminue. Ce phénomène est appelé « striction ». Il y a alors rupture de la barre. Par contre les règlements adoptent généralement un comportement des aciers Elasto-plastique parfait.

I.5 Le béton armé

Le béton armé et son adhérence :

Le principe du béton armé est de combiner le béton et l'acier de façon que :

- Les efforts de compression soient absorbés par le béton (et éventuellement par l'acier)
- Les efforts de traction soient absorbés par l'acier.

L'association acier-béton est rendu possible grâce à :

- L'adhérence acier-béton, permettent la transmission des efforts entre les deux matériaux.
- L'analogie des coefficients de dilatation très voisins (de l'ordre de 12.10^{-6}).
- L'absence de réactions chimiques nuisibles entre la pâte de ciment et l'acier. Par ailleurs, le béton enrobant l'acier le protège de la corrosion.

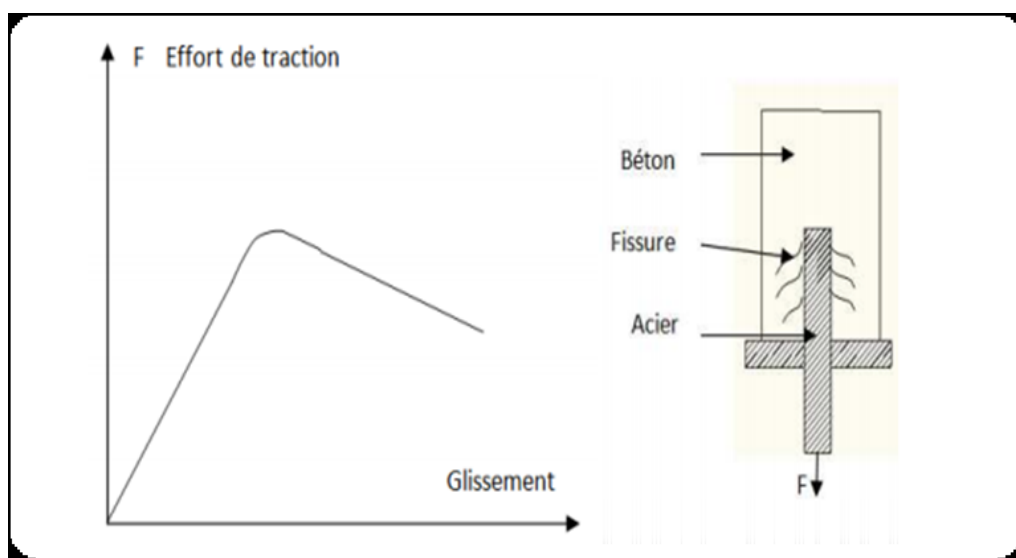


Figure I.10 : Comportement d'une barre d'acier soumise à un essai d'arrachement [11]

L'adhérence est favorisée par :

- L'état de surface et la forme de la barre d'acier :** L'adhérence est améliorée lorsque la barre possède des nervures en saillies ou lorsque sa surface est rugueuse [21].
- La qualité du béton d'enrobage:** L'adhérence croît avec la résistance en compression du béton, c'est-à-dire avec le dosage et la classe du ciment et aussi par les conditions de vibration lors du coulage.
- La position de la barre :** La position de la barre dans le coffrage et son inclinaison par rapport la direction de bétonnage, influent sur la valeur de l'adhérence [22].
- Diamètre des barres :** L'adhérence diminue avec une augmentation du diamètre des barres. Cette diminution varie de 5% et 30%.

I.6 Les matériaux composites

Les matériaux composites, appelés souvent composites, sont des matériaux solides et multiphasiques. Ils sont une combinaison de matériaux de composition ou de formes différentes et sont constitués d'au moins deux matériaux immiscibles aux caractéristiques complémentaires. La zone de contact entre chacun des matériaux constitue l'interface, dont la qualité est très influente sur les caractéristiques mécaniques et physiques du composite.

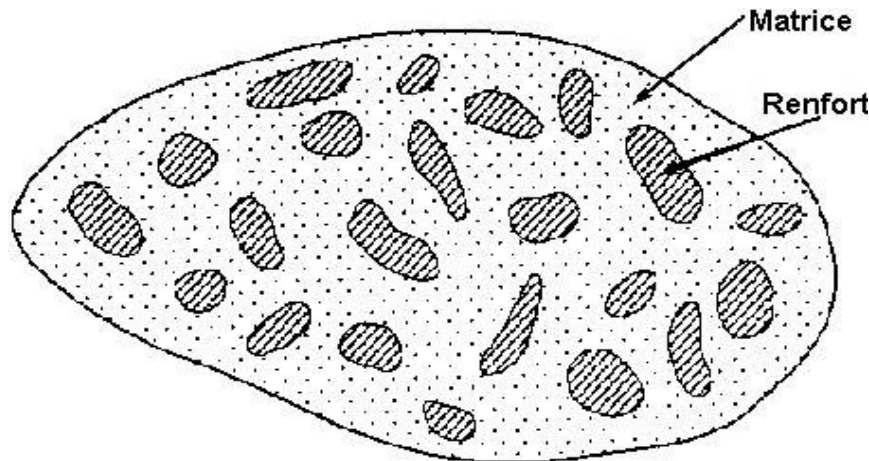


Figure I.11: Schéma illustratif d'un matériau composite [14]

I.6.1 Les fibres

Un béton de fibre est un matériau composite constitué d'une matrice le béton et d'un renfort, la fibre dans un béton fibré, les fibres n'ont d'autre rôle que de reprendre des efforts au travers des fissures créées dans la matrice. En d'autres termes, les fibres ne sont utiles que s'il y a des fissures potentielles dans le matériau [15].

L'une des caractéristiques mécaniques primordiale de la fibre qui permet la maîtrise de la fissuration est le module de Young, qui caractérise la rigidité de la fibre, en effet plus le module de Young de la fibre est important, le contrôle des fissures est meilleur et la longueur de fissures diminue, à condition que le bon ancrage des fibres dans le béton soit assuré.

Type de fibres :

Il existe plusieurs types de fibres, ils sont classés selon leur origine (naturelles ou artificielles), leur diamètre et leur longueur (macro ou micro fibres), leur forme et leur état de surface (lisse, rugueuse, plate, ondulée, crantée...). Leurs propriétés mécaniques, résistance à la traction et adhérence au béton, leur procurent un comportement mécanique spécifique aux

structures renforcées de fibres. Le choix des fibres dépend de l'usage recherché (pièces minces ou massives, renforcement de pâte pure, de mortier ou de béton, réparation des structures), de leurs propriétés (résistance et module élevés, bonne adhérence) et de leur prix. Les différents types de fibres sont :

a. Fibres artificielles :

Cette famille de fibre regroupe les fibres d'acier, les fibres de fonte, les fibres de verres, les fibres de carbone, amiante ...etc. Ces fibres sont utilisées dans le domaine industriel et particulièrement dans le domaine de génie civil

b. Les fibres de verre :

Les fibres de verre sont obtenues par fabrication à partir de verre fondu qui passe dans une filière, chauffé par effet de joule. Elles présentent de bonnes caractéristiques mécaniques, elles sont disponibles dans le commerce sous forme de bobines. Les fibres « E » sont sensibles aux alcalis libérés par l'hydratation du ciment. L'emploi de ce type de fibres dans le béton nécessite l'incorporation de polymères ou autres ajouts au mélange, au moment du gâchage qui ont pour fonction d'enrober la fibre et de la protéger de l'attaque alcaline.

Les fibres AR (alcali-résistantes) sont obtenues avec un verre riche en zirconium moins sensible aux alcalis.

Les principales propriétés des fibres de verre sont :

- Bonne adhérence avec la matrice.
- Bonne résistance à l'humidité et à la corrosion.
- Faible conductibilité thermique.

Fibres métalliques :

Leur résistance à la traction doit être supérieure à 1000 MPa selon la norme NF EN ISO 16120-2 et [16]. La longueur de la fibre doit être trois fois plus grande que le diamètre du plus gros granulats. La géométrie de la fibre doit favoriser son ancrage dans la matrice béton (ex : un façonnage symétrique en forme de baïonnette appelée "crochet" optimise l'ancrage de la fibre dans la matrice béton). Ce type de fibre est le plus utilisé dans le domaine de génie civil et qui a fait l'objet de plusieurs recherches. [17]

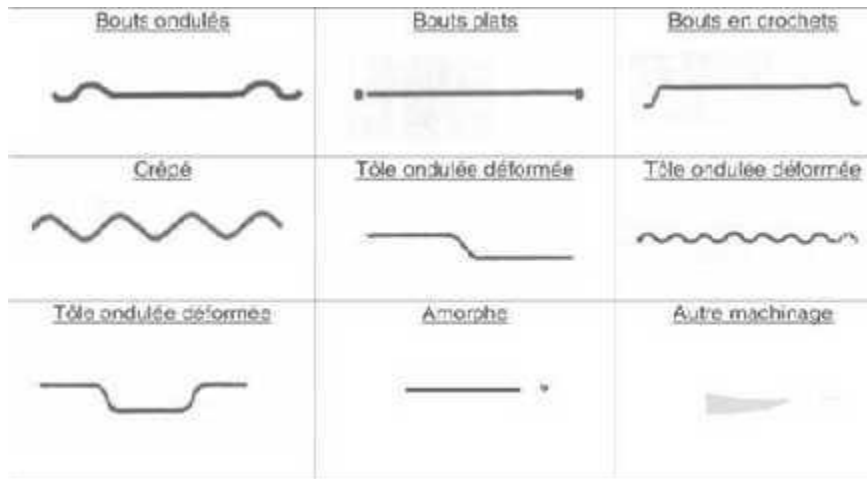


Figure I.12: Les différentes formes des fibres métalliques [32].

Les fibres de polypropylène :

Les fibres de polypropylène sont fabriquées depuis 1954 par l’industrie textile. Le polypropylène est un polymère cristallisable de la famille des polyoléfines des produits chimiques. Il a connu une extension croissante dans ce domaine où il apporte les avantages suivants : déformabilité élevée et bonne résistance en traction qui peut atteindre 800 MPA. Ces fibres sont utilisées dans les bâtiments pour l’élaboration de revêtement de façades dans plusieurs constructions (Londonderry House Hôtel), ainsi que l’élaboration de panneaux décoratifs de 33cm d’épaisseur aussi dans la réalisation des canalisations et des pieux.



Figure I.13: Fibres de polypropylène [50].

Fibres naturelles

Les fibres naturelles sont utilisées depuis 3000 ans dans les composites, par exemple dans L’ancienne Égypte, où la paille et l’argile étaient mélangées pour construire des murs.

Au cours de la Dernière décennie, les composites renforcés de fibres naturelles ont reçu une attention croissante, tant auprès du monde universitaire que de diverses industries. Il existe une grande variété de fibres naturelles qui peuvent être utilisées pour le renforcement ou comme charges. Les principales catégories de fibres agricoles sont :

- Fibres libériennes : extraites de la partie extérieure de la tige (lin, chanvre, jute, ...)
- Fibres extraites des feuilles : fibres de sisal, de bananier, de palmier...
- Fibres extraites de poils séminaux des graines : fibres de coton, de kapok...
- Fibres extraites de l'enveloppe du fruit : fibres de coco...
- Fibres extraites des tiges ou des troncs : paille de blé, de riz, d'orge ou d'autres cultures les fibres naturelles contiennent principalement de la cellulose, de l'hémicellulose et de la lignine [19].

Carbone: Il existe deux types de fibres de carbone, celles à haute résistance (HR) issues d'une mise en œuvre par carbonisation, et celles à haut module (HM) issues d'une fabrication par graphitisation [20].

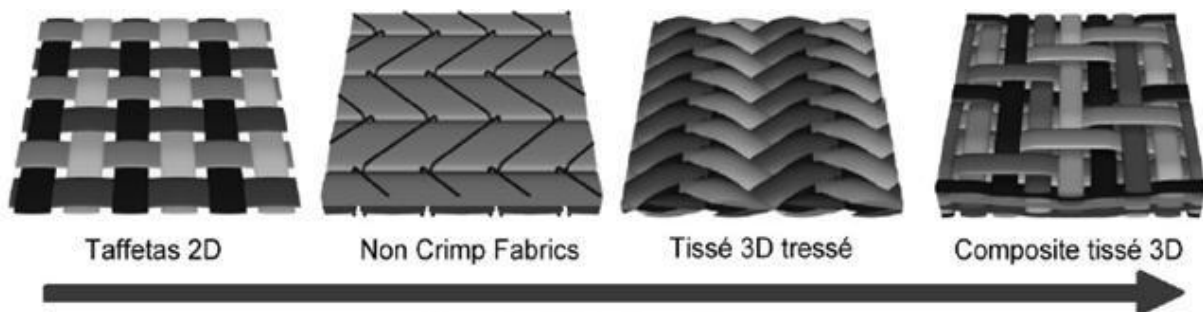


Figure I.14: Différentes armures utilisées pour les matériaux composites tissés [24]

Les fibres de carbone ont une très bonne tenue thermique et un très faible coefficient de dilatation.

Les fibres de carbone ont un module d'Young en traction de l'ordre de **230GPa**, une résistance en traction de **2500 à 5000MPa**, et une déformation à la rupture **de 0,5 à 2%**. Un composite composé de fibres de carbone HR et d'une matrice époxy ou Vonylester a les caractéristiques mécaniques suivantes :

- Module d'Young longitudinal en traction : 155 -165GPa.
- Résistance longitudinale en traction : 500 - 3000Mpa.
- Déformation à la rupture : 1,2 à 1,3 %.

Les matrices

La matrice fournit le mécanisme nécessaire au transfert de la charge mécanique aux fibres (renfort), comme elle a le rôle de lier les fibres entre elles et les protéger de l'environnement extérieur : risques d'abrasion et des attaques chimiques [21].

Il existe trois types principaux de matrices :

- **Résine thermodurcissable (TD):** polymère transformée en un produit essentiellement infusible et insoluble après traitement thermique (chaleur, radiation) ou physicochimique (catalyse, durcisseur). La transformation est irréversible.
- **Résine thermoplastique (TP):** polymère pouvant être alternativement ramollie par chauffage et durci par refroidissement dans un intervalle de température du polymère étudié.
- **Matrices métalliques et céramiques :** Sont utilisées respectivement pour les applications hautes (<500°C) et très hautes températures (>1000°C). Le coût de fabrication de ces matériaux est très élevé. [13].

En génie civil, les résines thermodurcissables sont utilisées presque exclusivement, telles que les matrices vinylesters, polyesters et époxy [14].

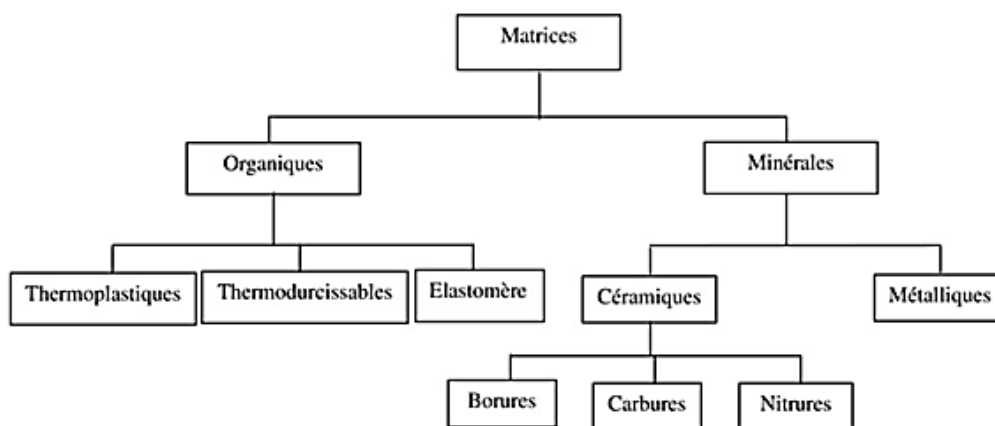


Figure I.15 : Organigramme illustrant les différentes familles de matrice [31].

Comportement mécanique des composites

Dans les matériaux composites, les fibres reprennent principalement des efforts dans leur direction. La matrice, quant à elle, transfère les contraintes aux fibres, et les protège.

La Figure I.18, montre des courbes (contraintes-déformations) typiques pour des différents composites et sous chargement de traction directe comparativement à celui des aciers.

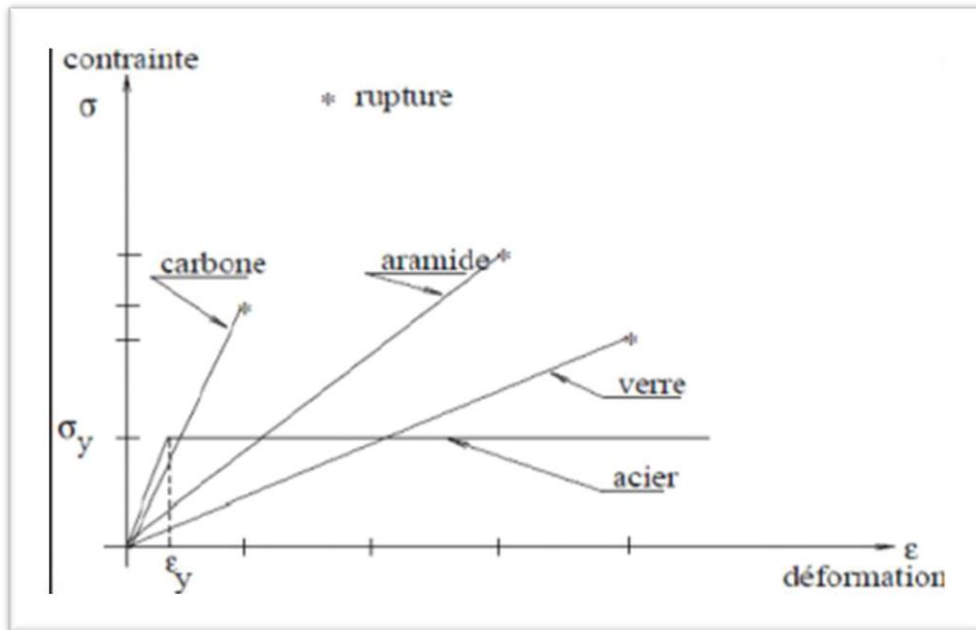


Figure I.16 : Confrontation du comportement des composites et de l'acier [26].

I.6.4 Modélisation des composites

Les matériaux composites sont constitués de couches unidirectionnelles. Les uns dans le sens des chaînes, les autres dans le sens des trames, possédant trois plans de symétrie orthogonaux deux à deux, et se comportent d'un point de vue élastique comme un matériau orthotrope. [29]

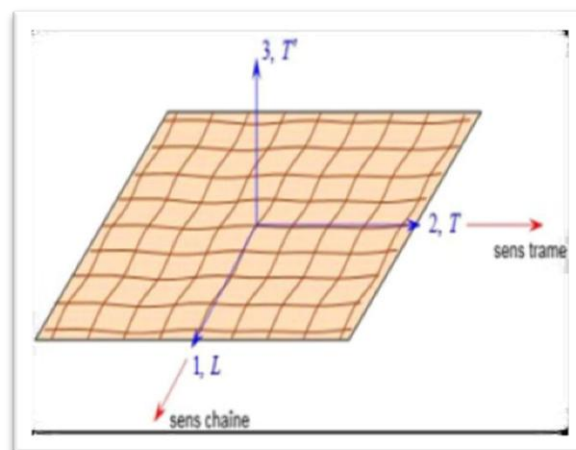


Figure I.17 : Couche de matériau composite orthotrope [51]

De plus, un matériau composite possède deux plans de symétries perpendiculaires et un troisième axe, ce type de matériau est dit orthotrope. Un matériau orthotrope est caractérisé par 9 constantes élastiques indépendantes si les plans de symétries sont connus

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques définitions et notions sur les matériaux : béton, acier et composites, ainsi que leurs principaux constituants. En effet, les composites en renforcé de fibre FRP présentent des caractéristiques améliorées comparé aux matériaux traditionnels.

Par conséquent, l'objectif assigné dans le deuxième chapitre est de présenter une revue détaillée, sur le comportement mécanique des poteaux en béton armé renforcés par collage de matériaux composites.

Chapitre II

Comportement et réparation des poteaux en béton armé

II.1 Introduction

La superstructure est la partie supérieure du bâtiment, située au-dessus du sol. Elle est constituée de l'ensemble des éléments de contreventement : Les portiques (poteaux – poutres) et les voiles. Ces éléments sont réalisés en béton armé. Leur rôle est d'assurer la résistance et la stabilité de la structure avant et après le séisme. Cependant ces derniers doivent être bien armés et bien disposés de telle sorte qu'ils puissent supporter et reprendre la totalité des sollicitations. En effet, à travers ce chapitre, une description réglementaire du dimensionnement et ferrailage des poteaux est présentée, suivie d'une présentation du comportement linéaire et non-linéaire des éléments d'un poteau. Après avoir lister les différents mécanismes de ruines et les différentes techniques de renforcement, une revue de littérature sur les travaux expérimentaux antérieurs portant sur le renforcement des poteaux en béton armé par collage externe des matériaux composites est mis en point.

II.2 Description réglementaire

Selon le règlement parasismique algérien (RPA 2003) [25] les éléments poteaux sont dimensionnés comme suit :

Les poteaux sont des éléments en béton armé dont la forme est généralement carrée, rectangulaire ou circulaire.

- **Principe :** Les poteaux sont pré-dimensionnés en compression simple en choisissant les poteaux les plus sollicités de la structure. C'est-à-dire, un poteau central, un poteau de rive et un poteau d'angle. Chaque type de poteau est affecté de la surface du plancher chargé lui revenant, et on utilisera un calcul basé sur la descente de charge.
- **Etapas de pré- dimensionnement :**
 - Calcul de la surface reprise par chaque poteau.
 - Évaluation de l'effort normal ultime de la compression à chaque niveau. - La section du poteau est alors calculée aux états limite ultime (ELU) vis-à-vis de la compression simple du poteau.
 - La section du poteau obtenue doit vérifier les conditions minimales imposée par le « RPA99 version 2003 ».
- **Dimensionnement des poteaux :**

$N_{br} \geq K \beta N_u f_{bu} 0, + 0, 100 f_{ed}$ Tel que :

$k = 1.10$ si plus de la moitié des charges est appliquée avant 90 jours. $k = 1.20$ si plus de la majeure partie des charges est appliquée avant 28 jours

$k = 1$ pour les autres cas.

Br : section réduite du poteau (en cm^2) $f_{bu} = 0.85 f_{c28} \theta \gamma_b = 14,2$ Mpa.

$f_{ed} = f_e \gamma_s = 348$ Mpa.

f_{c28} : résistance à la compression de béton $f_{c28} = 25$ MPa.

f_e : limite d'élasticité de l'acier utilisé $f_e = 400$ MPa. $\gamma_b = 1,5$ $\gamma_s = 1,15$ $\theta =$ est en fonction de la durée d'application des combinaisons d'action.

Dans notre cas : $\theta = 1$: Coefficient dépendant de l'élançement mécanique « λ » des poteaux qui est défini comme suit :

- Si $\lambda < \lambda < 70$: $\beta = 0,60 (50 / \lambda)^2$ Comme le calcul se fait en compression centrée, on fixe l'élançement mécanique forfaitairement à $\lambda = 35$ (pour que toutes les armatures participent à la résistance).

$Br \geq 1 \times 1, Nu 14, 0, + 0, 100 \times 348 = 0,65 Nu (cm^2)$ Pour une section carrée $Br = (a - 0,02)^2$ d'où :

$a = \sqrt{Br + 0,02} (m)$. Et pour tenir Compte de l'effet sismique On prend une majoration dynamique de 1,2 où : $\beta = 1 + 0,2 \times 1 = 1,2$

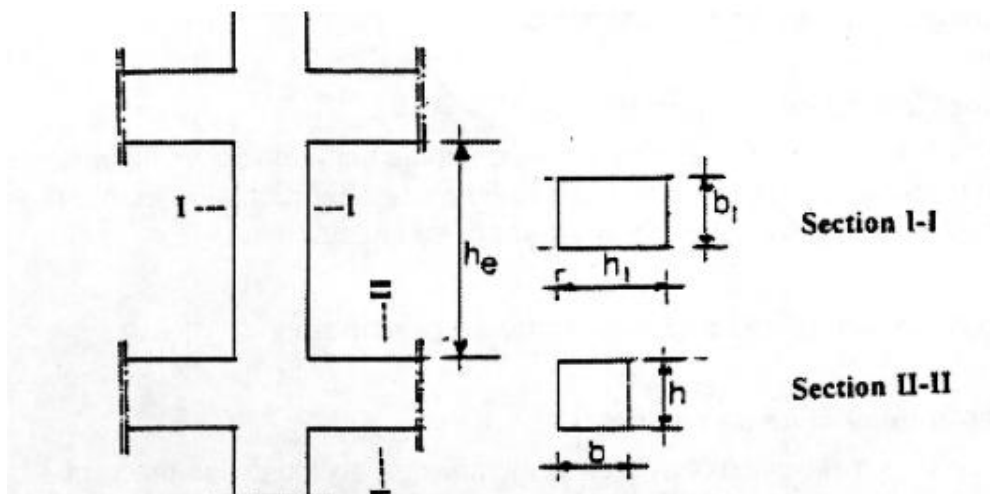


Figure II.1 : Coffrage des poteaux selon le RPA (2003) [25]

Les dimensions de la section transversale des poteaux doivent satisfaire les conditions suivantes (voir Figure II.1 et le tableau II.1) :

Tableau II.1: Détail de dimensionnement des sections du poteau [25]

Section rectangulaire	Section circulaire
-Min (b1, h1) ≥ 25cm en zones I et II	D ≥ 25cm en zone I
-Min (b1, h1) ≥ 30 cm en zone III	D ≥ 30cm en zone II
-Min (b1, h1) ≥ he/20	D ≥ 35cm en zone III
Tel que : 1/4 < b1/h1 < 4	D ≥ he/15

II.2.3 Ferrailage

- **Les armatures longitudinales :** Les armatures longitudinales doivent être à haute adhérence, droites et sans crochets :

Tableau II.2 : Les conditions sur les armatures longitudinales [25]

Le pourcentage total minimum des aciers	Le pourcentage total maximum des aciers	La longueur minimale de recouvrement	L'espacement entre les barres	Le diamètre minimum
- 0,7% en zone I - 0,8% en zone II - 0,9% en zone III	- 4% en zone courante - 6% en zone de recouvrement	40 Ø en zone I et II - 50 Ø en zone II	- 25 cm en zone I et II - 20 cm en zone III	12m

- **Les armatures transversales :** Les armatures transversales des poteaux sont calculées à l'aide de formules suivantes :

$$\left(\frac{A_t}{t} = \frac{(P.V_u)}{(H1.f_e)} \right) \quad \text{(II.1)}$$

Tableau II.3 : Les conditions sur les armatures transversales [25]

	La zone nodale	La zone courante	Quantité d'armatures transversales minimale At/t.b1 en %
$p_a=2.5$ Si $\lambda_g \geq 5$			
$p_a=3.75$ Si $\lambda_g \leq 3$	- t ≤ Min (10 Øl, 15cm) en zone I et II - t ≤ 10cm en zone II	-t' ≤ 15 Øl en zone I et II -t' ≤ Min (b1/2, h1/2, 10 Ø1) en zone II	Si $\lambda_g \geq 5$: 0,3% Si $\lambda_g \leq 3$: 0,8% Si $3 < \lambda_g < 5$: Interpoler entre les valeurs limites

II.2.4 Vérifications spécifiques

Tableau II.4 : Vérification spécifiques du ferrailage des poteaux [25]

Sollicitations normales	Outre les vérifications prescrites par le C.B.A et dans le but d'éviter ou limiter le risque de rupture fragile sous sollicitations d'ensemble dues au séisme, l'effort normal de compression de calcul est limité par la condition suivante : $V = \frac{Nd}{Bc \cdot fc28} \leq 0.3$
Sollicitations tangentes	bu sous combinaison τ La contrainte de cisaillement conventionnelle de calcul dans le béton sismique doit être inférieure ou égale à la valeur limite suivante : $\zeta = Pd \cdot fc28$
Effort normal réduit	On entend par effort normal réduit, le rapport : $V = \frac{Nd}{BC \cdot fcj} \leq 0.3$

Comportement des éléments d'ossatures auto stables

Les éléments d'ossatures auto-stables sont des composants structurels qui sont conçus pour résister aux charges et maintenir leur stabilité sans nécessiter de support supplémentaire. Ils sont souvent utilisés dans la construction d'édifices et de structures où la légèreté, la

résistance et la simplicité de construction sont des facteurs importants. Voici quelques exemples d'éléments d'ossatures auto-stables et de leur comportement :

- **Arcs et voûtes** : Les arcs et les voûtes sont des éléments courbés qui transmettent les charges verticales vers les supports situés aux extrémités. Leur forme courbe permet de distribuer les charges et de les transformer en forces de compression qui sont résistantes à la flexion. Les arcs et les voûtes peuvent être utilisés pour créer des structures comme les ponts en arc, les tunnels et les grandes salles voûtées.
- **Dômes** : Les dômes sont des structures hémisphériques ou en forme de coupole qui peuvent être auto-stables. La forme courbe des dômes permet de répartir les charges uniformément sur toute leur surface, ce qui réduit les contraintes et augmente leur résistance structurelle. Les dômes sont utilisés dans la construction de bâtiments emblématiques tels que les cathédrales, les stades et les musées.
- **Coques minces** : Les coques minces sont des éléments structurels qui ont une épaisseur relativement faible par rapport à leur dimension. Elles peuvent prendre la forme de coques cylindriques, coniques ou sphériques. Les coques minces sont capables de supporter des charges en utilisant principalement des forces de compression et de flexion. Elles sont couramment utilisées dans la construction de réservoirs, de silos et de structures en béton précontraint.
- **Structures treillis** : Les structures treillis sont constituées d'éléments linéaires, tels que des barres ou des tubes, reliés par des nœuds. Les treillis sont conçus pour résister aux forces de traction et de compression. Leur configuration triangulaire offre une grande rigidité et une résistance élevée avec une quantité minimale de matériau. Les structures treillis sont utilisées dans la construction de tours, de ponts et de structures légères telles que les passerelles.

II.3.1 Comportement non linéaire des poutres et des poteaux

Les poutres et poteaux en béton armé sont caractérisés par un comportement non linéaire en flexion et en cisaillement. La poutre est modélisée par des éléments de poutre élastiques avec des rotules plastiques concentrées à ses extrémités. Les poteaux sont modélisés de la même façon en tenant compte du comportement du moment résistant de la section RC du poteau en fonction de l'effort normal appliqué au poteau.

II.3.2 Comportement des éléments poteaux

La différence entre les éléments poutres et les éléments poteaux est la présence d'efforts normaux dans ces derniers, le comportement des poteaux de section carrée ou rectangulaire, en béton armé, soumis à des sollicitations cycliques en flexion composée, le paramètre considéré est la résistance plusieurs auteurs ont étudié expérimentalement La variation de l'effort normal, la disposition et l'écartement des barres d'acier transversales sont étudiés. Les ouvrages suivants peuvent être cités :

- Essai de Grelat [26].
- Essai de Park et al [27].
- Essai Saataggiolu et Ozcebe [28].
- Essai de Yongping Xie et all [29].
- Lors du premier cycle de chargement-déchargement, des fissures ont été observées sur les deux parties étirées en continu par flexion.
- La rupture se caractérise par une plastification de l'armature dans les zones de traction et de rupture lorsque l'effort normal est faible.
- La fissuration est obtenue par écrasement du béton dans la zone de compression lorsque l'effort normal est élevé

Les poteaux d'angle sont les plus vulnérables pour les raisons suivantes :

- Ils sont cisailés dans les deux sens horizontaux, même si les deux efforts tranchants ne sont pas à leur maximum en même temps.
- Elles ne supportent que le poids d'un quart de la travée en charge verticale, tandis que la poussée des bielles, qu'elles doivent équilibrer, correspond à toute la travée.

II.3.5 Définition des performances :

Un niveau de performance décrit une condition limite d'endommagement d'une structure donnée sous une action sismique donnée. Les états limites concernant la vie sauve des occupants ou la sécurité de la structure sont définis comme étant les états limite ultimes, ceux concernant le bon fonctionnement et l'occupation sans danger de la structure avec endommagement des éléments secondaires sont les états limite de service. D'autres états

intermédiaires peuvent être considérés. L’Eurocode 8 ainsi que le RPA 99 considèrent deux états limites à savoir :

- Etat de non endommagement local considéré comme état limite ultime qui assure la vie sauve des occupants sous une action sismique rare.
- -Etat d'endommagement léger des éléments secondaires ainsi que l'occupation et le fonctionnement de la structure sans danger sous un séisme modéré.

La performance cible peut être un niveau de contrainte à ne pas dépasser, une charge, un déplacement, un état limite ou un état d'endommagement cible. La figure I.3 représente la relation entre les différents niveaux de performance et les états d'endommagement correspondants.

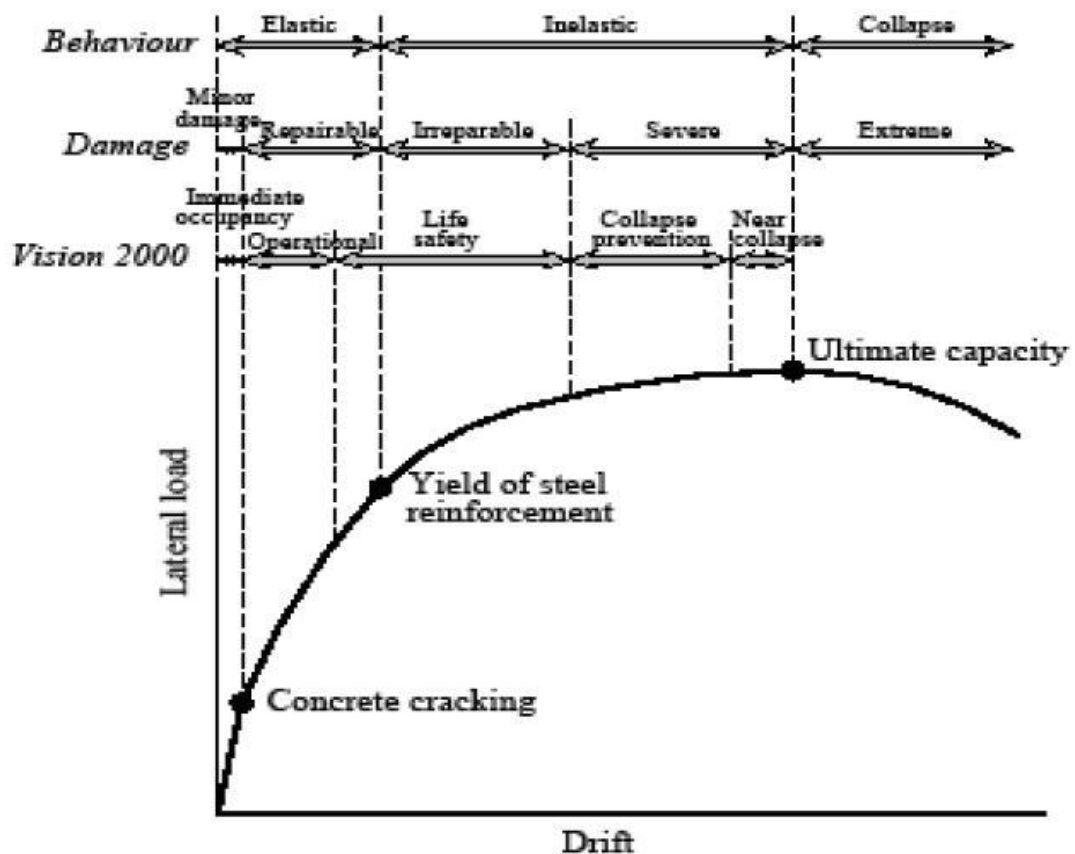


Figure II.2 : Performance structurelle typique et niveau d'endommagement associé [4]

II.4 Nécessité de renforcement

De nombreux facteurs conduisent au renforcement structurel.

Parmi les structures elles-mêmes, les plus courantes sont résumées par [34] comme :

- ✓ Rénovation d'un immeuble ancien.
- ✓ Renforts mal placés ou inadéquats.
- ✓ Construction d'une salle des machines dans un bâtiment industriel. Défauts liés à l'exécution dans la réalisation du projet.
- ✓ Mauvais matériel. Dimensions insuffisantes des éléments structurels.
- ✓ Augmentation des charges qui sollicitent la structure.
- ✓ Réutilisation de bâtiments (ex. transformation d'un immeuble résidentiel en centre commercial).
- ✓ Augmentation de l'activité à l'intérieur des ouvrages (ex. ponts anciens soumis à un trafic continu).
- ✓ Les charges (vibration, action sismique, etc.) qui n'ont pas été prises en compte lors du projet ou de la construction nécessiteront l'examen d'un renforcement.
- ✓ Corrosion et réduction des sections transversales des barres d'armature en béton.
- ✓ Vieillesse du matériau où il perd ses propriétés d'origine.
- ✓ La forme de la structure change. Suppression de piliers, murs porteurs, extension des portées calculées. Prévoir un passage d'ouverture dans le plafond des escaliers et des ascenseurs ; dommages structurels. Efforts pour améliorer nos conditions d'utilisation. Réduit le gauchissement et l'affaissement. Réduire la résistance à la contrainte du raidisseur ; réduire l'ouverture des fissures



Figure II.3 : Effondrement partiel d'un bâtiment faute de mauvaise conception (séisme Boumerdes 2003) [30]



Figure II.4 : Fissures en «X», dislocation de la section, Rupture par écrasement du béton du au remplissage partiel [37]



Figure II.5 : Éclatement du béton d'enrobage au niveau des zones nodales [37].



Figure II.6 : Rupture par flambement de poteaux [38].

II.2 Les cause des dommages et les dégradations du béton

- 1. Exposition aux agents chimiques :** Certains agents chimiques présents dans l'environnement peuvent réagir avec les composants du béton et causer sa détérioration. Parmi ces agents, on retrouve les sels de déverglaçage, les acides, les sulfates, les chlorures, etc.
- 2. Carbonatation :** La carbonatation est un phénomène dans lequel le dioxyde de carbone atmosphérique réagit avec la chaux libre présente dans le béton. Cela réduit le pH du béton, ce qui peut entraîner la corrosion des armatures métalliques internes.
- 3. Corrosion des armatures :** Lorsque les armatures en acier du béton sont exposées à l'humidité et à l'oxygène, elles peuvent se corroder. La corrosion des armatures provoque l'apparition de fissures et la formation d'efflorescences, ce qui peut affaiblir la structure du béton.
- 4. Gel et dégel :** Dans les régions où les températures peuvent passer en dessous de zéro, l'eau présente dans les pores du béton peut geler et se dilater, provoquant des contraintes internes. Les cycles répétés de gel et de dégel peuvent entraîner des fissures, des éclats et une dégradation générale du béton.

5. **Réaction alcali-silice (RAS) :** Certains granulats utilisés dans la fabrication du béton peuvent réagir avec les alcalis présents dans le ciment, formant un gel expansif. Cette réaction peut entraîner la formation de fissures et une perte de résistance mécanique.
6. **Surcharge et contraintes excessives :** Lorsque la charge sur une structure en béton dépasse sa capacité de résistance, cela peut entraîner des déformations permanentes, des fissures et même un effondrement partiel ou total.
7. **Érosion et abrasion :** L'exposition à des forces mécaniques telles que l'érosion due à l'eau, au vent ou aux particules abrasives peut endommager la surface du béton, entraînant une perte de l'épaisseur de la couche protectrice et une diminution de la résistance.
8. **Mauvaise conception ou exécution :** Des erreurs dans la conception ou la mise en œuvre du béton, telles que des défauts de mélange, une quantité insuffisante de ciment, un curing inadéquat, des joints mal placés, etc., peuvent entraîner des problèmes de durabilité et de résistance.

Il est important de noter que ces causes de dommages et de dégradations peuvent interagir les unes avec les autres, amplifiant ainsi leurs effets. De plus, chaque situation est unique et peut nécessiter une évaluation spécifique pour identifier les causes exactes des problèmes de béton rencontrés.

II.6 Méthodologie de renforcement

La technologie de renfort en polymère renforcé de fibres est l'une des technologies les plus efficaces pour améliorer la résistance des éléments de structure porteurs. De manière générale, les composites de type polymère renforcé de fibres FRP présentent des avantages considérables dans la protection, la réparation et le renforcement des structures ou éléments en béton armé.

Le processus de renforcement passe généralement par les étapes suivantes : [39]

1. Inspecter la surface de l'élément de structure à renforcer.
2. Réparer les fissures et les surfaces effritées avec une injection d'époxy et de mortier à base de résine époxy.

3. Préparer la surface de l'élément de structure (avec des meules et du sablage humide au besoin) en éliminant les saillies et en s'assurant que le profil est adéquat.
4. Appliquer une couche de mastic afin d'assurer l'adhérence des tissus de fibres.
5. Appliquer une première couche d'agent d'imprégnation.
6. Appliquer les tissus de fibres sur la surface, comme s'il s'agissait de papier peint.
7. Appliquer une deuxième couche d'agent d'imprégnation, une fois que les tissus auront bien durci, généralement au bout d'une heure.
8. Répéter les étapes 6 et 7, jusqu'à ce que toutes les couches de fibres soient installées

En cas de température basse et/ou d'humidité relative élevée, la surface du composite peut être devenue collante. Avant de poursuivre, il faut enlever ce film gluant en lavant en abondance la surface à l'eau, rincer puis laisser sécher.

Les photos suivantes présentes un résumé de mode opératoire de renforcement par les fibres de carbone :



1. Ponçage de la surface du support béton



2. Découpage du tissu en fibre de carbone



3. Application de la résine



4. Imprégnation du tissu



5. Mise en place sans étirement du tissu sur le support en béton



6. Marouflage : dégagement des bulles d'air Sur avec un rouleau

Figure II.7: mode opératoire de renforcement par les fibres de carbone [43].

II.7 Techniques de renforcement

Le renforcement est une opération qui valorise le niveau de service, notamment pour augmenter la ductilité et la résistance des éléments de structure pour permettre leur utilisation dans des conditions non prévues lors des phases de conception et de calcul. Parmi les techniques de renforcement, les plus courantes sont :

- Encastrement de profilés en acier.
- Collage d'éléments préfabriqués.
- Ajout d'armatures métalliques sans augmenter la section du béton avec ou sans ajout d'armatures métalliques [40]
- Ajout de plaques d'acier [41]
- Ajout de lattes ou bandes de matériaux composites [42]
- Renforcement NSMR : cette méthode consiste à sceller des tiges ou des bandes en polymère renforcé de fibres de carbone (CPRF) dans des rainures déjà préparées à la surface de la poutre à renforcer.
- Limitation : Par béton durci, on entend un volume de béton pourvu d'armatures transversales placées de manière à résister au gonflement du matériau sous contrainte de compression, ceci a un effet positif sur la courbe contrainte-déformation du béton.
- **Stratification au contact :**

Sur les chantiers, la technique la plus couramment utilisée pour renforcer les colonnes à l'aide de composites à base de fibres de polymère renforcé de fibres (PRF) est la stratification au contact, également appelée stratification directe.



Figure II.8 : Exemple de renforcement de colonnes par des matériaux composites [44]

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

Une autre méthode de renforcement des colonnes et des poteaux en béton armé (B.A) consiste à utiliser des chemises en polymère renforcé de fibres (PRF) sous forme de coquilles préfabriquées. Ces coquilles sont fabriquées dans des conditions contrôlées en utilisant des fibres en voile ou en bandes, préalablement imprégnées de résine, avant leur installation. Elles peuvent être conçues sous forme de demi-cercles, de demi-rectangles, de cercles avec une fente ou même sous forme de rouleaux continus, ce qui permet de les ouvrir et de les placer autour des colonnes. Afin d'assurer un confinement efficace, il est essentiel d'établir un contact total entre la colonne et la coquille en PRF.



Figure II.9 : Chemisage par coquille préfabriquée en «PRF»Teng et Lam (2002) [45].

Les coquilles préfabriquées en polymère renforcé de fibres (PRF) offrent une application intéressante dans les travaux de modification de forme des colonnes, en tant que mesure de renforcement. Cette approche a été discutée par Teng et Lam (2002), qui ont suggéré que les colonnes carrées ou rectangulaires peuvent être renforcées en les remodelant en colonnes circulaires ou elliptiques, en utilisant des coquilles préfabriquées en PRF. Cette méthode permet de donner à la colonne une forme supplémentaire en béton tout en offrant le confinement nécessaire une fois que le béton a durci [45].

II.8. Travaux antérieurs

Cette partie contient une revue de la littérature sur les techniques de certaines études expérimentales antérieures pertinentes sur la réparation et le renforcement des colonnes en béton armé utilisant des composites.

Y. Xie et al en 2018 [65] : Discutent de l'évaluation du comportement sismique des structures en béton armé et des avantages du renforcement local avec des FRP. Les auteurs ont développé un modèle pour décrire le comportement non linéaire des colonnes en béton armé de fibres de carbone sous chargement horizontal.

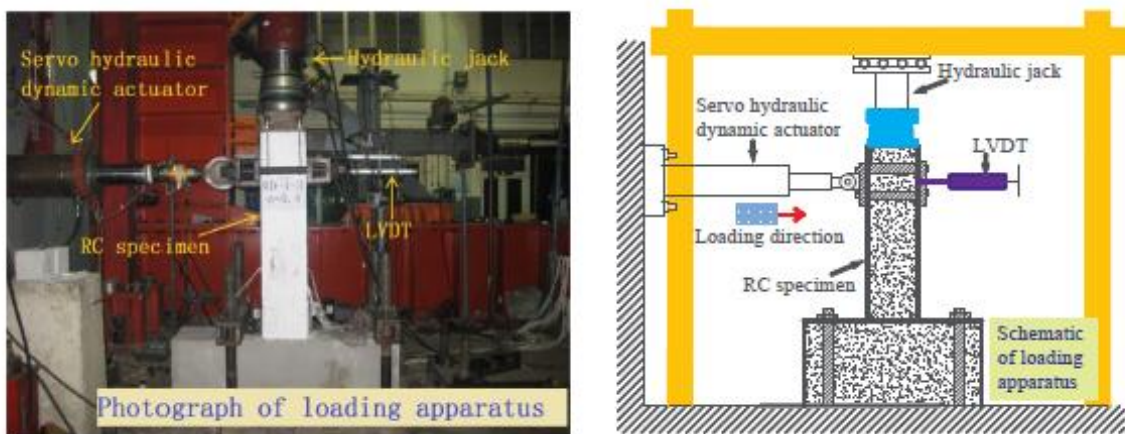
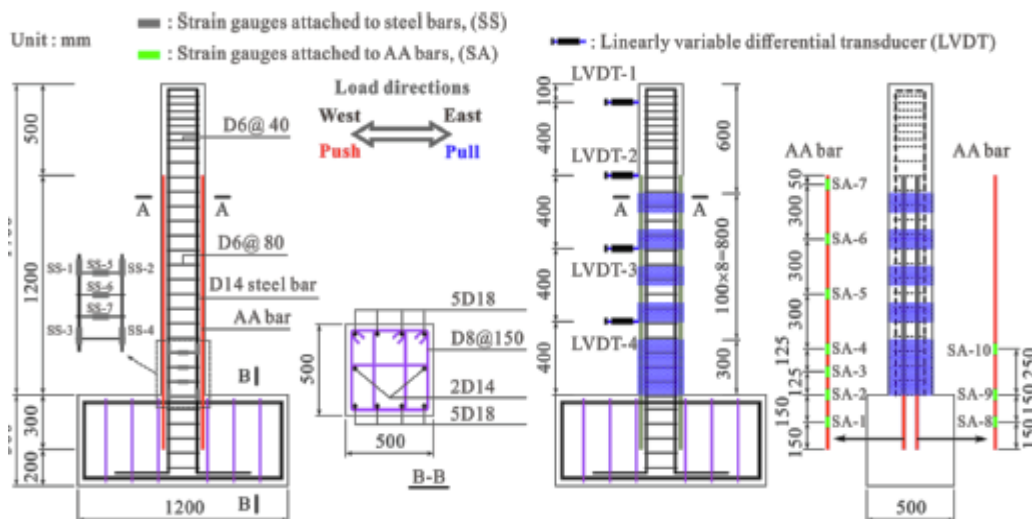


Figure II.10 : Détails structurel de la géométrie et du ferrailage du poteau par Xie et al [29].

H. Wang et al en 2022 [48] proposent une technique de renforcement proche de la surface en utilisant des barres en alliage d'aluminium (AA) et des enveloppes en polymère renforcé de fibres de carbone (CFRP) pour améliorer le comportement sismique du béton armé.



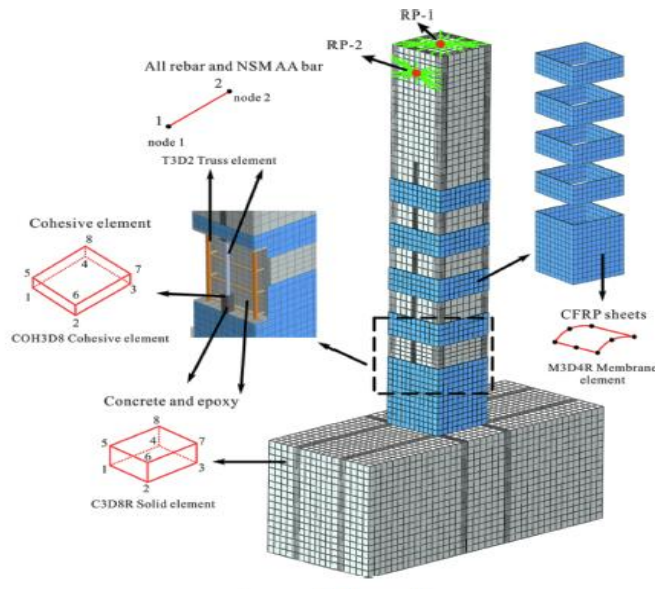


Figure II.11: Détails du modèle à éléments finis de Wang et al [48].

H. Huang et al en 2021 [46] : Pour étudier l'effet du rapport de compression axiale, du rapport de torsion-flexion et de l'excentricité sur la performance mécanique des colonnes en béton armé sous des charges combinées, les auteurs ont proposé la conception de renforcement de la figure II.12.

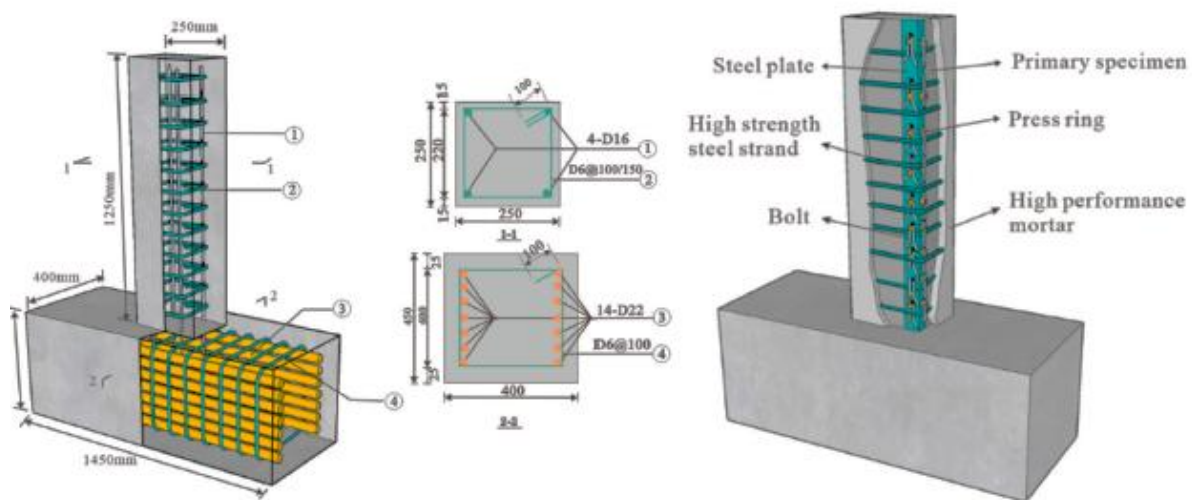


Figure II.12 : Description de la technique de renforcement testée par H. Huang et al [46].

Z. Chen et al 2021 [47] : Le polymère renforcé de fibres (PRF) a attiré une attention croissante en tant que méthode de renforcement des colonnes en tube d'acier remplies de béton (CFT) en raison de sa légèreté et de sa grande résistance en béton (CFT) en raison de sa légèreté et de sa grande résistance.

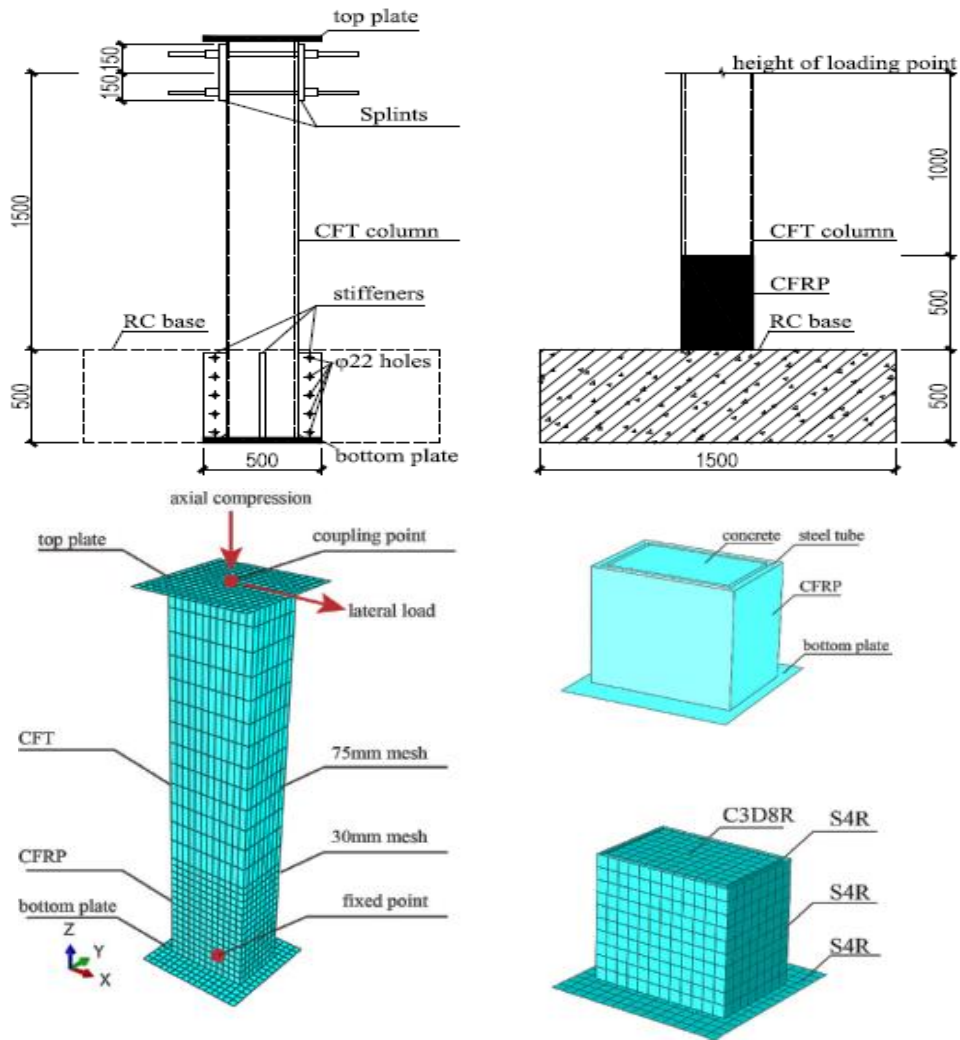
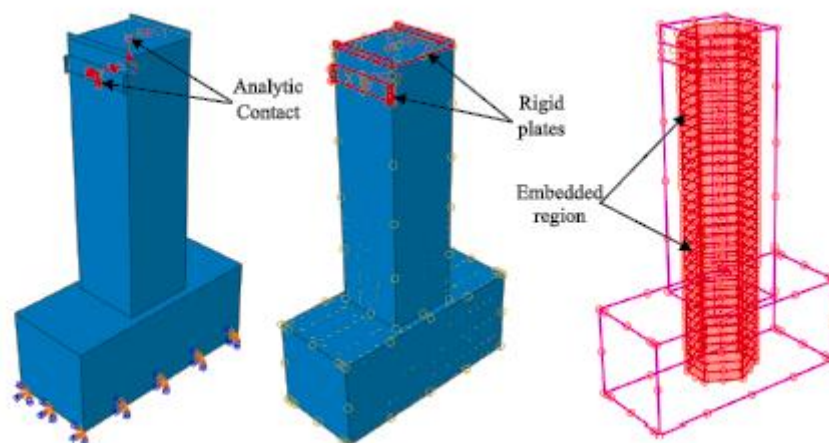


Figure II.13: Modèles expérimental et numérique de Z. Chen et al [47].

S. Djenad et al en 2023 [49] : proposent une technique de renforcement interne basée sur l'incorporation des cerces en fibre de verre de forme hexagonale en nid d'abeille.



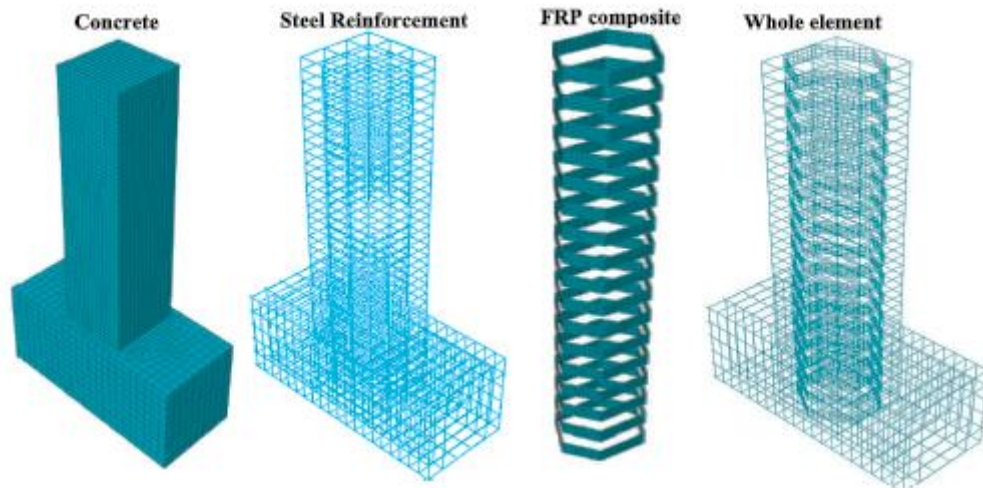


Figure II.14 : Modèles numériques de S. Djenad et al [49].

II.9 Conclusion

Le comportement des éléments de poteau décrit dans ce chapitre nous a permis d'énumérer les différentes causes qui ont conduit à l'utilisation de matériaux composites comme raidisseurs pour la réparation des zones dangereuses des poteaux en béton armé. Ces matériaux innovants sont largement utilisés dans la littérature car ils sont systématiquement utilisés pour augmenter la capacité portante et la ductilité des colonnes endommagées par l'action statique et sismique. Après avoir analysé diverses techniques proposées dans la littérature scientifique, nous proposons d'optimiser les paramètres adéquats par des simulations numériques.

Chapitre III

Modélisation et optimisation numérique

III.1 Introduction

Les simulations et les analyses numériques sont devenues presque indispensables dans l'étude du comportement des ouvrages d'art à échelle réelle, car elles ont un impact direct sur la qualité et le temps d'exécution. Ils sont apparus dans la volonté de minimiser le coût de la recherche expérimentale avec un nombre optimisé d'essais.

Par conséquent, dans ce chapitre, nous présenterons d'abord le programme ABAQUS et son fonctionnement, puis nous présenterons les différentes étapes de la modélisation d'une colonne en béton armé renforcée avec des bandes de fibres de carbone (CFRP). Le modèle géométrique et la sélection des modèles d'éléments finis pour le maillage sont générés dans l'espace tridimensionnel (3D) en tenant compte du comportement expérimental des matériaux composants. L'interaction des éléments individuels ainsi que les étapes d'assemblage et de chargement de la colonne renforcée sont également présentées.

III.2 Simulation avec ABAQUS

Avant d'utiliser le code informatique en production, il est important d'étudier ses capacités, notamment ses limites, à travers les tutoriels disponibles. ABAQUS est un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes mécaniques conçu pour simuler des phénomènes physiques. La modélisation de ces phénomènes permet de simuler avec précision le comportement expérimental des matériaux et de faire varier certains paramètres (géométriques, rhéologiques...) pour optimiser la conception

III.2.1 Présentation du logiciel ABAQUS

ABAQUS est un code de calcul basé sur la méthode des éléments finis (FEM), créé en 1978, a été développé par Hibbit, Karlson & Sorensen (HKS) [33]. Il est particulièrement reconnu pour sa technologie, sa qualité et sa

fiabilité. Ainsi, il offre les meilleures solutions pour les problèmes linéaires, non linéaires, explicites et dynamiques. Ce logiciel est une solution de simulation évolutive et se compose d'une solution d'analyse unifiée, il peut simuler n'importe quelle géométrie telle que : poutres, plaques, coques et éléments spéciaux (ressorts, masses, etc.) en deux ou trois dimensions. Voir (figure III.1). ABAQUS ne gère pas d'unités ; il appartient à l'utilisateur d'utiliser un système cohérent d'unités [34] comme indiqué dans le tableau III.1.

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

Masse	Langueur	Temps	Force	Pression	Energie
Kilogramme	Mètre	Seconde	Newton	Pascal	Joule
Gramme	Millimètre	Milliseconde	Newton	MPA	Mili joule
Tonne	Millimètre	Seconde	Newton	MPA	Mili joule
M	L	T	M.L.T-2	M.L-1.T-2	M.L2.T-2

III.2.1 Le CAE (Complete ABAQUS Environnement)

Une interface idéale pour la modélisation, la gestion et le post traitement des modèles ABAQUS dans laquelle l'utilisateur peut effectuer la totalité de la mise en donnée, de la création ou l'import de pièce, du maillage jusqu'à l'exploitation avancée des résultats (géométrie des différentes pièces, propriétés mécaniques, choix des éléments, choix de l'intégration de la matrice de rigidité, choix du mode de résolution)

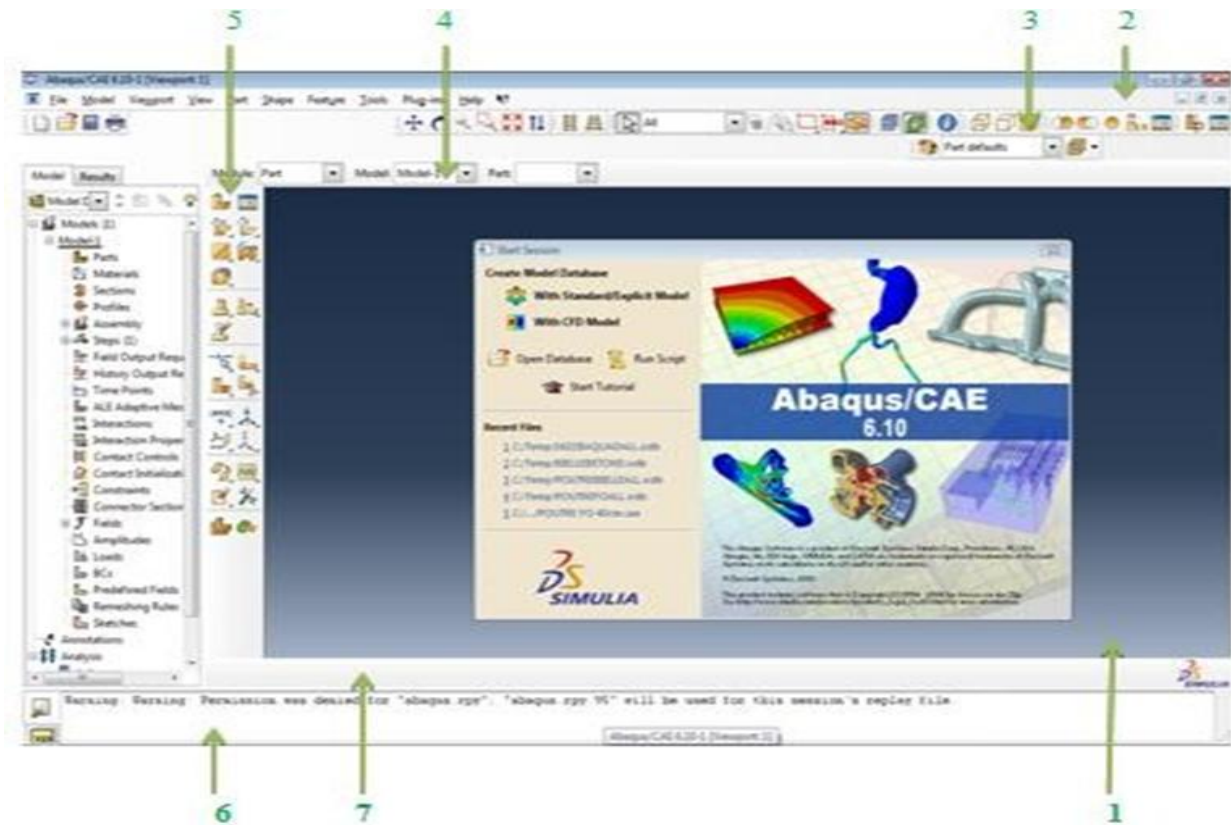


Figure III.1 : Présentation de l'interface ABAQUS

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. Une troisième barre de menus déroulant permettant d'accéder aux autres modules, ou désélectionner 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. Enfin, 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.

III.2.3. Définition du modèle à simuler

Notre travail consiste à évaluer la performance et d'étudier le comportement d'un poteau en béton armé renforcé par des matériaux composites « PRFV » sous chargement horizontal. L'objectif principal consiste à optimiser les caractéristiques des bandes PRFV, qui permettent d'améliorer la résistance du poteau à savoir l'apparition successive des fissures au niveau des sections critiques.

III.2.3.1 Dimensionnement et géométrie du poteau modélisé

Dans le cadre de ce travail, un poteau réel en béton armé, dimensionné et expérimenté par **Yongping Xie et al [29]**, soumis à un chargement horizontal a été simulé. Le poteau modélisé illustré sur la figure III.2, présente les caractéristiques suivantes :

- Hauteur totale du poteau 2548mm].
- Longueur de la semelle 2100 [mm]
- Section transversale du poteau 500*500mm².
- Section transversale de la semelle 700*900

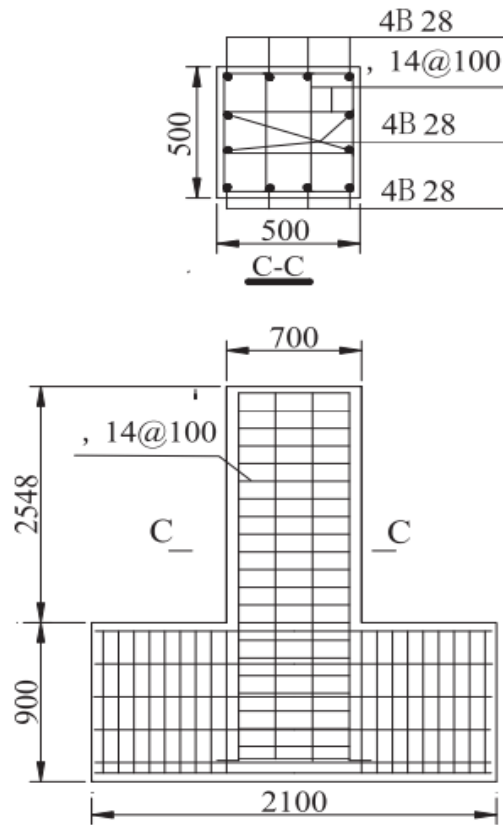


Figure III.2 : Géométrie du poteau modélisé par Xie, et al. [29] en (mm).

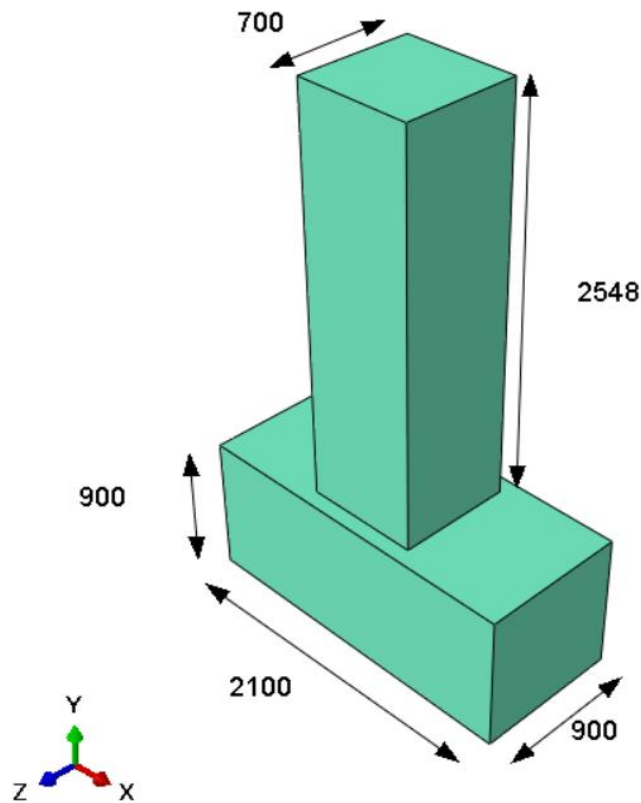


Figure III.3: Dimensionnement et géométrie du poteau modélisé en (mm).

Ferraillage :**Tableau III.2:** Tableau récapitulatif des caractéristiques du poteau

Largeur de section b (mm)	700
Hauteur de section h (mm)	700
Épaisseur du revêtement en béton c (mm)	345
Hauteur de section efficace du poteau, h_0 (mm)	637
Hauteur effective des poteaux BA, H (mm)	2548
Diamètre du renfort longitudinal (mm)	28
Diamètre d'étriers (mm)	14
Espacement des étriers, s (mm)	100
Rapport de cisaillement-portée	4
Charge de compression axiale (KN)	5782
Rapport d'étriers	1.89
Taux d'incrément de la charge horizontale (KN)	0.4
Épaisseur d'enrobage sur la longueur (mm)	27

III.2.4. Présentation des étapes suivies dans la simulation

Le logiciel est devisé en des modules indépendants les uns des autres, à savoir : le module.

Part; Module Property; Assembly; Step; Interaction; Load; Mesh ; Job et Visualization.

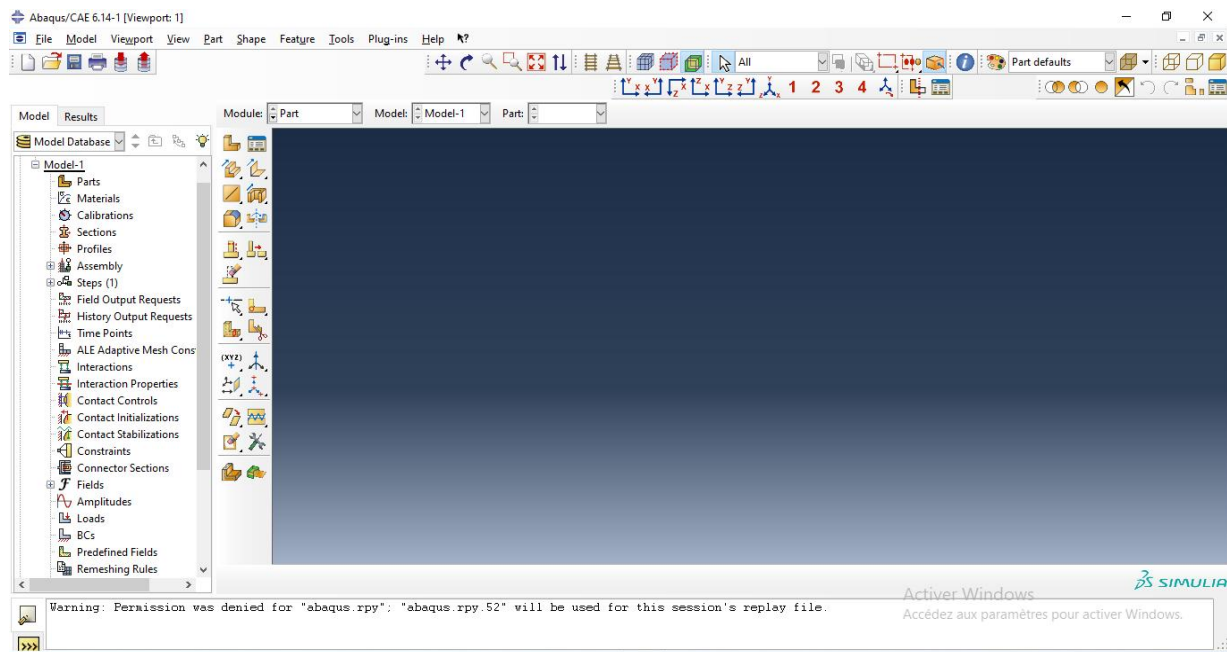


Figure III.4 : Les modules du logiciel.

- **La géométrie des éléments (module part) :**

Dans cette première étape, tous les éléments du portique sont créés grâce aux outils du module « **Part** ». On a créé la géométrie du portique dans le module **Part** en utilisant les coordonnées des points en deux dimensions et on a créé la 3eme dimension par **extrusion**. On a utilisé un solide déformable en **3D**. Au début.

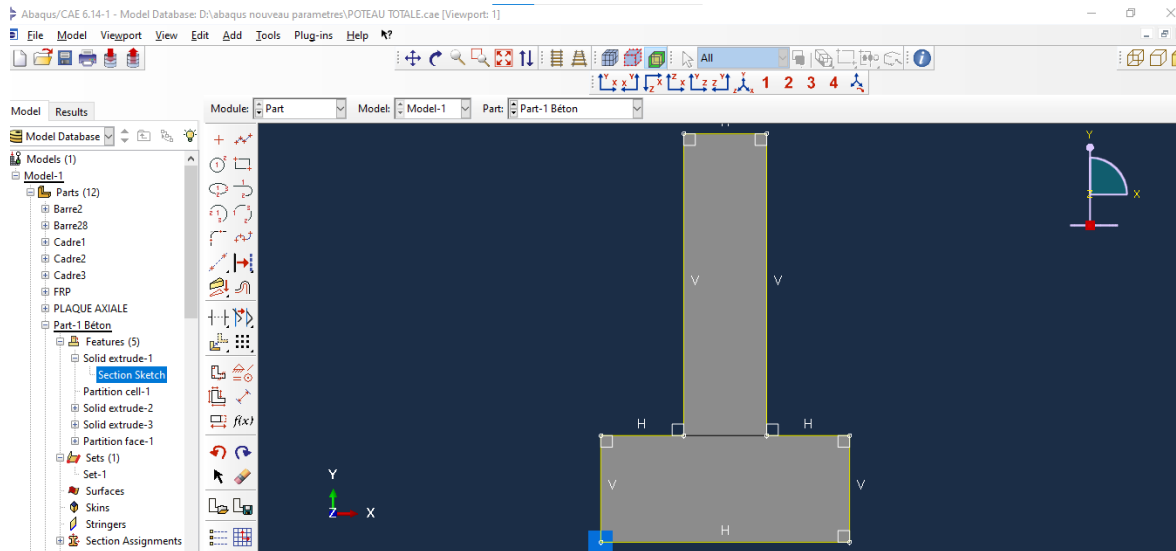


Figure III.5 : Création de poteau semelle en béton armé

On obtient ce modèle de poteau suivant :

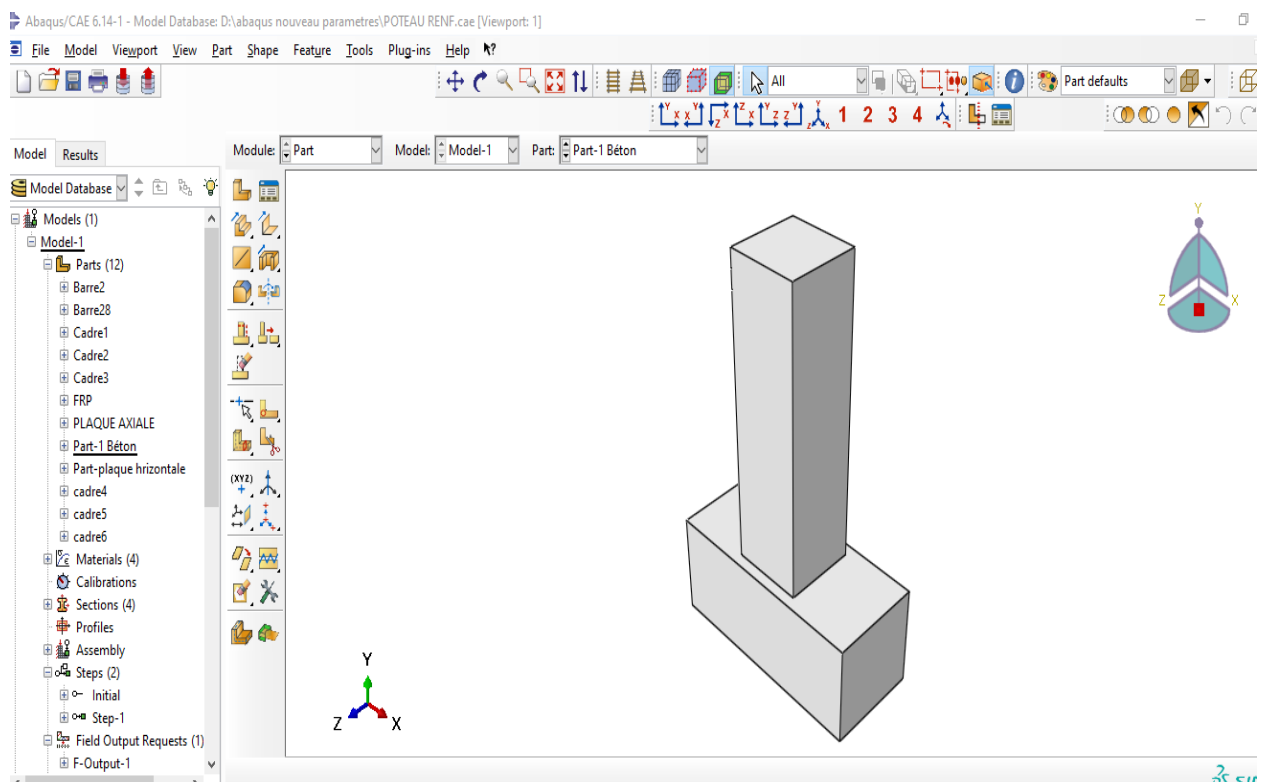


Figure III.6 : Élément poteau obtenu.

Les barres d'**armatures longitudinales** et **transversales** sont créées avec un modèle 3D déformable « **Wire** ». Ensuite, dessiner avec « **Créer lignes** » et dimensionner

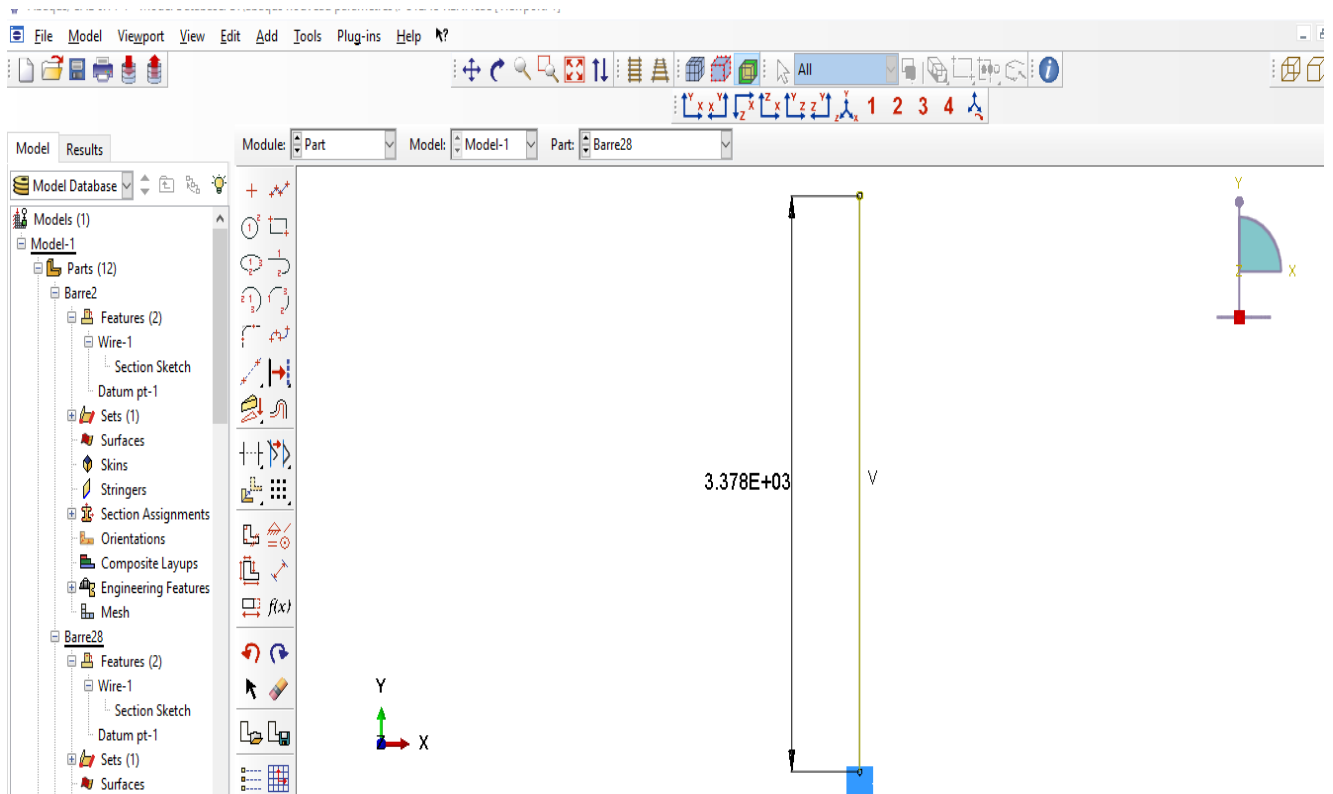


Figure III.7 : Création des armatures sur ABAQUS

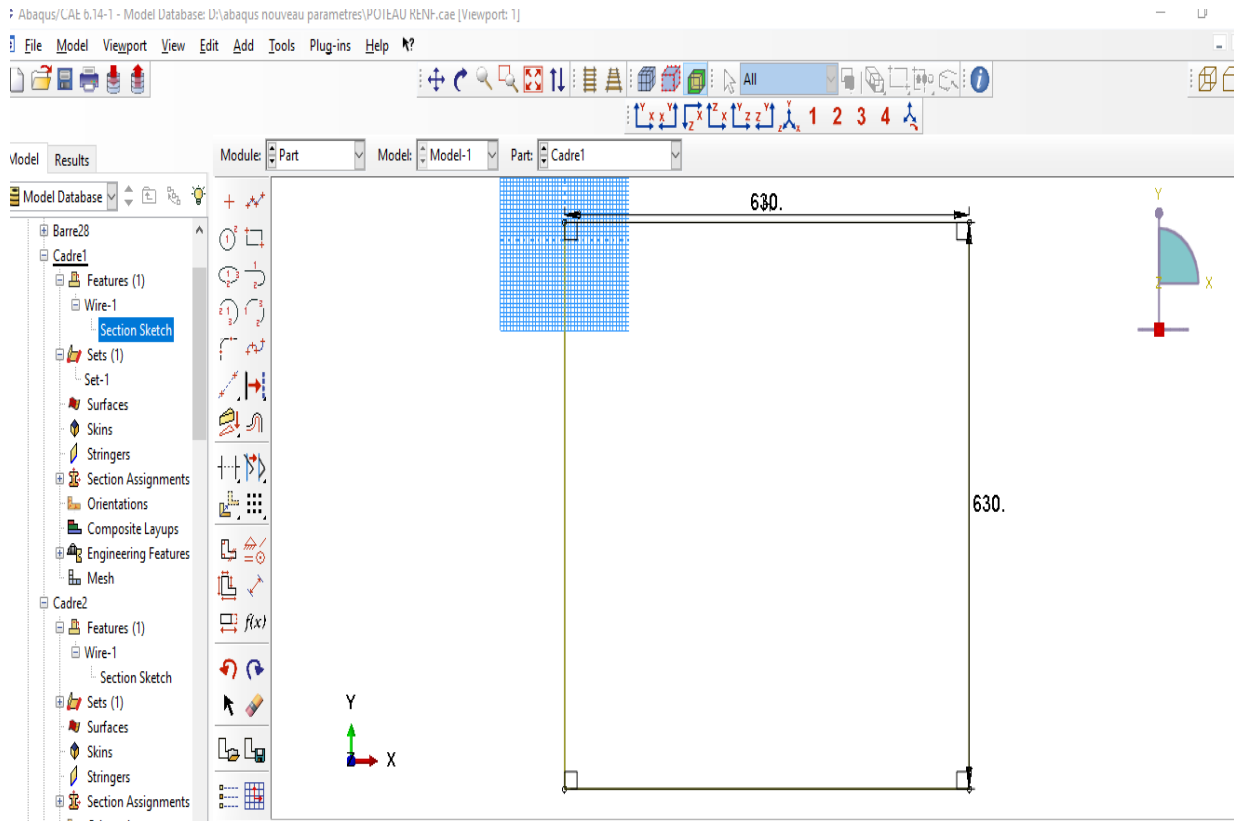


Figure III.8: Création des cadres

- Les composites sont générés avec différentes géométries sous forme de bandes planes inclinées, prenant en considération les angles d'inclinaisons selon les modèles réalisés. Cependant l'épaisseur reste constante qui équivaut à $e = 3\text{ mm}$ et la largeur $L = 5\text{ cm}$
- Les bandes sont créées avec un modèle 3D déformable « **Shell** » \Rightarrow « **Extrusion** », ensuite dessinées avec « **Create lignes** » et dimensionnées.

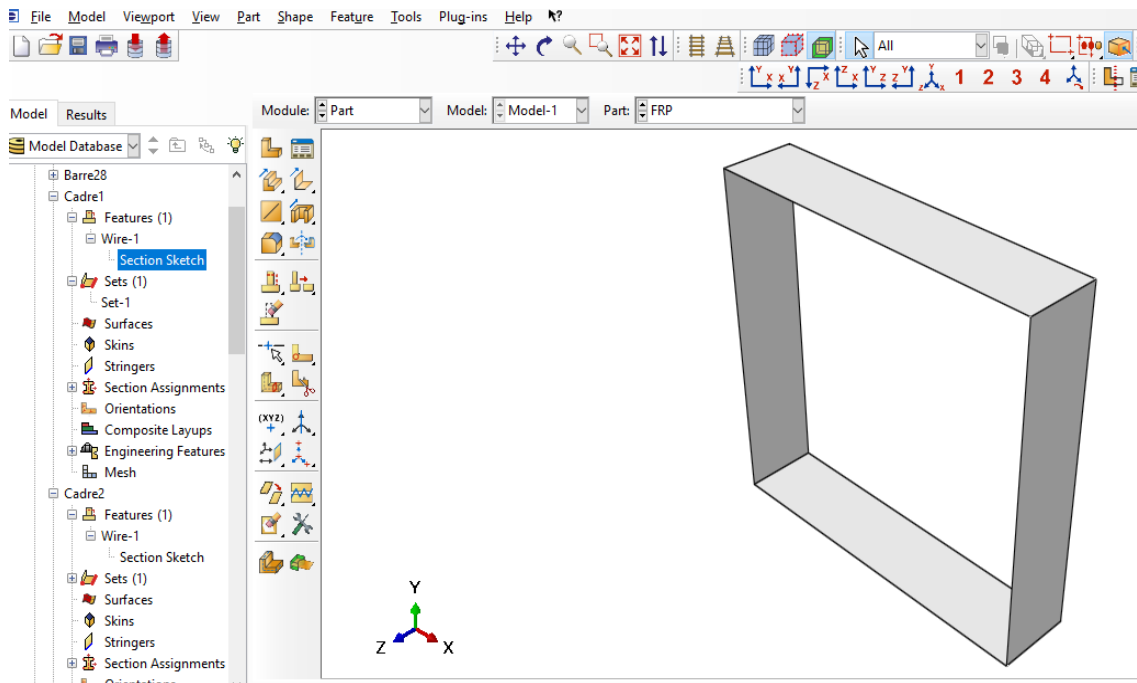


Figure III.9 : Création des bandes composites

- Les deux plaques qui assurent le pilotage du chargement axial et horizontal sont créées avec un modèle de 3D analytique rigide en suite dessinée avec *«creatignes»* et dimensionnées.

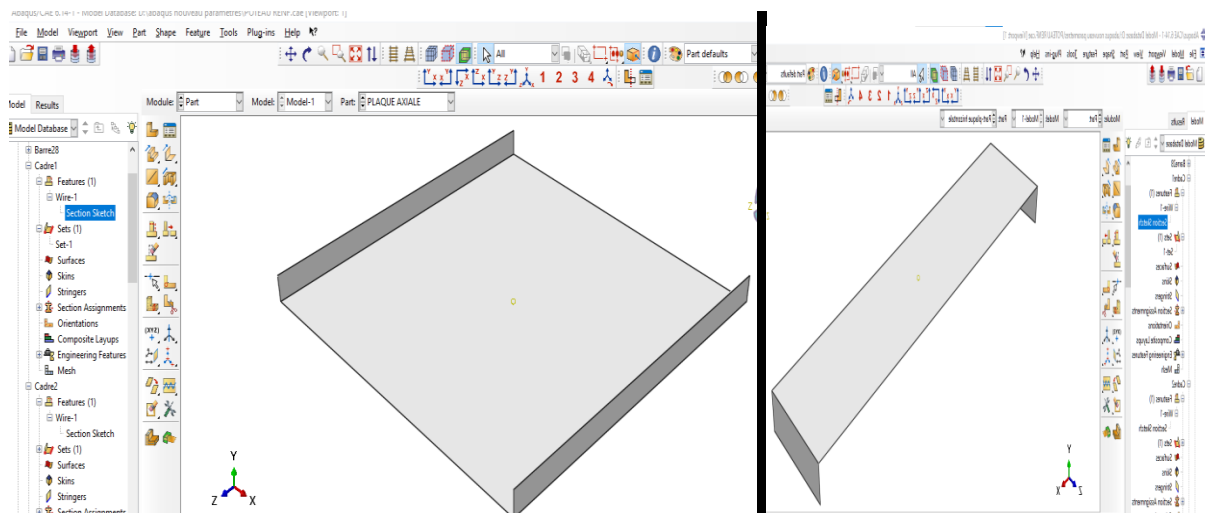


Figure III.10: Création des plaques rigides pour piloter le chargement axial et horizontal.

- **Propriétés des matériaux (Module Property) :**

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

- **Le béton :** Comportement élasto-plastique endommageable.
- **L'acier :** Comportement élasto-plastique avec écrouissage cinématique et isotrope.
- **Les composites :** Comportement élastique orthotrope.

Pour un calcul élastique il faut introduire les paramètres suivants : le module de Young et le coefficient de poisson ;

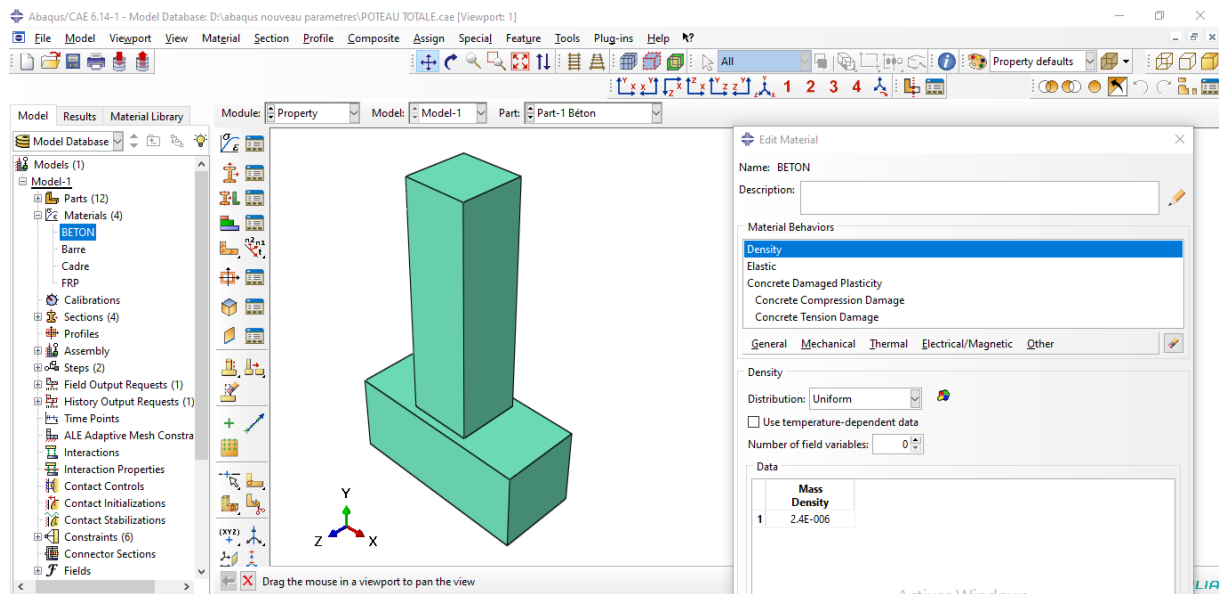
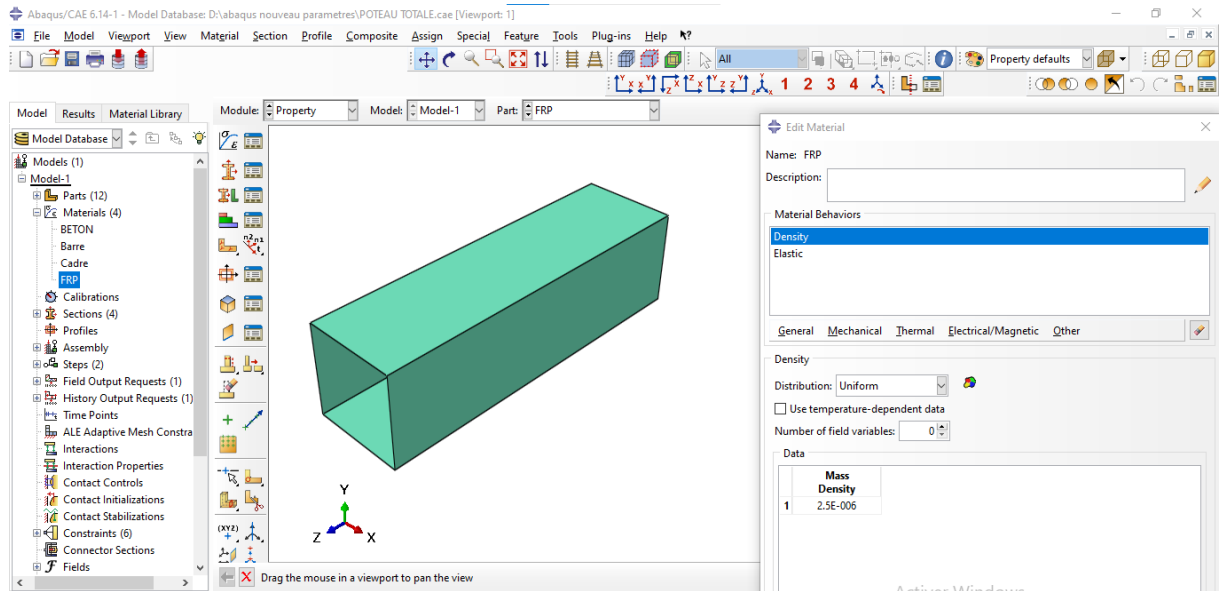


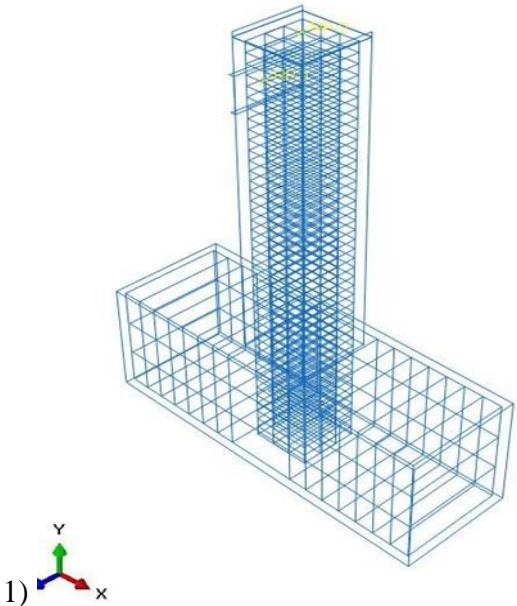
Figure III.11 : Création des propriétés des matériaux (béton, acier et composites)

- **Assemblage du modèle (Module Assembly) :**

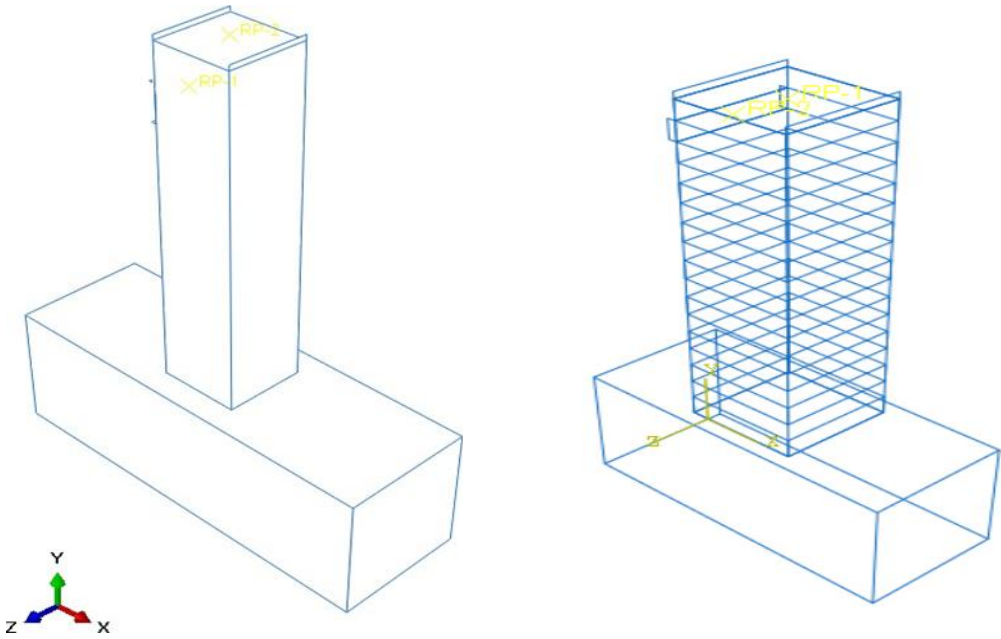
Dans ce modèle on rassemble toutes les pièces géométriques avec «Creat instance», on peut répéter chaque part créée plusieurs fois et lui faire des translations et rotations s'il est nécessaire jusqu' à voir notre modèle.

1) On commence par assemblage de poutre en béton avec les armatures.

2) Puis assemblage de poteau béton armé avec les bandes composites en tenant compte des variantes d'études imposées.



Assemblage béton-acier



Assemblage béton armé-composites

Figure III.12 : Détail d'assemblage du modèle

Définition des contacts (Module Interaction)

L'utilisateur définit tous les critères de calcul utilisés par ABAQUS dans le module Commande. Il définit notamment l'incrément, la valeur du pas de temps et la valeur du temps de fin, qui est du temps "virtuel", du temps sans unité. Vous devez définir deux types de sorties, qui sont des requêtes de sortie de champ, qui fournissent des valeurs à un instant donné, et des requêtes de sortie d'historique, qui montrent l'évolution de la quantité dans le temps.

Nous avons choisi un calcul "explicitement dynamique" pour notre simulation car il est plus efficace et plus rapide à calculer. Nous avons travaillé avec une période = 1 s déterminée en vérifiant le critère d'énergie pour la charge statique.

Définition des contacts (Module Interaction)

Il définit les interactions entre chaque pièce et introduit les premières hypothèses portant sur les contacts, les contraintes et les connections éventuelles. Dans cette simulation on a considéré :

- 1) Un contact parfait entre l'acier et le béton, on la définit avec «**Embedded région** » qui veut dire inclure l'armature dans le bloc du béton et avoir un matériau presque homogène.
- 2) Un contact surfacique entre le béton et les bandes **GFRP** avec «**TIE**», qui considère une adhérence quasi-parfaite entre les deux surfaces choisis.

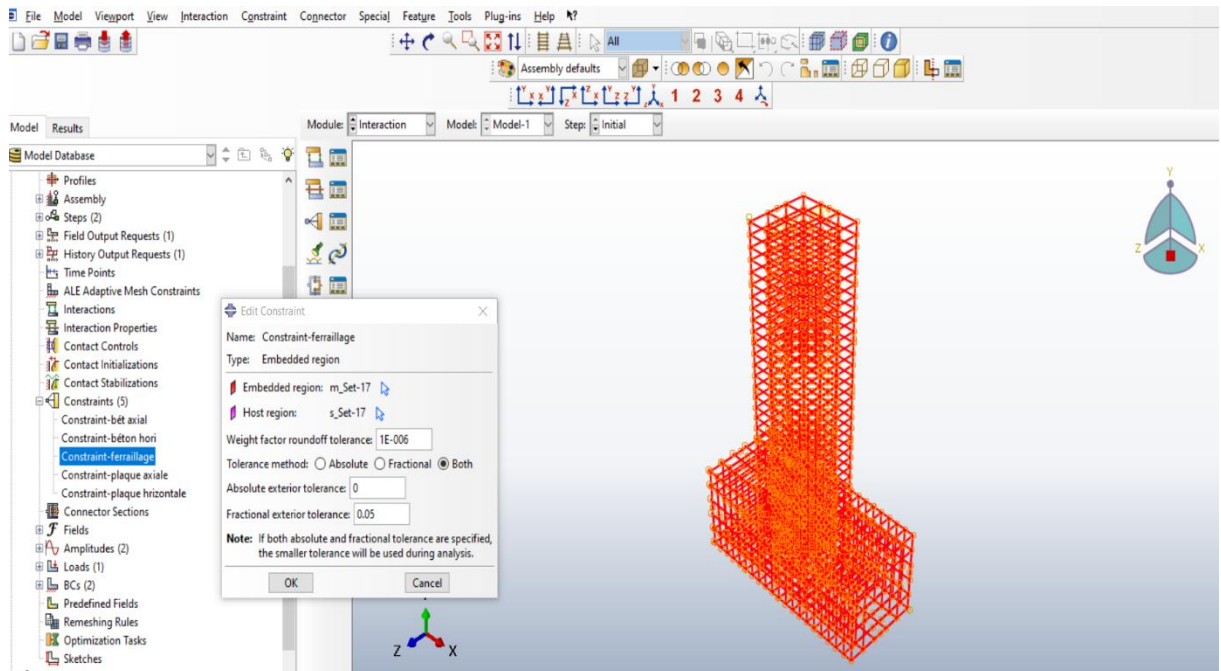


Figure III.13 : Création des interactions

Définition des conditions aux limites et chargement (Module Load)

L'utilisateur définit le système à partir de « **Create Boundary Condition** » et de « **Create Load** ». Les conditions aux limites à appliquer sont les suivantes :

- 1) Encastrer la fondation.
- 2) Appliquer un chargement statique piloté en déplacement multiplié par l'amplitude qu'on a défini pour avoir un chargement statique.
- 3) Le poids propre du poteau.

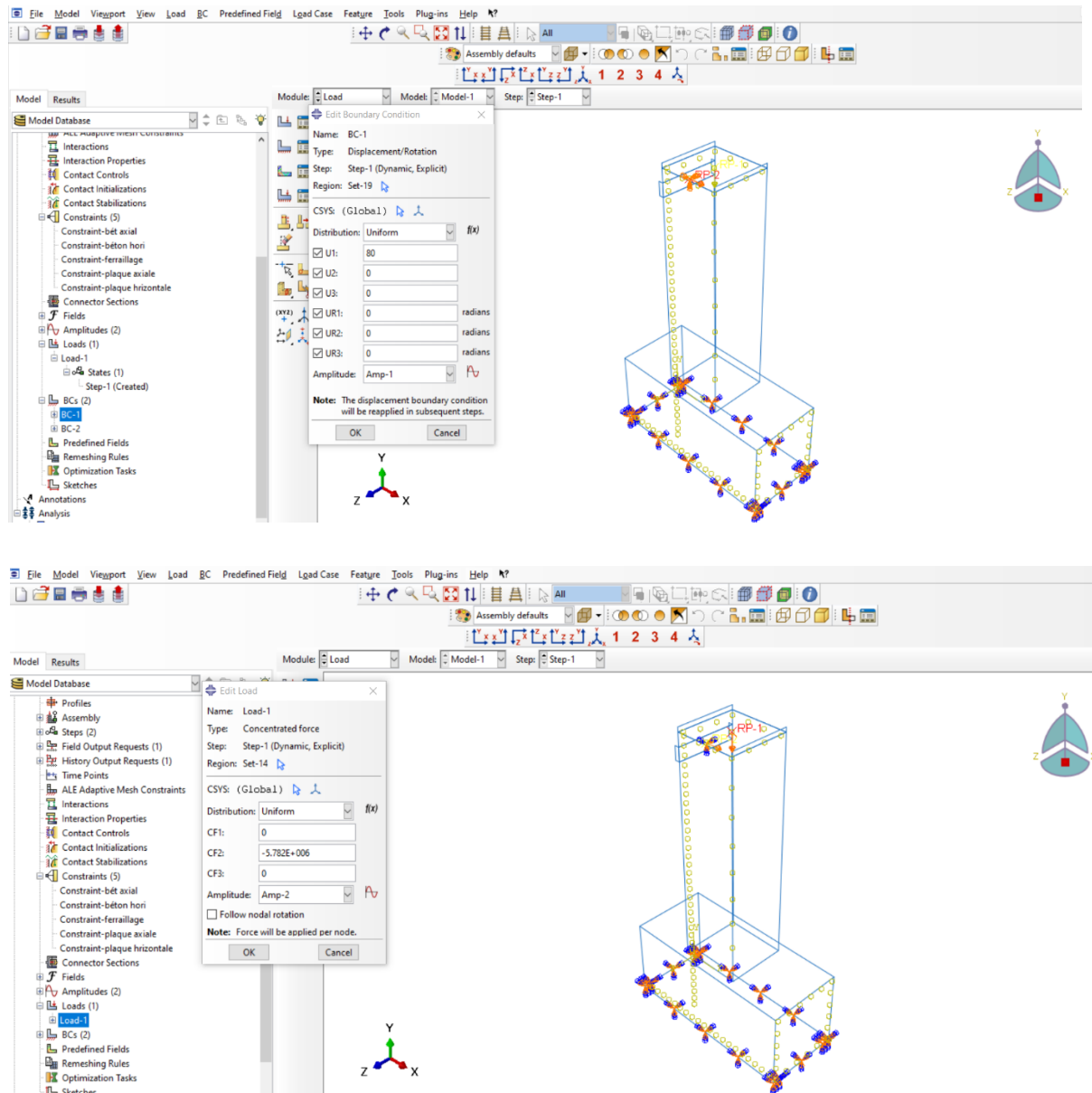
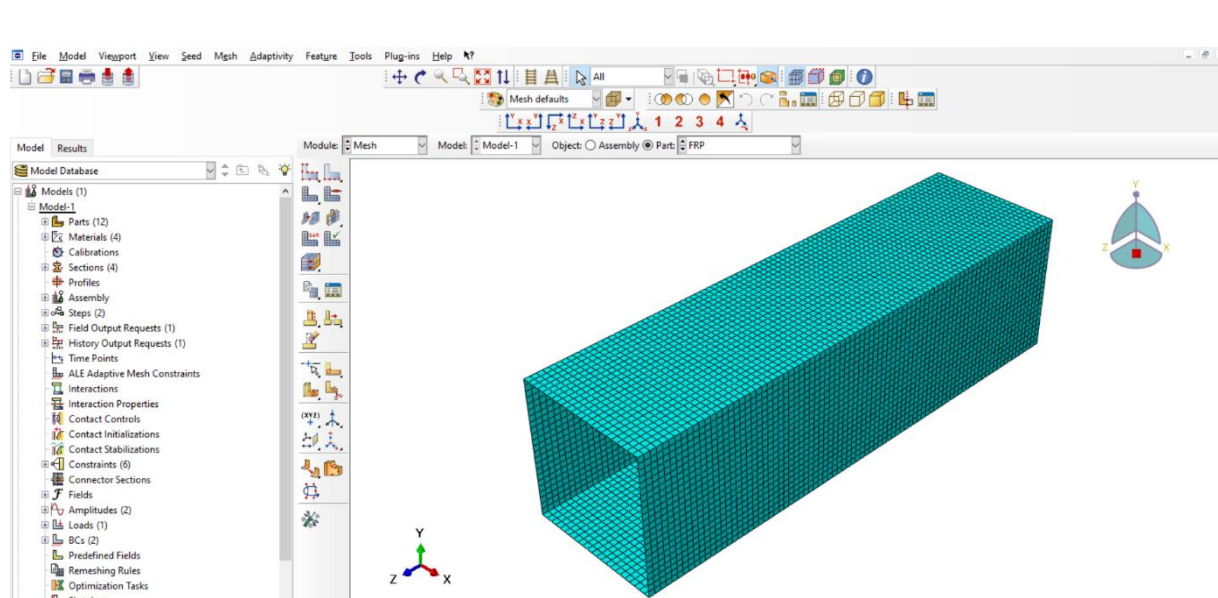
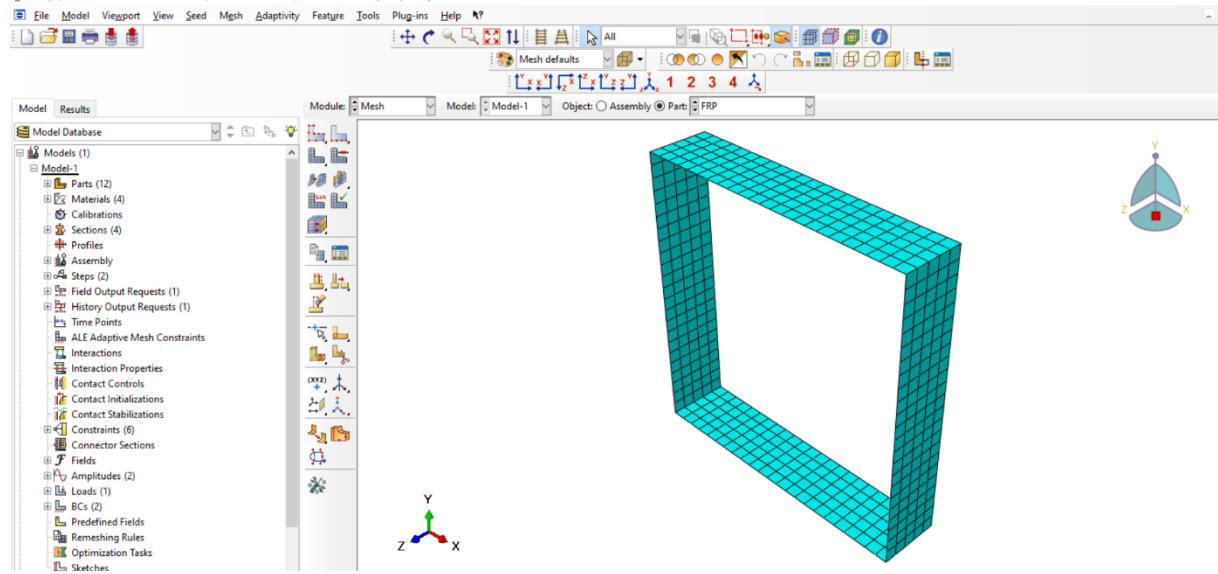
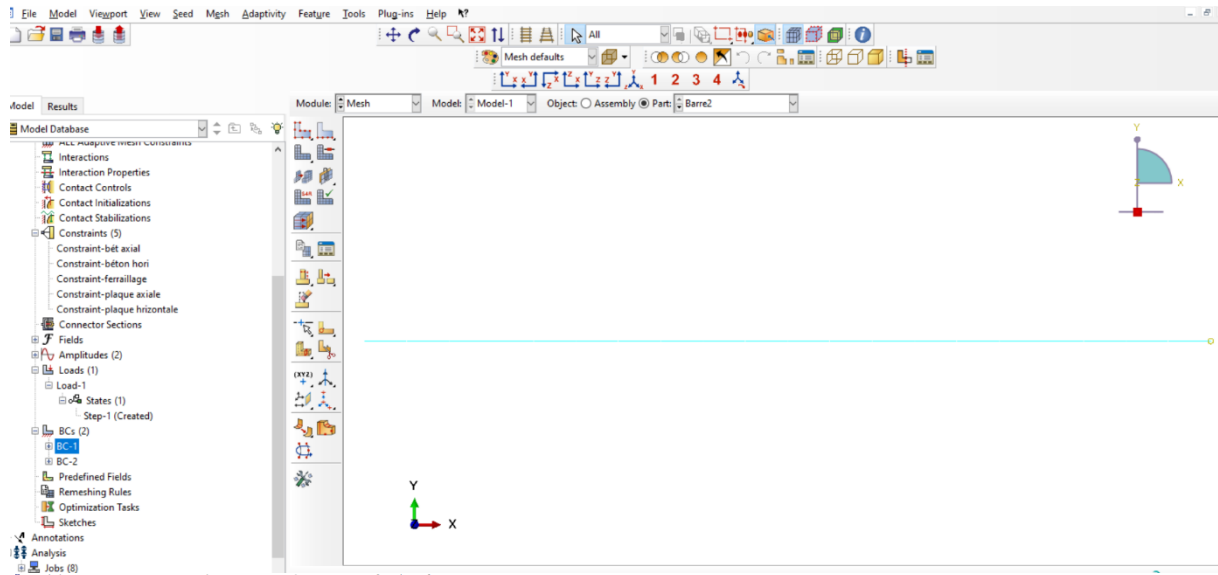


Figure III.14 : Chargement appliqué sur le poteau en béton armé.

Génération du maillage (Module Mesh)

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



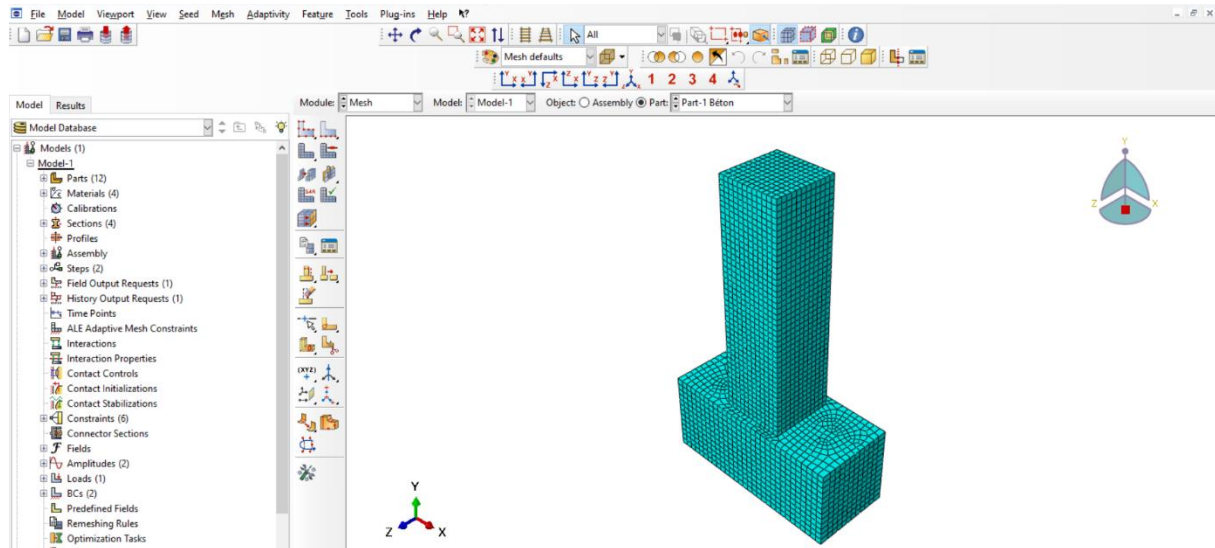


Figure III.15: Création du maillage (poteau, acier et composites).

Sensibilité de maillage :

Les composants et les maillages utilisés dans les modèles numériques ; Les tailles d'élément optimales pour la colonne RC et la semelle ont été obtenues à partir d'une étude de convergence, pour des résultats plus précis, comme illustré sur la **figure III15**. En utilisant un très petit élément consommerait un temps de calcul considérable et pourrait provoquer un problème de convergence numérique. L'utilisation de mailles grossières réduirait la précision de la simulation. En particulier, la modélisation numérique pourrait surestimer la force axiale des colonnes. Compte tenu des effets d'autres facteurs sur le comportement structurel prédit dans les modèles numériques, les résultats de l'étude de convergence suggèrent qu'un maillage approprié serait un maillage fin avec la taille de 30 mm pour la colonne en béton et le maillage avec la taille de 70 mm pour la semelle solide. Le GFRP et le renforcement ont été maillés de manière uniforme, avec une taille approximative de 20 mm et 50 mm respectivement.

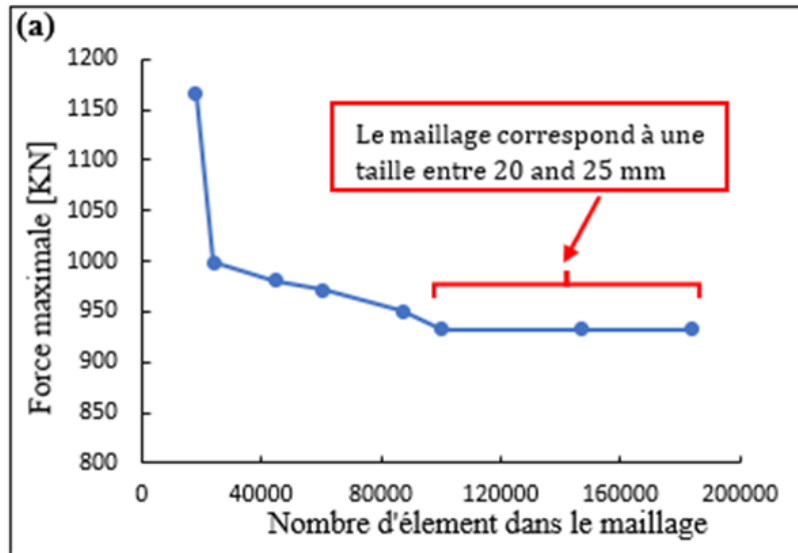


Figure III. 16.a : Courbe de convergence de maillage du poteau.

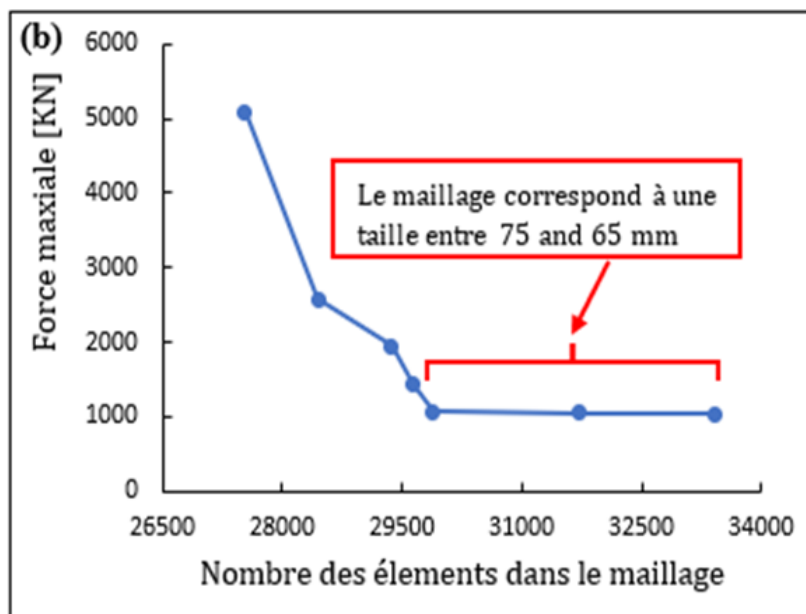




Figure III. 16.b : Courbe de convergence de maillage de la fondation.

Création du fichier résultats (Module Job)

Le module «job» reprend les caractéristiques de calcul dans le module «**Step**». Après avoir définie tout le modèle à simuler (géométrie, matériaux, lois de comportements, les chargements...). On lance le calcul après la définition d'un job, en cliquant sur «**Submit**».

Visualisation des résultats (Module visualization)

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

On peut visualiser la forme déformée du modèle, en cliquant sur les outils :  ou .

III.2 Modélisation du comportement des matériaux

Pour aboutir à une réponse globale d'une structure considérée sous sollicitations extérieures, l'utilisation d'un modèle numérique prédictif s'avère être nécessaire. Dans ce contexte, des modèles éléments finis disponibles dans la littérature pour le béton, acier et les matériaux composites sont utilisés séparément sous sollicitations particulières.

III.3.1 Modèle non linéaire pour béton

La modélisation du béton est bien moins évidente et son comportement mécanique est très difficile à décrire par les logiciels utilisant la méthode des éléments finis. En effet, le développement de microfissures très rapidement obtenu en traction, génère d'énormes difficultés de convergence de ces logiciels

Le modèle numérique utilisé dans notre simulation est « **Concrete Damaged Plasticity** » intégré dans le code des éléments finis ABAQUS. C'est un modèle couplé (plasticité, endommagement) basé sur l'endommagement en incluant les déformations irréversibles, principalement destiné à une capacité général d'analyse des structures en béton sous charge cyclique et / ou dynamique.

III.3.1.1 Loi du comportement : compression/traction :

La théorie de la plasticité est utilisée pour décrire le caractère irréversible des déformations ε^{pl} . La partition de la déformation totale ε est effectuée en une partie élastique et une partie plastique. Les déformations élastiques ε^{el} mettent en œuvre une énergie dite élastique réversible qui est donc restituée lors de toute décharge, tandis que les déformations plastiques ε^{pl} conduisent à la dissipation d'une énergie irréversible.

$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{pl} \quad (\text{III. 1})$$

Dans le cadre d'une théorie de petite déformation, le tenseur de déformation ε_{ij} est obtenu à partir du premier gradient du champ de déplacement $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z)$ tel que :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{ij} + u_{ji}) \quad (\text{III.1})$$

La relation contrainte-déformation est définie par :

$$\sigma = (1+d)\mathbf{D}_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) = \mathbf{D}^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \quad (\text{III. 2})$$

D'où \mathbf{D}_0^{el} la matrice de rigidité initiale (non endommagée), \mathbf{D}^{el} la matrice de rigidité élastique endommagée.

d est la valeur d'endommagement qui peut prendre des valeurs allant de zéros (matériau non endommagé) à un (matériau complètement endommagé) tel que :

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E_c^{-1}}{\varepsilon_c^{pl} \left(\frac{1}{b_t} - 1 \right) + \sigma_c E_c^{-1}} \quad (\text{III. 3})$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t E_c^{-1}}{\varepsilon_t^{pl} \left(\frac{1}{b_t} - 1 \right) + \sigma_t E_c^{-1}} \quad (\text{III. 4})$$

Suivant les notions habituelles de la mécanique des dommages continue, la contrainte effective est définie par :

$$\sigma = D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^pl) \quad (III.5)$$

Les taux de déformation plastique équivalentes est déterminés par :

$$\dot{\varepsilon}_t^{pl} = \dot{\varepsilon}_{11}^{pl} \text{Uni-axial traction} \quad (III.6)$$

$$\dot{\varepsilon}_c^{pl} = -\dot{\varepsilon}_{11}^{pl} \text{Uni-axial compression} \quad (III.7)$$

La réponse dégradée du béton est caractérisée par deux variables de dommage uni-axiales indépendantes d_t et d_c , supposées être en fonction de déformation plastique :

$$\tilde{d}_t = d_t(\varepsilon_t^{pl}, \theta, \mathbf{f}_i), \quad 0 \leq d_t \leq 1 \quad (III.8)$$

$$\tilde{d}_c = d_c(\varepsilon_c^{pl}, \theta, \mathbf{f}_i), \quad 0 \leq d_c \leq 1 \quad (III.9)$$

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

Dénotations	Équations
Contraintes effectives en traction	$\bar{\sigma}_t = \frac{\sigma_t}{(1-d_t)} = E_0(\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl})$
Contraintes effectives en compression	$\bar{\sigma}_c = \frac{\sigma_c}{(1-d_c)} = E_0(\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl})$
Dommages en compression	$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E_c^{-1}}{\varepsilon_c^{pl} (1/b_c - 1) + \sigma_c E_c^{-1}}$
Dommages en traction	$d_t = 1 - \frac{\sigma_t E_c^{-1}}{\varepsilon_t^{pl} (1/b_t - 1) + \sigma_t E_c^{-1}}$

III.3.1.2. Identification des paramètres du modèle.

Les paramètres principaux à définir soigneusement sont : la loi contrainte-déformation (puisque'elle permet de calculer les valeurs d'écrouissage) qui correspond au modèle expérimental de **Xiu et al. [29]**. Les paramètres du modèle numérique du béton utilisé dans notre étude numérique sont représentés dans les tableaux suivants :

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

Paramètres		Dénotation
Notations	Valeur	
f_c (MPa)	29.5	Contrainte en compression
$f_{c0} = 0.3f_c$ (MPa)	8.85	Contrainte élastique en compression
ε_{c1} (‰)	2.2	Déformation au pic en compression
$f_{t0} = 0.6 + 0.06f_c$ (MPa)	2.37	Contrainte maximale en traction
ε_{tm} (‰)	1.2	Déformation correspondante à f_{t0}
$E = 11000(f_c)^{1/3}$ (MPa)	33988.60	Module de Young instantané
ν	0.2	Coefficient de poisson

III.3.2. Modélisation de l'acier

L'acier est décrit par un comportement élasto-plastique avec écrouissage en compression et en traction. Les paramètres du modèle numérique du l'acier utilisé dans notre étude numérique sont le module d'Young $E = 203000$ MPa, coefficient du poisson $\nu = 0.3$ et une densité de $7.2 \cdot 10^6$ Kg/m³.

III.3.3 Modélisation des 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. Le but de cette section est de présenter le comportement élastique des matériaux orthotropes utilisés. Les paramètres du modèle numérique des bandes **CFRP** utilisé dans notre étude numérique sont représentés dans le **Tableau III.4** :

Tableau III.4 : Paramètres utilisés pour le comportement des bandes CFRP.

Fibre de carbone						
Élasticité (MPa)	E1 130000	E2 15000	NU12 0.25	G12 7700	G13 7700	G23 1380
Fail stress (MPa)	X1 :3500	X2 : 450	Y1 : 2500	Y2 : 770	S : 235	/
Densité (Kg/m ³)	2.02*10⁶					

III.4. Modèles et variantes de l'étude

Dans le but de lister les paramètres des matériaux dans le renforcement d'une poutre en béton armé, une étude paramétrique est reliée à la variation du taux d'endommagement du béton est réalisée. Les paramètres pilotant les valeurs des variables d'endommagement du béton sont récapitulés sur le tableau suivant :

Tableau III.5 : Paramètres du CDP utilisés pour chaque variante.

Taux d'endommagement	(Ø) angle de dilatation	(B) paramètre pilotant l'énergie de fissuration	fc₂₈ (MPa)	Module de Young (MPa)
0%	30	25	29.5	36000
10%	30	30	26.5	32400
20%	28	35	23.60	28800
30%	23	40	20.60	25200
50%	15	45	14.70	18000

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons le code de calcul ABAQUS et résumons les principales opérations à effectuer pour créer un modèle. Il nous permet de simuler le comportement non linéaire des poteaux en béton armé renforcés avec des bandes composites CFRP sous charges statiques. Les matériaux constitutifs sont modélisés à l'aide de modèles numériques intégrés au code ABAQUS, à savoir : un modèle élasto-plastique du béton, permettant d'évaluer la réponse finale et de représenter l'évolution de l'endommagement afin de définir le mode de rupture ; un modèle élasto-plastique de l'acier et celle des matériaux composites, modèle élastique orthotrope.

Chapitre IV

Résultats, analyses et discussions

IV.1 Introduction

À travers ce chapitre nous interpréterons les résultats obtenus à l'issue des simulations numériques réalisées sur le comportement mécanique des poteaux en béton armé renforcées avec des rubans composites CFRP. Une étude numérique authentifiée par les ouvrages disponibles dans la littérature [52-64] a été réalisée à l'aide du code ABAQUS. Les résultats de simulation du comportement global et local sont présentés et discutés, sous la forme de graphiques et de cartes de déplacement de force. Le gain en résistance a également été quantifié en comparant les courbes de puissance, ce qui nous a permis de mettre en évidence les pertes proportionnellement aux contributions.

IV.2 Confrontation et validation du modèle élément fini

Étant donné que notre modèle numérique élément fini proposé et le modèle expérimental tirés de la revue littérature [36] ont la même géométrie et sont constitués de matériaux possédant les mêmes propriétés physiques, nous nous permettons de faire une comparaison entre nos résultats numériques et expérimentaux.

Afin de vérifier la fiabilité de la procédure numérique, nous confrontons nos prévisions qualitatives et quantitatives sur le comportement des structures étudiées avec les observations expérimentales de **Xie et al** [36]. En ce qui concerne l'aspect quantitatif de la confrontation, nous avons choisi de suivre et de comparer l'évolution des paramètres identifiés expérimentalement : déplacement horizontal et évolution des capacités portantes.

La **figure (IV-1)** montre l'évolution du chargement extérieur appliqué en (KN) en fonction du déplacement horizontal en (mm) jusqu'à la rupture pour les trois spécimens d'étude considérés.

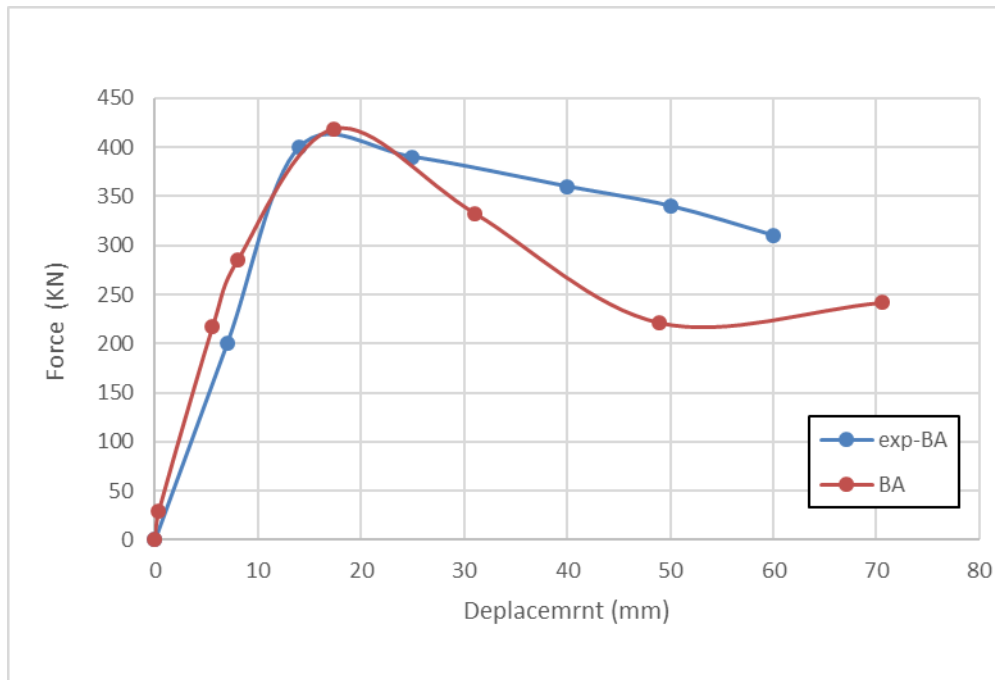


Figure IV.1: Confrontation des courbes (F-U); Validation du modèle non renforcé

Nous avons observé que la forme du graphe de la simulation numérique montre une bonne correspondance avec la forme du graphe donnée par l'analyse expérimentale de **Y. Xie, et al.**, [36]. Les valeurs de la capacité portante sont sensiblement différentes, pour le poteau en béton armé la simulation donne une charge maximale de 418,92 kN, tandis que le test donne une capacité portante moyenne d'environ 400 kN. Pour le déplacement du modèle expérimental dénommé : **Exp-Ba**, la simulation donne une valeur maximale de 60mm, pour le déplacement de poteau modélisé et dénommé : **BA**, la valeur maximale est de 70.57mm

IV.3. Effet de l'endommagement

Cette partie consiste à réaliser une étude paramétrique sur la variation d'endommagement pour le béton et les aciers que ce soit pour les poteaux classiques (témoins) ainsi que pour le poteau renforcé par des fibres de (**CFRP**). À cet effet, on a considéré quatre (4) variantes à savoir :

- Un poteau pré-endommagé à 10% ;
- Un poteau pré-endommagé à 20% ;
- Un poteau pré-endommagé à 30% ;
- Un poteau pré-endommagé à 50%.

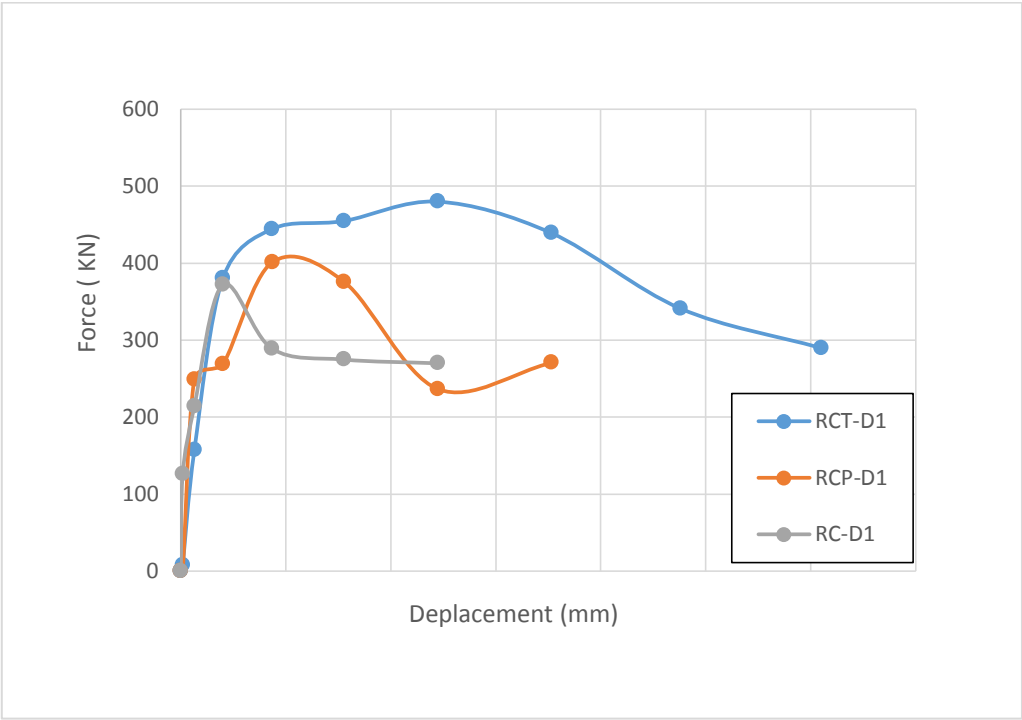
On a adopté les notations suivantes :

- **(RC)** : Poteau en béton armé sain.
- **(RCP)** : Poteau en béton armé sain renforcée partiellement.
- **(RCT)** : Poteau béton armé pré-endommagée totalement.

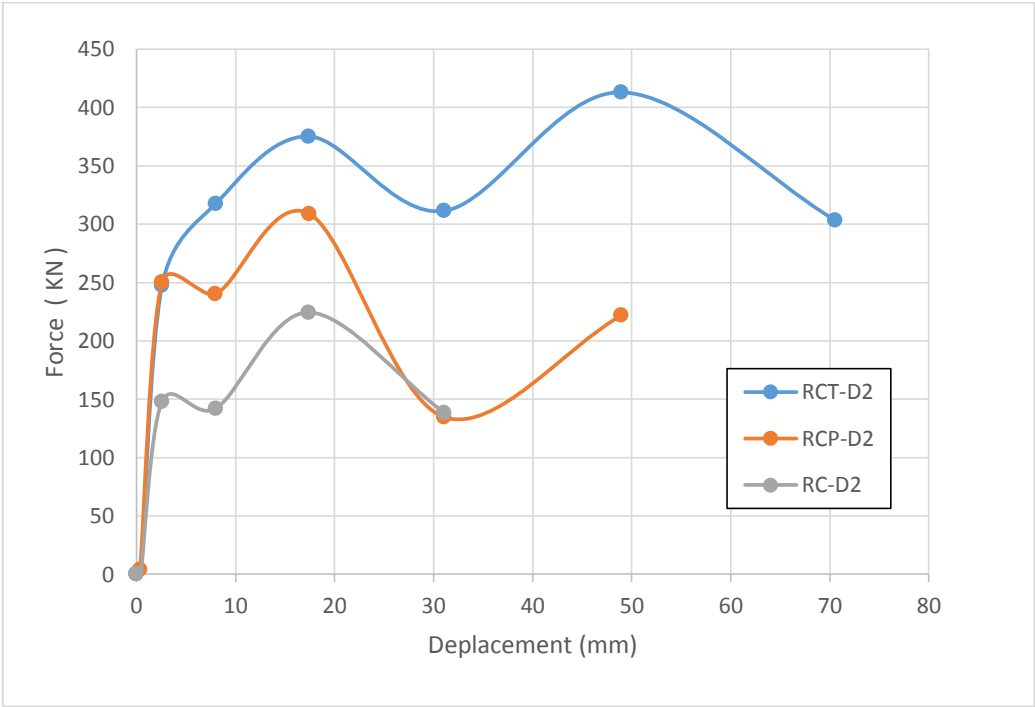
IV.3.1. Poteaux avec béton pré-endommagé

Les figures au-dessous présentent les capacités portantes des déférentes variantes d'études sous forme du graphe force en fonction de déplacement. Une étude paramétrique est reliée à la variation du taux d'endommagement du béton est réalisée. Les paramètres pilotant les valeurs des variables d'endommagement du béton sont récapitulés sur le **tableau III.5** du chapitre précédant.

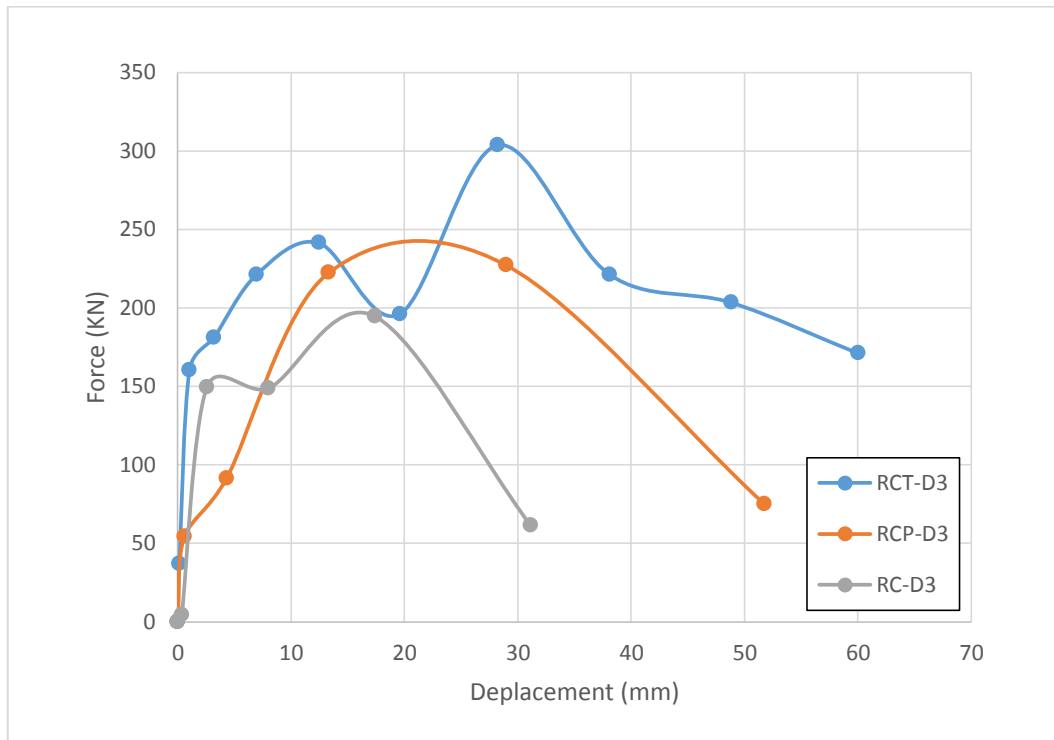
- Courbe (force-déplacement) des poteaux pré-endommagés à 10% : RC-D1, RCP-D1 et RCT-D1 ;
- Courbe (force-déplacement) des poteaux pré-endommagés à 20% : RC-D2, RCP-D2 et RCT-D2 ;
- Courbe (force-deplacement) des poteaux pré-endommagés à 30% : RC-D3, RCP-D3 et RCT-D3 ;
- Courbe (force-deplacement) des poteaux pré-endommagés à 50% : RC-D4, RCP-D4 et RCT-D4 ;



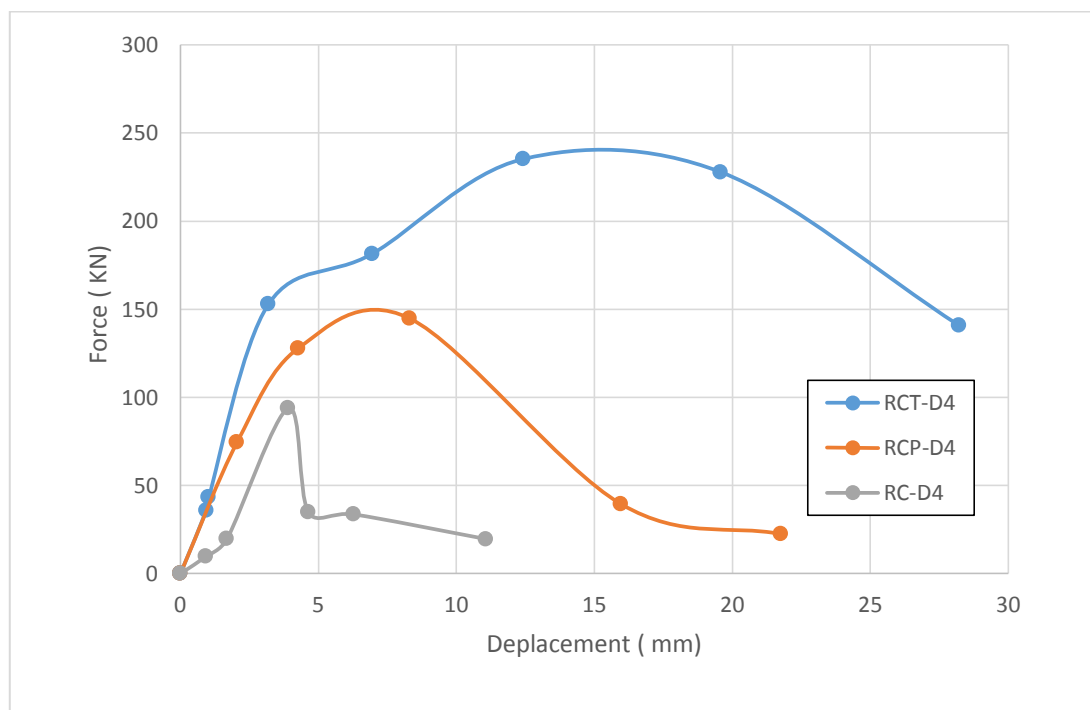
- Courbe (force-déplacement) du poteau pré-endommagé à 10%



- Courbe (force-déplacement) du poteau pré-endommagé à 20%



- Courbe (force-déplacement) du poteau pré-endommagé à 30%



- Courbe (force-déplacement) du poteau pré-endommagé à 50%

Figure IV.2: Résultat de l'effet d'endommagement du béton en termes de capacité portante

L'analyse des résultats en termes de courbe force-déplacement (**la figure IV.3**), montre clairement l'amélioration en termes de résistance du poteau renforcée par des bandes **CFPR** comparativement au poteau de référence en béton armé, qui représente une force de **509.76 KN** et un déplacement maximal de **85.84 mm**. Le poteau BA pré-endommagée de **10%** présente une force maximale de **371.93 KN** et un déplacement maximal de **48.95mm** avec un apport de force de **7.85%** et de déplacement de 44.26

Par contre le modèle de **20%**, atteint une force de **224.4 KN** avec un déplacement de **31.06 mm** avec un apport de force **37.36 %** et de déplacement de **57.62%**. Le poteau BA pré-endommagée de **30%** présente une force de **194.61 KN** et un déplacement de **31.13 mm** avec un apport de force de **16.74%** et de déplacement de 66.23. Le poteau BA pré-endommagée de **50%** présente une force de **93.87 KN** et un déplacement de **11.07mm** avec un apport de force de **154.37%** et de déplacement de **96.65%**.

Le poteau BA pré-endommagée de **50%** présente une valeur de force minimale par rapport aux variables de **10%** et **20%**, **30%** qui est de **371.93 KN** par contre le rapport maximal à **50%** est de **154.37%**. Ces différents apports sont quantifiés comme suit :

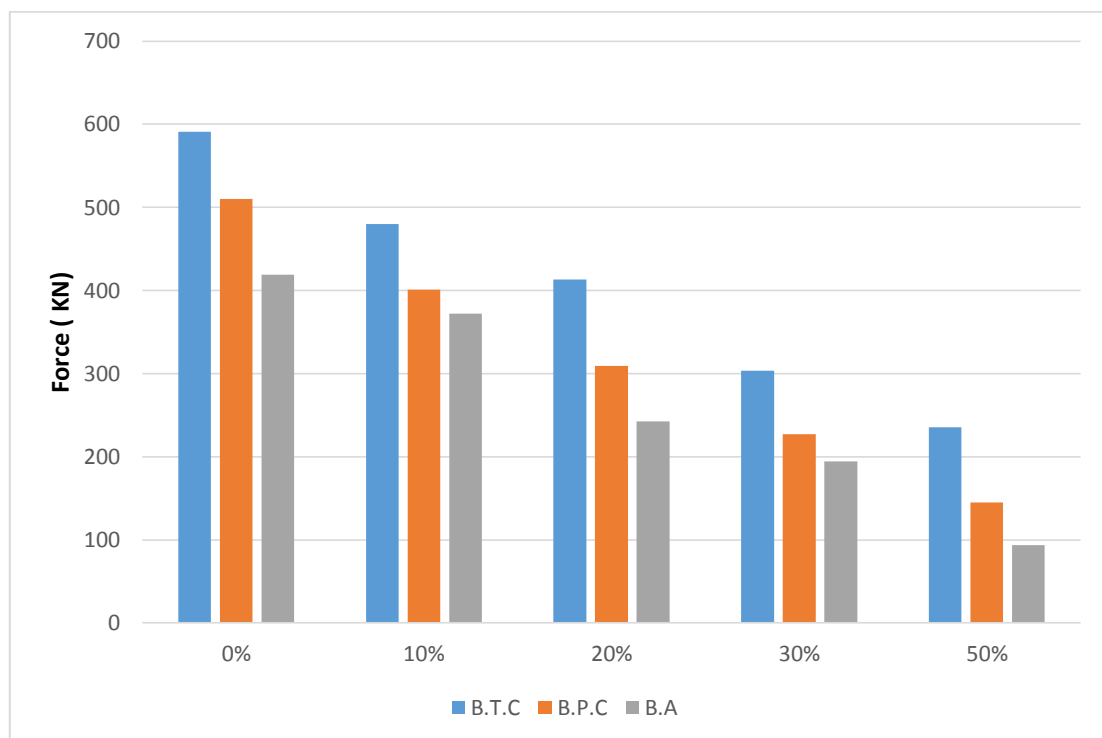
L'apport = (Capacité de poteau renforcé/ Capacité de poteau en béton armé)-1)*100

La comparaison des résultats de cette série montre que la variabilité de l'endommagement des zones de contraintes a un effet significatif sur la capacité de charge de poteau en béton armé. En effet, la meilleure configuration en termes de cartouche donne une variable d'endommagement de 50%. Il a été noté que la colonne renforcée à 30% et 50% pré-endommagée présentait une défaillance prématurée.

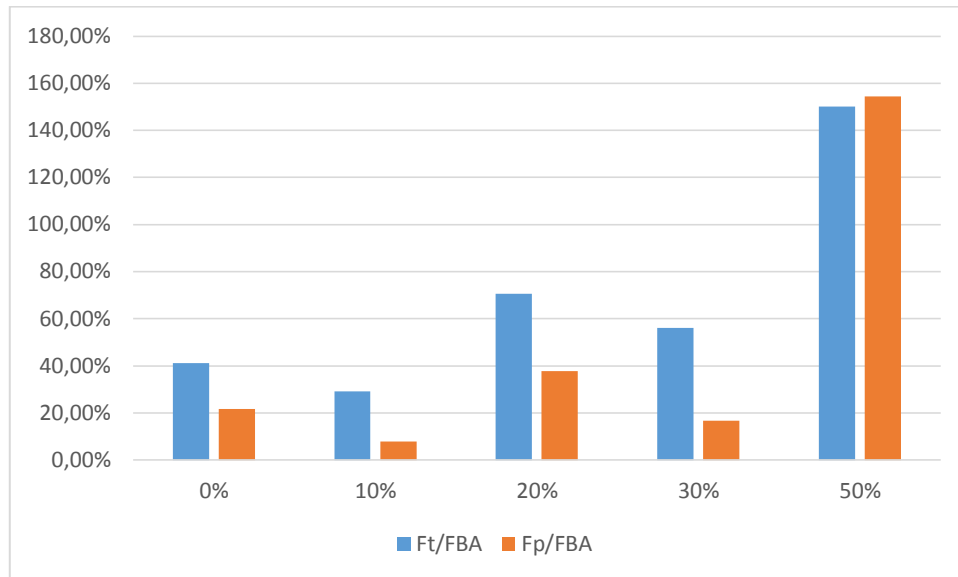
Les résultats numériques ont montré une augmentation de la résistance des poteaux renforcés comparativement aux poteaux non renforcés pour les différents taux d'endommagement considérés. Le **tableau IV.4** suivant représente la résistance des poteaux pré-endommagés.

La force latérale :

	B.T.C	B.P.C	B.A	F_t/F_{Ba}	F_p/F_{Ba}
0%	590.76	509.78	418.91	41.14%	21.7%
10%	479.978	401.146	371.93	29.05%	7.85%
20%	412.98	308.92	242.405	70.61%	37.66%
30%	303.68	227.19	194.61	56.04%	16.74%
50%	235.24	144.77	93.78	150%	154.37%



- Histogramme de la variation de la force selon le pourcentage



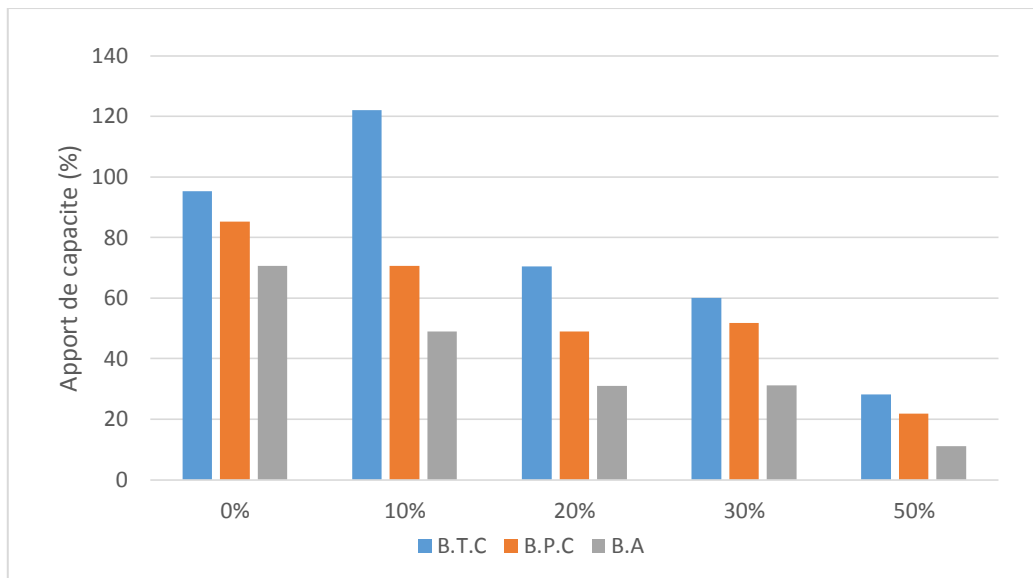
Histogramme des apports F_t/F_{BA} et F_p/F_{BA} (Force).

Figure IV.4: Histogramme de la variation de la force selon le pourcentage et des apports F_t/F_{BA} et F_p/F_{BA}

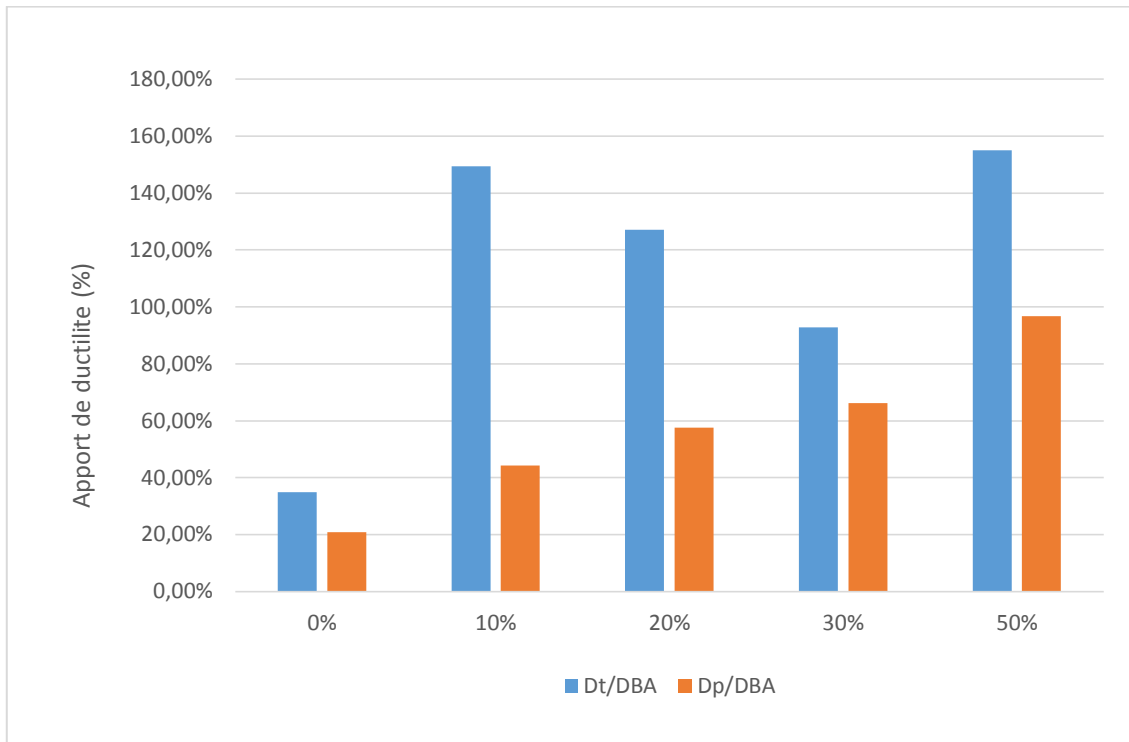
En examinant attentivement les données, il est possible d'observer une tendance remarquable: à mesure que les rapports deviennent plus importants, la résistance diminue de manière conséquente. Cette corrélation entre l'importance des rapports et la diminution de la résistance est fortement liée au pourcentage d'endommagements enregistré. En d'autres termes, lorsque les rapports augmentent, la résistance du système présente une baisse proportionnelle, ce qui se traduit par une augmentation significative du pourcentage d'endommagements observé. Cette observation souligne donc l'importance cruciale des rapports dans la compréhension des variations de résistance et des niveaux d'endommagements dans le système étudié, et met en évidence leur influence directe sur l'intégrité et la durabilité de ce dernier.

Déplacements horizontaux :

	B.T.C	B.P.C	B.A	D_t/D_{BA}	D_p/D_{BA}
0%	95.24	85.24	70.57	34.95%	20.78%
10%	122.07	70.62	48.95	149.35%	44.26%
20%	70.55	48.96	31.062	127.12%	57.62%
30%	60.01	51.75	31.13	92.77%	66.23%
50%	28.223	21.77	11.07	154.95%	96.655%



- **Histogramme de la variation du déplacement selon le pourcentage.**



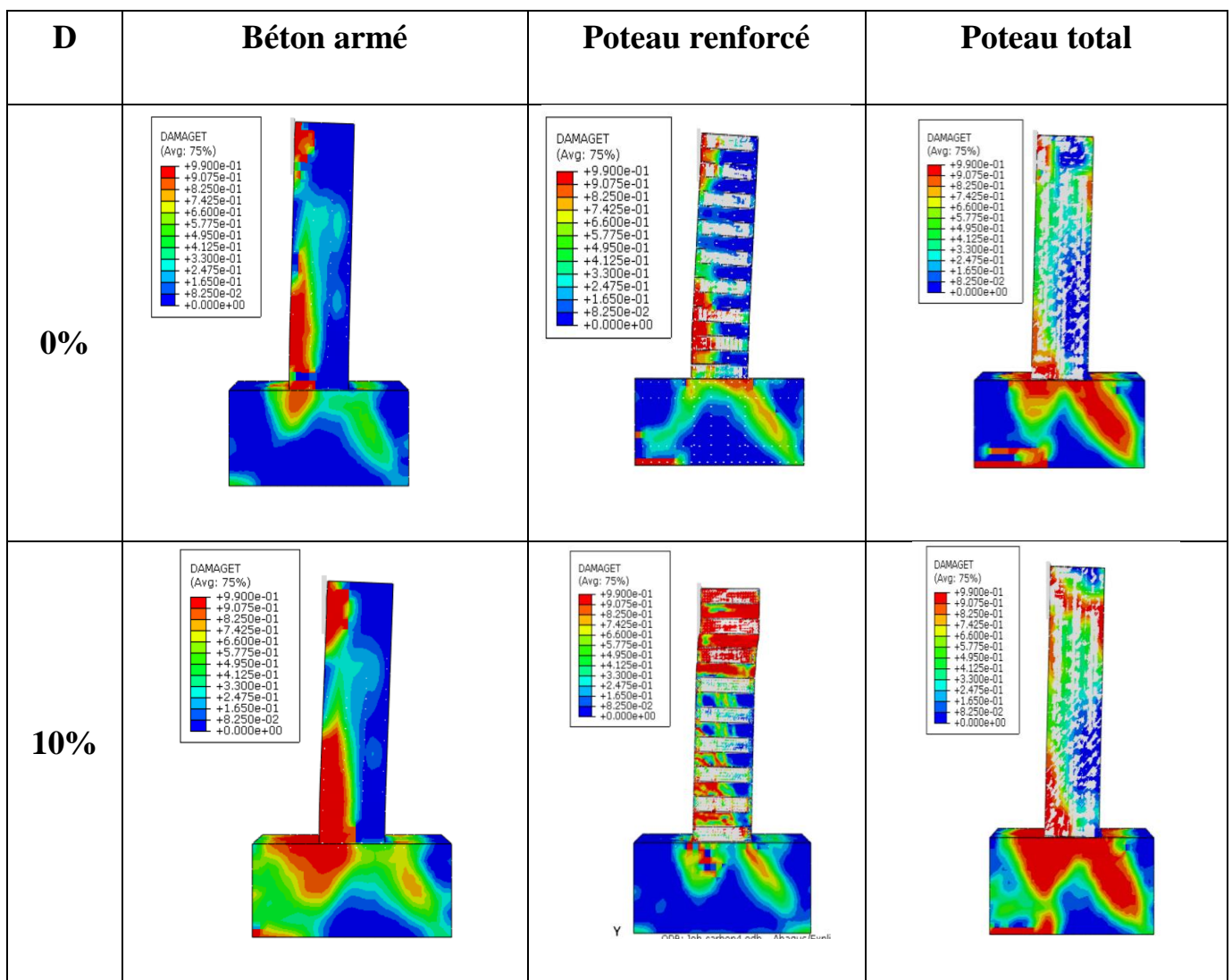
- **Histogramme des apports D_t/D_{BA} et D_p/D_{BA} (Déplacement)**

Figure IV.5: Histogramme de la variation du déplacement selon pourcentage et des apports D_t/D_{BA} et D_p/D_{BA}

Cet histogramme met en évidence une relation similaire à celle observée précédemment: une augmentation du rapport est associée à une augmentation du pourcentage d'endommagement, ce qui entraîne une diminution de la résistance pour chaque type de béton étudié. Toutefois, une observation intéressante peut être faite: la formulation BTC avec un pourcentage d'endommagement de 10% présente la meilleure résistance parmi les différents échantillons. Ce résultat suggère que malgré l'augmentation du pourcentage d'endommagement, la formulation spécifique du béton utilisée dans le cas de BTC permet de maintenir une résistance plus élevée par rapport aux autres échantillons. Cela peut être attribué à des caractéristiques spécifiques de cette formulation, telles que des

propriétés améliorées de liaison des composants ou une distribution plus homogène des matériaux constitutifs.

En conclusion, cette observation met en évidence l'importance de la formulation du béton et son impact sur la résistance face aux dommages. Elle souligne également la nécessité de poursuivre les recherches pour comprendre les mécanismes sous-jacents et développer des formulations de béton plus résistantes dans des conditions d'endommagement accrues.



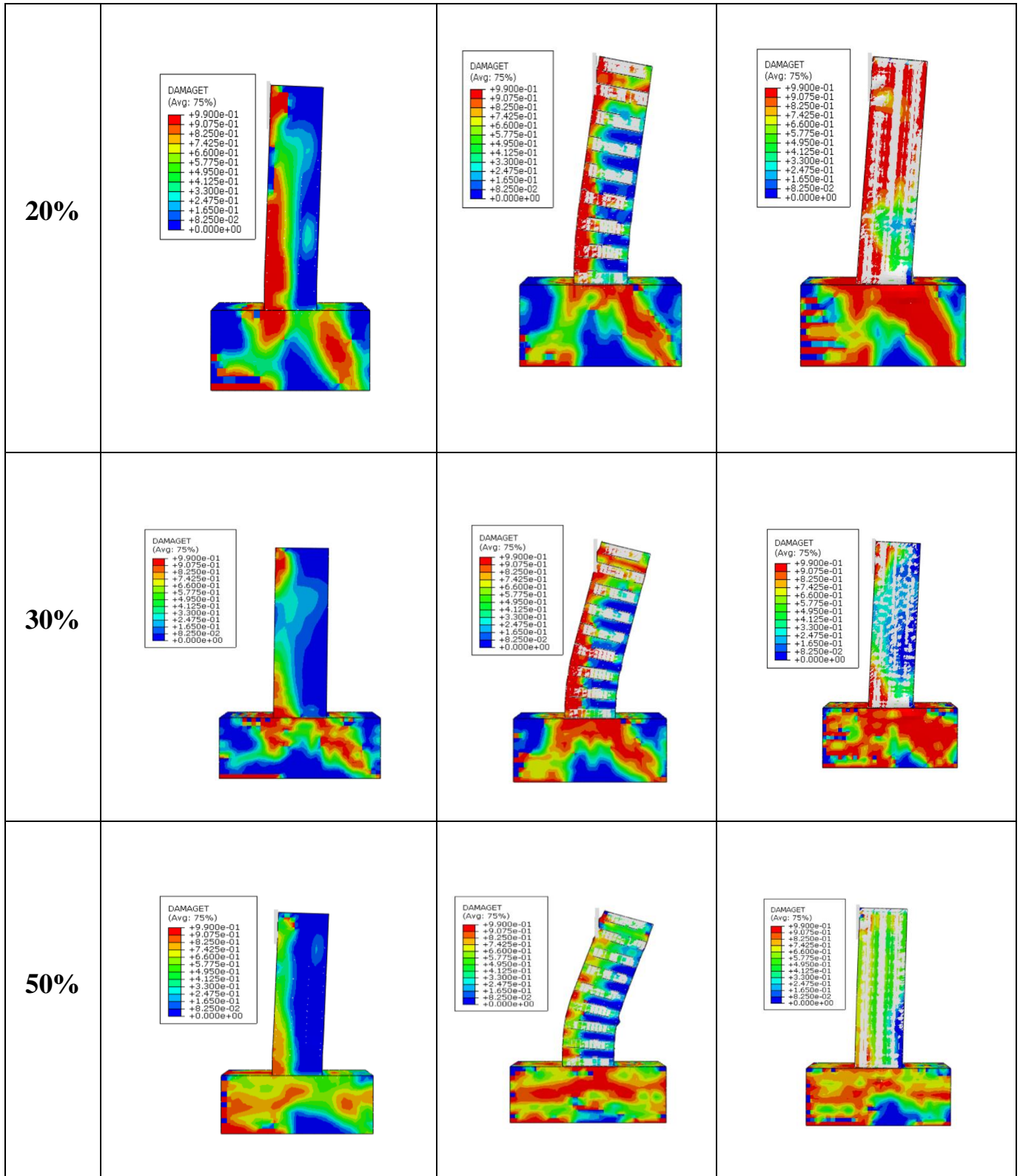


Figure IV.6: Représentation de l'évolution des dommages dus à la traction du poteau à base de béton et acier pré-endommagés

IV.4 Conclusion

Les différents résultats obtenus indiquent que le renforcement avec des matériaux composites a une part significative dans la capacité de charge de poteau en béton armé sous charge statique. L'analyse de ces résultats confirme que les barres de rupture subissent une flexion et/ou un cisaillement. En effet, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Augmentation de force d'environ 154,37% pour un poteau renforcée sans dommage initial, la force maximale de poteau total est 150% à base de béton.
- Augmentation de déplacement maximale d'environ 96.655% pour poteau renforcée à base de béton. Le déplacement maximal pour poteau total 154.73 % à base de béton
- Le gain du renforcement en terme de capacité portance et de ductilité augmente de manière proportionnelle avec le taux d'endommagement.
- Le confinement total peut restituer de capacité de charge d'un poteau endommagé à 30%, tandis que, le confinement partiel peut restituer de capacité de charge d'un poteau endommagé à 15%.

Conclusion générale

Les différents séismes qui ont touché plusieurs pays à travers le monde, ont montré l'urgence de développer des techniques de réhabilitation permettant de redonner aux structures des capacités nécessaires pour résister aux sollicitations de service. Dans cette démarche, notre travail de mémoire entrepris, s'inscrit dans la contribution des matériaux composites dans le confortement des poteaux en béton armé sous charges horizontales. Les objectifs de cette étude étaient d'améliorer le comportement mécanique d'un poteau en béton armé pré-endommagé par collage total et partiel des bandes composites en fibre de carbone « PRFC », au voisinage des zones critiques.

L'analyse des différents résultats obtenus dans ce travail de recherche, en termes de comportement global (courbes de capacité) et local (visualisation des endommagements) des différentes configurations de renforcement considérées a permis de lister les conclusions suivantes :

- ✓ Le béton témoin connaît un état d'endommagement plus important comparativement au poteau renforcé de fibres. Nous constatons que les poteaux en béton renforcés par des fibres de carbone sont accompagnés par une diminution des dommages.
- ✓ La résistance des différents poteaux étudiés évolue en fonction de collage total et partiel. Dans la configuration totale on obtient une très bonne résistance. Un gain en termes de capacité latérale de l'ordre de 76%, pour un poteau entièrement renforcé avec une bande totale. Un gain en termes de capacité de l'ordre de 33%, pour un poteau renforcé d'une manière partielle et optimisée.
- ✓ Amélioration de force latérale d'environ 154,37% pour un poteau renforcé sans dommage initial, la force maximale de poteau total est 150% à base de béton.
- ✓ Augmentation de déplacement maximale d'environ 96.655% pour poteau renforcée à base de béton. Le déplacement maximal pour poteau total 154.73 % à base de béton
- ✓ Le gain du renforcement en terme de capacité portance et de ductilité augmente de manière proportionnelle avec le taux d'endommagement.
- ✓ Le confinement total peut restituer de capacité de charge d'un poteau endommagé à 30%, tandis que, le confinement partiel peut restituer de capacité de charge d'un poteau endommagé à 15%.

Les différents résultats obtenus sont très satisfaisants, toutefois, des études futures devraient être réalisées pour confirmer et améliorer ces résultats. Par conséquent, pour la suite du travail, nous proposons les perspectives suivantes :

- Tenir en compte l'adhérence entre les matériaux composites et le béton, à travers des modèles de glissement et de contact ;
- Modéliser un poteau sous chargement sismique réel, de type cyclique monotone, ou par intégration d'un accéléro-gramme.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] - **DUPAIN R., LANCHON R., SAINT-ARROMAN J.C.** (2000); Granulats, sols, ciments et bétons, Edition Casteilla, Paris, 236 p
- [2] - Materials Science and Engineering par: **William D. Callister Jr., et David G. Rethwisch** (2018)
- [3] - **Delgado, M.** (2012). Histoire du béton : De l'Antiquité à nos jours. Éditions du Moniteur.
- [4] - **CHANVILLARD G., d'ALOIA L.** (1994) ; Prévion de la résistance en compression au jeune âge du béton, Application de la méthode du temps équivalent, Bull. Liaison Lab. Ponts et Ch., 1994, 193, 39-51
- [5] - **G. Vasudevan** and al "study on non-linear flexural behavior of reinforced concrete beams using ANSYS by discrete reinforcement modeling" Strength of Materials, Vol. 45, No. 2 March, (2013).
- [6] - **DUPAIN R., LANCHON R., SAINT-ARROMAN J.C.** (2000); Granulats, sols, ciments et bétons, Edition Casteilla, Paris, 236 p
- [7] - **NGUYEN T.L.H.** (2007) ; Outils pour la modélisation de la mise en œuvre des bétons, Thèse de Doctorat à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, décembre, 139 p.
- [8] - **IGUETOULENE.F** (2011) ; « modélisation non linéaire des structures triangulées » Thèse de MAGISTER, Université MOULOUD MAMMERI de Tizi-Ouzou.
- [9] **BAEL.** Règles de Béton Armé Aux États Limites (BAEL 91 modifiées 99), Edition Eyrolles, Troisième édition 2000
- [10] - **Glannoum W.M,** (1998):"Size effect on Sears straight of reinforced concrete teams". Mémoire de master école normale supérieure de Cachan.
- [11] - **S. DRIZI,** Influence de la variation des caractéristiques mécaniques sur le comportement des éléments en béton armé, MEMOIRE DE MASTER RECHERCHE, UMMTO Tizi-Ouzou (2012).
- [12] - Comité Euro -international du Béton, "Bond Action and Bond Behaviour of Reinforced – State of the Art Report", Bulletin d'information, N°151, Avril 1982.
- [13] - **Ferguson P.M.,** "Bond stress the state of the art", A.C.I Journal, vol.63, N°11, 1966.
- [14] **Djebbloun Youcef,** Etude de la rupture en MODE I d'ouverture des matériaux composites, Université de Biskra (2004).

Références bibliographiques

- [15] - **Pierre ROSSI** (TUNNELS ET ESPACE SOUTERRAIN - N°218 - Mars/Avril 2010)
- [16] - **Asquapro.**, Utilisation des bétons projetés pour la réparation et le renforcement des structures Comité Technique Asquapro Fascicule technique ASQUAPRO page 7 Version 2014.
- [17] - **ROSSI, 2005** (ROSSI, P., ARCA, A., PARANT, E., FAKHRI, P. (2005), Bending and Compressive Behaviors of a New Cement Composite, Cement and Concrete Research, no 35, p. 27–33)
- [18] - **MEDDAHI KAMEL**, Mme MEDDAHI NACIRA Née REZGUI, (2015); Comportements des bétons renforcés par des fibres métalliques, méthodologie et hypothèse de recherche.
- [19] - **Mohammad Dalour Hossen Beg.**, The Improvement of Interfacial Bonding, Weathering and Recycling of Wood Fibre Reinforced Polypropylene Composites; These de doctorat, University of Waikato, Hamilton, New Zealand, 2007.
- [20] **Carolin, A.** (2003). “*Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements*”, Doctorate Thesis, Lulea University of Technology, 178 p.
- [21] **Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T. et Lam, L.** (2002). “FRP strengthened RC structures”, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 245p.
- [22] **M. LACENE NECER Mohammed M. ELOUALI Ahmed** ; (2013), Étude technique et analyse statique non linéaire d'un bâtiment R+7 en béton armé ; Mémoire de Magister de l'université de TLEMCEM
- [23] **WEILER B., GROSSE C.**, 1996. Pullout Behaviour of Fibers in Steel Fiber Reinforced Concrete, Otto-Graf-Journal Vol. 7, pp. 116-127.
- [24] **François-Xavier IRISARRI**, Stratégies de calcul pour l'optimisation multiobjectif des structures composites, 2009.
- [25] - **RPA**, (2003). “REGLES PARASISMiques ALGERIENNES RPA 99 / VERSION 2003”
- [26] - **Grelat A**, “calcul non-linéaire des ossatures en béton armé”, Thèse de Docteur Ingénieur Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), France, 1978.
- [27] - **Sanya Johnson**, “Comparison of Nonlinear Finite Element Modeling Tools for Structural Concrete”, university of Illinois at Urbana Champaign, (December 15, 2006).
- [28] – **Saataggiogluet Ozcebe**, (1987). “Confinement of concrete columns for seismic loading”. ACI Structural journal Volume 84, Issue 4, pages 308-315.

Références bibliographiques

- [29]- **Yongping Xiea , Zhenbao Lib, Lei Jiaa , Hongyu Zhoub , Wenting Baia , Yuan Lia** : Flexural behavior and size effect of normal-strength RC columns under monotonic horizontal loading, *Engineering Structures*166 (2018) 251–262. College of Exploration Technology and Engineering, Beijing 100124, China.
- [30]- AFPS–Parasismic French Association. The seism of May 21, 2003 in Algeria. Preliminary report of the AFPS mission, Ministry for ecology and the durable development, 8 July; (2003)
- [31] **T. Hassaine Daouadji** : “analytical analysis of the interfacial stress in damaged reinforced concrete beams strengthened by bonded composite plates” *Strength of Materials*, Vol. 45, No. 5, September, (2013)
- [32] **Jesse. F, Curbach. M** « Strength of continuous AR-glass-fibre reinforcement for cementitious composites”, *RILEM International Workshop High Performance Fiber reinforced cement composite* 12, 337-348, 2003
- [33] **-HIBBIT, Karlsson & Sorensen, INC.** ABAQUS documentation version 6.14 ; 2014
- [34] - Mickaël ABBAS, Présentation du logiciel ABAQUS Principes et fonctionnement, Université de Technologie de Compiègne Laboratoires Roberval / UMR UTC-CNRS B.P.20529,version du 18/09/2012, stéphane Bochard.
- [35] **K. Mak, A. Fam** Performance of flax-FRP sandwich panels exposed to different ambient temperatures, *Construction and Building Materials* 219 (2019) 121–130 [36] H.M. Bahabadi, et al. “Investigation of debonding growth between composite skins and corrugated foam-composite core in sandwich panels under bending loading” *Engineering Fracture Mechanics* 230 (2020) 106987
- [37] **ADAM et NEVILLE.M** : “Propriétés des bétons”. Editions Eyrolles, Paris, 2000
- [38] - Didier Combescure, Quelques exemples de modélisations non linéaires simplifiées pour l’étude du comportement dynamique des structures de génie civil, Thèse de doctorat France, (2007).
- [39] - **Mahboub Lotfi Mr Moulessechool Sid Ahmed** ; (2009), étude des systèmes de contreventements des structures en béton armée par matériaux composites, Mémoire de Master : ingénieries des structures ; 113 pages
- [40] - **Aboutaha, R.S.**, et al “Rehabilitation of shear critical concrete columns by use of rectangular steel jackets.” *ACI Structural J.*, 96(1), 1999

Références bibliographiques

- [41] -**Nekmouche A, Kezmane A, ChérifiL, Boukais S** « Simulation numérique d'un portique en béton armé renforcé par collage des plaques composites » CMMS14 Le 13-14 novembre 2014.
- [42] **Khalifa, A., Nanni, A. and De Lorenzis, L.** “Shear performance of RC beams strengthened with FRP”. The International Workshop on Structural Composites for Infrastructure Applications, Cairo, Egypt, May, 217-230, 2001.
- [43]- **Hicham BELHANNACHI** ; REHABILITATION ET RENFORCEMENT DES POTEAUX EN BETON ARME Université Mentouri, Constantine Thèse de magister ,2009. [
- [44] **Mufti; A.A; Erki; M.A. and Jaeger; L.G.** «Advanced Composite Materials with Application to Bridges », Canadian society for civil engineering, 297 p, 1991.
- [45] - **Riad Benzaid, Habib abdelhakmesbah, Nasr-Eddine Chikh,** Contribution à l'Étude des Matériaux Composites Dans le Renforcement et la Réparation Des Éléments Structuraux Linéaires en Béton, Algérie, Livre, 2013.
- [46] -**H. Wang et al.** Seismic behavior of RC columns strengthened with near-surface-mounted aluminum alloy bars and CFRP wraps *Engineering Structures* 268 (2022) 114742
- [47] -**Z. Chen, S. Dong and Y. Du.** Experimental study and numerical analysis on seismic performance of FRP confined high-strength rectangular concrete-filled steel tube columns *Thin-Walled Structures* 162 (2021) 107560
- [48] **Y. Wang and G. Cai .** Numerical investigation on the bearing capacity of RC columns strengthened by HPFL-BSP under combined loadings *Journal of Building Engineering* 65 (2023) 10575
- [49] **Zeng JJ, Chen SP, Gao WY, Duan ZJ, Guo YC.** Three-dimensional finite element modeling and theoretical analysis of concrete confined with FRP rings. *Eng Struct* 2021; 234:111966.
- [50] **Zeng JJ, Guo YC, Gao WY, Li LJ, Chen W.** Stress-strain behavior of circular concrete columns partially wrapped with FRP strips, *Composite. Structure* 2018; 200:810–28.
- [51] **Zeng JJ, Guo YC, Li LJ, Chen W.** Behavior and three-dimensional finite element modeling of circular concrete
- [52] - **Abdelmadjid SI SALEM** (2016) ; Développement d'une poutre en béton-composite : analyse expérimentale et modélisation ; Thèse de doctorat de l'université de Tizi Ouzou.

Références bibliographiques

- [53] - **S. Djenad, S. Ait Taleb, A. Si Salem and M. A. Bouzidi** “NLFEA based design optimization of GFRP strips in partially confined concrete” *Procedia Structural Integrity* (2022) 37 321-329
- [54] - **S. Medjmadj, A. Si Salem and S. Ait Taleb.** Experimental behavior of plaster/cork functionally graded core sandwich panels with polymer skins. *Construction and Building Materials* 344 (2022) 128257
- [55] - **C. Ali Ahmed, A. Si Salem, S. Ait Taleb and K. Ait tahar.** Experimental behavior and reliability of pre-damaged concrete columns externally repaired with FRP spiral strips under axial compression/ *World journal of engineering* 2022 <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/WJE-06-2022-0248/full/html>
- [56] - **A. Si Salem, S. Djenad and S. Ait Taleb.** Experimental Axial Compressive Behavior of Partially Confined Concrete Columns with Combined External and Internal FRP Strips. *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM)*, 2022 Volume 21, Pages 356-362
- [57] - **S. Ait Taleb, S. Medjmadj and A. Si Salem.** Modeling the Nonlinear Behavior of Predamaged Reinforced Concrete Beams Retrofitted with Bonded and Jacketed FRP Sheets. *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM)*, 2022 Volume 21, Pages 288-294
- [58] - **Si Salem A, Ait Taleb Souad & Ait tahar K** « Static and dynamic behavior of composite concrete-based beams with embedded Polymer/FRP Components » *Procedia Engineering*, 114C, 2015, 173-180.
- [59] - **S. Ait Taleb, Abdelmadjid Si Salem & Kamal Ait tahar** “Behaviour of a new graded beam reinforced with externally bonded composite sheets”, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21(9), 2016 1171-1185.
- [60] - **S. Ait Taleb, A. Si Salem and K. Ait tahar.** “Bending and shear behavior of a composite beam strengthened and double-confined with FRP-jacket”, *Procedia Engineering*, 114(C), 2015, Pages 165-172.
- [61] - **S. Ait Taleb, A. Si Salem and K. Ait tahar.** “Experimental and theoretical modeling coupled to a reliability approach for flexural failure prediction in hybrid composite beams” *Asian Journal of Civil Engineering* (2020) 21:495–504

Références bibliographiques

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

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

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

Résumé

La réparation et la réhabilitation de structures en béton armé par collage externe et/ou intégration de matériaux composites a montré une importance significative et prometteuse pour répondre aux besoins de restitution des performances mécaniques. Les recherches récentes focalisées sur le comportement des poteaux en béton armé sous chargement statique et dynamique monotone ont montré que les endroits les plus sollicités voire les plus endommagés sont au voisinage des sommets et des bases des poteaux.

Dans cette optique, le présent travail consistera à proposer un modèle numérique pour prédire la réponse des poteaux pré-endommagés et réhabilités par le collage externe des bandes en fibre de carbone (CFRP) sous charges latérales. Le renforcement s'effectuera suivant les bielles de rupture dont le taux d'endommagement initial et la conception de disposition des renforts fera l'objet d'une optimisation. Les principaux résultats obtenus montrent que le confinement total peut restituer de capacité de charge d'un poteau endommagé à 30%, tandis que, le confinement partiel peut restituer de capacité de charge d'un poteau endommagé à 15%.

Mots clés : Réhabilitation, Endommagement, Comportement non linéaire, Matériaux composites, Simulation numérique, Restitution de rigidité.