REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU

FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Mémoire de master académique

Spécialité : génie civil

Option : structure

Thème

Analyse des dalles en béton renforcées par des lamelles en carbone

Proposé et dirigé par :

Mr Seddik MERAKEB

Présenté par :

M^elle^ Sonia BAKIRI

Soutenu le : Septembre 2015

Remerciements

J'exprime ma profonde gratitude à mon promoteur : monsieur MERAKEB SEDDIK, pour le choix de sujet, et pour avoir accepté de me diriger et de m'avoir guidé dans cette recherche, pour ses précieux conseils, son soutien inconditionnel, sa vision exceptionnelle du domaine. Je tiens également à le remercier pour sa grande disponibilité, je lui dois ce travail.

*J*e tiens également à adresser mes remerciements aux membres du jury, pour avoir accepté de juger ce mémoire et participer aux jurys.

*J*e tiens à remercier tous ceux qui ont contribués de loin ou de prés pour que ce travail puisse être sous sa forme actuelle.

*M*erci à ma famille, mes parent, pour m'avoir soutenue, donné de bons conseils et pour être toujours là dans les moments difficiles et heureux, merci à mes sœurs et à mon frères que j'adore.

*J*e tiens à exprimer mes sincères remerciement a celui qui ma aidé et à surmonté toutes les difficultés rencontrée, HAMROUNE DJEFFER, et tous mes amis (es), pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Dieu merci.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à

Mes chers parents, ma mère que j'aime beaucoup, et mon père que j'adore,

que Dieu vous garde pour nous.

Mes frères et sœurs.

Mes adorables nièces et neveu SAID, MAMMI, DINA, MALIK, HASSANE, que Dieu les protège

Mes chers amis.

RESUME

Le renforcement des structures en béton est l'une des méthodes curatives utilisées pour la réhabilitation des infrastructures de génie civil, afin d'assurer la sécurité et le prolongement de la durée de vie. Lorsque l'élément en béton est renforcé par des matériaux composites, la résistance du béton et sa ductilité seront augmentées.

Cette étude présente le comportement des dalles en béton, renforcées ou non au moyen des lamelles en fibres de carbone collées extérieurement à l'aide de résine, soumises à un effort en leur centre. Et aussi l'influence du renforcement du béton, sur la résistance et la ductilité des dalles.

Cette étude s'est effectuée à travers la réponse globale de l'élément de structure qui est caractérisée par la courbe force-déplacement par une analyse numérique à l'aide du logiciel de calcul CASTEM 2000, en utilisant la loi d'endommagement de Mazars pour le béton. A partir de ces courbes force-déplacement, nous avons confirmé que le gain en termes de résistance est fonction de la section du renforcement et de sa direction.

Mots clés: Dalle en Béton –composites– renforcement– Modélisation Numérique.

ABSTRACT

The reinforcement of the concrete structures is one of the curative methods used for the rehabilitation of the infrastructures of civil engineering, in order to ensure safety and the prolongation of the lifetime. When the concrete element is reinforced by composite materials, the resistance of the concrete and its ductility will be increased.

This study presents the behavior of the concrete slabs, reinforced or not by means of the carbon fibre strips stuck outside using resin, subjected to an effort in their center. And also the influence of the reinforcement of the concrete, on the resistance and the ductility of these flagstones considered.

This study was carried out through the total answer of the element of structure which is characterized by curved force displacement by a digital analysis using the tool for digital simulation CASTEM 2000, by using the law of damage of Mazars for the concrete.

From these curved force displacement, it was confirmed that the profit in term of resistance is function of several parameters such as: direction of the strip…

Keys words: Concrete slab – composites - reinforcement - numerical Modeling.

Liste des figures

Figure I .1 la première réalisation en béton Armé Barque de Joseph Louis lambot 2

Figure I.2 phases successives du comportement d'une dalle en flexion 8

Figure I.3 dalle rectangulaire articulée sur quatre côtes 10

Figure II.1matériaux composites 13
Figure II.2différentes familles de matrices 13
Figure II.3différentes familles des renforts 14
Figure II.4Eléments composants de la forme linéique. 15
Figure II.5Eléments composants de la forme surfacique 16
Figure II.6éléments composants de la structure multidimensionnelle 22
Figure II.7principales applications de renforcement par composite collés sur ouvrages 23
Figure II.8réparation de la poutre par adjonction d'armature 24
Figure II.9Réparation de poutre par béton projeté 25
Figure II.10Application de plats métalliques selon le procédé L'Hermite 26
Figure II.11Tôles colées; (a) difficulté de manutention; (b) Renforcement du viaduc 26
Figure II.12Principe d'une réparation par matériaux composites 27
Figure II.13Mise en œuvre de bandes de renfort en sous face d'une dalle et sur des poutres 28
Figure III.1 : Caractéristiques géométriques de la dalle 34
Figure III.2 : Vue en 3D du maillage de quart de dalle. 34
Figure III.3 : courbe force déplacement d'une dalle témoin 36
Figure III.4 : courbe force déplacement d'une dalle renforcée dans seule direction 36
Figure III.5 : courbe force déplacement d'une dalle renforcée dans deux directions 37
Figure III.6 : courbe de comparaison force-déplacement 38
Figure III.7 : cartographie des contraintes des différentes dalles (section des fibres $100mm^2$) 40
Figure III.8 : cartographie des contraintes sur la face inférieure de la dalle 41
Figure III.9 : cartographie des déformations pour différentes sections des fibres dans le cas d'un renforcement unidirectionnel 42
Figure III.10 : cartographie des déformations pour différentes sections des fibres dans le cas d'un **r**enforcement bidirectionnel 43
Figure III.11: profil des efforts internes dans la fibre suivant X 44
Figure III.12 : profil des efforts internes dans la fibre suivant Y 45

Liste des tableaux

Tableau II. 1 : Avantages et inconvénients de la Fibre de verre..... 17

Tableau II. 1: Avantages et inconvénients de la fibre de carbone 17

Tableau III. 1 : propriétés mécaniques du béton..... 35

Tableau III. 2 : propriétés mécaniques des lamelles en carbone 35

Tableau III. 3 : Résultats de calcul de la capacité ultime pour les différentes dalles..... 39

Tableau III-4 : valeurs des efforts interne de différentes sections des fibres 46

SOMMAIRE

Introduction générale……..1

CHAPITRE I : GENERALITE

I.1 Introduction.....2

I.2 Les modèles de comportement du béton 3

I.2.1 Comportement du béton selon la loi élastique.....4

I.2.2 Comportement du béton selon la loi de rupture.....4

I.2.3 Comportement du béton selon la loi élasto-plastique.....5

I.2.4 Comportement du béton selon la loi élasto-endommageable 6

I.3 Rappels sur les dalles.....7

I.4 Comportement des dalles.....8

I.5 Comportement globale d'une dalle fissurée 12

I.6 Comportement des dalles sous charge concentrée.....13

CHAPITRE II : MATERIAUX COMPOSITES

II.1 Introduction 15

II.2 Définition.....15

II.3 Définition de base.....15

II.4 Constituants des matériaux composites.....16

II.4.1 La matrice.....16

II.4.2 Les renforts……

II.5 Classification des matériaux composites.....26

II.5.1 Classification suivant la forme des constituants.....26

II.5.2 Classification suivant la nature des constituants 27

II.6 Les charges et les additifs 27
II.7 Principaux avantages et inconvénients des matériaux composites 27
II.8 Comportement élastique des matériaux composites 28
II.9 Utilisation des matériaux composites 29
II.10 La nécessité d'un renfort structurel 29
II.11 Applications des matériaux composites en génie civil 30
II.12 Techniques de renforcement 32
II.12.1 Renforcement par adjonction d'armature complémentaire 32
II.12.2 Béton projeté 33
II.12.3 Tôles collées 34
II.12.4 Précontrainte additionnelle 37
II.12.5 Renforcement des ouvrages par des matériaux composites 37
II.13 conclusion 37

CHAPITRE III :SIMULATION NUMERIUES

III.1 Introduction 40
III.2 Modèle de Mazars 40
III.3 Présentation de CASTEM 43
III.3.1 Modélisation de la structure 43
III.3.2 Conditions aux limites 45
III.3.3 Propriétés mécaniques 45

III.3.4 Conditions de chargement 46
III.4 Interprétation des résultats 46
III.4.1 Dalle sans renforcements 46
III.4.2 Dalle avec renforcement unidirectionnel 47
III.4.3 Comparaisons des résultats 48
III .5 Influence du renforcement sur la cartographie descontraintes..... 52
III.6 Influence de la direction et la section de renfort sur les déformations..... 54
III.7 Profil des efforts interne dans les fibres 56
III.8Conclusion 59

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Depuis plusieurs années, la réfection et le renforcement des ouvrages en béton armé prennent de plus en plus de l'importance dans la construction. Plusieurs facteurs font qu'il est peut être nécessaire de renforcer ou de réparer un ouvrage : la corrosion des armatures, la fissuration du béton, un mauvais dimensionnement, l'endommagement par un tremblement de terre…etc.

Les méthodes classiques de renforcement et de réparation comme l'augmentation de section par l'ajout de nouvelle barre d'armatures ou d'un nouveau béton, sont souvent difficile à réaliser.

Depuis une dizaine d'année, une alternative est proposée : il s'agit de renforcer ou de réparer les ouvrages en béton par des matériaux composites à matrice organique collés extérieurement sur des structures dégradées. Les matériaux composites, en particulier à base de fibres de carbone, de part leur résistance, présentent un grand intérêt pour la réparation des ouvrages. Malgré leur prix élevé, ils présentent un avantage économique car ils peuvent être mis en œuvre directement sur les structures par moulage au contact, procédé appelé aussi polymérisation in-situ ou stratification directe. Ceci permet de réduire considérablement les coûts liés à la manipulation des matériaux ainsi que les problèmes liés aux interruptions des activités des ouvrages réparés.

Dans le domaine du génie civil, les matériaux composites sont utilisés pour le renforcement et la réhabilitation d'éléments structuraux en béton armé, tels que les poutres, les dalles, les colonnes et les murs. Les premières recherches sur l'application de ce nouveau matériau destinées aux ouvrages de génie civil datent de 1980, bien que ce soit plutôt vers 1990 que le matériau est utilisé, d'abord sur une base expérimentale, puis progressivement sur une base commerciale.

Dans cette étude nous nous intéresserons à mettre en évidence le comportement mécaniques des dalles renforcées par des lamelles en carbone placées dans la partie tendue de la structure.

La présence étude est structurée en trois chapitres ;

- ✓ Le premier chapitre consiste à représenter une synthèse bibliographique sur l'état des connaissances sur les modèles de comportement de béton, notamment les modèles d'endommagement et de rupture. Dans ce chapitre, une description d'une certaine

approche possible pour décrire les phases successives du comportement des dalles en béton armé a été présentée.

- ✓ Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des matériaux composites et les différents constituants et leur classification, et décrit aussi les différentes techniques de renforcement des structures en génie civil par coulage des matériaux composites suivi d'autres techniques de renforcement.
- ✓ Le troisième chapitre, qui constitue l'objectif de cette étude, porte sur une modélisation numérique par éléments finis à l'aide du logiciel de calcul « Cast3M »le comportement des dalles. Cette étude va comparer le comportement des dalles non renforcées et renforcées par des lamelles de carbone.

Une conclusion générale termine cette étude.

CHAPITRE I : GENERALITES

I.1 Introduction

Le béton, depuis son invention, a toujours été considère comme un matériau noble par excellence dans les constructions de GENIE CIVIL, aujourd'hui il est le plus maitrise et il est le matériau le plus utilisé dans tous les domaines de construction, qu'il s'agisse du bâtiment ou d'ouvrage d'art comme les ponts ou barrages [1].

Comme les roches naturelles, le béton possède une grande résistance a la compression et une faible résistance à la traction. C'est pourquoi son utilisation comme matériau de construction, qui remontre aux Romains, ne s'est véritablement développée qu'avec l'invention du béton armé. Dans ce dernier, des armatures, c'est-à-dire des barres en acier (initialement en fer), pallient son insuffisante résistance à la traction.

L'invention du béton arme est généralement attribuée à Joseph Monier, qui, en 1848, fit flotter une barque en ciment armé, et à Joseph Monier, qui construisit indépendamment, grâce à ce matériau, des bacs a fleurs en 1849. L'emploi du béton arme dans les structures s'étend dés lors rapidement en France sous l'impulsion de Joseph Monier, mais aussi de Coignet, de François Hennebique et d'Armand Gabriel. Dés 1906, une circulaire ministérielle fixe des instructions relatives à l'emploi du béton armé, codifiant ainsi pour la première fois la conception et le calcul des ponts et des bâtiments avec ce matériau.

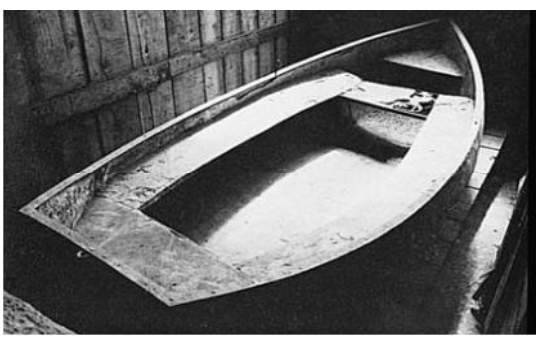


Figure I.1 : la première réalisation en béton Armé Barque : de Joseph Louis lambot 1849 [2]

Un nouvel essor est apporté par l'invention, vers 1930, du béton précontrainte par Eugène Freyssinet, un pas conceptuel important est alors franchi, qui constitue une véritable révolution dans l'art de construire, tant par la mise en pratique de la notion de précontrainte que par l'approfondissement de la compréhension du comportement mécanique et rhéologique du béton [3].

Le béton fait partie de notre cadre de vie et a mérite sa place par sa simplicité de fabrication, sa facilité de mise en place, ses performances mécanique et sa résistance au feu.

C'est un matériau composite obtenu après un mélange en proportion convenable de ciment, de granulats, eau et aussi des adjuvants. Ces composantes ont des caractéristiques mécaniques et physique-chimique différents

I.2 Les modèles de comportement du béton

Le béton a un comportement complexe difficile à représenter par une seule loi macroscopique homogène. Cette difficulté est liée notamment à la forte hétérogénéité du béton qui est un matériau composite constitué de granulats de différentes tailles, d'une matrice cimentaire et de cavités. A cela s'ajoutent des microfissures distribuées de manière aléatoire et présentes même à l'état dit vierge, c'est-à-dire avant toute sollicitation externe. Selon la nature et l'intensité de la sollicitation, le béton se déforme de manière complexe en faisant intervenir une ou plusieurs combinaisons de mécanismes élémentaires : élasticité, endommagement, glissement, frottement, fissuration… Des recherches ont été lancées depuis le début du XX^{e} siècle sur le comportement mécanique du béton dans l'espoir de mieux comprendre les mécanismes de dégradation de ce matériau [4].

De nombreux modèles de comportement du béton ont été proposés par différents auteurs dans la littérature. Les lois élastiques sont les plus simples. D'autres lois de comportement plus complexes prenant en compte des phénomènes comme la plasticité, la rupture, l'endommagement ont ensuite été successivement proposées. Aujourd'hui, l'étude des couplages entre l'endommagement et le comportement plastique des bétons fait l'objet de nombreuses recherches. Chacun de ces modèles

présentes des avantages et des inconvénients, ainsi que des champs d'application différents pour le calcul des structures en béton.

I.2.1 Comportement du béton selon la loi élastique

Avec une loi de comportement élastique, le béton est considéré comme totalement élastique. Les non linéarités apparaissant dans les zones pré-pic et post-pic sont négligées La loi de comportement est formulée à partir de la loi de Hooke. Quelques auteurs considèrent néanmoins les non-linéarités dans la partie pré-pic, comme Ahmed & Shah (1982) ou bien utilisent la relation entre les incréments de la contrainte et la déformation Gerstle (1981).

L'avantage de cette loi de comportement est sa simplicité, en particulier pour les modèles élastiques linéaires **[5].**

I.2.2 Comportement du béton selon la loi de rupture

Les approches d'élasticité linéaire de la rupture (LEFM-Linear Elastic Fracture Mechanics) s'adaptent bien à l'hypothèse de comportement parfaitement fragile du béton. Les paramètres de rupture et la condition critique de propagation des fissures sont alors décrits selon les principes de la mécanique de la rupture en tenant compte des fonctions géométriques obtenues à partir des essais dans le laboratoire. Kaplan (1961) et Glucklich (1963) ont introduit les formules analytiques de LEFM dans la modélisation du béton avec les facteurs d'intensité de contrainte Ki et les énergies de rupture Gf. Le béton est toujours considéré comme élastique et isotrope dans les zones hors des fissures.

I.2.3 Comportement du béton selon la loi élasto-plastique

La programmation par la méthode des éléments finis selon cette loi est relativement simple car le milieu de calcul est toujours continu. Le comportement en compression est bien décrit par les lois fondamentales ou modifiées à partir des modèles Mohr-Coulomb et Drucker Prager tandis que le comportement en traction peut être modélisé avec une précision suffisante par une loi de rupture simple.

Plusieurs modèles élasto-plastiques pour le béton ont également été proposés dans les années récentes comme Raynourd (1974), Franzetkakit (1987), Chen & Han (1988), Lubnier & Olivier (1989), Kang & al (2009), Nedjar (2002), Ulm & Coussy (2003)... Ces modèles s'intéressent bien au comportement en compression du béton et établissent la surface de plasticité selon les différentes hypothèses. L'inconvénient du plus grand de ces modèles plastiques est la non-considération de la diminution de la rigidité du béton dans les zones de rupture et dans le cas des bétons à haute résistance, le comportement du béton est plutôt fragile que plastique. En réalité cependant, les modèles plastiques sont déjà appliqués avec efficacité dans les calculs des structures en béton. Dans plusieurs normes de béton, les formules se basant sur la théorie de la plasticité ont introduites avec beaucoup de succès.

Dans la modélisation numérique par la méthode des éléments finis, les modèles élasto-plastiques tenant compte la localisation de la déformation en couplant les approches de gradient sont les tendances de recherche actuelle où l'endommagement du béton peut être considéré pour tenir compte de la diminution de la rigidité dans les zones plastiques.

I.2.4 Comportement du béton selon la loi élasto-endommageable

Les modèles de comportement du béton selon la loi élasto-endommageable se basent sur les principes fondamentaux de la mécanique de l'endommagement du milieu continu.

L'endommagement est caractérisé par la variable d'endommagement D (variant de 0 à 1) quand le matériau évolue de l'état sain à l'état totalement endommagé. La notion de contrainte effective est introduite pour tenir compte de la diminution du module d'élasticité E dans les zones de rupture du béton. Le premier modèle d'endommagement proposé par Kachanov (1958) était un modèle isotrope classique où la variable d'endommagement D est contrôlée par la déformation. Ensuite, plusieurs auteurs ont proposé des modèles appelés locaux comme Mazars (1984), Simo & Ju (1987a, 1987b); ces modèles ont fait apparaître plusieurs inconvénients dans la modélisation numérique comme la dépendance du résultat de calcul au maillage des éléments finis, le phénomène « snap-back »… Par la suite, pour

surmonter ces problèmes, des approches appelées non-locales et gradient, comme celles de Pijaudier-Cabot & Bazant (1988-1989), Frémont et Nedjar (1993), Jirasek (1996, 2004), etc, sont introduites pour tenir compte la localisation de la déformation dans les zones de rupture du béton en utilisant la déformation équivalente comme paramètre de contrôle. On utilise plutôt en réalité des variables scalaires avec lesquelles les calculs deviennent plus simples avec toutefois une tolérance acceptable. Les modèles élasto-endommageables donnent de bons résultats qui sont indépendants du maillage éléments finis et la localisation de la déformation est totalement considérée. Parmi les modèles d'endommagement cités dans la littérature, le modèle Mazars pouvant ternir compte de la dissymétrie du comportement du béton en compression et en traction est largement implanté dans les codes éléments finis et pris couramment comme la base générale pour développer les modèles plus compliqués, notamment les modèles de couplage multi-physiques. Le modèle Mazars a pourtant des inconvénients comme ne pas considérer l'effet unilatéral, celui-ci étant observé sous charge cyclique et la déformation résiduelle du béton lors du déchargement. Heureusement, ces effets ne sont importants que pour le chargement cyclique, autrement dit, lorsque le chargement est radial, ce modèle peut modéliser correctement le comportement du béton. La programmation par la méthode des éléments finis des modèles élasto-endommageables est aussi aisée que celle des modèles élasto-plastiques, le milieu de calcul restant toujours continu.

I.3 Rappels sur les dalles

On appelle plaque, un solide délimité par deux plans parallèles distants de *h* et par un surface cylindrique fermée normale à ces plans ; elles sont dites minces lorsque que cette épaisseur *h* est faible devant les autres dimensions.

Les dalles constituent un des éléments de structure le plus classique. Du point de vue mécanique, une dalle est un élément bidimensionnel de structure plan, d'épaisseur faible par rapport à ses dimensions dans le plan. Elle résiste aux efforts auxquels elle est soumise par des mécanismes de flexion dans une ou deux directions suivant sa géométrie et ses conditions aux limites.

La mécanique des structures permet de décrire le comportement des dalles, grâce à des équations aux dérivées partielles (équation fondamentale de Kirchhoff) et parmi les méthodes qui existent, la méthode des éléments finis est actuellement la plus utilisée. En plus, en fonction de la nature des matériaux qui les constituent et de la géométrie de leur section transversale, les dalles peuvent être classées en trois catégories [7].

• **Les dalles isotropes:** elles sont constituées de matériau isotrope (acier, béton parfaitement mis en œuvre, par exemple) et leur section transversale est homogène.

Elles ont les mêmes caractéristiques mécaniques dans toutes les directions. Elles sont définies par deux paramètres rhéologiques élastiques: module d'élasticité ou module de Young *E* et le coefficient de poisson *v*. On les retrouve dans les constructions civiles courantes (bâtiments, ouvrages d'art...).

• **Les dalles orthotropes:** l'orthotropie, naturelle (bois) ou technique (dalles raidies), fait que les propriétés élastiques de ces dalles sont différentes dans deux directions perpendiculaires. Le comportement de ces dalles est défini par quatre caractéristiques élastiques et on les retrouve dans les ouvrages navals, aéronavals, de réservoirs de l'industrie chimiques, des bâtiments et d'ouvrages d'art.

• **Les dalles anisotropes:** leurs paramètres élastiques sont différents dans toutes les directions. Six paramètres élastiques sont suffisants pour les décrire. Elles sont souvent constituées de matériaux composites et sont surtout utilisées dans l'industrie aéronavale ou aérospatiale

Il est aussi possible de classifier les dalles en fonction de leur système porteur. On peut distinguer :

• les dalles portant dans une direction (dalles sur deux appuis). Ces dalles ont un comportement unidirectionnel et se comportent essentiellement comme des poutres, et se dimensionnent selon les mêmes principes,

• les dalles portant dans deux directions (dalles sur quatre appuis). Ces dalles ont un comportement bidirectionnel et transmettent la charge à laquelle elles sont soumises dans les deux directions du plan en direction des appuis,

• les dalles portant sur des appuis ponctuels, ces appuis sont généralement constitués de colonnes en béton ou en acier.

I.4 Comportement des dalles

Le comportement flexionnel des dalles comprend plusieurs phases qu'il est important de distinguer [8]

• Phase élastique linéaire

Dans cette première phase de chargement (stade I FIG I.2), la dalle se comporte pratiquement comme une structure douée d'un comportement élastique linéaire.

• Phase de fissuration

La fissuration du béton apparaît dans les zones les plus sollicitées pour s'étendre sous charge croissante aux autres zones pour lesquelles le moment de fissuration est dépassé. La rigidité des sections fissurées est réduite, ce qui conduit à une modification de la répartition des moments de flexion, les moments dans les zones non fissurées augmentent plus, pour un même accroissement de charge, que dans la phase élastique. Tant que l'écoulement de l'armature ne se produit pas, l'ouverture des fissures est limitée.

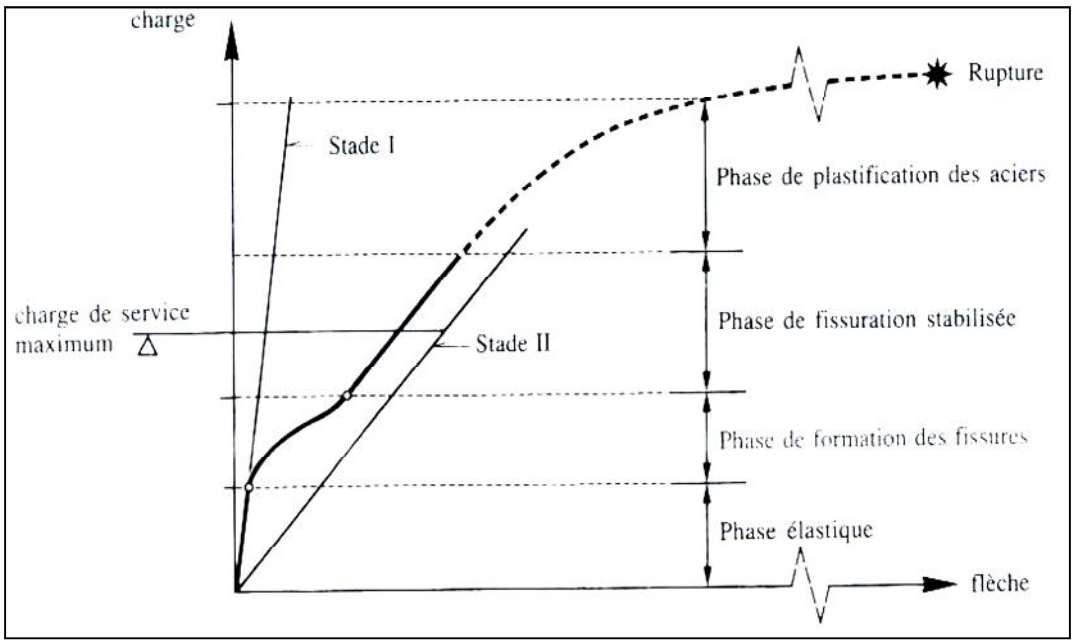


Figure I.2: phases successives du comportement d'une dalle en flexion

- **Phase d'écoulement**

L'armature s'écoule progressivement dans les zones où les moments sont les plus élevés. Les sections où l'acier d'armature atteint sa limite d'écoulement continuent de se déformer, mais le moment de flexion n'y augmente plus, ce qui cause une redistribution des moments, plus importante que dans la phase précédente. Les zones d'écoulement de l'acier s'étendent progressivement et se concentrent le long de bandes étroites où se produisent les fissures les plus ouvertes. Ces fissures se développent suivant un schéma qui dépend notamment de la géométrie de la dalle, des conditions d'appui, de la répartition des armatures et du mode de chargement.

- **Phase de rupture**

Lorsque les lignes d'articulation ont atteint un stade de développement tel que la dalle est transformée en un assemblage de sous-structures, une très légère augmentation des charges conduit à un état d'équilibre instable provoquant l'effondrement de la dalle.

I.5 Approche mécanique du comportement des dalles non fissurées

•Approche par la théorie des plaques

Le calcul des plaques dans le domaine élastique, sous chargement réparti, conduit à résoudre l'équation différentielle suivante :

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^2} + 2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q}{B} \tag{0.1}$$

Cette équation d'équilibre est plus connue sous le nom d'équation des plaques et fut établie la première fois par Lagrange en 1811.

Avec :

$$B = \frac{Eh^3}{12\left(1-\upsilon^2\right)}$$

B : Représente la rigidité flexionnelle de la dalle

E: module d'Young du matériau constitutif de la dalle

ν: Coefficient de Poisson du matériau

h : épaisseur de la dalle

Cette équation différentielle du quatrième ordre dans l'espace à deux dimensions n'ayant pas de solution mathématique exacte. Dans le cas des dalles rectangulaires articulées sur les quatre côtés, Navier a proposé pour résoudre l'équation précédente de définir la charge extérieure sous la forme de double série de Fourier.

$$q(x,y)=\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}A_{m,n}\sin\frac{m\pi x}{a}\sin\frac{n\pi y}{b}$$

Les coefficients A_{mn} sont donnés par la formule :

$$A_{m,n}=\int_0^a\int_0^b q(x,y)\sin\frac{m\pi x}{a}\sin\frac{n\pi y}{b}dxdy$$

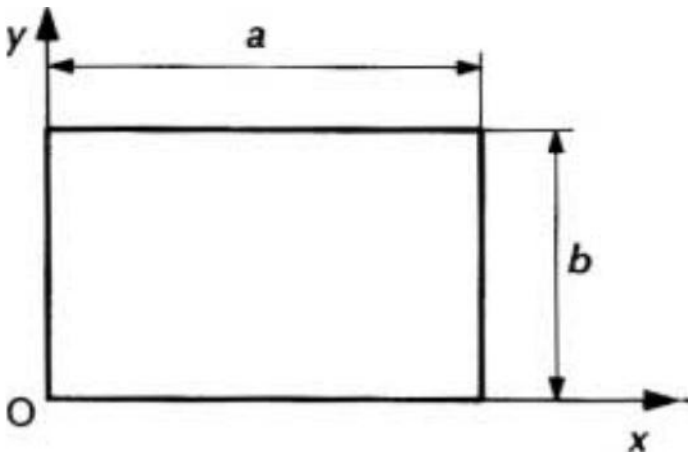


Figure I.3 : dalle rectangulaire articulée sur quatre côtes

La déformée devient :

$$w(x,y)=-\frac{1}{\pi^4 B}\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{A_{m,n}}{\left(\frac{m^2}{a^2}+\frac{n^2}{b^2}\right)^2}\sin\frac{m\pi x}{a}+\sin\frac{n\pi y}{b}$$

Les moments de flexion M_1 et M_2 sont données par des séries suivantes [8]

$$M_1=\frac{1}{\pi^2}\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}A_{m.n}\frac{\frac{m^2}{a^2}+\upsilon\frac{n^2}{b^2}}{\left(\frac{m^2}{a^2}+\frac{n^2}{b^2}\right)^2}\sin\frac{m\pi x}{a}\sin\frac{m\pi y}{b}$$

$$M_2 = \frac{1}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{m.n} \frac{\frac{n^2}{b^2} + \upsilon \frac{m^2}{a^2}}{\left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2} \sin \frac{m \pi x}{a} \sin \frac{m \pi y}{b}$$

Ces séries convergent très rapidement. En effet, il suffit de ne considérer que le premier terme pour obtenir la déformée *w*, et les trois premiers termes pour obtenir les moments à 2 ou 3%prés.

A partir de la solution de Navier, Pigeaud a établi des abaques qui permettent, pour un rapport donné des côtés de la dalle de calculer le moment à mi-travée dans chacune des deux directions et c'est la solution adopté par les Règles est rappelé que le coefficient de poisson ν du béton est pris égal à 0.20 pour le calcul des déformations et ν=0 pour la vérification des contraintes ou des résistances.

I.6 Comportement globale d'une dalle fissurée

En contraste avec la simplicité du modèle linéaire élastique, le comportement réel des dalles en béton est fort complexe et se caractérise par la fissuration des diverses parties de la dalle. Pour modéliser le comportement des sections fissurées, trois approches sont possibles. Approche par couches, approche par rigidité additionnelle de l'acier et approche par courbures.

I.7 Comportement des dalles sous charge concentrée

Pour les charges concentrées, les convergences des termes de *w(x, y)* développés en séries de Fourier est très mauvaise de sorte qu'il faut tenir compte de 300 à 400 termes.

Lorsqu'une force concentrée (réaction d'une colonne) agit normalement au plan moyen d'une dalle en béton armé, il est nécessaire de vérifier que son introduction se fasse en toute sécurité pour éviter une rupture soudaine par pénétration à travers la dalle, ce type de rupture est appelé rupture par poinçonnement. Cette forme de

sollicitation se rencontre essentiellement dans les planchers-dalles, les planchers-champignons ou lorsqu'une grande charge est transmise à une dalle par des appuis ponctuels [8].

CHAPITRE II : MATERIAUX COMPOSITES

II.1 Introduction

Un des objectifs de ce chapitre est d'apporter certaines connaissances sur les matériaux composites par une description de leurs constitutions, de leurs propriétés et leurs structures.

La première partie de ce chapitre est consacrée à la présentation des différents constituants des matériaux composites. Dans la deuxième partie, on va présenter le contexte général du renforcement des structures de génie civil par collage de matériaux composites. Les principales applications sont brièvement décrites, de manière à identifier les facteurs successibles d'affecter la durabilité des réparations dans les conditions usuelles de service.

Les matériaux composites disposent de grandes importances par rapport aux matériaux traditionnels. Ils possèdent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, libertés de formes. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Il offre une meilleure isolation thermique et pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique **[9]**.

II.2 Définition

Un matériau composite peut être défini d'une manière générale comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante "matériaux composites" des arrangements de fibres, les ***renforts*** qui sont noyés dans une ***matrice*** dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. La matrice assure la cohésion et l'orientation des fibres, elle permet également de transmettre les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces.

Les matériaux ainsi obtenus sont très *hétérogènes* et *anisotropes* **[10]**.

II.3 Définition de base

HOMOGENE: Mêmes propriétés en tout point

HETEROGENE: Propriétés différentes d'un point à un autre

ISOTROPE: Mêmes propriétés dans toutes les directions

ORTHOTROPE: Propriétés symétriques par rapport à 2 plans de symétrie

ANISOTROPE: Propriétés différentes selon les directions

II.4 Constituants des matériaux composites

Un matériau composite est constitué d'une phase continue appelée matrice et d'une phase discontinue appelée renfort.

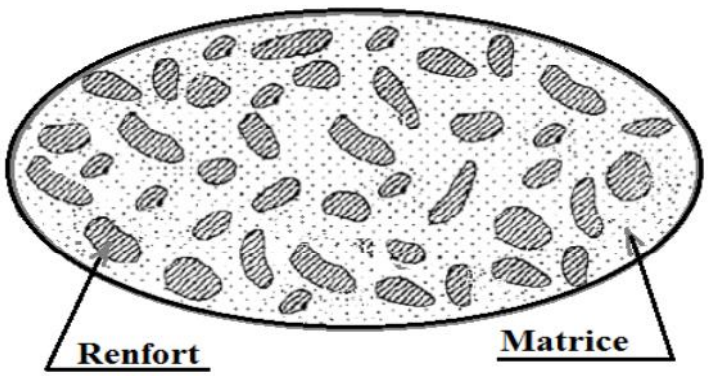


Figure II.1 : matériaux composites [11]

II.4.1 La matrice

La matrice permet de lier les fibres du renfort fibreux entre elle, ainsi de transmettre les charges aux renforts. La matrice est facilement déformable et assure la protection chimique des fibres.

On peut retrouver dans l'organigramme ci-dessous, les différentes familles de matrices :

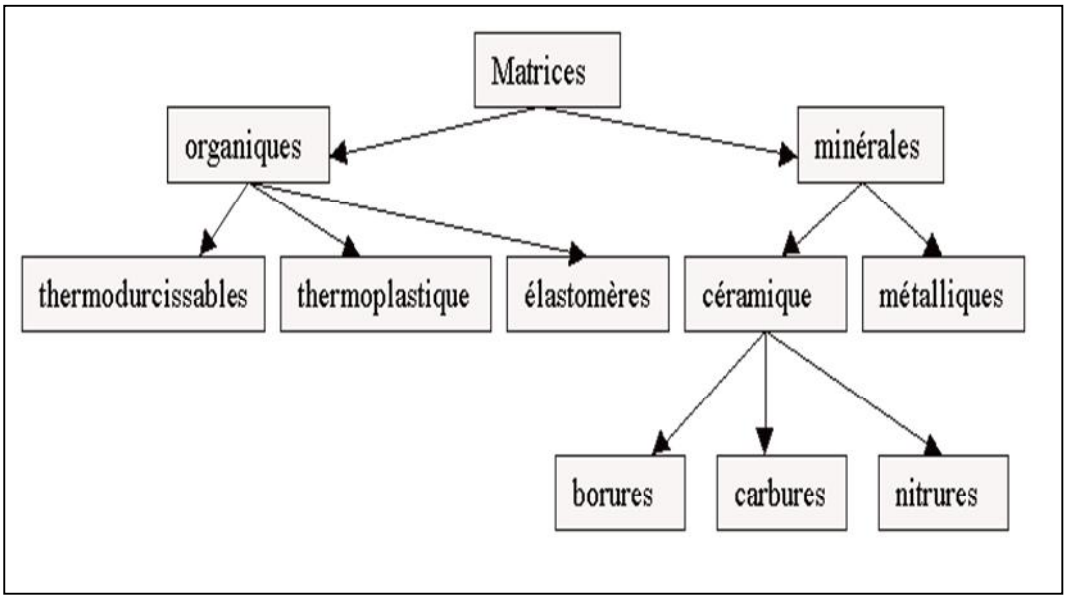


Figure II.2 : déférentes familles de matrices [9]

Les résines les plus utilisées sont les résines thermoplastiques et les résines thermodurcissables **[13]**.

II.4.1.1 Les résines thermoplastiques :

Elles peuvent être mises en forme plusieurs fois par chauffageset refroidissements successifs. Elles peuvent donc être facilement récupérées et recyclées. Ces résines présentent un faible coût de production du fait de techniques de production qui sont bien maitrisées et de matières premières disponibles.

II.4.2.2 Les résines thermodurcissables :

Possèdent de meilleures propriétés mécaniques et thermomécaniques que le premier type de résines. Néanmoins les résines thermodurcissable ne peuvent être mise en forme qu'une seule fois et sont plus chères à la fabrication.

II.4.2 Les renforts

Le renfort qui joue le rôle de squelette ou d'armature, assure la bonne tenue mécanique de ces matériaux. Il se présente généralement sous la forme de fibres, dont la conception de l'orientation au sein du composite dépend principalement de la direction du chargement mécanique à supporter. Les caractéristiques recherchées pour les fibres sont : la rigidité et la résistance mécanique élevée **[12]**.

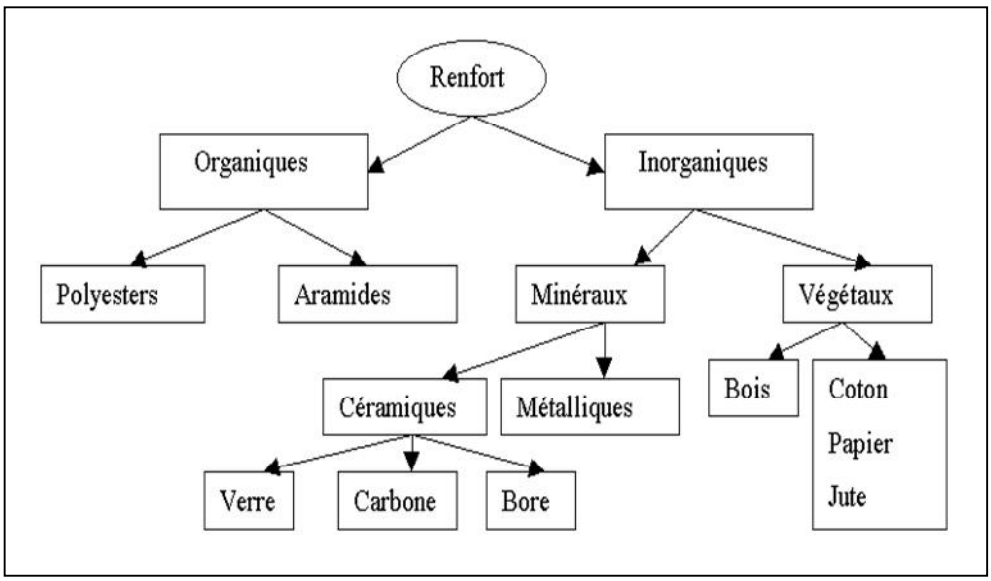


Figure II.3 : différentes familles des renforts

II.4.2.1 Formes des renforts

Afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques des structures composites, il est nécessaire de jouer sur la texture des renforts (***leur architecture***) pour créer une charpente résistante adaptée aux contraintes mécaniques. Les renforts se présentent généralement sous diverses formes: linéique, surfacique et structures multidirectionnelles.

a- Formes linéiques : Une fibre (diamètre environ de **10 µm**) est trop petite pour l'utilisation unitaire. On trouve en général, des fils ou mèches qui sont assemblés à partir de plusieurs fibres. L'unité de masse linéique est le tex (**1 tex = 1 g/km**)**[6]**.

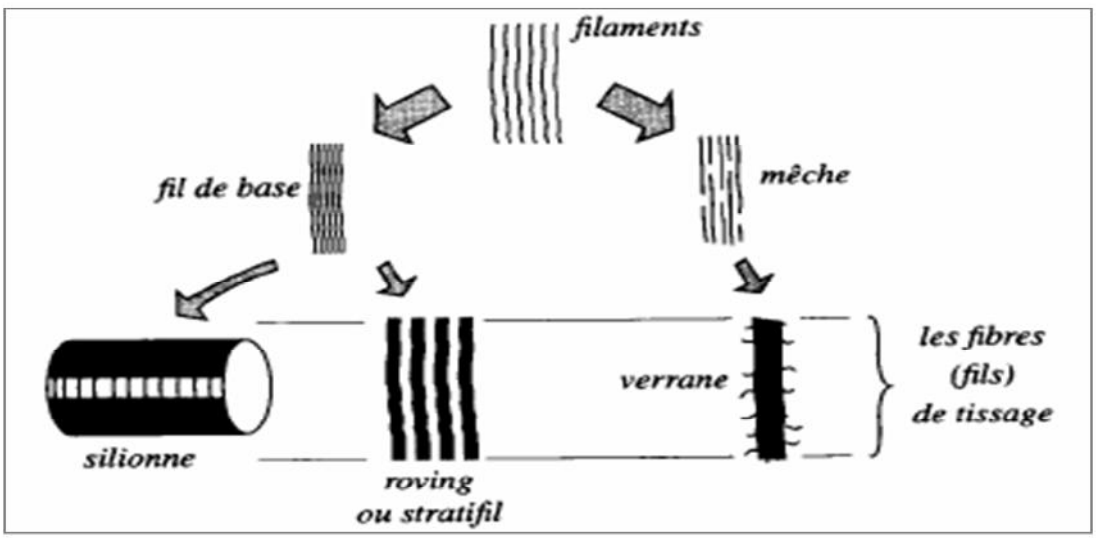


Figure II.4 : Eléments composants de la forme linéique.

b- Formes surfaciques :

Les fils peuvent être utilisés pour réaliser des formes surfaciques de divers types : mats, tissus ou rubans.

Tissus et rubans

Un tissu ou un ruban est un ensemble surfacique de fils, de mèches, ect…, il est constitué (figure 5) :

D'une chaîne, ensemble de fils parallèles répartis dans un plans suivant la longueur du tissus.

D'une trame, ensemble de fils s'entrecroisant avec les fils de chaîne.

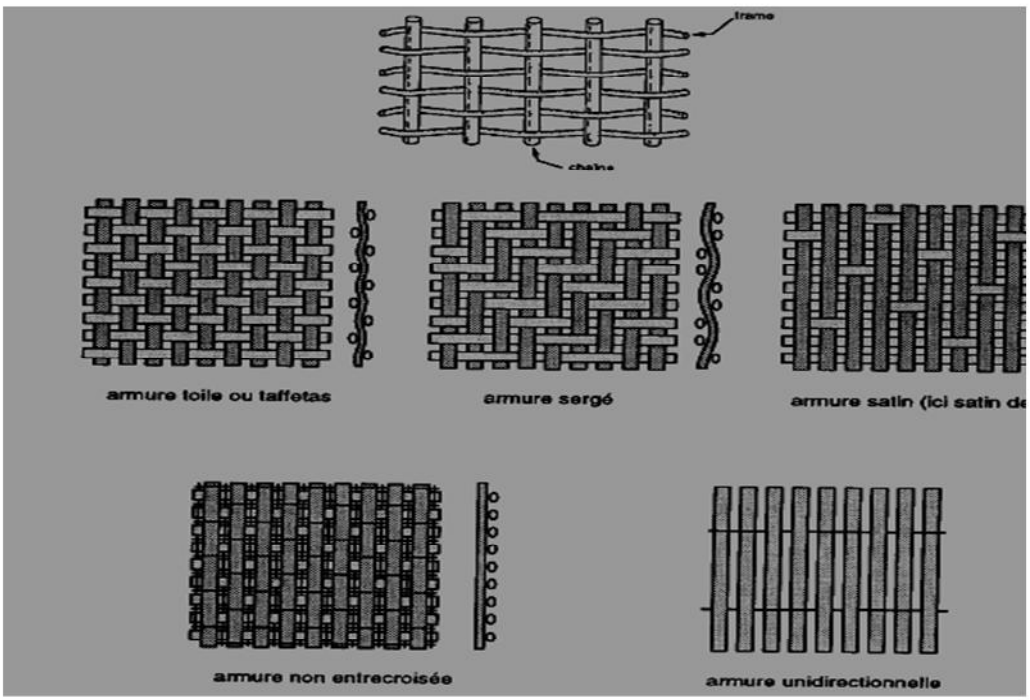


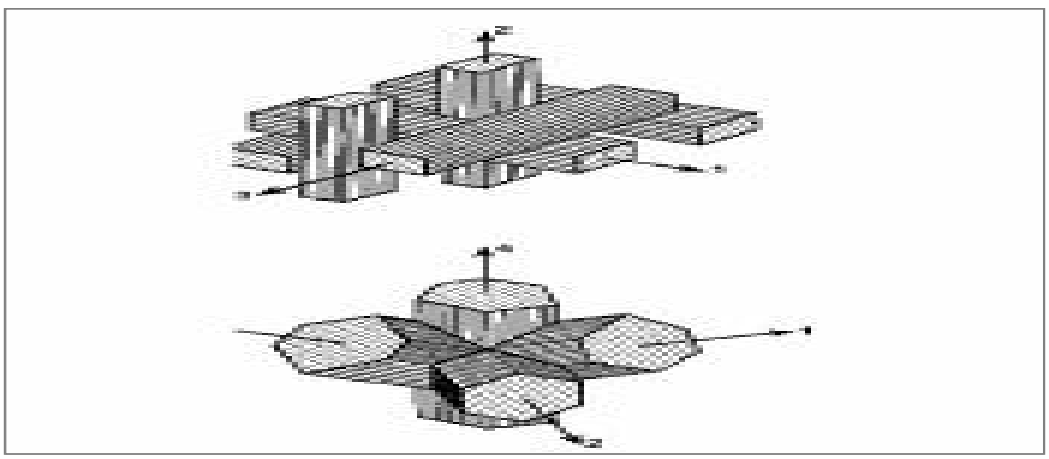
Figure II.5 : Eléments composants de la forme surfacique

Mats: Ce sont des nappes de fils continus ou coupés, disposés dans un plan suivantune direction aléatoire. Ils sont maintenus ensemble par un liant. Le mat est isotrope à cause de l'absence d'orientation préférentielle des fibres.

c- Structures multidimensionnelles

Il est également possible de réaliser des structures de renforts *3D*, et de renforts hybrides en tissant des fibres de natures différentes ou, en superposant des tissus ou nappes de renforts de fibres différentes, En terme de performance, les préformes 3D sont considérées comme des solutions de motif pour augmenter la résistance dans l'épaisseur, la prévention du délaminage et pour l'augmentation de la résistance à l'impact[14].

Figure II.6 :



éléments composants de la structure multidimensionnelle

II.4.2.2 Les fibres

Les fibres utilisées se présentent soit sous forme continues (fibres longues), soit sous forme discontinue (fibres courtes) [11].

●fibre de verre

Le terme fibres de verre désigne à la fois les fibres utilisées comme isolant thermique et celles utilisées comme renforts associées à des matrices organiques pour donner des composites.

Avantages	Inconvénients

-Bonne résistance thermique et électrique -Bonne résistance aux agents chimiques et à l'humidité. -Bonne compatibilité avec les matrices. -Faible coût.	-Caractéristiques mécaniques moyennes, notamment la rigidité élastique. -Tenue au choc médiocre.

La principale application des fibres de verreest le renforcement des plastiques. Cependant leur champ d'applications s'est élargi à d'autres matrices (ciment, plâtre, bitume...) et à d'autres utilisations **[15]**.

Tableau II. 1 : Avantages et inconvénients de la Fibre de verre [16]

●les fibres de carbone

La fibre de carbone est obtenue à partir de pyrolyse d'une fibre organique appelée précurseur.

Les fibres de carbone se différencient par le taux de carbone plus au moins élevé.

Ces fibres sont utilisées en tant que carbone pour les propriétés de cet élément et tant que fibre flexible et qui convient à toutes les formes de produit finis [17].

Avantages	**Inconvénients**
-Grande résistance à la traction et grande rigidité longitudinale.	- Fragilité au choc;

- Très bonne tenue en température sans chute de propriétés (jusqu'à 1 500 °C en atmosphère non oxydante). - Inertie à la corrosion et aux agents chimiques. - Coefficient de dilatation longitudinal très faible	- Fragilité à la courbure ou au pliage - Coût élevé.

Tableau II. 2: Avantages et inconvénients de la fibre de carbone [16]

● Fibres d'aramide

Les fibres d'aramides à caractéristiques mécaniques élevées sont généralement connues sous le nom de 'Kevlar'. Elles sont disponibles sous forme de tresses et des rubans,

Compte tenue de leur légèreté et leur bonne résistance au choc,les fibres d'aramides sont utilisées pour la fabrication de certains articles de sports, et pour la fabrication de protection contre les projectiles, et pour le renforcement de câbles. [14]

●Fibre de bore

Fibres de haut module et insensibles à l'oxydation à hautes températures, elles sont obtenuespar dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène.

● Fibre de silice

Elles sont produites comme le verre, par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique dans les tuyères pour moteur de fusé[10].

Note

En plus de ces fibres et la matrice, il faut rajouter : une interface qui assure la compatibilité renfort/matrice, qui transmet les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement relatif. Bonne adhérence en couche fine..

II.5 Classificationdes matériaux composites

Ils peuvent être classés selon plusieurs manières **[11]**.

II.5.1 Classification suivant la forme des constituants

En fonction de la forme des constituants, les matériaux composites peuvent être classés en deux familles :

● **Les matériaux à fibres** : les renforts se trouvent sous forme de fibres continues, coupées ou courtes. Les caractéristiques mécaniques du matériau dépendent de l'arrangement des fibres ainsi que de leur nature.

● **Les matériaux à particules** : les renforts se trouvent sous forme de particules, au contraire a une fibre .les particules n'ont pas de dimension privilégiée. Différents types de particules existent et seront choisis en fonction du gain souhaité.

Les particules peuvent augmenter la rigidité, ou encore améliorer la tenue au feu du matériau.

II.5.2 Classification suivant la nature des constituants

En fonction de la nature de la matrice les matériaux composites sont classés :

Composites à matrice organique, à matrice métallique ou à matrice minérale.

II.6 Les charges et les additifs

Les charges et les additifs ont pour but d'améliorer les caractéristiques mécaniques et physique du produit fini ou de faciliter la mise en œuvre.

Les charges renforcent les caractéristiques mécaniques de la résine. Il existe plusieurs types de charges :

- **Les charges sphériques :** diminuent la susceptibilité de fissuration de la résine. Les sphères ainsi incorporées dans la matrice peuvent être en verre, en carbone ou matières organique (époxyde, phénolique…) et peuvent être pleines ou creuses.

- **Les charges non sphériques :** ont surtout pour objectif soit de diminuer les coûts de production soit d'améliorer les propriétés des résines.

Les additifs ont pour objet de faciliter le façonnage de la résine. Il existe des lubrifiants pour faciliter le démoulage des résines, pour colorer les résines, pour réduire le retrait de la résine lors de son séchage [18].

II.7 Principaux avantages et inconvénients des matériaux composites

1) **Avantages**

-Bonne résistance à la fatigue;

-Possibilité de concevoir le matériau selon le besoin ;

-Réduction des coûts de fabrication ;

- faciles et rapides à mettre en œuvre ;

- insensibles à la corrosion ;

- légers, n'apportent pas de masse à la structure ;

- très bonnes caractéristiques mécaniques ;

- selon l'orientation des fibres, il est possible d'améliorer le comportement dans une seule direction.

2) inconvénients

Bien que les avantages des matériaux composites soient impressionnants, ces matériaux ne sont pas une solution miracle pour toutes les applications. Des inconvénients ou des problèmes existent et peuvent empêcher leur usage. Les inconvénients les plus courants sont les suivants : Coût de fabrication assez élevé (par rapport aux matériaux traditionnels) Faible conductivité électrique ; Sensibilité à l'environnement c'est à direVieillissement thermique, humide *;*

II.8 Comportement élastique des matériaux composites

Les champs des déformations et des contraintes dans un milieu sont liés par des lois appelées lois de comportement, caractérisant le comportement mécanique du milieu. Ces lois sont décrites par des axiomes qui permettent de rendre compte au mieux des phénomènes observés. L'expérience montre que de nombreux milieux solides déformables ont, pour une température donnée et dans un intervalle donné de déformation, un comportement élastique linéaire.

Dans le domaine de linéarité et en admettant que la température est uniforme dans tout le volume considéré, les matériaux composites se déforment comme les autres matériaux traditionnels.

II.9 Utilisation des matériaux composites

L'éventail des applications des matériaux composites est très large :

- Electricité et électronique : isolants, supports de disjoncteurs.
- Bâtiments et travaux publics : habitations, cheminées d'usine, , coffrages,
- Transports routiers : pièces de carrosseries, roues, ressorts de suspension,
- Transports ferroviaires : voitures, avant de motrices, gaines de ventilation,
- Transports aériens : avion de tourisme, pièces d'avion, bords d'attaque, volets **[19]**.

II.10 La nécessité d'un renfort structurel

Les causes qui conduisent à un renfort structurel sont aussi nombreuses que le nombre de structures elles-mêmes, chaque cas devant être considéré comme un cas particulier. Les plus fréquentes sont[20].

- Accroissement des charges qui sollicitent la structure :
    - Changement d'usage de la structure (ex: bâtiment d'habitation réhabilité en centre commercial),
    - installation de machinerie lourde dans les bâtiments industriels.

- Défauts dans le projet ou dans l'exécution:
  - Armature insuffisante ou mal placée,
  - mauvais matériaux,
  - Dimensions insuffisantes des éléments structurels.
- Rénovation des structures anciennes :
  - vieillissement des matériaux avec perte des caractéristiques initiale,
- Dégâts dans la structure :
  - Corrosion et diminution de la section des armatures dans le béton,
  - impacts contre la structure,
- Nécessité d'améliorer les conditions en service :
  - diminuer les déformations et flèches,
  - réduire la contrainte des armatures,
  - diminuer l'ouverture des fissures.

II.11 Applications des matériaux composites en génie civil

Le génie civil est actuellement peu consommateur de matériaux composites comparativement à d'autres secteurs tels que l'industrie de l'automobile ou celle de l'aérospatiale. Cependant, il existe de réelles perspectives dans les prochaines années quant à leur utilisation structurelle pour la réhabilitation des constructions civiles et industrielles. D'où l'intérêt et l'engouement apporté par les différents centres et laboratoires de recherche à travers le monde, pour étudier les différents aspects d'éléments structuraux en béton renforcés ou réparés par des «PRF».

D'une manière générale, les matériaux composites présentent des avantages considérables dès qu'il s'agit de la protection, la réparation et le renforcement d'ouvrages ou d'éléments d'ouvrages en béton armé tels que poutre, poteau, dalle ou mur**[21].**

- **Les poutres**

Le renforcement vis à vis la résistance à la flexion d'une poutre en béton armé simplement appuyée en utilisant les composites «PRF» est généralement réalisé par collage externe des lamelles «PRF» sur le support de la poutre concernée .Avant l'application de la lamelle «PRF», le support doit être préparé. Le but de la préparation d'une surface adéquate est d'enlever la couche faible de la surface du béton et d'exposer la totalité du béton pour

améliorer la liaison avec le «PRF», et de fournir une surface uniforme (Steiner 1996, Teng et al. 2002).

- **Les dalles**

Le procédé de renforcement de dalle consiste à coller, à la surface des zones de béton tendues, des plaques ou des bandes de renfort. De nos jours, seules sont appliquées des bandes de renforts. Pour des raisons évidentes de mises en œuvre, on préfère coller les bandes de renfort en sous face de la dalle. Dans le cas d'une mise en œuvre à la surface d'une dalle, il faut prendre en compte des problèmes de remise à niveau du plancher traité.

Les techniques sont similaires à celles utilisées pour renforcer les poutres pour reprendre les efforts de flexion. On rencontre donc le collage de plaques ou de bandes sur les dalles. Encore une fois, lors de ces dernières années la méthode de mise en œuvre de bandes s'est imposée plutôt que l'installation de plaques.

- **Les colonnes**

Plusieurs techniques différentes ont été développées pour renforcer ou réhabiliter des colonnes existantes en béton armé en utilisant des composites «PRF».

Les colonnes peuvent être renforcées vis -a vis des efforts axiaux, en les enveloppant par des colles «PRF».

Les figures suivantes présentent la description des principales applications de renforcement par composites colles sur ouvrages de génie civil. [22]

- L'accroissement de la résistance des structures aux moments de flexion (a).(b)
- Le renforcement de piles et poteaux (c).

principales applications de renforcement par composite collés sur ouvrages

II.12 Techniques de renforcement

La durée d'exploitation d'unouvrage en béton armé est à priori comprise entre 50 et 120 ans selon sa composition et sa fonction. Or, de nombreuses pathologies imprévues liées à l'utilisation ou à l'environnement sont susceptibles d'intervenir avant la fin de cette période. Dans ce cas, les réparations et/ou renforcements structuraux des ouvrages en béton armé peuvent être effectués soit par ajout de forces (cas de la précontrainte additionnelle), soit par ajout de matières (béton projeté et renfort collés). Le renforcement de structures en béton par ajout d'armatures externes est le procédé qui nous intéresse dans cette étude, et plus particulièrement le renforcement par composites[23]

II.12.1 Renforcement par adjonction d'armature complémentaire

Des armatures complémentaires sont à prévoir lorsqu'il s'agit de remplacer des acierscorrodés ou coupés accidentellement ou lorsqu'il s'agit de renforcer une structure. Lesarmatures complémentaires doivent s'opposer à la fissuration, et participer à la résistance dessections renforcées. La protection de ces armatures est assurée par un béton coulé ou projetéet leurs jonctions avec les armatures existantes peuvent se faire par des procédés classiques(recouvrement, soudure, manchonnage) (figure.8).

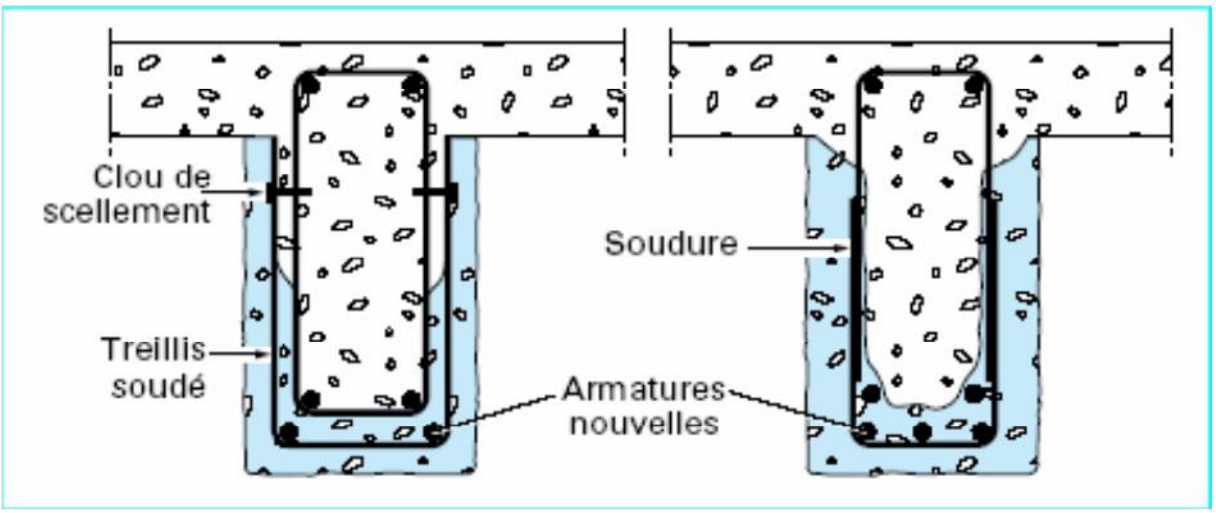


Figure II.8 : réparation de la poutre par adjonction d'armature

II.12.2 Béton projeté

Le béton projeté est un bétonmis enœuvre à l'aide d'une lance, par projectionsur une paroi sous l'impulsiond'un jet d'air comprimé [24].

La technique consiste à :

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

Il existe deux techniques de projection:par voiesècheoupar voiemouillée.La différence entre les deuxtechniques est liée à lamanière dontl'eau de gâchage du béton est introduite (soit lors dumalaxage du béton,soit lors de l'application du béton).

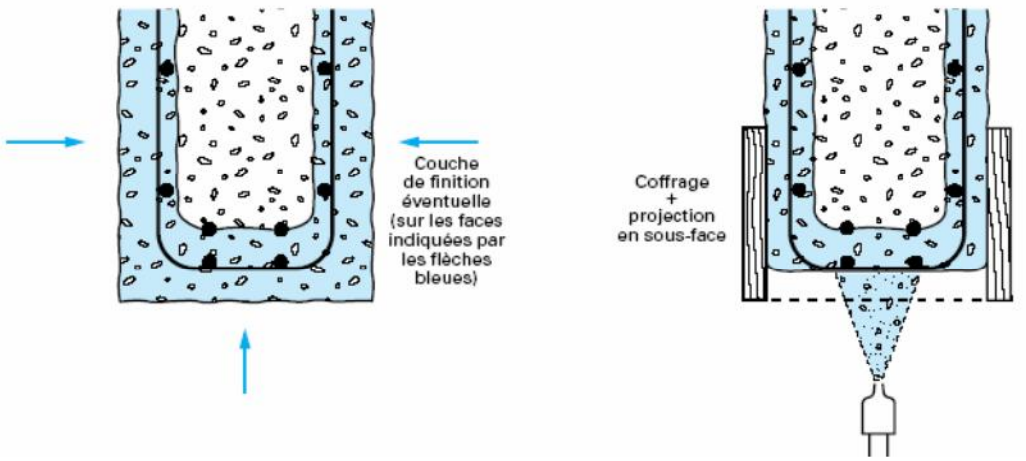


Figure II.9 : Réparation de poutre par béton projeté

Tôles collées

- **Développement de la technique des plats collés**

L'Hermite (1967) s'est intéressé, dés le début des années soixante, à l'utilisation de ces composés adhésifs polymérisant à froid pour associer du béton à des composants d'acier disposés extérieurement (Figure 10). D'abord utilisée dans le « béton plaqué » (collage de béton sur des tôles d'acier jouant à la fois le rôle de coffrage et d'armatures externes), cette

technique fut étendue, sous l'impulsion de Bresson (1971), au renforcement et à la réparation des structures en béton armé [21].

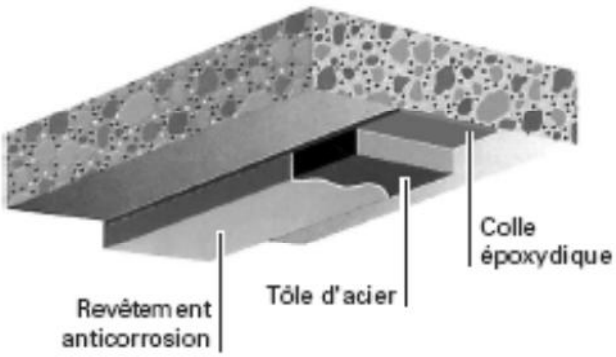


Figure II.10 Application de plats métalliques selon le procédé L'Hermite

Ce type de renforcement consiste à pallier les insuffisances locales ou globales des structures en béton par des tôles d'acier collées en surface du béton. Il fut appliqué très rapidement pour des renforcements de poutres de pont-roulent dans une cimenterie, puis pour le renforcement d'ouvrages d'art dont le niveau de service n'était plus suffisant compte tenu de l'évolution du trafic supporté (theillout 1997).

- **Problèmes rencontrés lors de son utilisation**

Le succès rencontré par cette technique conduisant à cette époque à envisager son utilisation pour la réparation d'ouvrages d'art en béton précontraint. Ce fut en particulier le cas pour le viaduc d'accès au pont de Gennevilliers en 1978. Des insuffisances locales de précontraintes au droit des sections de couplage faisaient craindre une rupture par fatigue des câbles dans ces zones. Des tôles furent alors collées à cheval sur ces fissures afin de limiter les risques. Des mesures faites lors de la réception des travaux mirent en évidence une forte flexion locale des tôles aux droits des fissures.

Des études plus approfondies, menées au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, ont permis de mieux comprendre le fonctionnement de ce type de réparation et de cerner, avec une plus grande précision, les domaines d'emploi de cette technique

- **Conditions d'emploi et domaine d'application**

La technique des tôles collées, qui fut utilisée d'abord dans le domaine du bâtiment industriel

(Bresson 1971), s'est très vite répandue dans le domaine des ouvrages d'art où dans bien des cas elle a permis soit d'accroître la capacité portante d'un ouvrage, soit de renforcer localement une structure présentant des insuffisances de résistance.

Des emplois quelque peu hasardeux voir totalement inadaptés aux problèmes posés ont pu, durant quelque temps, laisser entendre que cette technique n'était pas fiable. Elle a cependant continué à être utilisée avec succès dans le domaine du bâtiment industriel et commercial où le faible encombrement de ce type de renforcement est un atout majeur et ceci malgré les précautions qu'il convient de prendre pour isoler le renforcement vis-à-vis des risques d'incendie.

L'utilisation de ce type de renforcement devrait voir son emploi augmenté avec :

- une meilleure connaissance du fonctionnement mécanique ;

- l'amélioration continuelle des adhésifs et de leurs conditions d'utilisation ;

- les recherches menées sur l'emploi de matériaux nouveaux pour remplacer l'acier.

Cependant, il reste des pans entiers à exploiter pour l'utilisation de cette technique. Il s'agit principalement de connaître ses capacités à renforcer des structures qui ont subi des dommages dus aux séismes. En second lieu, il conviendrait de mieux connaître le comportement de tels renforcements dans des structures soumises à des atmosphères agressives Pour améliorer la technique du collage et éviter une partie des problèmes évoqués plus haut, enFrance, Freyssinet International a amélioré le procédé, en 1977, en perforant les tôles colées (Figure 11).

Figure II.1: Tôles colées ; (a) difficulté de manutention ; (b) Renforcement du viaduc

II.12.3Précontrainte additionnelle

Contrairement aux techniques présentées ci-dessus et qui consiste en l'ajout de matière (bétonou acier), la précontrainte additionnelle consiste en un ajout de force dans des ouvragesexistants en vue soit de leur redonner leur état de service initial, soit de leur donner un nouvelétat de service. Elle permet, en effet, d'appliquer des efforts d'une intensité connue, en despoints et suivant des directions bien définies, capables de s'opposer aux efforts générateursdes désordres. Elle est réalisée le plus souvent par la mise en œuvre d'armatures deprécontrainte (câble ou barres). La précontrainte additionnelle peut être employée pour traiterune grande variété d'ouvrage (ponts, barrages, réservoirs, bâtiment). Cette méthode estparticulièrement adaptée au renforcement en flexion et vis-à-vis de l'effort tranchant par l'emploi d'étriers actifs. En revanche, la mise en œuvre de tout ce qui concerne laprotection définitive des armatures nécessite un niveau particulier de qualité. De plus, lerecours à des unités de plus en plus puissantes pour en limiter le nombre implique une étudeparticulièrement soignée des zones d'ancrage, très fortement sollicitées

II.12.4Renforcement des ouvrages par des matériaux composites

En complément des procédés de réparations classiques (béton projeté, béton fibré projeté, collage de plats métalliques, précontrainte additionnelle…) sont apparus, depuis les années 80-90, des techniques de renforcement utilisant le collage de plats composites ou la stratification directe in situ de composites (renfort textile-polymère [18].

Le principe de la réparation peut être décrit par le schéma ci-dessous où il est possible d'identifier les différents éléments du procédé constructif :

3- support en béton

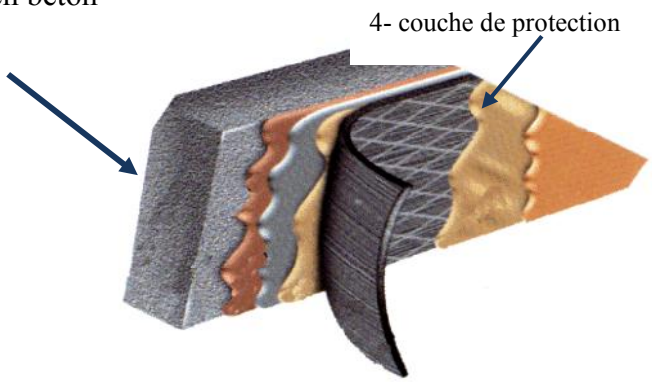


Figure II.12 : Principe d'une réparation par matériaux composites [25]

1- Le composite : association d'un tissus technique (en verre, carbone, aramide) avec une matrice (polymère thermodurcissable : résine époxy, résine).

2- L'interface est constituée soit de la colle soit de la résine d'imprégnation du tissu.

3- Le substrat correspondant à la couche de béton qui peut être traitée en surface(nettoyage, sablage, couche d'imprégnation, ragréage).

Il existe deux techniques de renforcement de structures en béton avec des fibres. La première est le renfort de structures avec des éléments constitués de fibres, par exemple des plaques ou des poutres. La seconde méthode est le collage de bandes de renforts à la structure en béton. De nos jours, la seconde est la plus utilisée dans le Génie Civil.

La mise en œuvre du collage de bandes de renfort nécessite une méthodologie rigoureuse, le respect de conditions climatiques adaptées (travaux à l'abri de la pluie, pas d'ensoleillement direct, température extérieure comprise entre 10 et 25° C, humidité relative limitée…), des conditions d'emploi des différents matériaux (durée d'utilisation des résines ...), des critères de sécurité et de grandes précautions lors de la préparation des supports.

- **Renforcement par des lamelles « carbone »**

Il existe de nombreuses techniques de réparation, de réhabilitation et de renforcement des structures. Une méthode récente, issue des progrès dans les sciences des matériaux offre aujourd'hui une alternative intéressante. Elle consiste à disposer des bandes de renfort en matériaux composites (fibre de carbone ou fibre de verre) en lieu et place des renforcements en acier [26].

F**figure**

s II.13 :Mise en œuvre de bandes de renfort en sous face d'une dalle et sur des poutres

- **Avantages du renfort avec des lamelles composites (comparé au renfort avec des platines en acier)**

Le renfort avec des lamelles comporte de nombreux avantages. En effet, les lamelles sont cinq fois plus légères que l'acier, dix fois plus résistantes (donc plus optimisées), d'une faible épaisseur et d'une grande flexibilité (donc plus faciles à transporter). D'autre part, les unions par soudure n'étant pas nécessaires, leur longueur n'est pas limitée. Grâce à ces caractéristiques, elles s'adaptent plus facilement aux supports ; les croisements de lamelles peuvent se faire sans travaux complémentaires ; on constate moins d'interférence avec le reste des éléments de l'ouvrage ; elles ne produisent pas de bulles d'air durant le collage et ne nécessitent pas d'étais ni d'autre système de maintien provisoire.

Quant à leur durabilité et à leur résistance, elles ne subissent pas de corrosion ni d'autres attaques chimiques ; elles offrent une meilleure résistance au feu et à la fatigue.

Face au feu, que le renfort soit fait avec des platines en acier ou avec des lamelles, la ruine estprovoquée par la dégradation de la résine époxy. Mais l'acier se dégrade beaucoup plus vite et présente des risques de chutes par décollage. Les lamelles, par contre, restent accrochées plus longtemps et la transmission de chaleur est moins rapide que dans l'acier ; de

plus, comme elles sont légères, les risques d'accident sont écartés. Le système de renfort avec matériaux composites est aussi recommandé dans certains cas de béton précontraint.

II.13 Conclusion

Les matériaux composites sont des matériaux très variés, disponibles partout, dans la nature. Cette diversité mérite d'effectuer des investigations dans le choix des constituants (la matrice, le renfort, les charges et les additifs) afin d'avoir les meilleures qualités qui dépendent :

-Des propriétés des matériaux constituants.

-Des distributions géométriques des constituants.

- De l'interaction entre les différents constituants, etc.

Le choix de ces matières, la technique et le procédé de fabrication à une influence directe sur l'architecture et le comportement mécanique du matériau.

Cette recherche bibliographique sur la pathologie et les techniques de réparation des structures de génie civil, nous a permis de conclure que :

Le renforcement des structures en béton armé par ajout d'armatures externes est une technique couramment utilisée depuis la fin des années 60. En effet, il est dans la plupart des cas plus rentable de réparer que de reconstruire.

Avec l'essor que connaissent les matériaux composites, suite à leurs performances mécaniques, de plus en plus des techniques de renforcement et de réparation de structures de génie civil en utilisant ces matériaux sont développées et proposées.

La construction des bâtiments fait déjà un large usage des matériaux composites. En effet dans beaucoup de cas ils sont les seules à répondre, en même temps à de multiples exigences fonctionnelles, tout en conservant un prix de revient acceptable.

CHAPITRE III :SIMULATION NUMÉRIQUE

III.1 Introduction

Le comportement mécanique des dalles est influencé par le choix qualitatif et quantitatif des matériaux de construction suivant leurs propriétés physiques, mécaniques et chimiques. Dans ce contexte, peu de recherches expérimentales et numériques ont été effectués, à cause de difficultés expérimentales et car il s'agit d'éléments de structure plus complexes.

La présence de la fibre dans les structures en béton joue un rôle indéniable sur l'amélioration du comportement de ces structures.

Les fibres sont encollées en sous-face de l'élément dans la zone tendue (là où des efforts de traction s'exercent). Cette association fibre-béton permet de limiter les déformations des ouvrages [27].

La modélisation des structures en béton armé est réalisée par la méthode des éléments finis qui a permis la description du comportement local et global d'éléments de ces structures. De part sa nature hétérogène, le béton présente un comportement mécanique très complexe qui a conduit à plusieurs modèles mécaniques.

Dans ce présent chapitre, nous avons introduit le modèle de Mazars dans le comportement post-élastique du béton.

III.2 Modèle de Mazars

Le modèle de comportement MAZARS [28] est un modèle simple, réputé robuste, basé sur la mécanique de l'endommagement, qui permet de décrire la diminution de la rigidité du matériau sous l'effet de la création de micro-fissures dans le béton. Il s'appuie sur une seule variable interne scalaire D décrivant l'endommagement de façon isotrope, mais distinguant malgré tout l'endommagement de traction et l'endommagement de compression.

Le modèle de MAZARS a été élaboré dans le cadre de la mécanique de l'endommagement.

La contrainte est donnée par la relation suivante :

$$\boldsymbol{\sigma} = (1-D)\mathbf{A}\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathbf{e}}$$

Avec :

• A la matrice de Hooke,

• $\boldsymbol{\varepsilon}^{\mathbf{e}}$ est le tenseur de déformation élastique

• D la variable d'endommagement. Elle est comprise entre 0, matériaux sain, et 1, matériau rompu

La variable scalaire d'endommagement D résulte de la combinaison linéaire des endommagements en traction D_t et compression D_c comme suit :

$$D = \alpha_t^{\beta} D_t + (1-\alpha_t^{\beta}) D_c$$

Les endommagements de traction et compression sont définis par les relations suivantes :

$$D_t = 1 - \frac{\varepsilon_{d0}(1-A_t)}{\varepsilon_{eq}} - A_t e^{-B_t(\varepsilon_{eq}-\varepsilon_{d0})}$$

$$D_c = 1 - \frac{\varepsilon_{d0}(1-A_c)}{\varepsilon_{eq}} - A_c e^{-B_c(\varepsilon_{eq}-\varepsilon_{d0})}$$

Les paramètres A_t, A_c, B_t, B_c et ε_{d0} sont des paramètres matériau à identifier.

ε_{eq} est la déformation équivalente qui permet de traduire l'état de déformation triaxial par une équivalence à un état uni axial. Elle est définie à partir des valeurs propres positives du tenseur de déformation et <>+ désigne les crochets de Mac Cauley: si la valeur est négative alors l'opérateur renvoie une valeur nulle, sinon la valeur est identique.

$$\varepsilon_{eq} = \sqrt{\langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle_+ : \langle \boldsymbol{\varepsilon} \rangle_+}$$

Qui peut s'écrire dans le repère principal du tenseur de déformation comme suit :

$$\varepsilon_{eq} = \sqrt{\langle \varepsilon_1 \rangle_+^2 + \langle \varepsilon_2 \rangle_+^2 + \langle \varepsilon_3 \rangle_+^2}$$

ou,

$$\begin{cases} \langle \varepsilon_i \rangle_+ = \varepsilon_i & si\ \varepsilon_i > 0 \\ \langle \varepsilon_i \rangle_+ = 0 & si\ \varepsilon_i < 0 \end{cases}$$

βest un coefficient qui a été introduit ultérieurement pour améliorer le comportement en cisaillement. Usuellement sa valeur est fixée à 1,06.

Le coefficient α_t qui réalise un couplage entre l'endommagement en traction et celui en compression est telle qu'en l'absence totale de traction il prend la valeur nulle (α_t=0) et en l'absence totale de compression il prend la valeur 1 (α_t=1). Il est défini par :

$$\alpha_t = \frac{\sum_{i=1}^{3} \left(\langle \varepsilon_i \rangle_+ \varepsilon_{ti} \right)}{\varepsilon_{eq}^2}$$

Où ε_{ti} est la composante principale de déformation créée par les contraintes principales positives. Sous forme tensorielle, nous avons :

$$\boldsymbol{\varepsilon}_t = \frac{1+\nu}{E} \langle \tilde{\boldsymbol{\sigma}} \rangle_+ - \frac{\nu}{E} tr\left(\langle \tilde{\boldsymbol{\sigma}} \rangle_+ \right)$$

Avec

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - D}$$

qui sont des contraintes effectives.

III.3 Présentation de CASTEM

*Castem2000*est un code de calcul pour l'analyse de structures par la méthode des éléments finis. Ce code a été développé par le Département Mécanique et Technologie (DMT) du Commissariat français à l'Energie Atomique (CEA).Le développement de *Castem2000* entre dans le cadre d'une activité de recherche dans le domaine de la mécanique dont le but est de définir un instrument de haut niveau, pour servir de support pour la conception, le dimensionnement et l'analyse de structures et de composants, dans le domaine du nucléaire comme dans le secteur industriel classique. *Castem2000*intègre non seulement les processus de calculs proprement dits mais également les fonctions de construction du modèle (pré processeur) et les fonctions de traitement des résultats (post-traitement). *Castem2000*est un logiciel que l'utilisateur peut adapter à ses besoins pour résoudre ses propres problèmes [29].

III.3.1 Modélisation de la structure

La méthode des éléments finis permet de calculer quantitativement le comportement d'un système composé de plusieurs éléments avec des interactions complexes, à condition que leurs interactions soient décrites par une équation aux dérivées partielles linéaires.

La structure étudiée est une dalle rectangulaires en béton, simplement appuyées sur son contour, de dimensions 270mm de langueur et 220 mm de largeur et 30 mm d'épaisseur renforcée par des fibres composites, et soumise à un chargement appliqué sur une surface d'impact au centre de la dalle, de dimensions 60x40mm.

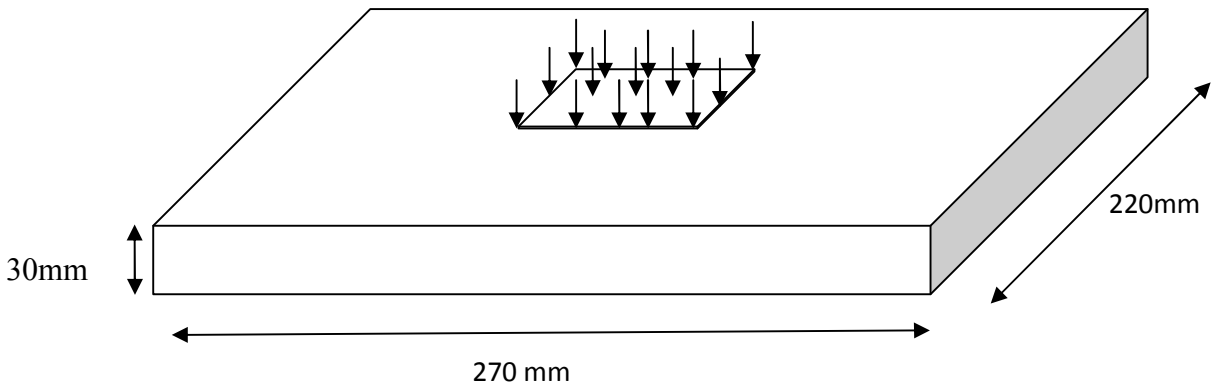


Figure III. 1 : Caractéristiques géométriques de la dalle

La dalle est modélisée comme une pièce chargée dans son plan. La géométrie de la structure est discrétisé par des éléments solides cubiques à 8 nœuds (CUB8), et les fibres sont discrétisées par des éléments linéiques segmentaires à 2 nœuds (SEG2) à l'aide du logiciel CASTEM.

Grâce à la double symétrie axiale du système, seulement un quart de la structure est modélisé pour diminuer le temps de calcul.

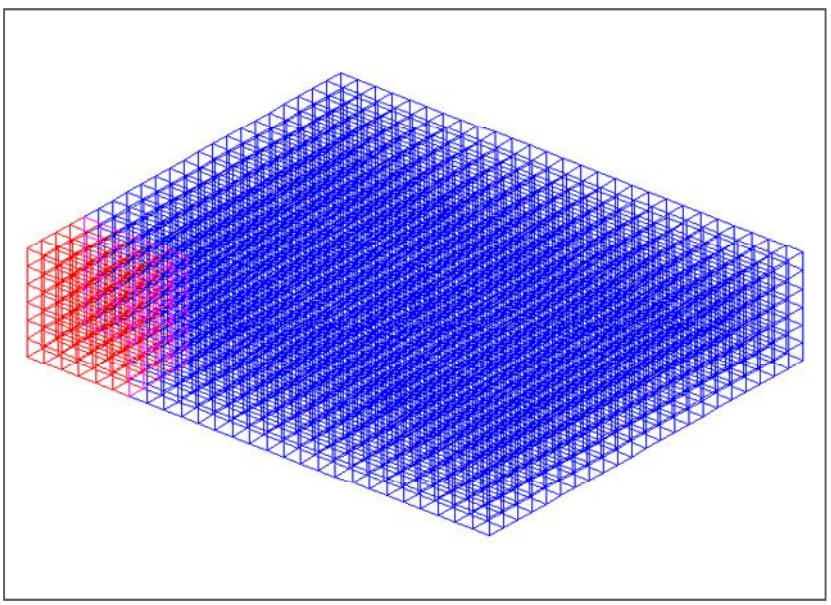


Figure III. 2 : Vue en 3D du maillage de quart de dalle.

III.3.2 Conditions aux limites

La dalle étant simplement appuyée, nous avons donc bloqué le déplacement suivant Z (Uz) des appuis. Des conditions limites mécaniques permettent de prendre en compte la symétrie de la structure. Ces conditions sont appliquées aux plans de symétrie de la structure. Dans la présente étude ces conditions reviennent à bloquer le déplacement des points situés sur les plans de symétrie dans le sens normal à ces plans.

III.3.3 Propriétés mécaniques

III.3.3.1 Le béton

Les paramètres du modèle d'endommagement de Mazars sont donnés dans le tableau suivant :

symbole	désignation	valeur	unité
E	Module de Young	33174.0	MPa
ν	Coefficient de poisson	0.15	/
sigT1	Contrainte maximale de traction	2.5	MPa
SigR1	Contrainte de rupture en traction	2.0	MPa
Idf1	Indice de fragilité	0.75	/
Sigc1	Contrainte maximale de compression	27.35	MPa
Espc1	Déformation correspondante	0.0015	/

Tableau III. 1 : propriétés mécaniques du béton

III.3.3.2 Les fibres composites

Les caractéristiques mécaniques de composite sont représentées dans le tableau

	La valeur	unité
Résistance à la traction	1000 à 1650	N/mm²
Épaisseur des lamelles	1.2 à 1.4	mm
Largeur des lamelles	50 à 120	mm
Module d'élasticité	80000	MPA

Tableau III. 2 : propriétés mécaniques des lamelles en carbone

III.3.4 Conditions de chargement

Le calcule de chargement est fait par la méthode pas à pas (incrémentale) jusqu'à la divergence du processus de calcul.

III.4 Interprétation des résultats

III.4.1 Dalle sans renforcements

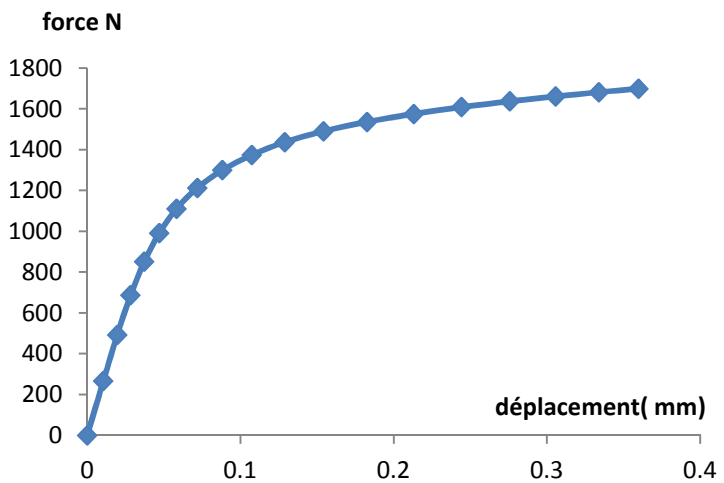


Figure III. 3 : courbe force déplacement d'une dalle témoin

L'évolution du déplacement en fonction du chargement est illustrée dans la figure **III.3**. Nous distinguons deux phases. La première traduit le comportement

élastique de la dalle et la seconde traduit l'apparition et le développement de l'endommagement au sein du volume du matériau au fur et à mesure que la charge augmente jusqu'à la divergence de calcule.

On constate que la charge limite tend vers une valeur d'environ 1700 N, pour un déplacement d'environ 0,35mm.

III.4.2 Dalle avec renforcement unidirectionnel

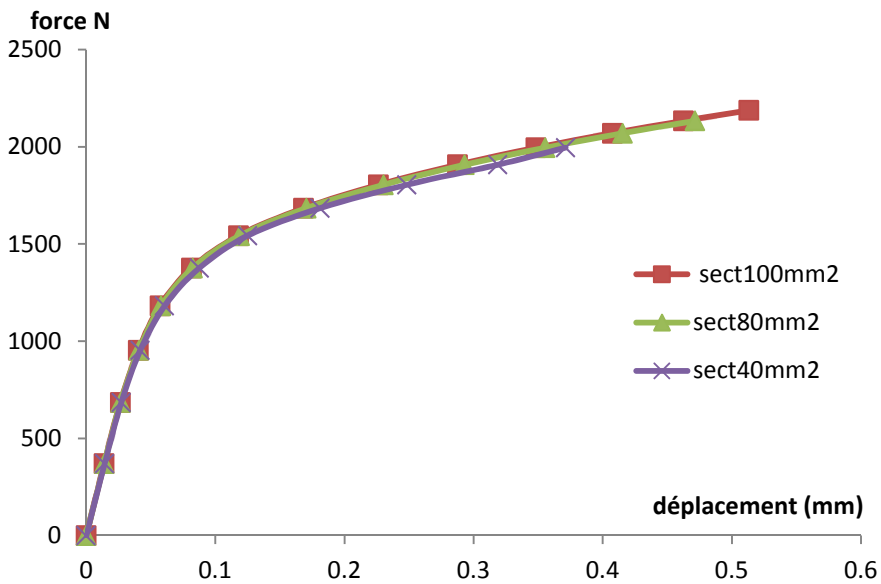


Figure III. 4 : courbe force déplacement d'une dalle renforcée dans seule direction

Ces dalles sont renforcées au centre par des lamelles composites de section $40mm^2$, $80mm^2$ et $100mm^2$ respectivement orientées dans une seule direction suivant X qui est l'axe de la plus grande dimension.

D'après cette figure on remarque que les courbes de comportement force/déplacement ont des allures similaires sur le plan de la forme et peuvent être divisée en deux phases. On peut aussi observer que la présence de renfort dans la structure permet d'augmenter la capacité ultime de la dalle.

Et aussi l'augmentation de la section des lamelles (renfort) permet au calcul numérique de retarder le point de divergence, signe de l'endommagement qui apparait

dans le volume de béton. Il faut noter que la seule source de divergence du processus itératif est l'endommagement du béton. On peut dire donc que l'endommagement du béton apparait de moins en moins lorsque la section du renfort augmente.

III.4.3 Dalle avec renforcement bidirectionnel

On renforce notre dalle par les mêmes sections de lamelles utilisées dans le renforcement unidirectionnel, mais cette fois nous utilisons un renforcement bidirectionnel c'est-à-dire dans les deux sens suivant les dimensions de la dalle.

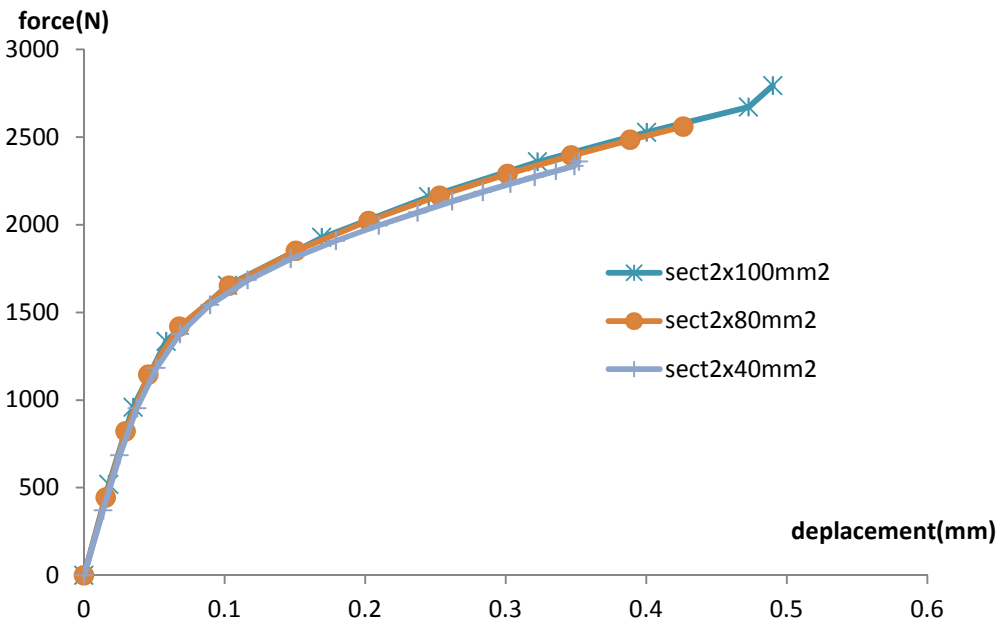


Figure III. 5 : courbe force déplacement d'une dalle renforcée dans deux directions

Les courbes obtenues présentent toutes une partie droite dans le domaine élastiques, puis les courbes s'éloignent de cette droite. Le comportement devient non linaire. On remarque que les courbes gardent la même allure, les remarques précédentes sont valables dans ce cas.

III.4.4 Comparaisons des résultats

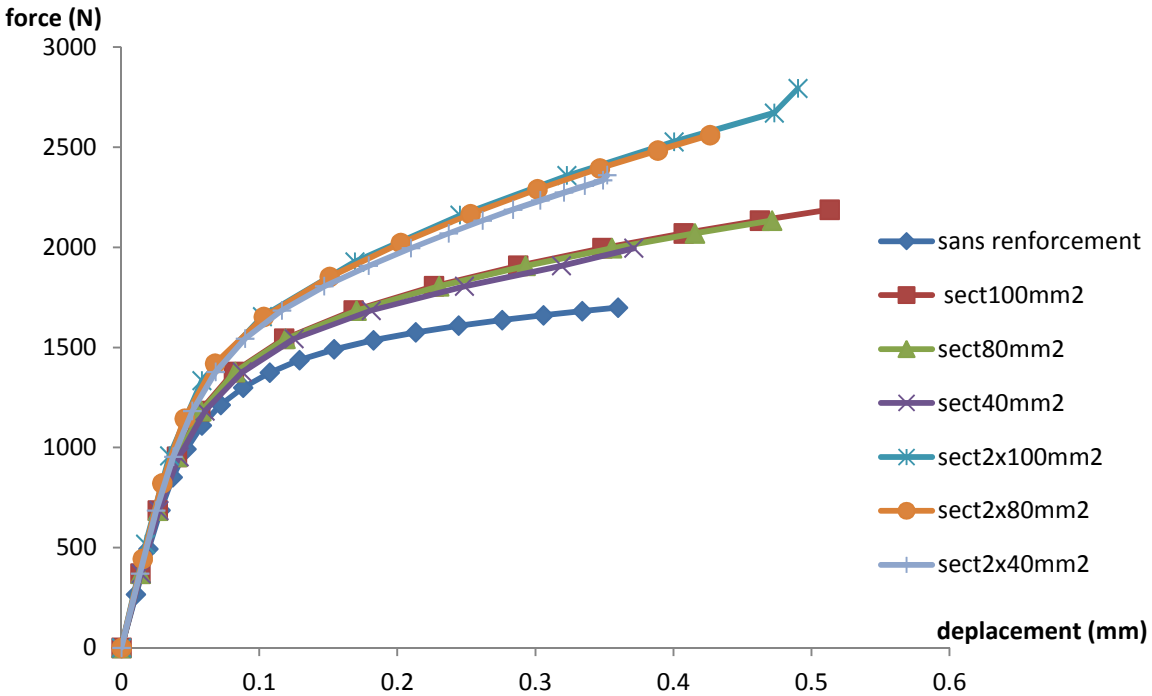


Figure III. 6 : courbe de comparaison force-déplacement

Pour interpréter les résultats des simulations numériques, on regroupe les courbes des réponses numériques (Fig. **III.6**) dans un même diagramme.

On constate sur chacune de ces courbes que :

Dans la première phase, un comportement linéaire dans lequel le béton constitutif de la dalle n'est pas encore endommagé.

La seconde phase est relative à la l'endommagement du béton au centre de la dalle, qui induit une augmentation de la déformation.

La résistance ultime atteinte est de 2800N pour les dalles renforcées dans les deux directions et 2200N pour celle renforcées dans seule direction, et 1700N pour les dalles non renforcées (témoin). On remarque que le renforcement bidirectionnel permet d'augmenter la capacité ultime de la dalle relativement au renforcement unidirectionnel. En effet, par comparaison avec la dalle de référence, l'ajout de renforcement permet d'augmenter la capacité ultime de la dalle de plus de 22% dans le

cas du renforcement unidirectionnelle et de 39% dans le cas du renforcement bidirectionnelle.

Nous constatons également que le point de divergence n'a pas été retardé dans le cas bidirectionnel relativement au cas unidirectionnel.

Les résultats en termes de capacité ultime en présence ou en absence de renforcement sont présentés dans le tableau suivant :

systèmes	Capacité ultime max	
	Valeur	Gain déplacement/ref
	N	%
Sans renforcement	1700	/
Renforcement unidirectionnel	2200	22.73
Renforcement bidirectionnel	2800	39.29

Tableau III. 3 : Résultats de calcul de la capacité ultime pour les différentes dalles

III.5 Influence du renforcement sur la cartographie des contraintes

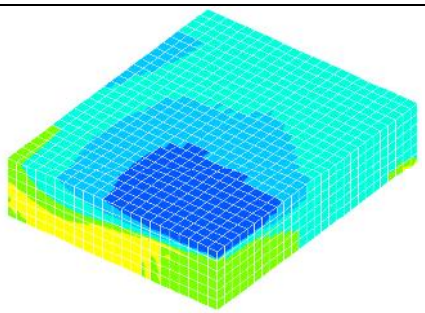
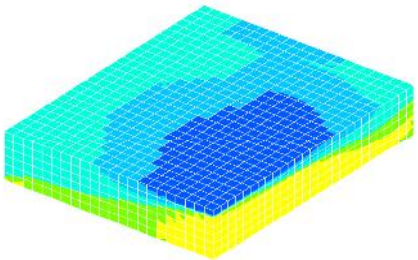
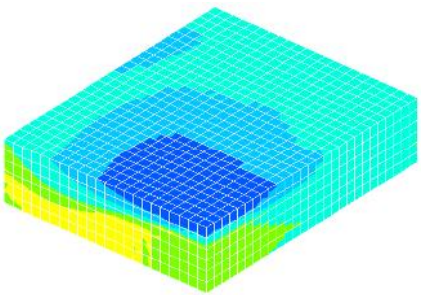
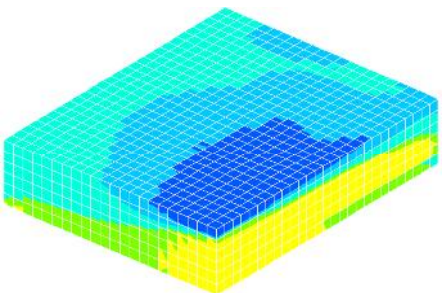
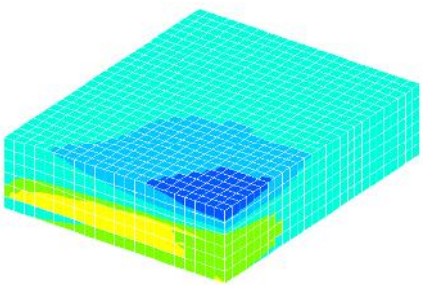
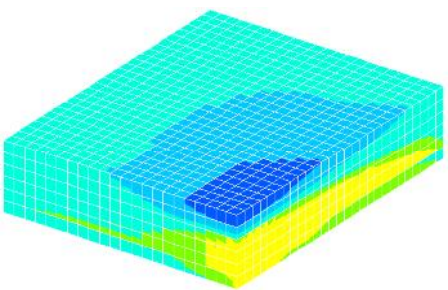
	σ_{xx}	σ_{YY}	légende
Sans renforcement			
Renforcement unidirectionnel			
Renforcement bidirectionnel			

Figure III.7 : cartographie des contraintes des différentes dalles (section des fibres 100mm^2)

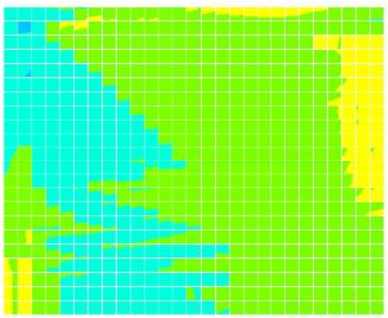
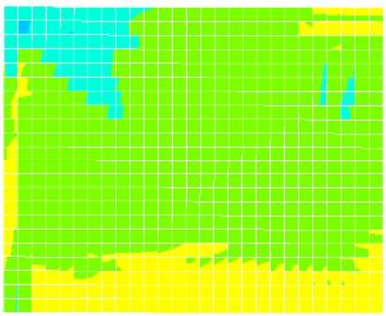
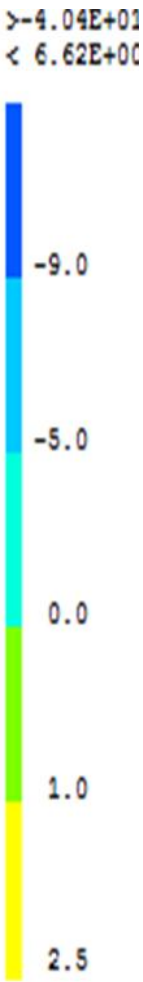
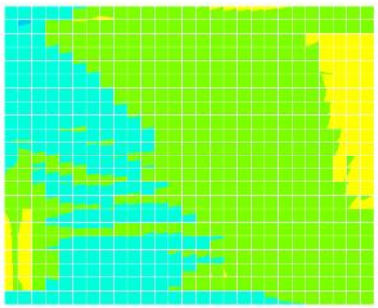
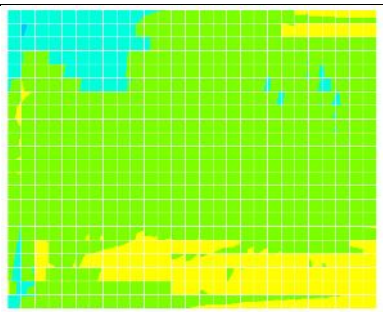
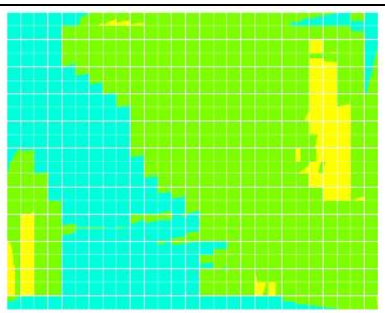
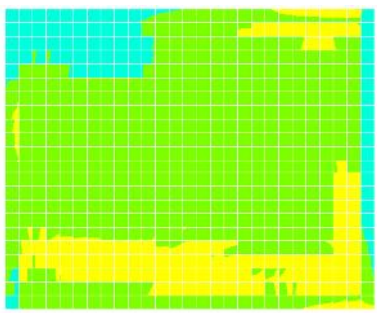
	σ_{XX}	σ_{YY}	légende
Sans renforcement			
Renforcement unidirectionnel			
Renforcement bidirectionnel			

Figure III.8 : cartographie des contraintessur la face inférieure de la dalle

Les graphiques des tableaux III.7 et III.8 montrent la répartition des contraintes normales pour un niveau de chargement de 1700N.

Cette cartographie nous permettons de distingue que les contraintes de traction sont plus présentes sur la dalle non renforcée. Et nous observons l'apparaissons des contraintes de compression et la diminution des contraintes de traction dans les dalles renforcées.

Il est essentiel de souligner que ces renforts (lamelles) jouent bien un rôle dans la structure, principalement au niveau de la réduction des contraintes de traction.

III.6 Influence de la direction et la section de renfort sur les déformations

Les graphiques des tableaux III.9 et III.10 montrent la répartition des déformations pour un niveau de chargement de 1700N.

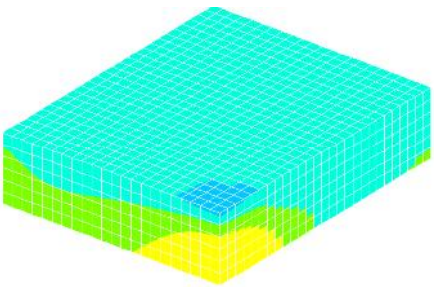
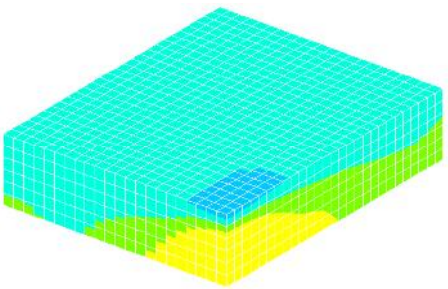
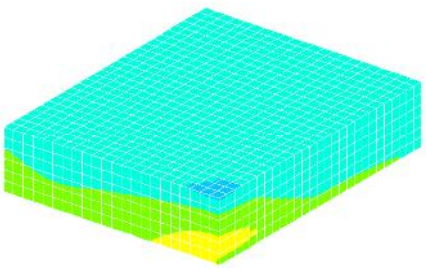
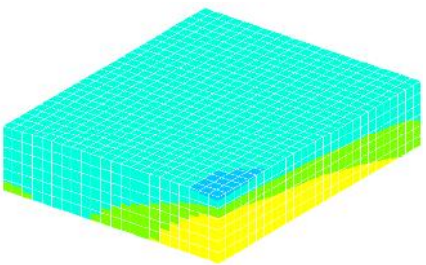
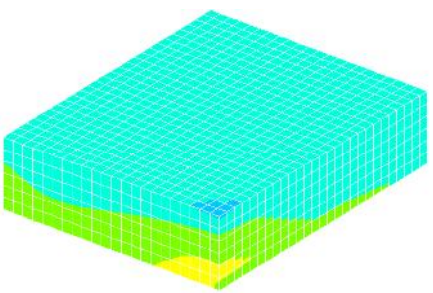
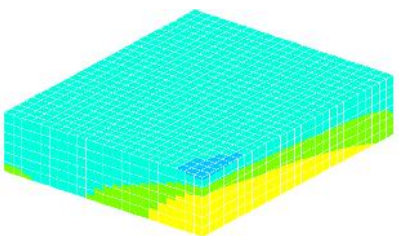
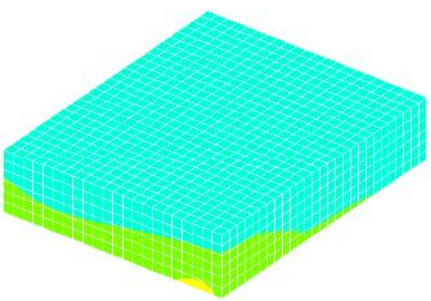
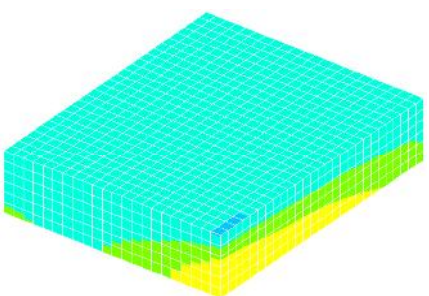
	ε_{xx}	ε_{YY}	**légende**
Sans renforcement			
Renforcement unidirectionnel Section 40mm^2			
Renforcement unidirectionnel Section 80mm^2			
Renforcement unidirectionnel Section 100mm^2			

Figure III.9: cartographie des déformations pour différentes sections des fibres dans le cas d'unrenforcement unidirectionnel

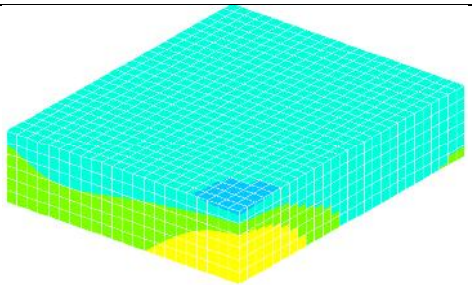
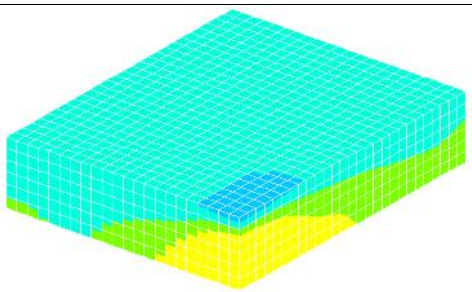
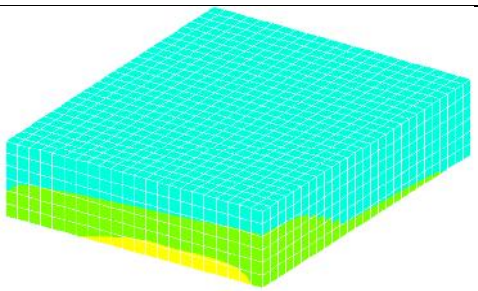
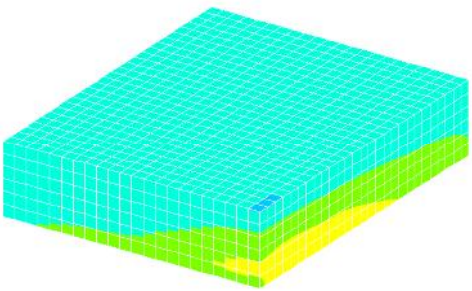
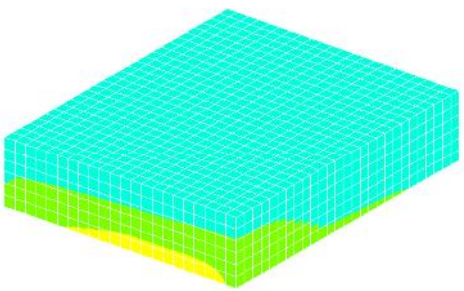
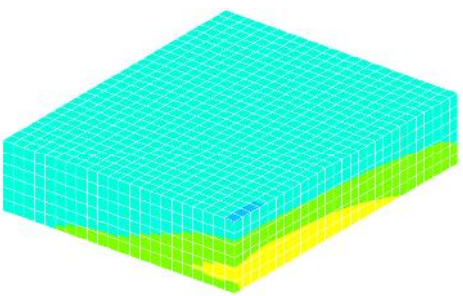
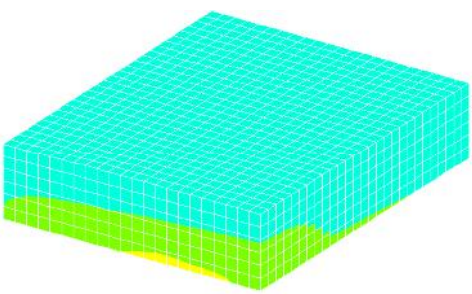
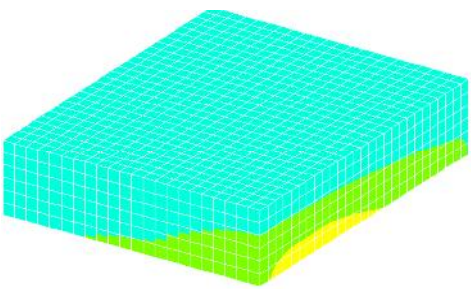
	ε_{xx}	ε_{YY}
Sans renforcement		
Renforcement bidirectionnel Section40mm^2		
Renforcement bidirectionnel Section 80mm^2		
Renforcement bidirectionnel Section100mm^2		

Figure III.10: cartographie des déformations pour différentes sections des fibres dans le cas d'unrenforcement bidirectionnel

Cette cartographie montre la distribution des déformations dans les dalles renforcée ou non. Nous observons que les résultats obtenus confirment le rôle de la fibre dans l'amélioration du comportement mécanique de la structure, en effet, il apparaît clairement que l'endommagement de la dalle renforcée est moins prononcé que dans le cas des dalles non renforcées. En d'autres termes, l'orientation et la section de la fibre ont une grande influence sur la diminution des déformations de traction.

III.7 Profil des efforts interne dans les fibres

Ces figures montrent l'allure des efforts internes dans les fibres, nous distingue que les efforts sont presque nulles au niveau d'appuis et atteindre le maximum au centre de la dalle.

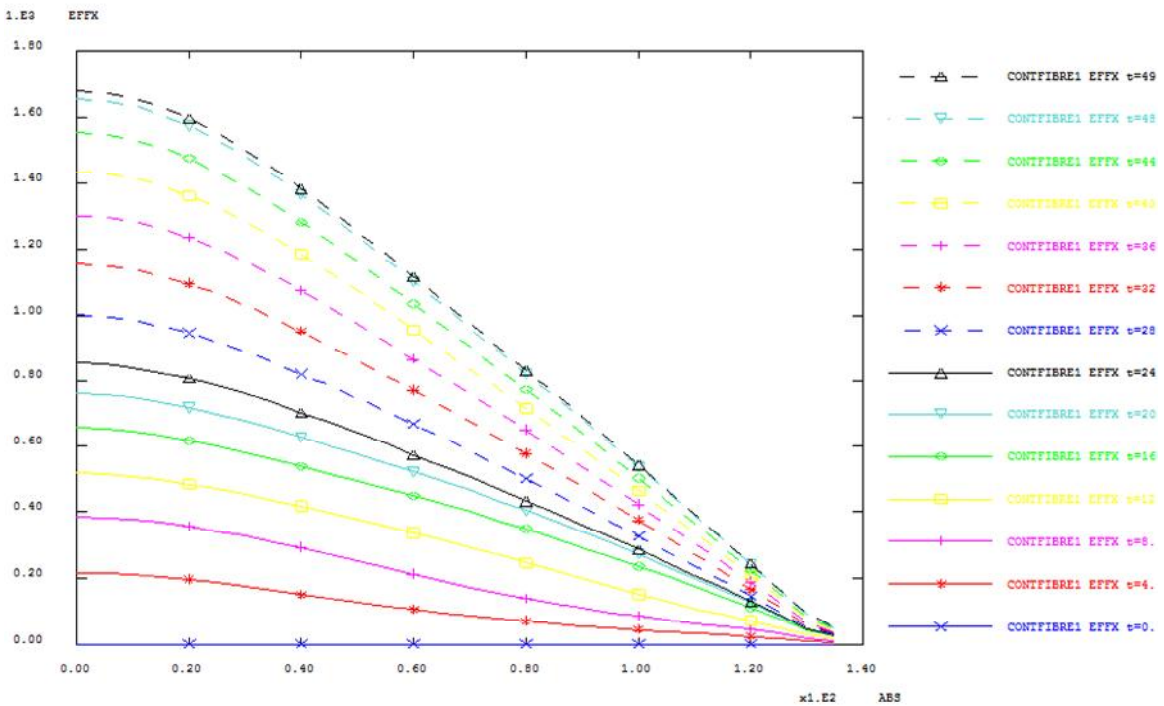


Figure 0I-11: profil des efforts internes dans la fibre suivant X

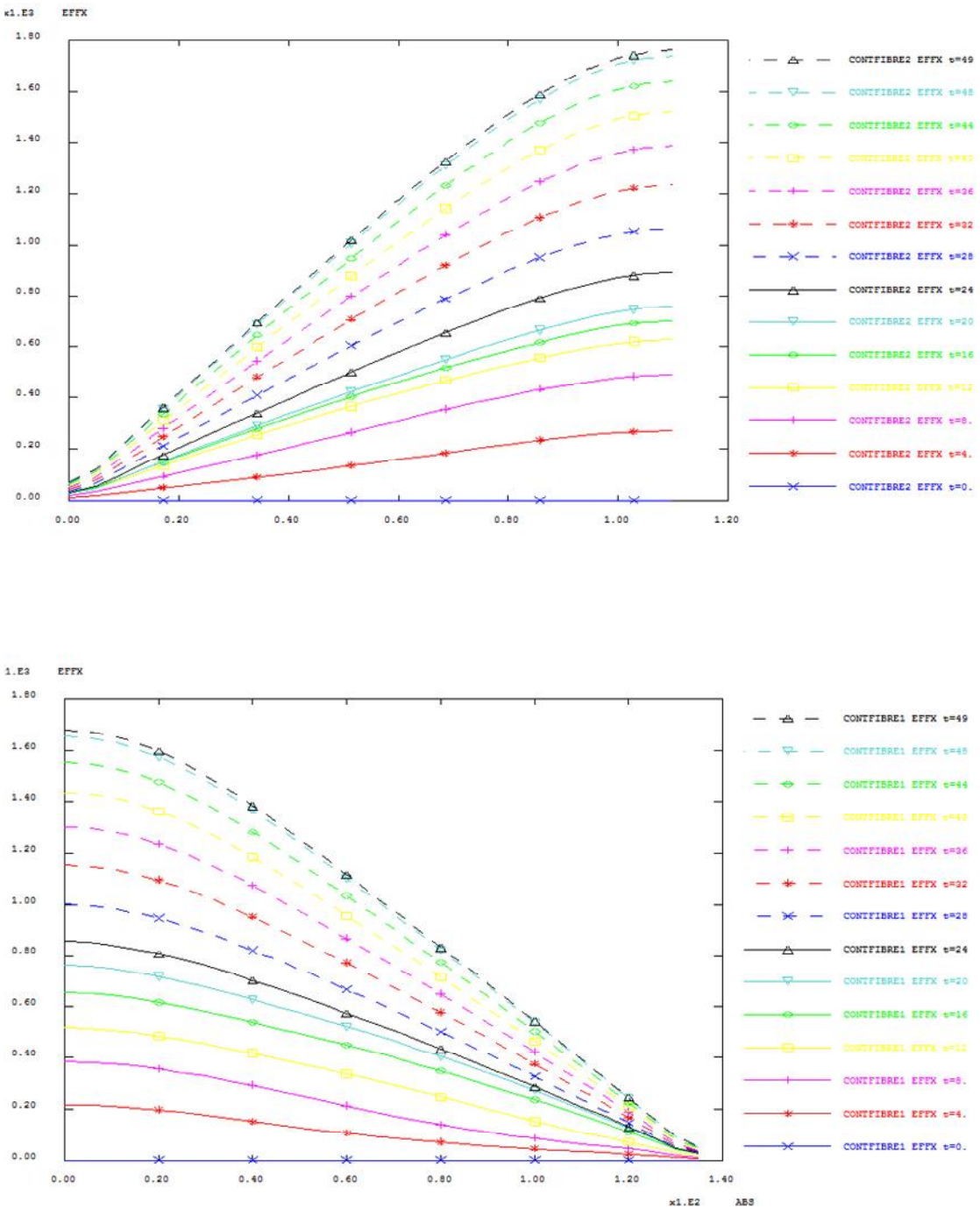


Figure III. 12: profil des efforts internes dans la fibre suivant Y

Le tableau III.4 montre la valeur des efforts internes des différentes sections des fibres pour un même déplacement de 0,35mm.

section	EFF X [N]	EFF Y [N]	$\sigma = \frac{f}{s}$ [N/mm²]	$\sigma = \frac{f}{s}$ [N/mm²]
Sec100m m²	1430	/	14.30	/
Sect80m m²	1395	/	17.44	/
Sect40m m^2	1239	/	30.98	/
Sect2x10 $0mm^2$	1557	1645	15.57	16.45
Sect2x80 mm^2	1412	1516	17.65	18.95
Sect2x40 mm^2	1267	1409	31.68	35.22

Tableau III-4 : valeurs des efforts interne de différentes sections des fibres

L'objectif d'une opération de renforcement est de pouvoir utiliser le renfort en sa pleine capacité. Lors des essais menés dans cette étude numérique, la déformation du composite a été suivie au centre de la dalle où le composite subit le maximum des efforts de traction. Et d'après le tableau III-4 on constate que le renfort ne travail pas au maximum de sa capacité. En effet, l'adhérence du béton avec les fibres empêchent ces dernières de se déformer au-delà de la limite en traction du béton. En perspective, nous pouvons donc imprimer une déformation initiale au matériau de renforcement durant l'opération de collage sur le béton de la dalle, pour faire travailler ce matériau au maximum de sa capacité.

III.8 Conclusion

L'étude numérique nous a permis de mettre en exergue l'apport apporté par le matériau composite en termes d'amélioration des performances mécaniques, l'analyse

des résultats nous permet également de conclure que la direction du renfort dans la structure est considérée comme un paramètre de conception primordial dans le cadre de la réhabilitation ou de confortement des éléments de la structure.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Le contexte générale de la présente étude sert à montrer le rôle primordial que joue le renforcement par des composites sur l'amélioration du comportement de béton en terme de résistance et de ductilité. Ceci à été montré à partir d'une simulation numérique sur des dalles en béton.

Notre travail s'est particulièrement orienté vers l'analyse du comportement de dalles en béton renforcées par matériaux composites. Nous avons traité le cas des dalles simplement appuyées sur leur contour, renforcées premièrement dans seule direction, ensuite dans les deux directions par des lamelles de différentes sections.

Nous constatons que la résistance et la ductilité des dalles renforcées augmentent en fonction de la direction et la section de renfort composite.

Cette modélisation a servi aussi à montrer l'influence du renforcement sur les déformations ultimes. En effet, la rupture numérique de la structure étudiée à été retardées de beaucoup dans le cas bidirectionnel. Ce qui veut dire que l'endommagement du béton est moins prononcé dans les structures renforcées.

En perspective, nous pensons qu'il est nécessaire de faire un renforcement par des lamelles précontraintes.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

[1] : **KHELOUI FATMA,** 'modélisation du comportement à la fatigue d'éléments de construction en béton de fibre' thèse de doctorat université de MMTO 2012.

[2] : histoire du béton : naissance et dévloppement1818-1970.

[3] : **F.GABRYSIAK,** « matériaux- les bétons »p1-2.

[4]: **H. UNG QUOC, G. MOUNAJED** « Nouveau modèle d'endommagement de comportement du béton »

[5] : **TRAN The Truyens**, « Contribution à l'étude du comportement mécanique et hydromécanique du béton »thèse de doctorat. Université de liège 2009.

[6] : **Charlotte MEAUD,** « analyse multi-échelle des connexions par collage application aux éléments structuraux multi matériaux fléchis »thèse de doctorat université Claude Bernard Lyon 2012.

[7] : **GORGUI DJIBRIL NIANG,** « traitement des singularités de charges sur les dalles prolongement pour l'anisotropie »projet de fin d'étude Ecole Polytechnique de Thiès 2009.

[8] : **EL HOUSSAIN ROCHDI**, « contribution a l'analyse du comportement mécanique de dalles en béton arme renforcées par matériaux composites » THESE de doctorat L'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON 2004.

[9]: **L.BERREUR, B.d. MAILLARD, and S.** « L'industrie française des matériaux composites». Ministre de l'économie des finances et de l'industrie 2002.

[10]: **GLOSSAIRES DES MATERIAUX COMPOSITES** « centre d'animation régional en matériaux avances » 2004.

[11] : **AIT TAHAR Kamal**, « Cours matériaux composites » 2015.

[12]: **MUSTAPHA.MALHA** « mise en œuvre, caractérisation et modélisation de matériaux composites polymère » thèse de doctorat 2013.

[13] : **J.M Berthelot**, matériaux composites « comportement mécanique et analyse des structures » 1999.

[14] : **Merdas .Abed . ELGANI,** « utilisation de TFC dans la réparation et renforcement des poutres en béton arme » mémoire de magister de l'université de Constantine 2005.

[15] : **Daniel GUILLON,** « Fibres de verre de renforcement » Techniques de l'Ingénieur, vol A 2 110.

[16] : **MICHEL DUPEUX,** « aide mémoire sciences des matériaux » paris ,2004.

[17] : **Jean LUYCKX,** « Composites à fibres de carbone dans le génie civil » Techniques de l'Ingénieur, vol AM 5 620

[18] : **Pierre-Alexandre BRIEMEL «** Simulation numérique du renforcement de structures en béton armé par des renforts en fibres végétales et comparaison au renforcement par des fibres de carbone » Projet de Fin d'études, Université Fédérale d'Uberlândia, Brésil 2013

[19] : hpp/www.mdacomposites.org/application au génie civil.

[20]: **VIZUETE, J.M.** « Techniques et systèmes de renfort des structures en béton » January 2000.

[21] : **Riad BENZAID Habib Abdelhak MESBAH Nasr-eddine CHIKH,** « Contribution à l'Étude des Matériaux Composites Dans le Renforcement et la Réparation Des Éléments Structuraux Linéaires en Béton ».

[22] : **MAAMOUN SAADE,** « Étude du comportement des voûtes en maçonnerie renforcées par matériaux composites – application aux ouvrages d'assainissement » thèse de doctorat université D'ARTOIS 2012.

[23] : **EL HOUSSAIN ROCHDI** « contribution a l'analyse du comportement mécanique de dalles en béton arme renforcées par matériaux composites » thèse de doctorat L'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON 2004.

[24] : **Patrick Guiraud ;** « Les solutions techniques pour la réparation et le renforcement des ouvrages de génie civil en béton ».p19.

[25] : **HAMELAN** « réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composite » document scientifiques et techniques

[26] : **HANTZ Mathieu ;** « Etude de l'optimisation du renforcement par des fibres de carbones des dalles en béton armé munies de trémies, en utilisant l'optimisation topologique » thèse de doctorat. Université Fédérale d'Uberlândia, Brésil

[27] : **Y. MOKEDDEM A. HAMOUINE N.KHELIFI & T.KADDOUCI** « L'Influence de la Résistance de Béton et de la Limite Élastique de l'Acier et sur l'Apparition de la Fissuration » The Journal of Scientific Research 2010-2013.

[28] : **J. Mazars** (1984). Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure, Thèse de doctorat d'état de l'Université Paris VI.

[29] : www-cast3m.cea.fr.