

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri – Tizi Ouzou –

Faculté de génie de la construction

Département de génie civil



## THÈSE

Pour obtenir le grade de

**MASTER RECHERCHE EN GENIE CIVIL**

*Spécialité : Structure et matériaux*

Présenté et soutenue publiquement par

**Sofiane Hadouche**

Septembre 2015

## THÈME

---

**Analyse paramétrique des résistances  
des dalles renforcées par des  
composites**

---

## JURY

Dr. F. KHELOUI      Rapporteur

Pr. K. AIT TAHAR    co-Rapporteur

Pr. B. MELBOUCI    Président

Dr. A. KAHIL        Examineur

*Promotion  
2014/2015*

*Au premier lieu, je remercie dieu le tout puissant, de m'avoir aidé à arriver au terme de ce travail qui présente le fruit de plusieurs années d'études.*

*Je voudrais remercier mes encadreurs Monsieur AIT TAHAR Kamal et Mme KHELOUI Fatma pour m'avoir encadré, je tiens à souligner leur disponibilité, le soutien qu'ils m'ont apporté, leurs idées, leur expérience et leur confiance qui m'ont accordé.*

*Ma sincère gratitude va aux membres du jury de soutenance qui m'ont fait honneur d'examiner et de juger mon travail.*

*J'associe à ces remerciements Mr BOUHERAOUA Rachid, Mme MADJBER Fadhila, les ingénieurs de laboratoire de génie civil pour leur disponibilité et toute l'aide que j'ai eu de leurs parts. Pour terminer, je tiens sincèrement à remercier mes parents et toute ma famille qui m'ont soutenu dans mes choix et m'ont encouragé à réaliser ce mémoire.*

*L'objectif de ce travail, consiste à mener une étude paramétrique des différents facteurs régissant le comportement des dalles en béton armé renforcées par des patchs composites soumises à un chargement vertical progressif de poinçonnement centré.*

*En effet, en se basant sur les résultats de l'investigation expérimentale réalisée par notre collègue Djellad.Z, Plusieurs rapports sont considérés pour tenir compte de la surface spécifique renforcée. Les dimensions des patchs sont calculées de sorte que, le rapport  $X_P/Y_P$  soit proportionnel à  $X_D/Y_D$ , de la dalle, avec un pas respectivement de 6 cm longitudinalement et 4 cm transversalement.*

*Nous avons réalisé un calcul paramétrique en utilisant le logiciel de calcul Excel Les résultats obtenus montrent une influence assez importante de la surface spécifique renforcée sur la résistance et la réponse globale de la dalle en béton renforcée par un patch composite de dimensions relativement moyennes.*

**Mots Clés :** *Dalle, patch composite, poinçonnement, analyse paramétrique, traitement,*

*The objective of this work is to conduct a parametric study of the different factors governing the behavior of reinforced concrete slabs reinforced composite patches subjected to a progressive vertical loading punching centered.*

*Indeed, based on the results of experimental investigation conducted by our colleague Djellad Z. Several reports are considered to account for the enhanced surface area. The dimensions of the patches are calculated so that the  $XP / YP$  ratio is proportional to  $XD / YD$ , of the slab, with a pitch of 6 cm 4 cm longitudinally and transversely respectively.*

*we conducted a parametric calculation using Excel software The results obtained show a rather strong influence of enhanced surface area on the resistance and the overall response of the reinforced concrete slab reinforced with of a composite patch relatively medium size*

**Keywords:** *Concrete slab, composite patch, punching load, parametric analysis, traitement*

Remerciements	
Résumé	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	
<b>Chapitre I LE MATERIAU BETON</b>	
Introduction.....	5
I.1. Les constituants du béton .....	6
I.2. Caractéristiques mécanique du béton.....	6
I.2.1. Béton en compression axiale.....	6
I.2.2. Béton en traction.....	8
I.2.3. Module de déformation longitudinale.....	11
I.2.4. Module d'élasticité transversale « G » .....	11
I.2.5. Coefficient de poisson.....	12
I.2.6. Modèle de calcul à l'E.LU.....	12
I.3. Les dalles.....	13
I.4. Systèmes structuraux des dalles.....	15
I.4.1. Les planchers préfabriqués en béton.....	16
I.4.2. Les planchers à poutrelles.....	16
I.4.3. Les planchers à pré-dalles.....	17
I.4.4. Les planchers nervures.....	17
I.4.5. Les planchers à dalles alvéolées.....	18
I.5. Poinçonnement des dalles.....	18
I.5.1. Rupture par poinçonnement .....	20
I.5.2. Comportement mécanique des dalles.....	22
I.5.2.1. Approche mécanique du comportement des dalles non fissurées.....	22
Conclusion du chapitre .....	25

## Chapitre II LES MATERIAUX COMPOSITES

Introduction.....	27
II.1. Classification des Matériaux Composites.....	29
II.1.1. Classification suivant la forme des constituants.....	29
II.1.2. Classification suivant la nature des constituants.....	29
II.2. Constituants des matériaux composites.....	30
II.2.1. Les matrices.....	30
II.2.1. 1. Les résines thermodurcissables.....	31
II.2.1. 2. Les résines thermoplastiques.....	33
II.2.2. Les renforts.....	34
II.2.3. Charges et additifs.....	37
II.3. Mécanisme de rupture et endommagement des matériaux composites.....	39
II.3.1. Différents mécanismes de rupture dans un composite unidirectionnel.....	39
II.3.2. Composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale.....	40
II.3.3. Composite unidirectionnel soumis à une traction transverse.....	41
II.4. Critères de rupture.....	42
II.4.1. Critères en contraintes maximales.....	42
II.4.1. 1. Critères dans les axes principaux.....	42
II.4.2. Critères en déformations maximales.....	43
II.4.2.1. Critères dans les axes principaux.....	43
II.4.3. Critères interactif.....	43
II.4.3.1. Critère de Hill.....	44
II.4.3.2. Critère de Tsai-Hill.....	45
II.4.3.3. Critère de O.Hoffman.....	45
II.4.3.4. Critère de Tsai-Wu.....	46
II.5. Application en Génie civil.....	46
II.5. 1. Exemple de renforcement des structures par des composites.....	46
II.5.1.1. Enroulement filamentaire.....	46
II.5.1.2. Stratification directe de tissus sec.....	47
II.5.1.3. Tissus de fibres de carbone ‘TFC’.....	48
II.5.1.4. Le collage de plaques composites.....	49
Conclusion du chapitre.....	51

## Chapitre III ETUDE PARAMETRIQUE

Introduction.....	53
III.1. Patchs composites .....	53
III.1.1. Matrice : La résine époxyde.....	53
III.1. 2.. Liège.....	54
III.2. Chargement, acquisition des valeurs et présentation des résultats.....	57
III.2.1. Essai de compression.....	57
III.2.2. Essai de traction des composites.....	57
III.2.3. Essai de poinçonnement.....	58
III.3. Traitement des résultats et illustration.....	60
III.4. Développement du modèle théorique.....	70
III.4. 1.Equilibre d'une section en béton renforcée.....	71
III.4. 2.Conditions d'équilibre.....	71
III.5. Application numérique.....	75
Conclusion du chapitre.....	77
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>79</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>82</b>

# ***LISTE DES FIGURES***

<u>Figure I.1.</u> : cylindre soumis à la compression.....	7
<u>Figure I.2.</u> : Evolution de la résistance à la compression dans le temps.....	8
<u>Figure I.3.</u> Diagramme des contrainte-déformation en compression.....	8
<u>Figure I.4.</u> Comportement d'une éprouvette en béton en traction directe.....	10
<u>Figure I.5.</u> Essai de fendage sur éprouvette cylindrique.....	10
<u>Figure I.6.</u> Essai de traction sur une éprouvette.....	11
<u>Figure I.7.</u> Evolution de la résistance à la traction $f_{tj}$ en fonction de celle à la compression $f_{cj}$ .....	11
<u>Figure I.8.</u> Diagramme contrainte déformation.....	13
<u>Figure I.9.</u> Phases successives du comportement d'une dalle en flexion.....	15
<u>Figure I.10.</u> Différents types de dalles structurales.....	16
<u>Figure I.11.</u> Différents types d'éléments de plancher préfabriqué.....	17
<u>Figure I.12.</u> a). Plancher à poutrelles et entrevous bétons sur vide sanitaire.....	18
<u>Figure I.12.</u> (b). Plancher à dalles alvéolées.....	19
<u>Figure I.13:</u> Différents types de poinçonnement de dalles en béton armé : (a) poinçonnement axisymétrique ; (b) poinçonnement symétrique ; (c) poinçonnement non symétrique (sans excentricité) ; (d) poinçonnement excentré.....	20
<u>Figure 1.14</u> : rupture par poinçonnement d'une dalle en béton.....	21
<u>Figure I.15.</u> Le plancher-dalle.....	21
<u>Figure I.16.</u> Evolution de la fissuration de la face tendue d'une dalle d'essais.....	22
<u>Figure I.17.</u> Comportement des dalles sous poinçonnement non symétrique.....	23
<u>Figure I.18</u> : Distribution des moments dans une dalle rectangulaire pour différentes valeurs du rapport des côtés $a/b$ et pour $\nu=0$ .....	25
<u>Figure II.1.</u> Evolution de la production mondiale des composites et conséquences sur les prix.....	29
<u>Figure II.2:</u> Composition des matériaux composites.....	31
<u>Figure II.3.</u> Différentes familles de matrices.....	32
<u>Figure II.4.</u> Principaux durcisseurs utilisés.....	33
<u>Figure II.5.</u> Fonction des liaisons d'un polymère époxy.....	33
<u>Figure II.6.</u> Evolution des propriétés mécaniques en fonction de la température.....	34
<u>Figure II.7.</u> Principaux matériaux de renfort.....	36
<u>Figure II.8.</u> Principales formes des renforts.....	36
<u>Figure II.9.</u> Histogramme des propriétés en traction des fibres.....	37
<u>Figure II.10.</u> Géométries des renforts.....	38
<u>Figure II.11.</u> Exemples de tissus de renforts utilisés pour les CMO haute performance : (a) verre, (b) carbone, (c) aramide (Kevlar) .....	38

<u>Figure II.12.</u> Exemples de charges utilisées dans les CMO : (a) micro-billes de verre, (b) noir de carbone, (c) silice .....	40
<u>Figure II.13.</u> Courbe contrainte-déformation dans le cas $\epsilon_{fu} < \epsilon_{mu}$ .....	42
<u>Figure II.14.</u> Courbe contrainte-déformation dans le cas $\epsilon_{fu} > \epsilon_{mu}$ .....	42
<u>Figure II.15.</u> Comportement (a) fragile (b) ductile d'un matériau .....	44
<u>Figure II.16.</u> Contrainte dans les axes des matériaux d'une couche .....	44
<u>Figure II.17.</u> Renforcement par fibres sèches. a) principe de l'enroulement filamentaire, b) enroulement automatisé. ....	49
<u>Figure II.18.</u> Mise en œuvre par stratification directe.....	50
<u>Figure II.19.</u> Renforcement par Tissu de fibres de carbone TFC de surfaces non planes .....	50
<u>Figure II.20.</u> Procédé par collage de plaques.....	51
<u>Figure II.21.</u> Exemples d'application des matériaux composites en génie civil .....	52
<u>Figure II.22:</u> Armatures composites pour le renforcement des ouvrages en béton.....	52
<u>Figure II.23.</u> Confinement de colonnes.....	52
<u>Figure III.1:</u> Le Liège.....	58
<u>Figure III.2.</u> Patches composites de différentes dimensions. ....	58
<u>Figure III.3.</u> Mise en point du dispositif d'essai de poinçonnement. ....	60
<u>Figure III.4.</u> Présentation des variantes de dalles de patches composites de dimensions variées.....	62
<u>Figure III.5.</u> Force reprise par le patch composite de dimensions 40x60x2xmm. ....	64
<u>Figure III.6.</u> Variation de la Force reprise par le patch composite de 40x60x2xmm. ....	64
<u>Figure III.7.</u> Force reprise par le patch composite de dimensions 80x120x2xmm. ....	65
<u>Figure III.8.</u> Variation de la Force reprise par le patch composite de 80x120x2xmm. ....	66
<u>Figure III.9.</u> Force reprise par le patch composite de dimensions 120x180x2xmm. ....	67
<u>Figure III.10.</u> Variation de la Force reprise par le patch composite de 120x180x2xmm. ....	67
<u>Figure III.11.</u> Force reprise par le patch composite de dimensions 220x250x2xmm. ....	68
<u>Figure III.12.</u> Variation de la Force reprise par le patch composite de 220x250x2xmm. ....	69
<u>Figure III.13.</u> Variation de la Force reprise par les patches composites de dimensions variées. ....	70
<u>Figure III.14.</u> Confrontation des valeurs de la force reprise par les dalles renforcées et dalle témoin.....	71
<u>Figure III.15.</u> Confrontation des valeurs des forces des différentes dalles renforcées (Apports des patches composites).....	71
<u>Figure III.16.</u> Histogramme des apports des patches composites dans la reprise de la charge de poinçonnement. ....	72

<u>Figure III.17.</u> : Variation de la force reprise par le composite en fonction du rapport des surfaces $S1/S$ (patch/ dalle).....	73
<u>Figure III.18.</u> Diagramme des contraintes et des déformations d'une section rectangulaire en béton renforcé. ....	74
<u>Figure III.19.</u> Périmètre du rectangle d'impact au niveau du feuillet moyen.....	76
<u>Figure III.20.</u> Variation de $F_x/c*e*b$ en fonction de $S1/S$ .....	77
<u>Figure III.21.</u> Confrontation des valeurs expérimentales et théoriques de la force reprise par le patch $F_x$ . ....	79
<u>Figure III.22.</u> Histogramme des erreurs entre les valeurs expérimentales et théoriques de la force reprise par le patch $F_x$ . ....	79

# ***LISTE DES TABLEAUX***

Tableau I.1. Classification des dalles.....	14
Tableau II.1:Classification des matériaux composites.....	30
Tableau II.2. Caractéristiques mécaniques des résines époxydes.....	34
Tableau II.3. Propriétés mécaniques des résines polyester.....	35
Tableau II.4. Propriétés des fibres.....	37
Tableau III.1 : Caractéristiques de la résine époxyde.....	56
Tableau III.2 : Caractéristiques du liège (Fiche technique).....	57
Tableau III.3. : Caractéristiques du béton en compression.....	59
Tableau III.4. Dimensions géométriques des patchs composites réalisés.....	61
Tableau III.5. Résultats des essais de poinçonnement centré (Valeurs Moyennes).....	62
Tableau III.6. Résultats des essais sur les dalles renforcées avec le patch de dimensions 40x60x2xmm.....	63
Tableau III.7. Résultats des essais sur les dalles renforcées avec le patch de dimensions 80x120x2xmm.....	65
Tableau III.8. Résultats des essais sur les dalles renforcées avec le patch de dimensions 120x180x2xmm.....	66
Tableau III.9.Résultats des essais sur les dalles renforcées avec le patch de dimensions 220x250x2xmm.....	68
Tableau III.10.Valeurs moyennes des résistances des dalles renforcées avec différents patchs.....	69
Tableau III.11.Valeurs de la force reprise par le patch en fonction du rapport des surfaces S1/S.....	72
Tableau III.12. Variation de $F_x/\sigma^*e*b$ en fonction de S1/S.....	76
Tableau III.13. Résultats de l'application numérique du modèle proposé.....	78

# Introduction Générale

## Introduction Générale

Le béton est le matériau le plus consommé dans le monde (1m<sup>3</sup>/habitant/an). Il représente plus de 80% du marché de l'industrie de la construction. Le processus de fabrication et de mise en œuvre du béton est frottement énergivore (1,85 MWh/m<sup>3</sup>). Les objectifs de développement durable et de réduction des coûts incitent à réduire fortement les quantités de béton mises en œuvre dans la construction.

Ce chapitre est totalement consacré à la présentation des différents calculs et résultats obtenus dans l'étude paramétrique, des facteurs importants régissant le comportement des dalles en béton renforcées par des patchs composites, soumises à un chargement vertical progressif de poinçonnement. Le patch composite est toujours collé sous le point d'application de la charge. Les résultats expérimentaux utilisés dans cette étude sont ceux obtenus lors de l'investigation expérimentale menée par Melle Djellad A Z sous la direction de mon promoteur. Tous les essais ont été réalisés au Laboratoire de Génie-Civil de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou.

L'objectif principal consiste à étudier l'influence du patch composite à travers sa surface (dimensions en plan) sur la résistance et la réponse mécanique des dalles. Un modèle théorique qui permet de transcrire le comportement mécanique sera développé et proposé à partir des différents résultats.

Pour étudier l'influence de la surface de patch en composite sur le mode de rupture de la dalle sous l'effet d'une charge centrée quatre (04) variantes ont été considérées. Les sections des patchs sont calculées de façon que le rapport  $X_P/Y_P$  de patch soit proportionnel à  $X_D/Y_D$  de la dalle, avec un pas de 6cm dans le sens longitudinal et de 4cm dans le sens transversal.

Les matériaux composites utilisés dans notre étude, sont des patchs à base de résine époxy renforcée de fibres en liège. Les patchs composites sont réalisés à partir du mélange résine époxy -durcisseur et des renforts, selon la fiche technique proposée par le constructeur.

Le travail présenté dans ce mémoire est organisé en trois (03) chapitres et est terminé par une conclusion générale.

Le premier chapitre est totalement consacré à la revue de littérature orientée sur le matériau béton, les pathologies et causes de dégradations, le phénomène de poinçonnement et les techniques de renforcement par les matériaux composites. L'analyse critique nous a permis de mettre en évidence l'intérêt et l'actualité de notre recherche.

Dans le deuxième chapitre, on présente les matériaux composites, les différents types de matrices et renforts classiquement employés dans l'industrie et enfin les propriétés mécaniques.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des différents résultats obtenus. Le modèle analytique proposé a une forme simple et peut être appliqué sans difficulté, permet d'estimer correctement les valeurs limites de la résistance de rupture des dalles en béton renforcées par des patches composites. Les dimensions géométriques du patch ( surface renforcée) ont une influence directe sur la résistance.

Le mémoire est terminé par une conclusion générale.

# **Chapitre I :**

# **Le matériau Béton**

## INTRODUCTION

L'invention du béton armé est généralement attribuée à Joseph Lambot, qui, en 1848, a fait flotter une barque en ciment armé, et à Joseph Monier, qui a construit indépendamment, grâce à ce matériau, des bacs à fleurs en 1849. L'emploi du béton armé dans les structures s'étend dès lors rapidement en France sous l'impulsion de Joseph Monier, mais aussi de Coignet, de François Hennebique et d'Armand Gabriel.



**Figure : 1.1** La première réalisation en béton armé Barque de Joseph Louis.



**Figure1.2** : Pont bi-poutre de Chazelet, 1875, Joseph Monier.

Les recherches menées depuis 1970 sur le béton, et particulièrement sur ses constituants actifs, conduisent à un nouveau bond qualitatif et quantitatif de ses propriétés. Aux États-Unis et au Japon, on fabrique et on met en œuvre, dans les années 1980, des bétons à hautes performances dont la résistance à la compression atteint 100 Mégapascals (MPa) (environ 1000 kg/cm<sup>2</sup>), et même 140 MPa (1400 kg/cm<sup>2</sup>) dans un immeuble à Seattle aux États-Unis. En laboratoire, on obtient, d'ores et déjà, des résistances supérieures à 600 MPa (6000 kg/cm<sup>2</sup>). [1]

Bien que toujours composés de ciment, de granulats et d'eau, les bétons à hautes performances sont des matériaux nouveaux qui possèdent des propriétés mécaniques élevées, associées à une grande durabilité. Les améliorations apportées par l'industrie des liants hydrauliques à la qualité des ciments, la mise au point d'adjuvants spécifiques de synthèse ainsi que l'emploi d'ultrafines ont permis ce progrès spectaculaire.

## **I.1. Les constituants du béton**

Les constituants essentiels du béton sont : Le ciment, les graviers, le sable et l'eau. Le ciment joue le rôle du liant hydraulique et les agrégats confèrent au matériau sa dureté et sa résistance. Le matériau béton est constitué par le mélange, dans des proportions étudiées, de ciment, de granulats et d'eau et d'adjuvants. La variation des différentes proportions de ces constituants se répercutera sur les caractéristiques physiques et mécaniques. Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine s'hydratant en présence d'eau. Il forme une pâte faisant prise qui durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide. L'eau de gâchage doit avoir les propriétés de l'eau potable. L'eau confère au béton sa maniabilité d'une part par son action lubrifiante sur les différents grains, d'autre part par la cohésion due à la pâte provoquée par l'association des grains fins avec elle. L'eau permet aussi l'hydratation du ciment et donc le durcissement du béton. Toute variation de la quantité d'eau entraîne des modifications de la vitesse de durcissement et des performances mécaniques. Les granulats (sables, gravillons) constituent le squelette du béton. Ils doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air. Le choix des granulats a une influence sur la fluidité du mélange. Les additions (fumée de silice, cendres volantes...) influent sur la compacité du béton, et complétant la courbe granulométrique du béton vers les éléments fins. Les adjuvants améliorent la maniabilité, modifie sa prise et son durcissement et, dans un certain cas, avoir un rôle d'entraîneur d'air, d'hydrofuges de masse.

## **I.2. Caractéristiques mécanique du béton**

### **I.2.1. Béton en compression axiale**

Les bétons durcis ont des lois de comportement non linéaires. Les paramètres qui régissent ces lois sont déterminés à partir d'essais de compression. Le paramètre le plus déterminants est la résistance en compression Le béton est caractérisé par une bonne résistance à la compression  $f_{cj}$  et une résistance médiocre en traction  $f_{tj}$ . Un module d'Young qui prend deux valeurs selon que l'on considère des déformations instantanées  $E_{ij}$  ou des déformations à long terme, déformations différées,  $E_{vj}$ . La résistance en compression  $F_{ck}$ , qui est mesurée (à 7 et 28 jours) par écrasement d'éprouvettes cylindriques de 300 mm de haut et de 150 mm de diamètre conservés dans l'eau à  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  [REG 82]. La résistance à la compression varie de

20 à 40 MPa pour les bétons courants, et entre 50 et 100 MPa pour les bétons à haute performance. Le diagramme contraintes-déformations du béton soumis à une compression uni-axiale passe par un maximum et décroît ensuite faiblement jusqu'à la rupture. Le comportement en compression pour le béton typique est schématisé par la figure I.3 et est représenté par les courbes contraintes-déformations données dans la figure I.4.

Lorsque l'âge du béton est inférieur à 28 jours, on prend en compte pour les calculs de résistance  $f_{cj}$ , valeur caractéristique à j jours, obtenue suivant les cas par les formules suivantes :

$$f_{cj} = f_{c28} \frac{j}{4,76 + 0,83j} \quad \text{pour } f_{c28} \leq 40 \text{ Mpa}$$

$$f_{cj} = f_{c28} \frac{j}{1,40 + 0,95j} \quad \text{pour } f_{c28} > 40 \text{ Mpa}$$

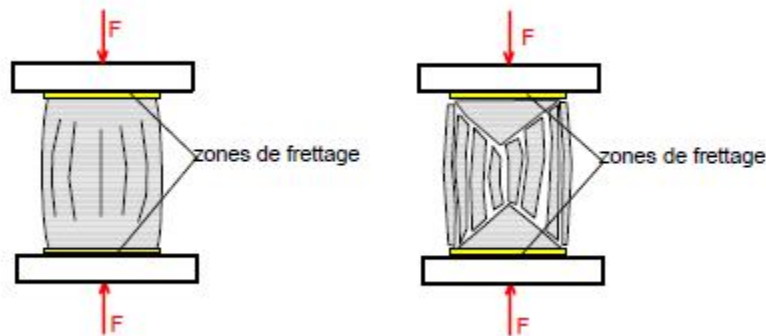


Figure I.3 : Cylindre soumis à la compression.

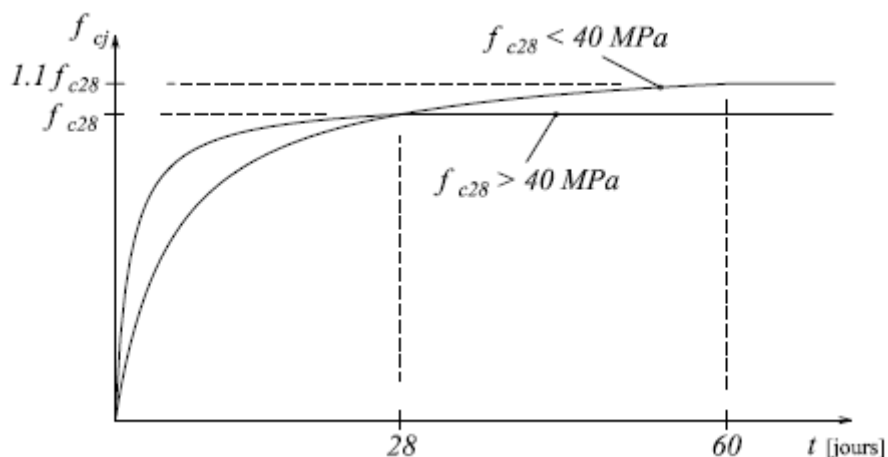
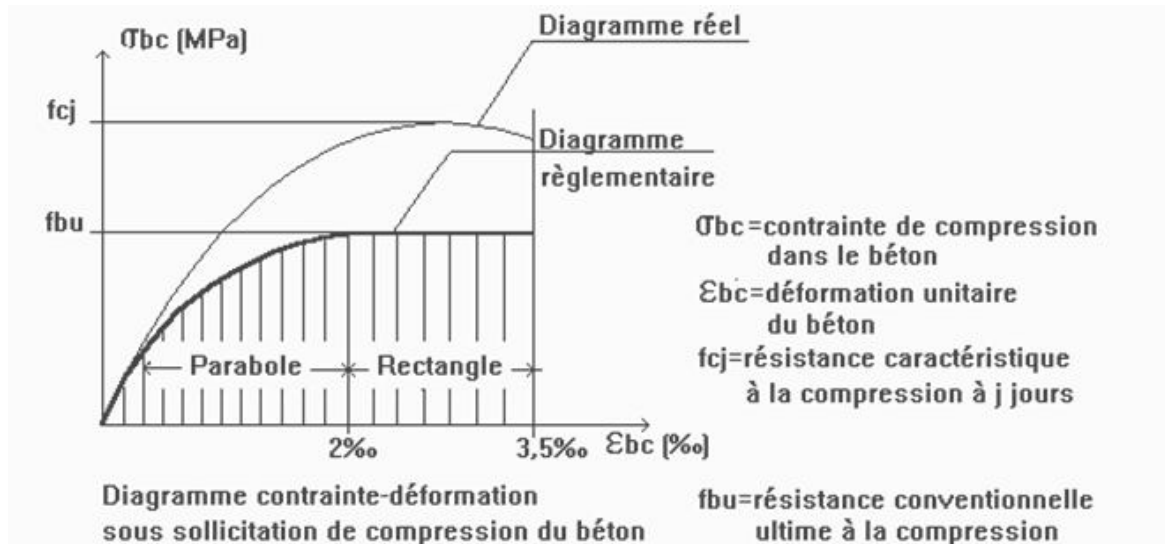


Figure I.4 : Evolution de la résistance à la compression dans le temps.

Le diagramme contraintes déformations du béton aux ELU réglementaires est le diagramme de calcul simplifié dit "PARABOLE- RECTANGLE". Le diagramme ci-dessous schématise ces dispositions.



**Figure I.5 :** Diagramme des contraintes-déformation en compression.

### I.2.2. Béton en traction

Conventionnellement, la résistance à la traction peut être calculée à partir de la résistance à la compression. La valeur moyenne de la résistance à la traction du béton se déduit de l'équation (I.1) :

$$f_t = 0,3 (f_c)^{2/3} \text{ MPa} \quad (\text{I.1})$$

La résistance à la traction s'obtient soit par essai de traction par fendage (dit essai Brésilien) soit par un essai de flexion sur éprouvette prismatique 10x10x40cm ou 7x7x28cm

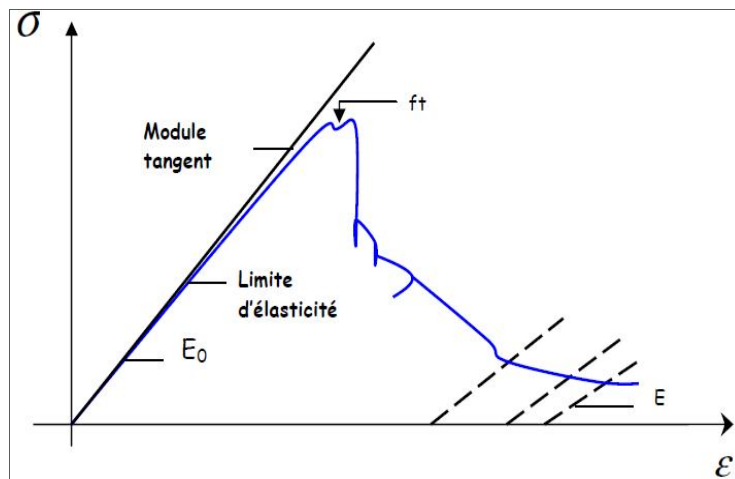
La résistance à la traction ( $f_{tj}$ ) est conventionnellement définie par le BAEL [A.2.1, 12]

$$\begin{aligned}
 &\text{Pour } f_{cj} < 60 \text{ MPa} \quad f_{tj} = 0,6 + 0,06.f_{cj} \\
 &\text{pour } f_{cj} \geq 60 \text{ MPa} \quad f_{tj} = 0,275.f_{cj}^{2/3}
 \end{aligned} \quad (\text{I.2})$$

Le comportement d'un matériau fragile en traction est élastique jusqu'à une contrainte maximale au-delà de laquelle il y a rupture et le matériau ne peut plus supporter de

sollicitations. A l'état ultime de traction, la rigidité du matériau s'annule brutalement et il y a ouverture d'une fissure.

Le béton présente une résistance en traction très faible par rapport à celle en compression. Le dépassement de cette résistance provoque l'apparition de fissures. Les essais classiques (traction directe, flexion de prismes non armés, fendage), utilisés pour la détermination de la résistance à la traction du béton, donnent généralement des résultats très dispersés et qui présentent le béton comme ayant un comportement fragile vis à vis de la traction. La figure (I.8) présente le comportement typique d'une éprouvette prismatique en béton soumise à un essai de traction directe.



**Figure I.6.** Comportement d'une éprouvette en béton en traction directe. [2]

En plus de l'essai de traction directe, on peut en déduire la valeur de la résistance du béton à la traction à partir de l'essai de traction par fendage et l'essai de traction par flexion.

a) Traction par fendage (essai brésilien) NFP 18-408

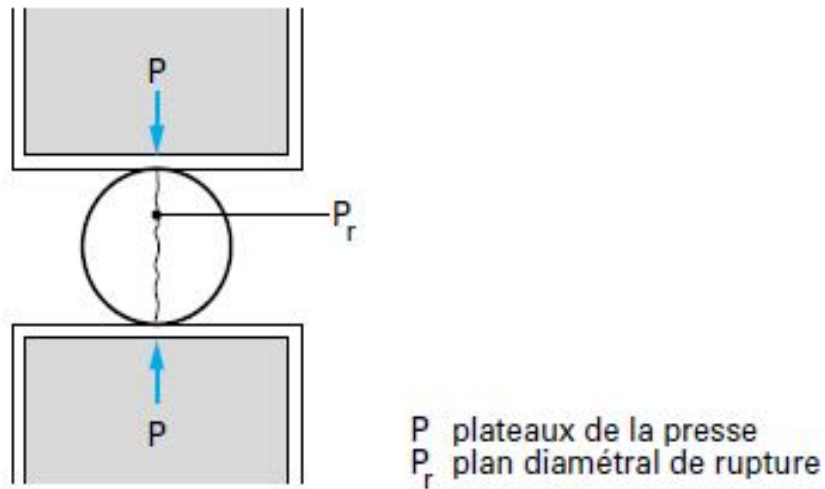


Figure I.7 : Essai de fendage sur éprouvette cylindrique.

b) Traction par flexion NFP 18-407

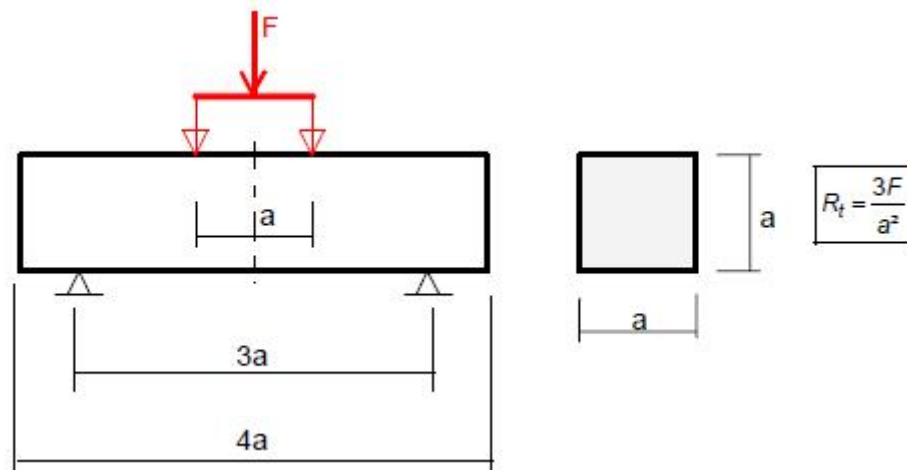
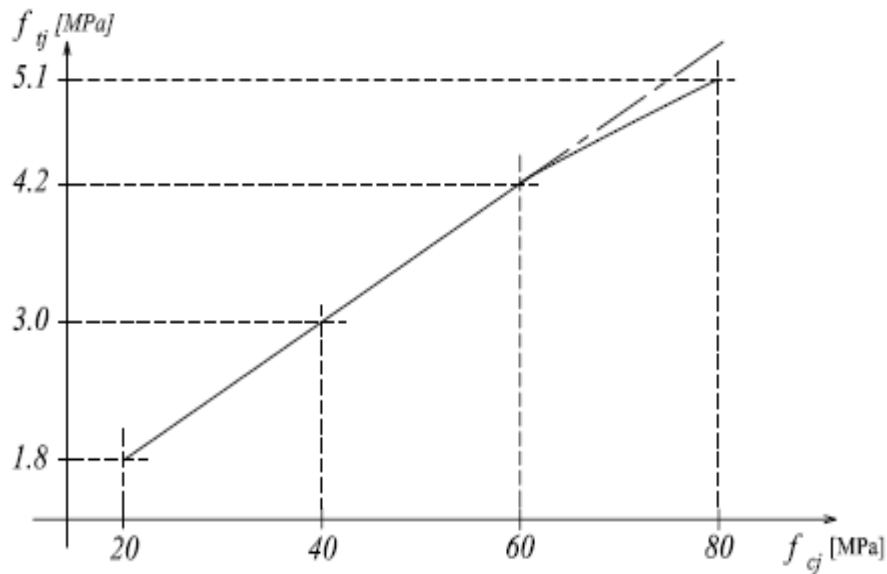


Figure I.8 : Essai de traction sur une éprouvette.

La Figure suivante illustre l'évolution de la résistance caractéristique à la traction  $f_{tj}$  en fonction de celle à la compression  $f_{cj}$ .



**Figure I.9** : Evolution de la résistance à la traction  $f_{tj}$  en fonction de celle à la compression  $f_{cj}$  .

### I.2.3. Module de déformation longitudinale

On distingue module de Young instantané  $E_{ij}$  et différé  $E_{vj}$

-Le module instantané est utilisé pour les calculs sous chargement instantané de durée inférieure à 24heures.

-Pour des chargements de longue durée (cas courant), on utilisera le module différé qui prend en compte artificiellement les déformations de fluage du béton, celles-ci représentant approximativement deux fois les déformations instantanées, Le module instantané est pris égal à trois (3) fois le module différé.  $E_{ij} = 3 E_{vj}$

Le module de Young différé du béton dépend de la résistance caractéristique à la compression du béton :

$$E_{vj} = 3700(f_{c_j})^{1/3} \dots\dots\dots \text{ si } f_{c28} \leq 60\text{MPa (Art -2.1, 2)}$$

$$E_{vj} = 4400(f_{c_j})^{1/3} \dots\dots\dots \text{ si } f_{c28} > 60\text{MPa, sans fumée de silice (Annexe F)}$$

$$E_{vj} = 6100 f_{c_j} \dots\dots\dots \text{ si } f_{c28} > 60\text{MPa, avec fumée de silice (Annexe F)}$$

### I.2.4. Module d'élasticité transversale « G »

Le module d'élasticité transversale  $G$  caractérise la déformation du matériau sous l'effet de l'effort tranchant. Il est donné par la relation suivante :

$$G = E / 2(1 + \nu) \text{ (MPa)}$$

Avec :

$E$  : Module de Young (module d'élasticité)

$\nu$  : Coefficient de poisson  $\nu = (\Delta d/d)/(\Delta l/l)$

$\Delta d/d$  : Déformation relative transversale

$\Delta l/l$  : Déformation relative longitudinale

### I.2.5. Coefficient de poisson :

Le coefficient de poisson sera pris égale à  $\nu = 0$  pour un calcul de sollicitations à L'E.L.U et

$\nu = 0,2$  pour un calcul de déformations à L'E.L.S (Art – 2.1,3).

### I.2.6. Modèle de calcul à l'E.L.U

Pour les calculs à L'E.L.U, le diagramme réel de déformations donné sur la figure

Alors on a

$$* E_{bc1} = 2‰$$

$$* E_{bc1} = \begin{cases} 3,5‰ \dots \dots \dots \text{si } f_{cj} \leq 40 \text{ MPa (Art. 4.3, 41).} \\ (4,5 - 0,025 f_{cj}) \dots \dots \text{ si } f_{cj} > 40 \text{ MPa (Art.4.3, 41).} \end{cases}$$

- La valeur de calcul de la résistance à la compression du béton  $f_{bu}$  est donnée par :

$$f_{bu} = 0,85 f_{cj} / \theta \cdot \gamma_b$$

Avec :  $\theta = 1$  pour  $t > 24 \text{ h}$

$$\theta = 0,9 \text{ pour } 1 \leq t \leq 24 \text{ h}$$

$$\theta = 0,85 \text{ pour } t < 1 \text{ h}$$

$\gamma_b$  : Coefficient de sécurité partiel

$\gamma_b = 1,5 \dots \dots \dots$  pour les cas courants (situation durable ou situation courante).

$\gamma_b = 1,15 \dots \dots \dots$  pour les cas accidentels (situation accidentelle).

-La valeur de la contrainte admissible de compression du béton est :  $\sigma_{bc} = 0,6 f_{cj} = 0,6 f_{c28}$  .

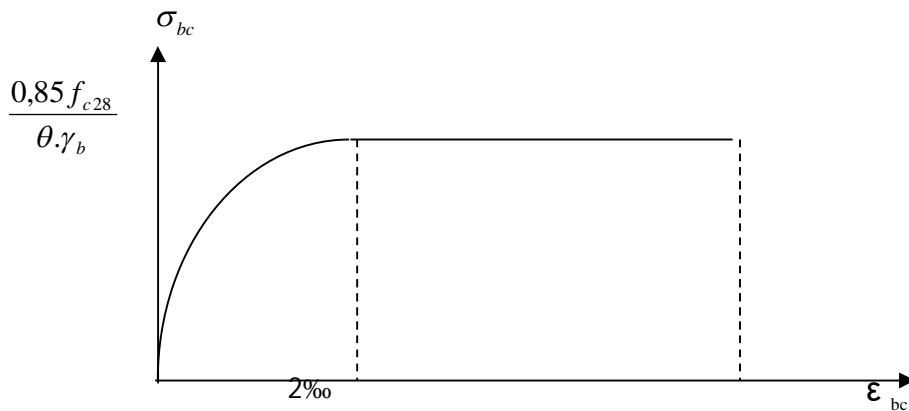


Figure I.10 : Diagramme contrainte.

### I.3. Les dalles

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

- Les dalles portant dans une direction (dalles sur deux appuis).
- Les dalles portant dans deux directions (dalles sur quatre appuis).

En fonction de leur élancement (rapport hauteur/portée), les dalles peuvent être classifiées en trois catégories : dalles minces, dalles d'épaisseur modérée et dalles épaisses. [3] [4]

**Tableau I.1.** Classification des dalles.

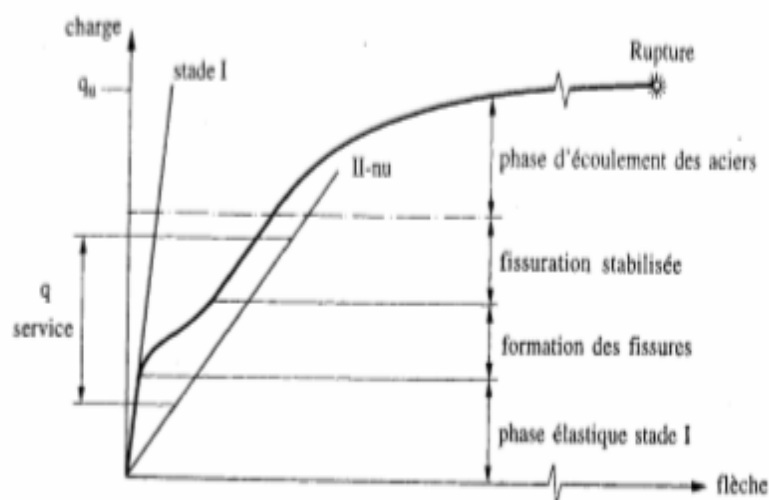
Classification des dalles			
Dalle	Mince	D'épaisseur Modérée	Epaisse
Elancement $h/l$	1/25 à 1/35	1/15 à 1/25	Inférieur à 1/15

Les dalles sont particulièrement sensibles au poinçonnement. Leur dimensionnement sous flexion ou sous poinçonnement est réalisé en utilisant des règles simplifiées, où les modèles de calcul sont des expressions de forme analytique.

Le comportement flexionnel des dalles comprend plusieurs phases :

- Phase élastique linéaire
- Phase de fissuration
- Phase d'écoulement
- Phase de rupture

Ces différentes phases de comportement sont illustrées par la figure I.11.



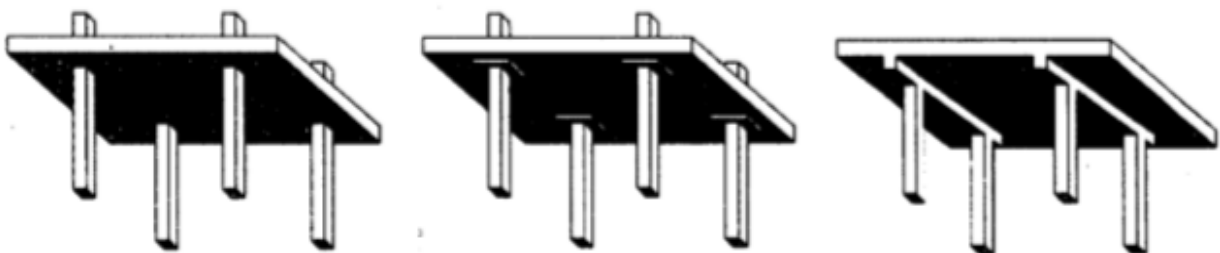
**Figure I.11** : Phases successives du comportement d'une dalle en flexion. [5]

Dans le domaine élastique, l'équation différentielle de Lagrange donne la relation entre la déformée  $w(x,y)$  et la charge appliquée  $q(x,y)$ . Selon les conditions d'appuis, on trouve différentes solutions, le plus souvent sous forme de séries de Fourier (solution de Navier pour les dalles articulées sur leurs quatre côtés, solution de Maurice Lévy pour les dalles articulées sur deux côtés opposés).

Dans le domaine post-élastique, la méthode cinématique est applicable aux dalles en partant d'un mécanisme admis a priori, c'est la théorie des lignes de rupture développées initialement par JOHANSEN [5].

#### I.4. Systèmes structuraux des dalles

Les dalles des stationnements étagés peuvent être construites selon plusieurs types d'éléments structuraux. Les différents types de dalles structurales utilisées dans les stationnements étagés. Sont illustrés par la figure I.12.

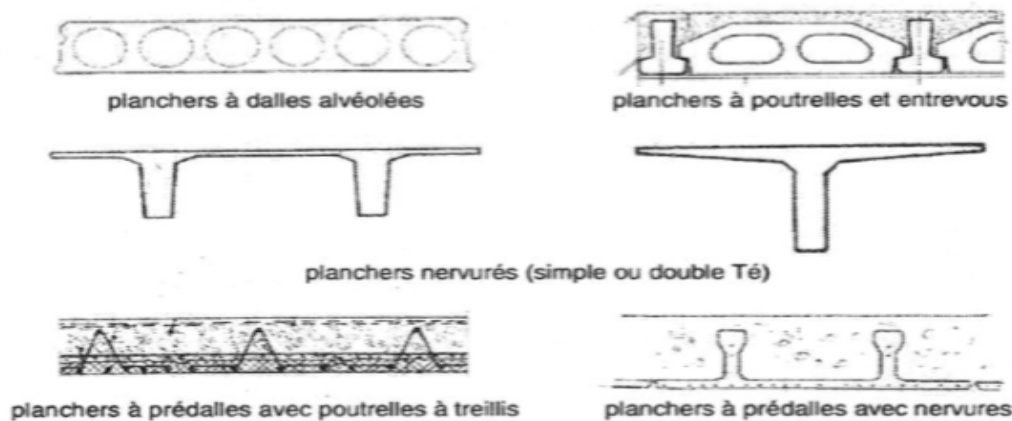


a) dalle plane bidirectionnelle sans ressaut;      b) dalle plane bidirectionnelle avec ressaut ;      c) dalle unidirectionnelle avec poutres.

**Figure.I.12** : Différents types de dalles structurales. [6]

### I.4.1. Les planchers préfabriqués en béton

Les planchers préfabriqués présentent de nombreux avantages par rapport aux planchers coulés en place, notamment en réduisant le temps de mise en œuvre et en offrant des hautes performances mécaniques. Les planchers préfabriqués sont regroupés en quatre grandes familles : les planchers en béton armé et les planchers en béton précontraint.



**Figure I.13** : Différents types d'éléments de plancher préfabriqué. [5]

Les principales exigences concernant ces éléments de planchers, en dehors de la capacité portante, sont : la résistance en flexion transversale sous charges concentrées et le comportement en diaphragme.

### I.4.2. Les planchers à poutrelles

Les poutrelles permettent de confectionner deux familles de plancher :

- Les planchers avec dalle de compression coulée en place :
  - En plancher bas on utilise des entrevous en polystyrène expansé pour des raisons d'isolation thermique.

- En plancher courant, on utilise généralement des entrevous en béton de granulats courants, voire plus rarement des entrevous en terre cuite.
- les planchers sans dalle de compression coulée en œuvre : de tels planchers sont constitués par des poutrelles et des entrevous de résistance élevée dits entrevous porteurs. [6]



**Figure. I.14 :** (a) Plancher à poutrelles et entrevous bétons sur vide sanitaire. [7]

#### **I.4.3. Les planchers à pré-dalles**

Les pré-dalles, d'épaisseur généralement comprise entre 5 et 8 cm et de 2,50 m de largeur standard, forment la partie inférieure du plancher et sont associées à du béton coulé en place afin de constituer le plancher fini.

Les planchers à pré-dalles sont principalement utilisés dans le domaine du logement collectif et des bâtiments industriels (parkings, entrepôts, ...).[8]

#### **I.4.4. Les planchers nervurés**

Ils sont constitués de poutres en T ou en double T dont la nervure généralement trapézoïdale est associée à un hourdis supérieur de 2,50 m de largeur standard. [9]

#### I.4.5. Les planchers à dalles alvéolées

Les dalles alvéolées sont généralement en béton précontraint, d'épaisseur comprise entre 12 cm et 40 cm et de largeur standard 1,20 m. Les planchers à dalles alvéolées précontraintes font l'objet d'un engouement croissant, en raison notamment de leurs bonnes performances mécaniques, de leur facilité de mise en œuvre (pas d'étaieage intermédiaire) et d'un poids propre relativement faible. [10]

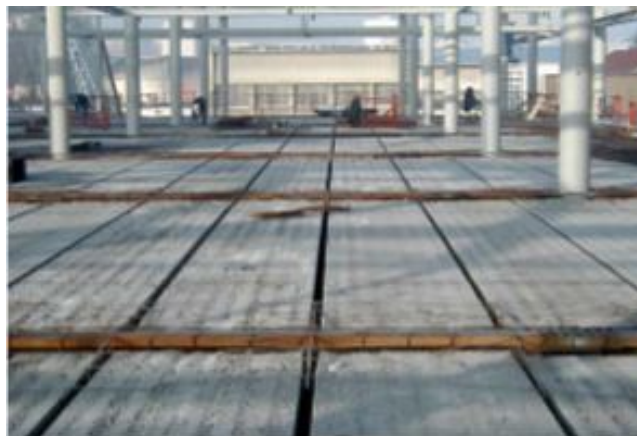


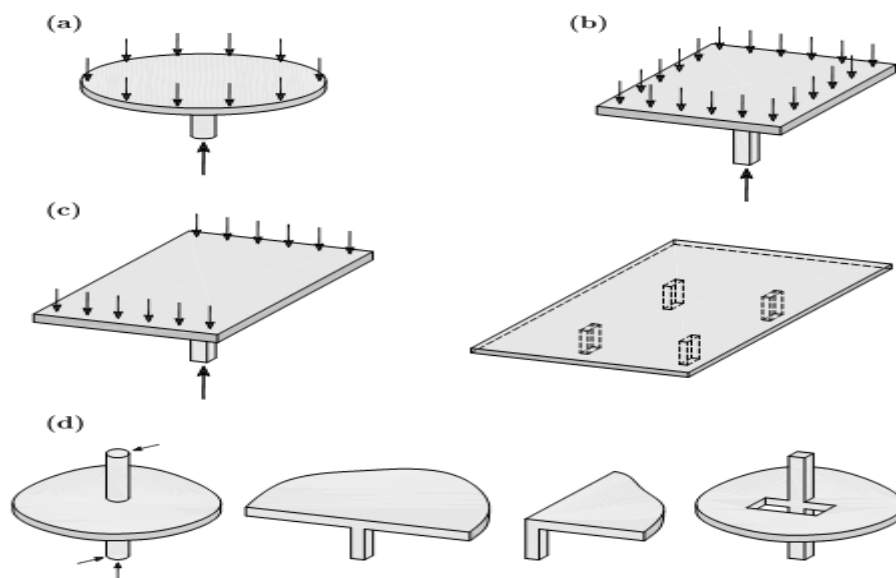
Figure I.12. (b) Plancher à dalles alvéolées. [10]

#### I.5. Poinçonnement des dalles

Le phénomène du poinçonnement des dalles en béton armé est l'un des problèmes les plus étudiés des structures en béton mais en même temps il n'est pas encore complètement compris. En général, on peut distinguer deux types de poinçonnement : le poinçonnement *symétrique* et le poinçonnement *non symétrique* ou *asymétrique*. On parle de poinçonnement symétrique si la géométrie, la charge, les conditions d'appuis et la constitution de l'élément structurel (matériau et armatures) peuvent être considérés symétriques par rapport à deux axes de symétrie. Lorsque la symétrie est relative à tous les axes radiaux, on se trouve dans le cas particulier du *poinçonnement axisymétrique*.

Si une de ces conditions vient à manquer, on rentre dans le cadre du poinçonnement non symétrique. Dans ce cas, on peut encore distinguer deux domaines différents : le poinçonnement non symétrique sans excentricité ou centré, **Fig.I.13.c** et le poinçonnement non symétrique avec excentricité ou excentré, **Fig.I.13.c** La différence entre ces deux domaines est que dans le cas du poinçonnement excentré, les conditions de non symétrie conduisent à l'apparition d'un moment flexion à transférer de la dalle à la colonne. Ce moment est appelé moment non balancé [11] ou moment d'encastrement. Le phénomène de transmission du moment entre la dalle et la colonne constitue l'un des problèmes principaux de l'étude du poinçonnement excentré.

- Par la suite, afin d'avoir une exposition plus aisée, on fera référence aux types de poinçonnement introduits préalablement avec la terminologie suivante :
- Poinçonnement symétrique en faisant référence aux cas avec double symétrie axiale.
- Poinçonnement non symétrique en faisant référence aux cas non symétriques ou avec simple symétrie axiale, mais sans excentricité.
- Poinçonnement excentré en faisant référence aux cas non symétriques avec excentricité.



**Fig.I.13:** Différents types de poinçonnement de dalles en béton armé : (a) poinçonnement axisymétrique ; (b) poinçonnement symétrique ; (c) poinçonnement non symétrique (sans excentricité) ; (d) poinçonnement excentré. [11]

### I.5.1. Rupture par poinçonnement

Le poids d'une dalle en appui sur un poteau induit des contraintes de cisaillement dans la dalle. Ces contraintes, lorsqu'elles sont suffisantes et si des renforts de ferrailage n'ont pas été prévus, peuvent entraîner le poinçonnement du poteau à travers la dalle. Similairement, ce phénomène de poinçonnement peut avoir lieu dans les semelles de fondations sur lesquelles reposent les poteaux.

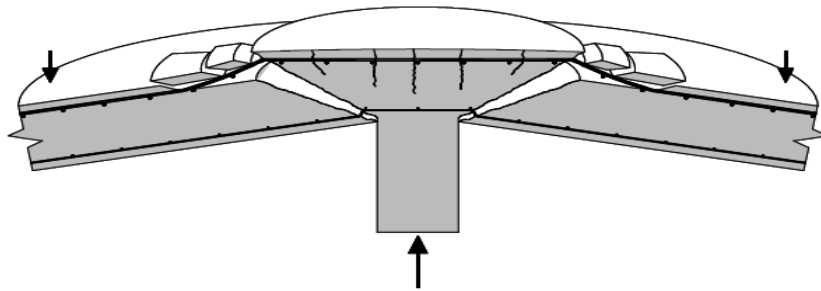


Figure 1.14 : rupture par poinçonnement d'une dalle en béton [12].

Ce mécanisme de rupture peut se rencontrer essentiellement dans les planchers-dalles et dans les semelles et radiers de fondation ou lorsqu'une grande charge est transmise à une dalle par des appuis concentrés. Le poinçonnement des dalles sans armature d'effort tranchant est un mode de rupture fragile, particulièrement indésirable, auquel il convient de prêter une grande attention lors de la conception et de l'exécution.

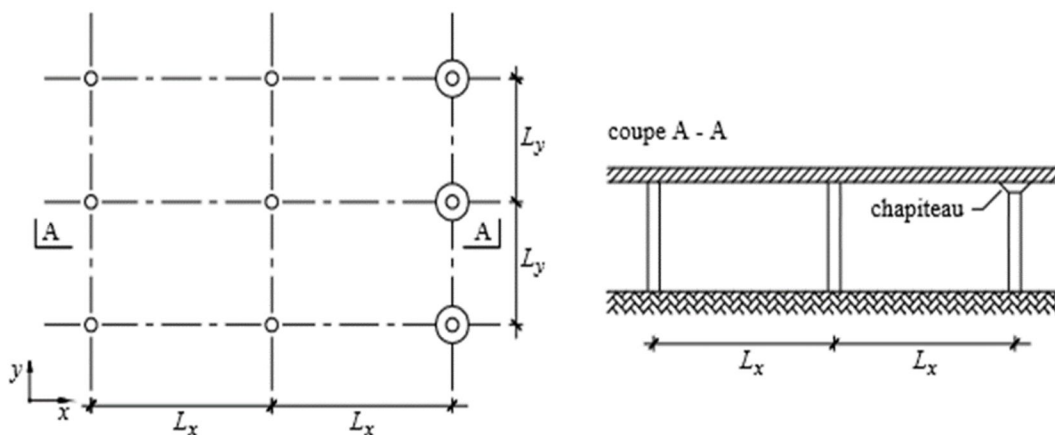
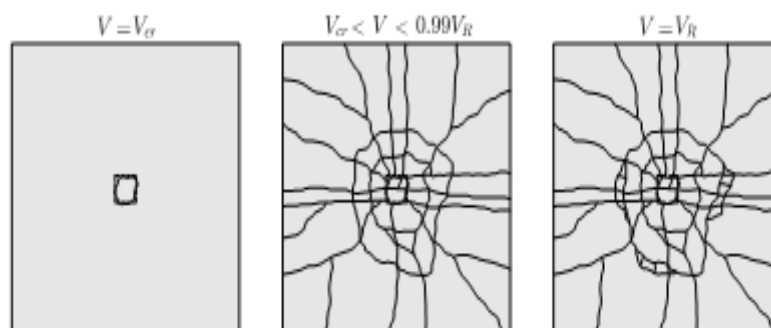


Figure I.15. Le plancher-dalle. [12]

A ce jour, les mécanismes de rupture par poinçonnement ne sont pas totalement définis et font toujours l'objet de recherches au niveau des laboratoires. Plusieurs explications sont avancées pour expliquer ces mécanismes, on parlera soit d'un épuisement de la capacité du béton en compression radiale, soit d'une rupture par traction dans le béton à la surface du cône de rupture, soit d'insuffisance de l'armature de flexion de la dalle au-dessus de la charge concentrée.

L'évolution de la fissuration de la face tendue d'une dalle d'essais sous une charge de poinçonnement symétrique depuis l'initiation de la fissure jusqu'à la rupture, est illustrée par la figure I.15. La dalle se comporte élastiquement et elle se déforme sans se fissurer jusqu'à la charge de fissuration  $V_{cr}$  pour laquelle une fissure tangentielle se forme en correspondance de la projection du périmètre de la colonne. Lorsque la charge augmente, cette fissure engendre une redistribution des efforts qui provoque la formation d'autres fissures radiales et tangentielles. A partir d'un certain niveau de charge, il n'y a plus de nouvelles fissures qui se forment et l'incrément de charge engendre l'augmentation de l'ouverture des fissures existantes. Dans cette phase, les fissures se propagent dans l'épaisseur de la dalle. En particulier, à 50–60 % de la charge de rupture, à cause de l'effort tranchant, les fissures tangentielles proches de la colonne s'inclinent en direction de la colonne même en prenant une forme conique. Pour cette raison, ces fissures inclinées sont souvent appelées fissures d'effort tranchant. La rupture se produit lorsqu'une de ces fissures tangentielles devient critique et atteint la surface inférieure comprimée au droit du périmètre de la colonne



**Figure.I.16.** Evolution de la fissuration de la face tendue d'une dalle d'essais. [12]

La non symétrie a une influence importante sur le comportement global de la dalle ainsi que sur le comportement local autour de la colonne, notamment sur la distribution de l'effort tranchant et sur la distribution de la résistance. Ceci peut être expliqué par les concepts de la théorie de la fissure critique. Les conditions de non symétrie provoquent des rotations non uniformes autour de la colonne auxquelles sont associées des ouvertures de fissures différentes. C'est pourquoi, la résistance n'est pas uniformément répartie autour du périmètre de contrôle. [13]

La théorie de la fissure critique peut être adaptée au cas non symétrique avec l'utilisation du critère de rupture en combinaison avec la courbe de comportement de la dalle qui donne la rotation maximale [14]. Ceci équivaut à considérer une dalle symétrique qui a les mêmes caractéristiques que la direction faible de la dalle non symétrique originale. Cette méthode donne, en général, une estimation conservatrice de la charge ultime et de la capacité de déformation de la dalle.

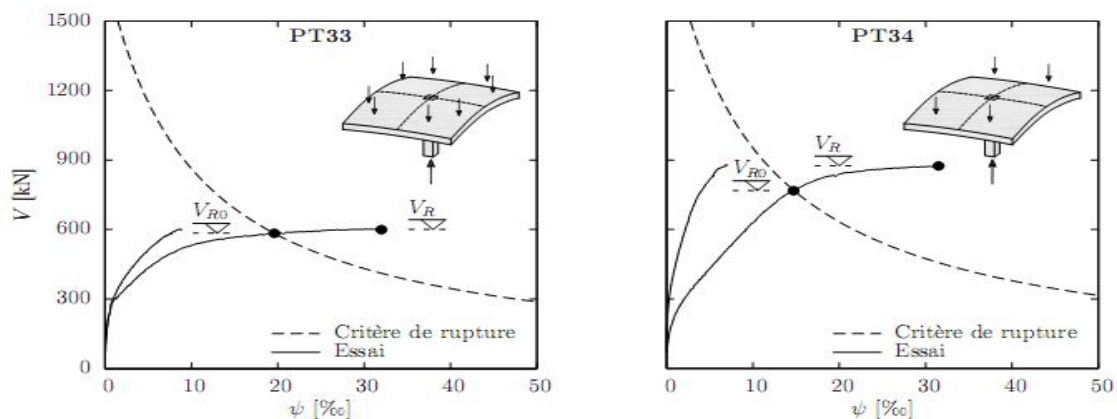


Figure.I.17. Comportement des dalles sous poinçonnement non symétrique. [15]

## I.5. 2. Comportement mécanique des dalles

### I.5. 2.1. Approche mécanique du comportement des dalles non fissurées

#### I.5.2.1.1. Approche par la théorie des plaques

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

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

$$B = \frac{E h^3}{12(1-\nu^2)}$$

$B$  : représente la rigidité flexionnelle de la dalle

$E$  = module d'Young du matériau constitutif de la dalle,

$\nu$  = coefficient de poisson,

$h$  = 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 (I) 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  $A_{m,n}$  sont donnés par la formule :

$$A_{m,n} = \frac{4}{ab} \int_0^a \int_0^b q(x, y) \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} dx dy$$

La déformée devient :

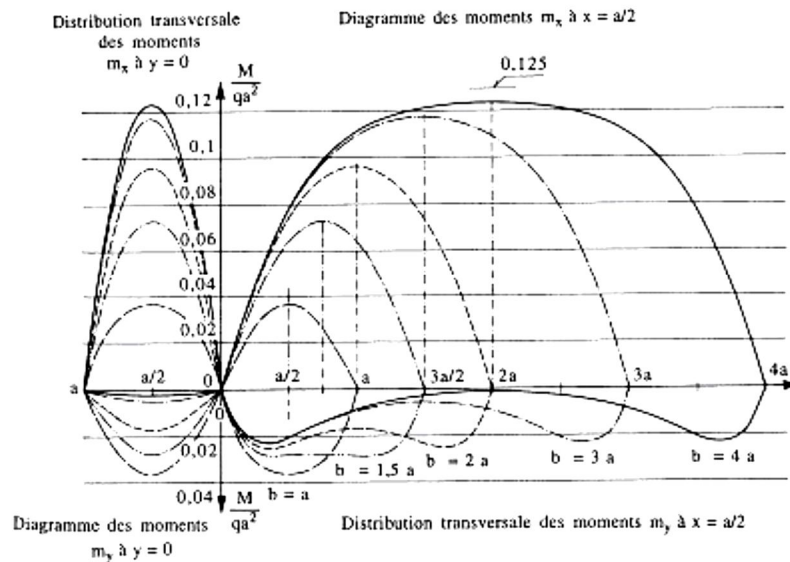
$$w(x, y) = -\frac{1}{\pi^4 B} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{A_{m,n}}{\left( \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2} \right) \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}$$

Les moments de flexion  $M_1$  et  $M_2$  sont données par les séries suivantes :

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

$$M_2 = \frac{1}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{m,n} \frac{\frac{n^2}{b^2} + \nu \frac{m^2}{a^2}}{\left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right)^{3/2}} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{m\pi y}{b}$$

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% près. La figure suivante montre la distribution des moments au milieu d'une dalle de côtés  $a$  et  $b$  pour diverses valeurs du rapport  $a/b$  [Favre R. *et al.* 1997].



**Figure I.18** : Distribution des moments dans une dalle rectangulaire pour différentes valeurs du rapport des côtés  $a/b$  et pour  $\nu=0$

**Conclusion du chapitre**

Cette recherche bibliographique sur les éléments dalles en béton, nous a permis de mettre en évidence tout l'intérêt de l'étude des dalles en béton sous un chargement vertical progressif de poinçonnement. Le mode de rupture par poinçonnement est caractérisé par une rupture fragile qui se produit sans déformation plastique. A ce jour, les mécanismes de rupture par poinçonnement ne sont pas totalement définis et font toujours l'objet de recherches au niveau des laboratoires. Plusieurs explications sont avancées pour expliquer ces mécanismes, à savoir : épuisement de la capacité du béton en compression radiale, rupture par traction dans le béton à la surface du cône de rupture, insuffisance de l'armature de flexion de la dalle au-dessus de la charge concentrée.

# **Chapitre II :**

# **Les Matériaux Composites**

## **Introduction**

Un matériau composite est un assemblage d'au moins deux constituants non miscibles dont les qualités respectives se complètent pour former un matériau aux performances globales améliorées. Le matériau ainsi constitué possède des propriétés que les éléments constitutifs seuls ne possèdent pas.

Un matériau composite structural est généralement constitué d'une phase discontinue appelée 'renfort' et d'une phase continue appelée 'matrice'. Le renfort, le plus souvent sous forme fibreuse ou filamentaire, assure l'essentiel des propriétés mécaniques. La matrice joue le rôle de liant afin de protéger le renfort de l'environnement, de le maintenir dans sa position initiale et d'assurer la transmission des efforts. Entre le renfort et la matrice, existe une zone de liaison appelée interface. Un matériau composite est la plupart du temps hétérogène et anisotrope.

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 ou phonique et, pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique [16].

Il existe aujourd'hui un grand nombre de matériaux composites que l'on classe généralement en trois familles en fonction de la nature de la matrice :

- Les composites à matrices organiques (CMO) qui constituent, de loin, les volumes les plus importants aujourd'hui à l'échelle industrielle.
- Les composites à matrices céramiques (CMC) réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme dans les domaines spatial, nucléaire et militaire.
- Les composites à matrices métalliques (CMM) intéressent les concepteurs des industries automobiles, électroniques et de loisirs pour répondre à des exigences mécaniques spécifiques.

Les composites trouvent leurs principales applications dans le transport aérien, maritime et ferroviaire, le bâtiment, l'aérospatial ainsi que les sports et loisirs, notamment grâce à leur

Bonne tenue mécanique comparable aux matériaux homogènes comme l'acier et à leur faible masse volumique [17].

Les matériaux composites utilisés en génie civil sont essentiellement des tissus en fibres de carbone, voir en fibre de verre pour certaines applications. Il reste évident que les résines adéquates doivent être utilisées pour optimiser l'emploi des fibres. Plusieurs procédés de renforcements sont apparus au cours de ces quinze dernières années. Les principaux utilisent directement les fibres sous formes de fil continu et d'autres font appel à des semi-produits plus ou moins sophistiqués, tels que les tissus secs, les tissus pré-imprégnés ou des produits pultrudés.

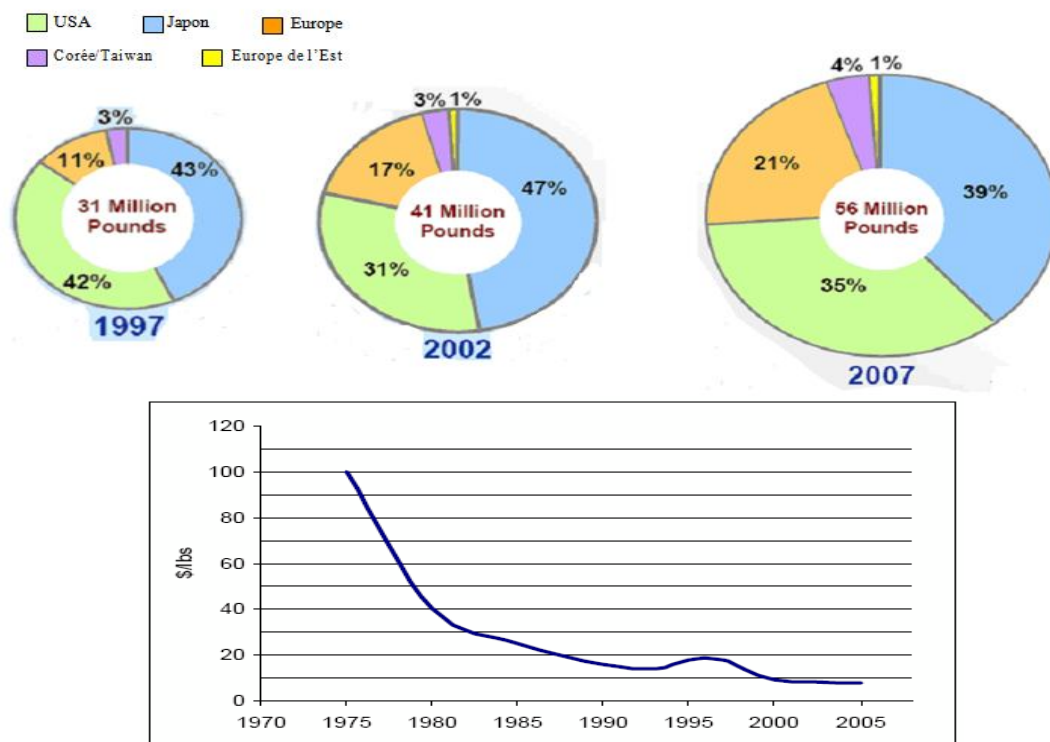


Figure II.1. Evolution de la production mondiale des composites et conséquences sur les prix. [3]

## II.1. Classification des Matériaux Composites

### II.1.1. Classification suivant la forme des constituants

Suivant la forme des constituants, on distingue les matériaux composites à particules, dans lesquels le renfort se trouve sous forme de particules. Le deuxième type de matériaux est appelé matériaux composites à fibres, dans lesquels le renfort est sous forme de fibres. Ces dernières peuvent être longues ou courtes. L'orientation (disposition) des fibres permet de donner au matériau des propriétés mécaniques selon une direction privilégiée.

### II.1.2. Classification suivant la nature des constituants

Une autre classification, basée sur la nature des constituants (matrice et renforts), peut être donnée. Suivant la nature de la matrice, on distingue les matériaux composites à matrice organique, à matrice métallique et à matrice minérale. Nous avons représenté sur l'organigramme suivant, les différents types de matrices et renforts utilisés actuellement.

**Tableau II.1:** Classification des matériaux composites

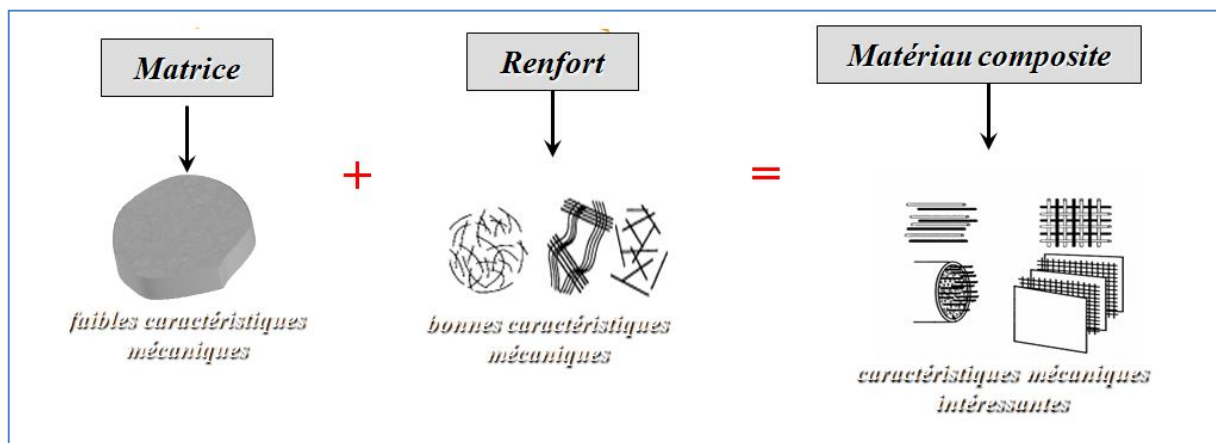
Classe	Exemple	Composantes	Applications
Composites à matrice organique	carton pneus stratifiés	cellulose caoutchouc, acier résines organiques, fibres de verre, carbone, bore etc.	emballages etc. transports structures légères
	plastiques renforcées	résines, fibres courtes	diverses
Composites à matrice minérale	béton	ciment, sable, additifs	génie civil
	composites C-C	C, fibres de C	aérospatial, aviation, sport, biomécanique
	composites céramiques	céramiques et fibres céramiques	composantes thermomécaniques
Composites à matrice métallique		Al/fibres de B Al/fibres de C	aérospatial
Alliages	aciers Alliages d'Al cuivres	C, Fe, Mn, Cr, Al, Cu, Sn etc.	diverses

Chacune de ces familles possède des propriétés différentes et pour chacune d'entre elles, différents types de renforts sont employés.

## II.2. Constituants des matériaux composites

Un matériau composite est constitué d'une :

- Ossature appelée renfort, présentant diverses architectures, qui assure la tenue mécanique,
- Protection appelée matrice, assurant la cohésion de la structure et la retransmission des efforts vers le renfort, qui est généralement une matière plastique (résine thermoplastique ou thermodurcissable).

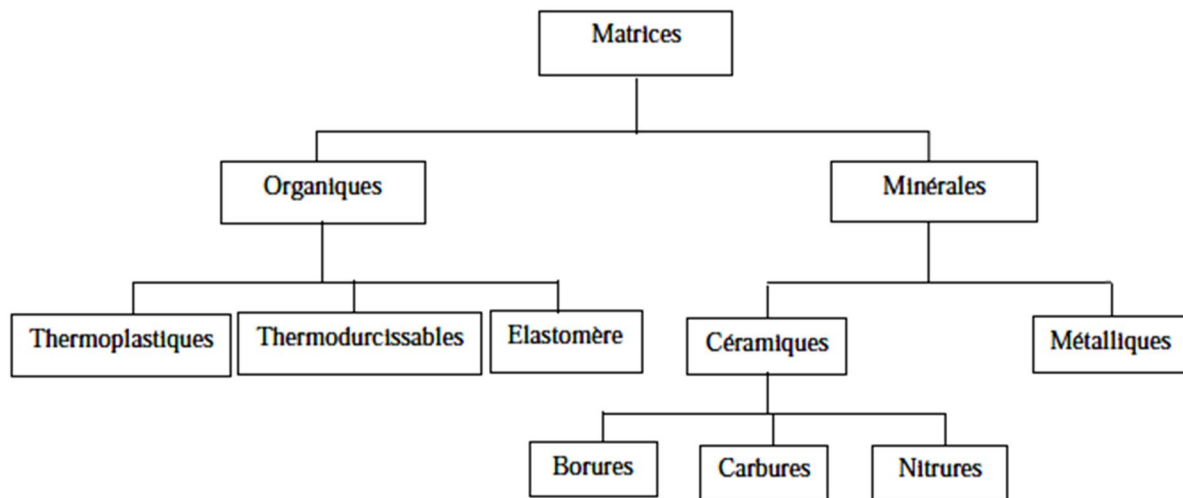


**Figure II.2:** Composition des matériaux composites

### II.2.1. Les matrices

La matrice a pour rôle de lier les fibres renforts, répartir les contraintes subies, apporter la tenue chimique de la structure et donner la forme désirée au produit. On utilise actuellement surtout des résines thermodurcissables que l'on associe à des fibres longues, mais l'emploi de polymères thermoplastiques renforcés de fibres courtes se développe fortement. Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. Les résines polymères existent en grand nombre et chacune à un domaine particulier d'utilisation. Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés. Dans le cas des matériaux en carbone des températures de 2 200°C peuvent être atteintes.

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



**Figure. II.3.** Différentes familles de matrices [18]

Les résines les plus employées dans les matériaux composites sont les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques.

### II.2.1. 1. Les résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables sont des polymères, qui, après un traitement thermique ou physico-chimique (catalyseur, durcisseur), se transforment en des produits essentiellement infusibles et insolubles. Ces résines ont donc la particularité de ne pouvoir être mises en forme qu'une seule fois. [19]

#### II.2.1.1.1. La matrice époxy

Les polymères époxy sont des résines thermodurcissables et qui réticulent de façon irréversible. Ils possèdent de bonnes propriétés mécaniques. Les polymères époxydes sont transformés à l'aide de durcisseurs et d'accélérateurs afin d'obtenir une structure macromoléculaire tridimensionnelle. [20].

En général, les polymères durcis à chaud possèdent de meilleures caractéristiques mécaniques que ceux durcis à froid.

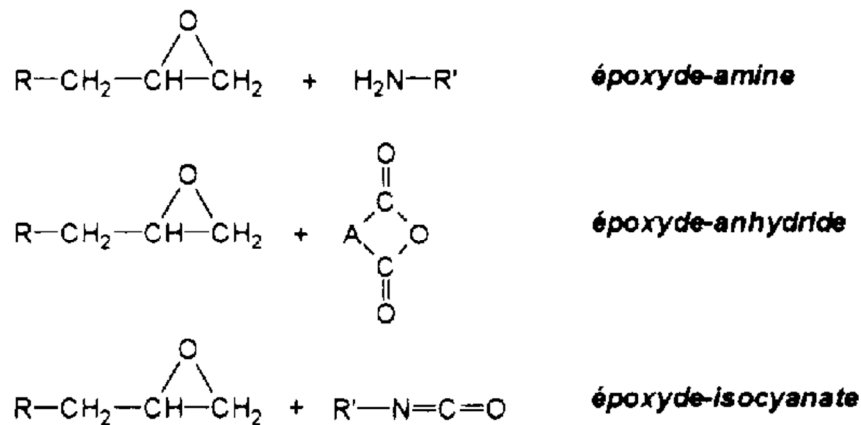


Figure II.4. Principaux durcisseurs utilisés. [7]

L'un des principaux avantages des polymères époxydes provient de la réaction de polyaddition [7]. Par définition, cette réaction se fait sans perte de matière et présente ainsi un faible retrait avec la possibilité d'obtenir, par coulée, des masses très importantes. La faible absorption d'eau et l'absence de post-retrait assurent au polymère une bonne résistance aux divers agents chimiques. Ces deux propriétés permettent d'obtenir une protection importante contre la corrosion.

Les fonctions de chacune des liaisons d'un polymère DGEBA est donnée par la Fig.II.5.

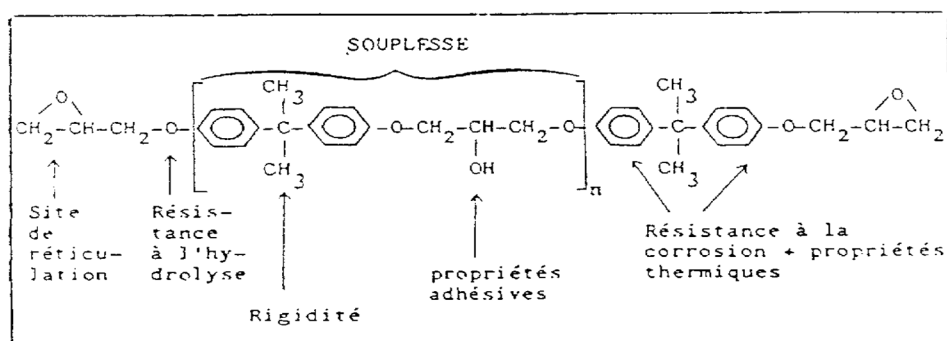
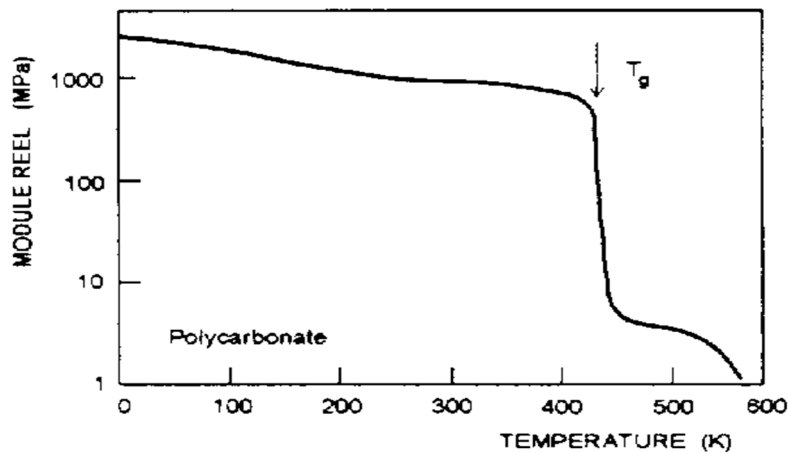


Figure II.5. Fonction des liaisons d'un polymère époxy. [7]

. Les propriétés mécaniques diminuent à l'approche de ce seuil de température : c'est la température de transition vitreuse (Fig.II.6.). Elle est de l'ordre de 30°C à 80°C pour des époxy polymérisant à froid.



**Figure II.6.** Evolution des propriétés mécaniques en fonction de la température.

Les caractéristiques mécaniques des résines époxydes sont résumées dans le tableau II.2 suivant ;

**Tableau II.2.** Caractéristiques mécaniques des résines époxydes. [21].

Résistance à la traction (MPa)	50 à 80
Module de traction (GPa)	3 à 10
Allongement à la rupture %	1 à 1.5
Résistance à la compression	140 à 150
Résistance au choc (MPa)	7 à 10 kJ/m <sup>2</sup>

### II.2.1. 2. Les résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques sont des solides généralement solubles, formés de chaînes distinctes bien compactées, liées entre elles par des seules liaisons secondaires (force de van der Waals, liaisons d'hydrogène) et mis en forme par chauffage et refroidissement. [22]

#### II.2.1. 2. 1. Les résines polyesters

Les résines polyesters insaturés sont les plus utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites grâce à un faible coût de production et à leur adaptation à des procédés de fabrication faciles à mettre en œuvre et à automatiser. Suivant leur module d'élasticité, les résines polyesters sont classées en résines souples, résines semi-rigides et résines rigides. Les résines les plus utilisées sont souvent les résines rigides. [23]

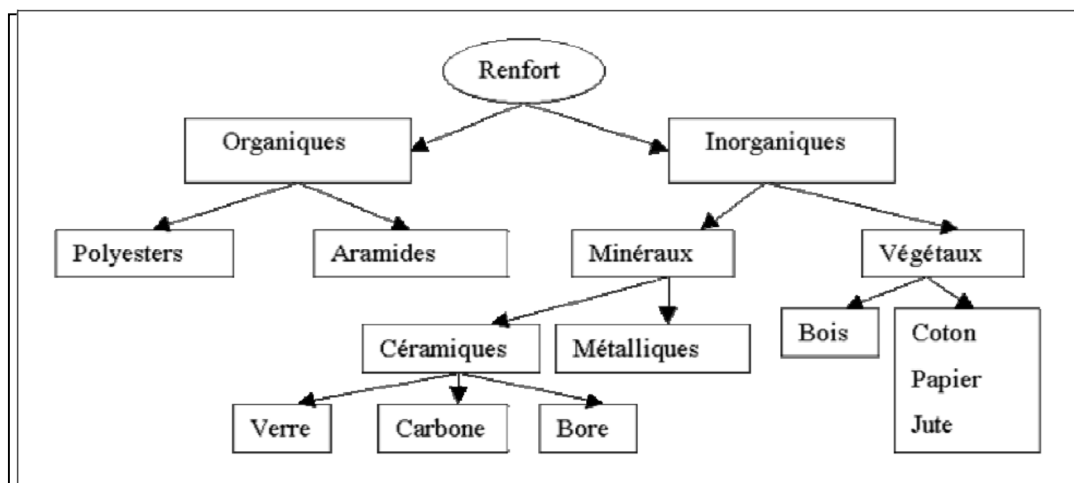
**Tableau II.3.** Propriétés mécaniques des résines polyesters.

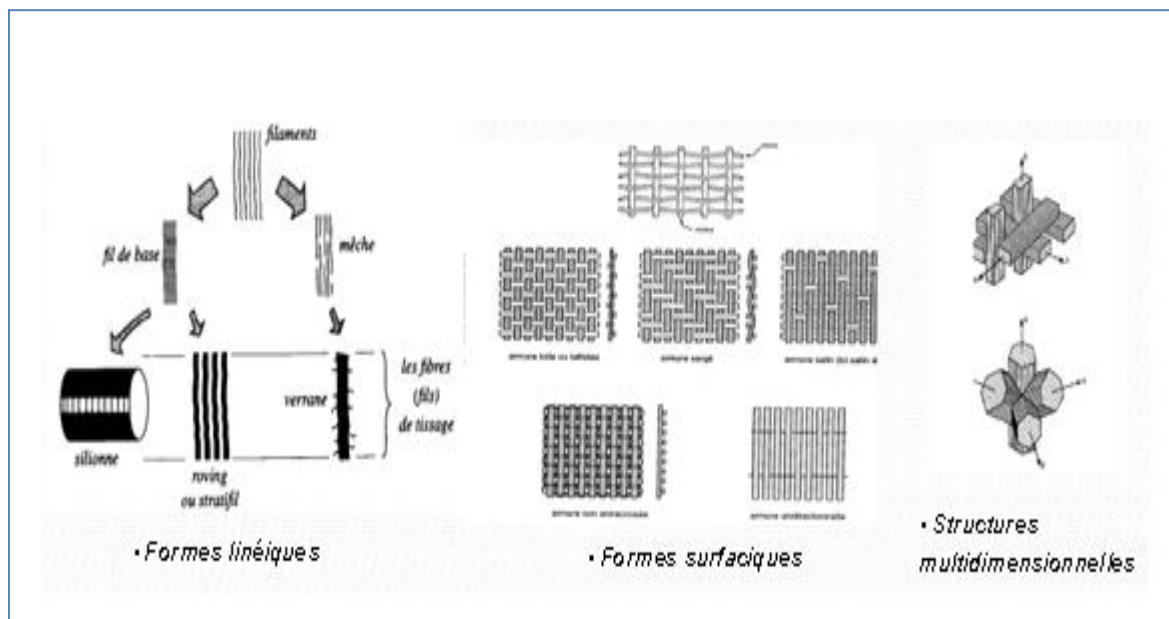
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	1200
Module d'élasticité en traction (GPa)	2.8 à 3.5
Contrainte à rupture en traction (MPa)	50 à 80 MPa
Allongement à rupture en traction (%)	2 à 5 %
Résistance au cisaillement	10 à 20 MPa

En plus des bonnes propriétés mécaniques (**Tab.II.3**), les résines polyesters ont une bonne stabilité dimensionnelle, une bonne mouillabilité des fibres, une bonne tenue chimique. Par contre, les principaux inconvénients de ces résines portent sur la sensibilité à la fissuration, la mauvaise tenue aux chocs, aux vapeurs d'eau et aux ultra-violets et ces résines présentent un fort pouvoir inflammable. L'ensemble de ces inconvénients pénalise ces résines vis-à-vis d'un emploi en génie civil, à moins d'utiliser un "gel-coat" de protection. [23]

### II.2.2. Les renforts

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite et un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus).

**Figure II.7.** Principaux matériaux de renfort.



**Figure II.8.** Principales formes des renforts.

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme filamentaire, allant de la particule de forme allongée à la fibre continue qui donne au matériau un effet de résistance orientée [24].

La fibre est constituée de plusieurs filaments élémentaires dont les diamètres varient entre 5  $\mu\text{m}$  et 25  $\mu\text{m}$ . Les lois de comportement des fibres sont de type "fragile". Il faut souligner le fait que les lois proposées correspondent à des essais sur mono-filaments et que le comportement mécanique d'une mèche de 10 à 15000 filaments peut différer de façon significative dans la mesure où la probabilité de rupture des fils élémentaires joue un rôle important.

Le Tableau II.4 récapitule les principales propriétés des fibres et le graphe de la Figure II.9 compare la résistance en traction de différents types de fibres.

Les structures composites sont anisotropes. La plupart des renforts travaillent bien en traction, mais offrent des performances médiocres en compression et en cisaillement. Il est donc impératif de jouer sur la texture et la géométrie des renforts pour créer une architecture adaptée.

Tableau II.4. Propriétés des fibres.

Filament	Diam. ( $\mu$ )	Densité	Traction (MPa)	Module (MPa)	Allon. (%)	Fusion (°C)
Verre E	3-30	2.54	3400	73000	4.5	850
Verre D	3-30	2.14	2500	55000	4.5	-
Verre R	3-30	2.48	4400	86000	5.2	990
Carbone HR	8	1.78	3500	200000	1	2500
Carbone HM	8	1.8	2200	400000	0.5	2500
Aramide HR	12	1.45	3100	70000	4	480
Aramide HM	12	1.45	3100	130000	2	480

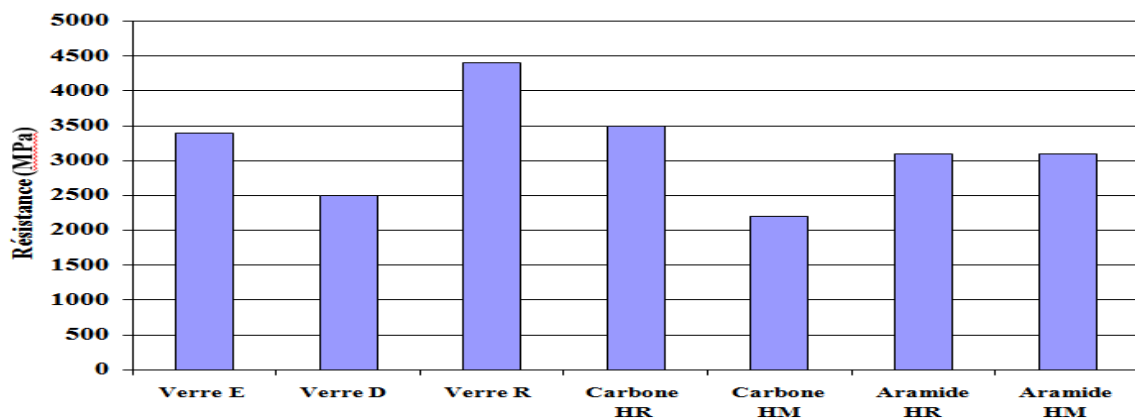
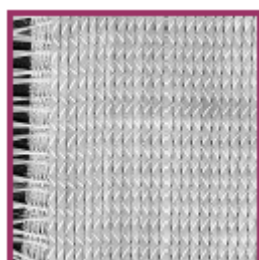
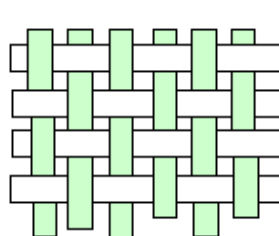


Figure J.III.9. Histogramme des propriétés en traction des fibres.

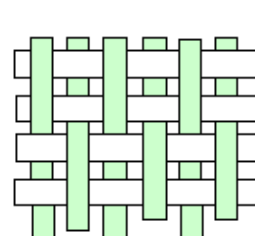
Il existe différentes géométries et textures de renforts : Les unidirectionnels (1D), Toile ou taffetas, Serge, et Satin



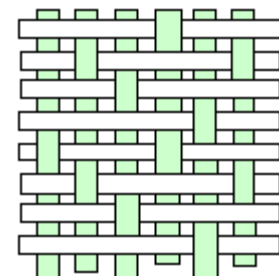
Les unidirectionnels



Toile ou taffetas



Serge



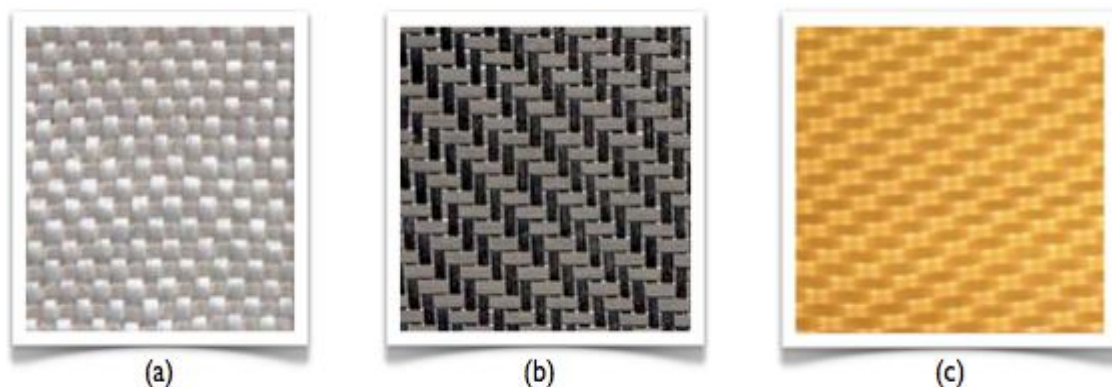
Satin

Figure II.10. Géométries des renforts [25]

Différentes fibres peuvent être employées avec ces matrices. Les plus courantes sont :

- Les fibres de verre, peu coûteuses et ultra-répandues (95% des renforts !), utilisées dans pratiquement toutes les applications "grande diffusion" et certaines applications "hautes performances" ;
- Les fibres de carbone, plus onéreuses mais très performantes d'un point de vue mécanique, utilisées notamment en aéronautique, en construction industrielle et dans les sports et loisirs ;
- Les fibres d'aramide (Kevlar) ou de polypropylène, plus résistantes aux chocs et plus tenaces que le carbone, d'où leur utilisation, entre autres, dans les gilets pare-balles et autres protections balistiques ;
- Les fibres végétales comme le chanvre ou le lin, assez peu coûteuses et renouvelables, qui commencent à faire leur apparition sur certaines pièces peu sollicitées mécaniquement.

Certains composites d'entrée de gamme, plus anciens, emploient des fibres de papier ou de coton ; les matériaux obtenus, généralement appelés micarta sont de bons isolants thermiques et électriques.



**Figure II.11.** Exemples de tissus de renforts utilisés pour les CMO haute performance : (a) verre, (b) carbone, (c) aramide (Kevlar).

### II.2.3. Charges et additifs

Enfin, des charges et additifs sont ajoutés au composite afin de lui conférer de nouvelles propriétés et, ainsi, de lui permettre de remplir davantage de fonctions techniques. De manière

générale, les charges et additifs jouent un rôle essentiel dans l'obtention des propriétés des polymères, qu'ils soient utilisés seuls ou comme matrices de composites ; il en existe de très nombreux types.

Les charges sont des particules solides que l'on disperse au sein de la matrice. Elles peuvent être minérales, organiques (végétales ou synthétiques) ou métalliques, et s'utilisent de la même façon que dans les plastiques "traditionnels". On peut par exemple rencontrer :

- Des micro-billes de verre creuses, ajoutées en plus des renforts principaux, qui améliorent la tenue en compression tout en allégeant la matrice ;
- Du noir de carbone utilisé à la fois comme pigment noir, comme barrière anti-UV et comme antioxydant ;
- Des particules de silice pour rendre la matrice plus isolante (thermiquement, électriquement et acoustiquement), diminuer son retrait au moulage... ;
- Des poudres ou paillettes métalliques pour rendre la matrice conductrice de l'électricité et de la chaleur, pour améliorer son usinabilité, sa résistance aux chocs ou à l'abrasion... ;
- Des billes thermoplastiques ajoutées dans les matrices thermodurcissables, pour améliorer leur ductilité et donc leur résistance à la fissuration... ;



**Figure II.12.** Exemples de charges utilisées dans les CMO : (a) micro-billes de verre, (b) noir de carbone, (c) silice.

Les additifs possibles sont encore plus nombreux. Une classe d'additifs que l'on rencontre systématiquement est celle des agents d'interface, que l'on dépose sur les fibres pour les faire adhérer à la matrice. On rencontre également :

Des stabilisants, qui retardent les dégradations dues à l'oxygène, aux UV ou encore à l'ozone ;

Des ignifugeants ou retardateurs de flamme (la plupart des polymères sont inflammables !) ;

Des agents de démoulage ; des colorants...

### **II.3. Mécanisme de rupture et endommagement des matériaux composites**

Par mécanisme de rupture, il faut comprendre tout processus mécanique produisant au sein d'un matériau une « discontinuité » locale de matière appelée fissure. L'initiation de la rupture peut être considérée comme la création de micro -fissures à l'échelle microscopique (celle des constituants) à partir d'un défaut c'est la microfissuration. La propagation de la rupture est le résultat de la création de nouvelles surfaces de rupture à l'échelle macroscopique à partir des microfissures existantes c'est la macro fissuration. Dans le cas des matériaux composites l'amorce de la fissure se produit généralement bien avant le changement du comportement macroscopique.

#### **II.3.1. Différents mécanismes de rupture dans un composite unidirectionnel**

La rupture finale d'un composite unidirectionnel est le résultat de 'l'accumulation de divers mécanismes élémentaires :

- Rupture des fibres
- Rupture transverse de la matrice
- Rupture longitudinale de la matrice
- Rupture de l'interface fibre-matrice

#### **Remarques**

- Les mécanismes ne sont pas isolés car il y a toujours une coexistence entre eux, ils se développent suivant la nature des matériaux et des conditions de sollicitations externes.
- Il existe plusieurs critères de rupture des matériaux orthotropes le plus couramment utilisé dans le calcul de pré dimensionnement est le critère de « Hill-Tsai » par

analogie au critère de « Von-Mises » appliqué pour les matériaux isotropes dans le domaine élastique.

- La fissuration transverse est obtenue quand la contrainte en traction  $\sigma_m$  dans la matrice atteint la contrainte à la rupture  $\sigma_{mu}$  de la matrice.
- Par fissuration longitudinale lorsque la contrainte de cisaillement  $\tau_m$  dans la matrice atteint la contrainte en cisaillement à la rupture  $\tau_{mu}$ , généralement au voisinage d'une fibre.
- La rupture par décohésion de l'interface fibre-matrice se produit quand  $\tau_d < \tau_{mu}$ .

### II.3.2. Composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale

Dans le cas d'un composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale, l'initiation de la rupture se produit généralement soit par rupture des fibres lorsque la déformation à la rupture des fibres est plus faible que celle de la matrice ( $\epsilon_{fu} < \epsilon_{mu}$ ), soit par rupture transverse de la matrice dans les cas contraires. Dans le cas où  $\epsilon_{fu} < \epsilon_{mu}$  les courbes contrainte déformation sont représentées sur la figure ci-dessous, en admettant l'égalité des déformations dans les fibres et dans la matrice on peut écrire :

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} V_f + (\sigma_m)_{\epsilon_{fu}} (1 - V_f),$$

Avec :  $\sigma_{cu}$  : contrainte à la rupture du composite

$(\sigma_m)_{\epsilon_{fu}}$  : contrainte dans la matrice pour une déformation égale à la déformation  $\epsilon_{fu}$  à la rupture des fibres.

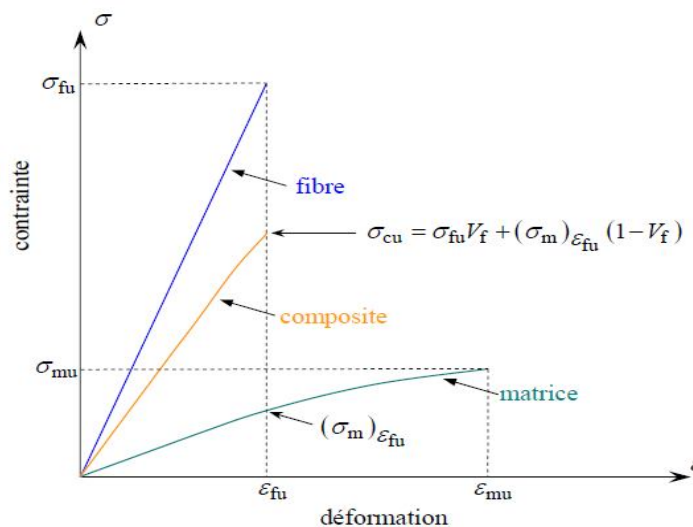


Figure II.13. Courbe contrainte-déformation dans le cas  $\epsilon_{fu} < \epsilon_{mu}$  .

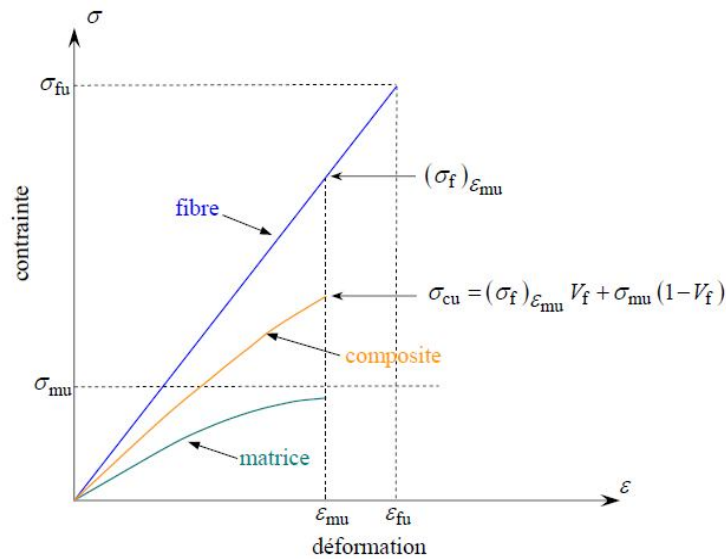


Figure II.14.

Figure II.14. Courbe contrainte-déformation dans le cas  $\epsilon_{fu} > \epsilon_{mu}$ .

Les performances à la rupture des composites tels que les fibres de carbone sont conditionnées par les propriétés des fibres.

Pour les fibres de verre, les performances sont limitées par une déformabilité trop faible de la matrice.

Les performances à la rupture des composites sont obtenus par une bonne optimisation des propriétés des constituants.

### II.3.3. Composite unidirectionnel soumis à une traction transverse

Dans le cas d'un composite unidirectionnel soumis à une traction transverse, la rupture se produit soit par rupture de la matrice, soit par décohésion de l'interface fibre-matrice, suivant les caractéristiques à la rupture de la matrice et de l'interface. La rupture de la matrice se produit lorsque la contrainte en traction  $\sigma_m$  dans la matrice atteint la contrainte à la rupture  $\sigma_{mu}$  de la matrice. Ce processus intervient lorsque la contrainte à la rupture de la matrice est inférieure à la contrainte de décohésion  $\sigma_d$  en traction de l'interface fibre-matrice. Dans le cas contraire où  $\sigma_{mu} > \sigma_d$ , la rupture du composite se produit par rupture de l'interface fibre-matrice. Après initiation, la rupture se propage dans le matériau composite suivant plus ou moins plane, dépendant des caractéristiques du matériau.

## II.4. Critères de rupture

L'objectif essentiel des critères de rupture est l'évaluation de la résistance mécanique développée par les matériaux, elle correspond à une dégradation irréversible obtenue soit par rupture réelle du matériau soit à la limite du domaine élastique (micro rupture dans la matrice, rupture des fibres, décohésion fibres-matrice...). On distingue :

- Les critères en contraintes maximales,
- Les critères en déformations maximales,
- Les critères interactifs (critères énergétiques).

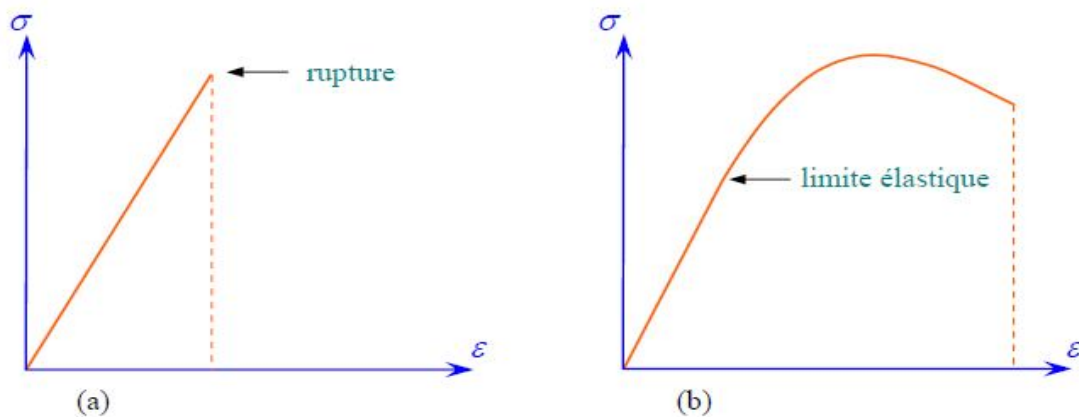


Figure II.15. Comportement (a) fragile (b) ductile d'un matériau.

### II.4.1. Critères en contraintes maximales II.4.1.1. Critères dans les axes principaux

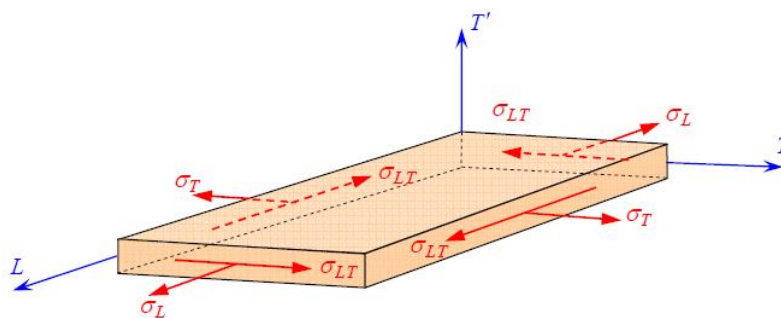


Figure II.16. Contrainte dans les axes des matériaux d'une couche.

$\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  : Contraintes à la rupture suivant l'axe longitudinal respectivement en traction et en compression.

$Y_t, Y_c$  : Contrainte à la rupture suivant l'axe transversal respectivement en traction et en compression.

$S$  : Contrainte à la rupture en cisaillement dans le plan de la couche.

Si la couche est soumise à un état de contrainte plan (  $\sigma_L, \sigma_T, \sigma_{LT}$  ), le critère de la contrainte maximale s'écrit :

$$-X_c < \sigma_L < X_t,$$

$$-Y_c < \sigma_T < Y_t,$$

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

Si les inéquations sont vérifiées alors l'état des contraintes limite n'est pas atteint

Si une inégalité quelconque n'est pas vérifiée, il y a rupture suivant le mécanisme correspondant.

## II.4.2. Critères en déformations maximales

### II.4.2.1. Critères dans les axes principaux

Ce critère est similaire à celui de la contrainte maximale, ils font intervenir :

$X_{et}, X_{ec}$  : Déformation à la rupture suivant l'axe longitudinal respectivement en traction et en compression.

$Y_{et}, Y_{ec}$  : Déformation à la rupture suivant l'axe transversal respectivement en traction et en compression.

$S_\varepsilon$  : Déformation à la rupture en cisaillement dans le plan de la couche.

Les critères en déformation maximales s'écrivent sous la forme :

$$-X_{ec} < \varepsilon_L < X_{et},$$

$$-Y_{ec} < \varepsilon_T < Y_{et},$$

$$-S_\varepsilon < \gamma_{LT} < S_\varepsilon.$$

### II.4.3. Critères interactif

Sont aussi appelés critères énergétique car le critère de Von-Mises, utilisé pour les matériaux isotropes, est relié à l'énergie de déformation emmagasinée par unité de volume du matériau déformé. N'oublions pas de signaler que les critères cités précédemment ne permettent pas prendre l'interaction entre les contraintes ou déformation dans les axes des matériaux.

### II.4.3.1. Critère de Hill

Ce critère est utilisé pour définir le domaine d'élasticité d'un matériau orthotrope, il suppose que la rupture est atteinte quand cette égalité est vérifiée :

$$F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{12}^2 + 2M\sigma_{13}^2 + 2N\sigma_{23}^2 \leq 1$$

On suppose la base d'orthotropie  $(\vec{N}_1, \vec{N}_2, \vec{N}_3)$  connue. Pour identifier ce critère, il faut réaliser suivant les axes d'orthotropie, trois expériences de traction et trois expériences de cisaillement qui permettent d'écrire les relations suivantes :

– trois essais de traction :

$$F + G = \frac{1}{\sigma_{11}^e{}^2}, F + H = \frac{1}{\sigma_{22}^e{}^2} \text{ et } F + G = \frac{1}{\sigma_{33}^e{}^2}$$

– trois essais de cisaillement :

$$2L = \frac{1}{\sigma_{12}^e{}^2}, 2M = \frac{1}{\sigma_{13}^e{}^2} \text{ et } 2N = \frac{1}{\sigma_{23}^e{}^2}$$

Il suffit d'exploiter les essais pour identifier les six paramètres du critère F, G, H, L, M, N en fonction des limites d'élasticité du matériau considéré. Il faut noter que lorsque  $F=G=H=L=M=N$ , le critère de Hill correspond à celui de Mises. Le critère s'écrit sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\sigma_{11}}{\sigma_{11}^e} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{22}}{\sigma_{22}^e} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{33}}{\sigma_{33}^e} \right)^2 - \left( \frac{1}{\sigma_{11}^e{}^2} + \frac{1}{\sigma_{22}^e{}^2} - \frac{1}{\sigma_{33}^e{}^2} \right) \sigma_{11}\sigma_{22} \\ & - \left( \frac{1}{\sigma_{11}^e{}^2} - \frac{1}{\sigma_{22}^e{}^2} + \frac{1}{\sigma_{33}^e{}^2} \right) \sigma_{11}\sigma_{33} - \left( -\frac{1}{\sigma_{11}^e{}^2} + \frac{1}{\sigma_{22}^e{}^2} + \frac{1}{\sigma_{33}^e{}^2} \right) \sigma_{22}\sigma_{33} \\ & \left( \frac{\sigma_{12}}{\sigma_{12}^e} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{13}}{\sigma_{13}^e} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{23}}{\sigma_{23}^e} \right)^2 = 1 \end{aligned}$$

Où les caractéristiques injectées dans le critère sont les limites élastiques. D'un point de vue conception, lors du dimensionnement des structures, les valeurs limites dans le critère sont généralement les contraintes enregistrées à rupture. En contraintes planes dans le plan  $(N_1, N_2)$ , ce critère se réduit à :

$$\left( \frac{\sigma_{11}}{\sigma_{11}^e} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{22}}{\sigma_{22}^e} \right)^2 - \left( \frac{1}{\sigma_{11}^e{}^2} + \frac{1}{\sigma_{22}^e{}^2} - \frac{1}{\sigma_{33}^e{}^2} \right) \sigma_{11}\sigma_{22} + \left( \frac{\sigma_{12}}{\sigma_{12}^e} \right)^2 = 1$$

### II.4.3.2. Critère de Tsai-Hill

Le critère proposé par Tsai-Hill correspond au critère de Hill écrit en contrainte plane dans le cas d'un matériau isotrope transverse. Ce critère ne tient pas compte des différences de comportement en traction et en compression. Dans la base d'orthotrope connue, le critère s'écrit :

$$F(\sigma_{22})^2 + G(\sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{12}^2 \leq 1$$

Le critère est classiquement utilisé sous la forme :

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma_{11}^e}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{22}}{\sigma_{22}^e}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{11}\sigma_{22}}{\sigma_{11}^e \sigma_{22}^e}\right) + \left(\frac{\sigma_{12}}{\sigma_{12}^e}\right)^2 = 1$$

### II.4.3.3. Critère de O. Hoffman

Une généralisation du critère de Hill-Tsai, tenant compte de la différence du comportement des matériaux en traction et compression a été formulé par Hoffman.

Il est utilisé pour définir le domaine d'élasticité d'un matériau orthotrope en tenant compte des limites en compression :

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

Les constantes  $C_1$  à  $C_9$  sont des caractéristiques du matériau et reliées aux contraintes à la rupture du matériau par les relations :

$$C_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{Y_t Y_c} + \frac{1}{Z_t Z_c} - \frac{1}{X_t X_c} \right), \\ C_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{Z_t Z_c} + \frac{1}{X_t X_c} - \frac{1}{Y_t Y_c} \right), \\ C_3 = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{X_t X_c} + \frac{1}{Y_t Y_c} - \frac{1}{Z_t Z_c} \right), \\ C_4 = \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c}, \quad C_7 = \frac{1}{S_{TT'}^2}, \\ C_5 = \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c}, \quad C_8 = \frac{1}{S_{LT'}^2}, \\ C_6 = \frac{1}{Z_t} - \frac{1}{Z_c}, \quad C_9 = \frac{1}{S_{LT}^2}.$$

Pour identifier ce critère, il faut réaliser suivant les axes d'orthotropie, trois expériences de traction, trois expériences de compression et trois expériences de cisaillement.

Ce critère se réduit dans un état de contraintes planes à l'expression suivante :

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

#### II.4.3.4. Critère de Tsai-Wu

Les critères précédents suffisent généralement pour décrire les divers résultats expérimentaux observés. Toutefois, une des façons d'améliorer la corrélation entre les résultats expérimentaux et théoriques est d'accroître le nombre des paramètres des équations théoriques. On admettra que la rupture d'un matériau anisotrope est atteinte lorsque l'égalité suivante est vérifiée :

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1, \quad i, j = 1, 2, \dots, 6,$$

Les constantes  $F_{ij}$  et  $F_i$  sont les composantes des deux tenseurs respectivement de rang 2 et 4. La notation contractée usuelle est utilisée dans cette relation pour les contraintes rapportées aux axes principaux :

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_{11} = \sigma_L, & \sigma_2 &= \sigma_{22} = \sigma_T, & \sigma_3 &= \sigma_{33} = \sigma_{T'}, \\ \sigma_4 &= \sigma_{23} = \sigma_{TT'}, & \sigma_5 &= \sigma_{13} = \sigma_{LT'}, & \sigma_6 &= \sigma_{12} = \sigma_{LT}. \end{aligned}$$

Ce critère généralise le critère de Von Mises pour les matériaux orthotropes. Le critère de Tsai-Wu s'intéresse à l'apparition de la première fissure dans le pli.

## II.5. Application en Génie civil

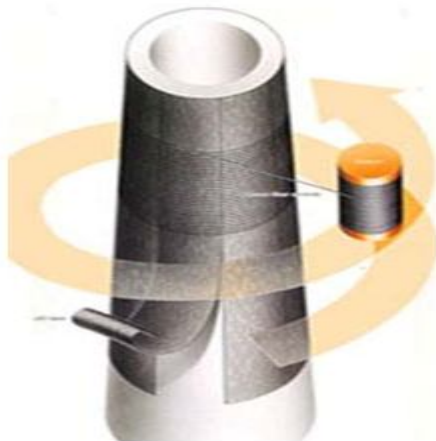
L'introduction des matériaux composites dans le génie civil s'inscrit dans les nouvelles technologies les plus employées pour le renforcement ou la réparation des structures nouvellement construites ou ayant déjà servies et d'améliorer leurs comportements mécaniques. En effet les techniques de renforcement et le choix des matériaux qui répondent mieux aux sollicitations auxquelles les structures en question seront soumises, sont des atouts très importants pour une bonne conception (résistance, durabilité, économie, ...).

### II.5. 1. Exemple de renforcement des structures par des composites

#### II.5.1.1. Enroulement filamentaire

La fibre est produite sous forme de fibres continues de très grande longueur. Elle est

déposée et enroulée régulièrement autour d'un mandrin. La longueur de fibres continues peut varier de 600 m à 5 km (soit 0,8 g au mètre linéaire). Pour renforcer directement une structure à partir d'une bobine de fibre de carbone, il est nécessaire de pouvoir tourner autour. Ce procédé de renforcement est donc naturellement limité aux colonnes ou aux pylônes (**Fig.II.17. a**). Le principal avantage de ce procédé est l'automatisation complète du système de pose (**Fig.II.17. b**). Son principal inconvénient est le fait qu'une pose manuelle est nécessaire pour renforcer les extrémités des piles et des colonnes et que cette méthode demande en outre du temps et des manipulations importantes pour installer le matériel. Cette méthode a surtout été développée au Japon, et elle est aujourd'hui utilisée au Japon et en Amérique du Nord.



(a)



(b)

**Figure II.17.** Renforcement par fibres sèches. a) principe de l'enroulement filamentaire, b) enroulement automatisé. [26]

### II.5.1.2. Stratification directe de tissus secs

Le renforcement de structures à partir d'un tissu sec se fait directement par la pose de ce dernier sur une couche de résine qui recouvre l'élément à renforcer et qui sert de liant. Après marouflage, une couche de résine de fermeture permet de parfaire l'imprégnation. Les pressions nécessaires appliquées pour cette méthode de renforcement sont faibles par rapport à d'autres méthodes de renforcement. Le principal avantage du renforcement par tissus secs est la manipulation très facile sur chantier avec une absence totale de matériel lourd à déplacer. Cette technique permet notamment un suivi parfait de la forme du support ainsi que

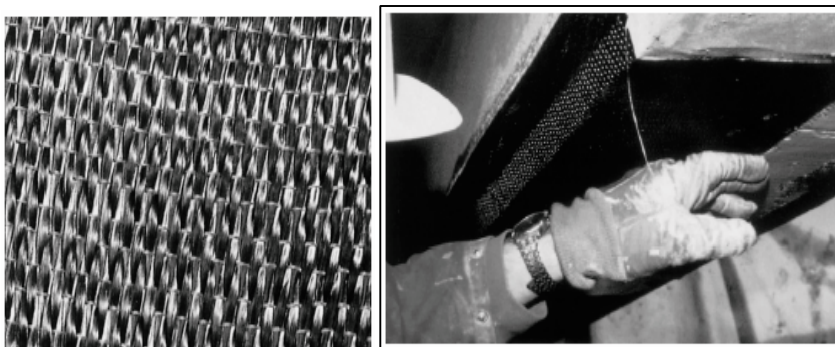
la maîtrise de l'épaisseur du film de résine. Ce procédé a trouvé de nombreuses applications en Europe, au Japon et aux Etats-Unis).



**Figure II.18.** Mise en œuvre par stratification directe. [26]

### II.5.1.3. Tissus de fibres de carbone 'TFC'

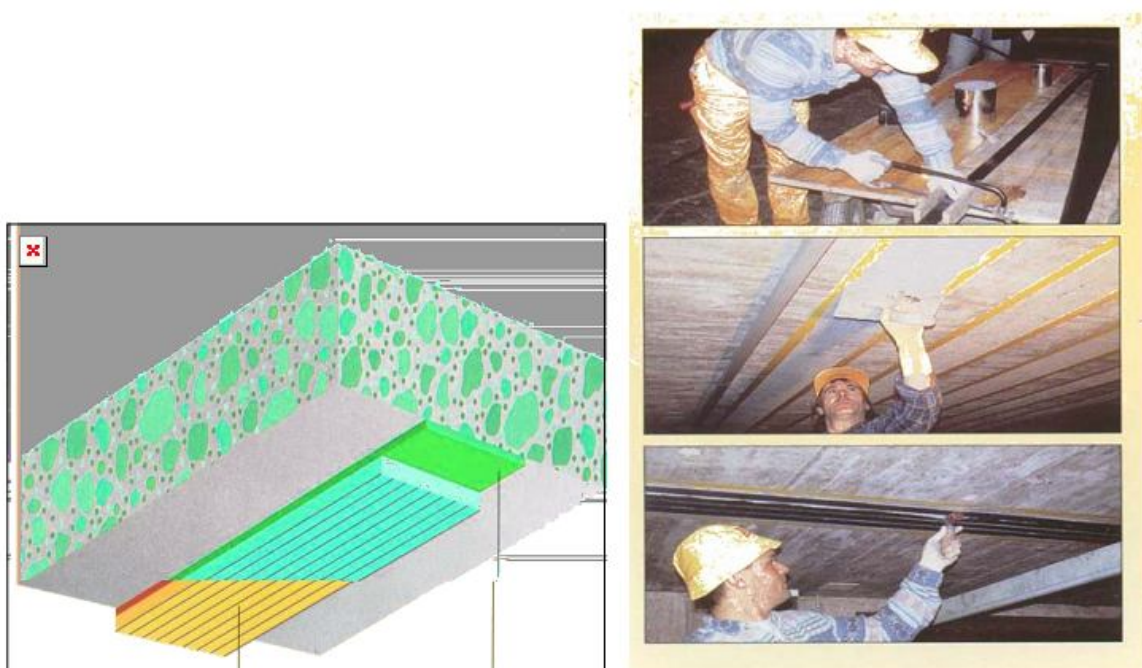
En France, une collaboration entre les milieux industriels et des laboratoires de recherche, fin 1994, a donné naissance à un produit appelé TFC (tissus de fibres de carbone), marque déposée par Freyssinet international (**Fig.I.32**). Comparativement à l'utilisation des produits pultrudés, ce procédé a l'avantage de simplifier les opérations de pose et offre la possibilité de permettre le renforcement de surface non plane (**Fig.II.19**).



**Figure II.19.** Renforcement par Tissu de fibres de carbone TFC de surfaces non planes. [26]

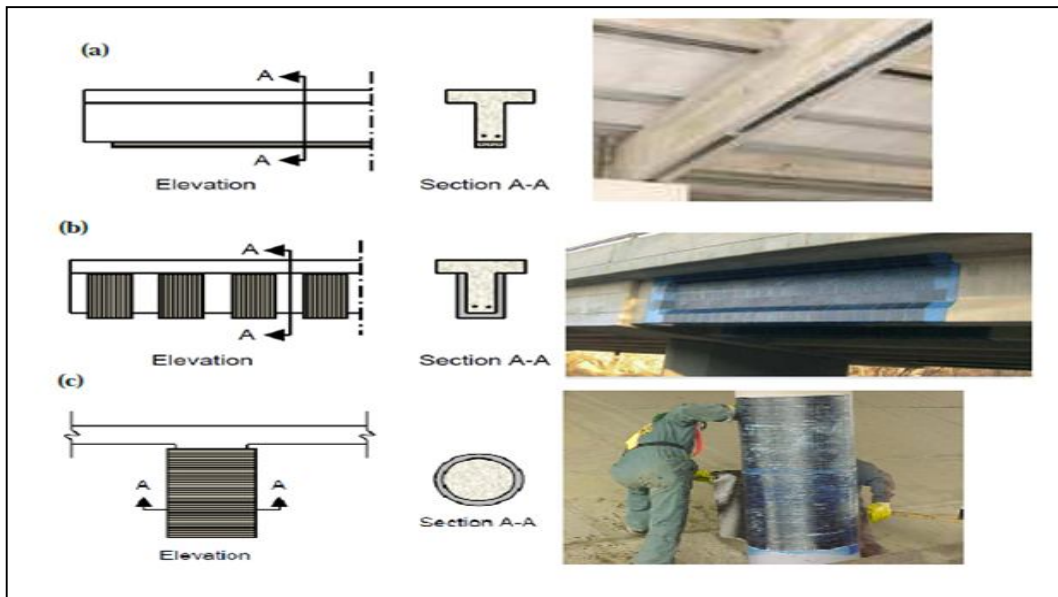
#### II.5.1.4. Le collage de plaques composites

Les plaques composites sont obtenues à partir de fibres continues qui sont enduites par passage en continu dans un bain de résine. À partir de ces bandes pultrudées, la technique de renforcement est similaire à celle du plat collé métallique selon le procédé L'Hermitte. L'utilisation de cette technique, comme celle du plat collé métallique, permet difficilement de maîtriser les épaisseurs de colle, en raison de la rigidité des aciers et des composites. L'application de ces renforcements sur des surfaces ayant des défauts de planéité ou sur des surfaces courbes ou non développables reste très limitée.



**Figure II.20.** Procédé par collage de plaques en partie inférieure (Sika, 1996)

Tous les éléments porteurs de la structure peuvent être renforcés par des matériaux composites après avoir subi des dommages. En fonction du taux d'endommagement, la technique de renforcement est adaptée pour mieux répondre aux exigences de mise en service. A titre indicatif, dans la figure II suivante, nous illustrons les techniques de renforcement des poutres avec des lamelles en composites et le confinement des colonnes en béton par un tissu composite en fibres de carbone pré imprégnées.



**Figure II.21.** Exemples d'application des matériaux composites en génie civil



**Figure II.22:** Armatures composites pour le renforcement des ouvrages en béton.



**Figure II.23.** Confinement de colonnes.

**Conclusion du chapitre**

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de forme et durée de vie prolongée. Etant de natures plus légères, ils offrent une réduction de poids propre qui peut être transformée en charges d'exploitation additionnelles, ou en réduction des charges imposées. Leur faible poids peut aussi réduire les besoins en équipements, moyens de réalisation et les délais de construction, ainsi que le temps de réalisation. Les matériaux composites offrent également une meilleure durabilité. La variation spatiale et progressive des propriétés de ces matériaux permet de créer des structures innovantes qui peuvent être exploitées dans de nombreux domaines d'application dans les structures spéciales en génie civil.

# **Chapitre III :**

# **Etude Paramétrique**

**Introduction**

Ce chapitre est totalement consacré à la présentation des différents calculs et résultats obtenus dans l'étude paramétrique, des facteurs importants régissant le comportement des dalles en béton renforcées par des patchs composites, soumises à un chargement vertical progressif de poinçonnement. Nous rappelons que les résultats expérimentaux utilisés dans cette étude sont ceux obtenus lors de l'investigation expérimentale menée par Melle Djellad A.Z[27].

Tous les essais ont été réalisés au Laboratoire de Génie-Civil de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

L'objectif principal consiste à étudier l'influence du patch composite à travers sa surface (dimensions en plan) sur la résistance et la réponse mécanique des dalles. Un modèle théorique qui permet de transcrire le comportement mécanique sera développé et proposé à partir des différents résultats.

Plusieurs variantes (surface renforcée) sont considérées. Un total de douze dalles renforcées avec composite à base de liège et trois dalles témoin, de dimensions  $28 \times 23 \times 3 \text{ cm}^3$  ont été réalisées et testées. Le patch composite est toujours collé sous le point d'application de la charge. Pour étudier l'influence de la surface de patch en composite sur le mode de rupture de la dalle sous l'effet d'une charge centrée quatre (04) variantes ont été considérées. Les sections des patchs sont calculées de façon que le rapport  $X_P/Y_P$  de patch soit proportionnel à  $X_D/Y_D$  de la dalle, avec un pas de 6cm dans le sens longitudinal et de 4cm dans le sens transversal.

**III.1. Patchs composites**

Les matériaux composites utilisés dans notre étude, sont des patchs à base de résine époxy renforcée de fibres en liège. Les plaques composites sont réalisées à partir du mélange résine époxy accompagnée de son durcisseur et des renforts, selon la fiche technique proposée par le constructeur.

**III.1.1. Matrice : La résine époxyde**

Les résines époxydes sont très utilisées dans le domaine de la construction et plus particulièrement dans le domaine de la réparation. Les avantages de cette résine sont :

- Bonne tenue mécanique, dont la fatigue.
- Forte adhésion au renfort.
- Une bonne tenue aux températures élevées.
- Très bonne tenue aux agents chimiques.
- Très bonne adhérence sur supports béton et acier.
- Bonne mouillabilité du support et des fibres de verre.
- Faible retrait.

**Tableau III.1** : Caractéristiques de la résine époxyde

Densité (ISO 758)	1.1 ± 0.05
Viscosité (NF T76-102)	11000 mPaS à 25°C
DPU (NFP18 810)	1h15mn à 20°C et 65%HR
Temps de durcissement à 20°C et 65% HR	Hors poisse 6h , Dur 16h
Rc (NA427)	> 70 MPa
Rf (NA 234)	> 25 MPa
Adhérence sur béton (NFP18 858)	3 MPa
Durée de mise en service	10j à 20°
Rapport pondérale	Résine :1 Kg ,Durcisseur : 0.666 Kg
Résistivité à 20 °C (Û · m)	1010 à 1013

**III.1.2 Liège**

Le liège utilisé est récupéré des forêts de la région de YAKOURAN de TIZI-OUZOU. Le liège est récupéré à l'état brut, ensuite broyé avec un broyeur spécial, le matériau est obtenu sous forme de granulats de diamètres allant jusqu'à 25mm.

Après le broyage du liège on procède au tamisage du contenu, afin de séparer les grains de différents diamètres et avoir une poudre très fine (granulométrie). Sans liant à une température de l'ordre de 300°C la résine naturelle contenue dans le liège tient lieu de liant.

**Tableau III.2 : Caractéristiques du liège (Fiche technique)**

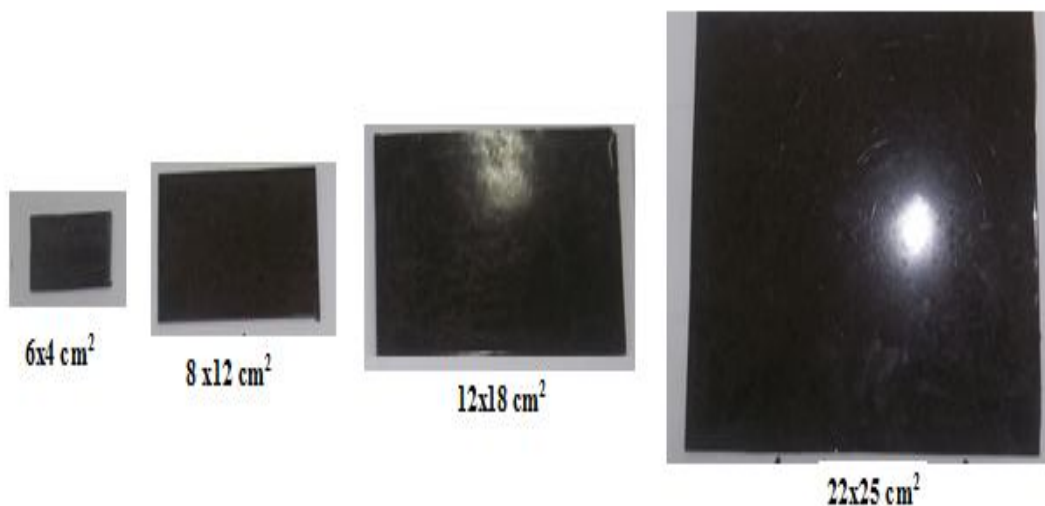
<b>Caractéristiques</b>	<b>Tolérance</b>
Densités	0.24g/cm <sup>3</sup>
Granulométries	4 / 8 mm
Coefficient de conductibilité thermique 20°C	ë = 0,040 W/m°K
Stabilité dans le temps	Illimitée. Produit imputrescible.
Réaction au feu	Très difficilement inflammable.
Attaque des insectes, rongeurs et autres	Peu propice.
Temps de déphasage chaud/froids	+/- 12 heures
Résistance à la conductibilité de la chaleur	R = 0,5 / 0,75 / 1 / 1,25m <sup>2</sup> K/W
Chaleur spécifique	1,67 KJ/Kg°C
Résistance à la flexion	1,8 Kg/cm <sup>2</sup>
Résistance à la compression	0,20 Kg/cm <sup>2</sup>



**Figure III.1: Le Liège.**

Les patchs composites sont confectionnés par séries de différentes dimensions, comme indiquées ci-dessus, ils sont issus d'un mélange de liège enduit avec un malaxage d'une résine époxyde associée à un durcisseur avec des proportions bien définies par la fiche technique délivrée par le concepteur. Les produits finis se présentent sous forme de plaques, plus ou moins rigides suivant les dimensions.

La préparation de la surface du béton avant le collage de chacun des patchs composites est d'une grande importance puisqu'elle assure une bonne adhérence entre le béton et le composite en question. La surface est préparée selon la norme (NF P 74-203/DTU 59-3) par dépoussiérage convenablement nettoyée, dégraissée, et débarrassée de toute particule non adhérente ou susceptible d'amoindrir la résistance du collage, sans toutefois fragiliser le béton. Afin d'éviter un délaminage (décollement des plaques) prématuré, il convient de s'assurer de la résistance mécanique du support. L'application se fait par collage de la plaque sur la surface de béton préparé, selon les dimensions choisies des patchs et correctement pressée pour enlever l'excédent de colle. Au bout d'une semaine, le renforcement acquiert sa résistance totale.



**Figure III.2.** Patchs composites de différentes dimensions [27]

**Les dimensions utilisées sont : 40x60x2, 80x120x2, 120x180x2 et 220x250x2 mm**

## III.2. Chargement, acquisition des valeurs et présentation des résultats

### III.2.1. Essai de compression (référence)

Les essais de compression des cylindres Ø160x320 mm ont été réalisés pour déterminer les caractéristiques mécaniques du béton (résistance à la compression, module d'élasticité E et le coefficient de poisson  $\nu$ ).

Le chargement axial a été effectué à l'aide d'une presse hydraulique avec une étendue de capacité 3000 KN, Cette presse comporte 2 plateaux, un plateau inférieur mobile et l'autre supérieur fixe est une rotule de type Autotest.

Un taux de chargement quasi-statique est appliqué avec une vitesse de 2,5 KN/s. à mi-hauteur au milieu de deux faces opposées, ont été mesurées, à intervalles rapprochés, les forces et les déformations axiales et radiales. L'acquisition et le pilotage sont gérés par un ordinateur muni d'un logiciel de commande qui traite tous les résultats. La presse utilisée et le mode chargement est illustré par la figure II.8.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau III.1

**Tableau III.3.** : Caractéristiques du béton en compression

Résistance à la compression à 28j $f_{cj}$ (Mpa)	31.35
Limite élastique (Mpa)	27,43
Module d'élasticité $E_{C0}$ (Mpa)	33174
Coefficient de poisson $\mu$	0.14

### III.2.2. Essai de traction sur composites

Les essais de traction simple, par série de trois pour chaque type de composite, ont été réalisés au sein du laboratoire. Les dimensions des éprouvettes utilisées pour ces essais de traction ont été choisies selon la norme NF EN ISO 178, ASTM D790 c'est-à-dire  $l = 20h+20$  mm ; b en fonction de h comme indiqué ci-après :  $10 < b \leq 15$ mm  $h \leq 5$ mm. Les éprouvettes ont pour dimensions une longueur de 140 mm sur une largeur de 14mm avec une épaisseur de 2mm.

Les essais de traction sont réalisés sur une machine de marque IBERTEST. C'est une machine universelle qui peut effectuer sans encombre la traction, la compression et la flexion. La machine est équipée d'une cellule de force maximale de 200 KN. Elle est commandée par microordinateur muni d'un logiciel de commande et de traitement des résultats, ce qui permet une bonne acquisition de données, c'est-à-dire les diagrammes (force/déplacement et force/temps) avec une bonne précision. Les essais sont réalisés à température ambiante. Muni de mors auto-serrant, elle nous permet une bonne tenue des spécimens c'est une manière d'assurer une répartition homogène des contraintes, elle est pilotée jusqu'à la rupture à vitesse de traverse constante fixée à 10 mm/min soit 0.1KN/s pour assurer une bonne reproductibilité des résultats.

### III.2.3. Essai de poinçonnement

L'essai de poinçonnement centré et poinçonnement excentré sont effectués sur la même machine IBERTEST décrite précédemment. La dalle de dimension 28x23x3 cm repose sur ces quatre côtés, sur un dispositif d'appui rigide de dimensions 27 x 22 cm, pour éviter toute excentricité du chargement. Ce dernier est appliqué sur un rectangle d'impact de l'ordre de 28x23mm, soit un dixième de chaque côté.

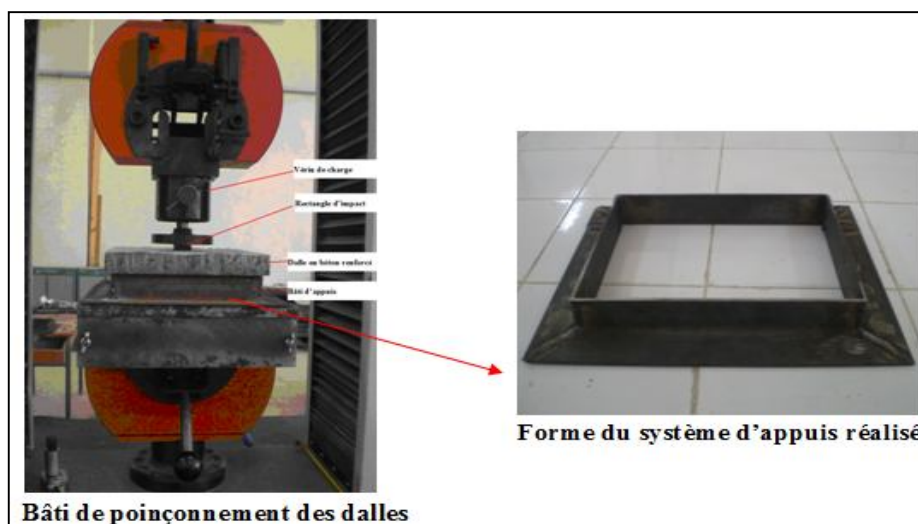


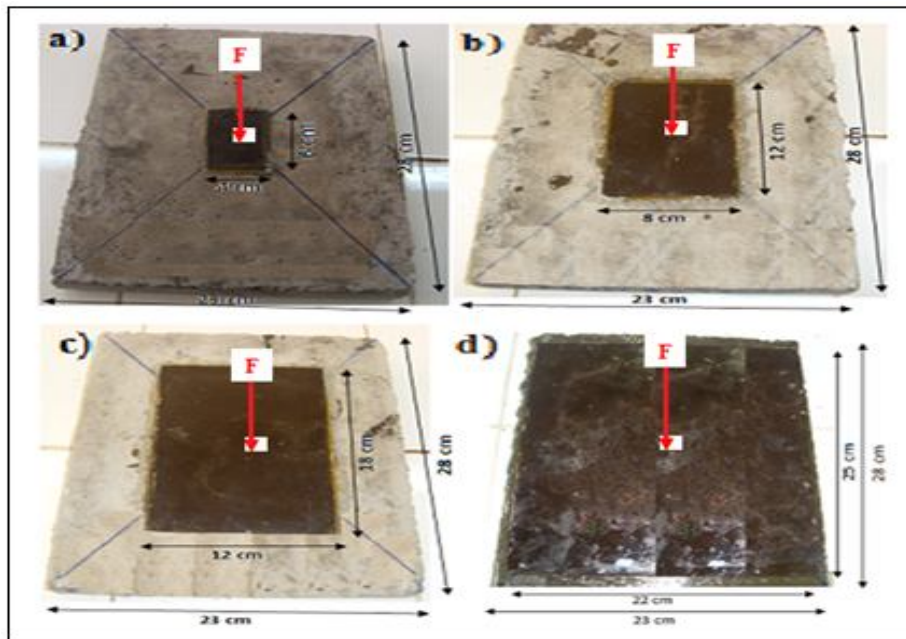
Figure III.3. Mise en point du dispositif d'essai de poinçonnement.

L'objectif de cet essai consiste à identifier expérimentalement le comportement des dalles renforcées par des patchs composites. Les résultats permettent de mettre en évidence l'influence du rapport des surfaces patch / dalle pour couvrir la zone du moment maximal (surface renforcée). Les dimensions géométriques des patchs composites sont présentées dans le tableau II.7.

**Tableau III.4.** Dimensions géométriques des patchs composites réalisés

Variante	Dimension patch (cm)	Dalle en béton (cm)
1	6x4x2	28x23x3
2	12x8x2	
3	18x12x2	
4	25x22x2	

Pour étudier l'influence de la surface de patch en composite (SP) sur le mode de rupture de la dalle renforcée, sous l'effet d'une charge concentrée au centre de gravité de la dalle, quatre (04) variantes ont été considérées. Les sections des patchs sont calculées de façon que le rapport  $X_P/Y_P$  du patch soit proportionnel à  $X_D/Y_D$  de la dalle, avec un pas de 6cm dans le sens longitudinal et de 4cm dans le sens transversal.



**Figure III.4.** Présentation des variantes de dalles de patches composites de dimensions différentes. [27]

Les différents résultats obtenus sont résumés dans le tableau II.8

**Tableau III.5.** Résultats des essais de poinçonnement centré (Valeurs Moyennes)

	Désignation	Dimensions (cm)	Rapport ( $S_p/S_D$ )	Résistance maximale (Mpa)	Force de rupture (kN)	Déplacement au pic (mm)
<b>Dalle de référence</b>	DRef	28x23x3	-	0.67	4.62	1.26
<b>Dalle renforcées par patch en liège</b>	DRCL1	6x4	0,037	0.81	5.62	1.28
	DRCL2	12x8	0,149	1.06	7.33	1.31
	DRCL3	18x12	0,335	1.36	9.4	1.52
	DRCL4	25x22	0,854	1.39	9.6	1.64

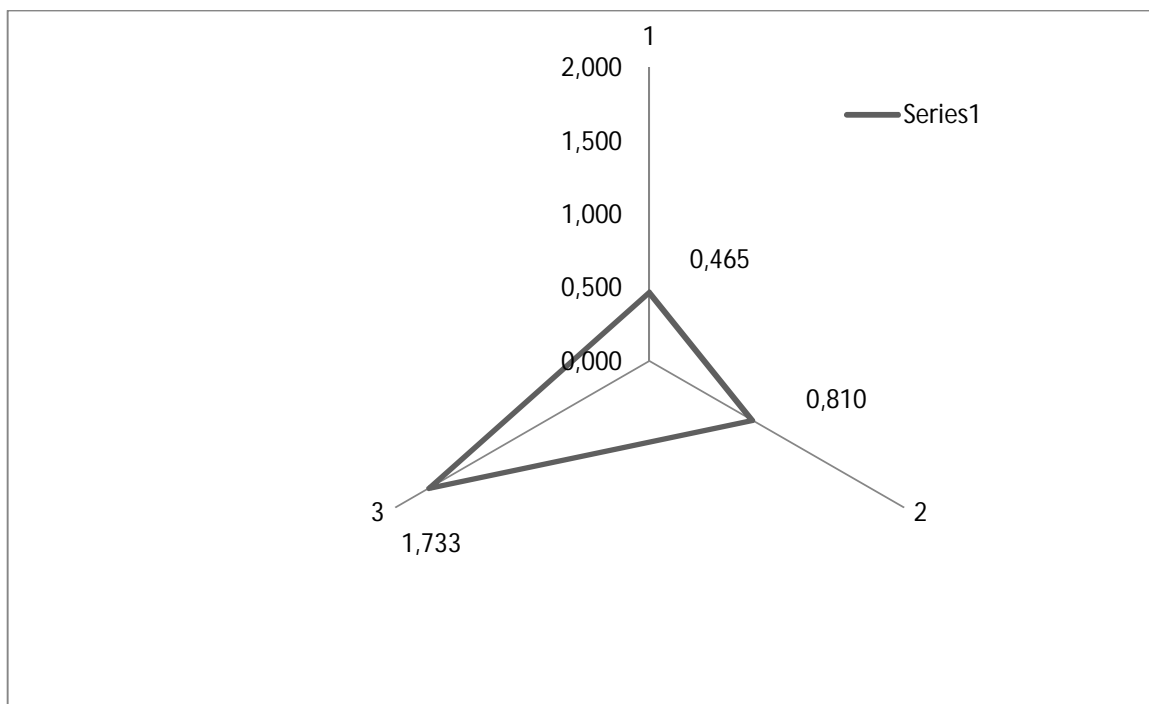
### III .3. Traitement des résultats et illustration

Pour réaliser notre étude paramétrique, nous avons préféré utiliser l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus sur les différentes dalles testées et non pas les valeurs moyennes. Par

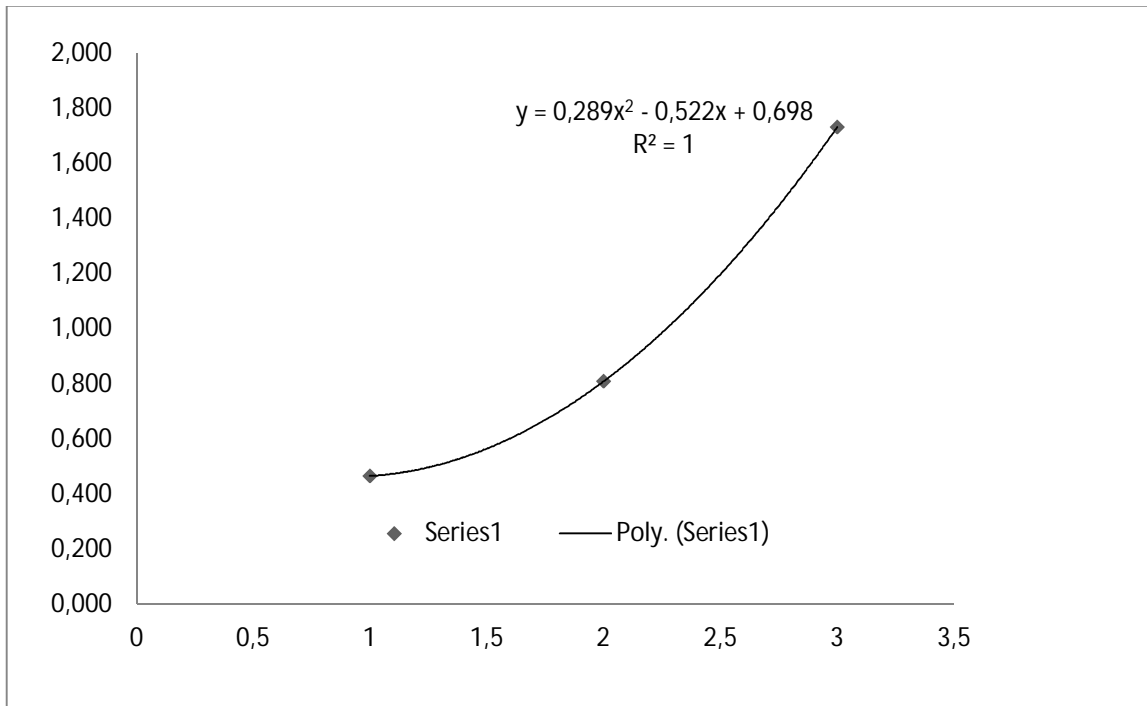
La suite, un traitement numérique est réalisé en utilisant le logiciel de calcul Excel pour effectuer les calculs et illustrer sous formes de graphes et figures l'influence des paramètres considérés sur la résistance mécanique de l'élément dalle.

**Tableau III.6.** Résultats des essais sur les dalles renforcées avec le patch de dimensions 40x60x2xmm

	<b>Force de rupture exp totale(KN)</b>	<b>Force reprise par le béton(KN)</b>	<b>F(x) reprise par le composite (KN)</b>
<b>F11</b>	5,085	4,62	0,465
<b>F12</b>	5,43	4,62	0,810
<b>F13</b>	6,353	4,62	1,733
	Moy: 5,62	4,62	1,002666667 : (22%)



**Figure III.5.** Force reprise par le patch composite de dimensions 40x60x2xmm



**Figure III.6.** Variation de la Force reprise par le patch composite de dimensions 40x60x2mm

**Tableau III.7.** Résultats des essais sur les dalles renforcées avec le patch de dimensions 80x120x2mm

	<b>Force de rupture exp totale(KN)</b>	<b>Force reprise par le béton(KN)</b>	<b>F(x) reprise par le composite</b>
<b>F21</b>	6,819	4,62	2,199
<b>F22</b>	7,22	4,62	2,600
<b>F23</b>	7,952	4,62	3,332
	Moy: 7,33	4,62	2,710333333 : (59%)

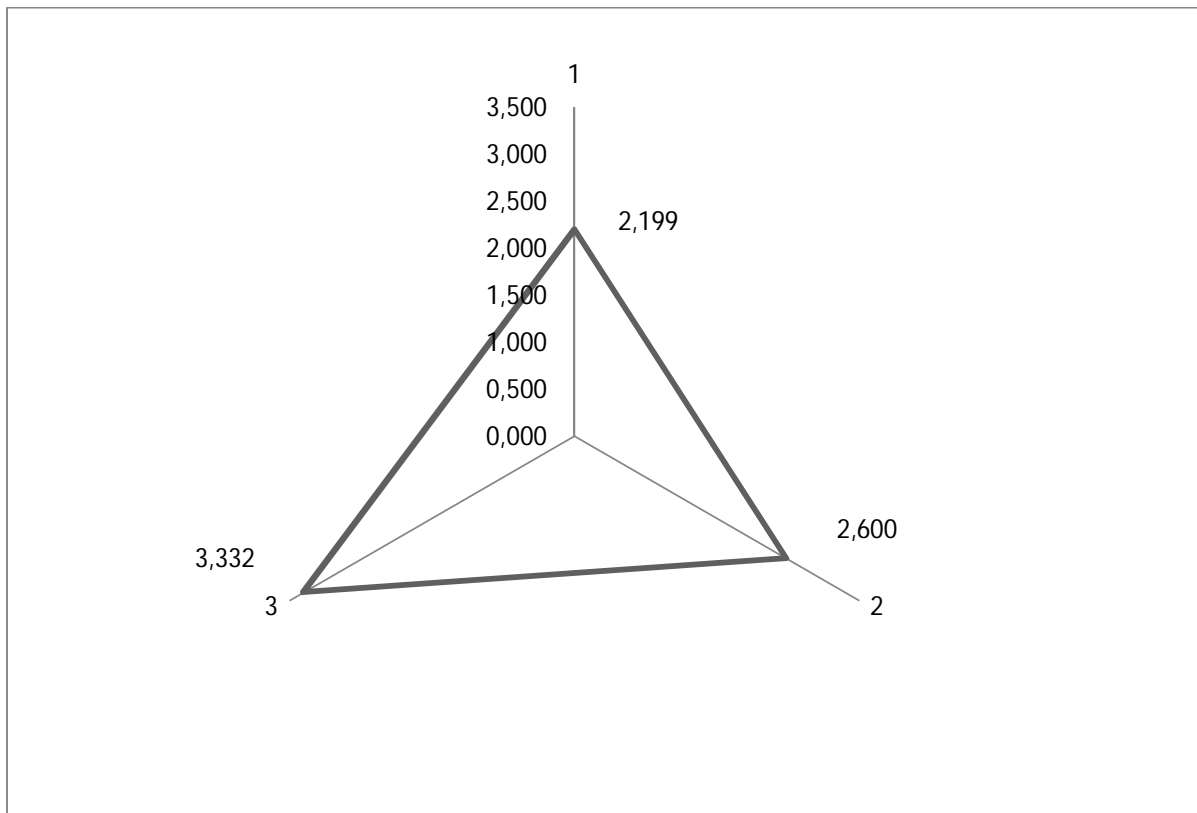


Figure III.7. Force reprise par le patch composite de dimensions 80x120x2xmm

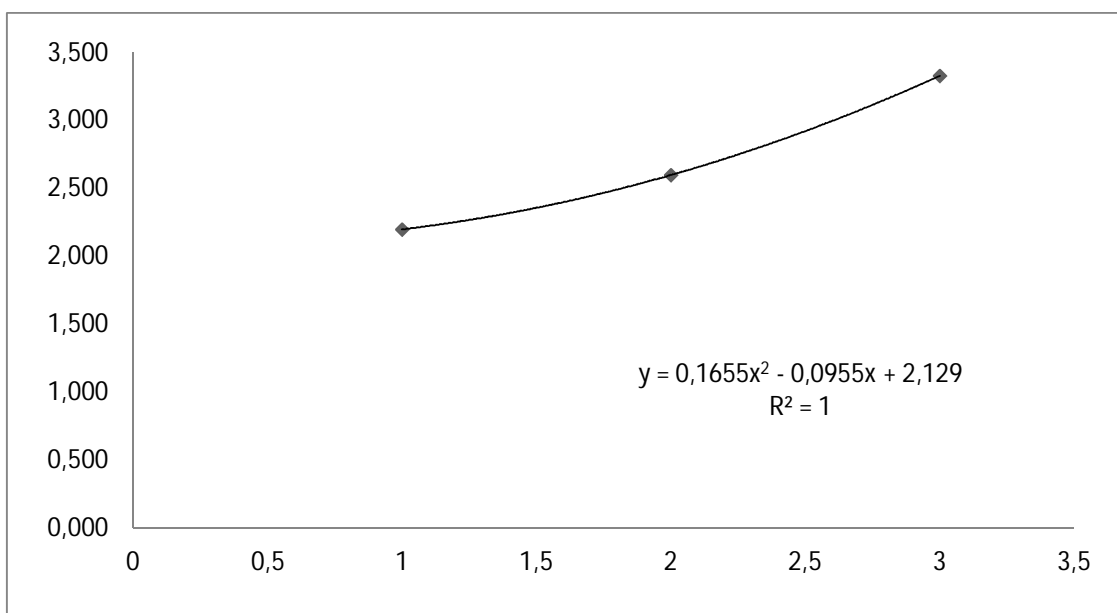
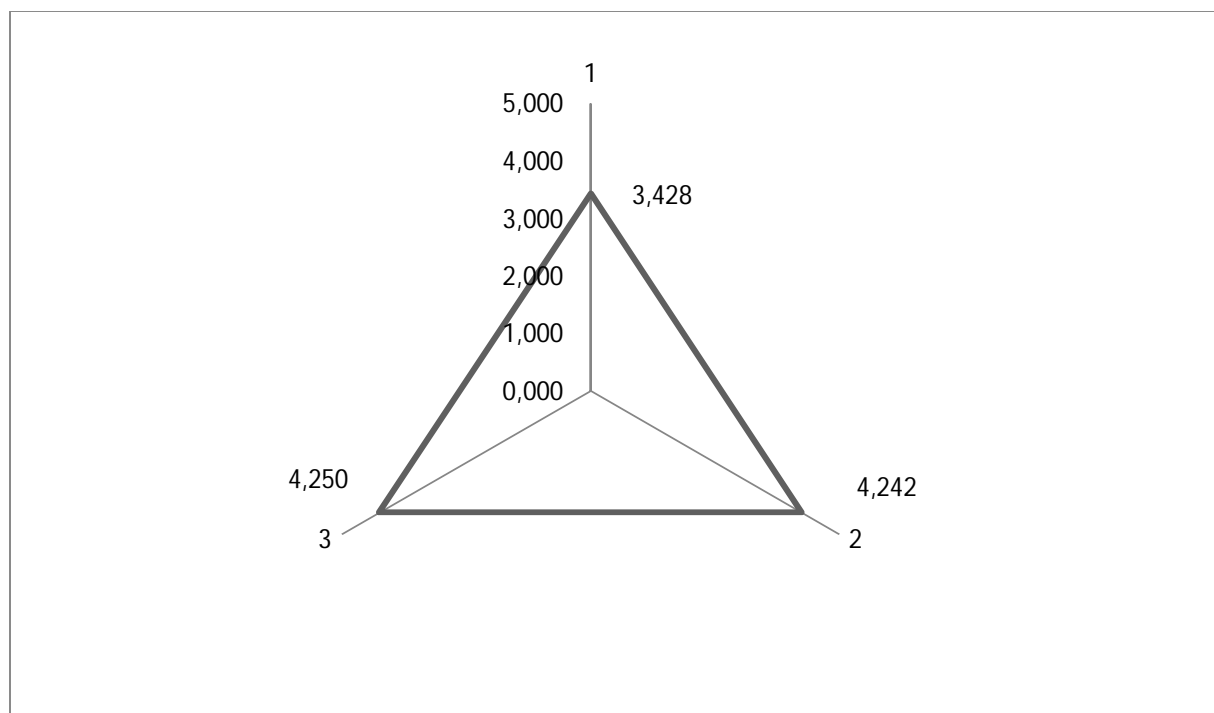


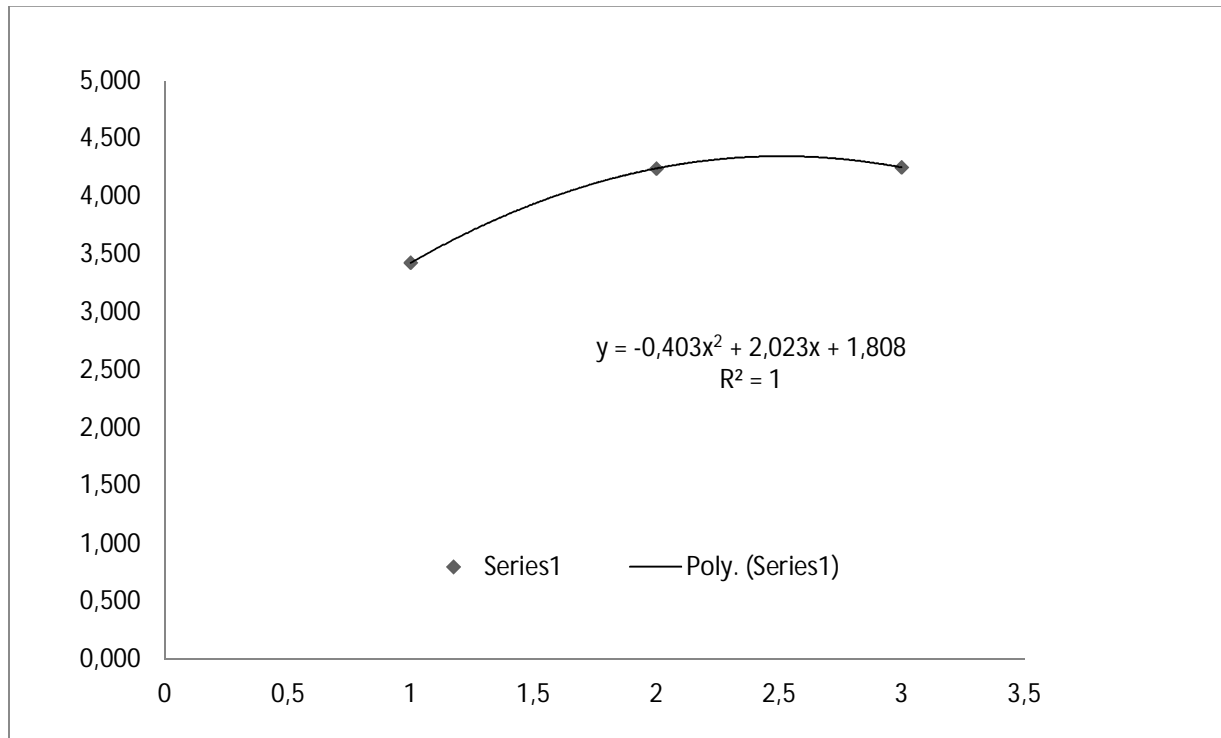
Figure III.8. Variation de la Force reprise par le patch composite de dimensions 80x120x2xmm

**Tableau III.8.** Résultats des essais sur les dalles renforcées avec le patch de dimensions 120x180x2xmm

	Force de rupture exp totale(KN)	Force reprise par le béton(KN)	F(x) reprise par le composite(KN)
<b>F31</b>	8,048	4,62	3,428
<b>F32</b>	8,862	4,62	4,242
<b>F33</b>	8,87	4,62	4,250
	Moy: 8,59	4,62	3,973333333 : (86%)



**Figure III.9.** Force reprise par le patch composite de dimensions 120x180x2xmm



**Figure III.10.** Variation de la Force reprise par le patch composite de dimensions 120x180x2xmm

**Tableau III.9.** Résultats des essais sur les dalles renforcées avec le patch de dimensions 220x250x2xmm

	<b>Force de rupture exp totale(KN)</b>	<b>Force reprise par le béton(KN)</b>	<b>F(x) reprise par le composite(KN)</b>
<b>F41</b>	9,559	4,62	4,939
<b>F42</b>	9,589	4,62	4,969
<b>F43</b>	9,645	4,62	5,025
	Moy : 9.6	4.62	4,977666667 : (107,74%)

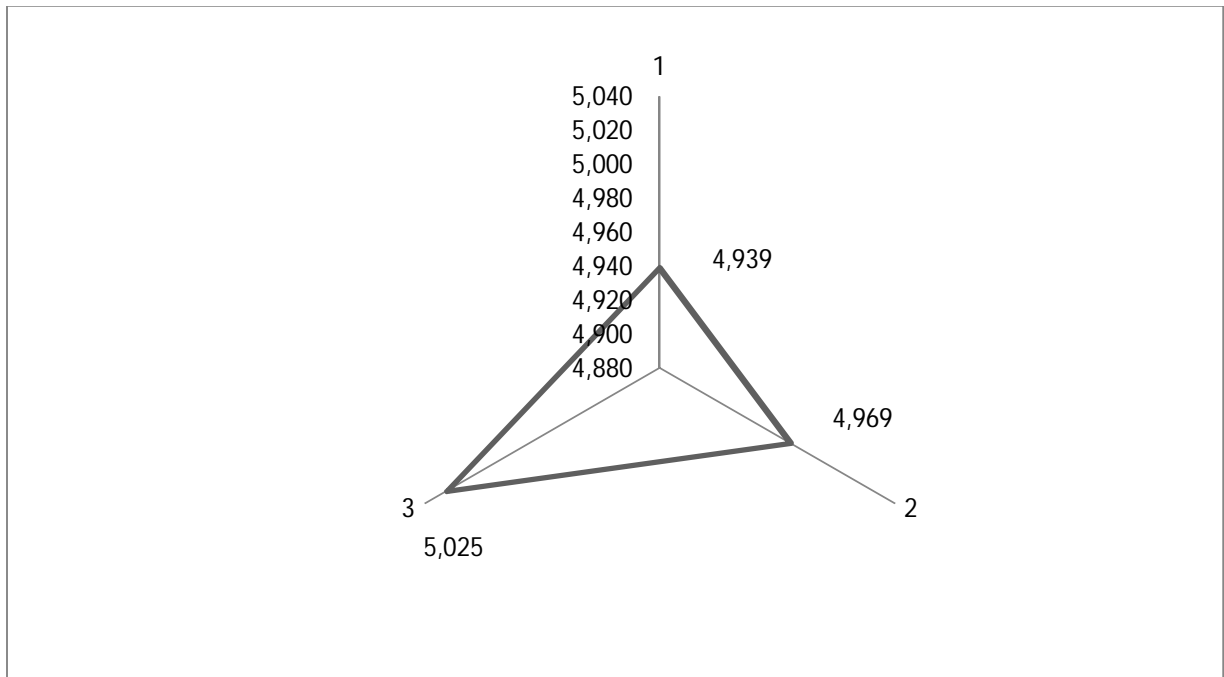


Figure III.11. Force reprise par le patch composite de dimensions 220x250x2xmm

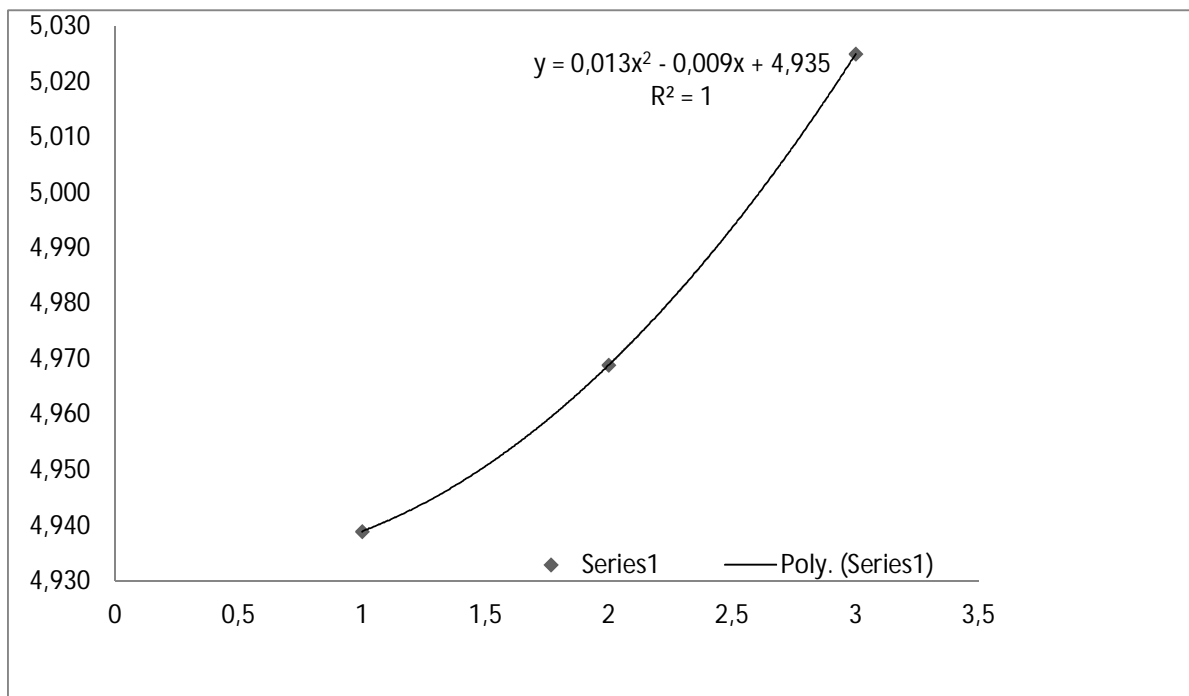
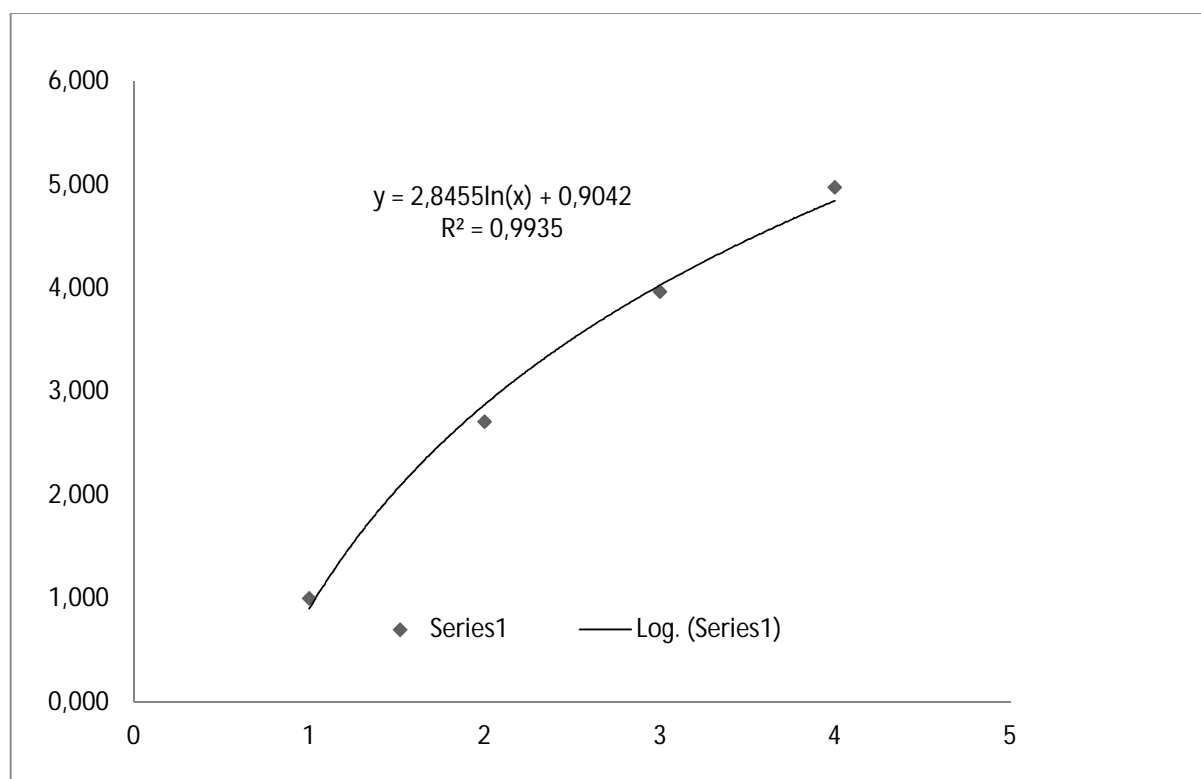


Figure III.12. Variation de la Force reprise par le patch composite de dimensions 220x250x2xmm

**Tableau III.10.** Valeurs moyennes des résistances des dalles renforcées avec différents patches

	dimension plaques(mm)	Force de rupture exp totale(KN)	Force reprise par le béton(KN)	F(x) reprise par le composite(KN)
<b>F1</b>	40x60x2	5,620	4,62	1,000
<b>F2</b>	120x80x2	7,330	4,62	2,710
<b>F3</b>	180x120x2	8,590	4,62	3,970
<b>F4</b>	250x220x2	9,600	4,62	4,980

**Figure III.13.** Variation de la Force reprise par les patches composites de dimensions variées

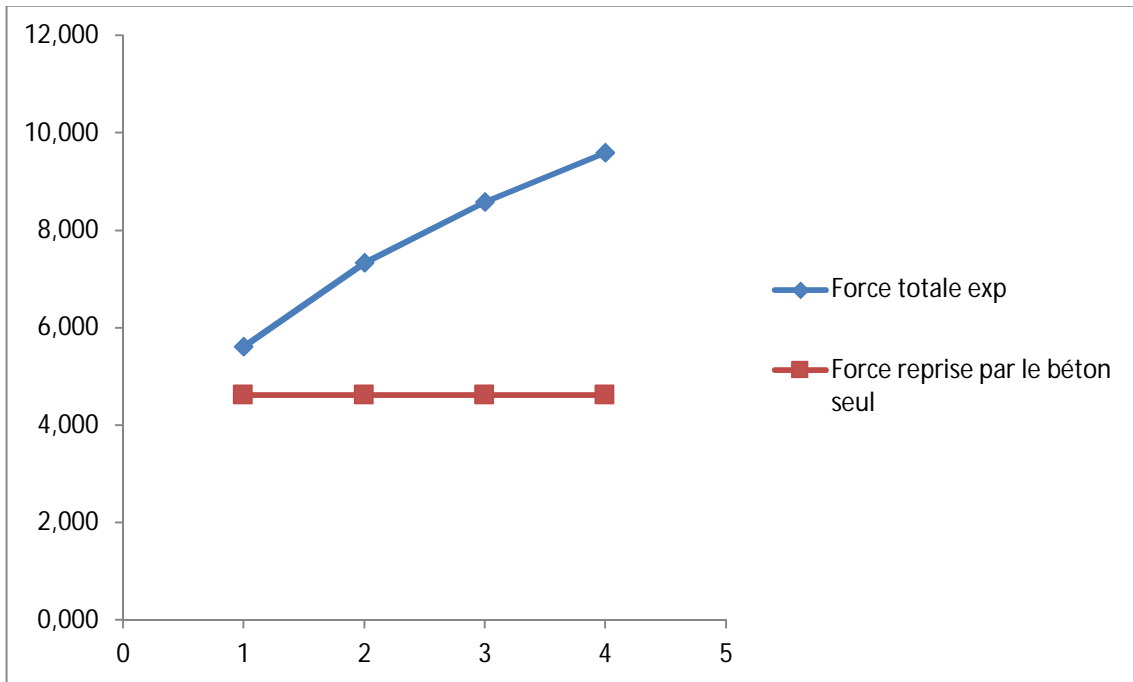


Figure III.14. Confrontation des valeurs de la force reprise par les dalles renforcées et dalle témoin

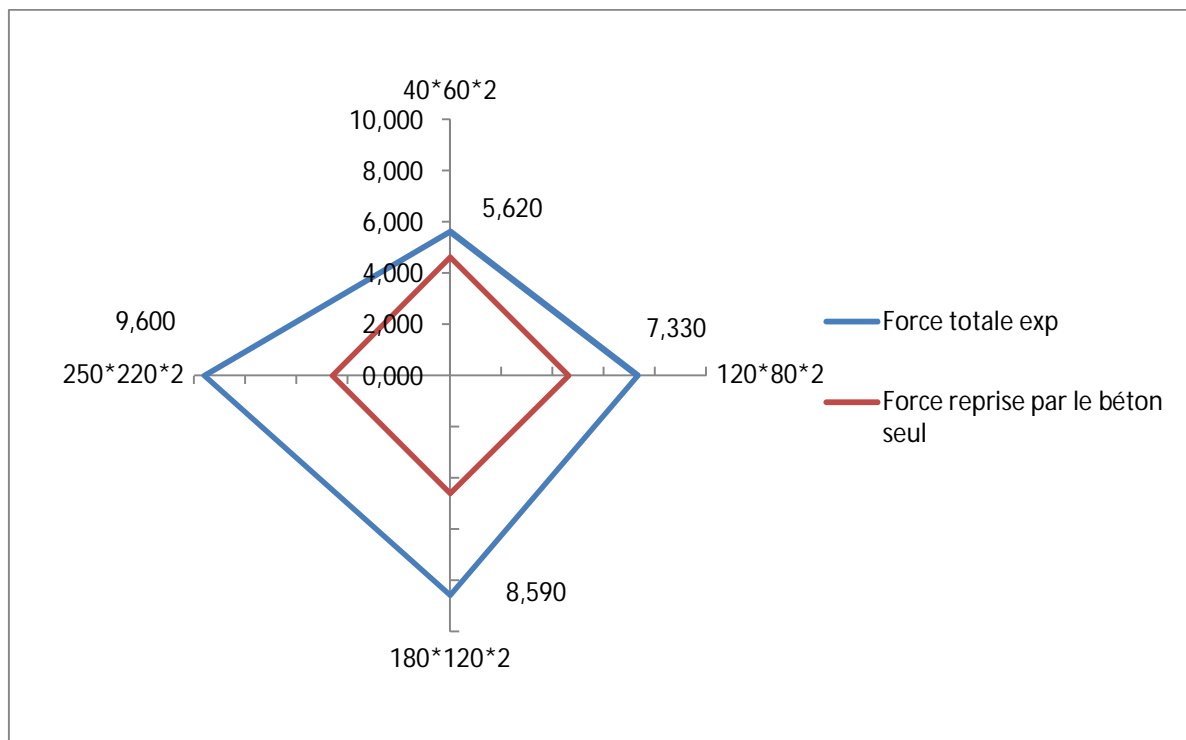


Figure III.15. Confrontation des valeurs des forces des différentes dalles renforcées (Apports des patchs composites)

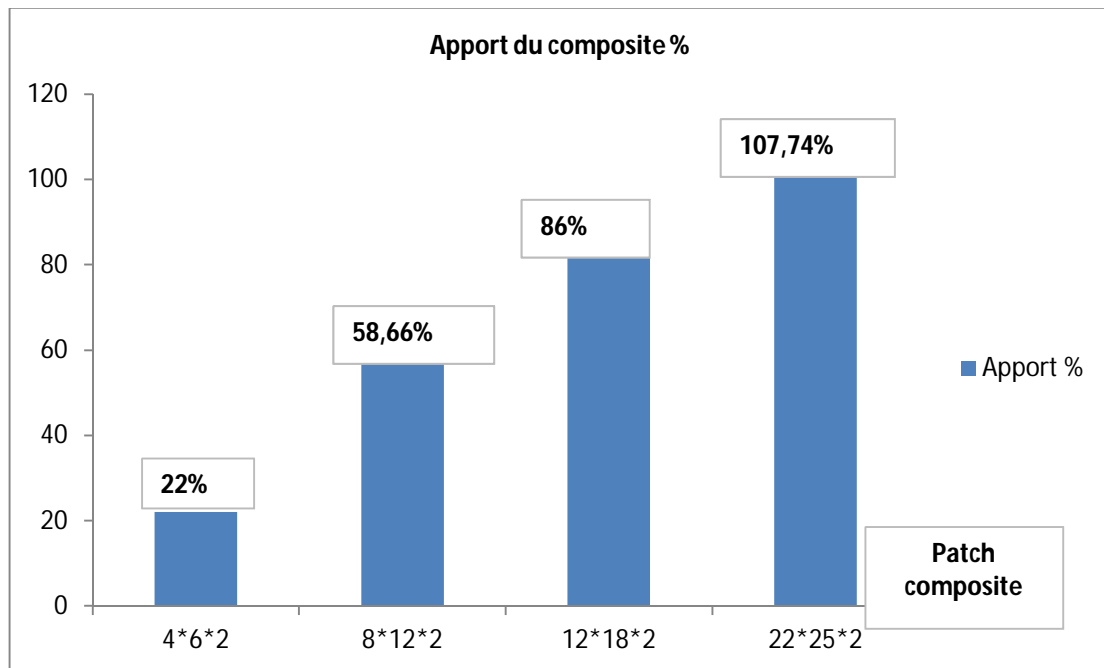
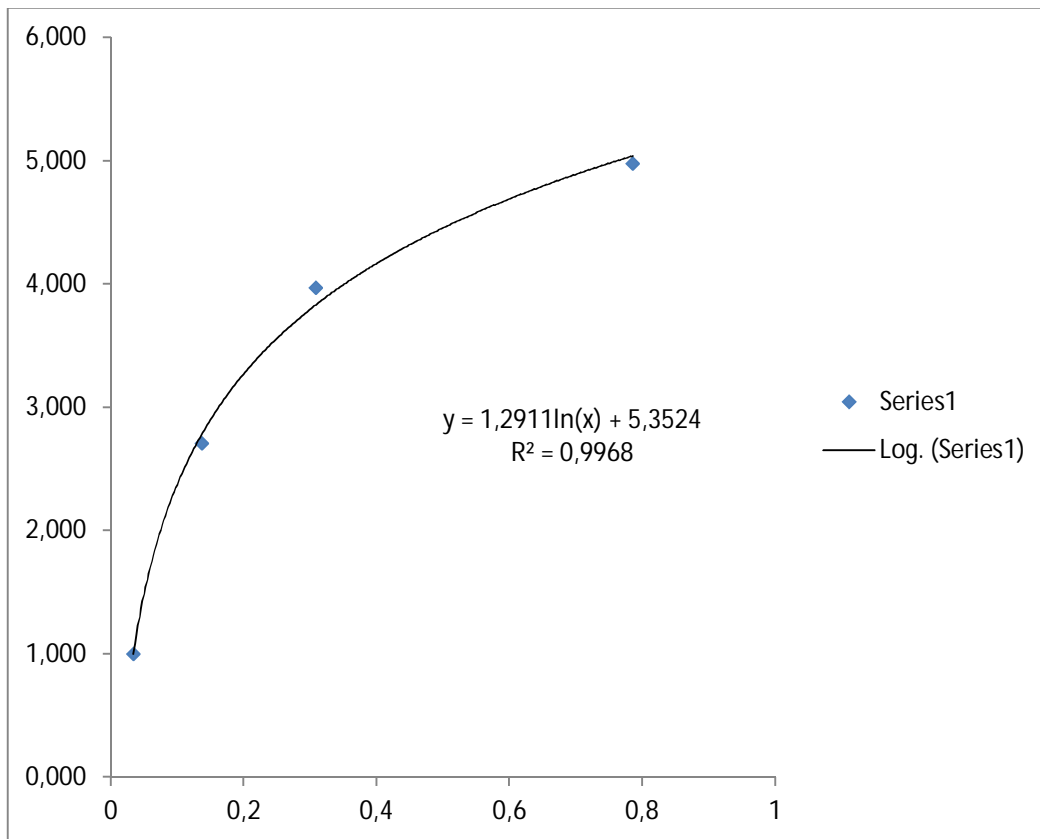


Figure III.16. Histogramme des apports des patches composites dans la reprise de la charge de poinçonnement

Tableau III.11. Valeurs de la force reprise par le patch en fonction du rapport des surfaces S1/S

Dimensions des patches(mm)	Rapports des surfaces S1/S	F(x) reprise par le composite(KN)	%
40*60*2	0,034285714	1,000	22
120*80*2	0,137142857	2,710	58.66
180*120*2	0,308571429	3,970	86
250*220*2	0,785714286	4,980	107.74



**Figure III.17. :** Variation de la force reprise par le composite en fonction du rapport des surfaces S1/S (patch/ dalle)

#### III.4. Développement du modèle théorique

En général, la capacité ultime de la dalle est limitée par le phénomène du poinçonnement, qui dépend plus des caractéristiques du béton. Pour les dalles en béton, le mode de rupture observé est une rupture par flexion-poinçonnement [Djellad] [27].

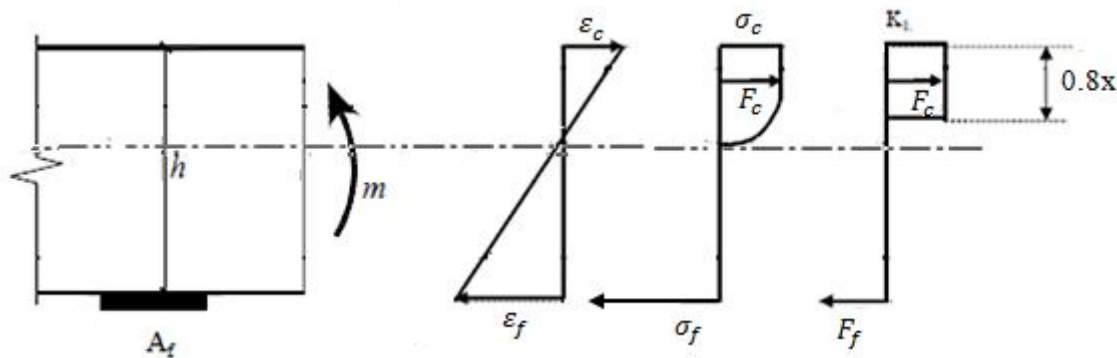
Dans cette partie du travail, nous attelons à développer un modèle analytique qui permet de prédire le comportement des dalles renforcées à l'aide de patches composites, collés sur la face inférieure de la dalle, soumises à une charge verticale de poinçonnement centrée.

Le développement de ce modèle, est basé sur les résultats expérimentaux.

Les résultats montrent que les dimensions du patch composite ont une influence directe sur la réponse mécanique de la dalle renforcée aux sollicitations mécaniques appliquées.

**III.4.1. Equilibre d'une section en béton renforcée :**

L'équilibre d'un élément est présenté par les diagrammes de contraintes et des déformations. La figure III.18 montre l'état d'équilibre de la section de dalle en béton renforcée par un patch composite, lorsqu'elle est soumise à un moment de flexion développé par l'effort vertical [27].



**Figure III.18.** Diagramme des contraintes et des déformations d'une section rectangulaire en béton renforcé [27].

**III.4.2. Conditions d'équilibre :**

Les efforts dans la section M et N sont donnés par les relations suivantes :

$$\int \sigma_c \cdot da_c + \int \sigma_f \cdot da_f = N \tag{III.1}$$

$$\int \sigma_c \cdot z \cdot da_c + \int \sigma_f \cdot z \cdot da_f = M \tag{III.2}$$

Où :  $a_c$  correspond à l'aire du béton de la section par unité de longueur.

A l'état limite ultime, et en considérant le diagramme contrainte-déformation d'une dalle renforcée par des patchs composites, l'équilibre de la section béton-composite s'écrit sous la forme suivante :

$$F_{rupture} = F_{béton} + F_{composite} \tag{III.3}$$

La Force de rupture dans le béton seul doit satisfaire la condition de non poinçonnement, donnée par le règlement BAEL [28] A l'état limite ultime (ELU), la force résistante au

Poinçonnement 'Qu' est déterminée par les formules suivantes, qui tiennent compte de l'effort favorable dû à la présence d'un ferrailage horizontal [29] :

$$\text{Si } f_{cj} \leq 40 \text{ Mpa} \Rightarrow Q_U \leq (0.05 + 1.5\rho_l) u_c .d. \frac{f_{cj}}{\gamma_b} \quad (\text{III.4})$$

Avec :

$\rho_l$  : Pourcentage moyen d'armatures de flexion au droit de la charge, défini par :

$$\rho_l = \min [ \sqrt{\rho_{lx}\rho_{ly}} ; 0.015 ] \quad (\text{III.5})$$

Avec :  $\rho_{lx}$  et  $\rho_{ly}$  sont, respectivement, les pourcentages dans les deux directions,

d : Hauteur utile,

$f_{cj}$  : Résistance du béton en compression,

$\gamma_b$  : Coefficient de sécurité appliqué à la résistance du béton.

$Q_U$  : la charge de calcul à l'état limite ultime,

$u_c$  : le périmètre du contour au niveau du feuillet moyen.

En supposant, dans les expressions précédentes (III.4) et (III.5),  $\rho_l = 0$  et  $d = 0.9 h$ , La condition de non poinçonnement peut être vérifiée par l'expression (III.18) :

$$Q_U \leq 0,045 . u_c . h . \frac{f_{cj}}{\gamma_b} \quad (\text{III.6})$$

Avec h : la hauteur utile,

Le périmètre du rectangle d'impact au niveau du feuillet moyen dépend du point d'application de la charge. Deux cas sont considérés :

- Charge éloignée du bord :  $U_c = AB + BC + CD + AD$
- Charge au niveau (prés) du bord :  $U_c = AB + BC + CD$

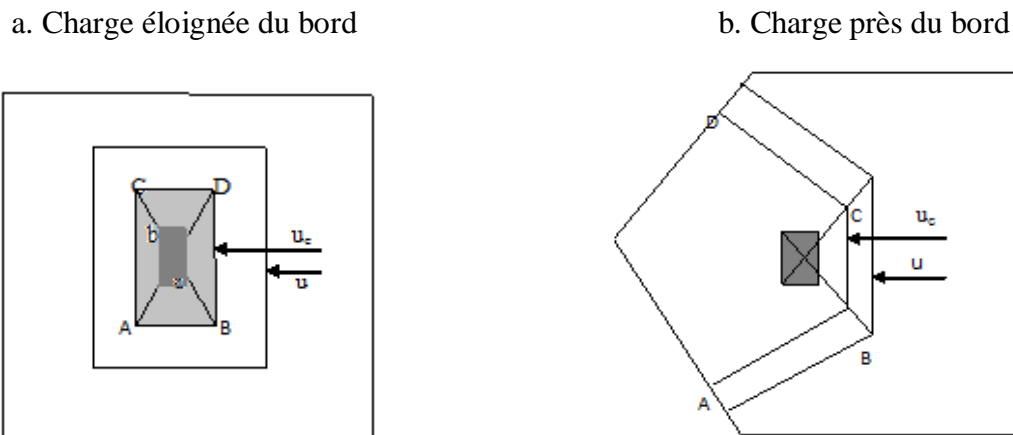
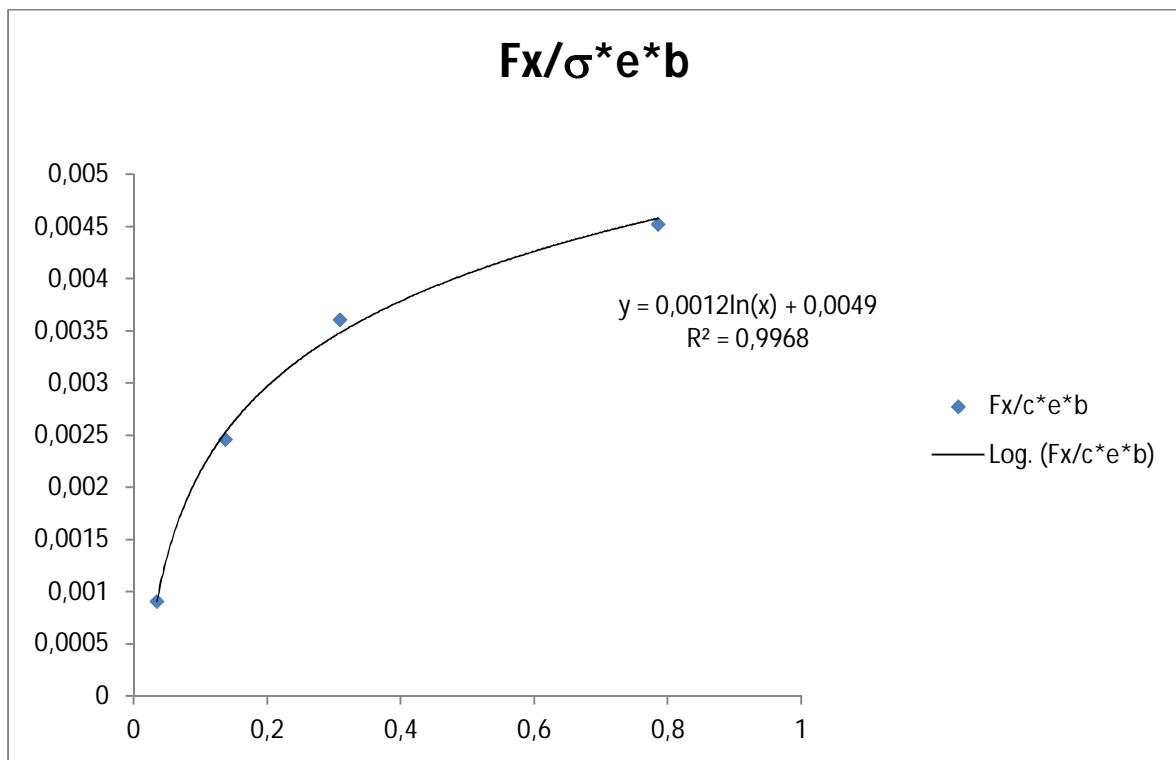


Figure III.19. Périmètre du rectangle d’impact au niveau du feuillet moyen [27]

On suppose que , le patch composite contribue à la reprise de l’effort vertical, d’une manière proportionnelle à la surface renforcée et selon les propriétés mécaniques du composite utilisé. Cette hypothèse est validée par les résultats expérimentaux, à partir desquels , nous avons constaté , comme il a été montré dans les figures précédentes, que les dimensions du patch composite ( surface renforcée) a une influence directe sur la résistance de la dalle en béton renforcée par le patch composite

Tableau III.12. Variation de  $F_x/\sigma^*e*b$  en fonction de S1/S

$F_x$ comp (KN)	$\sigma^*e*b$ (KN)	S1/S	$F_x/\sigma^*e*b$
1	1100,4	0,034285714	0,00090876
2,71	1100,4	0,137142857	0,00246274
3,97	1100,4	0,308571429	0,00360778
4,98	1100,4	0,785714286	0,00452563



**Figure III.20.** Variation de  $F_x/\sigma \cdot e \cdot b$  en fonction de  $S1/S$

D'après la figure, on constate que la valeur de la force reprise par le composite dépend du rapport des surfaces  $S1/S$  (patch/dalle). Cette variation est de forme logarithmique dont la courbe de tendance permet d'écrire l'équation (III.7) ;

$$F_x/\sigma \cdot e \cdot b = 0,0012 \ln(S1/S) + 0,0049 \quad (\text{III.7})$$

Le coefficient de corrélation est égal à :  $R^2 = 0,9968$

La force reprise par le patch composite peut être estimée par la relation logarithmique (III.8) ;

$$F_{\text{composite}} = \alpha \cdot F_c = [0,0012 \ln(S1/S) + 0,0049] \sigma \cdot e \cdot b \quad (\text{III.8})$$

En considérant la condition de non poinçonnement donnée par l'expression (III.6) et la force reprise par le patch composite par l'expression (III.8), la valeur de la résistance à la rupture, dans le cas de poinçonnement centré pour les dalles en béton renforcées par des patches composites peut être estimée par la relation (III.9) suivante :

$$Fr = 0,045 \cdot u_c \cdot d \cdot \frac{f_{cj}}{\gamma_b} + [0,0012 \ln (S_i/S) + 0.0049] \sigma \cdot e \cdot b \quad (III.9)$$

Avec :

$\sigma$  : La contrainte de traction du composite

$f_{cj}$  : Résistance du béton en compression

e: épaisseur du patch composite,

b : largeur du patch composite,

$S_i$  : la surface du patch composite,

S : la surface de la dalle en béton.

### III.5. Application numérique

Pour valider le modèle proposé, nous confrontons les résultats donnés par application du modèle avec ceux obtenus concernant la participation du patch composite dans la reprise de l'effort vertical de poinçonnement

**Tableau III.13.** Résultats de l'application numérique du modèle proposé

patch	S <sub>i</sub> /S	$\sigma \cdot e \cdot b$	F <sub>x</sub> Exp (KN)	F <sub>x</sub> modèle(KN)	erreur%
40*60*2	0,034285714	1100,4	1	0,93794596	6,60%
120*80*2	0,137142857	1100,4	2,71	2,76851994	2,11%
180*120*2	0,308571429	1100,4	3,97	3,83933707	3,40%
250*220*2	0,785714286	1100,4	4,98	5,07351033	1,84%

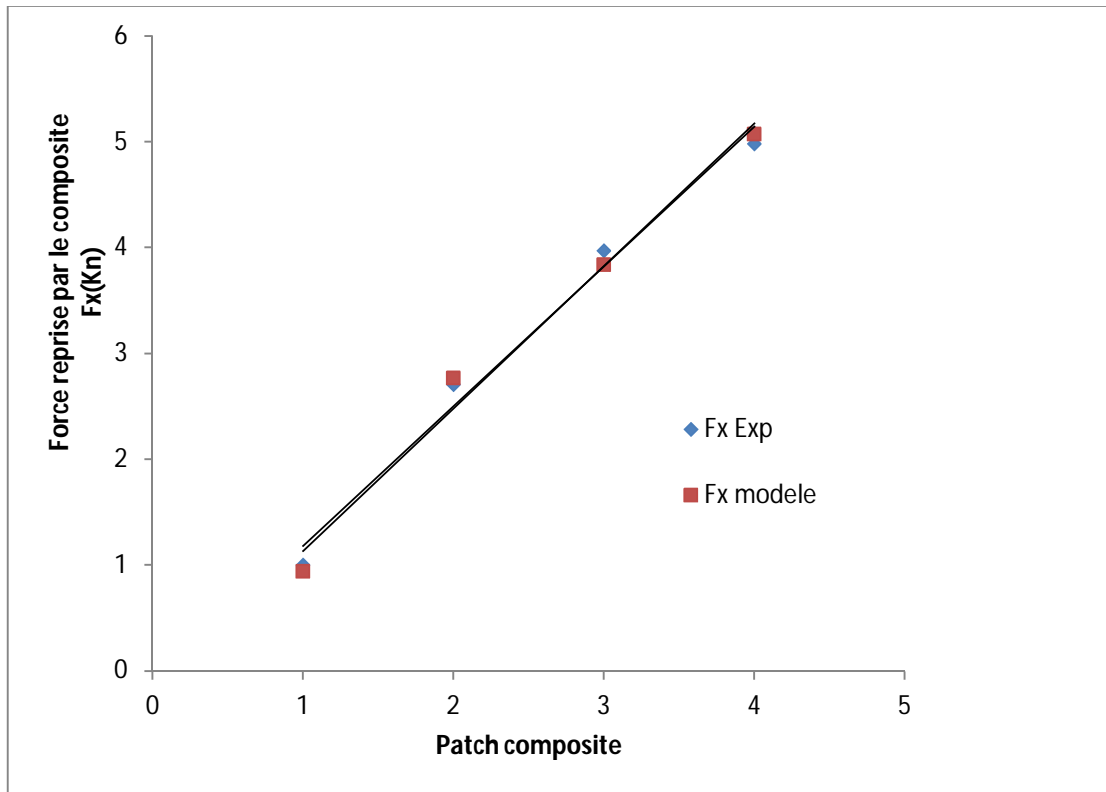


Figure III.21. Confrontation des valeurs expérimentales et théoriques de la force reprise par le patch Fx

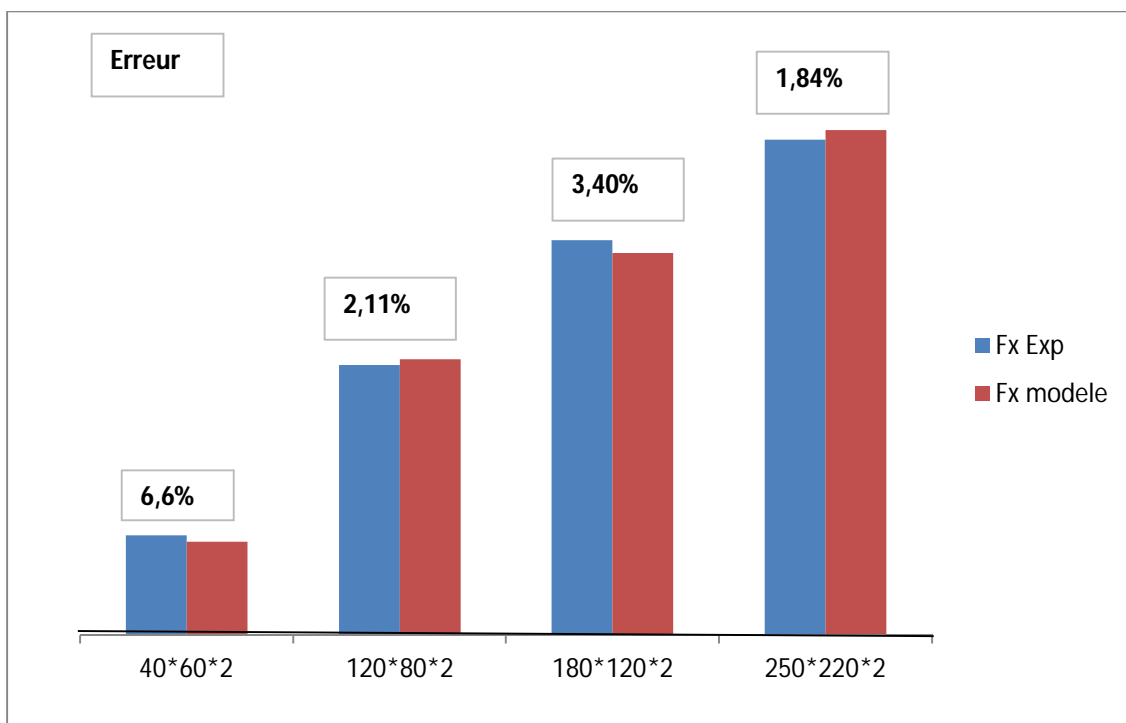


Figure III.22. Histogramme des erreurs entre les valeurs expérimentales et théoriques de la force reprise par le patch Fx

**Conclusion du chapitre**

Dans l'ensemble, le modèle proposé permet d'estimer correctement les valeurs limites de la résistance de rupture des dalles en béton renforcées par des patchs composites. Le modèle analytique proposé a une forme logarithmique simple et peut être appliqué sans difficulté. Ce modèle permet d'obtenir une bonne concordance des résultats ; l'erreur maximale est de l'ordre de 6.6% ; qui correspond au patch composite 40x60x2 mm. Plus les dimensions en plan du patch composite augmentent, plus l'erreur est réduite. L'apport minimal des patchs composites dans la reprise de la charge de poinçonnement est égal à 22% qui correspond au patch de dimensions 40x60x2 mm. Cet apport augmente avec les dimensions du patch. En effet, avec un patch de dimensions 220x250 x2 mm, l'apport est de l'ordre de 107,7%.

# Conclusion Générale

L'analyse critique et objective des travaux antérieurs menés sur les différentes techniques de renforcement des éléments en béton qui ont montré une grande efficacité en termes d'amélioration des résistances et de la capacité portante, notamment lors du renforcement par les matériaux composites, grâce à la conjugaison des performances mécaniques des composants de ces derniers, à savoir la matrice et le renfort de fibres.

Les structures de type dalles sont particulièrement sensibles au poinçonnement. Pour redonner une certaine résistance et une rigidité à la dalle, il est recommandé de procéder au renforcement de la structure. Les exigences de l'amélioration des performances mécaniques, de réduction du poids propre des structures et de leur cout de main ont conduit les chercheurs à s'intéresser au développement durable à travers de nouveau matériaux et procédés de conception. A cet effet, le recours aux plaques composites pour le renforcement des dalles est actuellement une technique très utilisée dans le domaine de génie civil.

Pour le cas de poinçonnement, le renforcement des dalles par des matériaux composites semble être une technique prometteuse, en égard aux propriétés mécaniques très élevées de ces derniers, Néanmoins, pour réduire le cout (réduction de la quantité des matériaux composites), il est recommandé de recourir aux patches composites pour couvrir juste la zone la plus sollicitée, dans le cas d'un chargement axial progressif et non pas la totalité de la surface de la dalle.

Dans l'ensemble, le modèle proposé permet d'estimer correctement les valeurs limites de la résistance de rupture des dalles en béton renforcées par des patches composites. Les dimensions géométriques du patch ( surface renforcée) ont une influence directe sur la résistance. L'hypothèse admise dans ce travail qui consiste à supposer que , le patch composite contribue à la reprise de l'effort vertical, d'une manière proportionnelle à la surface renforcée est validée par les résultats expérimentaux, à partir des quels , nous avons constaté que les dimensions du patch composite ( surface renforcée) a une influence directe sur la résistance de la dalle en béton renforcée par le patch composite

Le modèle analytique proposé a une forme linéaire simple et peut être appliqué sans difficulté. Ce modèle permet d'obtenir une bonne concordance des résultats ; l'erreur maximale est de l'ordre de 6.6% ; qui correspond au patch composite 40x60x2 mm. Plus les dimensions en plan du patch composite augmentent, plus l'erreur est réduite. L'apport minimal des patches composites dans la reprise de la charge de poinçonnement est égal à 22% qui correspond au patch de dimensions 40x60x2 mm. Cet apport augmente avec les dimensions du patch. En effet, avec un patch de dimensions 220x250 x2 mm, l'apport est de l'ordre de 107,7%.

Cependant, nous considérons que d'autres essais sont nécessaires pour mieux optimiser les paramètres du modèle proposé.

# **Références**

# **Bibliographiques**

- [1]. : **F.Gabrysiak** « Matériaux-Les Bétons »p1-2
- [2]. S. Boukhari, UMMTO.2014.
- [3]. **El Houssain Rochdi**, « Contribution à l'analyse du comportement mécanique de dalles en béton arme renforcées par matériaux composites », Mar 2007.
- [4]. **S. Boukhari**, UMMTO.2014
- [5]. XSYS technologies, « Machine applied/high température cure composite column casing for bridge », document technique, 1998.
- [6] Les planchers, Cours L3, Université Joseph Fourier Grenoble. 2015.
- [7] Y.Lescorarc 'h « PLANCHERS EN BETON ».2012
- [8] Programme d'accompagnement des professionnelles, règles de l'art grenelle environnement 2012, « Planchers a poutrelles et entrevous ».2014
- [9] CAHIERS DU CSTB, Planchers nervurés à POUTRELLES PREFABRIQUÉES associées à du béton coulé en œuvre ou associées à d'autres constituants préfabriqués par du béton coulé en œuvre. CPT "PLANCHERS" TITRE I (section A), livraison 374, cahier 2920, Novembre 1996.
- [10]. CAHIERS DU CSTB, Planchers confectionnées à partir de DALLES ALVEOLEES en béton précontraint. CPT "PLANCHERS" TITRE III (1ère partie), livraison 370, cahier 2892, Juin 1996.
- [11]. **Kruger G.** « Résistance au poinçonnement excentré des planchers-dalles ». Phd thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). 1999.
- [12]. **Stefano Guandalini**, « Poinçonnement symétrique des dalles en béton armé », THÈS N<sup>0</sup> 3380, Lausanne, EPFL 2005.
- [13]. **Sagaseta J., Muttoni A., Fernández Ruiz M., Tassinari L.** Nonaxis-symmetrical

punching shear around internal columns of RC slabs without transverse reinforcement. Magazine Of Concrete Research, t. 63. Approuvé pour publication. 2011.

[14]. **Sagasetta J., Fernández Ruiz M., Muttoni A.** Non-symmetrical punching of flat slabs and slab bridges without transverse reinforcement. Dans Concret: 21st Century Superhero. International FIB Symposium, London, UK, June 22-24, 2009. 2009.

[15]. **Muttoni A.** Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement. ACI Structural Journal, t. 105(4), p. 440–450. ISSN 0889-3241. 2008.

[16]. **YVES PERROT** “Influence des propriétés de la matrice sur le comportement mécanique de matériaux composites verre/polyester utilisés en construction navale de plaisance - Cas des résines polyester limitant les émissions de styrène” ; université de Bretagne Sud, thèse de doctorat 2006 – 236p.

[17]. **KECHAOU Borhane** “Corrélation entre propriétés diélectriques et mécaniques de composites à matrice époxyde renforcée par des fibres de verres E” ; école centrale de Lyon et faculté des sciences Sfax, thèse de doctorat 2003 – 138p

[18]. **BELKACEMI Chérifa** “Etude expérimentale du comportement mécanique des stratifiés à renfort en matière végétale” ; université Boumerdes, thèse de magister 2006 – 142p

[19]. **E. J. JULES**, « Couplages entre propriétés thermiques, réactivité chimique et viscosité des matériaux composites thermodurcissables en relation avec les conditions de leur élaboration fondée sur l’hystérésis diélectrique ». ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D’ARTS ET METIERS, 2001.

[20]. **Dudgeon, C.D.** «Engineering Materials Handbook—V. 1, Composites, ASM International», p. 91. Du Pont. “Kevlar Yarn and Fiber Properties,” DuPont Advanced Fiber Systems, Wilmington, 2 pp. 1994

[21]. **Berthelot J. M.** Matériaux composites : « comportement mécanique et analyse des structures », Edition Technique & documentation, 1999.

- [22]. **H.-H. Kausch, N. Heymans, C. J. Plummer, and P. Decroly**, « Matériaux polymères: propriétés mécaniques et physiques », 2001.
- [23]. **Karbhari V.M and Seible F.**, «Design consideration for the use of fiber reinforced polymeric composites in the rehabilitation of concrete structures, Division of structural engineering», San Diego, CA, 1998.
- [24]. **ROCHDI El Houssain** “Contribution à l’analyse du comportement mécanique de dalles en béton arme renforcées par matériaux composites” ; université Lyon 1, thèse de doctorat 2004 -232p.
- [25]. **MERDAS Abde-elghani** “Utilisation du TFC dans la réparation et le renforcement des poutres en BA” ; université de Constantine, thèse de magister 2005 – 135p.
- [26]. **El Houssain Rochdi**, « Contribution à l’analyse du comportement mécanique de dalles en béton arme renforcées par matériaux Composites »,2007.
- [27] **DJELLAD Zohra Amal** "Contribution à l’étude des dalles renforcées par composites"  
Université de tizi ouzou, thèse de magister 2015
- [28] **Jean PERCHAT et Jean ROUX** “Pratique du BAEL 91 cours avec exercices corrigés” ; Eyrolles, 4° édition 2002 - 466p.
- [29] **DAVIDOVICI Victor** “Formulaire du béton armé 1” mémento technique, volume 1, 2° édition ; Paris : Le Moniteur ; 1996 – 270p
-