

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJE-BOUIRA

Faculté des Sciences et des sciences appliquées

Département Génie Civil



Mémoire de fin d'études

Présenté par :

ABDI SALIM

SAADI SALIM

En vue de l'obtention du diplôme de **Master 2** en :

Filière : **Génie Civil**

Option : **Structure**

Thème :

RENFORCEMENT PARTIEL DES SALLES EN BETON PAR DES FRP

Devant le jury composé de :

MOUSSAOULF

AIT TAHAR. K

BOUAMRA.Y

BOUMAIZA.M UAMOB

Dr

Pr

Dr

Mme

UAMOB

UAMOB

UAMOB

UAMOB

Présidente

Promoteur

Co-promoteur

Examineur

Année Universitaire 2020/2021

Remerciement

En préambule à ce mémoire je remercie ALLAH de m'avoir donné la patience et le courage d'achever ce modeste travail.

Ce mémoire n'aurait pas été possible sans l'intervention et l'encouragement d'un grand nombre de personnes. Je souhaite ici les en remercier.

Je tiens d'abord à remercier très chaleureusement Monsieur AIT TAHAR ET Monsieur Bouamara qui m'ont permis de bénéficier de leur encadrement, les conseils qu'ils m'ont prodigués, la patience et la confiance qu'ils m'ont témoignées.

Mes remerciements s'étendent également à tous mes enseignants durant les années des études.

Mes remerciements s'adressent aussi au corps enseignants et à tout le personnel du département de Génie Civil, et aux membres du jury qui nous feront l'honneur de juger mon travail.

Mes remerciements à tous mes amis et mes collègues et à tous ceux qui ont participé à l'aboutissement de ce travail.

Enfin, je dédie ce travail à mes parents et à toute ma famille qui m'ont toujours soutenu.

Dédicace

C'est avec grand respect et gratitude que je tiens à exprimer toute ma reconnaissance et ma sympathie et dédier ce travail modeste à :

- ❖ Mes parents, les mots ne sauraient exprimer l'immense et profonde gratitude que je leur témoigne ici pour leur précieux soutien, pour leur patience, pour avoir crus en moi, pour leurs sourires réconfortants et pour leurs sacrifices qui m'ont permis d'atteindre cette étape dans ma vie et qu'ils m'ont jamais cessé de consentir pour mon instruction et mon bien être. Que dieu me les gardes et les protège.*
- ❖ Mes frères et mes sœurs et Toute ma famille*
- ❖ Tous mes amis surtout mon binôme.*
- ❖ Tous mes enseignants tout au long des cycles de mes études.*
- ❖ Toute la promotion 2021/2022 génie civil.*
- ❖ Tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

Résumé

Le développement du champ de fissuration dans un élément en béton produit des pertes de rigidité et de résistance. Les dalles sont des éléments porteurs de construction. Généralement ; elles sont sollicitées par flexion. La restitution de la résistance à un niveau acceptable nécessite un renforcement externe pour le cas des dalles existantes ou interne dans le cas de la conception. Les techniques récentes de renforcement par les matériaux composites sont largement développées ces dernières années eu égard aux propriétés mécaniques intéressantes de ces dernières. Une revue bibliographique assez conséquente existe dans la littérature spécialisée et beaucoup de nouveaux procédés sont proposés.

Ce travail est totalement dédié aux études numériques de l'influence du procédé de renforcement externe par les matériaux composites de nature différentes (lamelles, tissu et grille) sur la résistance mécanique et surtout le mode d'endommagement et de rupture.

Les différents résultats obtenus permettent de mettre en évidence, d'une part, l'influence de la disposition et du type de composites sur les résistances mécaniques et d'autre part sur l'économie du matériau composite fonction de la valeur caractéristique de comparaison

Mots clés : béton, dalle , composite, renforcement, simulation.

Abstract

The development of the cracking field in a concrete element produces losses of rigidity and resistance. Generally, they are stressed by bending. Restoring the resistance to an acceptable level requires external reinforcement in the case of existing slabs or internal reinforcement in the case of design. Recent reinforcement techniques using composite materials have been widely developed in recent years due to their interesting mechanical properties. A substantial bibliographical review exists in the specialized literature and many new processes are proposed.

This work is totally dedicated to the numerical studies of the influence of the external reinforcement process by composite materials of different nature (lamellas, fabric and grid) on the mechanical resistance and especially the mode of damage and rupture.

The various results obtained allow to highlight, on the one hand, the influence of the arrangement and the type of composites on the mechanical resistances and on the other hand on the economy of the composite material according to the characteristic value of comparison

Key words: concrete, slab, composite, reinforcement, simulation. Translated with www.DeepL.com/Translator (free version)

ملخص

يؤدي تطوير حقل الكراك في عنصر خرساني إلى فقدان الصلابة والمقاومة. بشكل عام ، يتم إجهادهم عن طريق الانحناء. تتطلب استعادة القوة إلى مستوى مقبول تعزيزاً خارجياً في حالة الألواح الموجودة أو التعزيز الداخلي في حالة التصميم. تم تطوير تقنيات التعزيز باستخدام المواد المركبة على نطاق واسع في السنوات الأخيرة بسبب خصائصها الميكانيكية المثيرة للاهتمام. توجد مراجعة بليوغرافية مهمة في الأدبيات المتخصصة ويتم اقتراح العديد من الأساليب الجديدة.

هذا العمل مخصص بالكامل للدراسات العددية لتأثير عملية التعزيز الخارجي بمواد مركبة ذات طبيعة مختلفة (صفائح ، نسيج وشبكة) على المقاومة الميكانيكية وخاصة نمط التلف والفشل.

تتيح النتائج المختلفة التي تم الحصول عليها تسليط الضوء ، من ناحية ، على تأثير الترتيب ونوع المواد المركبة على القوة الميكانيكية ، ومن ناحية أخرى ، اقتصاد المواد المركبة كدالة للقيمة المميزة.

الكلمات المفتاحية: خرسانة ، بلاطة ، مركب ، تسليح ، محاكاة.

Sommaire

Résumé	
Abstract	
ملخص	
INTRODUCTION GENERALE.....	2
CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES DALLES EN BETON	5
I.1 INTRODUCTION.....	5
I.2 LES DIFFERENTS CONSTITUANTS DU BETON.....	5
I.3 DEFINITION D'UN PLANCHER.....	6
I.3.1 La composition d'un plancher.....	6
I.3.2 Caractéristiques fondamentales d'un plancher.....	6
I.3.3 Classification des plancher.....	7
I.3.3.1 Les planchers à corps creux	7
I.3.3.2 Les planchers en béton armé (dalles).....	8
I.3.4 LES DALLAGES.....	11
I.4 CONCLUSION DU CHAPITRE	15
CHAPITRE II : LES TECHNIQUES DE RENFORCEMENT DES ELEMENTS EN BETON.....	17
II.1 INTRODUCTION.....	17
II.2 PRINCIPALES PATHOLOGIES DES CONSTRUCTIONS [9]	17
II.2.1 Pathologies des constructions dues aux défauts de conception et de construction....	18
II.3 LES PRINCIPALES TECHNIQUES DE REPARATION.....	24
II.3.1 Introduction.....	24
II.3.2 Principes de bases d'une réparation durable.....	24
Les causes qui conduisent à renforcer les structures	25
II.3.3 RENFORCEMENT	25
II.4 CONCLUSION DU CHAPITRE	35
CHAPITRE III : COMPORTEMENT DES DALLES RENFORCEES PAR LES COMPOSITES.....	37

III.1 INTRODUCTION	37
III.2 PRESENTATION DU LOGICIEL ABAQUS :	37
III.3 LES ETAPES DE MODELISATION	37
III.4 PRESENTATION DES VARIANTES D'ETUDE :	39
III.5 PRESENTATION DES RESULTATS : INTERPRETATION ET DISCUSSIONS:	43
III.5.1 Dalle – Témoin ‘D-Réf’	44
III.5.2 Dalle totalement renforcée ‘D- TR’	45
III.5.3 Dalle renforcée par grille composite ‘D- RG-45°’	47
III.5.4 Dalle renforcée par lamelles composites ‘D- RL’	50
III.5.5 Confrontation des résultats	52
III.6 CONCLUSION DU CHAPITRE	53
CONCLUSION GENERALE	53

Bibliographie

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES DALLES EN BETON

Figure I 1: Composition d'un plancher.	6
Figure I 2: les éléments principaux d'un plancher à corps creux. [2]	7
Figure I 3: Plancher en béton arme (dalles). [1].....	8
Figure I 4: Disposition des armatures dans les dalles. [3].....	8
Figure I 5: Les dalles champignons.[2].....	9
Figure I 6: Coupe d'une pré-dalle. [3]	9
Figure I 7: les planchers alvéolés.[2]	10
Figure I 8: Elément de plancher nervurés.[1].....	10
Figure I 9: Planchers en tôle pliée ou ondulée. [4].....	11
Figure I 10: Phases successives du comportement d'une dalle en flexion. ELHOSSAIN R. [5]	13
Figure I 11: Equilibre du parallélépipède élémentaire [6].	14

Chapitre II : Les techniques de renforcement des éléments en béton

Figure II 1: Mauvais positionnement d'un système de drainage.[10].....	18
Figure II 2: Formation de nids d'abeilles dans un élément de béton armé.	18
Figure II 3: Dégradation de pont à cause de manque d'entretien.....	19
Figure II 4: Dommages des poutres	19
Figure II 5: Dommages dus au tassement de sol.....	20
Figure II 6: Dommages de portique exposé au séisme.....	20
Figure II 9: Les dégradations associées au gel-dégel selon Pigeon.	21
Figure II 7: Pont exposé au gel/dégel.....	21
Figure II 8: Pilier de pont exposé au gel/dégel.....	21
Figure II 10: Quels exemples des structures en béton armé exposés.	21
Figure II 12: Détérioration de l'enveloppe intérieure.	22
Figure II 11: Phénomène de capillarité.	22
Figure II 13: Exemple de l'attaque par l'acide sulfurique dosé à 5% pour un béton ordinaire durant quatre mois.	22
Figure II 16: Exemples de corrosion des structures en béton armé.	23
Figure II 14: Progression de la carbonatation.	23
Figure II 15: Fissures causée par la Réaction Alkali-Silice rapporté par Mehta.[11]	23
Figure II 17: Principaux facteurs contrôlant la durabilité des réparations selon Emmons.[9].	24

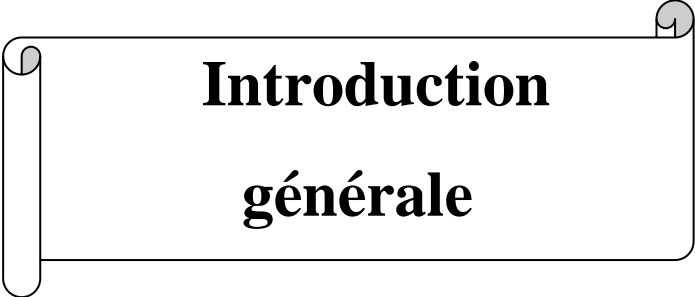
Figure II 18: schéma d'adjonction d'armature.	27
Figure II 19: Réparation de poutre par béton projeté.	28
Figure II 20: Renforcement d'un viaduc.[5]	28
Figure II 21: Différents types de réparation par précontrainte additionnelle [Fargeot B. 1997].	29
Figure II 22: Schéma sur les gainages métalliques.	29
Figure II 23: Gainage métallique.	29
Figure II 24: Renforcement de poteaux circulaires et rectangulaires avec des chemises en acier (Priestley et al. 1994 a, 1994 b)[10]	30
Figure II 25: Réparation de poutre par adjonction d'armature.....	30
Figure II 26: Chemisage en béton armée (Fukuyama et Sugano 2000)[1].	31
Figure II 27: Renforcement des poutres par matériaux composites.....	31
Figure II 28: les différents types de composites.....	32
Figure II 29: Différents constituants d'un matériau composite.	33
Figure II 31: dalle renforcée par des composites.	34
Figure II 30: Exemples de confinement des colonnes et poteaux [6].	34
Figure II 32: poutre renforcée par composites.	35
 Chapitre III : Comportement des dalles renforcées par les composites	
Figure III 1: a)Dimensions géométriques de la dalle de référence : D-Réf et b) mode de chargement.	39
Figure III 2: Dalle renforcée totalement par le tissu composite 'D-TR'	40
Figure III 3: Dalle renforcée totalement par la grille composite 'D-RG-45°' : a) Dimensions géométriques et mode. de chargement, b) disposition de la grille composite et dimensions, c) et d) détails de la grille composite.....	42
Figure III 4: Dalle renforcée totalement par des lamelles composites 'D-RL' : a) Vue de la dalle renforcée, b) détails des lamelles composites.....	42
Figure III 5: Courbe Force – déplacement de la dalle témoin.....	44
Figure III 6: Cartographie des contraintes, déformations et déplacements : D-Ref.....	45
Figure III 7: Courbe Force – déplacement de la dalle totalement renforcée D-TR.	45
Figure III 8: Cartographies des contraintes, déformations et déplacements de la dalle totalement renforcée par les composites : D-TR.....	46
Figure III 9: Courbe Force – déplacement de la dalle totalement renforcée D-RG- 45.....	47
Figure III 10: Cartographies des contraintes, déformations et déplacements de la dalle renforcée par la grille composite : D-RG- 45°.	49

Figure III 11: Courbe Force – déplacement de la dalle totalement renforcée D-RL.	50
Figure III 12: Cartographies des contraintes, déformations et déplacements de la dalle renforcée par des lamelles composites : D-RL ^o	51

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II : Les techniques de renforcement des éléments en béton

Tableau II 1: Exemples de matériaux composites.	32
Tableau II 2: comparaison qualitative entre fibres.	33



**Introduction
générale**

Introduction générale

Les dalles sont considérées comme des éléments porteurs dans la structure d'un bâtiment. Durant leur durée de vie, elles subissent des dégradations qui nécessitent des opérations de réparation et de renforcement pour continuer à assurer leur fonction. Le recours aux composites pour renforcer les dalles en béton est une solution intéressante vu les avantages qu'offrent les composites en termes de résistance.

L'analyse du comportement des dalles en béton renforcées par des composites sollicitées en flexion est donc un thème très actuel. Les dégradations des constructions anciennes et même parfois nouvelles montrent clairement l'importance du renforcement pour redonner une certaine résistance et une rigidité à la dalle et pour améliorer son comportement vis à vis de la flexion et du poinçonnement.

Notre projet de recherche s'inscrit dans le cadre de développement des techniques de renforcement des éléments de structures en béton par les matériaux composites, en proposant des solutions innovantes de renforcement et de les comparer aux autres existantes afin de mettre en évidence l'efficacité de la technique de renforcement externe des dalles par des composites. A cet effet, des simulations numériques à base des éléments finis sont réalisés pour comparer les résistances et le mode d'endommagement et de rupture des différentes variantes proposées et étudiés.

Plusieurs variantes (surfaces renforcées) sont considérées.

- Dalle en béton considérée comme référence
- Dalle renforcée totalement par les composites FRP
- Dalle renforcée par une grille composites inclinée à 45°
- Dalle renforcée par des lamelles composites disposées au centre de la dalle en croix

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

Le premier chapitre est totalement consacré à la synthèse bibliographique sur les dalles en béton regroupant l'ensemble des procédés de réalisation de différents planchers, afin de mener à un choix judicieux et adapté à son bâtiment autant dans le coût, l'esthétisme et les moyens mis en œuvre à la réalisation.

Dans le deuxième chapitre, on présente les techniques de renforcement dans Les éléments en bétons les solutions techniques de renforcement, en particulier par les matériaux

composites, proposées par quelques chercheurs. L'analyse critique nous a permis de mettre en évidence l'intérêt et l'actualité de notre recherche.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des techniques de renforcements considérées dans ce travail de recherche et l'analyse des différents résultats obtenus par la simulation numérique à base des éléments finis. Une étude comparative est menée pour mettre en évidence l'intérêt de chaque variante de renforcement considérée par rapport aux autres techniques.

Le mémoire est terminé par des conclusions générales qui débouchent sur un certain nombre de recommandations pratiques dans la perspective de poursuivre ce travail.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top. The text is centered within the horizontal strip.

**Chapitre I : Synthèse bibliographique
sur les dalles en béton**

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES DALLES EN BETON

I.1 Introduction

Le béton est le matériau de construction par excellence. Il est composé d'un liant (ciment ou chaux), de l'eau, de sable, des granulats et des adjuvants. Les propriétés mécaniques sont directement liées à la nature, les pourcentages des constituants, le malaxage et la mise en œuvre.

I.2 Les différents constituants du béton

a) Les ciments

Les ciments sont des poudres fines, composés essentiellement de silicates de chaux, d'alumine et de fer. Le ciment utilisé en Algérie est le ciment CPJ de classe de résistance 32.5 ayant une résistance ordinaire au jeune âge, est identifiée par ciment CPJ - CEM II/ 32.5, c'est le constituant qui va réagir chimiquement avec l'eau, devenir résistant, et lier tous les ingrédients. le ciment peut être stocké, soit en sacs, soit en vrac dans des silos.

b) Les Granulats

Les granulats sont des graviers et des sables. Les graviers doivent avoir une bonne granulométrie dans le diamètre varie du plus petit au plus gros. Ils peuvent être : Naturels roulés ou naturels concassés. ils sont anguleux et durs. Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Ils peuvent être également : Naturels roulés ou naturels concassés. Les granulats vont former une disposition plus ou moins ordonnée qui va conférer au béton sa résistance. C'est le ciment hydraté qui va « coller » les granulats. Le sable permet de remplir les trous qui subsistent entre les gros granulats.

- **NB** : les granulats et sables peuvent être de nature siliceuse ou silico-calcaire dans le cas des naturels et des basaltes, porphyres et quartzites pour les concassés.

c) L'eau de gâchage

Le «gâchage» consiste à ajouter de l'eau au ciment lors du malaxage. La résistance finale d'un béton dépend du rapport E/C (masse d'eau / masse de ciment) du mélange. Le rapport E/C d'un béton courant varie entre 0,4 (qualité supérieure) et 0,6 (béton de fondation). L'eau doit être propre et ne contient aucun élément nocif qui influencerait défavorablement le durcissement ou la corrosion des armatures ; l'eau sert à hydrater le ciment et rendre le mélange malléable.

d) Les adjuvants

Les adjuvants sont ajoutés au béton en faible quantité pour améliorer certaines propriétés ou qualités souhaitées soit sur béton frais soit sur béton durci. Il existe plusieurs types d'adjuvants.

On citera :

- ✓ les plastifiants :(améliorent la maniabilité et l'ouvrabilité)
- ✓ Entraîneurs d'air :(créant dans le béton un très grand nombre de petites bulles ils améliorent essentiellement : la plasticité et l'ouvrabilité, la résistance au gel du béton durci).
- ✓ Accélérateurs :(agissent chimiquement en augmentant la vitesse d'hydratation du ciment.
- ✓ hydrofuges :(améliorent l'étanchéité du béton).

I.3 Définition d'un plancher

Les différents niveaux d'une construction sont communément appelés 'planchers'. Ils constituent l'élément plan horizontal sollicité en flexion/

Il faut distinguer la dalle

- du dallage : s'appuie directement sur une couche de forme sur toute sa surface, et transmet directement au sol de fondation les charges qu'il reçoit.
- de la chape : destinée à compléter le gros œuvre sur lequel elle repose, et à recevoir un revêtement.

I.3.1 La composition d'un plancher

Le plancher est formé de 3 parties essentielles décrites dans la Figure I .1 ci dessous:

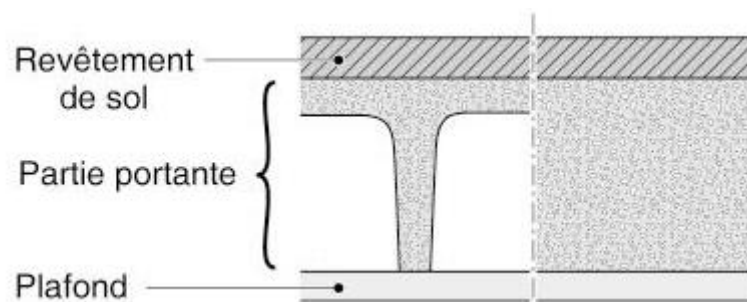


Figure I 1: Composition d'un plancher.

I.3.2 Caractéristiques fondamentales d'un plancher

Un plancher doit remplir un rôle structurel et un rôle de protection. Il doit pouvoir répondre à des exigences techniques particulières, on citera:

- robustesse et durabilité.
- liaison avec les éléments porteurs verticaux
- étanchéité à l'air, au feu et aux effractions.
- Isolation thermique et acoustique
- Facilitation du passage de gaines techniques et de tuyauteries.
- aspect esthétique.

I.3.3 Classification des plancher

I.3.3.1 Les planchers à corps creux

On distingue :

- les corps creux ou "entrevous" qui servent de coffrage perdu (ressemblent à des parpaings), leur rôle consiste au départ à supporter le poids de la dalle de compression en phase de coulage. Mais on peut aussi leur octroyer un rôle d'isolant ;
- les poutrelles en béton armé ou précontraint qui assurent la tenue de l'ensemble et reprennent les efforts de traction grâce à leurs armatures, elles supportent le plancher et transmettent ses charges à la structure porteuse ;
- une dalle de compression armée ou "hourdis" coulée sur les entrevous qui reprend les efforts de compression. Le plancher est entouré par un chaînage horizontal. Elle permet de réduire et de limiter les pressions exercées sur la structure en répartissant les charges sur l'ensemble de la structure. [1]

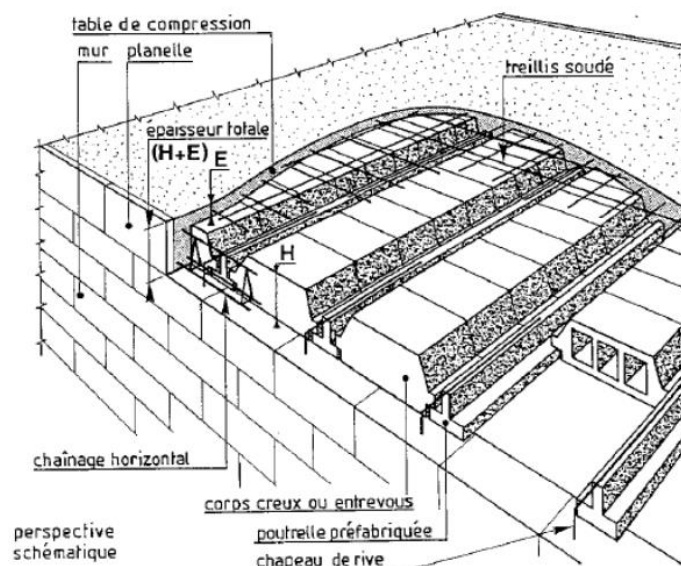


Figure I 2: les éléments principaux d'un plancher à corps creux. [2]

I.3.3.2 Les planchers en béton armé (dalles)

Les planchers en béton armé sont de plus en plus utilisés. Le béton armé permet de réaliser des formes complexes, variées et économiques en assurant une excellente liaison entre les différents éléments (Figure I3) grâce à son caractère monolithique.

Les planchers en béton armé peuvent être entièrement coulés sur place, semi-préfabriqués ou tout simplement entièrement préfabriqués. [1] [2]

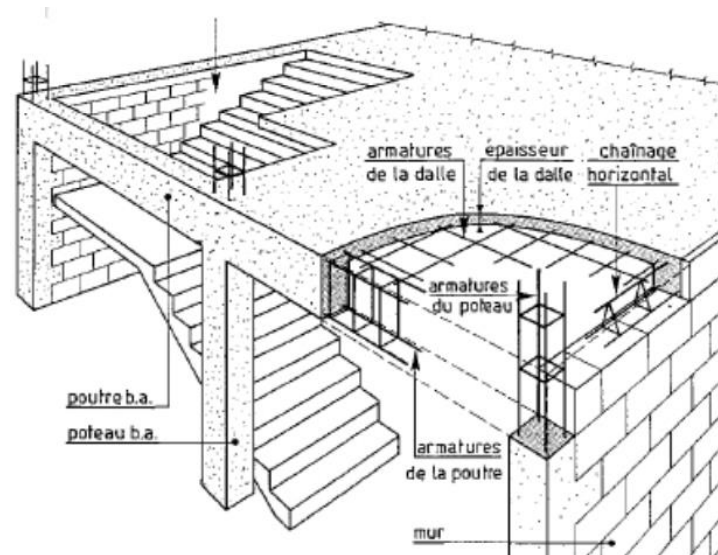


Figure I 3: Plancher en béton armé (dalles). [1]

Ils existent plusieurs types de dalles, on citera :

- Dalles coulées en place

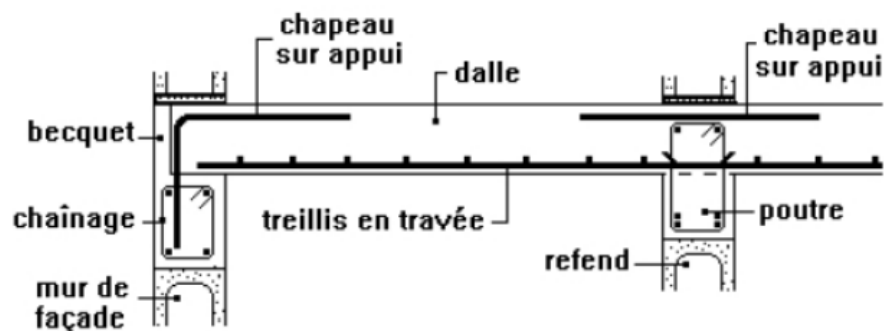


Figure I 4: Disposition des armatures dans les dalles. [3]

- Dalles champignons

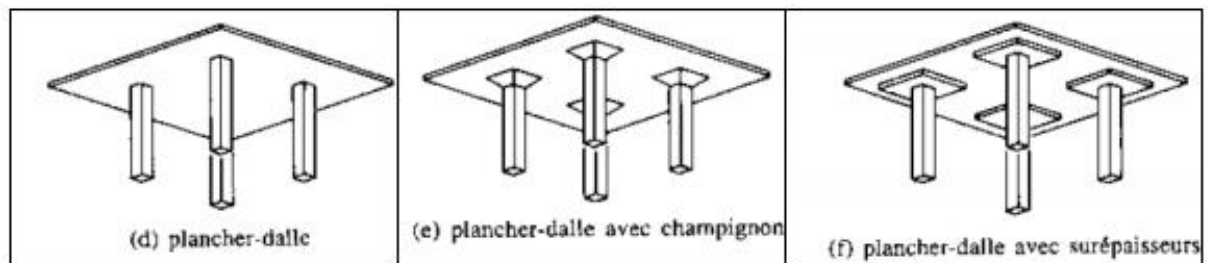
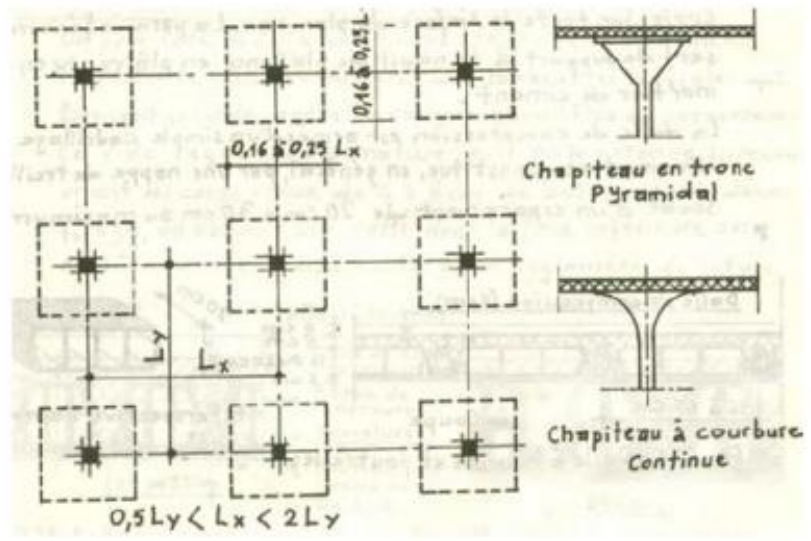


Figure I 5: Les dalles champignons.[2]

- Les planchers à pré-dalles

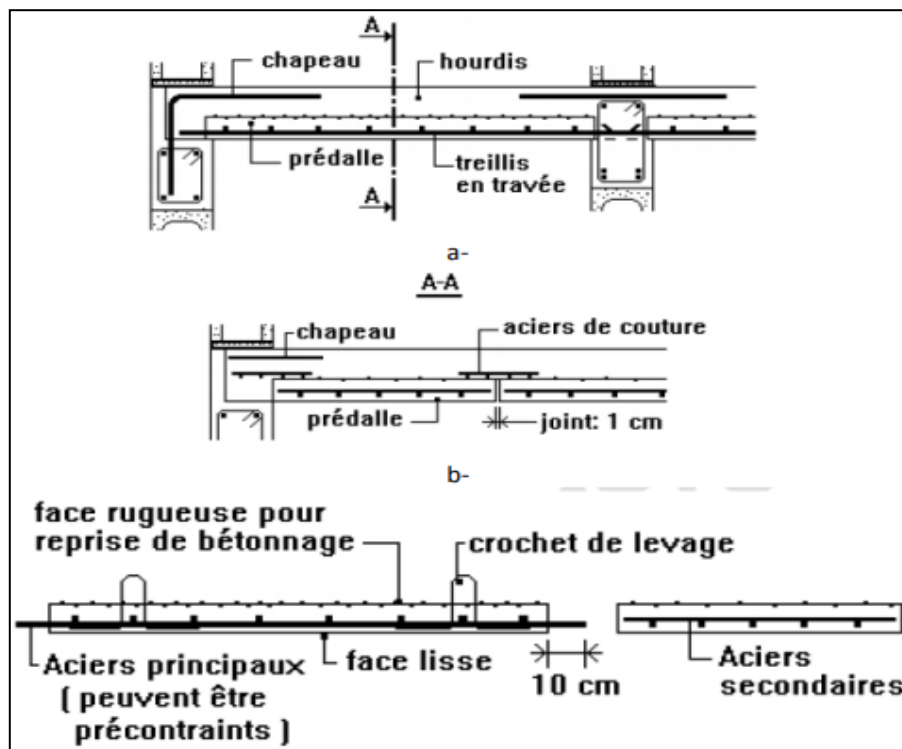


Figure I 6: Coupe d'une pré-dalle. [3]

- Les planchers alvéolés

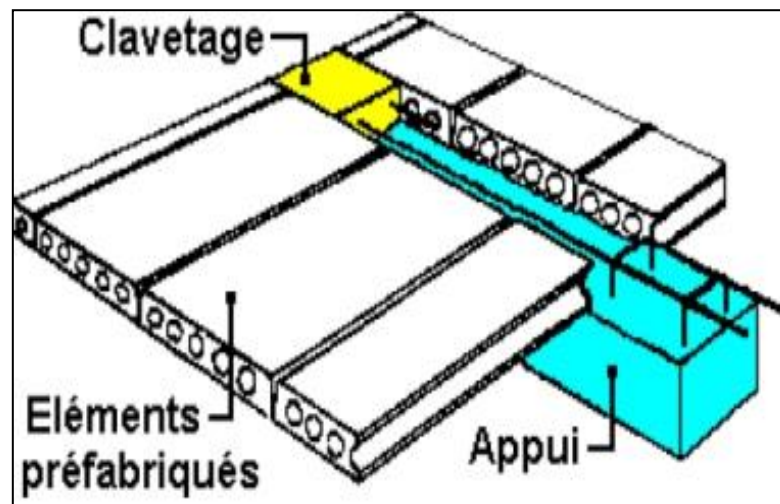


Figure I 7: les planchers alvéolés.[2]

- Les plancher nervurés

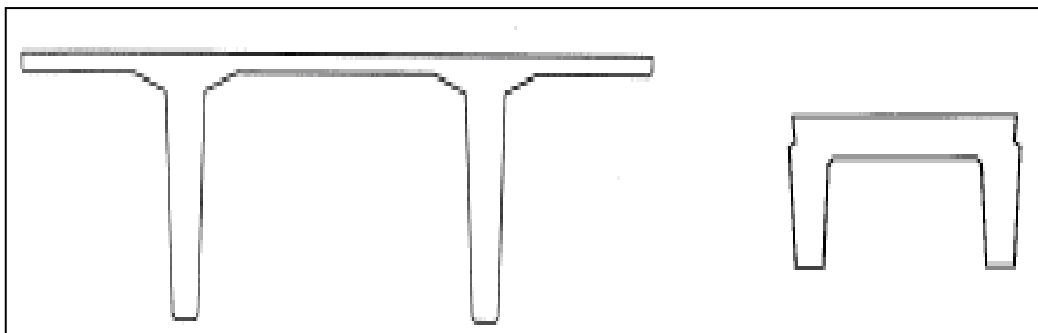


Figure I 8: Élément de plancher nervurés.[1]

- Les planchers métalliques

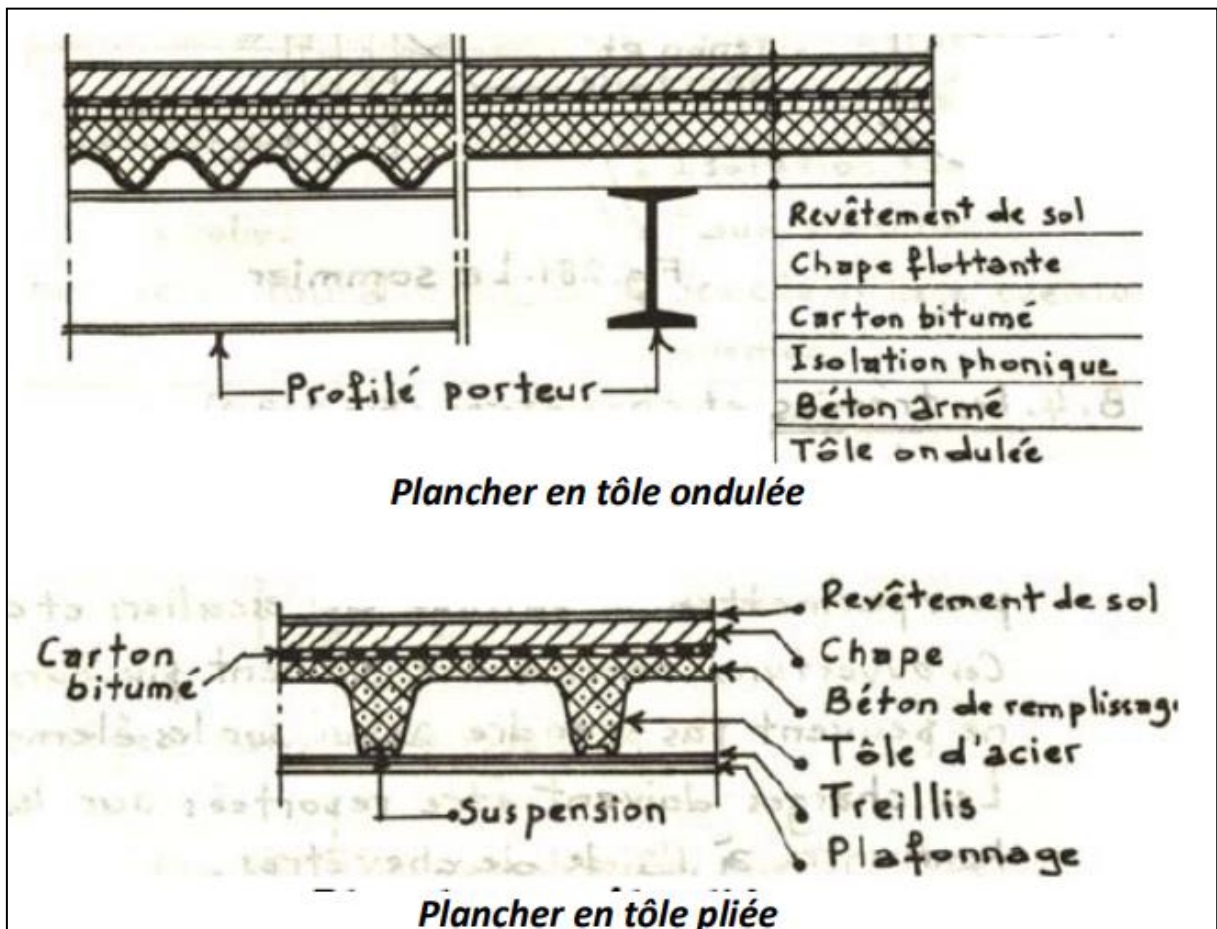


Figure I 9: Planchers en tôle pliée ou ondulée. [4]

I.3.4 LES DALLAGES

Le rôle principal des dallages est d'isoler la construction de l'humidité provenant du sol et de limiter les déperditions thermiques. Pour des constructions en maçonnerie légères, le dallage pourra avoir un rôle de fondation pour tout l'ouvrage. Dans ce cas, la dalle sert aussi d'assise aux murs périphériques et aux refends. Il faut alors prévoir des armatures de liaison.

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. (ELHOUSSAIN R). [5]

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

- Les dalles portant dans une direction (dalles sur deux appuis). Ces dalles ont un comportement unidirectionnel et se comportent essentiellement comme des poutres, et se dimensionnent selon les mêmes principes.
- Les dalles portant dans deux directions (dalles sur quatre appuis). Ces dalles ont un comportement bidirectionnel et transmettent la charge à laquelle elles sont soumises dans les deux directions du plan en direction des appuis,
- Les dalles portant sur des appuis ponctuels, ces appuis sont généralement constitués de colonnes en béton ou en acier. 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. Le comportement flexionnel des dalles comprend plusieurs phases qu'il est important de distinguer. (ELHOUSSAIN R). [5]

a) Phases de comportement

✓ Phase élastique linéaire

Dans cette première phase de chargement, la dalle se comporte pratiquement comme une structure douée d'un comportement élastique linéaire.

✓ Phase de fissuration

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

✓ Phase d'écoulement

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

✓ Phase de rupture

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

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 cotés, solution de Maurice Lévy pour les dalles articulées sur deux cotés 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.

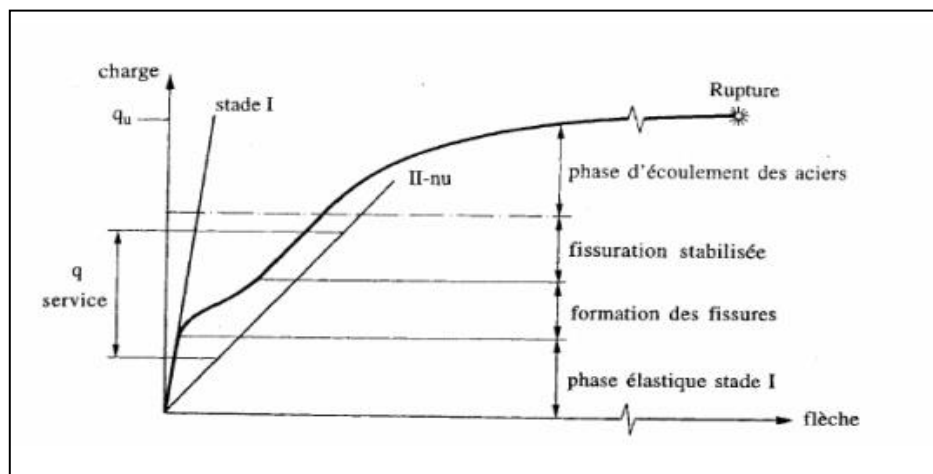


Figure I 10: Phases successives du comportement d'une dalle en flexion. ELHOSSAIN R. [5]

b) Théorie élastique des dalles

La théorie élastique des dalles a été développée par Poisson en 1829, est décrite dans plusieurs ouvrages [6], [7], [8].

La théorie élastique est applicable pour les dalles pour lesquelles les déplacements verticaux w sont petits par rapport à l'épaisseur h de la dalle sont considérées.

Les hypothèses suivantes sont donc valables :

- Aucune déformation du feuillet moyen de la dalle
- Aucun effet causé par l'effort tranchant sur les déplacements
- Les efforts normaux perpendiculaires à la dalle sont négligés

Tenant compte de toutes ces hypothèses, on peut exprimer toutes les contraintes en fonction du déplacement w . L'expression pour w doit satisfaire une équation différentielle partielle linéaire laquelle, avec les conditions au bord, défini w de manière unique.

Les expressions des courbures sont données par les équations I.1 :

$$\chi_x = -\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \qquad \chi_y = -\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} = \frac{\partial \varphi}{\partial y} \qquad (I.1)$$

Les valeurs correspondantes pour les moments de flexion sont données par l'équation I.2 :

$$\begin{aligned} M_x &= D. (\chi_x + \eta \chi_y) = -D \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \eta \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) \\ M_y &= D. (\chi_y + \eta \chi_x) = -D \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \eta \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right) \\ M_{xy} &= D. (1 - \eta) \chi_{xy} = -D(1 - \eta) \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \end{aligned} \qquad (I.2)$$

Où $D = \frac{Eh^3}{12(1-\eta^2)}$ est la rigidité en flexion et η le module de Poisson.

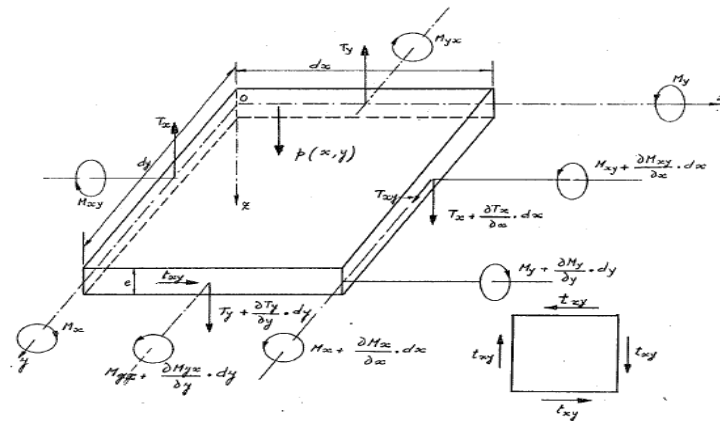


Figure I 11: Equilibre du parallélépipède élémentaire [6].

D'après la figure I.11 qui représente l'équilibre du parallélépipède élémentaire sous l'effet des forces et moments qui le sollicitent, on remarque que toutes les forces sont parallèles à l'axe z , et tous les couples sont représentés par des vecteurs perpendiculaires à cet axe. Donc, les six équations de la statique se réduisent à 3, On a l'équation de projection parallèlement à oz donnée par I.3 et I.4 et les équations de moment autour des axes ox et oy .

En supposant que le poids propre de la plaque est inclus dans la valeur de la charge 'p', l'équation de projection parallèlement à oz s'écrit :

$$\frac{\partial T_x}{\partial x} \cdot dx \cdot dy + \frac{\partial T_y}{\partial y} \cdot dy \cdot dx + p \cdot dx \cdot dy = 0 \qquad (I.3)$$

Ou :

$$\frac{\partial T_x}{\partial x} + \frac{\partial T_y}{\partial y} + p = 0 \quad (\text{I.4})$$

En considérant tous les moments par rapport aux axes des x et des y de toutes les forces agissantes sur l'élément et en négligeant les termes de second ordre, on peut écrire :

$$\frac{\partial M_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial M_y}{\partial y} + T_y = 0 \quad (\text{I.5})$$

$$\frac{\partial M_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial M_x}{\partial x} - T_x = 0 \quad (\text{I.6})$$

On peut obtenir une équation d'équilibre unique en fonction uniquement des composantes M_x , M_y et M_{xy} , en éliminant les efforts tranchants T_x , T_y entre les équations (I.4), (I.5), (I.6) soit :

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} = -p \quad (\text{I.7})$$

Si on substitue les expressions (1.2), pour M_x , M_y et M_{xy} dans (I.7) on obtient :

$$\nabla^4 \omega = \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} = \frac{p}{D} \quad (\text{I.8})$$

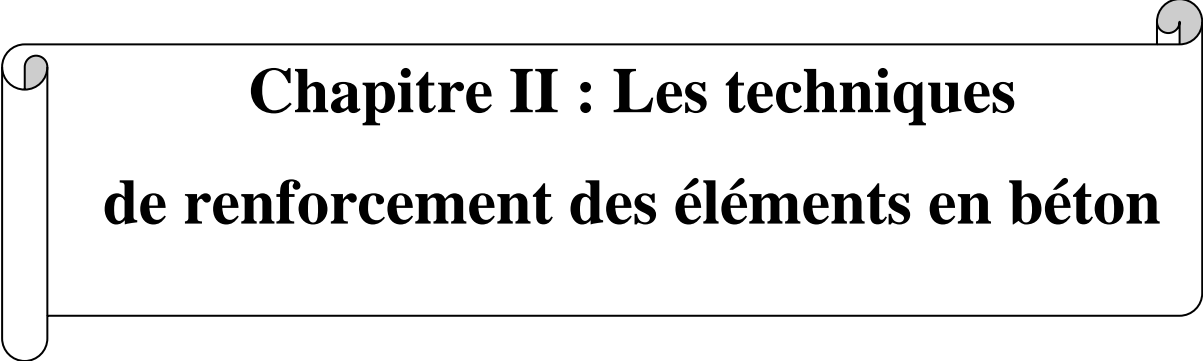
L'équation différentielle (I.8) gouvernant le déplacement transversal d'une plaque est du quatrième ordre. Il s'ensuit que, le long du bord de la plaque, il faut et il suffit d'imposer deux conditions pour déterminer ω . Dans le cas d'une dalle simplement appuyée sur les quatre côtés, les conditions aux limites sont traduit par :

$$(\omega)_{x=a} = 0 \quad \text{et} \quad (M_x)_{x=a} = 0 \quad (\text{I.9})$$

I.4 Conclusion du chapitre

Le présent chapitre a porté sur la présentation et définitions des différents types de dalles en béton couramment utilisées dans les constructions. Ainsi, nous avons présenté de manière succincte les planchers bétons qu'ils soient réalisés en place ou préfabriqués, mais encore les planchers mixtes.

Leur comportement mécanique à travers la présentation des différentes phases de comportement ainsi que les hypothèses de base et les expressions mathématiques permettant leur calcul sont succinctement rappelés.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both with rounded ends and a slight shadow effect.

Chapitre II : Les techniques de renforcement des éléments en béton

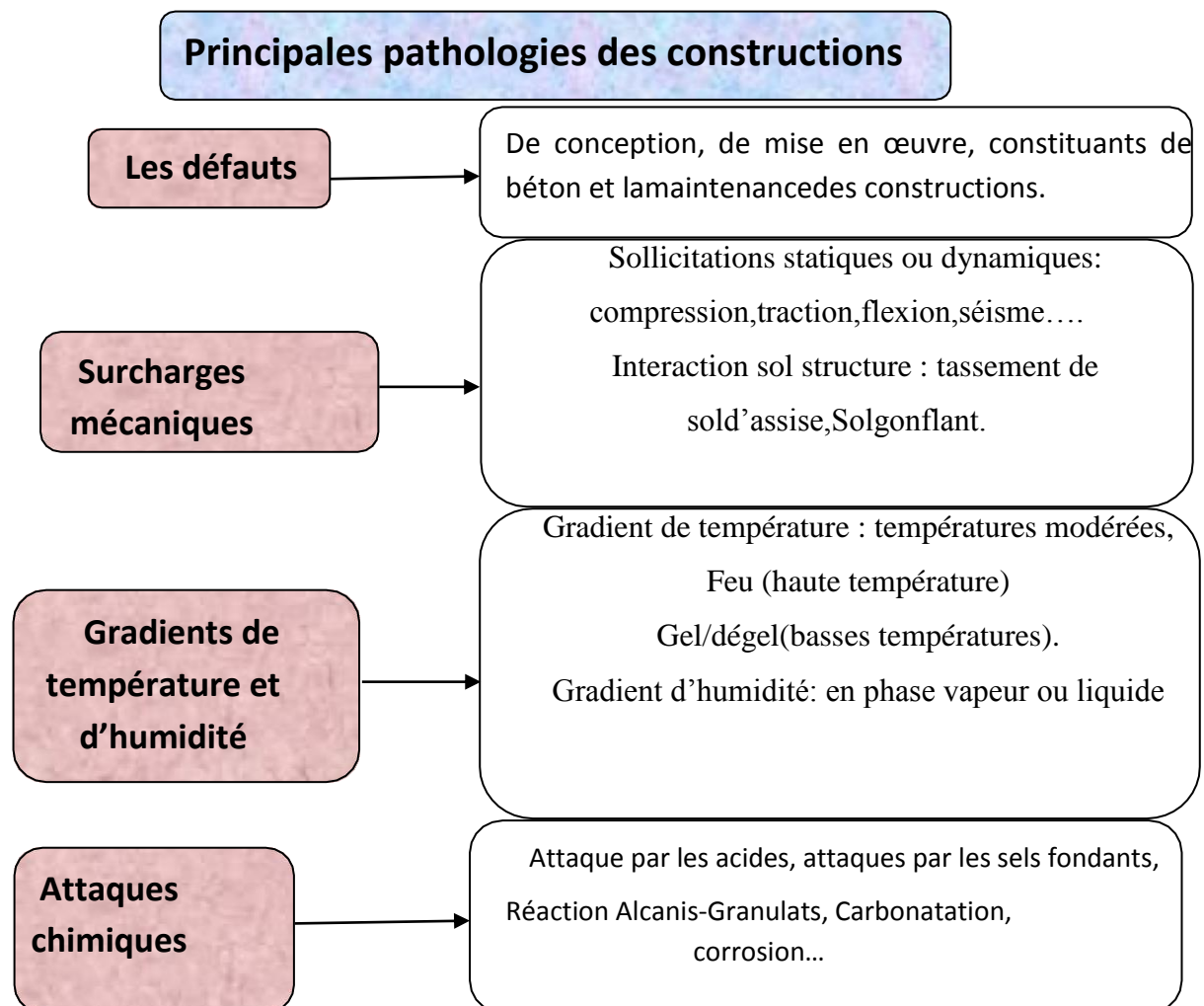
Chapitre II : Les techniques de renforcement des éléments en béton

II.1 Introduction

Avant de procéder à toute réparation, il est indispensable de procéder à un diagnostic et de rechercher les causes des dégradations lorsque celles-ci n'apparaissent pas de façon évidente. En effet, cette étape est nécessaire pour le choix de la réparation optimale qui peut être définie comme la réparation la plus durable.

L'objet du présent chapitre dans un premier lieu est de dresser un panorama de l'essentiel des pathologies affectant les ouvrages en béton en les classant en fonction de leur origine chimique, physique ou mécanique et sans avoir, toutefois, l'ambition d'être exhaustif tant les situations des ouvrages existants peuvent être diverses, et dans un second lieu est d'expliquer les différentes méthodes de renforcements à adopter à fin de remédier à ces problèmes.

II.2 Principales Pathologies des constructions [9]



II.2.1 Pathologies des constructions dues aux défauts de conception et de construction

✓ Défauts de conception

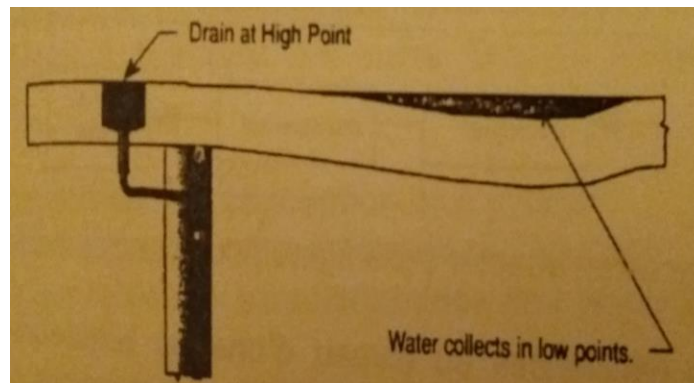


Figure II 1: Mauvais positionnement d'un système de drainage.[10]

✓ Défauts de réalisation : mauvais coffrage et coulage du béton

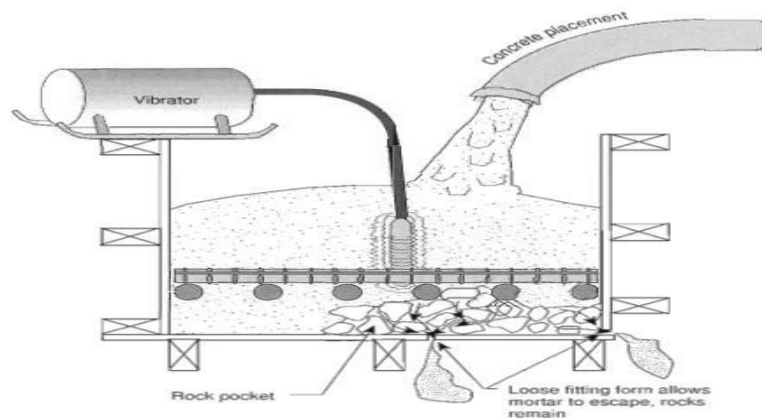


Figure II 2: Formation de nids d'abeilles dans un élément de béton armé.

✓ Défauts des matériaux de construction

La qualité des matériaux de construction entrant dans la fabrication du béton caractérise non seulement ces propriétés physico-écaniques mais aussi leur durabilité aux différentes

agressions physico-chimiques. Donc pour fabriquer une structure durable, il faut utiliser des matériaux durables.

✓ Manque d'entretien

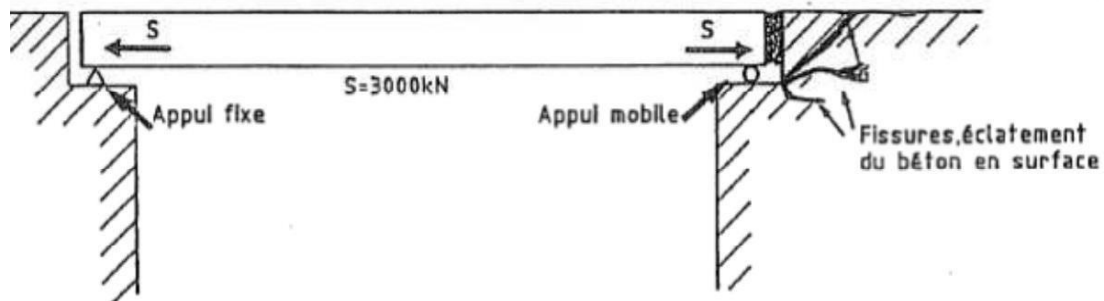
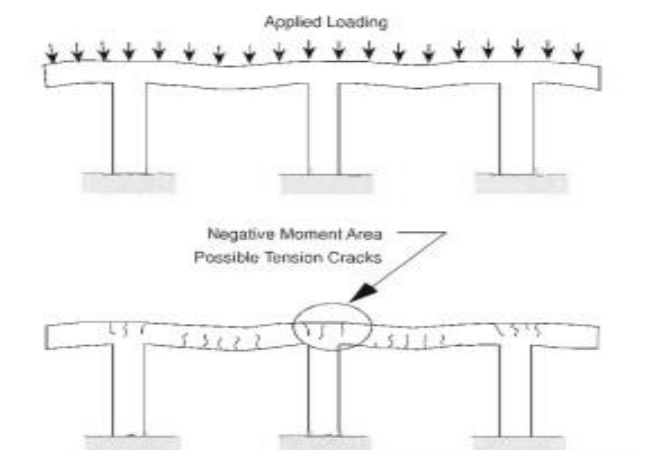


Figure II 3: Dégradation de pont à cause de manque d'entretien.

✓ Dommages de béton dus aux surcharges mécaniques

Les structures en béton armé sont calculées pour résister à toutes les surcharges mécaniques usuelles ou accidentelles (poids propre, surcharge d'exploitation, séisme, poussée de sol, choc sous explosions modérées). Malheureusement, on ne peut pas éliminer totalement l'apparition des dommages dus aux sollicitations mécaniques quel que soit la qualité de conception effectuée, à cause que les méthodes de calcul des constructions sont approchées. En outre, les sollicitations mécaniques ont des interactions avec d'autres sollicitation comme les conditions climatiques environnementales, interaction sol-structure et les actions imprévues.

✓ Poutre continue



Poutre continue sous charge uniformément répartie (sollicité en flexion).

Fissures dans les zones de moments fléchissant max au niveau de l'appui et mi-travées.

Figure II 4: Dommages des poutres Continues sollicitées en flexion.

✓ **Interaction sol-structure**

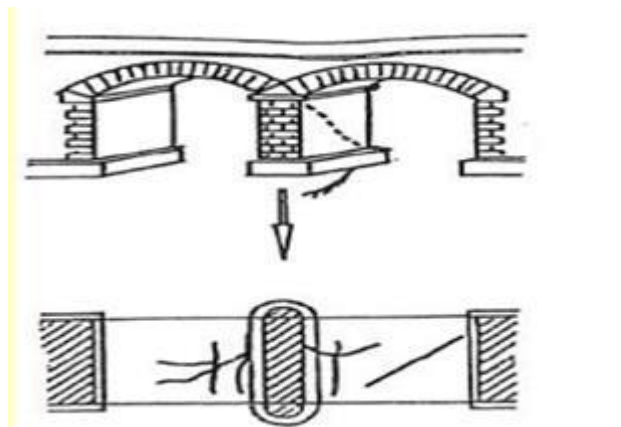


Figure II 5: Dommages dus au tassement de sol.

Le tassement de sol d'assise de pilier central du pont exerce des contraintes sur le pilier et le plancher et génère des fissures →

Donc, Il y a un risque de rupture du pont si nous n'intervenons pas rapidement pour résoudre ce problème

✓ **Dommages dus au séisme**

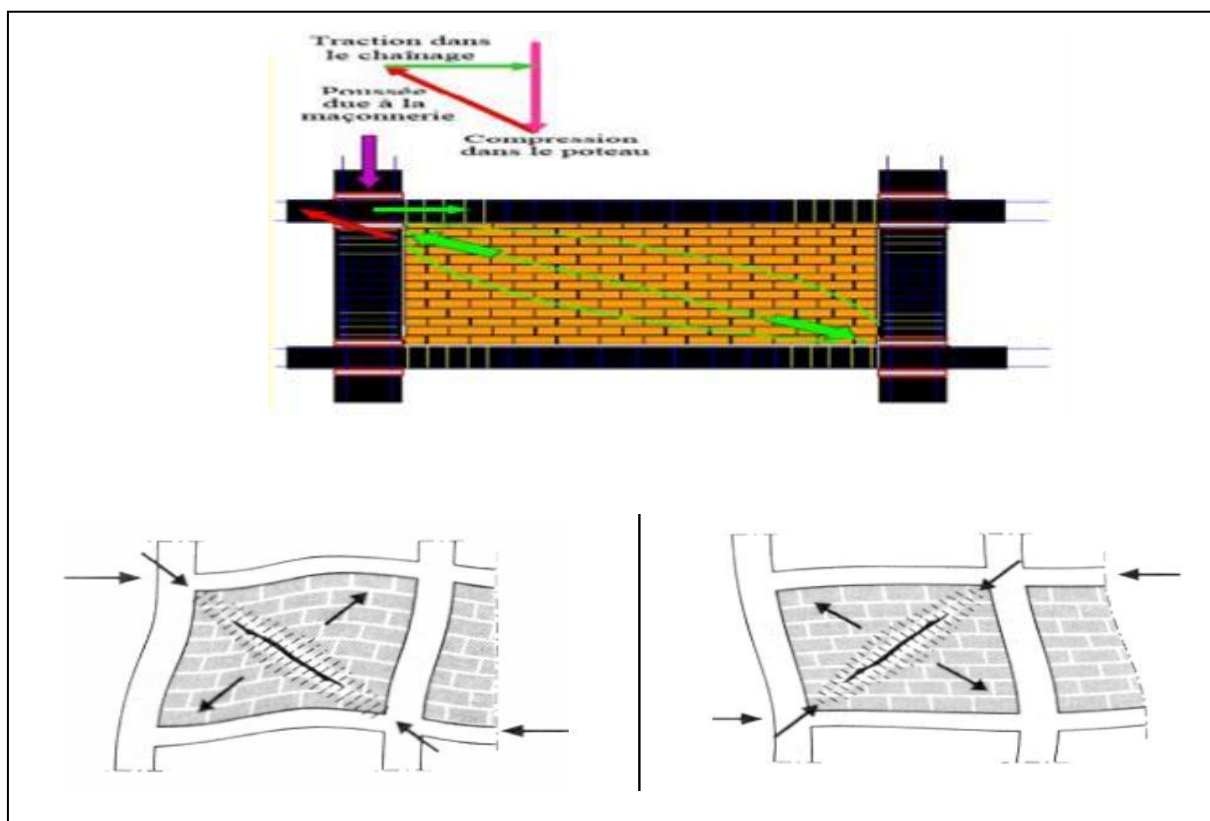


Figure II 6: Dommages de portique exposé au séisme.

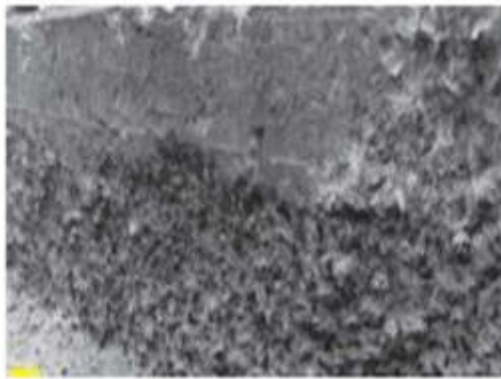
✓ **Dégradations du Béton dues aux gradients de température et d'humidité**



Figure II 7: Pont exposé au gel/dégel.



Figure II 8: Pilier de pont exposé au gel/dégel.



(a)



(b)

Figure II 9: Les dégradations associées au gel-dégel selon Pigeon.

✓ **Hautes températures (Feu)**



Tunnel Sous la Manche en phase de réparation à la suite de l'incendie de Septembre 2008, [Lejd, 2008].



Tour Windsor (Madrid, Espagne, fév 2005)

Figure II 10: Quels exemples des structures en béton armé exposés.

✓ Effet d'humidité: Capillarité

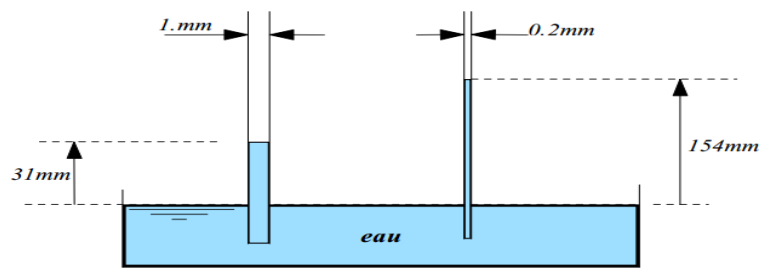


Figure II 11: Phénomène de capillarité.



Figure II 12: Détérioration de l'enveloppe intérieure.

✓ Détériorations du béton dues aux attaques chimiques



Figure II 13: Exemple de l'attaque par l'acide sulfurique dosé à 5% pour un béton ordinaire durant quatre mois.

✓ **Carbonatation de béton:**

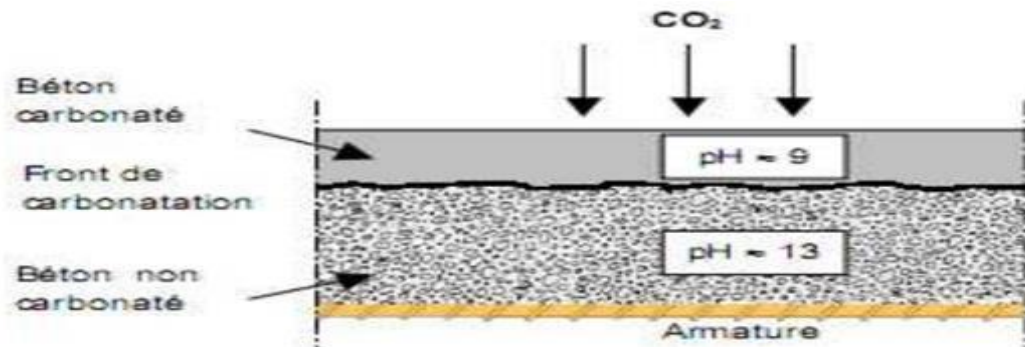


Figure II 14: Progression de la carbonatation.

✓ **Réaction alcali-granulat**

Le terme alcali-réaction désigne un ensemble de réaction chimique qui se produit entre la solution interstitielle du béton alcaline, et certaines phases, réactives des granulats. Lorsque un béton contient une concentration en alcalins excédant un seuil critique et le taux d'humidité (vers 80%), l'alcali-réaction peut provoquer durant quelques années : gonflement, fissuration et chute des performances mécaniques du béton attaqué (voir la figure ci-dessous).



Figure II 15: Fissures causées par la Réaction Alcali-Silice rapporté par Mehta.[11]

✓ **Corrosion**

Pile de pont attaqué par la corrosion



Poutre de tablier



Figure II 16: Exemples de corrosion des structures en béton armé.

II.3 Les principales techniques de réparation

II.3.1 Introduction

Le bon choix du matériau de réparation est prépondérant pour la durabilité de la réparation. Une attention particulière doit être accordée à la préparation des surfaces, aux techniques d'application et de mûrissement et au contrôle de qualité [10,12].

II.3.2 Principes de bases d'une réparation durable

Les principaux facteurs contrôlant la durabilité des réparations et les différents paramètres de compatibilité sont présentés sur la figure II.17 ci dessous.

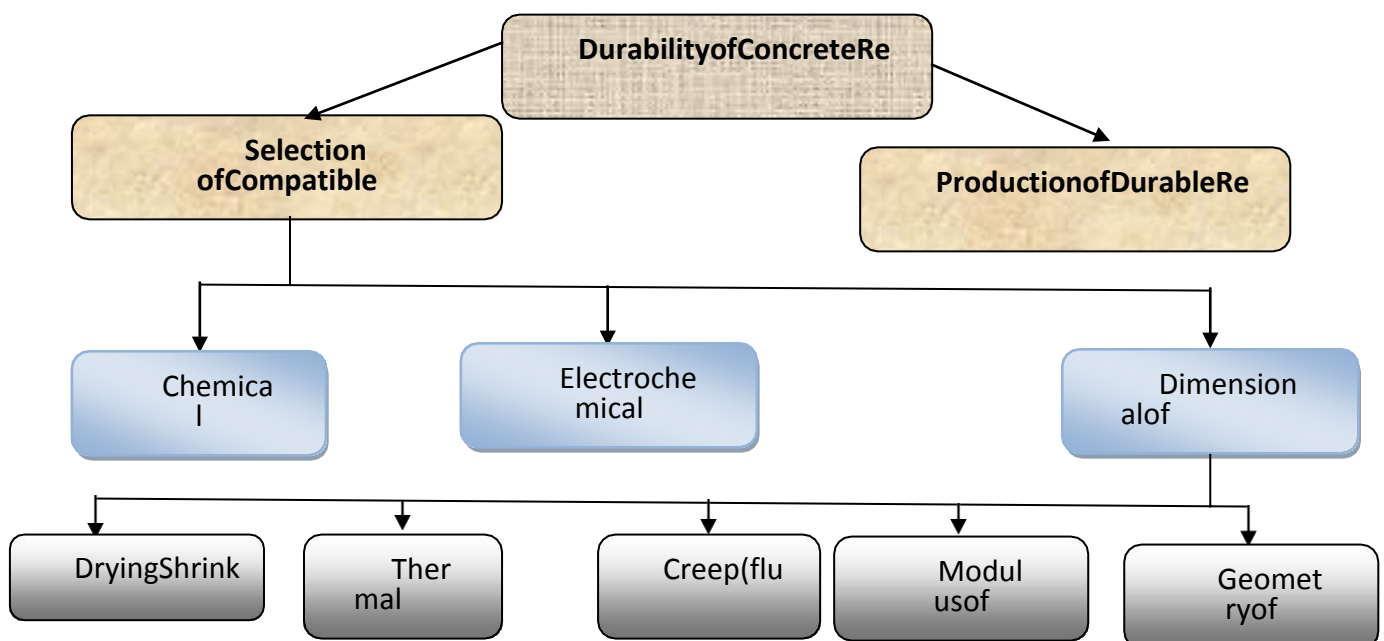


Figure II 17: Principaux facteurs contrôlant la durabilité des réparations selon Emmons.[9]

Suivant l'importance et les causes des désordres, les différentes techniques sont résumées ci – après :

- Les traitements de surface: ragréages et injection des fissures;
- La protection du béton et des armatures;
- La régénération des matériaux;
- L'ajout de forces(ou de déformations);
- L'ajout de matière.

Les causes qui conduisent à renforcer les structures

Les causes qui conduisent à renforcer la structure sont nombreuses, chaque cas doit être considéré comme un cas particulier, qui doit subir un traitement spécifique.

- Les causes les plus fréquentes sont :
- Accroissement des charges qui sollicitent la structure, exemple : changement d'usage de la structure, augmentation du niveau d'activité, installation de machinerie lourde dans les bâtiments industriels, etc.
- Défauts dans le projet ou dans l'exécution, exemple : une insuffisance de ferrailage, mauvaise disposition des armatures, matériaux de mauvaise qualité, dimensions insuffisantes des éléments structurels.etc.
- Rénovation des structures anciennes,
- Changement de la forme de la structure, exemple : suppression des éléments porteurs, élargissement des portées, ouverture de passages en dalles, etc.
- Dégâts dans la structure : corrosion et diminution de la section des armatures dans le béton, impacts contre la structure, incendies.
- Nécessité d'améliorer les conditions en service : limiter les déformations et les flèches, réduire l'intensité des contraintes sur les armatures, diminuer la vitesse de propagation et ouvertures des fissures.

II.3.3 RENFORCEMENT

Le renforcement permet d'augmenter les résistances ultimes et la ductilité, ce qui assurera un niveau de service acceptable dans des conditions non prévues à l'avance pendant la phase de conception et de calcul.

La technique de renforcement dépend étroitement du degré d'endommagement de l'élément. Il convient de choisir la solution technique adaptée à la pathologie à traiter, après un diagnostic complet et précis des désordres, de leurs causes et de leurs évolutions [16]. Une panoplie de techniques innovantes et efficaces est proposée dans la littérature spécialisée.

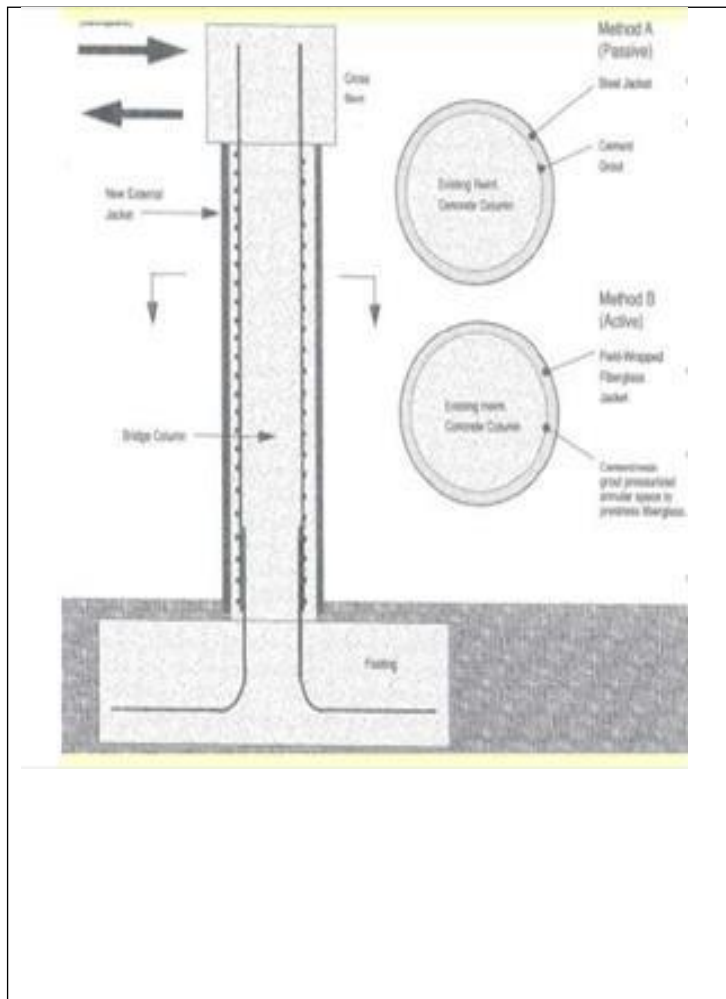
a) Les avantages du renforcement

- la résistance, la ductilité et la déformation d'un béton renforcé sont plus élevées,
- la flexibilité des composites permet de confiner des colonnes de différentes géométries,
- Le poids de l'élément renforcé par les composites est peu modifié, vu la légèreté des composites,
- L'enveloppe de composites ne modifie pas l'apparence des colonnes ou des structures,

- Certaines composites résistent très bien aux variations de température, aux cycles de gel-dégel et à l'humidité.

Exemples de renforcement

- ✓ Renforcement d'une pile de pont par confinement ou «jacketing»



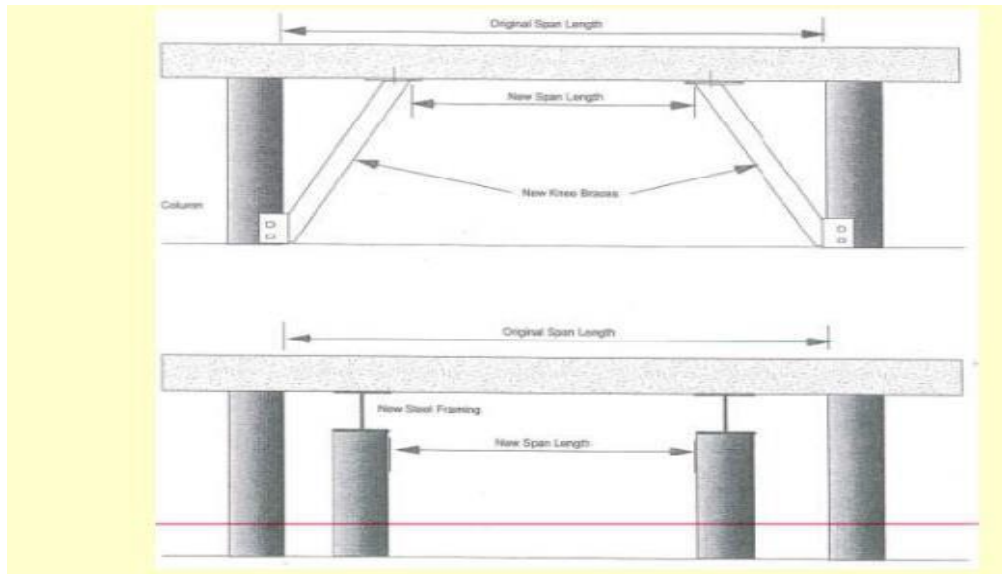
MéthodeA

- Tube métallique «jacket»
- Mortier de ciment ou Résine injectée sous pression

MéthodeB

- Bandage par tissu de fibre verre, carbone
- Résine injectée sous pression
- Augmentation de la résistance du béton
- Résistance armatures acier inchangée
- Passage de ruine «béton» fragile à ruine «acier» ductile
- Augmentation de résistance en flexion-compression
- Augmentation de ductilité

✓ **Renforcement par réduction de la portée des éléments**



✓ **Ajout d'armatures complémentaires dans des poteaux ou voiles**

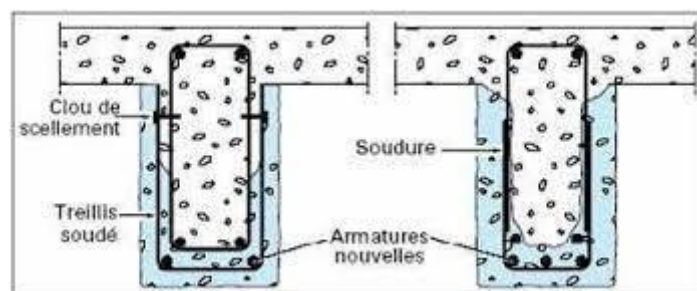
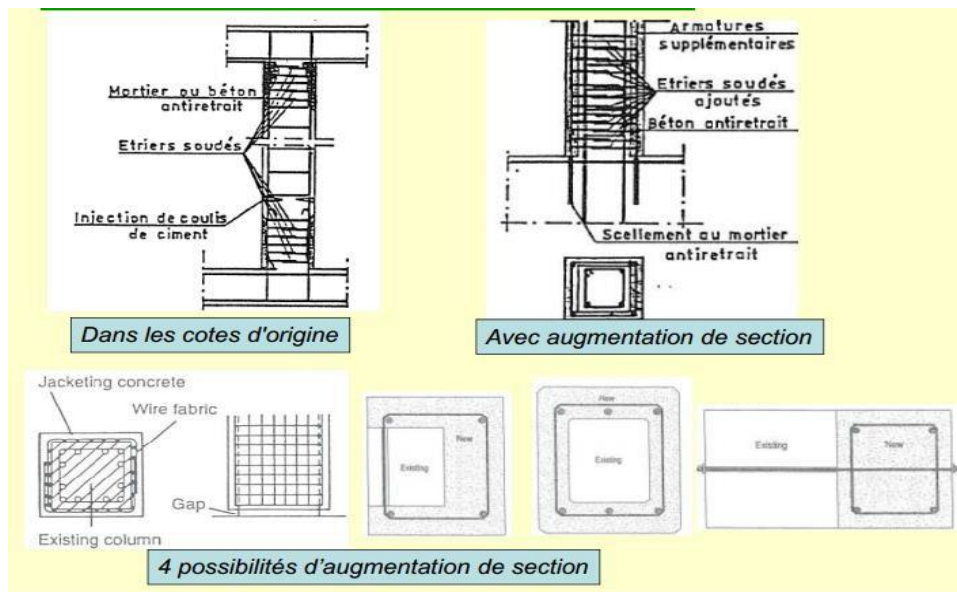


Figure II 18: schéma d'adjonction d'armature.

a. Béton projeté

La projection est réalisée soit par voie sèche, soit par voie mouillée. Le béton projeté permet de réaliser économiquement les différentes réparations. La difficulté de l'emploi de cette méthode provient essentiellement du mode d'application et de mise en œuvre (matériels, main d'œuvre et problèmes d'hygiène et de sécurité)

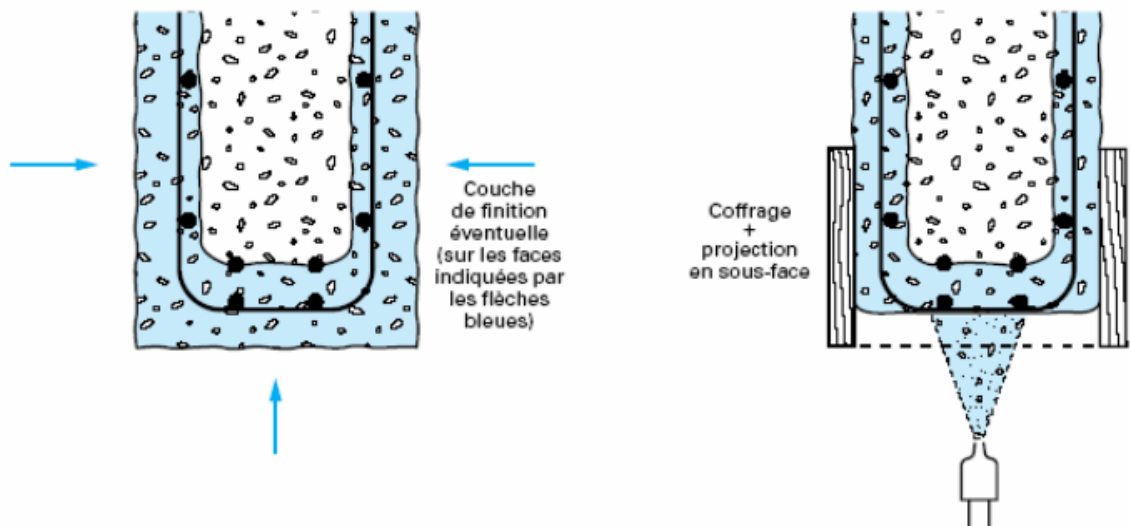


Figure II 19: Réparation de poutre par béton projeté.

✓ Tôles collées Le renforcement de structure par plats métalliques

Mieux connue sous le nom de procédé l'Hermitte, consiste à coller des plats en acier sur les faces tendues de structures en béton armé. La mise en place des tôles nécessite une très bonne préparation de chantier ainsi qu'une excellente coordination des équipes. Le collage impose un dispositif de serrage pouvant être un étaielement, un serrage par serre-joint ou un serrage par vérins plats.



Figure II 20: Renforcement d'un viaduc.[5]

✓ Précontrainte additionnelle

La précontrainte additionnelle consiste en un ajout de force dans des ouvrages existants en vue soit de leur redonner leur état de service initial, soit de leur donner un nouvel état de service. Elle permet, en effet, d'appliquer des efforts d'une intensité connue, en des points et suivant des directions bien définies, capables de s'opposer aux efforts générateurs des désordres. Cette méthode est particulièrement adaptée au renforcement en flexion et vis-à-vis de l'effort tranchant par l'emploi d'étriers actifs.

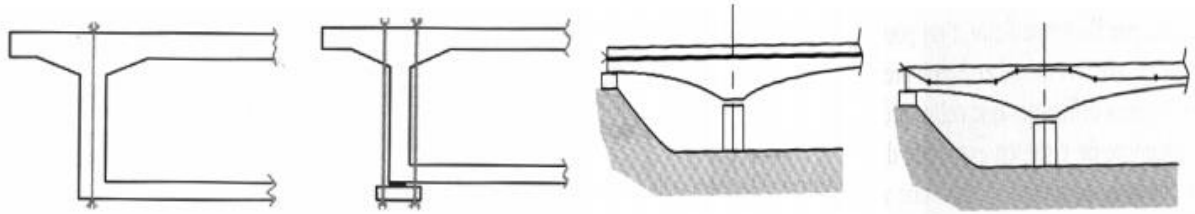


Figure II 21: Différents types de réparation par précontrainte additionnelle [Fargeot B. 1997].

✓ Gainage métallique

Le renforcement des poteaux de sections circulaires ou rectangulaires avec des chemises en acier permet d'améliorer considérablement la résistance sismique des poteaux ainsi que leur ductilité.

Cette technique est utilisée surtout sur les poteaux, elle se traduit par la réalisation d'un coffrage métallique autour du poteau. Cette méthode est généralement utilisée dans le cas d'écrasement localisé et elle peut être associée à une injection. Le poteau est ensuite recouvert par un enduit de ciment.

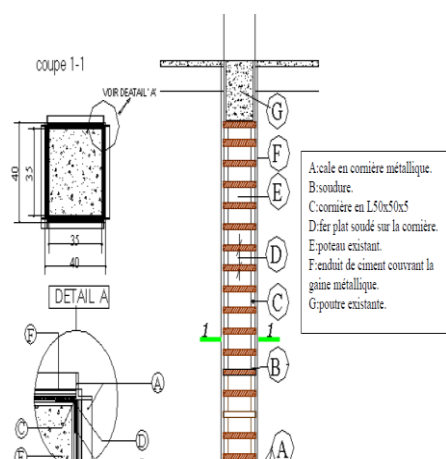


Figure II 22: Schéma sur les gainages métalliques.

Figure II 23: Gainage métallique.

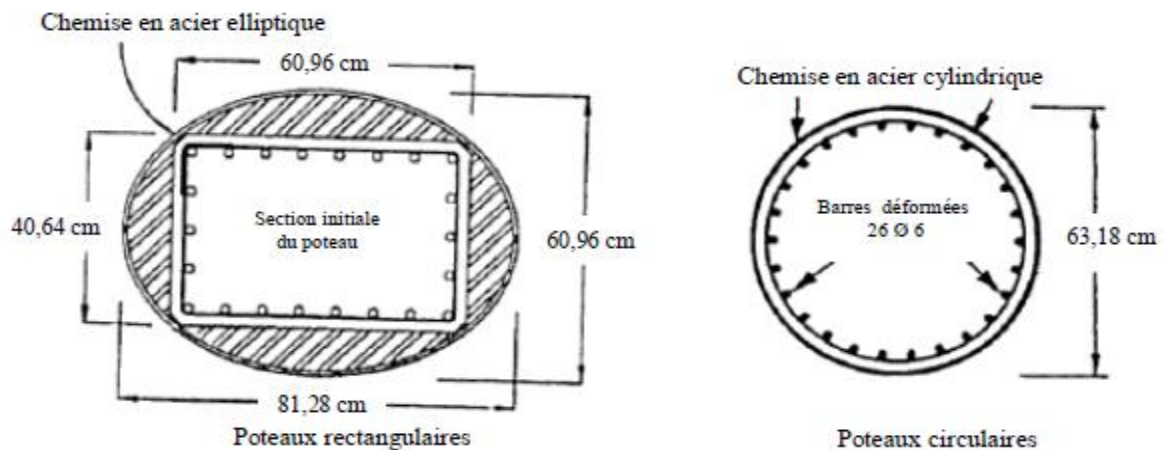


Figure II 24: Renforcement de poteaux circulaires et rectangulaires avec des chemises en acier (Priestley et al. 1994 a, 1994 b)[10] .

✓ Chemisage en béton armé

Le chemisage en béton armé consiste à augmenter considérablement les sections, par la mise en œuvre d'un ferrailage additionnel à l'ancien élément et d'un nouveau béton d'enrobage pour favoriser l'accrochage, ce dernier sera mis en œuvre après la confection du coffrage [16][17].

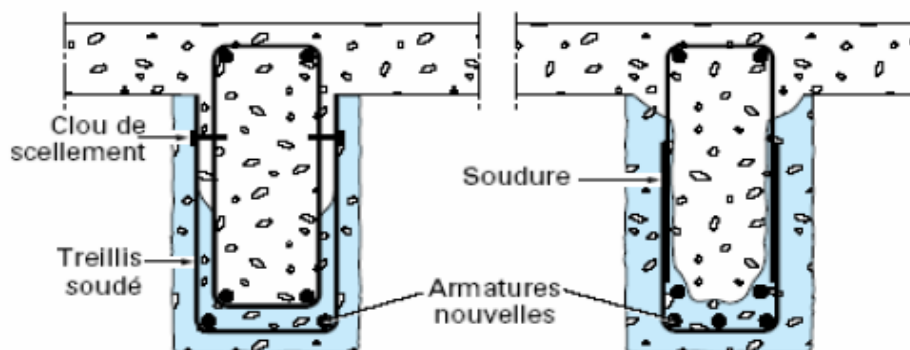


Figure II 25: Réparation de poutre par adjonction d'armature.

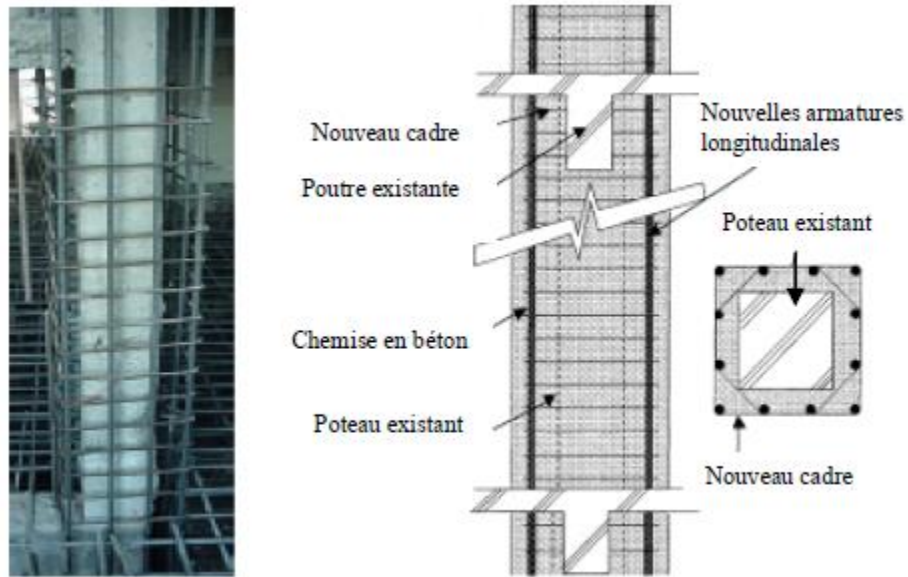


Figure II 26: Chemisage en béton armée (Fukuyama et Sugano 2000)[1].

✓ Renforcement par les matériaux composite

Les techniques traditionnelles de renforcement ou de réparation ont montré leurs limites. Le recours aux matériaux composites constitue une des solutions de renforcement des structures la plus prometteuse. Les quelques exemples d'application de part le monde, ont mis en évidence l'intérêt du renforcement par les matériaux composites en termes de résistance et de durabilité [16],[17],[18].



Figure II 27: Renforcement des poutres par matériaux composites.

❖ Généralités sur les matériaux composites

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des

performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Des exemples de matériaux composites pris au sens large sont donnés au tableau (II-1).

Type de composite	Constituants	Domaine d'application
1/Composites à matrice organique : - papier - carton -panneaux de fibres toiles enduites -matériaux d'étanchéité et pneumatiques	-Résine/fibre cellulosique - Résine /copeaux - Résine / tissus - Elastomère - Caoutchouc/ acier	- Imprimerie - Bâtiment - Toitures - Automobile
2/composites à matrice minérale : -bidon -Composite -carbone	-Ciment /sable /granulats -Carbone / fibres	-Gène civil -Aviation -Espace
3/ Composites à matrice métallique	Aluminium /fibres de bore - Aluminium /fibres de carbone	- Aéro - Spatial

Tableau II 1: Exemples de matériaux composites.

❖ Caractéristiques générales

Un matériau composite consiste dans le cas général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue a habituellement des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue. La phase continue est appelée " la matrice ", la phase discontinue est appelée "le renfort " (**figure II-28**).

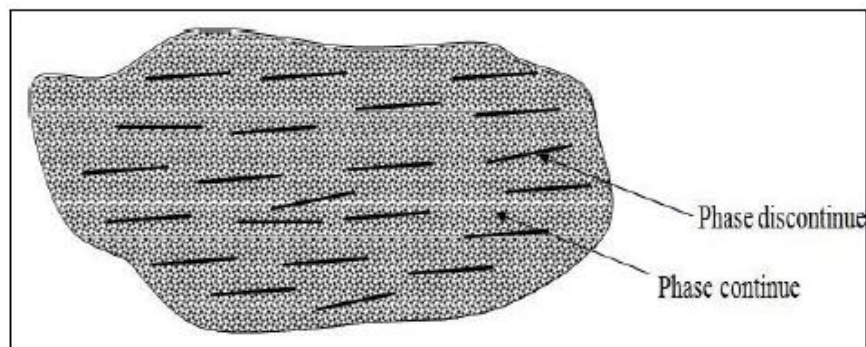


Figure II 28: les différents types de composites.

Critères	Fibres de carbone	Fibres d'aramide	Fibres de verre
Résistance à la traction	Très bonne	Très bonne	Très bonne
Résistance à la compression	Très bonne	Inadéquate	Bonne
Module d'élasticité	Très bon	Bon	Adéquat
Comportement à long terme	Très bon	Bon	Adéquat
Comportement à la fatigue	Excellent	Bon	Adéquat
Densité	Bonne	Excellente	Adéquate
Résistance alcaline	Très bonne	Bonne	Inadéquate
Prix	Adéquat	Adéquate	Très bon

Tableau II 2: comparaison qualitative entre fibres.

Le comportement mécanique des matériaux composites est gouverné par plusieurs facteurs principaux, tels que: le type et nature des fibres de renfort, le type de matrice, la fraction volumique des constituants.

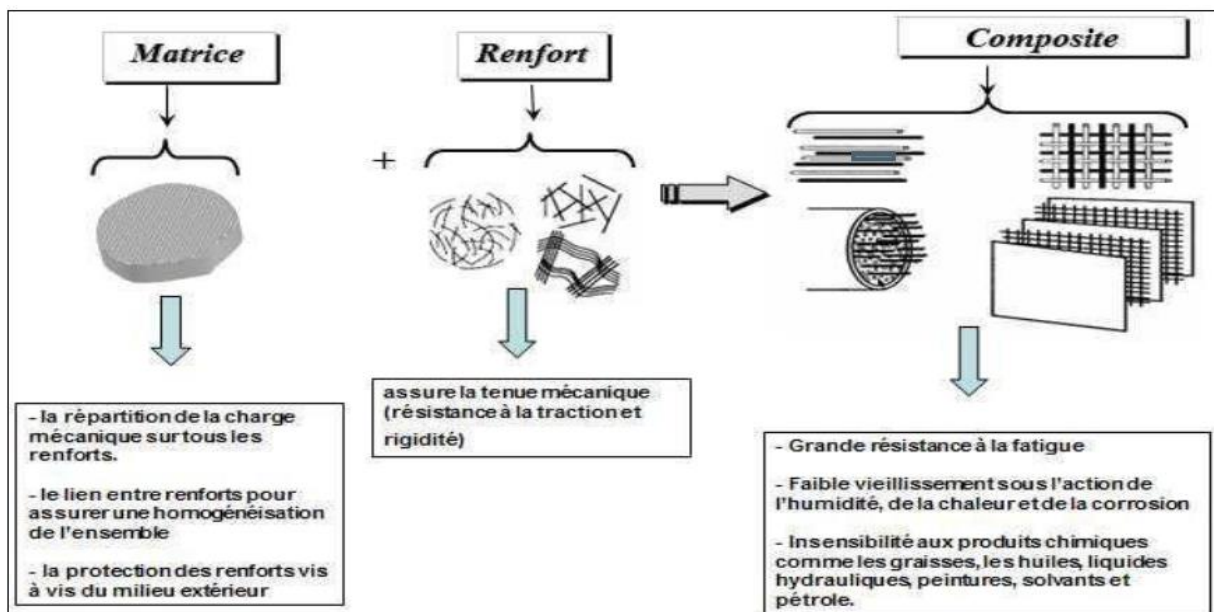


Figure II 29: Différents constituants d'un matériau composite.

❖ Renforcement par les matériaux composites

Le collage de matériaux composites sur les éléments en béton endommagés permet de supporter des sollicitations plus importantes de flexion, de cisaillement (dalles et poutres) et de compression (poteaux) ou de redonner une certaine résistance afin d'assurer le

fonctionnement en service. Les principaux avantages du collage des matériaux composites sont :

- leur légèreté,
- leur excellente résistance à la corrosion,
- absence de réaction avec des agents agressifs extérieurs, tels que le sel, les produits chimiques et l'alcalinité du béton

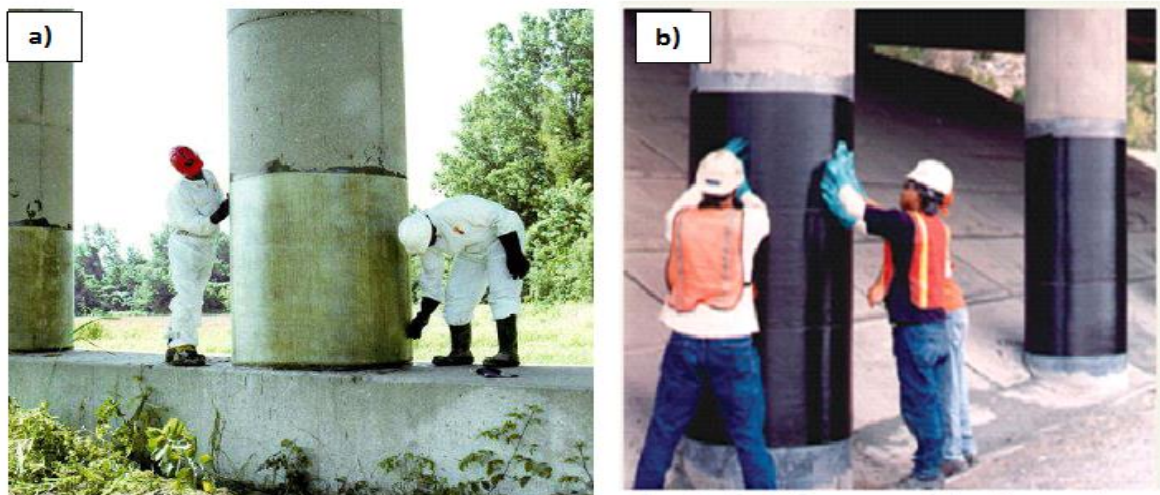


Figure II 30: Exemples de confinement des colonnes et poteaux [6].

La figure II.30 représente un cas de renforcement pratique des piles d'un Pont de l'autoroute US 87 (Californie - années 90) renforcées en 2005 (fibres de verre) après le décret de mise à jour des charges de trafic en 2004 et la prise en compte de l'augmentation des charges sismiques de dimensionnement [15].



Figure II 31: dalle renforcée par des composites.



Figure II 32: poutre renforcée par composites.

II.4 Conclusion du chapitre

Afin de réhabiliter les constructions et ouvrages ayant subits des dommages moyens ou importants, des opérations de réparation et de renforcement sont nécessaires. Cette revue bibliographique sur les techniques de renforcement en particulier par les matériaux composites nous a permis de mettre en évidence la performance mécanique du renforcement par les composites grâce à leur propriétés mécaniques très élevées et leur légèreté. A cet effet, quelques techniques de renforcement des dalles en béton par des matériaux composites seront développées et leur comportement sera simulé en utilisant un logiciel de calcul à base des éléments finis dans le prochain chapitre.



**Chapitre III : Comportement des dalles
renforcées par les composites**

Chapitre III : Comportement des dalles renforcées par les composites

III.1 Introduction

La simulation et l'analyse numérique sont actuellement très développées grâce au développement de l'informatique, conduisant à l'émergence de plusieurs techniques de résolution numériques dont le but consiste à apporter des solutions adéquates [39]. Les techniques de simulation connaissent actuellement des évolutions assez importantes et

Leurs champs d'application deviennent de plus en plus larges grâce en particulier au développement de la technologie, sa qualité et sa fiabilité. Sur le marché, on trouve beaucoup de logiciels de calcul, dans notre travail, on utilise le logiciel Abaqus qui, offre les meilleures solutions pour des problèmes linéaires, non linéaires, explicites et dynamiques.

Dans ce chapitre, on présente succinctement les principales étapes de simulation par le logiciel Abaqus, les différentes variantes considérées et les résultats de la simulation numérique en termes d'évolution de la résistance ultime, l'endommagement, les déformations et le mode de rupture.

III.2 Présentation du logiciel Abaqus :

Abaqus, est un logiciel développé en 1978, basé sur la méthode des éléments finis. Il permet de résoudre les problèmes linéaires simples et non linéaires les plus complexes. Actuellement est très utilisé pour la résolution des problèmes du Génie Civil.

ABAQUS se divise en trois grands codes :

- ABAQUS/Standard : résolution par un algorithme statique implicite.
- ABAQUS/Explicit : résolution par un algorithme dynamique explicite.
- ABAQUS/CAE : fournit un environnement complet de modéliser et de visualisation

pour des produits d'analyse d'ABAQUS.

Dans le cas d'un problème mécanique, Abaqus n'est qu'un solveur (standard, explicite, implicite, etc.) qui, effectue la résolution d'un problème décrit par un fichier « entrée » (ou fichier de données) et dont il écrit la solution vers un fichier « de sortie » (ou fichier de résultats).

III.3 Les étapes de modélisation

Pour simuler notre travail, nous avons effectué un passage successif sur les neuf modules de ABAQUS [33] à savoir : Part, Property, Assembly, Step, Interaction, Load, Mesh, Job et Visualisation.

- a. **Module : Part** : Dessin de toutes les pièces du problème. Chaque pièce est créée grâce à l'outil Create Part
- b. **Module : Property** : Affectation des propriétés mécaniques pour chaque élément des différents matériaux utilisés
- c. **Module : Assembly** : Assemblage de toutes les pièces avec « create instance » afin de modéliser le phénomène physique
- d. **Module : Step** : définition de tous les critères de calcul utilisés par Abaqus dans le module Job. (L'incrément, valeur du pas de temps, et la valeur du temps final, qui est un temps « virtuel », temps sans unité). Le temps réel ou physique est défini dans 'Material Manager'
- e. **Module : Interaction** : Définition des interactions entre chaque pièce et introduction des premières hypothèses portant sur les contacts, les contraintes et les connections éventuelles.
- f. **Module : Load** : Cette étape est dédiée au chargement et conditions aux limites de notre modèle, Ce type de chargement et de conditions aux appuis est analogue à celui utilisé dans l'expérimental. L'utilisateur définit le système à partir de nn 'CreateBoundary Condition' et de 'CreateLoad' : - La partie 'BC' regroupe tous les mouvements possibles que l'on rencontre, le nombre de degrés de liberté pour chaque pièce.- La partie 'Load' regroupe l'ensemble des forces auxquelles le système est soumis.
- g. **Module : Mesh** : Le maillage est une méthode pour diviser l'élément en question en particules élémentaires ayant les mêmes propriétés et examiner chaque particule séparément
- h. **Module : Job** :Le module 'Job' reprend les caractéristiques de calcul dans le module 'Step'.Ce module est important dans la modélisation numérique du phénomène physique. Il faut créer le matériau, c'est-à-dire, élaborer toutes ses propriétés mécaniques, thermiques ou acoustiques.

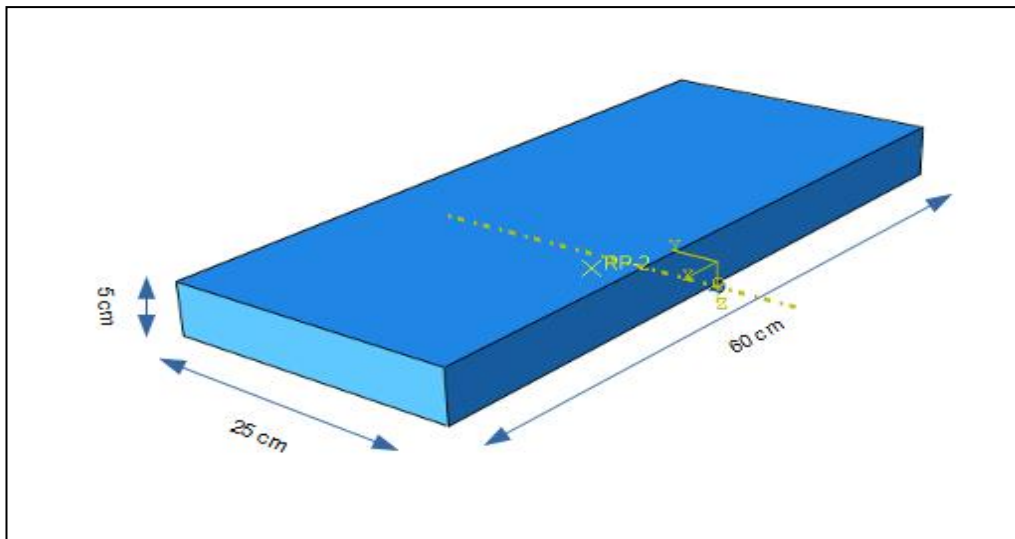
- i. **Module : Visualisation** : Les résultats du calcul numérique sont représentés dans 'Results' et dans 'Field output' on visualise les déformations, les contraintes, les forces nodales et l'endommagement

III.4 Présentation des variantes d'étude :

Dans ce travail, nous allons simuler trois (04) dalles de dimensions normalisées 05*25*60 cm, renforcées différemment par des composites de fibres de verre. Les dalles sont soumises à un chargement de flexion.

Variante I : dalle témoin en béton, considérée comme une référence pour les autres variantes (D-Réf) .

a)



b)

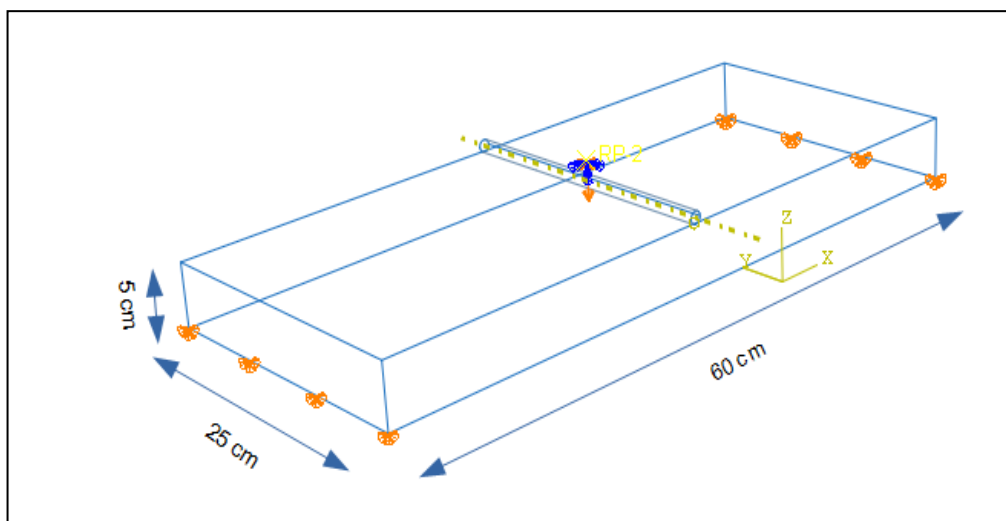
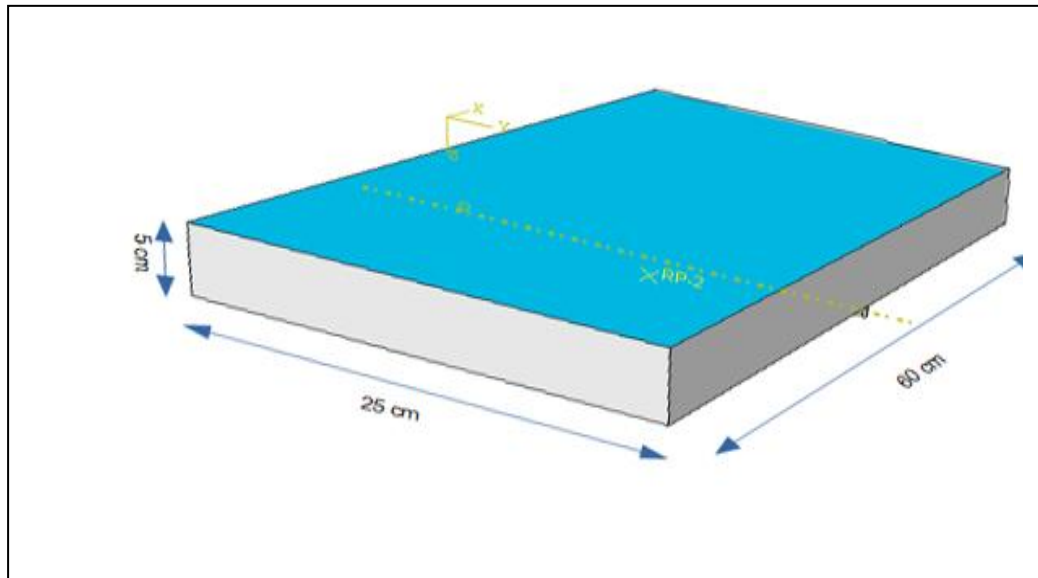


Figure III 1: a) Dimensions géométriques de la dalle de référence : D-Réf et b) mode de chargement.

Variante II: Dalle renforcée totalement par un tissu composite en fibres de verre ‘GFRP’. Cette technique est largement utilisée pour le cas des éléments très endommagés. ‘D-TR’ La dalle est soumise au même mode de chargement.



Tissu Composite

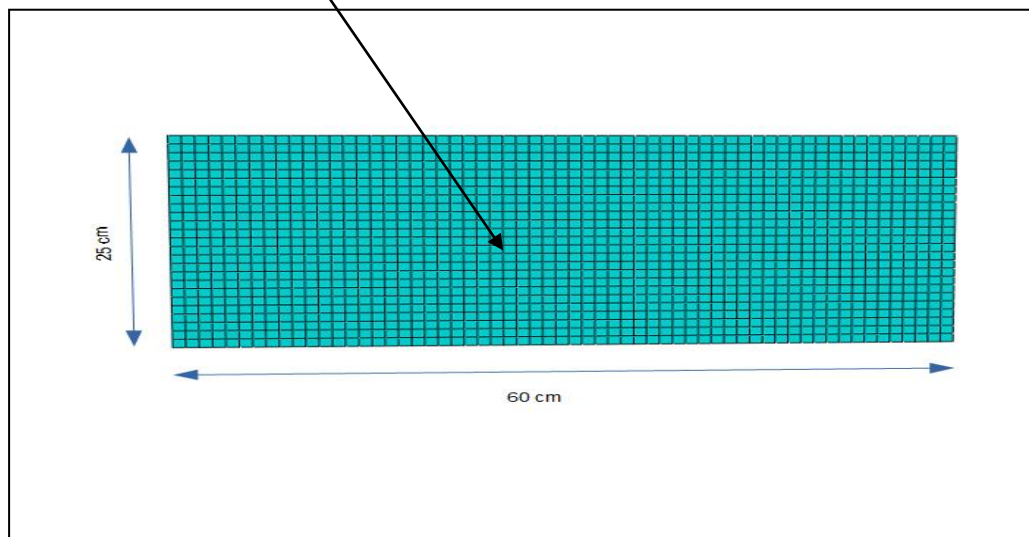
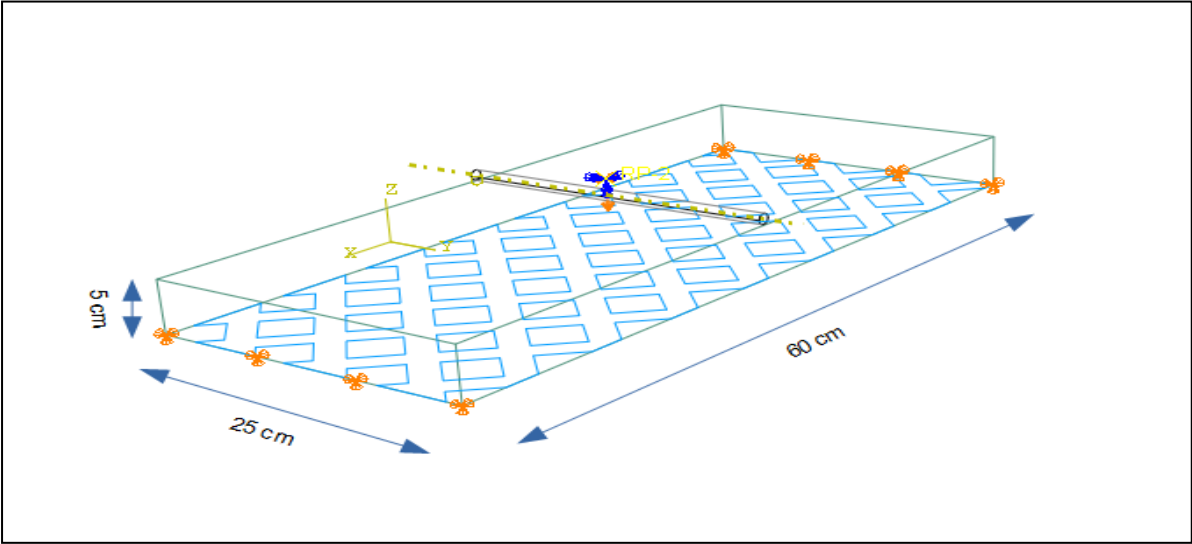


Figure III 2: Dalle renforcée totalement par le tissu composite ‘D-TR’.

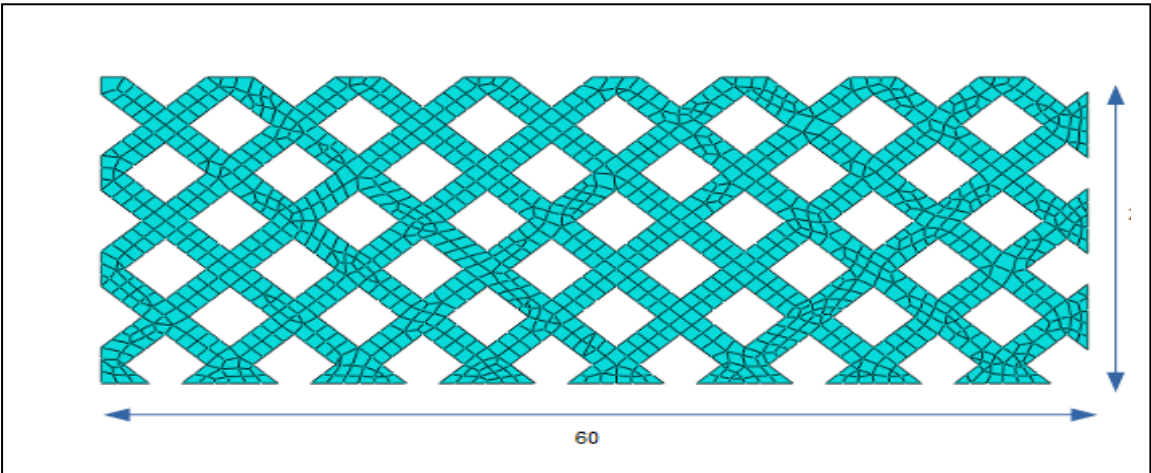
Variante III: Dalle renforcée par une grille composite à base de fibres de verre. L’objectif de cette technique de renforcement réside dans l’économie du tissu composite comparativement au renforcement global. La maille a une dimension diagonale de 5 cm et le côté transversal est de 3,54 cm. Par contre la lamelle composite à une largeur de 2 cm. Ces

dimensions géométriques permettent de calculer le rapport de surface du tissu composite utilisé. 'D- RG-45°'

a)



c)



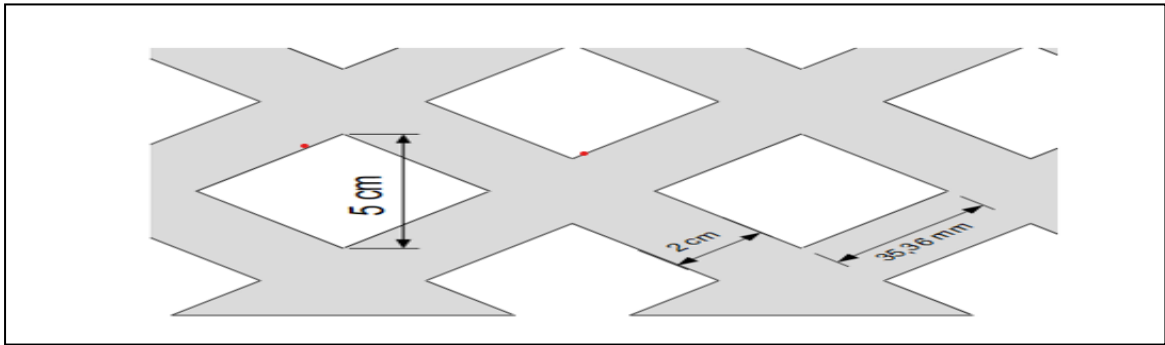


Figure III 3: Dalle renforcée totalement par la grille composite 'D-RG-45°' : a) Dimensions géométriques et mode. de chargement, b) disposition de la grille composite et dimensions, c) et d) détails de la grille composite.

d)

Variante IV: Dalle renforcée par des lamelles composites de 5 cm de largeur selon les deux directions longitudinale et transversale, disposées au milieu de la dalle (symétrie). 'D-RL'

a)

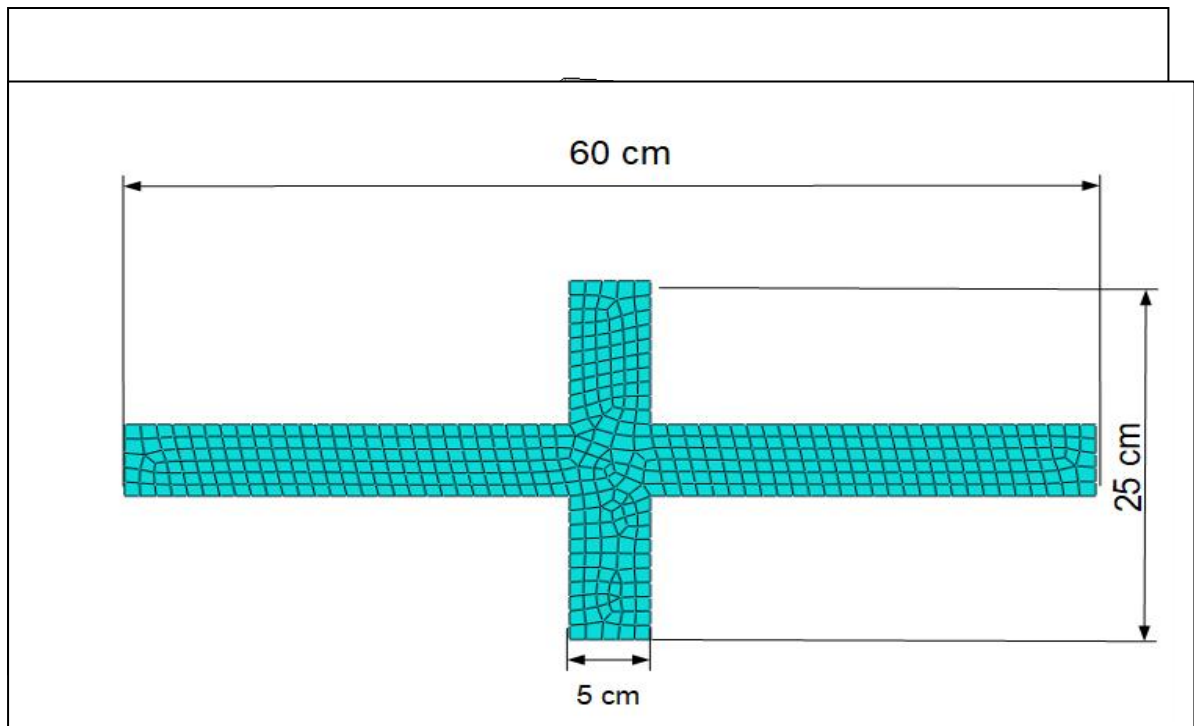


Figure III 4: Dalle renforcée totalement par des lamelles composites 'D-RL' : a) Vue de la dalle renforcée, b) détails des lamelles composites.

b)

III.5 Présentation des résultats : interprétation et discussions:

Dans cette partie du chapitre, on présente toutes les cartographies des champs des contraintes, des déplacements, des fissures et d'endommagement obtenues pour toutes les dalles. Les courbes forces – déplacements sont également présentées et analysées pour mettre en évidence l'apport de chaque technique de renforcement en termes de résistance et d'économie des matériaux composites.

III.5.1 Dalle – Témoin ‘D-Réf’

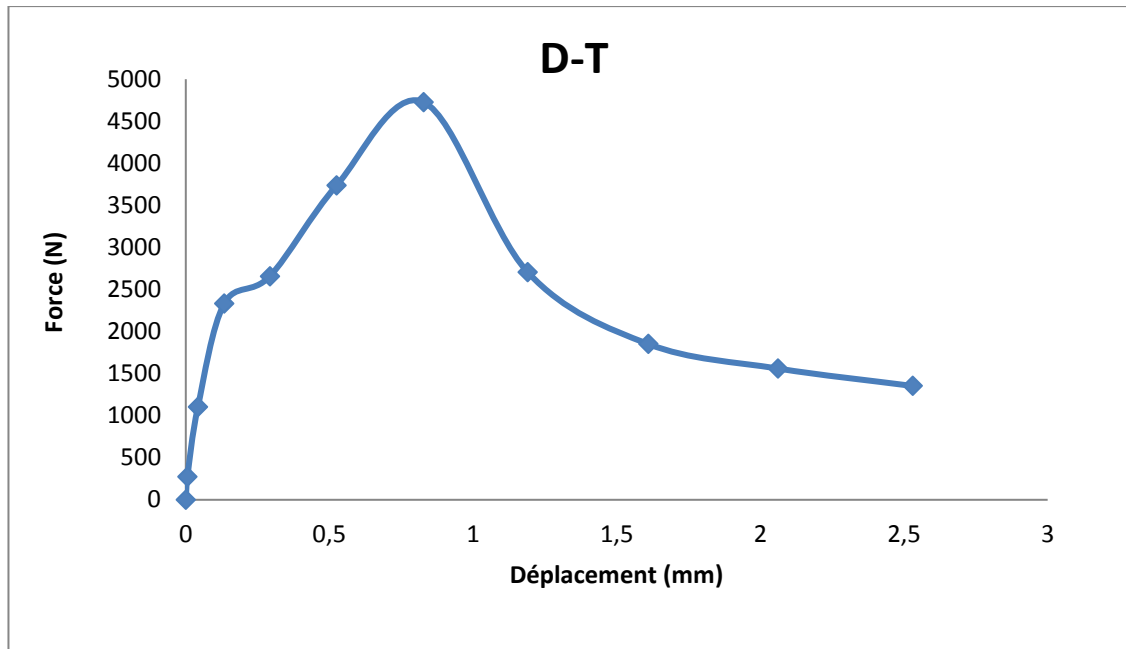
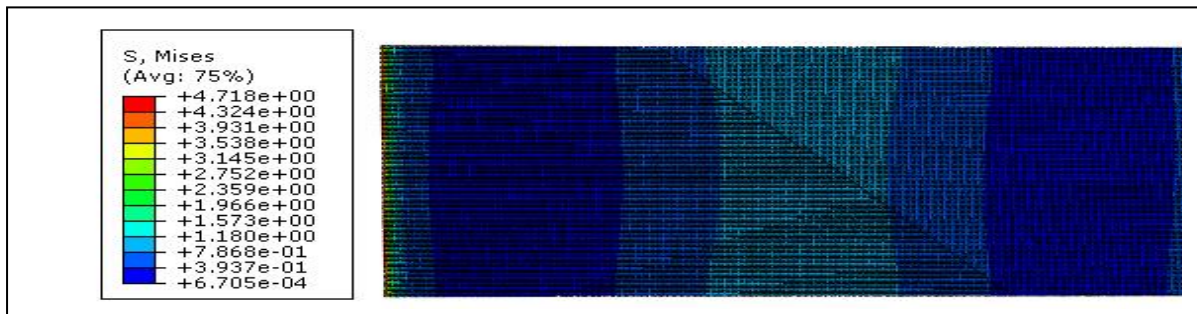
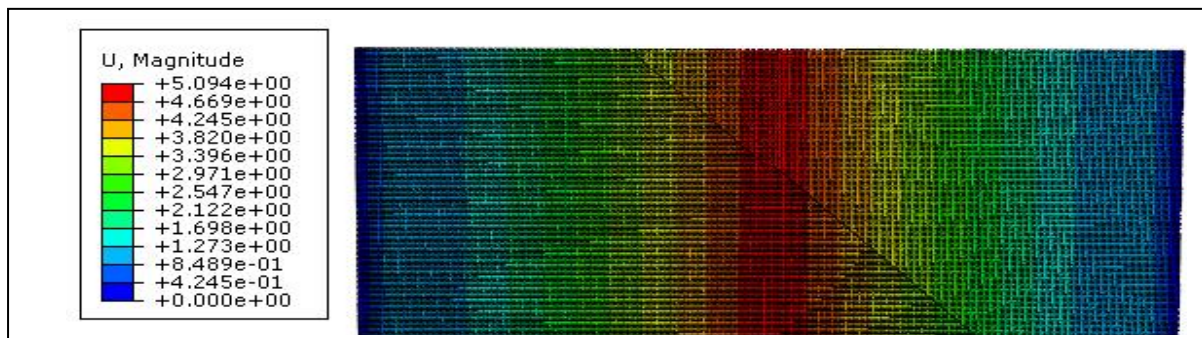


Figure III 5: Courbe Force – déplacement de la dalle témoin.

a) Evolution des contraintes



b) Evolution des déplacements



c) Endommagement dans la dalle

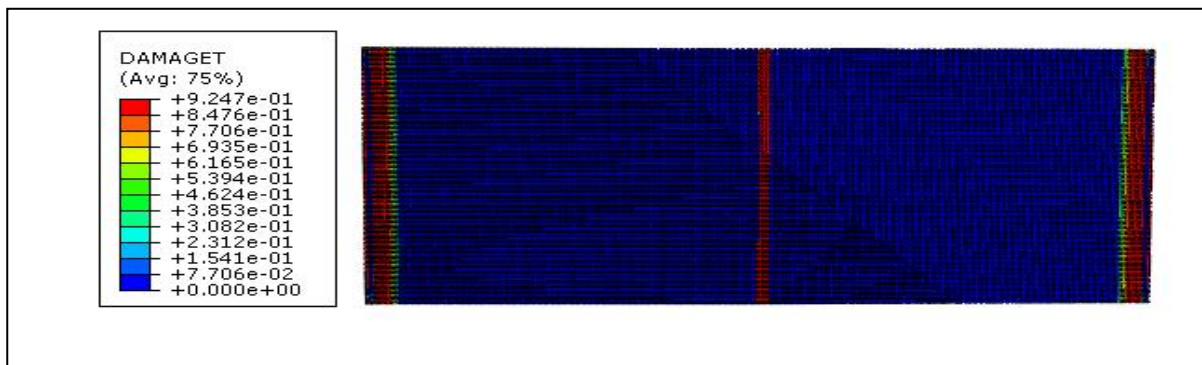


Figure III 6: Cartographie des contraintes, déformations et déplacements : D-Ref

La figure III.5 illustre le comportement typique des dalles en béton soumises à un chargement de flexion et la figure III.6 montre les différentes cartographies des champs des contraintes, des déplacements, des fissures et d'endommagement. L'analyse de l'allure de la courbe force –déplacement montre un comportement typique du comportement des dalles en béton, à savoir , une phase élastique où les déplacements sont proportionnels aux contraintes appliquées. Cette phase définit la limite élastique . La force élastique obtenue est de 2332 N pour un déplacement correspondant de 0,14 mm. Puis une phase élastoplastique qui définit le comportement elastoplastique où l'on observe des une densification des fissures et endommagements de la poutre. La rupture finale est obtenue pour une valeur de force ultime de 4728 N correspondant à un déplacement de 0,83mm. Le mode de rupture observé est fragile. La fissure est amorcée et est développée dans la partie centrale de la dalle.

III.5.2 Dalle totalement renforcée 'D- TR'

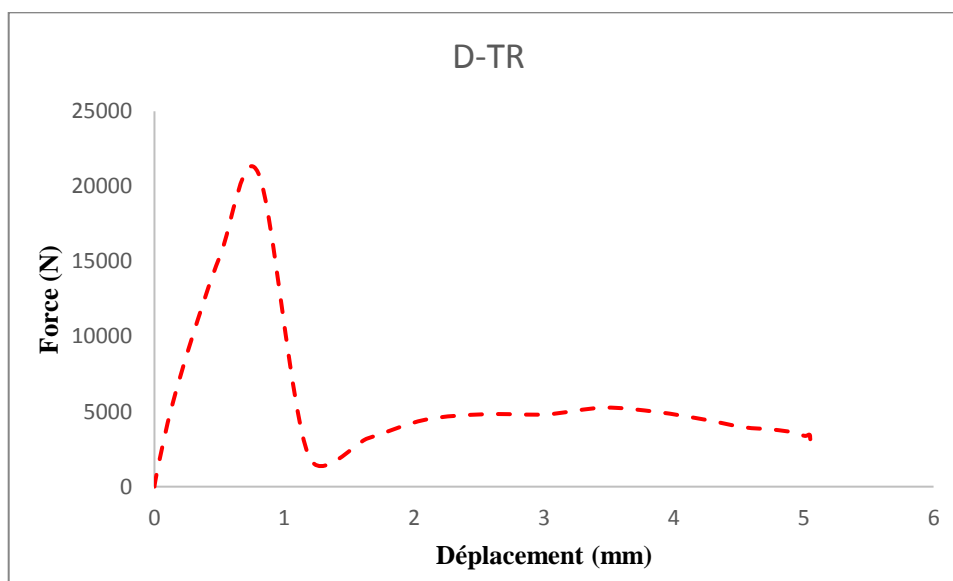
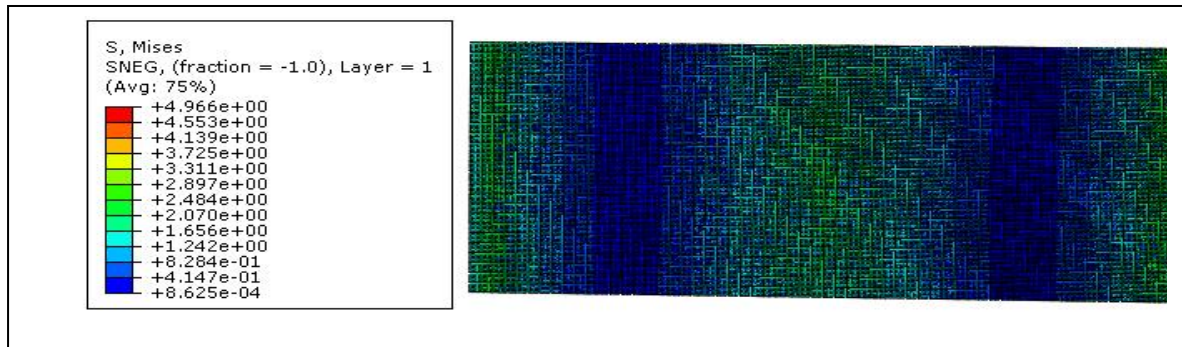
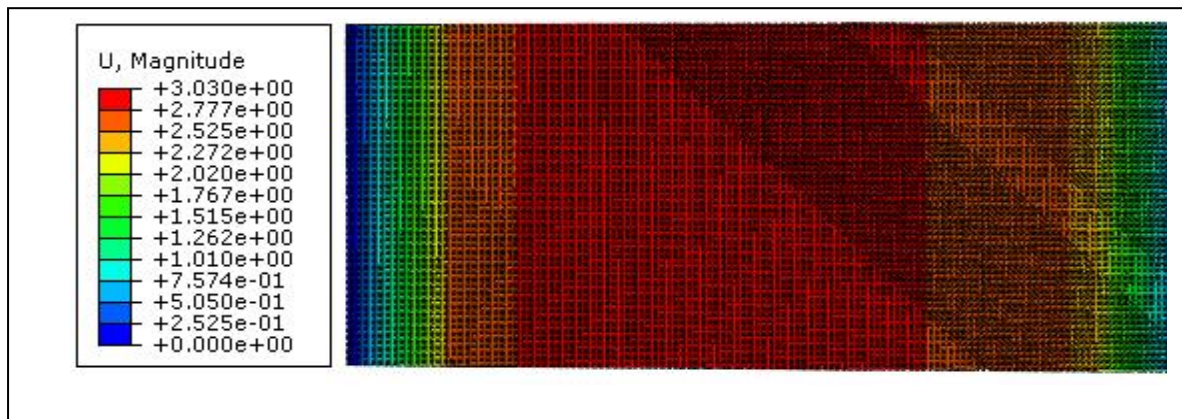


Figure III 7: Courbe Force – déplacement de la dalle totalement renforcée D-TR.

a) Evolution des contraintes



b) Evolution des déplacements



d) Endommagement dans la dalle

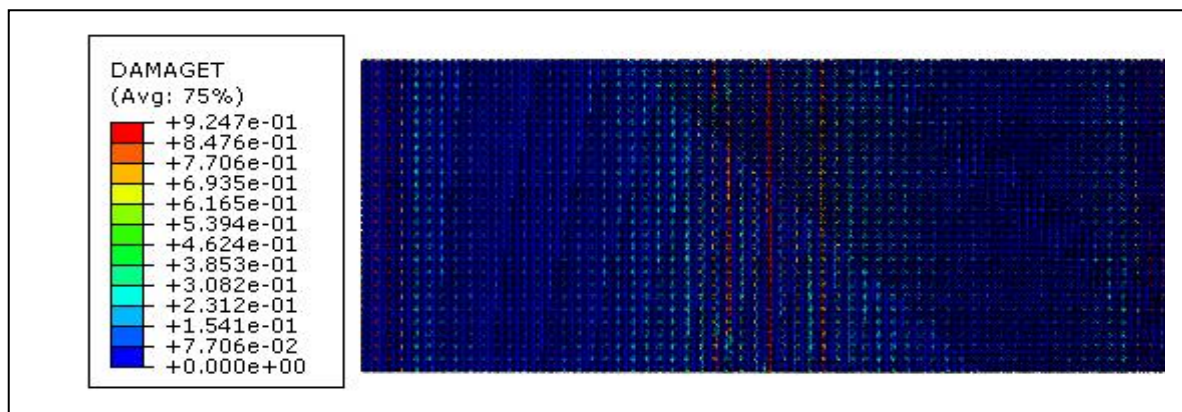


Figure III 8: Cartographies des contraintes, déformations et déplacements de la dalle totalement renforcée par les composites : D-TR.

Les figures III.6 et III.7 illustrent le comportement de la dalle sous flexion en termes de force – déplacement, mesuré au milieu de la dalle. La limite élastique correspond à la force

maximale et est égale à 20,84 kN avec un déplacement correspondant de 0,8 mm. Le comportement est quasi fragile. La rupture est obtenue après la rupture du composite. Le composite a un comportement fragile. On remarque une nette amélioration de la capacité portante de la dalle. La valeur de la force de rupture augmente de 4,73 kN à 20,84kN. Ce qui représente environ 440%, pour la même valeur du déplacement égale à 0,8 mm.

III.5.3 Dalle renforcée par grille composite 'D- RG-45°'

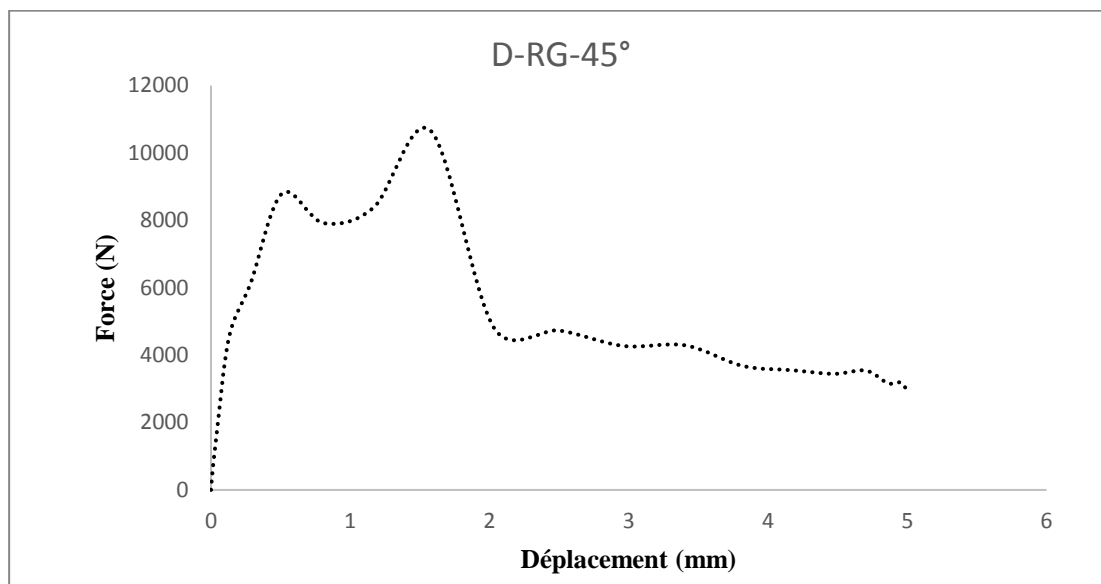
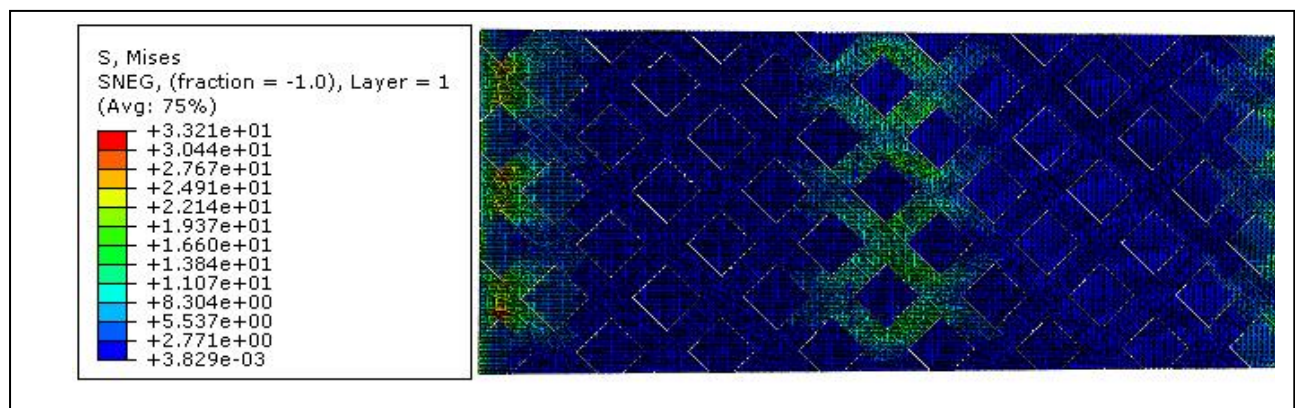
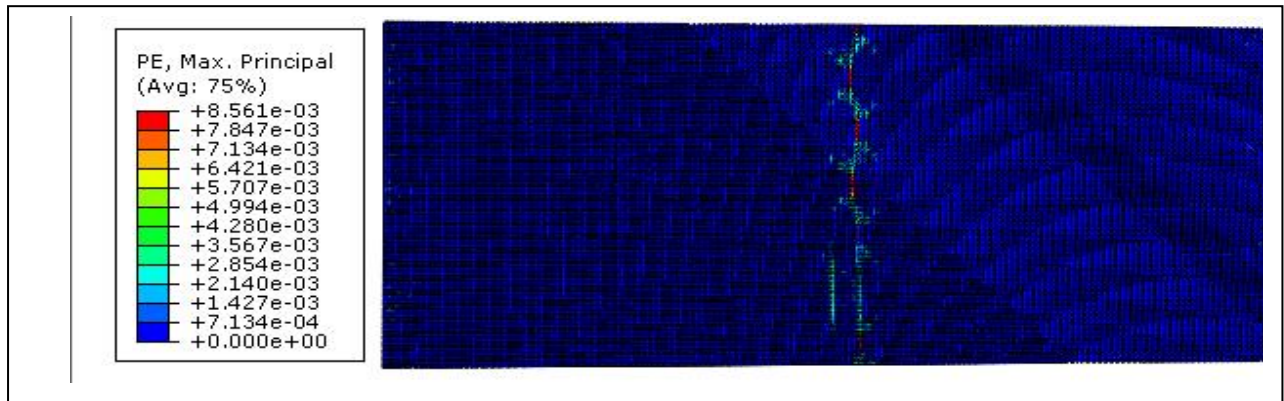


Figure III 9: Courbe Force – déplacement de la dalle totalement renforcée D-RG- 45.

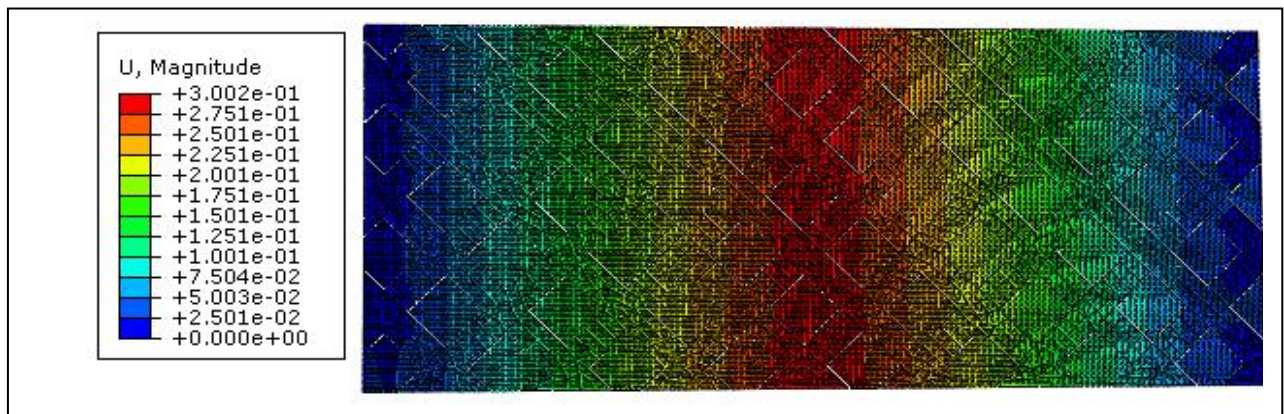
a) Evolution des contraintes



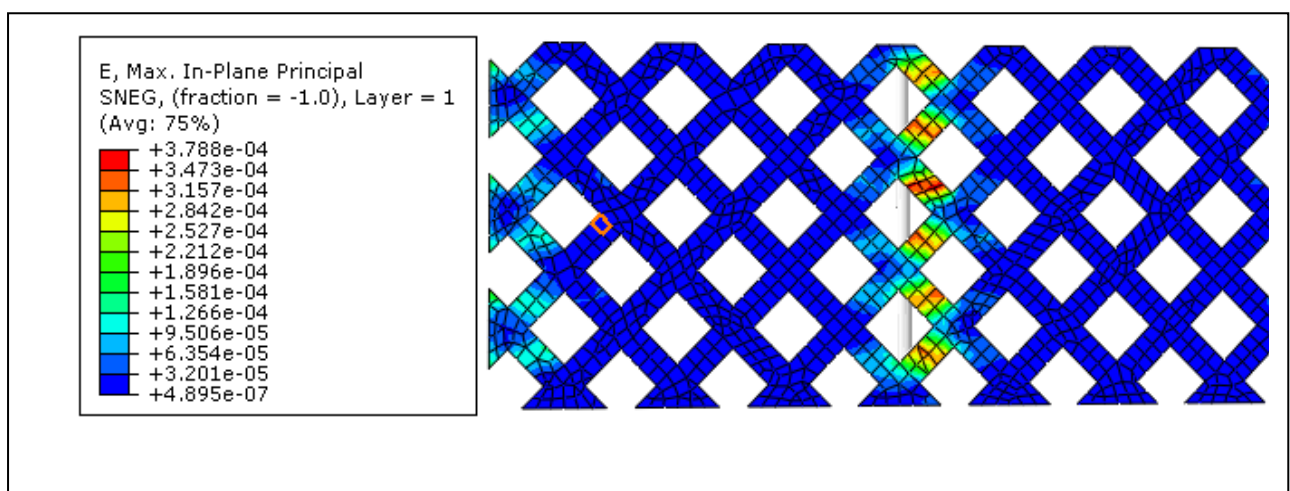
b) Evolution des déformations



c) Evolution des déplacements



d) Endommagement dans la grille composite



e) Endommagement dans la dalle

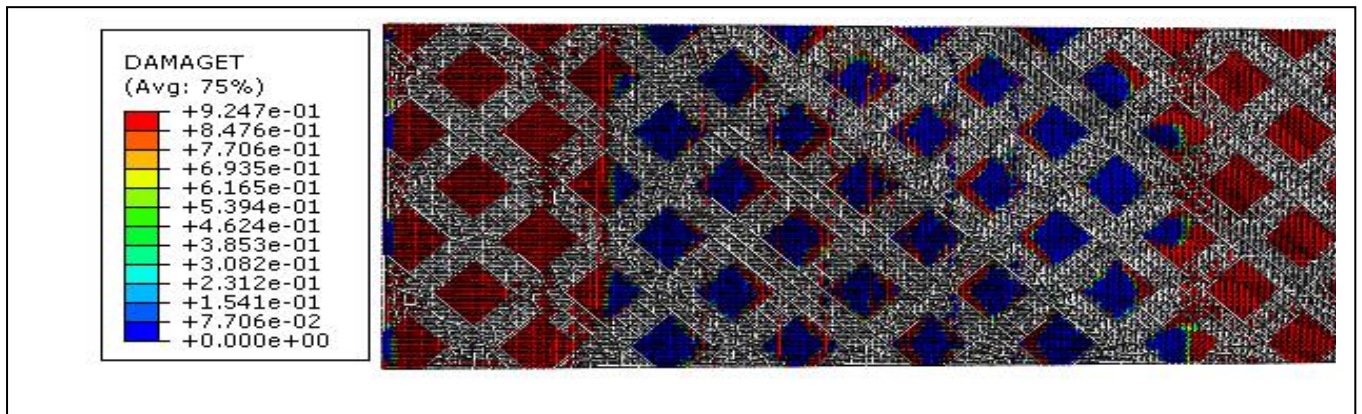


Figure III 10: Cartographies des contraintes, déformations et déplacements de la dalle renforcée par la grille composite : D-RG- 45°.

Les figures III.9 illustre le comportement force- déplacement de la dalle considérée. On remarque que le comportement est légèrement modifié par la présence de la grille. En effet, on constate qu'après la limite élastique, correspondante à une valeur de la force de 1,71 kN pour un déplacement de 0,04 mm, la force continue à augmenter linéairement en changeant légèrement de pente jusqu'à une valeur de 8,8 kN pour un déplacement de 0,51 mm. , puis cette force chute d'une manière brutale jusqu'à la valeur de 7,91 kN pour un déplacement de 0,81 mm puis remonte au maximum à 10,65 kN avec un déplacement correspondant à 1,58 mm. En analysant les différentes cartographies des contraintes, déformations et déplacements de la dalle renforcée par la grille composite, Comparativement aux précédentes variantes, on observe une modification du mode de rupture. En effet, on observe des ruptures par flexion et par cisaillement. Les fissures sont mieux réparties et se concentrent plus aux niveaux des extrémités de la grille (fissures inclinées de cisaillement). Les déplacements importants se produisent toujours dans la partie centrale de la dalle. Le béton compris entre les mailles de la grille composite se fissure rapidement Aussi, les lamelles constituant la grille ne subissent aucun endommagement. La rupture finale est obtenue après éclatement et / ou rupture de la grille après endommagement important de la dalle. Comparativement à la dalle de référence on obtient une amélioration de la résistance de l'ordre de 220% alors que par rapport à la variante D-TR la charge ultime diminue d'environ 50% . Cependant, la quantité du composite utilisé représente environ 60%. Donc, cette variante est économique pour un seuil de résistance souhaité.

III.5.4 Dalle renforcée par lamelles composites ‘D- RL’

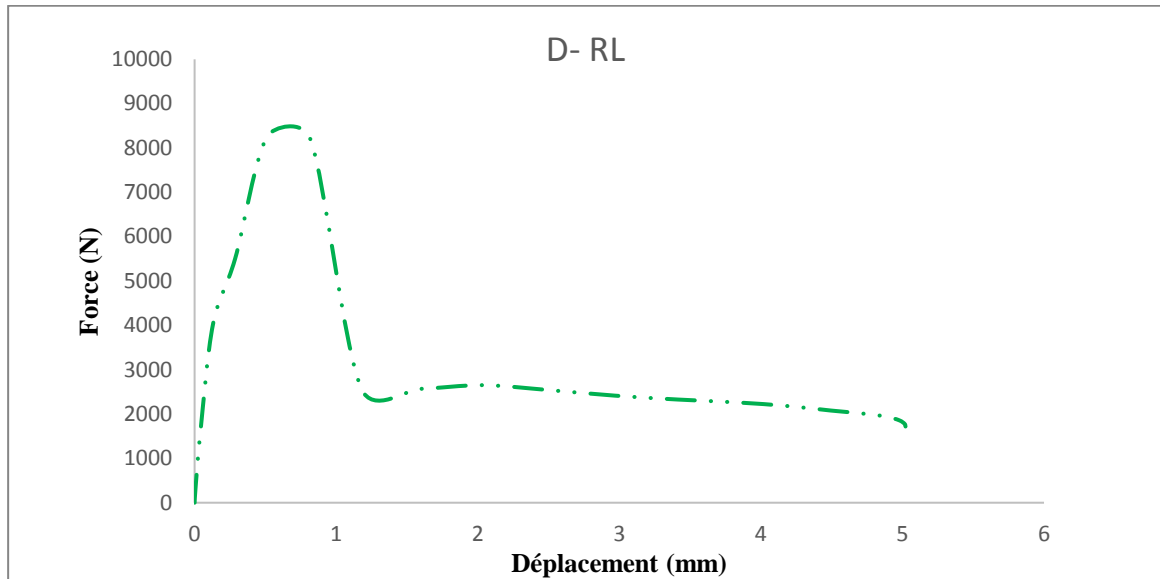
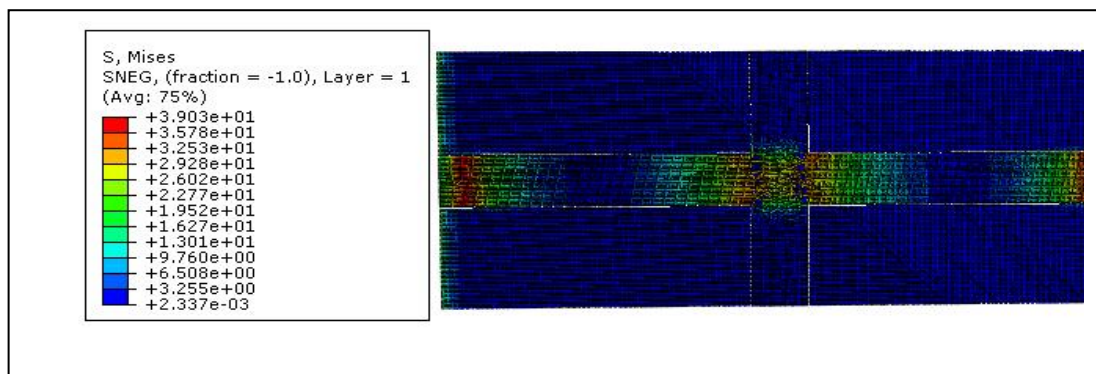
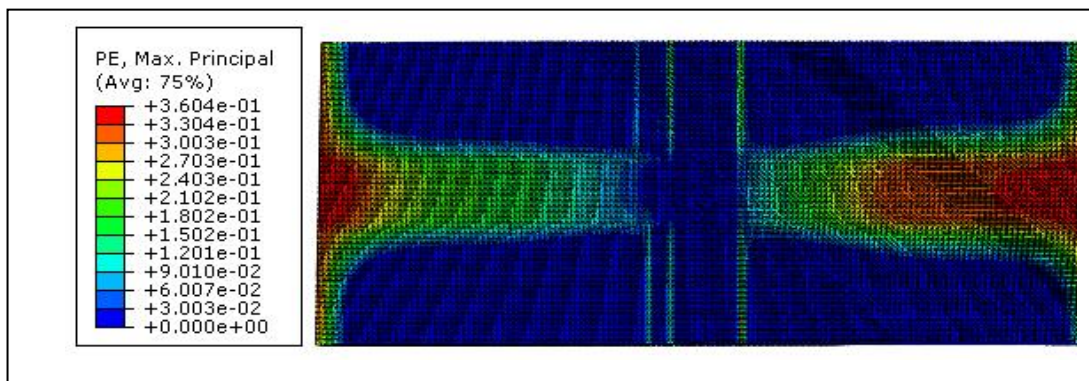


Figure III 11: Courbe Force – déplacement de la dalle totalement renforcée D-RL.

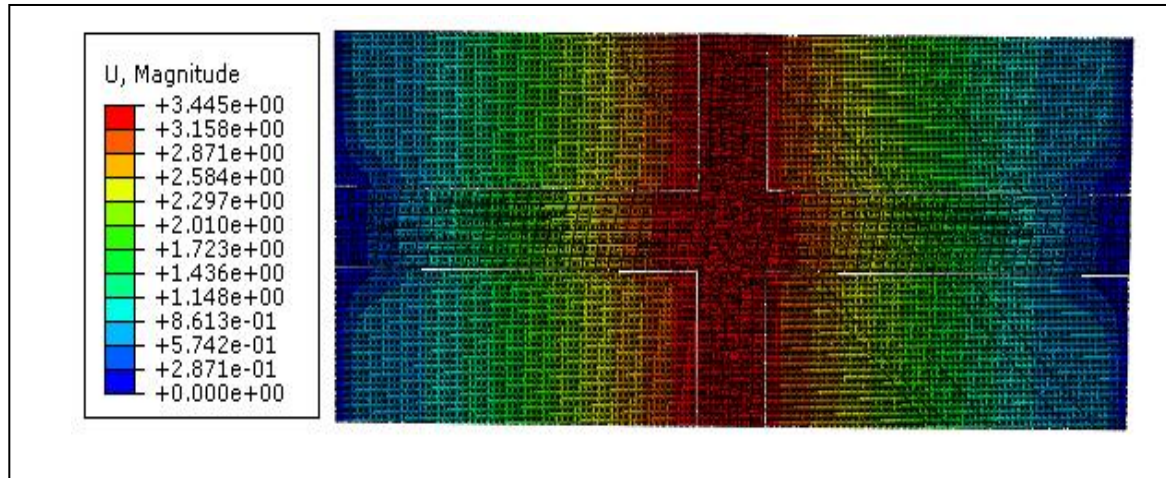
a) Evolution des contraintes



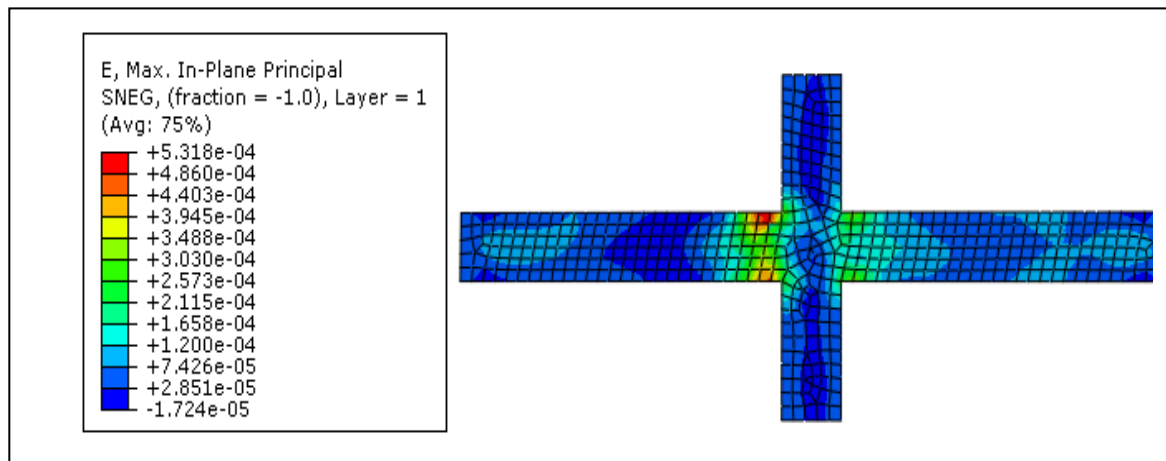
b) Evolution des déformations beton



c) Evolution des déplacements



d) Endommagement dans la lamelle composite



e) Endommagement dans la dalle renforcée

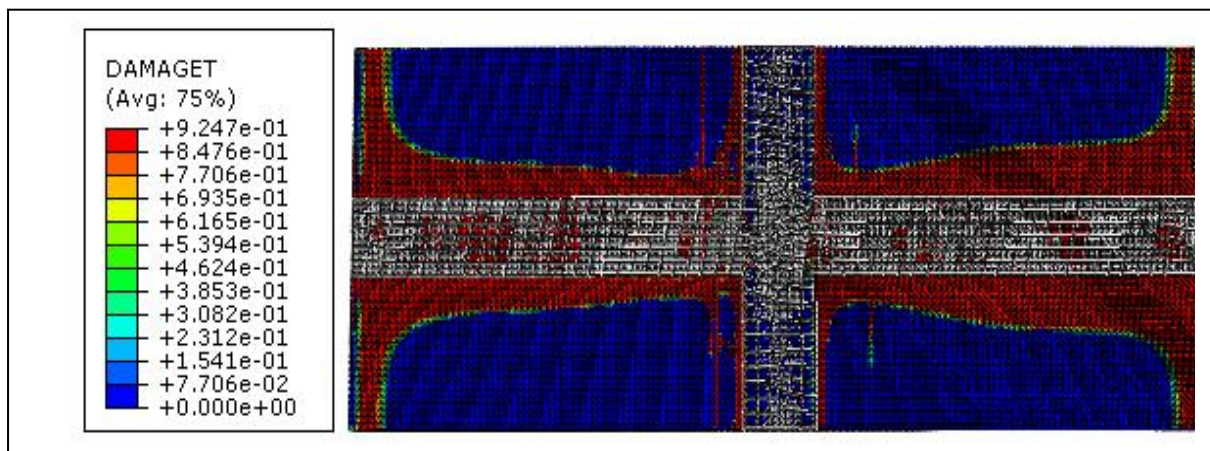


Figure III 12: Cartographies des contraintes, déformations et déplacements de la dalle renforcée par des lamelles composites : D-RL^o.

Les figures III.11 illustre le comportement force- déplacement de la dalle renforcée par des lamelles composites disposées en croix au centre de la dalle. La largeur des lamelles est de 50mm. L'analyse du comportement en terme de force – déplacement met en évidence l'influence du renforcement des lamelles sur la capacité portante et le mode d'endommagement et de rupture. En effet, la force évolue d'une manière presque linéaire jusqu'à la valeur ultime de 8,27 kN pour un déplacement de 0,51mm puis décroît rapidement jusqu'à la valeur de 2,57 pour un déplacement de 1,18mm. Le comportement est fragile, similaire au cas des dalles en béton (Dalle de Réf). Les différentes cartographies des contraintes, déformations et déplacements de la dalle renforcée par des lamelles composites illustrées par la figure III.12 mettent en évidence la diffusion du champ d'endommagement du centre de la dalle vers les extrémités selon l'axe porteur (sens longitudinal), alors que selon l'axe perpendiculaire (transversal) on remarque un léger endommagement. Une concentration des contraintes et damages, est observée aux extrémités des lamelles, après rupture du béton.

Les déplacements sont plus importants au milieu de la dalle alors que les endommagements sont plus intenses aux niveaux des extrémités de la lamelle. La rupture finale est obtenue après rupture longitudinale de la lamelle ou par décollement de la lamelle aux bords de la dalle.

III.5.5 Confrontation des résultats

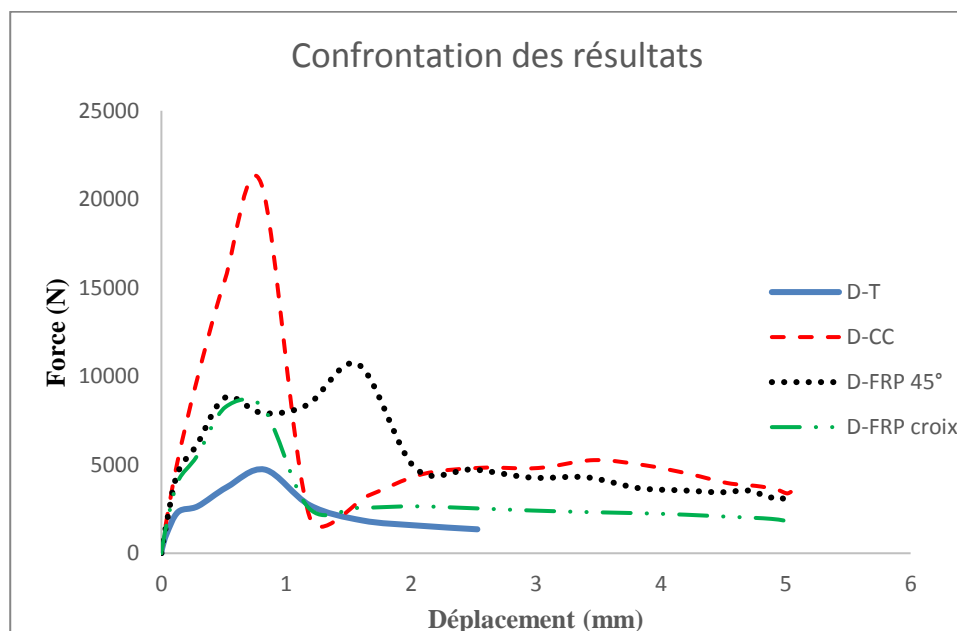


Figure III.13. Confrontation des courbe forces – déplacements de toutes les variantes de renforcement considérées.

L'analyse de figure III.13 illustrant la confrontation des courbes de comportements Forces-déplacements, montre que, comparativement à la dalle de référence on obtient une amélioration de la résistance de l'ordre environ de 176% pour un déplacement inférieur à celui de la dalle témoin et une chute de la force de l'ordre environ de 250% comparativement à la dalle totalement renforcée 'D-TR' avec un gain en tissu composite égal respectivement à 72% et une chute de la force de l'ordre de 77,6% avec un gain en tissu composite égal à 54% par rapport à la dalle renforcée par grille composite.

En conclusion, cette technique de renforcement localisé par des lamelles est plus recommandée pour les éléments prismatiques tels que les poutres dont la largeur transversale est négligeable devant la longueur. Néanmoins, pour les dalles, elle peut être utilisée dans le cas d'un renforcement local. Cette variante permet d'améliorer la capacité portante et est surtout économique et facile à réaliser.

III.6 Conclusion du chapitre

Le renforcement des dalles par les matériaux composites est une des solutions largement adoptée ces dernières années, vu la maîtrise de la technologie et le développement de nouveaux matériaux innovants. Pour améliorer la capacité portante de la dalle, le rapport des surfaces ' composite / dalle', couvrant toute ou une partie de la zone du moment maximal (surface renforcée) est considéré dans ce travail, en proposant différentes techniques de renforcement à savoir : le renforcement total de la surface de la dalle, le renforcement par grille composite de maille diagonale et par des lamelles composites disposées dans la partie centrale de la dalle selon les deux directions principales.

Les différents résultats obtenus dans ce travail et illustrés par les différentes cartographies des contraintes, des déformations et déplacements ainsi que les courbes de comportement forces-déplacements, mettent en exergue l'influence du mode de renforcement sur la capacité portante et l'économie du tissu composite.

A decorative horizontal scroll-like border with a black outline and rounded ends, containing the text.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Le renforcement des dalles par des matériaux composites permet de redonner une certaine résistance et une rigidité à la dalle endommagée. Cependant, plusieurs techniques de renforcement sont proposées par différents auteurs. Chaque technique présente des avantages et des inconvénients, le choix judicieux et rentable s'avère difficile et doit être étayé par des résultats d'étude assez conséquente et précise. Le développement de nouvelles techniques de renforcement reste donc d'actualité vu la dégradation du bâti.

En général, Les dalles en béton armé présentent un comportement flexionnel caractérisé par plusieurs phases.

Les résultats obtenus dans cette étude, permettent de formuler les conclusions suivantes :

- La rupture finale de la dalle en béton de référence est obtenue pour une valeur de force ultime de 4728 N correspondant à un déplacement de 0,83mm. Le mode de rupture observé est fragile. La fissure est amorcée et est développée dans la partie centrale de la dalle.
- Pour la dalle en béton renforcée totalement par un tissu composite, la limite élastique est égale à 20,84 kN avec un déplacement correspondant de 0,8 mm. Le comportement est quasi fragile. La rupture est obtenue après la rupture du composite. Une nette amélioration de la capacité portante de la dalle. La valeur de la force de rupture augmente de 4,73 kN à 20,84kN. pour la même valeur du déplacement égale à 0,8 mm.
- Pour la dalle en béton renforcée avec une grille composite inclinée à 45°, la limite élastique est de 8,8 kN pour un déplacement de 0,51 mm. , puis cette force chute d'une manière brutale jusqu'à la valeur de 7,91 kN pour un déplacement de 0,81 mm puis remonte au maximum à 10,65 kN avec un déplacement correspondant à 1,58 mm. Les fissures sont mieux réparties et se concentrent plus aux niveaux des extrémités de la grille (fissures inclinées de cisaillement). La rupture finale est obtenue après éclatement et / ou rupture de la grille après endommagement important de la dalle.
- Pour la dalle en béton renforcée par des lamelles composites, la force évolue d'une manière presque linéaire jusqu'à la valeur ultime de 8,27 kN pour un déplacement de 0,51mm puis décroît rapidement jusqu'à la valeur de 2,57 pour un déplacement de 1,18mm. Le comportement est fragile, similaire au cas des dalles en béton (Dalle de Réf). Une concentration des contraintes et dommages, est observée aux extrémités des lamelles, après rupture du béton.

Enfin, même si ces résultats numériques nous permettent de mieux comprendre le comportement des dalles en béton renforcées par des matériaux composites, il sera judicieux de mener des essais mécaniques pour valider ces résultats.

À cet effet, en perspectives, il est recommandé :

- de poursuivre le travail en procédant à l'étude expérimentale des différentes variantes;
- de mener une étude sur le comportement des dalles renforcées par plusieurs lamelles composites parallèles, en tenant compte du paramètre espacement entre –elles

Bibliographie

- [1] Cours : Bâtiment 2 (12/13) – S6 LICENCE Génie Civil – Option : Construction Bâtiment - Prof. Amar KASSOUL - UHBChef
- [2] <http://www.scribd.com/doc/38623463/Cours-PLANCHER-Procédés-Generaux-de-Construction>
- [3] http://www.cours-genie-civil.com/wp-content/uploads/Cours-PLANCHER_procedes-generaux-de-construction.pdf
- [4] <https://l.21-bal.com/law/4139/index.html>
- [5] El Houssain Rochdi. CONTRIBUTION A L'ANALYSE DU COMPORTEMENT MECANIQUE DE DALLES EN BETON ARME RENFORCEES PAR MATERIAUX COMPOSITES. Matériaux. Université Claude Bernard - Lyon I, 2004. Français. fftel-00138446f
- [6] ROUX Jean "Résistance des matériaux par pratique 4" ; Paris : Eyrolles, 2000 – 504p ; pp255-367.
- [7] LAROSE Serge "Mécanique des Structures 1 : solides élastique, plaque et coques" ; 2° édition, Paris : Masson, 1999 – 292p.
- [8] CHORFI Sofiane "Analyse des plaques orthotropes minces sous l'effet des conditions extérieures" ; université de Constantine, thèse de magister 2010 – 211p
- [9] Pathologies des Constructions Préparé Par : Dr GUELMINE Layachi publié sur <https://www.researchgate.net/publication/336287624>
- [10] Peter H. Emmons., Concrete Repairer and maintenance illustrated, R.S. MEANS COMPANY, INC., Construction Published & Consultations, Copyright 1994, 100 Construction Plaza, P.B. Box 800, Kingston, MA 02364-0800.
- [11] Mehta P.K, Paulo J.M "Concrete Micro structure, properties and materials" 3rd edition, The McGraw-Hill Companies, Inc. U.S.A,2006.
- [12] Cours de Durabilité et réparations du béton de l'Université de Sherbrooke (Canada). Site Internet : www.civil.usherbrooke.ca/cours/gci714/338 page.
- [13] Joseph Abou Zeid, Méthodes de réparation et de protection des ouvrages en béton armé, Institut des Sciences Appliquées et Economiques- Université libanaise, ISAE – Cnam Liban, Centre du Liban associé au conservatoire national des arts et métiers- Paris, Information et communication pour l'ingénieur Génie Civil ENG222, 2016, 44 pages.
- [14] Cours de Durabilité et réparations du béton de l'Université de Sherbrooke (Canada).Site Internet : www.civil.usherbrooke.ca/cours/gci714/338 page.

- [15] J.M.BERTHELOT, Matériaux Composites: Comportement Mécanique Et Analyse Des Structures, TEC Et DOC 4eme Edition, 2002.
- [16] MERDAS Abdel-Elghani « Utilisation Du TFC Dans La Réparation Et Le Renforcement Des Poutres En BA » ; Université De Constantine, Thèse De Magister 2005 – 135p.
- [17] ROCHDI El Houssaini « Contribution A L'analyse Du Comportement Mécanique De Dalles En Béton Arme Renforcées Par Matériaux Composites » ; Université Lyon 1, Thèse De Doctorat 2004 -232p.
- [18] BOUKHAZAR Mohcene « Réhabilitation Et Renforcement Des Poutres Au Moyen Des Matériaux Composites » ; Université De Constantine, Thèse De Magister 2009 – 123p.
- [19] GULRAUD Patrick « Les Solutions Techniques Pour La Réparation Et Le Renforcement Des Ouvrages De Génie Civil En Béton » ; Solution Béton ; Construction Moderne /Annuel Ouvrage D'art ; 2011 – Pp 15 – 22
- [20] Mémoire de fin d'étude intitulé « PATHOLOGIE DE STRUCTURES EN BÉTON ARMÉ » réalisé par ITMAIZEH Ehab
- [21] Pathologie-et-réhabilitation-des-ponts-M2-GC- réalisé par Bouteraa-Zohra
- [22] Mémoire de fin d'étude intitulé «REHABILITATION DES STRUCTURES EN BETON ARME» Présenté par : KHOBIZI Sena
- [23] Mémoire de magister intitulé «Contribution à l'étude des dalles renforcées par des composites : Analyse expérimentale et modélisation» Présenté par : Mlle DJELLAD Zohra Amal