

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



MEMOIRE DE MAGISTER EN GENIE CIVIL
OPTION : MODELISATION ET CALCUL NON LINEAIRE

Présenté par :

M^{lle} DJELLAD Zohra Amal

THEME

***Contribution à l'étude des dalles renforcées
par des composites :
Analyse expérimentale et modélisation***

Devant le jury composé de :

Mr MELBOUCI Bachir	Professeur,	UMMTO	Président
Mr AIT TAHAR Kamal	Professeur,	UMMTO	Rapporteur
Mr DAHMANI Lahlou	Professeur,	UMMTO	Examineur
Mr SAAD Mohamed	Maitre de conférences Classe A,	UMMTO	Examineur
M ^{me} KHELOUI Fatma	Maitre de conférences Classe B,	UMMTO	Invitée

Tizi ouzou : 2015

REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier mon encadreur Monsieur **AIT TAHAR Kamal** pour m'avoir encadré, je tiens à souligner sa disponibilité, le soutien qu'il m'a apporté, ces idées, son expérience et la confiance qui m'a accordé.

Je remercie Mme KHELOUI Fatma pour l'aide qu'elle m'a fourni au cours de ce travail et de m'avoir permis de contribuer à l'étude d'une partie de son projet de recherche sur le renforcement des éléments de structures en béton par des matériaux composites.

Ma sincère gratitude à Monsieur MELBOUCI Bachir, Professeur à l'université Mouloud MAMMARI de Tizi Ouzou , sachez que vous me faites honneur de présider le jury de ma soutenance.

Je remercie Mr DAHMANI Lahlou professeur à l'université Mouloud MAMMARI de Tizi Ouzou, ainsi que Mr SAAD Mohamed, Maitre de conférences Classe A à l'université Mouloud MAMMARI de Tizi Ouzou, qui m'ont fait honneur en acceptant de juger ce 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.

Je tiens à remercier Mr BENCHAABE Tarek pour son aide lors des travaux de laboratoire.

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.

Résumé

L'objectif de ce travail, consiste à apporter une contribution à l'analyse du comportement des dalles en béton armé renforcées par des patchs composites soumises à un chargement vertical progressif de poinçonnement centré et excentré. Une investigation expérimentale est réalisée. Les paramètres d'étude sont : Le rapport des surfaces 'patch composite / dalle', l'excentricité de la charge verticale et la nature du composite. 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. Deux excentricités de la charge verticale ainsi que deux types de composites 'composite à base de carbone et composite à base de liège' sont également considérés dans cette étude. L'objectif visé consiste à évaluer d'une part les gains en termes de résistance et d'autre part, de définir les paramètres influençant le comportement en rigidité. Les résultats obtenus montrent une amélioration en termes de résistance, et de performances mécaniques de la dalle en béton renforcée par un patch composite de dimensions relativement moyennes.

Mots Clés : *Dalle, patch composite, essais, modélisation, analyse*

Abstract

The analysis of the behavior of reinforced concrete slabs reinforced with composite patches subjected to vertical loading progressive punching centric and eccentric is considered in this work. An experimental investigation is carried. The study parameters are: the ratio's area composite patch / slab', the eccentricity of the vertical load and the nature of the composite. Several reports are considered to account for the enhanced surface area. Patches dimensions are calculated so that the ratio X_P/Y_P is proportional to X_D/Y_D of the slab, with a patch of 6 cm and 4 cm respectively longitudinally and transversely. Two vertical load eccentricities and two types of composite: carbon-based composite and composite cork-based 'are also considered in this study. The objective is to evaluate both the gains in terms of strength and secondly, to define the parameters influencing the stiffness behavior. The results show a good improvement in terms of strength, and mechanical performance for reinforced slabs by the composite patch with a relative small size.

Keywords: *Concrete slab, composite patch, testing, modeling, analysis.*

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
------------------------------------	----------

CHAPITRE 1 RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction	6
I.2. Constituants du béton	6
.3. Matériaux composites	6
I.3.1. La Constitution des Matériaux Composites	7
I.3.1.1. Matrices	7
I.3.1.2. Renforts	9
I.3.2. Application des matériaux composites	11
I.4. Le Renforcement	12
I.4.1. Les avantage du renforcement	12
I.4.2.les causes du renforcement des structures	12
I.4.4. Méthodes de renforcement des structures en béton armé	13
a. Chemisage en béton armé	13
b. Chemises en acier	14
c. Tôles collées	15
d. Matériaux composites	15
e. Précontrainte additionnelle	16
I.5. Le poinçonnement	16
I.5.1 Mode de rupture	17
I.5.2.Type de poinçonnement	19
I.5.2.1. Poinçonnement symétrique	19
I.5.2.2. Poinçonnement non symétrique	19
a. Non symétrie centrée	20
b. Poinçonnement excentré	20
I.6. Théorie élastique des dalles	20
I.7. Revue bibliographique : aspect expérimental.....	23
Conclusion du chapitre	26

CHAPITRE II : INVESTIGATION EXPERIMENTALE

Introduction.....	28
I.1 Matériaux utilisés	29
II.1.1. Béton.....	29
II.1.2. Patchs composites	30
II.1.2.1. Matrice : Les matrices époxy.....	30
II.1.2.2. Les renforts.....	31
II.1.2. 2. a. Liège.....	31
II.1.2.2. b. Carbone	33
II.2. Fabrication et préparation des spécimens.....	34
II.2.1. Spécimens cylindriques	34
II.2.2. Spécimens prismatiques (dalles).....	35
II.3. Procédé de confection du matériau composite.....	36
II.3.1. Dimensions et quantités.....	37
II.4.Collage des patchs sur les spécimens	39
II.5.Chargement et acquisition des valeurs.....	41
II.5.1. Essai de compression.....	41
II.5.2. Essai de traction des composites.....	42
II.6. Essai de poinçonnement.....	44
II. 6.1. Essai de poinçonnement.....	46
II. 6.1.1. Poinçonnement centré	46
II. 6.1.2. Poinçonnement excentré	52
II. 7. Analyse des résultats et conclusion.....	60

CHAPITRE III. MODELISATION ANALYTIQUE

Introduction	64
III.1. Comportement des matériaux utilisés	64
III.1.1. Béton.....	64
III.1.1.1. Comportement en compression.....	65
III.1.1.2. Comportement en traction	66

III.1.2. Comportement de composite à la rupture	67
III.1.2.1. Propriétés du composite unidirectionnel	67
III.2. Equilibre d'une section en béton renforcée	70
III.2.1. Conditions d'équilibre	70
III.3. Développement analytique du modèle de comportement d'une section en béton renforcée par un patch composite	71
III.3.1. Mécanisme de rupture de Kinnunen et Nylander	71
III.3.1.2. Critère de dans le mécanisme de rupture KN.....	72
III.3.1.2. Force de rupture dans le béton seul	73
III.4. Développement du modèle analytique	74
III.4.1. Cas de poinçonnement centré	75
III.4.1. 1. Application numérique	76
III.4.2. Cas de poinçonnement excentré	77
III.4.2.1. Application numérique	78
Conclusion du chapitre	80

CHAPITRE IV : ANALYSE PARAMETRIQUE

IV.1. Introduction	82
IV.2. Calcul statistique.....	82
IV.3. Variables considérées.....	84
IV.4. Présentations des résultats.	85
IV.4. 1. Influence du rapport des sections patch / dalle en béton ' S_p/S_D '.....	85
Poinçonnement centré.....	85
Poinçonnement excentré.....	86
IV.4. 2. Influence de l'excentricité de la charge et du patch composite	87

CONCLUSION GENERALE	91
----------------------------------	-----------

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	94
--	-----------

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Différentes familles de matrices.....	7
Figure I.2: Principaux matériaux de renfort.....	10
Figure I.3 : Réparation de poutre par adjonction d'armature	13
Figure I.4 : Chemisage en béton armée (Fukuyama et Sugano 2000)	14
Figure I.5: Renforcement de poteaux circulaires et rectangulaires avec des chemises en acier (Priestley et al. 1994 a, 1994 b)	14
Figure I.6 : Application de plats métalliques selon le procédé Hamelin 2002).....	15
Figure I.7 : Renforcement des poutres par matériaux composites	15
Figure I.8 : Différents types de réparation par précontrainte additionnelle [Fargeot B. 1997]	16
Figure I.9: Rupture par poinçonnement d'une plancher-dalle en béton armé	17
Figure I.10 : Distribution des efforts de cisaillement près d'une colonne (Favre et coll. 1997).....	17
Figure I.11 : Fissuration lors d'une rupture par poinçonnement	18
Figure I.12 : Evolution des fissures sur la face tendue d'une dalle pendant la mise en charge	19
Figure I.13: Etat de fissuration et fissures de poinçonnement à la rupture (vue en plan de la dalle)....	20
Figure I.14: Equilibre du parallépipède élémentaire.....	21
Figure II.1: Séchage des granulats, Plastifiant MEDAFLOW-30.....	29
Figure II.2: Liège aggloméré.....	33
Figure II.3: Plaque de fibre de carbone.....	33
Figure II.4: Matériels et matériaux utilisés.....	36
Figure II.5: Principe de confection des différents patches en liège	39
Figure II.6: Technique de renforcement des dalles par les différents Patches.....	40
Figure II.7.Patches composites de différentes dimensions	40
Figure II.8. Presse utilisé pour les cylindres 160×320mm	41
Figure II.9.: Essai de compression axial sur éprouvettes cylindriques ϕ 160 ×320 mm	42
Figure II.10. Dimensions des éprouvettes de liège et de carbone	43
Figure II.11. Machine d'essai IBERTEST	44
Figure II.12. Courbe de force déplacement de l'éprouvette composite à base de liège en traction	44
Figure II.13. Mise en point du dispositif d'essai de poinçonnement	45
Figure II.14. Présentation des variantes de dalles de patches composites de dimensions variées	46
Figure II.15. Confrontation des courbes Forces –déplacements des différentes variantes de dalles renforcées par des patches composites en liège	47
Figure II.16. Confrontation des courbes Forces –déplacements des différentes variantes de dalles renforcées par des patches composites en carbone	48
Figure II.17. Histogramme des valeurs Forces - déplacements des différentes variantes de dalles renforcées par des patches composites en Liège	48
Figure II.18. Histogramme des valeurs Forces - déplacements des différentes variantes de dalles renforcées par des patches composites en carbone	49
Figure II.19. Confrontation des courbes Force -déplacement des dalles en béton en fonction des propriétés et dimensions des patches composites : a) P 6x4, b)-P 12x8, c)- P 18x12, d)- P 25x22	49--51
Figure II.20. Influence des propriétés du patch composite sur la force de rupture de la dalle en béton renforcée	51
Figure II.21. Influence de la dimension du patch composite sur la force de rupture de la dalle en béton renforcée	52

Figure II.22. Mise en point de l'essai de poinçonnement excentré : $e = (1/3 \text{ et } 2/3)L'$ par rapport au centre de gravité de la dalle.....	53
Figure II.23. Dalles en béton renforcées par des patches composites de différentes dimensions cas : de la charge de $1/3$ par rapport au centre de gravité de la dalle : a)Patch (6x4)cm, b)Patch (12x8)cm, c)Patch (18x12)cm	53
Figure II.24. Dalles en béton renforcées par des patches composites de différentes dimensions cas de la charge de $2/3$ par rapport au centre de gravité de la dalle : a)Patch (6x4)cm, b)Patch (8x12)cm	54
Figure II.25. Courbe Force- déplacement de la dalle renforcée sous charge de poinçonnement excentrée : $e = 1/3L'$ avec : a) Patch composite = 6x4 cm, b) 12x8 ; c) 18x12 ; d)- dalle témoin	55-56
Figure II.26. Courbe Force- déplacement de la dalle renforcée sous une charge de poinçonnement excentrée : ($e = 2/3$) L' avec : a) Patch composite = 6x4 cm, b) 18x12 cm ; c)- dalle témoin	57-58
Figure II.27. Confrontation des courbes Force- déplacement dans le cas de $e = (1/3)L'$	58
Figure II.28. Confrontation des courbes Force- déplacement dans le cas de $e = (2/3)L'$	59
Figure II.29. : Histogramme des valeurs des forces et déplacements dans le cas : $e = (1/3)L'$	59
Figure II.30. Histogramme des valeurs des forces et déplacements dans le cas : $e = (2/3)L'$	60
Figure III 1. Etat de comportement du béton σ - ϵ	65
Figure III 2. Etat de comportement σ - ϵ du béton en traction	67
Figure III.3. Courbe contrainte-déformation d'un composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale, dans le cas où $\epsilon_{fu} < \epsilon_{mu}$	69
Figure III.4. Courbe contrainte-déformation d'un composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale, dans le cas où $\epsilon_{fu} > \epsilon_{mu}$	69
Figure III.5 : Diagramme des contraintes et des déformations d'une section rectangulaire en béton renforcé.....	70
Figure III.6 : Mécanisme de rupture de Kinnunen et Nylander.....	71
Figure III.7 : Périmètre du rectangle d'impact au niveau du feuillet moyen	74
Figure III.8 : mécanisme de rupture de dalle	75
Figure III.9 : Histogramme de poinçonnement centré	77
Figure III.10 : Histogramme des valeurs : Charge excentrée à $1/3L'$	79
Figure III.11 : Histogramme des valeurs : Charge excentrée à $2/3L'$	79
Figure III.12 : Variation de la force appliquée en fonction du type de patch et de l'excentricité	80
Figure IV.1 : Courbe de comparaison force- rapport des sections patch / dalle en béton (S_i/S_D) au poinçonnement centré.....	85
Figure IV.2: Evolution de la Charge en fonction du rapport (S_p/S_D) : Cas de poinçonnement excentré $e = 1/3 L'$	86
Figure IV.3: Evolution de la Charge en fonction du rapport (S_p/S_D) : Cas de poinçonnement excentré $e = 2/3 L'$	86
Figure IV.4: Evolution de la Charge en fonction de l'excentricité: Cas de renforcement par le patch (6x4)cm.....	87
Figure IV.5: Evolution de la Charge en fonction de l'excentricité: Cas de renforcement par le patch (8x12)cm	88
Figure IV.6: Evolution de la Charge en fonction de l'excentricité: Cas de renforcement par le patch (18x12)cm	88

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1: Caractéristiques moyennes des matrices thermodurcissables (TD) non renforcées ..	8
Tableau I.2: Caractéristiques moyennes des matrices thermoplastiques non renforcées	8
Tableau I.3: Principales différences entre matrices TP et TD	9
Tableau I.4: Les Caractéristiques des fibres de carbone	10
Tableau II.1: Constituants du béton pour le programme expérimental	30
Tableau II.2 : Caractéristiques de la résine époxy	31
Tableau II.3 : Caractéristiques de liège (Fiche technique)	32
Tableau II.4: Paramètres physico-mécaniques du carbone	34
Tableau II.5: Composition du matériau composite à base de liège.	37
Tableau II.6 : Caractéristiques du béton en compression	42
Tableau II.7 : Dimensions géométriques des patches composites réalisés	46
Tableau II.8 : Résultats des essais de poinçonnement centré	47
Tableau II.9 : résultats des essais de poinçonnement excentré	54
Tableau III.1: Confrontation des résultats expérimentaux et théoriques	76
Tableau III.2: Confrontation des résultats expérimentaux et théoriques	78
Tableau IV.1: Cas de Poinçonnement centré	83
Tableau IV.2 : Cas de Poinçonnement excentré : $e= 1/3 L'$	83
Tableau IV.3 : Cas de Poinçonnement excentré : $e= 2/3 L'$	83

Introduction Générale

Introduction Générale

L'analyse du comportement des dalles en béton armé sollicitées par un chargement vertical progressif de poinçonnement est un thème très actuel. Les accidents récents montrent clairement l'importance du phénomène.

Les dalles en béton armé lorsqu'elles sont soumises à des charges ponctuelles, elles développent des résistances plus au moins faibles. La rupture par poinçonnement est due à l'effort tranchant développé dans la zone fortement comprimée.

Le renforcement des dalles en béton armé par des patchs composites peut être considéré comme une solution vis à vis de la flexion et du poinçonnement.

Dans le cadre du projet de recherche sur le développement des techniques de renforcement des éléments de structures en béton par les matériaux composites, mon travail consiste à apporter une contribution à l'étude des dalles renforcées par des patchs composites soumises à un chargement vertical de poinçonnement.

Le but de notre travail consiste à étudier l'efficacité de la technique de renforcement externe des dalles par des patchs composites de dimensions variées dans l'amélioration de la réponse mécanique, sous l'effet d'un chargement vertical progressif de poinçonnement centré et excentré. A cet effet, un programme expérimental a été élaboré et réalisé, pour mettre en évidence l'influence, sur le comportement mécanique, des trois paramètres suivants :

- Les rapports des surfaces 'patch composite / dalle', couvrant toute ou une partie de la zone du moment maximal (surface renforcée) ,
- Les propriétés mécaniques des patchs composites
- L'excentricité du chargement progressif vertical de poinçonnement

Plusieurs variantes (surfaces renforcées) sont considérées. Un total de vingt quatre dalles renforcées et trois dalles de référence (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 du patch composite (S_p) sur le mode de rupture de la dalle sous l'effet d'une charge concentrée au centre de gravité de la dalle, quatre (04) variantes ont été considérées. Les sections des patches 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. Deux types de composites: composite à base de fibres de carbone et composite à base de résine renforcée de liège, ont été utilisés. Enfin, deux excentricités de la charge verticale, avec un pas de $(1/3)L'$ et $(2/3)L'$ sont également considérées dans cette étude.

Le travail présenté dans ce mémoire est organisé en quatre (04) chapitres et est terminé par une conclusion générale et des perspectives.

Le premier chapitre est totalement consacré à la revue de littérature orientée sur le phénomène de poinçonnement et 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.

Dans le deuxième chapitre, on présente toutes les opérations et procédures expérimentales. Un large programme expérimental consacré à l'étude des dalles en béton renforcées de patches composites soumises à un poinçonnement centré et excentré, nous a permis de mettre en évidence l'influence des paramètres régissant le comportement mécanique de ces dalles. Les résultats obtenus, nous ont permis de constater une amélioration de la capacité portante de la dalle renforcée. Cette amélioration est fonction de la nature du patch composite, de la surface renforcée, de la position du patch composite et de la position de la charge de poinçonnement.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des modèles théoriques développés pour prédire le comportement des dalles en béton renforcées par des patches composites soumises à un chargement vertical progressif de poinçonnement centré et excentré. Ces modèles sont basés sur les résultats expérimentaux obtenus sur les différentes dalles considérées dans cette étude.

Dans le quatrième chapitre, une analyse paramétrique est réalisée pour étudier l'influence des différents paramètres des modèles de comportement des dalles renforcées par des patchs composites, tels que : le rapport des sections patch / dalle en béton, l'excentricité de la charge et la position du patch composite par rapport au centre de gravité de la dalle. L'objectif principal est de valider les modèles proposés et d'étudier l'influence des différents paramètres en procédant à une confrontation des résultats donnés par ces modèles avec les résultats expérimentaux.

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

CHAPITRE I :
RECHERCHE
BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction :

Le matériau le plus utilisé dans la construction est certainement le béton. Le béton est considéré comme une pierre artificielle, néanmoins il subit durant sa durée de vie des dégradations (fissurations) et des vieillissements, qui proviennent soit des changements ou des rénovations d'usage et d'exploitation, soit d'une détérioration de sa capacité portante engendrée par un accroissement des charges (Vizuete 2000). [1]

Dans la plupart des cas, les détériorations du matériau béton entraînent des pertes de résistance et autres faiblesses qui nécessitent un renforcement de la structure pour améliorer les caractéristiques mécaniques des éléments qui la composent [2].

Le renforcement des éléments en béton par des composites, consiste à augmenter le niveau de service et en particulier l'augmentation de la ductilité et de la résistance pour répondre à des nouvelles exigences d'exploitation ou des conditions non prévues à l'avance, pendant la phase de conception et de calcul [35].

I.2. Constituants du béton :

La composition du béton a une grande influence sur ses caractéristiques ; le choix de la formulation a un impact direct sur les résistances. Le béton est un matériau composite obtenu à partir d'un mélange de granulats gros et fins (gravier ou pierre concassée, sable) liés entre eux par un liant hydraulique (une pâte de ciment + eau), avec des adjuvants et des additions pour améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou durci.

I.3. Matériaux composites :

Depuis une dizaine d'années, Les composites sont présents dans le secteur de la construction, en particulier dans le renforcement des éléments d'ouvrages endommagés. Les matériaux composites sont des produits de synthèse, composés de renforts, tels que : les fibres de verre, d'aramide ou fibres de carbone,... et une matrice dont le rôle consiste à protéger et à transmettre les charges aux fibres résistantes [32]. Les composites sont des matériaux qui peuvent se substituer aux métaux, Grâce à leurs légèretés, leurs résistances, qui dépassent celles de l'acier. En effet, les plaques composites FRP sont au moins deux fois plus résistantes que les plaques en acier et leur poids est 80% moins que celui de l'acier, pour la même dimension de la plaque [32].

Les composites s'adaptent à toutes les formes de supports et ne requièrent aucun placage sous pression, grâce à leur souplesse, leur légèreté et la facilité de mise en forme qui peut s'adapter à tous les ouvrages de formes complexes [3]

I.3.1. La Constitution des matériaux composites :

En général, les constituants principaux d'un matériau composite sont : la matrice et le renfort. Dans certains cas, des charges et des additifs peuvent être utilisés [4].

I.3.1.1. Les matrices :

Les matrices sont des matériaux isotropes, leur utilisation dans les composites permet de coller des fibres entre elles, de transmettre les efforts aux fibres et d'assurer une protection des fibres, en les isolant de l'humidité, de l'oxydation et des agressions chimiques.

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 chimique [5],[6].

Deux grandes familles de matrices en résine polymère sont largement connues: Les résines thermoplastiques (TP) et les résines thermodurcissables (TD). Il y a aussi les élastomères, qui sont utilisés parfois dans l'industrie automobile [7],[8],[32].

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

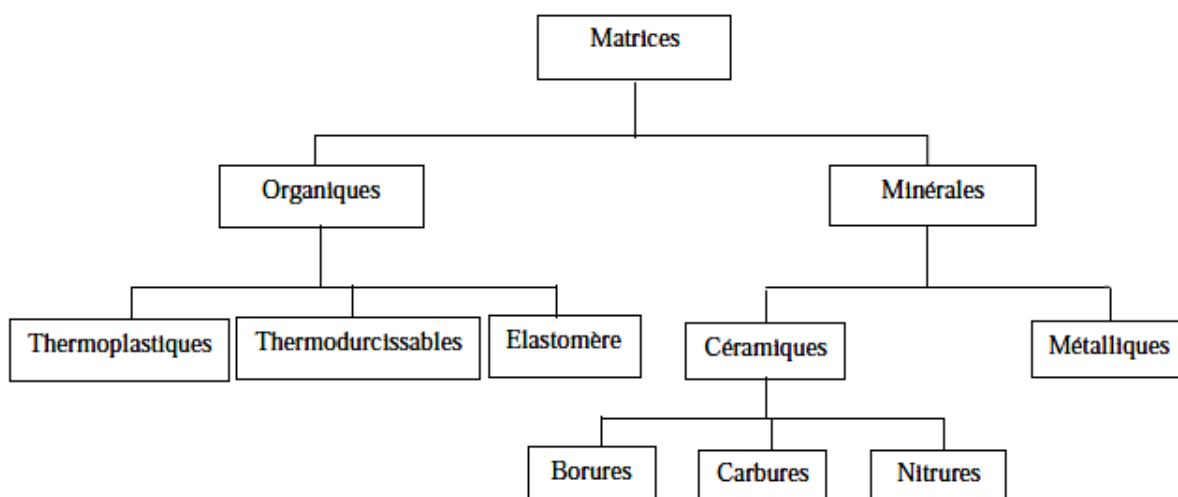


Figure I.1: Différentes familles de matrices [9]

Les différentes caractéristiques moyennes des matrices thermodurcissables (TD) non renforcées et des matrices thermoplastiques non renforcées sont présentées respectivement dans les tableaux I.1 et I.2 [10]

Tableau I.1: Caractéristiques moyennes des matrices thermodurcissables (TD) non renforcées [10]

Polymère	Masse spécifique (kg /dm ³)	Résistance à la traction (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Tenue à la chaleur continue(°C)
Polyester(UP)	1.2		3	120
Vinyl-ester	1.15		3.5	140
Phénolique	1.2	40 -50	3	120 – 150
Epoxyde	1.1 – 1.4	50 – 90	3	120 -200
Polyuréthane(UP)	1.1 – 1.5	20 – 50	1	100 – 120
Poly-imide	1.3 – 1.4	30 -40	4	250 – 300

Tableau I.2: Caractéristiques moyennes des matrices thermoplastiques non renforcées [10]

Polymère	Masse spécifique (kg /dm ³)	Résistance à la traction (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Tenue à la chaleur continue(°C)
Polypropylène(PP)	1.1 -1.2	20 – 30	1 -1.6	85 – 115
Polytéréphtalatebutylénique (PBT)	1.5	45 – 55	2.2 – 2.6	120
Polytéréphtalate éthylénique (PET)	1.6	55 – 75	2 – 2.2	105 – 120
Polyoxide de phénylène (PPO-)	1.3	55 – 65	2.4 – 2.6	80 – 105
Polyoxyméthylène (POM)	1.6	60 – 70	7 – 9	95 – 105
Polyamides (PA)	1.3 – 1.4	60 – 90	6 – 9	80 – 120
Polyamide-imide (PAI)	1.3 – 1.4	195	4.9	275
Polyéther-imide (PEI)	1.5	105	3	170
Polyéther-sulfone (PES)	1.6	85	2.6	180
Polyéther-éther-cétone (PEEK)	1.5	100	3.7	> 240

Les deux types de résines, qui sont actuellement, utilisées, présentent des propriétés différentes, les principales différences sont résumées dans le tableau I.3.

Tableau I.3: Principales différences entre matrices TP et TD [10]

Matrices	TD	TP
Etat de base	Liquide visqueux à polymériser	Solide prêt à l'emploi
Stockage	Réduit	Illimité
Mouillabilité des renforts	Aisée	Difficile
Moulage	Chauffage continu	Chauffage + refroidissement
Cycle	Long (polymérisation)	Court
Tenue au choc	Limitée	Assez bonne
Tenue thermique	Meilleure	Réduite (sauf nouveau TP)
Chutes et déchets	Perdus ou utilisés en charges	Recyclables
Conditions de travail	Emanations de solvants	Propreté

I.3.1.2. Renforts :

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites. Les avantages des fibres sont : Propriétés physico-mécaniques intéressantes, résistance à l'abrasion, propriétés électriques, etc...[32].

En fonction de leur utilisation, les renforts peuvent être d'origines et de formes diverses. Néanmoins, les renforts les plus utilisés se présentent sous forme filamentaire, allant de la particule de forme allongée à la fibre continue. Ils sont caractérisés par la nature de la fibre (minérale ou organique) et de l'architecture du renfort. Ils constituent une fraction volumique du matériau composite généralement comprise entre 30% et 70%.[11],[12]

L'organigramme ci-dessous, résume les principales fibres utilisées comme renforts.

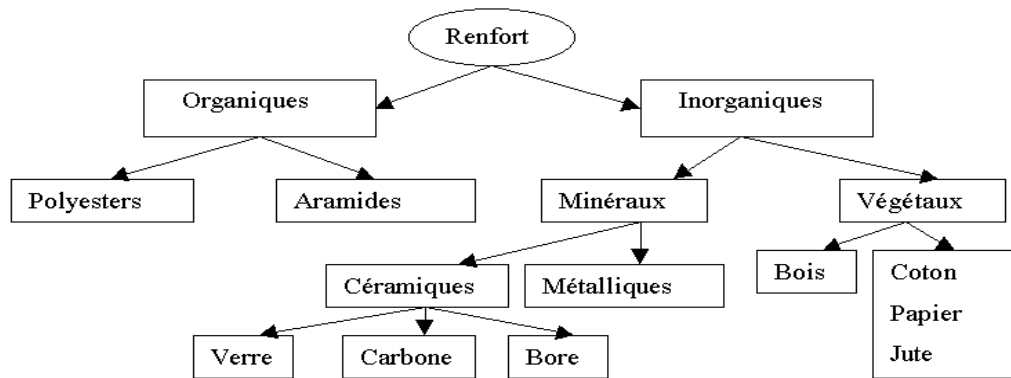


Figure I.2: Principaux matériaux de renfort [10].

- Les fibres de carbone :

Le carbone est le sixième élément du tableau de Mendeleïev et la liaison covalente carbone-carbone est la plus forte dans la nature (4 000 KJ/mol). Néanmoins, les atomes de carbone peuvent être organisés de plusieurs façons et former ainsi différentes structures, telles que celles du graphite, du diamant ou des formes amorphes. L'arrangement de graphite est très ordonné et anisotrope : les atomes sont disposés en plans parallèles distants de 0,34nm l'un par rapport à l'autre [32].

Il existe deux types de fibres de carbone : fibres de carbone à haute résistance (HR) issues d'une mise en œuvre par carbonisation, et celles à haut module (HM) issues d'une fabrication par graphitisation [5]. Les caractéristiques des fibres de carbone sont données dans le tableau I.4

Tableau I.4: Caractéristiques des fibres de carbone [32]

Caractéristiques	fibres de carbone haute résistance (HR)	fibres de carbone haut module (HM)
Pureté en carbone	97 à 98 %	99 %
Masse volumique (kg/m ³)	1800	2100 à 2200
Résistance en traction (MPa)	3000 à 5000	2500 à 3000
Module en traction (GPa)	environ 250	environ 500

Les fibres de carbone ont une très bonne tenue thermique et un très faible coefficient de dilatation. De plus, les fibres de carbone sont inertes à température ambiante et vis-à-vis de la plupart des agents chimiques.

Généralement, les renforts textiles utilisés en renforcement sont unidirectionnelles, les fils de trame (fil de liaison) sont uniquement destinés à faciliter le conditionnement et la mise en œuvre en maintenant les fils longitudinaux en position.[5]

- **Fibres naturelles :**

Les fibres naturelles sont des structures biologiques principalement composées de cellulose, hémicelluloses et lignine. Elles contiennent aussi des extractibles, des protéines et certains composés inorganiques en faibles proportions.[3],[13],[14]. Les fibres naturelles comme éléments de renfort dans les matériaux composites ont fait l'objet de nombreuses études durant les dernières décennies, en raison de leur plus grande facilité de recyclage. Ces renforts constituent une alternative aux fibres synthétiques. Ces dernières sont dures et rigides, en particulier, les fibres de verre sont abrasives et présentent des dangers potentiels pour la santé, notamment par les particules qu'elles génèrent pendant l'usinage. En contre partie, les fibres de cellulose sont des renforts,[15],[16],[17], qui permettent :

- de réduire le prix de revient du composite,
- d'obtenir des matériaux avec de bonnes propriétés mécaniques.
- d'éviter les problèmes potentiellement causés par les fibres minérales.

I.3.2. Application des matériaux composites :

Il existe deux procédés de réalisation d'un renforcement par composite : le système avec une cure in-situ et le système préfabriqué.

a. Le système avec une cure in-situ :

Deux processus différents peuvent être utilisés pour mettre en place un composite sur des surfaces de béton :

- le tissu sec peut être appliqué directement sur la résine déjà appliquée sur la surface du béton, suivi de l'application d'une couche de fermeture,
- le tissu peut être pré-imprégné avec la résine dans une machine adaptée, puis déposé avant polymérisation sur la surface de béton à renforcer.

b. Le système préfabriqué :

Ce processus consiste à pré-fabriquer des bandes qui sont installées, une fois durcies, sur la surface du béton en utilisant l'adhésif [5].

I.4. Le Renforcement :

Les dégradations du matériau béton entraînent des faiblesses qui nécessitent un renforcement de la structure pour améliorer les caractéristiques mécaniques des éléments qui la composent afin d'augmenter la durée de vie de l'ouvrage et lui conférer une certaine résistance pour mieux répondre aux nouvelles conditions de sollicitations.

De nombreuses solutions techniques sont disponibles et maîtrisées, elles ont fait la preuve de leur efficacité et répondent à l'ensemble des problèmes potentiels rencontrés sur les structures en béton armé. 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 [1].

I.4.1. Les avantages du renforcement [1].

- 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.

I.4.2.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 [1]:

- 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.

I.4.4. Méthodes de renforcement des structures en béton armé

Actuellement, plusieurs méthodes et techniques de réparation ou/et de renforcement sont proposées dans la littérature. Le choix de la technique dépend de plusieurs paramètres, tels que : le degré d'endommagement de la structure ou des éléments, les matériaux de renforcement, la nature et la forme de l'élément, etc. La solution la mieux adaptée sera alors définie en fonction de la structure à renforcer, de l'espace disponible pour l'exécution des travaux et de l'usage futur de la structure renforcée ou réparée, le cout de l'opération de renforcement. [1][10][19]

a. 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 [1][10].

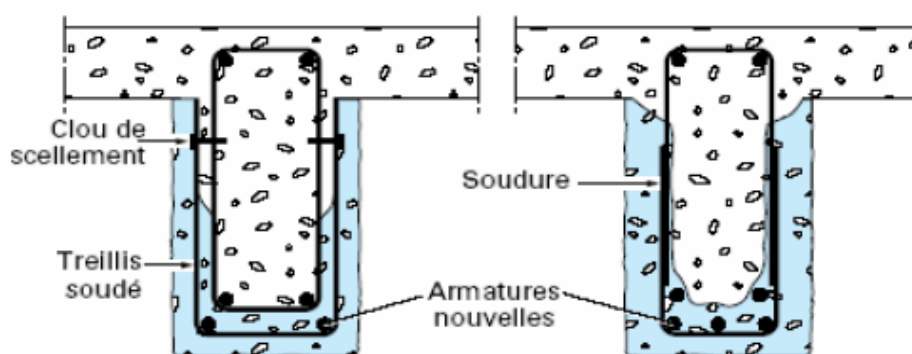


Figure I.3 : Réparation de poutre par adjonction d'armature [19].

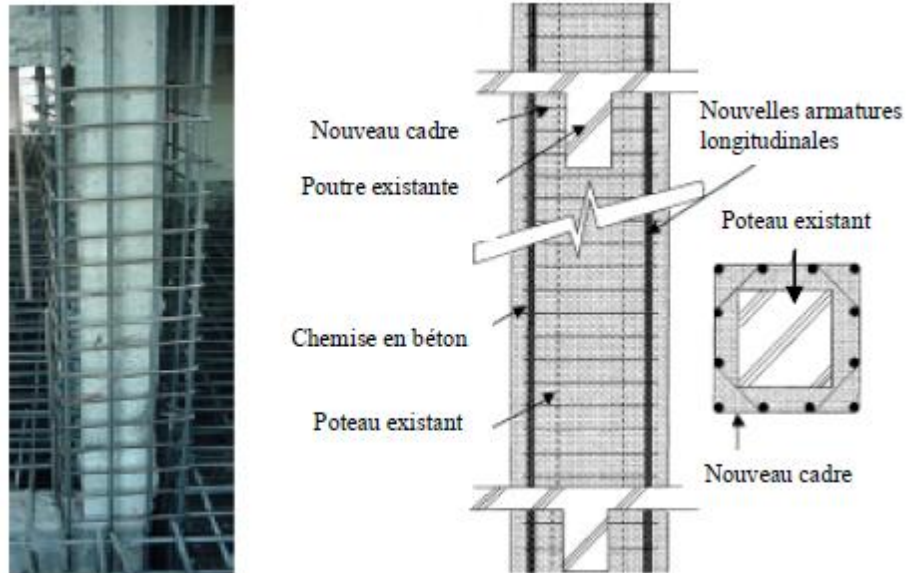


Figure I.4 : Chemisage en béton armée (Fukuyama et Sugano 2000)[1]

b. Chemises en acier

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.

Toutefois, cette technique est onéreuse et exige une main-d'œuvre qualifiée. Les chemises en acier pourraient éventuellement être utilisées dans les installations industrielles possédant un nombre restreint de poteaux nécessitant un renforcement, vu le coût élevé de l'acier. Cependant, dans le cas des bâtiments à usage d'habitation où plusieurs poteaux doivent être renforcés, cette technique s'avère trop onéreuse [1]

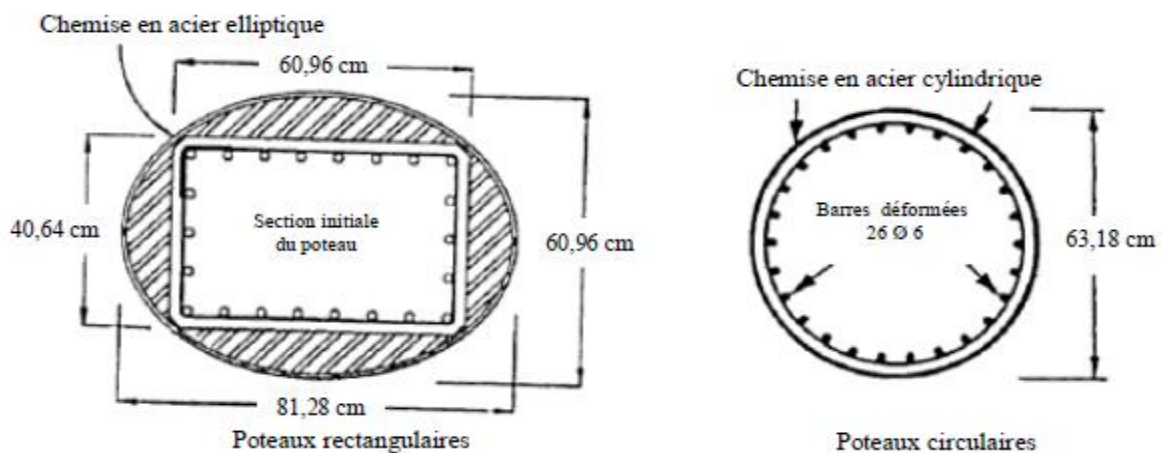


Figure I.5: Renforcement de poteaux circulaires et rectangulaires avec des chemises en acier (Priestley et al. 1994 a, 1994 b)[1]

c. Tôles collées :

Le renforcement de la structure par plats métalliques, mieux connue sous le nom de procédé l'Hermite, consiste à réaliser un collage de tôles d'acier sur les supports de béton. La tôle joue à la fois le rôle de coffrage et d'armatures. Pour que l'adhérence entre l'acier et la colle ait une bonne tenue, les tôles utilisées doivent subir toute leur préparation en usine (découpage, sablage...). L'emploi de ce mode de réparation est particulièrement limité, à cause de sa mise en œuvre difficile et onéreuse. [1][19]

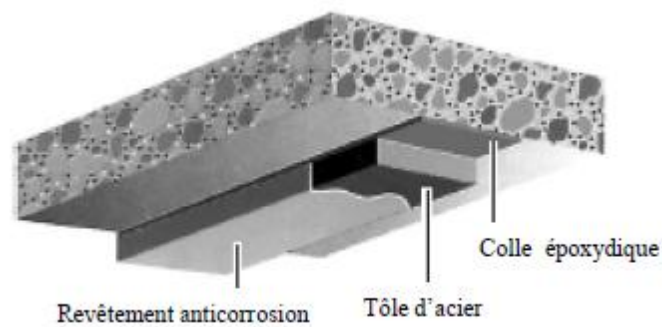


Figure I.6 : Application de plats métalliques selon le procédé Hamelin 2002)

d. Matériaux composites:

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 [1],[18],[19].



Figure I.7 : Renforcement des poutres par matériaux composites.

e. Précontrainte additionnelle

Cette technique consiste à renforcer une structure à l'aide de câbles de précontrainte ou de torons gainés graissés généralement, disposés à l'extérieur du béton.

La précontrainte additionnelle va introduire dans la structure des sollicitations complémentaires, qui vont compenser les défauts de dimensionnement ou de conception ou pour supporter des efforts supplémentaires, suite à des modifications des conditions d'exploitation [2][19]

Cette technique permet :

- Soit d'améliorer la pérennité des ouvrages ;
- Soit de renforcer des ouvrages en béton (en particulier des ouvrages en béton précontraint dont les câbles présentent des problèmes de corrosion ou de ruptures de torons ou d'ancrages ou qui ont fait l'objet lors de leur dimensionnement de prise en compte de lois de fluage mal adaptées) ;
- Soit d'augmenter la capacité structurale des ouvrages

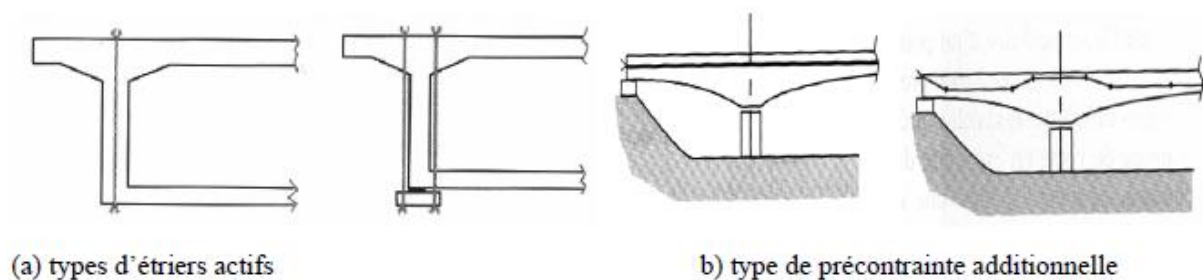


Figure 1.8 : Différents types de réparation par précontrainte additionnelle
[Fargeot B. 1997][19]

I.5. Le poinçonnement :

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, capable de transmettre des forces perpendiculaires à la surface ainsi que parallèles à son 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 [19],[20].

La rupture par poinçonnement est caractérisée par une force concentrée agissant perpendiculairement sur une dalle, qui crée une rupture locale.

La figure I.9 montre le cône tronqué de poinçonnement séparé de la dalle par la fissure de poinçonnement, généralement inclinée par rapport au plan de la dalle d'un angle compris entre 25 et 40°. 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. [22]

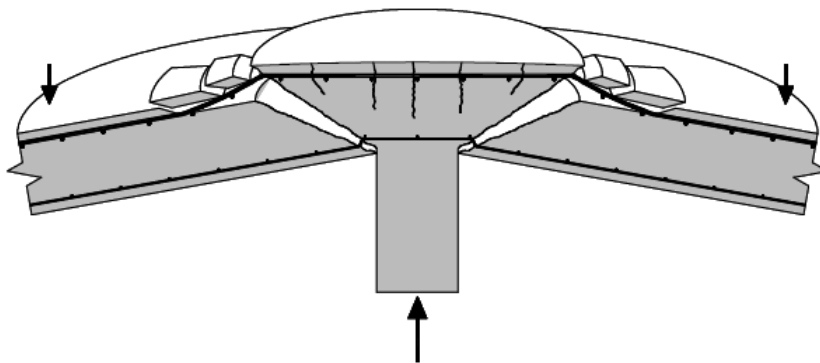


Figure I.9: Rupture par poinçonnement d'une plancher-dalle en béton armé. [22]

I.5.1 Mode de rupture

La résistance au poinçonnement constitue un paramètre important dans la conception des dalles en béton. Sous un chargement d'une charge concentrée (poinçonnement), des efforts tranchants très importants sont développés dans la dalle. La distribution de ces efforts tranchants est de forme hyperbolique et est maximale au nu de la colonne (Favre et coll.1997). La figure I.10 présente la distribution des efforts de cisaillement près d'une colonne.

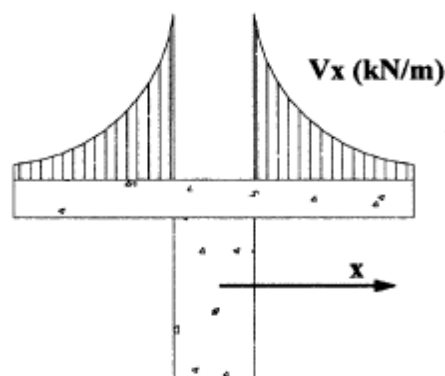


Figure I.10 : Distribution des efforts de cisaillement près d'une colonne [21]

Généralement, des efforts de flexion accompagnent les efforts tranchants. Ainsi, des ruptures dites par flexion-poinçonnement peuvent être présentes dans certains cas. Ce terme signifie que le mode de rupture final est par poinçonnement, mais que l'origine de la rupture est la flexion (Stein et coll. 2007). Ce phénomène est visible essentiellement dans les dalles armées d'acier. La grande ductilité observée, lors de rupture en flexion des dalles armées d'acier, engendre de larges déformations (plastification des armatures) entraînant un deuxième mode de rupture par poinçonnement.

Les dalles ayant un faible taux d'armature (moins de 1 %) sont susceptibles d'avoir une rupture par flexion-poinçonnement. [21]

Le mode de rupture par poinçonnement est fort complexe. Des essais sont couramment réalisés pour mettre en évidence ce phénomène par beaucoup de chercheurs. Les principaux points inhérents au problème de rupture par poinçonnement sont actuellement établis [Favre R. et al. 1997] [22]. Le mode de fissuration, lors d'une rupture par poinçonnement, est illustré par la figure 11 et l'évolution des fissures sur la face tendue d'une dalle pendant la mise en charge est montrée par la figure 1.12.

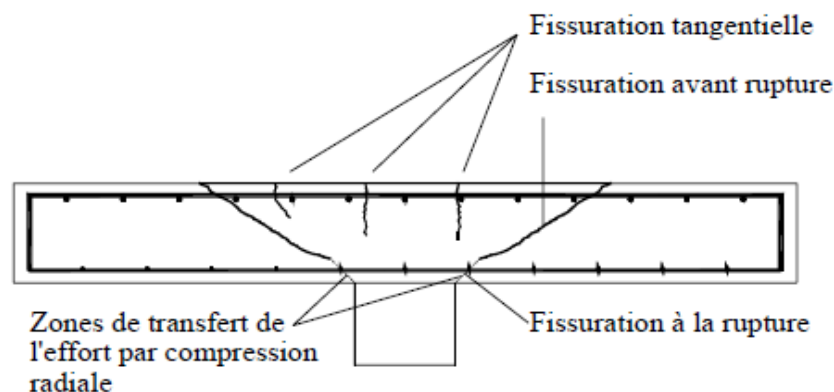


Figure I.11 : Fissuration lors d'une rupture par poinçonnement [22].

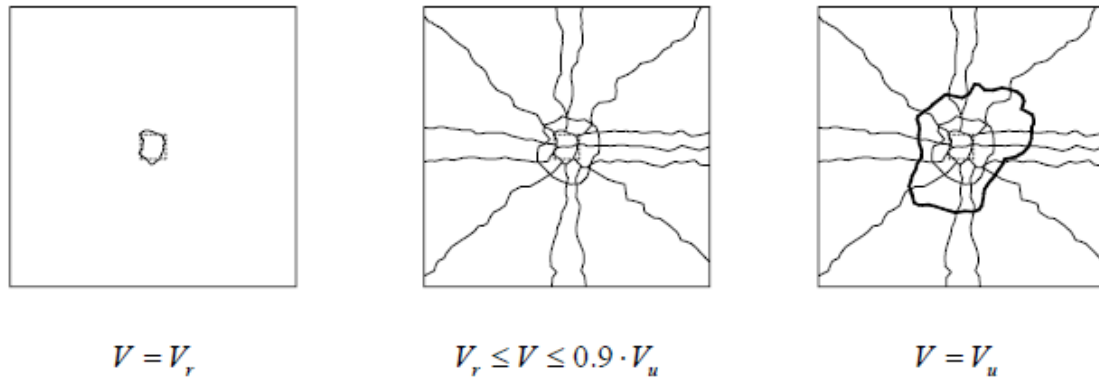


Figure I.12 : Evolution des fissures sur la face tendue d'une dalle pendant la mise en charge [22].

I.5.2.Type de poinçonnement :

En général, on peut distinguer deux types de poinçonnement : le poinçonnement symétrique et le poinçonnement non symétrique ou asymétrique

I.5.2.1. Poinçonnement symétrique :

Si la géométrie, la charge, les conditions d'appuis et la constitution de l'élément structurel sont considérés symétriques par rapport à deux axes de symétrie, on parlera de poinçonnement symétrique. Le mode de rupture est illustré par la figure I.11. Lorsque la symétrie est relative à tous les axes radiaux, on se trouve dans le cas particulier du poinçonnement axisymétrique [23],[24].

I.5.2.2. Poinçonnement non symétrique :

L'asymétrie est marquée par le manque d'une des conditions citées dans le cas du poinçonnement symétrique.

Le poinçonnement non symétrique est désigné par deux états différents : Le poinçonnement non symétrique centré et le poinçonnement non symétrique excentré. , La différence entre ces deux types de poinçonnement est donnée par l'apparition d'un moment de flexion transféré de la dalle à la colonne dans le cas du poinçonnement excentré.

Les comportements global et local autour de la colonne sont influencés par la non symétrie. La résistance n'est pas uniformément répartie autour du périmètre de contrôle [23].

a. Non symétrie centrée :

Dans la plus part des cas, tenant compte des exigences fonctionnelles qui imposent souvent des irrégularités géométriques, le dimensionnement de la dalle conduit à une disposition des armatures de flexion différente dans les deux directions perpendiculaires [23]

b. Poinçonnement excentré :

L'excentricité de la charge verticale induit un moment de flexion additionnel qui va influencer la surface de rupture. En fonction de l'intensité du moment de flexion, la forme peut devenir asymétrique autour de la colonne. L'augmentation des efforts locaux et l'ouverture de la fissure critique diminue la résistance par unité de longueur, par conséquent, la charge de rupture [23],[25].

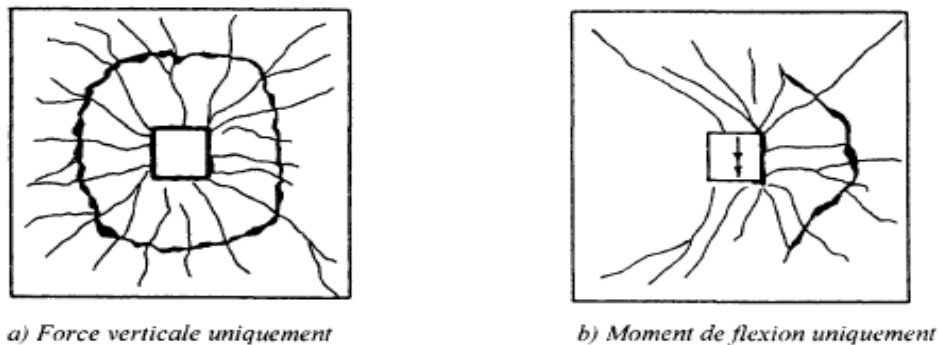


Figure I.13: Etat de fissuration et fissures de poinçonnement à la rupture (vue en plan de la dalle)[23].

La figure I.13.a montre une rupture par poinçonnement centré résultant uniquement d'une force verticale, tandis que la figure I.13.b montre une rupture par poinçonnement résultant uniquement d'un moment de flexion.

Dans le cas d'un poinçonnement excentré, les fissures se concentrent plutôt du côté où la force est appliquée. Plus l'excentricité est importante, plus la rupture est ductile.

I.6. Théorie élastique des dalles

La théorie élastique des dalles développée par Poisson en 1829, est décrite dans plusieurs ouvrages [26], [27], [28]. Les considérations les plus importantes sont rappelées ici.

Des 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

Grâce à ces hypothèses, toutes les contraintes peuvent être exprimées en fonction du déplacement w . L'expression pour w doit satisfaire une équation différentielle partielle linéaire laquelle, avec les conditions au bord, définit w de manière unique. Au voisinage de la colonne, l'effort tranchant devient important et la deuxième hypothèse n'est plus entièrement valable.

Les expressions des courbures sont :

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

Sur la base de ses expressions, on obtient les valeurs correspondantes pour les moments de flexion :

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

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

Ces équations définissent la forme que prend après déformation le feuillet moyen de la plaque quand on donne les moments de flexion M_x et M_y .

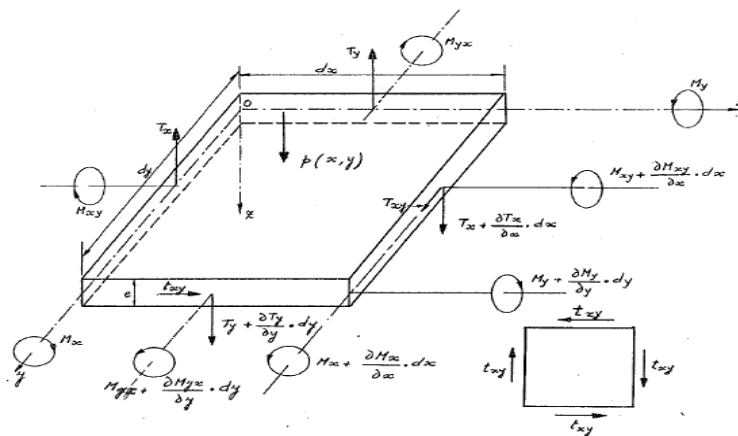


Figure I.14: Equilibre du parallélépipède élémentaire [26],

Exprimons maintenant 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. Par conséquent, les six équations de la statique se réduisent à 3, à savoir l'équation de projection parallèlement à oz et les équations de moment autour des axes ox et oy.

D'après la figure I.14, l'équation de projection parallèlement à oz s'écrit :

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

Soit après simplification :

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

Le poids propre de la plaque étant supposé inclus dans la valeur de la charge 'p'.

De même, en prenant 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 aboutit respectivement à :

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

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

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.7. Revue bibliographique : aspect expérimental

[**Matthys et Taerwe (2000)**] ont testé la capacité en poinçonnement de 17 dalles bidirectionnelles sous l'application d'une charge ponctuelle au centre de la dalle. Les dalles testées ont des dimensions de (1x1x0.12)m et (1x1x0.15)m. Deux principaux types d'armature ont été utilisés : grilles ou barres. Le taux de renforcement varie entre 0.27% à 3.76%. Les résultats obtenus ont montrés que les dalles armées de grilles avaient un réseau de fissuration différent de celles armées de barres. Les dalles renforcées de grilles de PRF avaient des fissures apparaissant soudainement sur toute la profondeur de la dalle et le long des renforcements. Les dalles armées de PRF ont démontré des résistances au poinçonnement ainsi que des rigidités post-fissuration moins élevées comparativement aux dalles armées d'acier ayant un taux d'armature semblable [21].

[**Rabinovitch O., et Frostig Y. 2002**] ont traité le problème d'une dalle BA renforcée par des plaques circulaires collées au centre de la dalle pour couvrir la zone du moment maximal.

Les résultats révèlent une augmentation de la charge ultime de 2 à 3 fois en comparaison avec les dalles non renforcées et montrent aussi la limite de la capacité flexionnelle de la dalle par le poinçonnement du fait que la charge soit concentrée au centre de la dalle. [19]

[**Ospina et coll. (2003)**] ont testé quatre dalles bidirectionnelles selon un montage semblable à El-Ghandour et coll. Les dalles testées ont des dimensions de (2.15x2.15x0.155)m, les types

d'armature de renforcement utilisés dans cette étude sont des barres de PRFV, des grilles de PRFV et de l'acier pour les spécimens de référence, avec une variation de taux de renforcement de 0.73% à 1.46%.

Les trois spécimens armés de barres ont une rupture par poinçonnement typique de la dalle au moment où la charge appliquée était maximale. Le spécimen armé de grille de PRPV a montré une rupture beaucoup plus ductile. La perte de résistance était très graduelle. Les importantes différences d'adhérence entre les deux types de renforcement expliquent la différence de comportement.[21]

[**Mosallam A.S. et al. 2003**] ont mené une étude expérimentale sur des dalles renforcées à échelle 1 (2670 × 2670 × 76 mm). Les renforts sont des bandes en composite carbone/époxy et verre/époxy de 0,46 m de largeur espacées de 0,46 m collées dans les deux directions. Les résultats ont montré que la rupture commence par apparition des fissures dans la zone non renforcée et par la suite la rupture en compression du béton et plastification des aciers. Le composite atteint 43% de sa déformation ultime et la charge ultime des dalles renforcées était 200% celle des dalles non renforcées. [19][21]

[**Teng J.G. et al. 2001**] ont réalisé une étude expérimentale sur des dalles en BA en porte-à-faux renforcées par des bandes en fibres de verre. Les bandes composites sont ancrées dans le béton. Elles sont introduites dans des encoches remplies de mortier et d'époxy dans le mur d'ancrage.

Deux modes de rupture ont été observés :

- décollement total des bandes composites dans le cas des dalles avec un degré de renforcement élevé (0.5%)
- mixte avec un décollement partiel du renfort et une rupture des fibres de verre en traction (dalles moins renforcées). Les résultats montrent que le composite a un effet plus important sur la résistance de la dalle que sur sa rigidité, cependant, le mode de rupture des dalles non renforcées est plus ductile que celui des dalles renforcées.[19]

[Marzouk H. et al. 2003] ont mené une étude expérimentale sur des dalles carrées (1900×1900×150mm) avec deux pourcentages d'armature : 0.35% et 0.50%. Les dalles sont renforcées par des bandes en composite carbone/époxy et verre/époxy couvrant 30% de la face tendue de la dalle. Un seul pli en composite carbone/époxy haute résistance (2800 MPa) est collé dans chacune des deux directions, pour le renforcement en composite verre/époxy (600 MPa), deux plis sont collés dans chacune des deux directions. Les résultats ont montré une augmentation de la charge ultime de 36% avec un gain plus important dans le cas des dalles renforcées à l'aide du composite en fibres de carbone. L'ajout de plis supplémentaires sur les bords n'a pas empêché le décollement des bandes composites qui fut le mode de rupture prédominant et les essais ont été arrêtés avant l'effondrement total de la dalle pour éviter une rupture brutale par poinçonnement.[19][21]

[El Houssein Rochdi et coll. (2004)] ont testé quatre dalles bidirectionnelles de dimensions (1900x1900x150)mm, les types d'armature de renforcement utilisés sont des barres de PRFV, avec une variation de taux de renforcement de 0.95% à 1.67%. Les résultats ont montré que l'augmentation du taux d'armature a entraîné une augmentation de la résistance au poinçonnement. [19]

[Zhang et coll. (2005)] ont testé des dalles de dimensions de (1900x1900x150)mm armées de PRFV dont le taux de renforcement de 1.10% à 1.18%. Dans cette étude, les auteurs ont testé une dalle armée de PRFV ayant un béton d'une résistance à la compression de 71 MPa. Les auteurs indiquent que la rigidité des dalles armées de PRFV après fissuration est différente de la dalle de référence armée d'acier. [21]

Conclusion du chapitre

Les structures de type dalles sont très sensibles au poinçonnement. Le renforcement par des patchs composites peut être une solution intéressante et rentable. Pour améliorer la capacité portante de la dalle, le rapport des surfaces 'patch composite / dalle', couvrant toute ou une partie de la zone du moment maximal (surface renforcée) est considéré.

Dans notre travail, nous envisageons le renforcement à l'aide de patchs en matériau composite de nature différente et de dimensions proportionnelles à la surface renforcée.

CHAPITRE II :
INVESTIGATION
EXPERIMENTALE

Introduction

Ce chapitre est totalement consacré à la présentation des démarches utilisées lors des essais (protocole expérimental). Les procédés de construction des différentes éprouvettes, les caractéristiques des matériaux utilisés (béton, patchs composites), la caractérisation classique du comportement mécanique (traction axiale sur le matériau composite, compression simple sur les cylindres et le poinçonnement /flexion sur les dalles) qui permet d'étudier les propriétés élastiques ainsi que la rupture de chaque matériau et l'analyse des différents résultats obtenus sont présentés.

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.

Tous les essais ont été réalisés au Laboratoire de Modélisation des Matériaux et Structures LAMOMS de Génie-Civil de l'université de Tizi-ouzou.

Pour mener à terme cette investigation expérimentale, nous avons réalisé le calcul des proportions des constituants du béton, préparé le coffrage, le bétonnage, assuré le mûrissement des éprouvettes, réalisé les différents patchs composites, le collage de ces patchs sur le support béton préalablement nettoyé et enfin, procédé à tous les réglages concernant les essais (machine, paramètres et configuration) et les moyens de mesure. Les résultats obtenus, sur chaque constituant, ont permis de fournir des informations indispensables à la compréhension du comportement mécanique et des mécanismes de rupture des éléments étudiés.

Pour le besoin de l'étude, nous réalisons deux types d'éprouvettes en béton : des dalles de dimensions $28 \times 23 \times 3 \text{ cm}^3$ pour les essais de poinçonnement et des cylindres $16 \times 32 \text{ cm}^2$ pour caractériser le béton en compression. Aussi, des plaques composites de nature variée ont été réalisées pour la confection des patchs de renforcement de dimensions différentes. Le but de cette étude expérimentale est d'observer le comportement des dalles renforcées avec des patchs composites, et d'évaluer l'effet des différents paramètres du renforcement notamment l'augmentation de la charge ultime et le mode de rupture. Cette série d'essais permet de faire une comparaison entre le comportement des dalles renforcées avec celui des dalles non renforcées. Plusieurs variantes (surface renforcée) sont considérées. Un total de douze dalles

renforcées avec composite à base de carbone, 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 puis sous charge excentrée quatre (04) variantes ont été considérées. Les sections des patches sont calculées de façon que le rapport X_P/Y_P de patch soit proportionnel à L_D/l_D de la dalle, avec un pas de 6cm dans le sens longitudinal et de 4cm dans le sens transversal.

II.1 Matériaux utilisés

II.1.1. Béton

Un seul type de mélange de béton a été utilisé pour la fabrication des différents spécimens à étudier. La formulation de ce béton a été déterminée à partir de la méthode de **Dreux-Gorisse**. le ciment utilisé est un ciment portland importé de marque CIMPOR de classe CEM II/A-L 42.5R, le sable et le gravier utilisés proviennent d'une sablière, stocké à l'université, les granulats sont lavés et séchés à l'étuve à une température de 105°C et conservés dans des sacs à l'intérieur du laboratoire (granulats sec et propres), l'eau de gâchage utilisé est l'eau du robinet, potable enfin nous avons utilisé un plastifiant MEDAFLOW-30 fabriqué par Granitex. Une même gâchée est utilisée pour chaque série de test. Les constituants du béton sont présentés dans le Tableau II.1.



Figure II.1: Séchage des granulats, Plastifiant MEDAFLOW-30

Tableau II.1 : Constituants du béton.

Composant	Masse pour 1m³ de béton
Ciment (Kg/m ³)	350
Fumée de silice (Kg/m ³)	75
Sable (Kg/m ³)	750
Eau (Litres)	192
Gravier 8/15 (Kg/m ³)	572
Gravier 3/8 (Kg/m ³)	253
Superplastifiant	5.1 litre
Rapport E/C	0.54

II.1.2. Patchs composites

Les matériaux composites utilisés dans notre étude, sont des patchs en fibre de carbone et 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.

II.1.2.1. Matrice : La résine époxyde

Les résines époxydes sont utilisées d'une façon incontournable pour les applications structurales, cet intérêt provient des propriétés spécifiques :

- 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.
- Bonne tenue mécanique, dont la fatigue.
- Forte adhésion au renfort.
- Une bonne tenue aux températures élevées.

Tableau II.2 : 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 ($\bar{U} \cdot m$)	1010 à 1013

II.1.2.2.Les renforts

II.1.2. 2.a. 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 II.3 : Caractéristiques du liège (Fiche technique)

Caractéristiques	Tolérance
Densités	0.24g/cm ³
Granulométries	4 / 8 mm
Coefficient de conductibilité thermique 20°C	$\lambda = 0,040 \text{ W/m}^\circ\text{K}$
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	$R = 0,5 / 0,75 / 1 / 1,25 \text{ m}^2\text{K/W}$
Chaleur spécifique	1,67 KJ/Kg°C
Résistance à la flexion	1,8 Kg/cm ²
Résistance à la compression	0,20 Kg/cm ²



Figure II.2: Liège aggloméré.

II.1.2.2.b. Carbone

On a utilisé une plaque en stratifié de fibres de carbone de type 'weber.tec. Le carbone est de haute performance et résistant à la corrosion. La plaque est fabriquée par S & P, Suisse, elle présente une teneur volumique de fibres de 70% dans une matrice de résine époxyde.

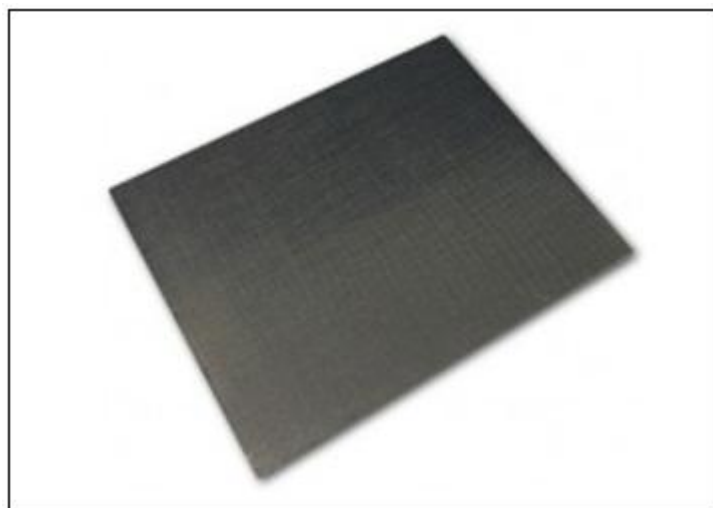


Figure II.3: Plaque de fibre de carbone.

Tableau II.4: Paramètres physico-mécaniques du carbone

Les paramètres physiques		
Composition	Stratifié en fibres de carbone imprégnées dans une résine époxy	
Couleur	Noir	
Fraction volumique des fibres v_f	70%	
Densité	1.7 g/cm ³	
Résistance à la température T_{GM}	100 – 130°C	
Épaisseur de	1.2 mm et 1.4 mm	
Largeur	10, 50, 80, 90, 100, et 120 mm Autres largeurs disponibles sur demande	
Les paramètres mécaniques		
	Grade 150	Grade 200
Module d'élasticité E_f	> 165 kN / mm ²	> 210 kN / mm ²
Module d'élasticité caractéristique E_{fk}	150 kN / mm ²	200 kN / mm ²
Résistance à la traction f	2800 - 3000 N/mm ²	2400-2600 N / mm ²
Résistance caractéristique à la traction f_{fk} (où $f_{fk} = f - 2s$)	2850 N / mm ²	2400-2600 N / mm ²

II.2. Fabrication et préparation des spécimens

II.2.1. Spécimens cylindriques

Des cylindres de diamètre 160mm et de hauteur 320 mm ont été réalisés afin de caractériser le béton utilisé, pour des raisons de stabilité, c'est-à-dire, pour éviter le "flambement" de l'éprouvette, le cylindre est nécessairement court, cet essai est réalisé avec une presse par écrasement des éprouvettes cylindriques de béton, placées verticalement et dont les faces de

chaque cylindre, en contact avec la presse, ont été surfacées pour garantir un chargement uniforme. Cette méthode consiste à munir chaque extrémité de l'éprouvette d'une galette lisse en respectant ainsi: la planéité et la perpendicularité aux génératrices. La perpendicularité est obtenue grâce au maintien des génératrices de l'éprouvette perpendiculairement au fond du moule.

II.2.2. Spécimens prismatiques (dalles)

L'ensemble des spécimens prismatiques ont été coulés à l'horizontale, ce qui fait que la planéité des surfaces est assurée par le coffrage lui même.

Le procédé de fabrication de chaque éprouvette est comme suit :

- *Coffrage* : pour les spécimens de formes prismatiques, on a utilisé des moules en bois, démontables, constitués de planches de bois et imprégnés par un agent démoulant pour faciliter l'extraction des éprouvettes après la prise du béton. Par contre pour les cylindres on a utilisé des coffrages en acier, alors que pour les plaques composites, nous avons confectionné des moules en verre.

-*Bétonnage* : la mise en place du béton dans les moules a été faite en 2 couches, chacune vibrée pendant 20 à 30secondes sur une table vibrante. Après 24h de séchage, le coffrage a été retiré et les éprouvettes ont été mises en mûrissement,

-*Mûrissement*: Toutes les éprouvettes ont été plongées dans un bac d'eau, à une température constante de 20° C pendant une durée de 28 jours, selon la norme européenne (NF 2001) relative à la confection et la conservation des éprouvettes.

-Toutes les éprouvettes vont être testées après 28 jours de mûrissement. Les éprouvettes cylindriques sont destinées à déterminer la résistance caractéristique en compression du béton. Les paragraphes suivants présentent les étapes de confection des différents spécimens d'étude nécessaire. La figure II.4 présente le matériel utilisé lors de la préparation des éprouvettes.



Figure II.4: Matériels et matériaux utilisés.

II.3. Procédé de confection du matériau composite

Nous avons fabriqué plusieurs moules de dimensions différentes pour la réalisation des patches composites. Les moules ont des dimensions intérieures respectivement de (60x40x2) mm, (120x80x2) mm, (180x120x2) mm et (250x220x2) mm.

II.3.1. Dimensions et quantités

Le principe de moulage au contact, qui est un procédé manuel pour la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression, est utilisé dans cette étude.

Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée. Nous avons fabriqué plusieurs moules de dimensions différentes pour la réalisation des patchs composites, les moules ont des dimensions intérieures de (60x40x2) mm, (120x80x2) mm, (180x120x2) mm et (250x220x2) mm. Le tableau III.5 résume les quantités de chaque constituant de la plaque composite à base de liège.

Tableau II.5 : Composition du matériau composite à base de liège.

Désignation	Composition	Dimensions	Composants	Volume	Densité	Quantités
L15%	Epoxy + charge (15% Liège D ≤ 0.08 mm)	60x40x 2mm	Epoxyde	4.08cm ³	1.1 g/cm ³	2.99 g
			Durcisseur			1.5 g
			Liège	0.72 cm ³	0.24 g/cm ³	0.17 g
		80x120x 2mm	Epoxyde	16.32cm ³	1.1 g/cm ³	11.97 g
			Durcisseur			5.98 g
			Liège	2.88 cm ³	0.24 g/cm ³	0.69 g
		120x180x 2mm	Epoxyde	36.72cm ³	1.1 g/cm ³	26.93 g
			Durcisseur			13.46 g
			Liège	6.48 cm ³	0.24 g/cm ³	1.56g
		250x220x 2 mm	Epoxyde	93.5cm ³	1.1 g/cm ³	68.57 g
			Durcisseur			34.28 g
			Liège	16.5 cm ³	0.24 g/cm ³	3.96 g

Les patches 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.

Pour plus de détails, toutes les étapes de confection, dans un ordre bien précis, sont présentées ci - dessous:

- On prépare la quantité de mélange qui va être utilisée (selon le volume);
- On remue les deux éléments composant le MEDAPOXY STR, dans le but d'avoir un mélange bien homogène;
- On verse les grains de liège de diamètre moyen inférieur à 0.08 mm, le pourcentage est de 15% de la masse totale du composant; dans le mélange, d'une manière graduelle,
- On assure un malaxage d'environ 3 minutes avec un agitateur électrique à faible vitesse de rotation, pour obtenir une bonne homogénéisation du mélange;
- On verse le mélange progressivement dans le moule en verre, pour garantir une bonne répartition du mélange (éviter la formation de poches d'air);
- On procède au démoulage, après durcissement du matériau (Après 24h);
- On place les plaques durcies dans l'étuve à une température de 70°C, pendant 3 jours pour la polymérisation du composite.



Figure II.5: Principe de confection des différents patchs en liège.

II.4.Collage des patchs sur les spécimens

La préparation de la surface du béton avant le collage de chacun des patchs composite 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'amoinrir 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.

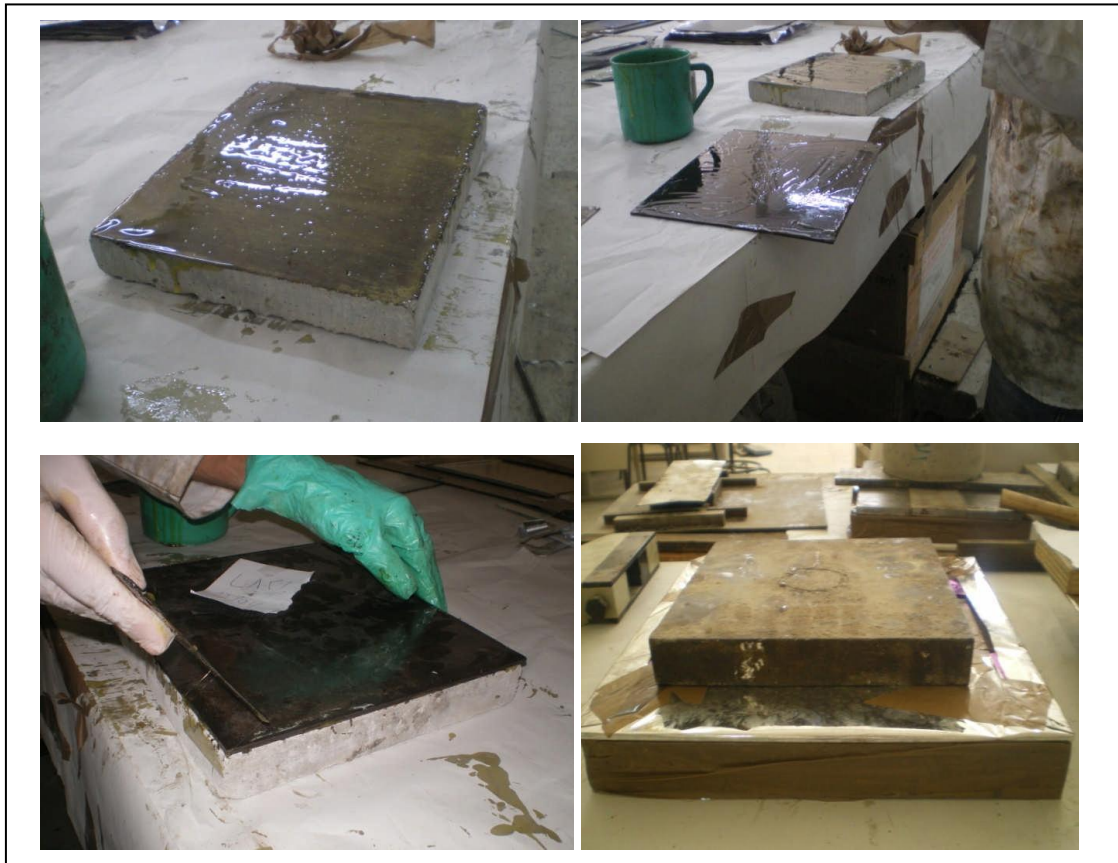


Figure II.6: Technique de renforcement des dalles par les différents Patches.

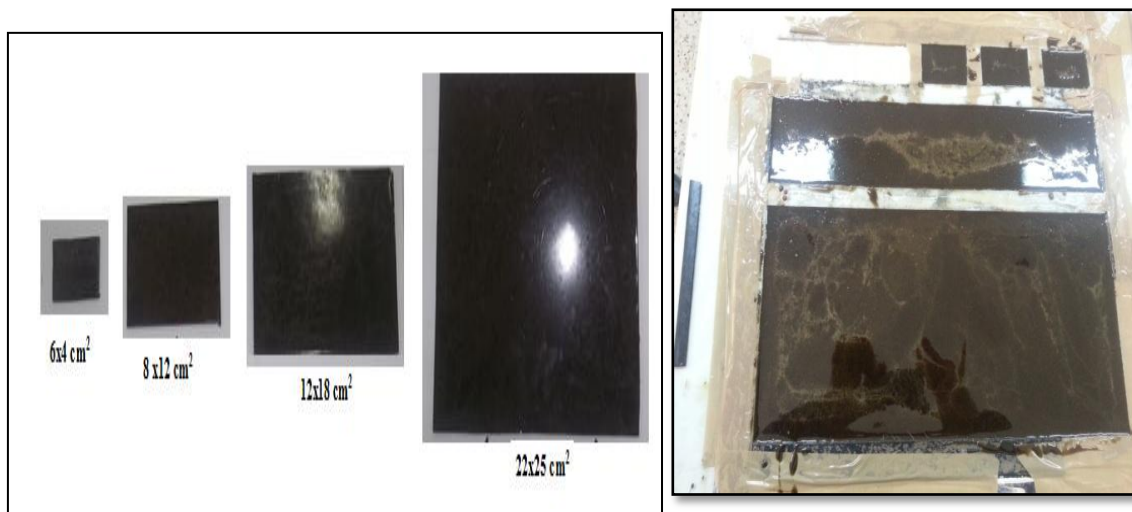


Figure II.7. Patches composites de différentes dimensions

II.5. Chargement, acquisition des valeurs et présentation des résultats

II.5.1. Essai de compression

Les essais de compression des cylindres $\text{Ø}160 \times 320$ mm ont été réalisés pour déterminer les caractéristiques mécaniques du béton (résistance à la compression, module d'élasticité E et le coefficient de poisson ν).

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 utilisé et le mode chargement est illustré par la figure II.8.



Figure II.8. Presse utilisé pour les cylindres 160×320 mm.

La mise sous contrainte est effectuée sans choc et d'une manière continue, afin de mesurer le raccourcissement axial et l'expansion latérale des échantillons, ces lectures visuelles sont mesurées par un montage équipé de deux comparateurs de déplacements installés respectivement dans le sens vertical et radial. Cette acquisition manuelle des données, a été relativement délicate au moment de la lecture à une vitesse suscitée du chargement, ainsi les déformations transversales calculées à partir de mesures effectuées à mi hauteur des

spécimens, sont une indication de l'expansion latérale des différentes éprouvettes due à la charge de compression axiale (effet de Poisson).

La courbe contrainte – déformation est illustrée par la figure II.9 et les valeurs moyennes des caractéristiques du béton en compression sont données par le tableau II.6.

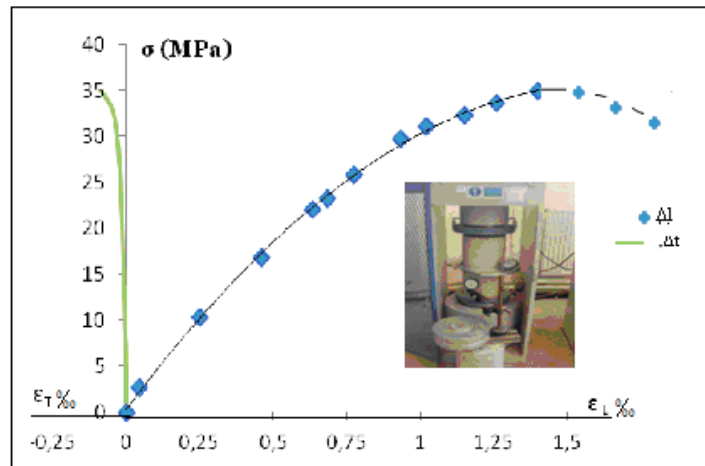


Figure II.9.: Courbe contrainte – déformation du béton

Tableau II.6 : 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 μ	0.14

II.5.2. Essai de traction des composites

Afin de déterminer les propriétés physico- mécaniques en traction du matériau composite élaboré, des 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 : $10 < b \leq 15\text{mm}$ $h \leq 5\text{mm}$. Les éprouvettes ont pour dimensions une longueur de 140 mm sur une largeur de 14mm avec une épaisseur de 2mm.

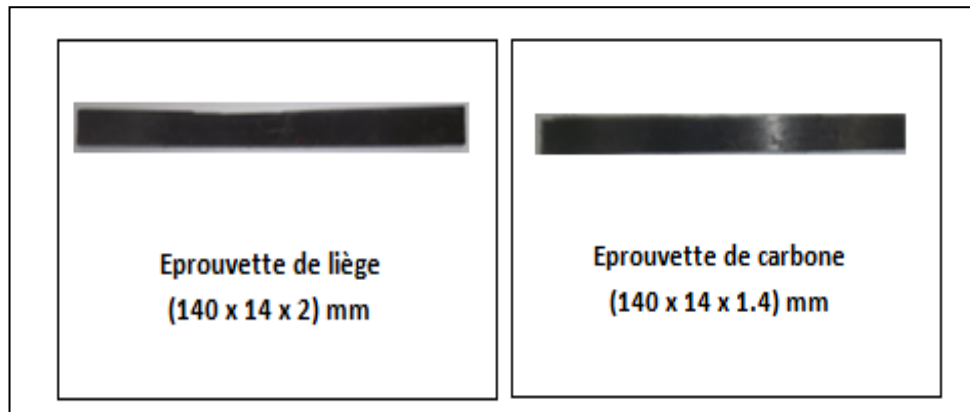


Figure II.10. Dimensions des éprouvettes de liège et de carbone.

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.

Les propriétés physiques et mécaniques sont généralement calculées de la manière suivante :

- la contrainte axiale dans l'éprouvette est obtenue en divisant la force axiale mesurée par l'aire de la section utile de l'éprouvette au début de l'essai.
- le module élastique en traction est calculé en divisant la contrainte axiale par la déformation axiale mesurée par la jauge ou par des capteurs.
- la contrainte à la rupture est habituellement identifiée comme étant la contrainte maximale enregistrée durant tout l'essai.
- le coefficient de Poisson est obtenu en divisant la déformation transversale par la déformation axiale de l'échantillon.



Figure II.11. Machine d'essai IBERTEST.

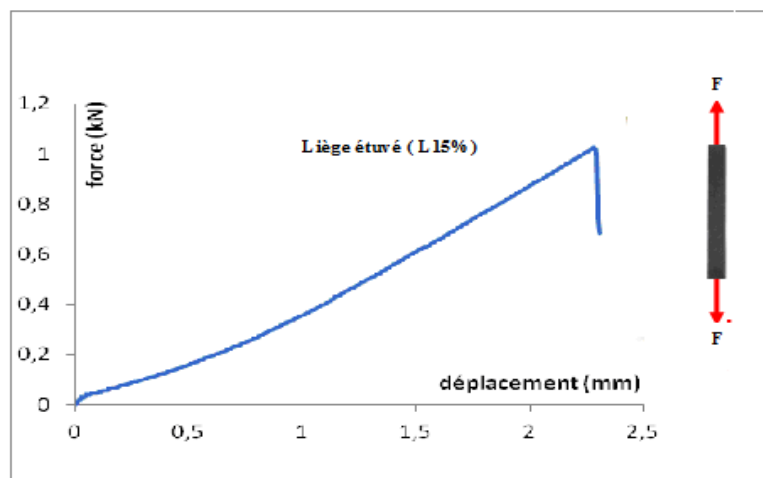


Figure II.12. Courbe de force déplacement de l'éprouvette composite à base de liège en traction

Sur cette courbe, on observe un comportement linéaire du composite, qui se traduit par une relation linéaire entre la contrainte σ et la déformation ε .

II.6. Essai de poinçonnement

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. Une meilleure compréhension du phénomène est indispensable pour concevoir des

solutions constructives plus performantes et d'évaluer la capacité portante de structures existantes.

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.

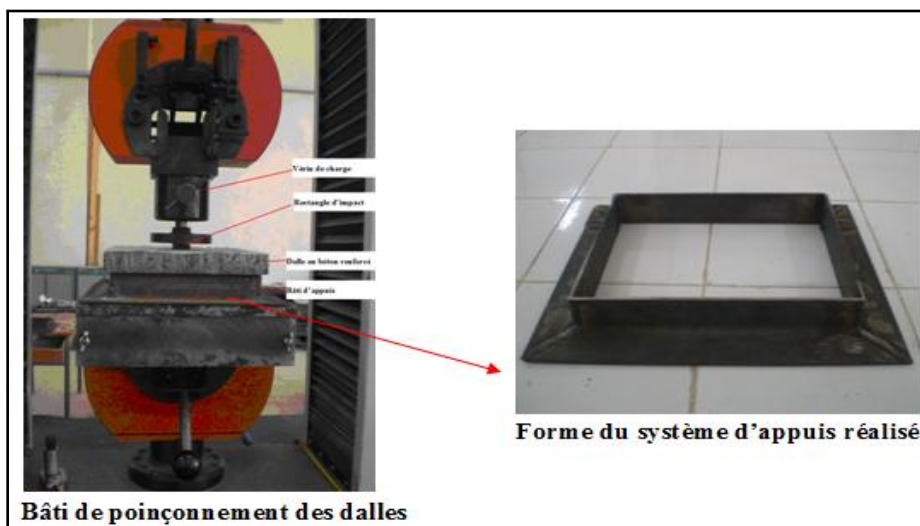


Figure II.13. Mise en point du dispositif d'essai de poinçonnement.

L'objectif de cet essai consiste à identifier expérimentalement le comportement des dalles renforcées par des patchs composites. Deux cas d'application de la charge ont été considérés : Poinçonnement centré et poinçonnement excentré. 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 propriétés du patch composite et enfin l'excentricité de la charge de poinçonnement. Les dimensions géométriques des patchs composites sont présentées dans le tableau II.7.

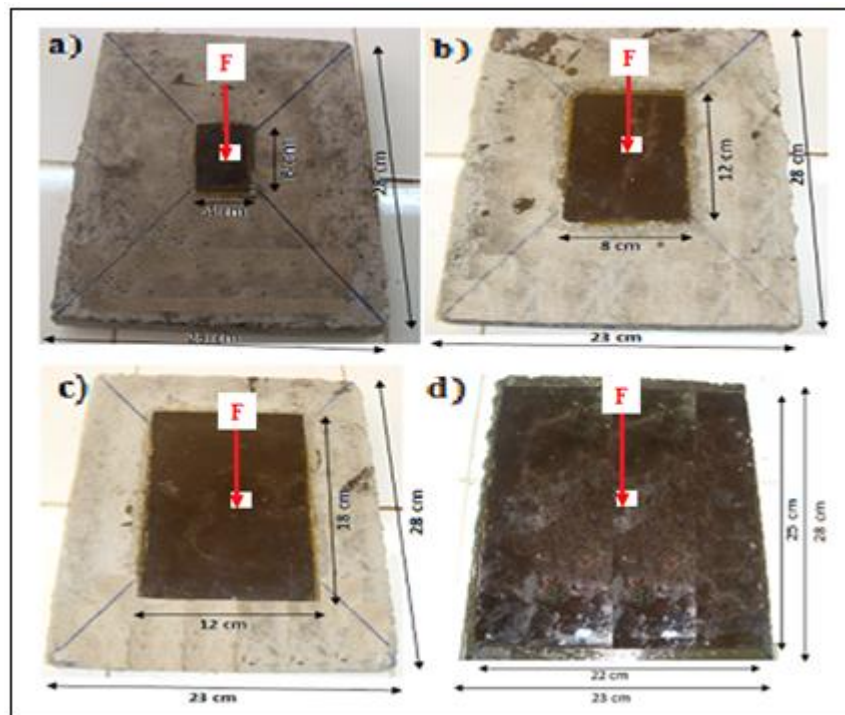
Tableau II.7 : Dimensions géométriques des patchs composites réalisés

Variante	Dimension patch (cm)	Epaisseur du patch (mm)		Dalle en béton (cm)
		Liège	Carbone	
1	6x4	2	1.4	28x23x3
2	12x8			
3	18x12			
4	25x22			

II. 6.1. Essai de poinçonnement :

III. 6.1.1. Poinçonnement centré

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 II.14.** Présentation des variantes de dalles de patchs composites de dimensions variées.

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

Tableau II.8.: Résultats des essais de poinçonnement centré

	Désignation	Dimensions (cm)	Rapport (S_P/S_D)	Force de rupture (kN)	Déplacement au pic (mm)
Dalle de référence	DRef	-	-	4.62	1.26
Dalle renforcées par patch en liège	DRCL1	6x4	0,037	5.62	1.28
	DRCL2	12x8	0,149	7.33	1.31
	DRCL3	18x12	0,335	9.4	1.52
	DRCL4	25x22	0,854	9.6	1.64
Dalle renforcées par patch en carbone	DRCC1	6x4	0,037	5.83	1.37
	DRCC2	12x8	0,149	7.45	1.2
	DRCC3	18x12	0,335	11.19	1.36
	DRCC4	25x22	0,854	9.87	1.5

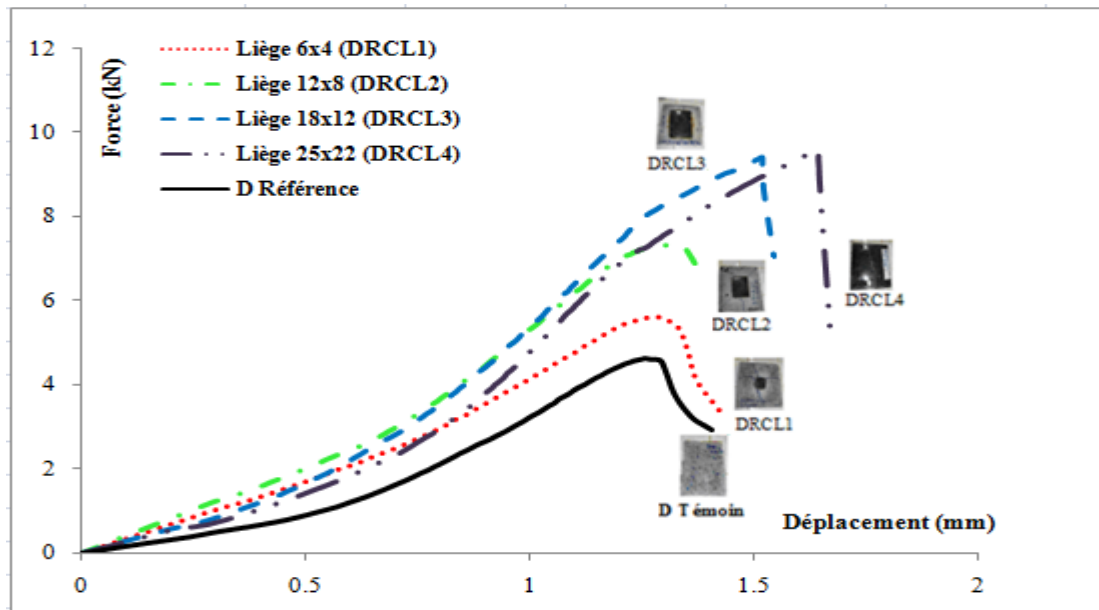


Figure II.15. Confrontation des courbes Forces –déplacements des différentes variantes de dalles renforcées par des patches composites en liège

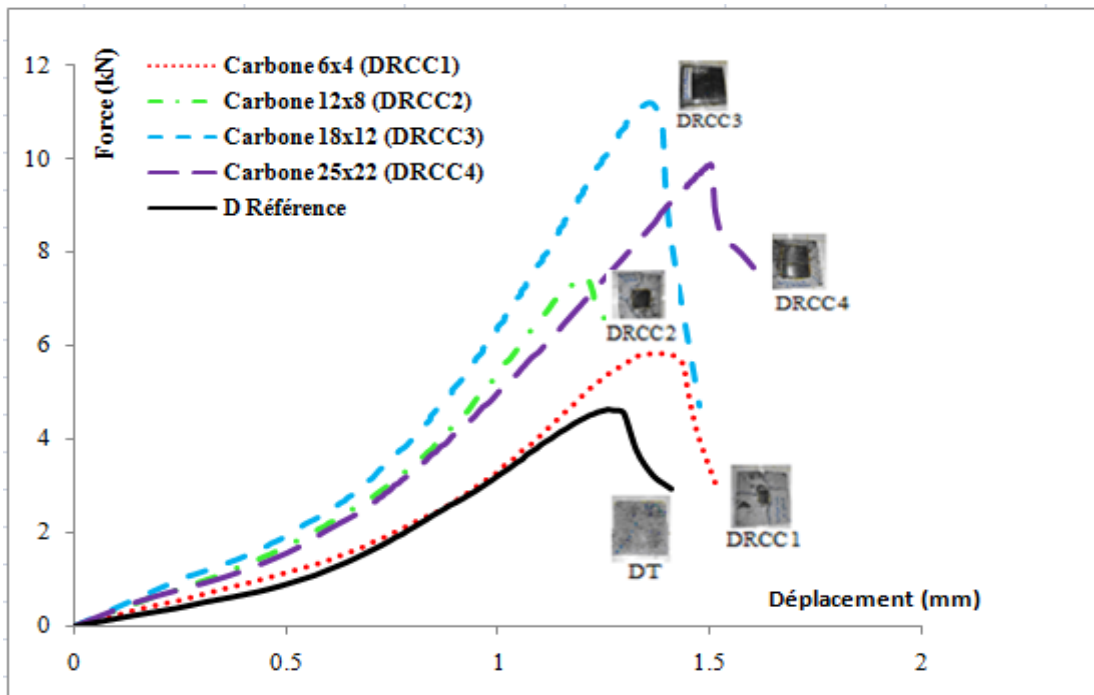


Figure II.16. Confrontation des courbes Forces –déplacements des différentes variantes de dalles renforcées par des patches composites en carbone

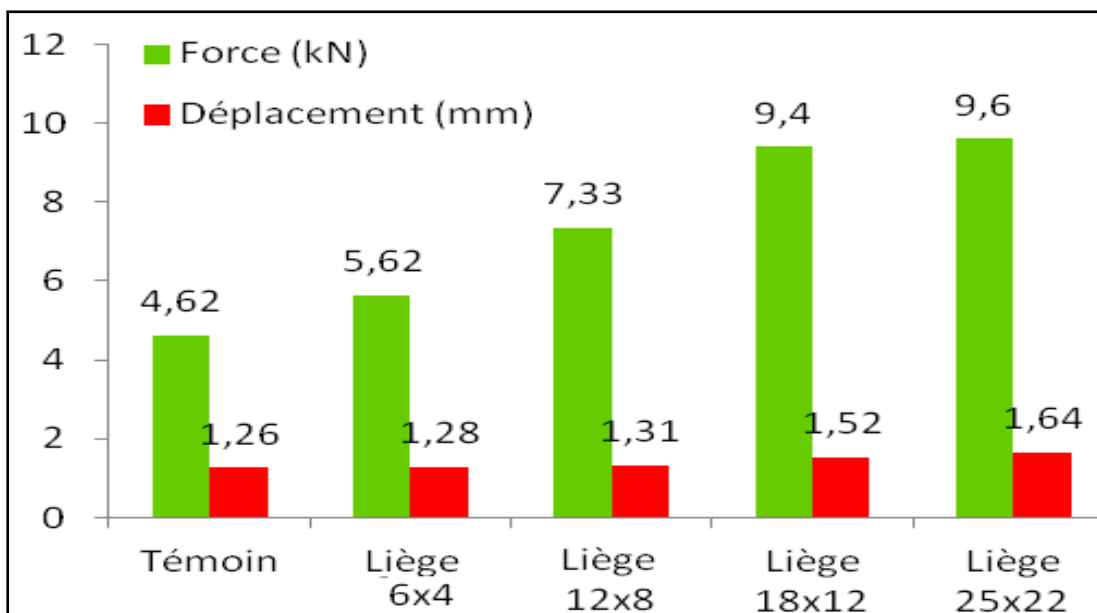


Figure II.17. Histogramme des valeurs Forces - déplacements des différentes variantes de dalles renforcées par des patches composites en Liège

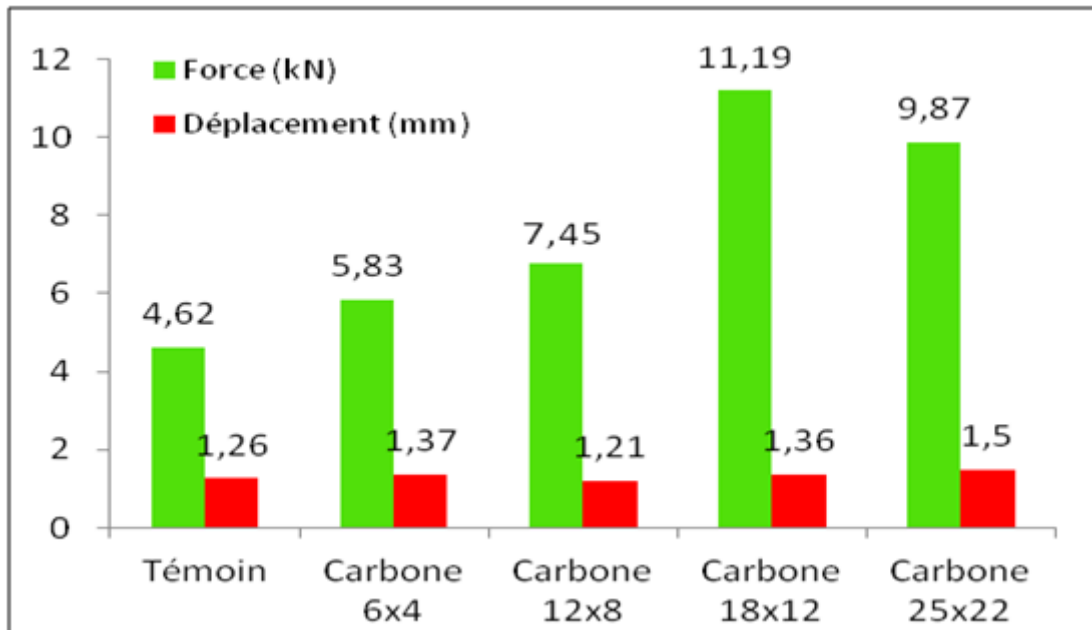
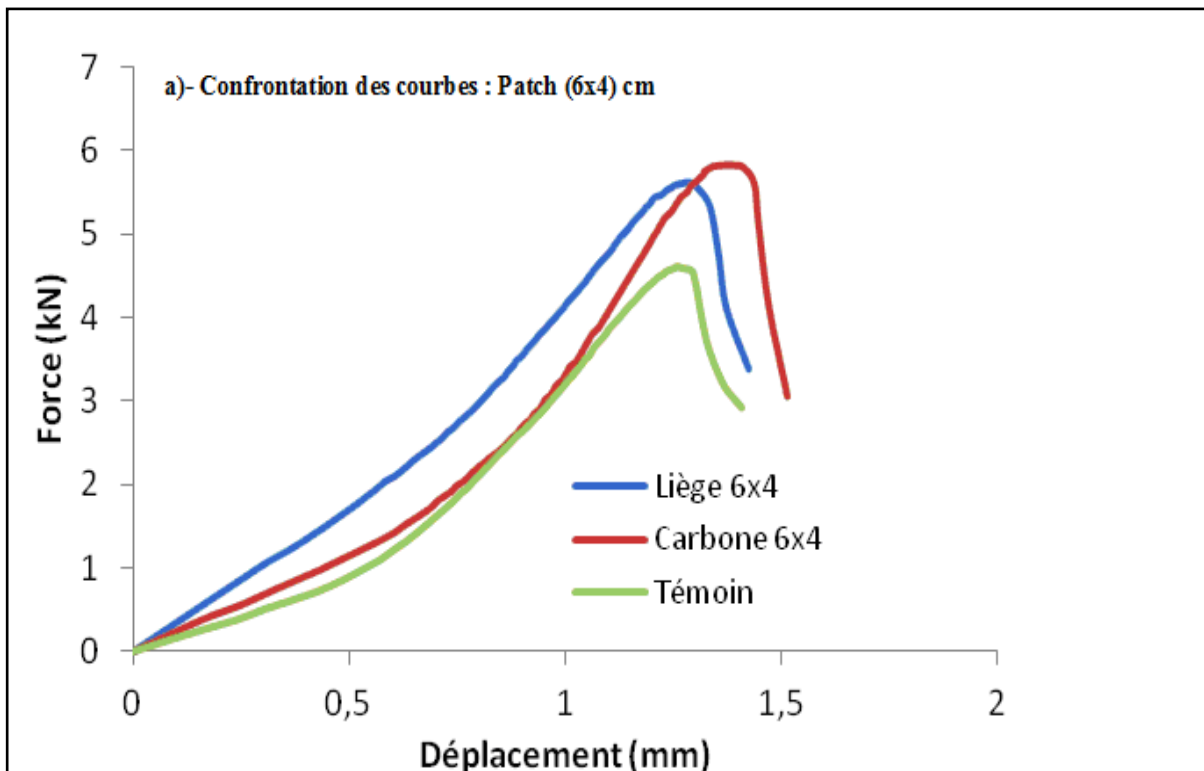
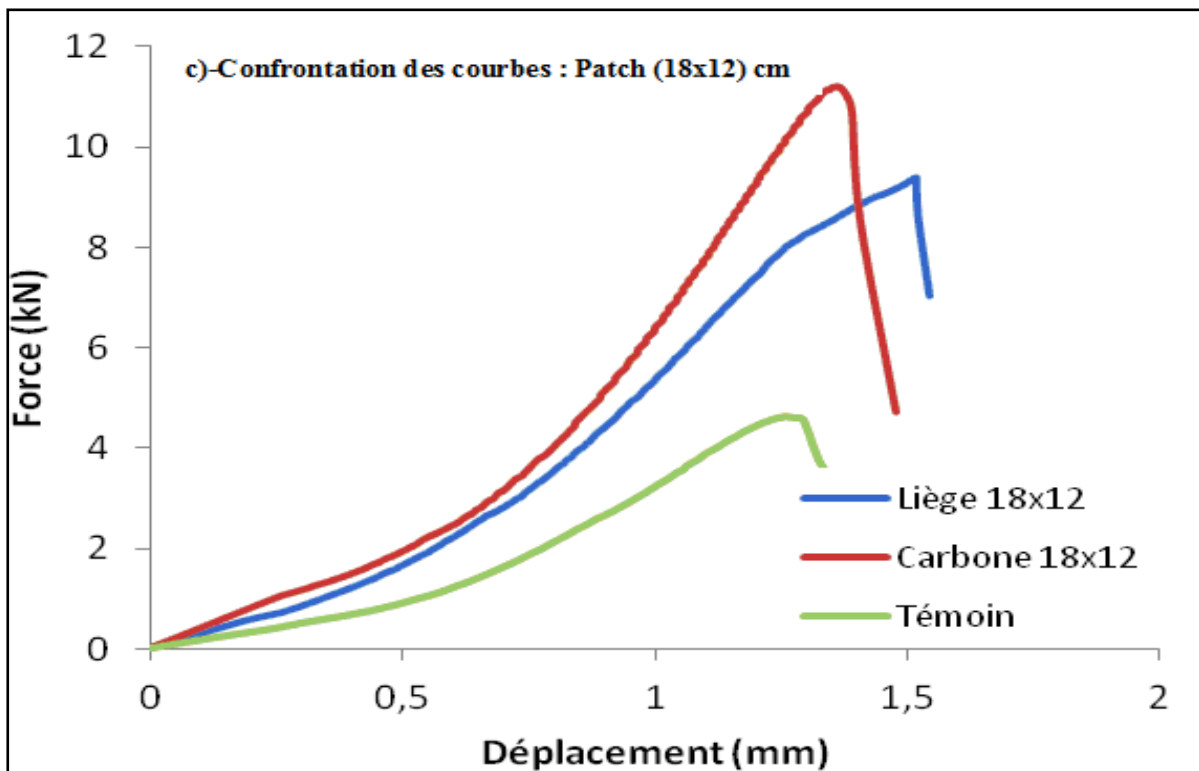
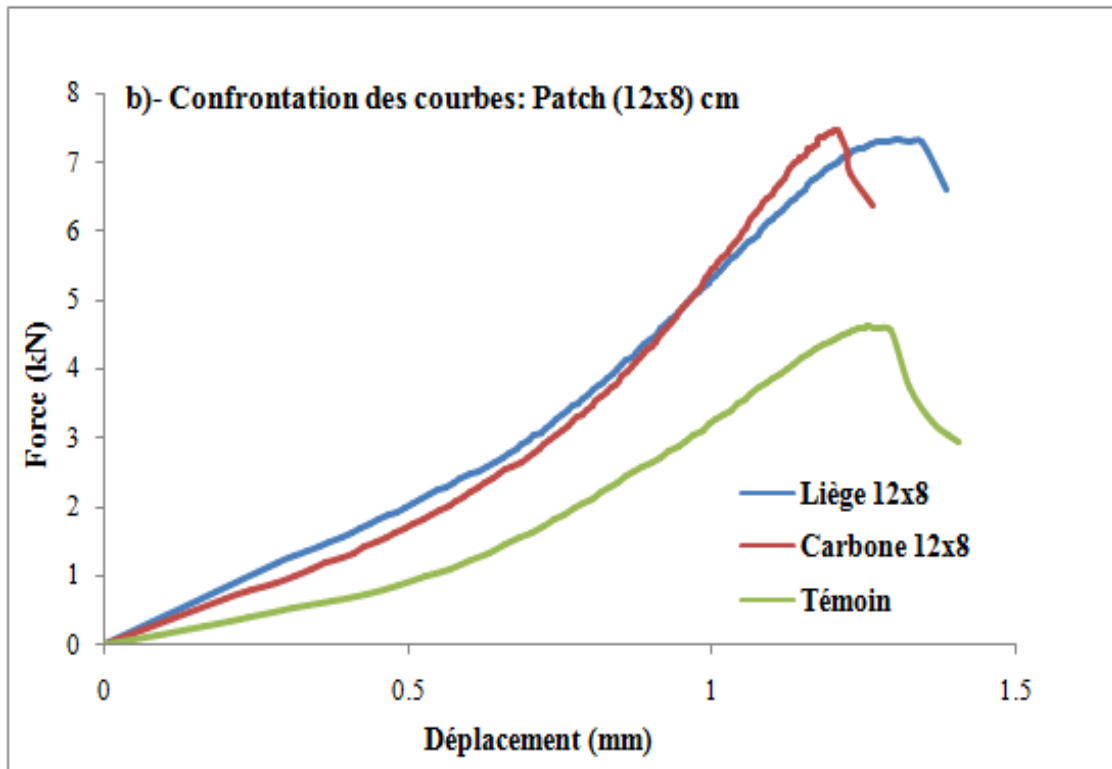


Figure II.18. Histogramme des valeurs Forces - déplacements des différentes variantes de dalles renforcées par des patches composites en carbone





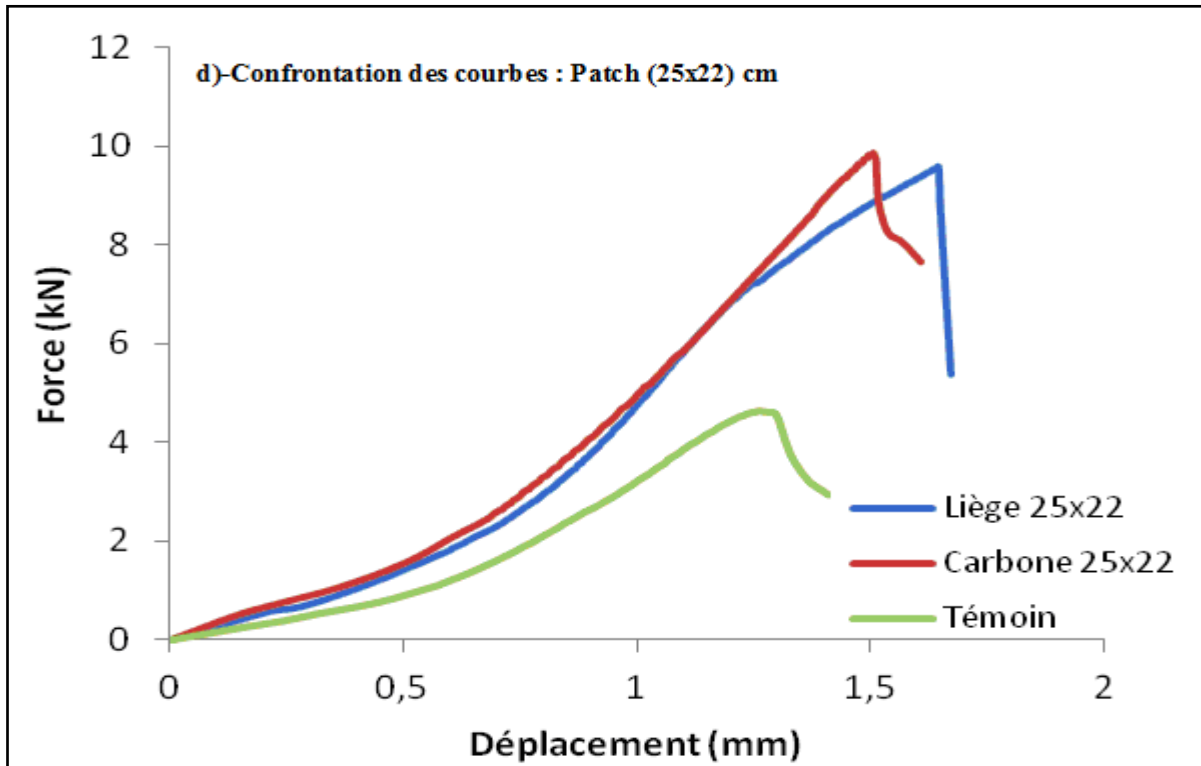


Figure II.19. Confrontation des courbes Force -déplacement des dalles en béton en fonction des propriétés et dimensions des patchs composites : a) P 6x4, b)-P 12x8, c)- P 18x12, d)- P 25x22

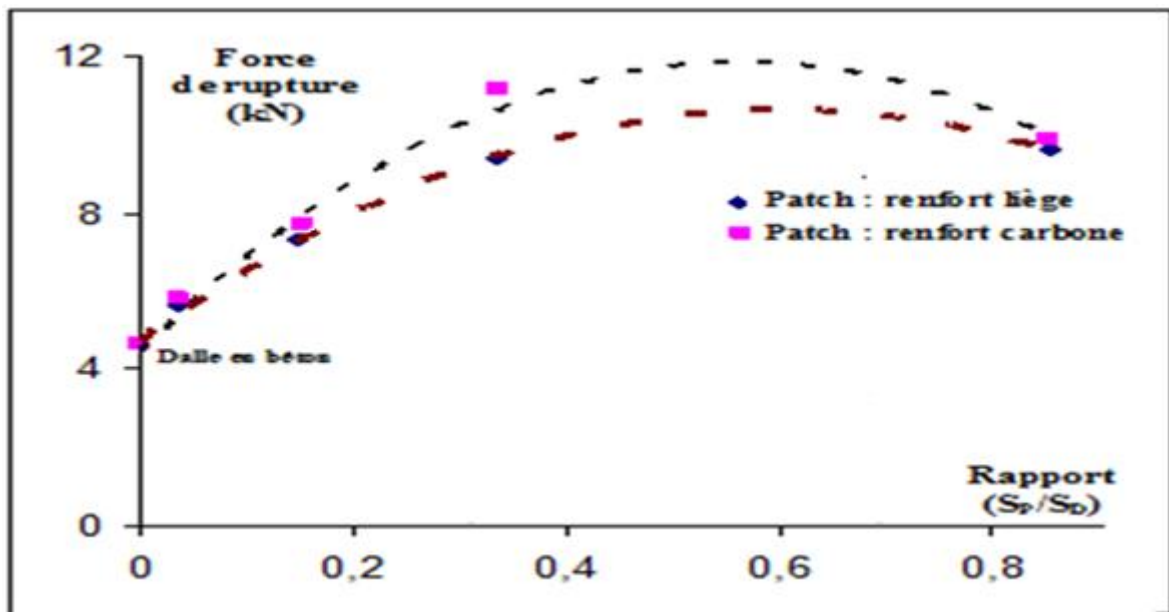


Figure II.20.. Influence des propriétés du patch composite sur la force de rupture de la dalle en béton renforcée

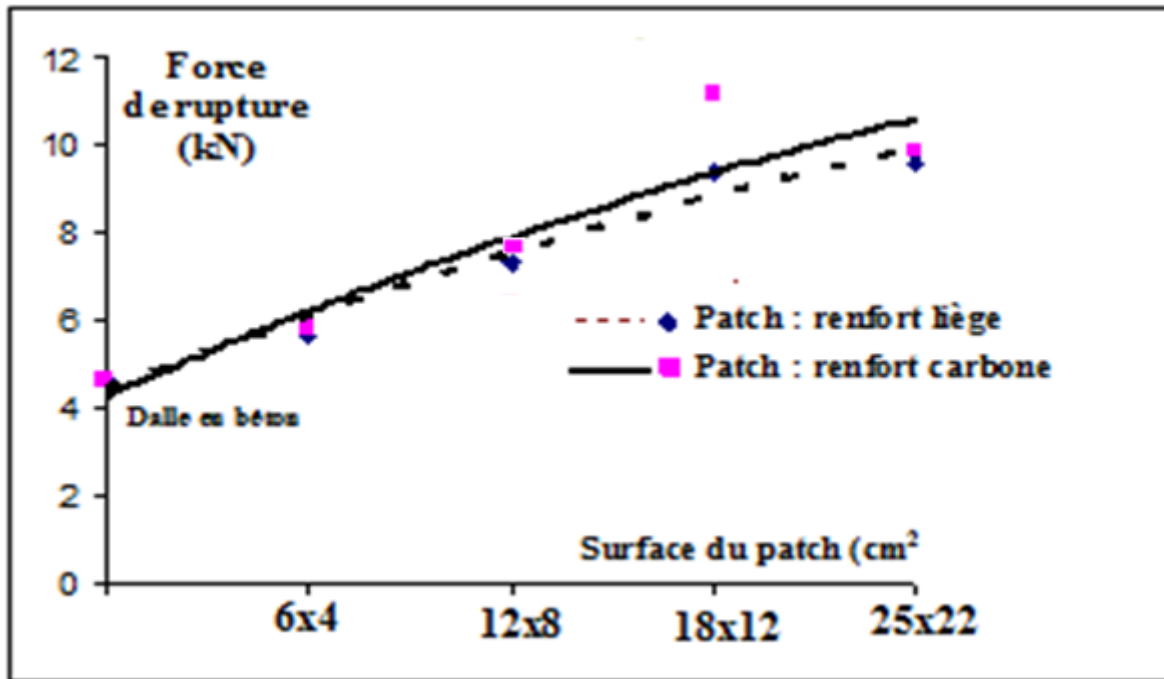


Figure II.21. Influence de la dimension du patch composite sur la force de rupture de la dalle en béton renforcée

II. 6.1.2. Poinçonnement excentré

Pour étudier l'influence de la surface renforcée par le patch en composite (SP) sur le mode de rupture de la dalle sous l'effet d'une charge excentrée par rapport au centre de gravité de la dalle, quatre (04) variantes ont été considérées.

L'essai de poinçonnement excentré est réalisé avec une excentricité de la charge de $(1/3) L'$ et $(2/3) L'$ par rapport au centre de gravité de la dalle, avec L' : diagonale de la surface de la dalle. Le patch composite est toujours appliqué sous la charge verticale de poinçonnement.



Figure II.22. Mise en point de l'essai de poinçonnement excentré :

$e = (1/3 \text{ et } 2/3)L'$ par rapport au centre de gravité de la dalle

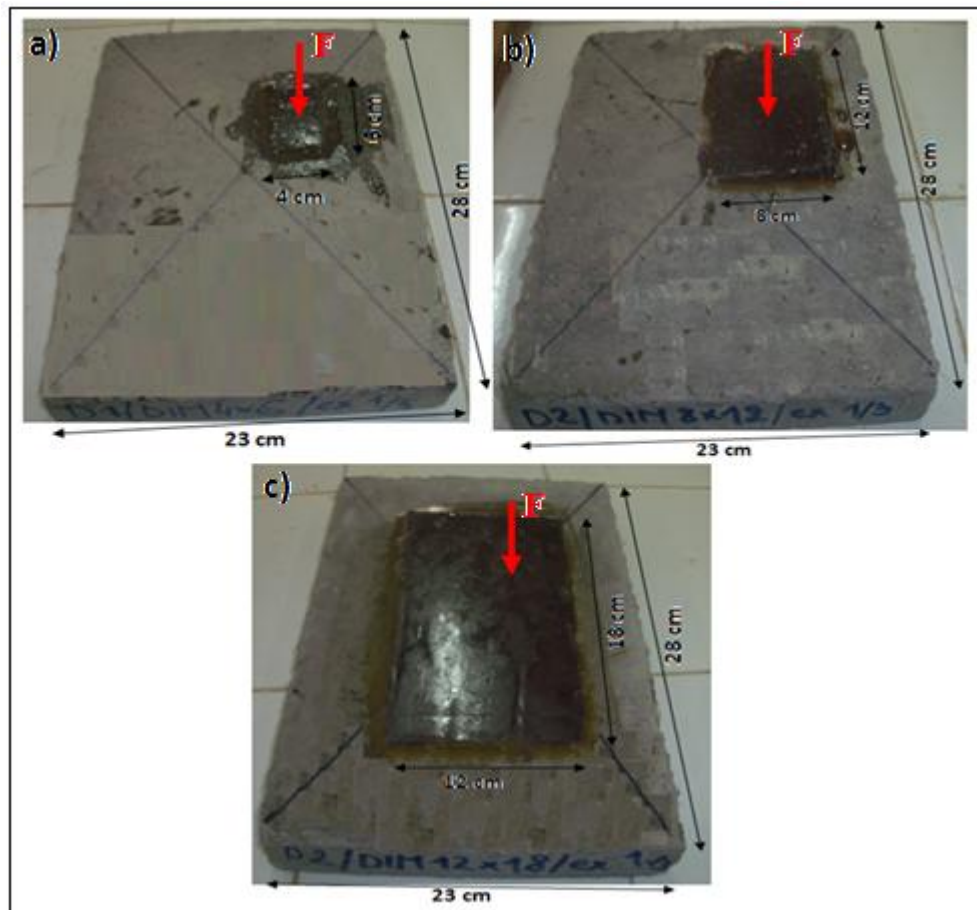


Figure II.23. Dalles en béton renforcées par des patches composites de différentes dimensions: cas de la charge de $1/3$ par rapport au centre de gravité de la dalle : a) Patch (6x4)cm, b) Patch (12x8)cm, c) Patch (18x12)cm

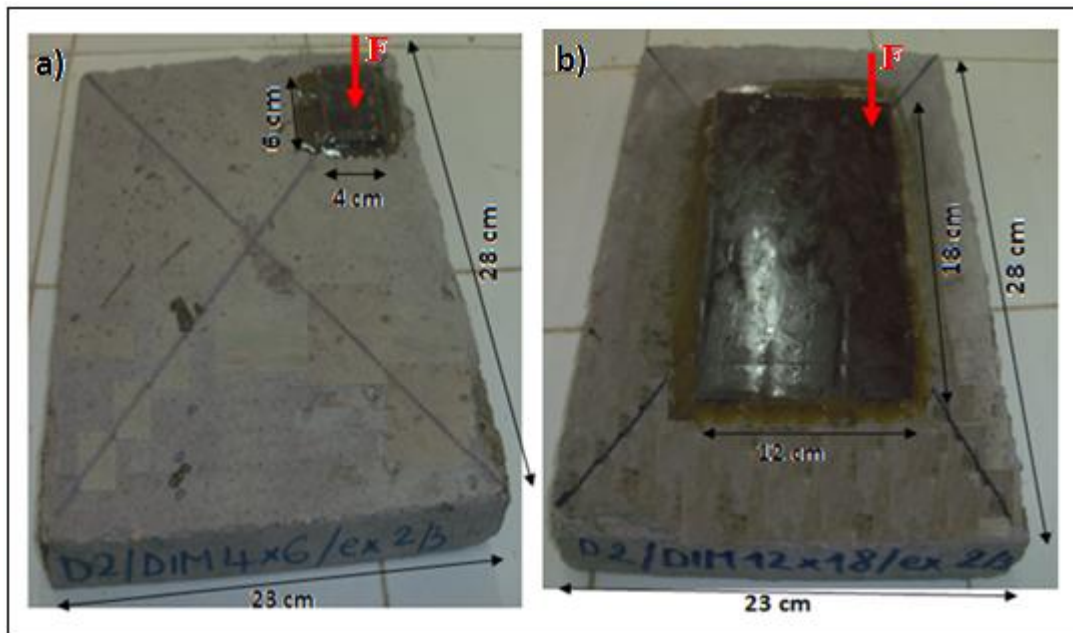


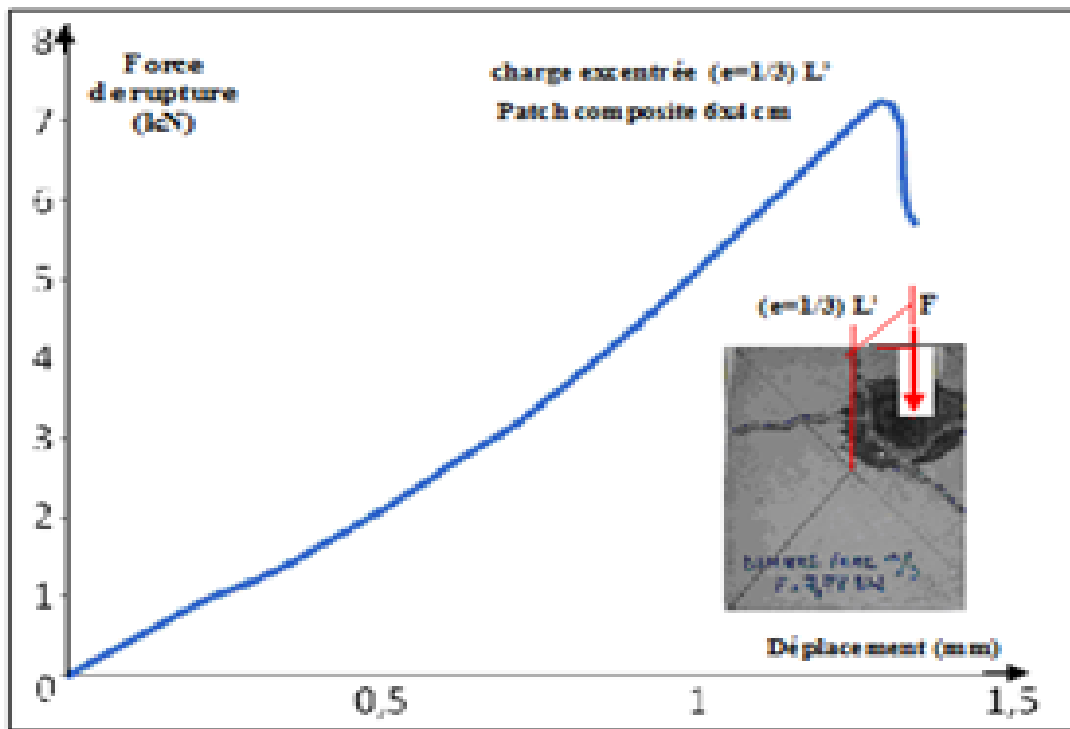
Figure II.24. Dalles en béton renforcées par des patches composites de différentes dimensions cas de la charge de $2/3$ par rapport au centre de gravité de la dalle : a) Patch (6x4)cm, b) Patch (18x12)cm

Les différents résultats obtenus sont résumés dans le tableau II.9.

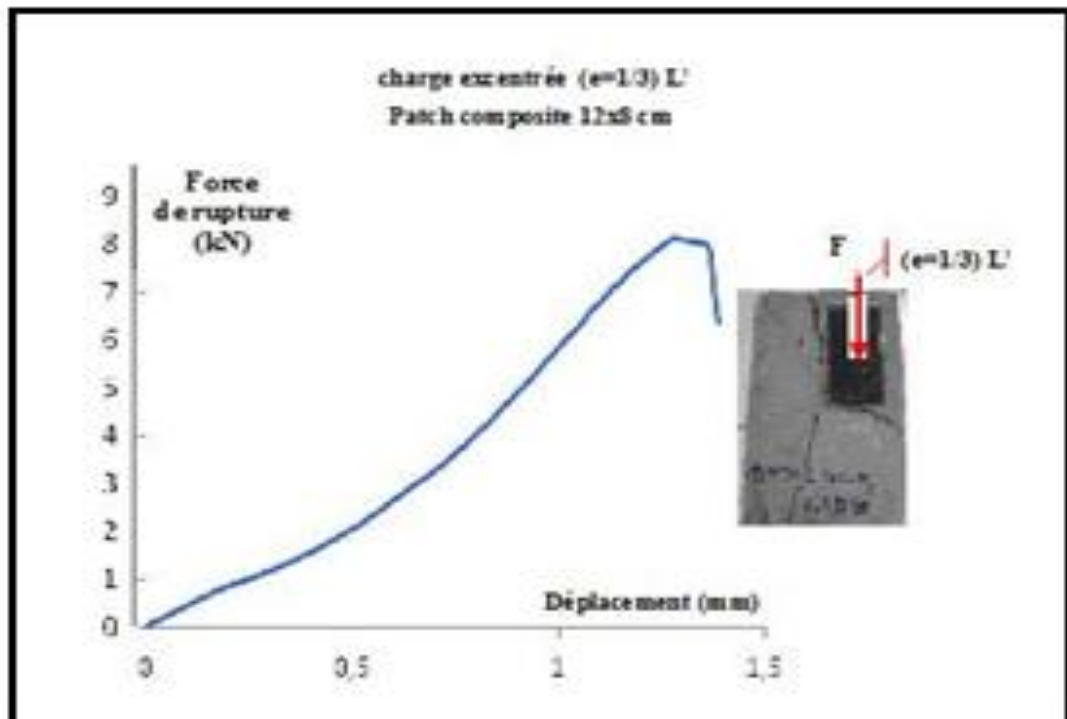
Tableau II.9 : résultats des essais de poinçonnement excentré

	excentricité (e)	Désignation	Dimensions (cm)	Rapport (S_p/S_D)	Force de rupture (kN)	Déplacement au pic (mm)
Dalle de référence	1/3	DRef 1/3	-	-	6.12	1.12
	2/3	DRef2/3			8.58	1.26
Dalle renforcées par patch en liège	1/3	DRCL1e1/3	P=6x4	0.037	7.25	1.29
	2/3	DRCL1e2/3			10.89	2.13
	1/3	DRCL2e 1/3	P=12x8	0.149	8.13	1.28
	2/3	DRCL2e2/3			-	-
	1/3	DRCL3e 1/3	P=18x12	0.335	8.55	1.31
	2/3	DRCL3e2/3			9.27	1.48

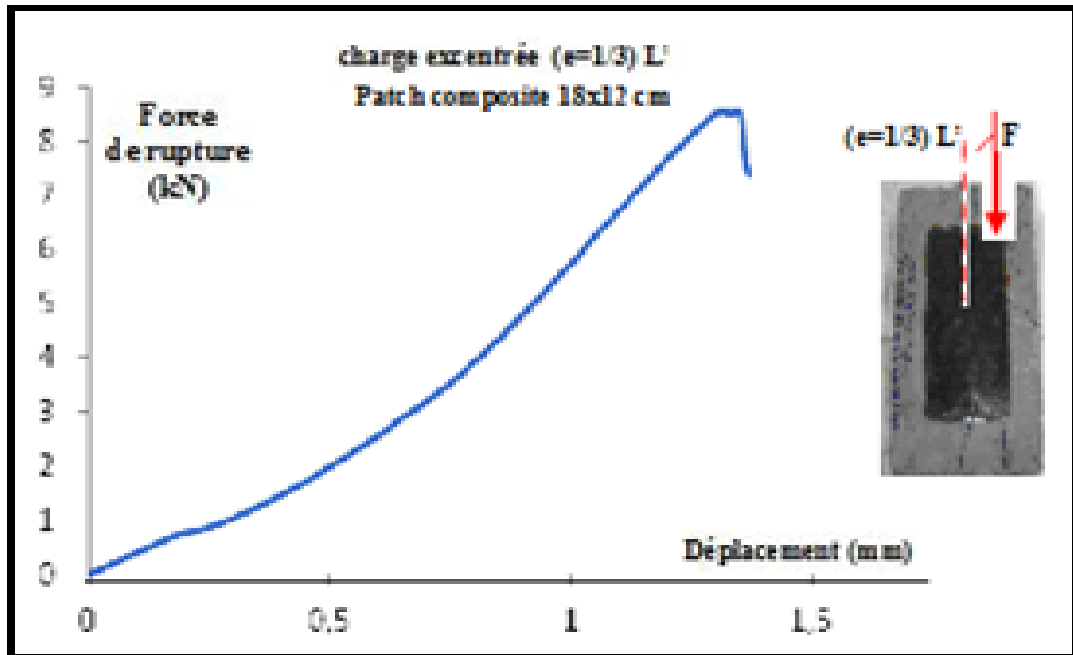
a)



b)



c)



d)

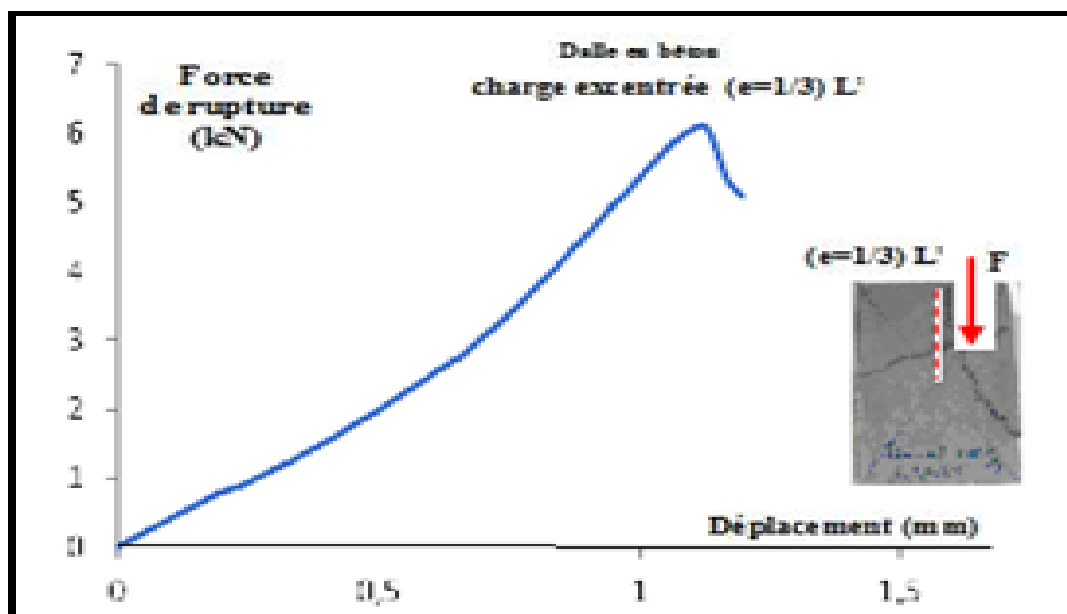
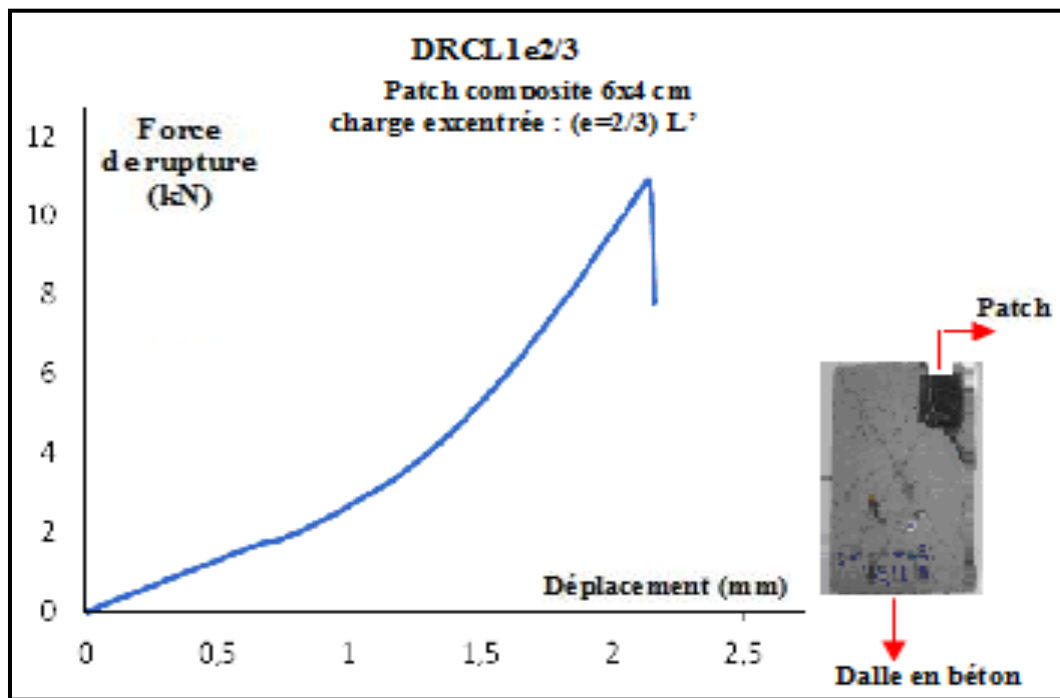
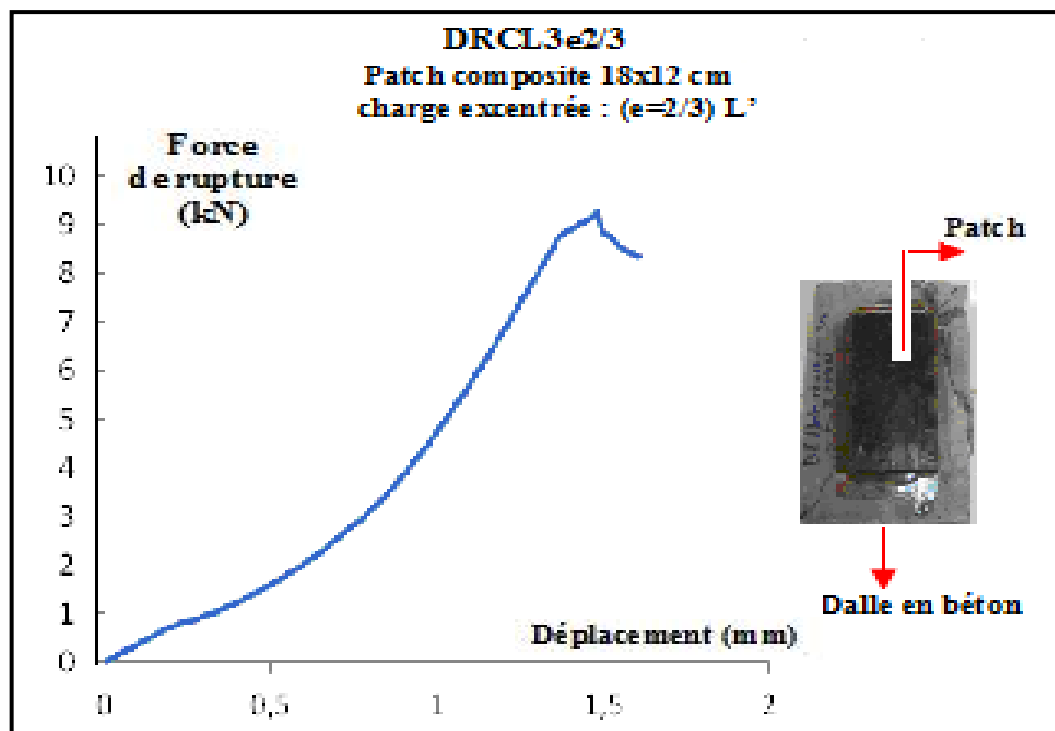


Figure II.25 : Courbe Force- déplacement de la dalle renforcée sous charge de poinçonnement excentrée : $e=1/3L'$ avec : a) Patch composite = 6x4 cm, b) 12x8 ; c) 18x12 ; d)- dalle témoin

a)



b)



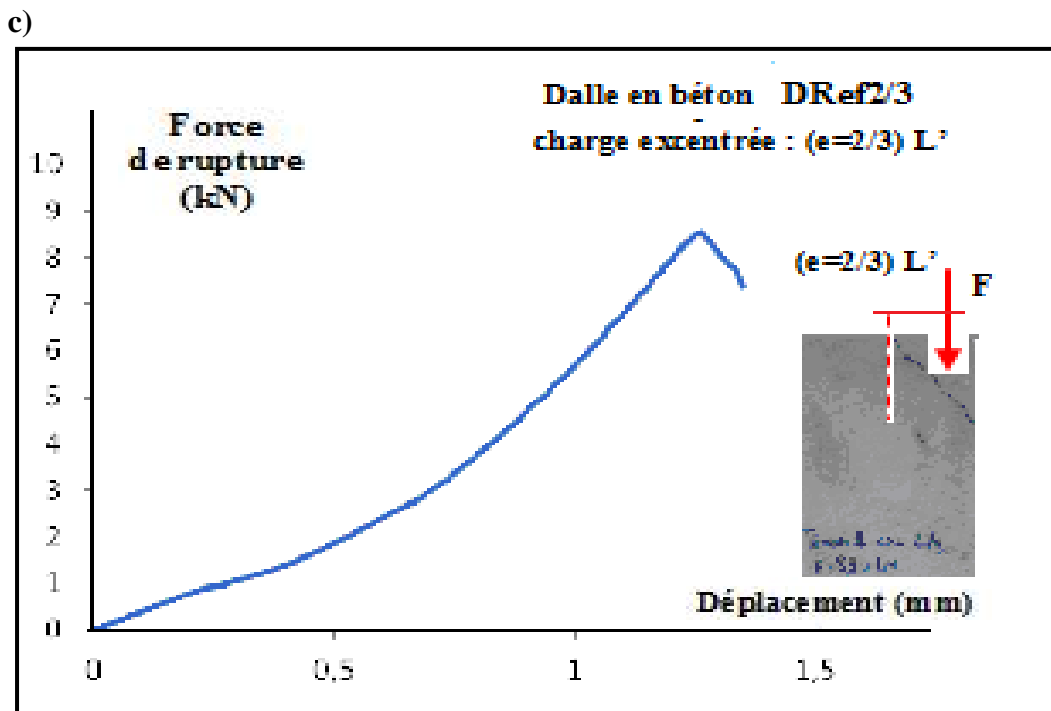


Figure II.26 : Courbe Force- déplacement de la dalle renforcée sous une charge de poinçonnement excentrée : $(e=2/3)L'$ avec : a) Patch composite = 6x4 cm, b) 18x12 cm ; c)- dalle témoin

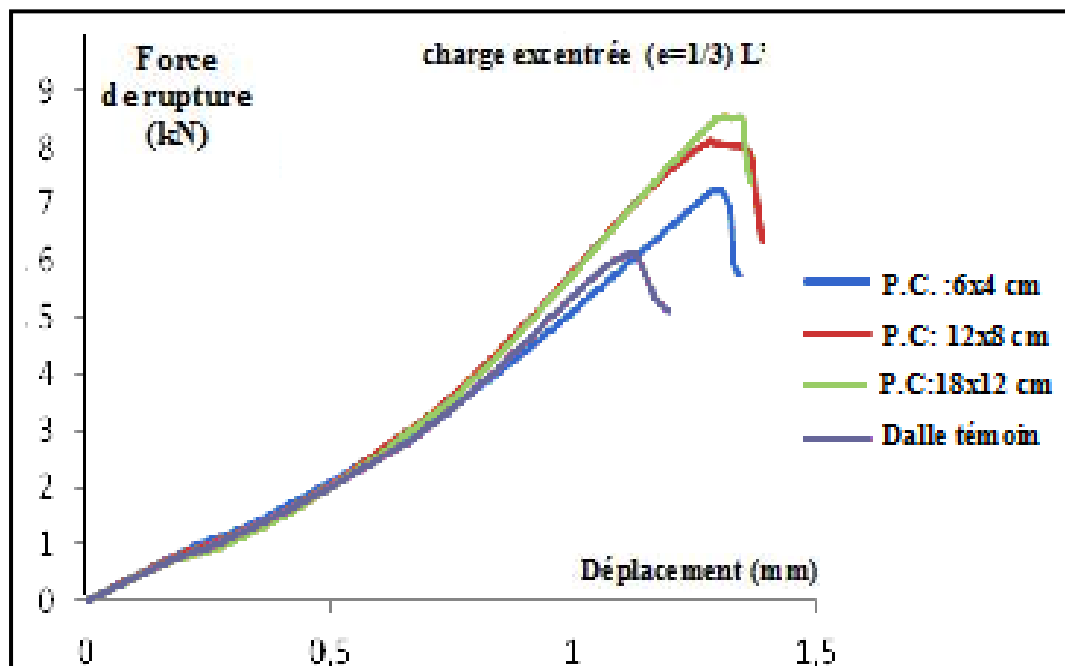


Figure II.27 : Confrontation des courbes Force- déplacement dans le cas de $e= (1/3)L'$.

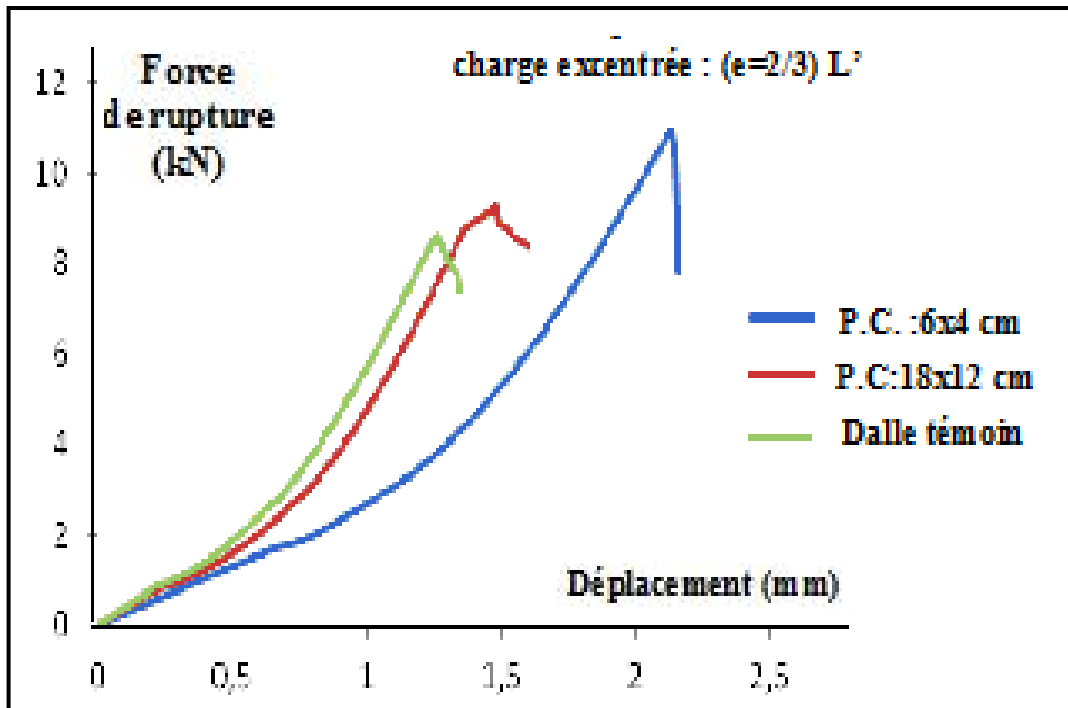


Figure II.28 : Confrontation des courbes Force- déplacement dans le cas de $e = (2/3)L'$.

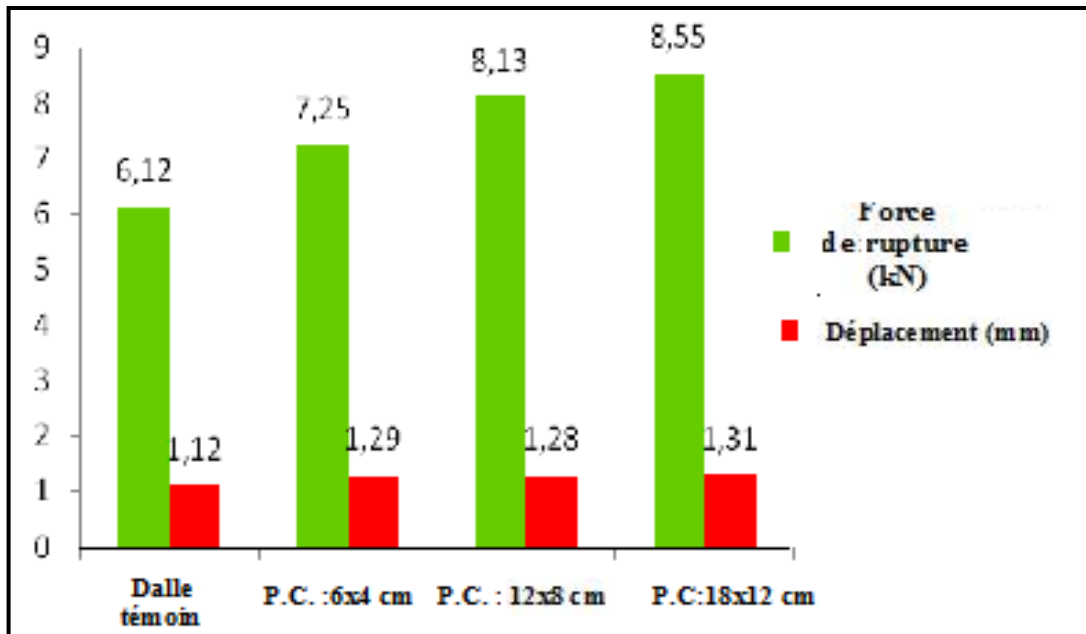


Figure II.29 : Histogramme des valeurs des forces et déplacements dans le cas : $e = (1/3)L'$

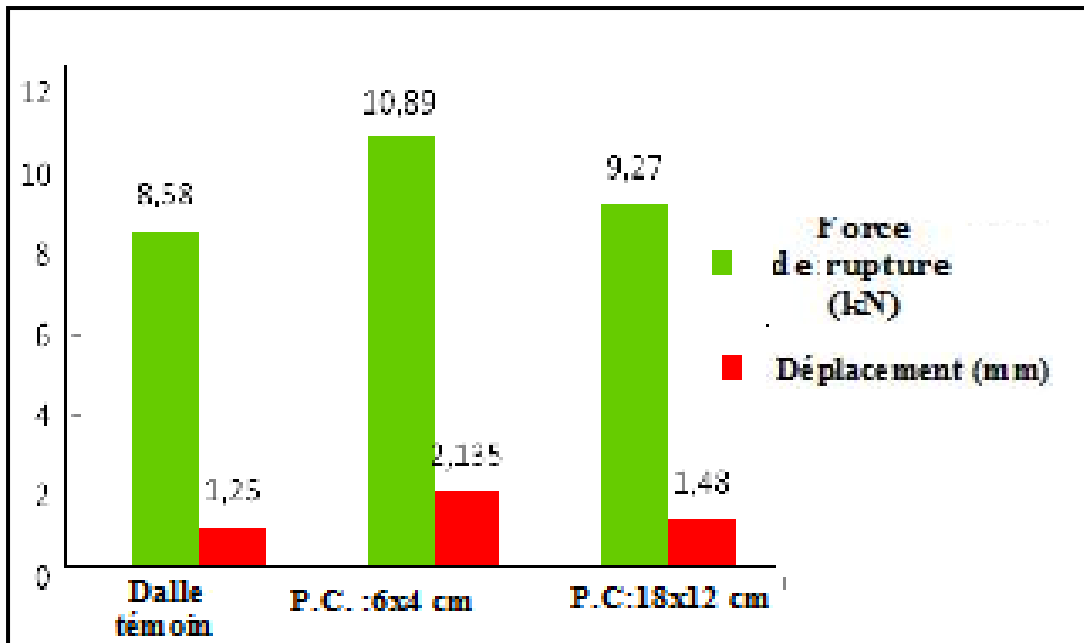


Figure II.30 : Histogramme des valeurs des forces et déplacements dans le cas : $e = (2/3)L'$

II. 7. Analyse des résultats et conclusion

- en général, le mode de rupture des dalles en béton se caractérise par un cisaillement du béton dans l'épaisseur de la dalle.
- Le comportement réel des dalles renforcées par des patches composite se caractérise, dans l'ensemble, par la résistance aux efforts de flexion et de poinçonnement,
- Le comportement flexionnel des dalles comprend plusieurs phases : Au début du chargement, on a un comportement élastique linéaire, par la suite, la fissuration du béton apparaît dans les zones les plus sollicitées, enfin, dans la phase de rupture, on observe une très légère augmentation de la charge appliquée qui conduit à un état d'équilibre instable provoquant la rupture totale de la dalle.

- Comme le montre les résultats obtenus, le collage de matériaux composites semble être une technique prometteuse pour le renforcement des structures en béton armé. Cependant, pour réduire le coût de l'opération de renforcement (réduction de la quantité des matériaux composites), il est recommandé de recourir aux patchs composites pour couvrir la zone la plus sollicitée, dans le cas d'un chargement axial progressif.

- Les résultats donnés sous forme de courbes déplacements mesurés au centre de la dalle en fonction de la force appliquée, montrent que la force de rupture et le déplacement ultime correspondant sont influencés par les propriétés du patch composite et la surface couverte par le patch composite. Dans les deux cas, on observe que la force de rupture et le déplacement ultime augmentent avec la surface du patch et les propriétés du composite. A titre indicatif, la charge de rupture augmente de 107.8% pour la dalle DRCL4, 113.6% pour la dalle DRCC4 et 142.2 % pour la dalle DRCC3. Ce gain au niveau de la charge ultime n'est pas proportionnel à la surface du patch composite, du fait que la capacité ultime de la dalle est limitée par le phénomène du poinçonnement qui dépend plus des caractéristiques du béton

- l'évaluation du gain en rigidité et en résistance des dalles renforcées par matériaux composites peut être faite à partir des différentes figures illustrant la confrontation des courbes Force -déplacement des dalles en béton en fonction des propriétés et dimensions des patchs composites. Les résultats mettent clairement en évidence l'influence du composite, en particulier sur la charge ultime. Les relations forces – déplacements sont peu modifiées en phase élastique.

- Les résultats ont montré que la rupture commence par l'apparition des fissures dans la zone non renforcée

- Dans le cas d'une excentricité de $e = (1/3)L'$, le meilleur rapport résistance /section est obtenu pour le cas de renforcement avec un patch composite de section 12x8 cm, alors que, pour une excentricité de $e = (2/3)L'$, le renforcement avec un patch composite de section 6x4 cm² procure à la dalle une meilleure résistance de l'ordre de 10,9 Kn. Ceci met en évidence l'influence de l'excentricité de la charge de poinçonnement sur les dimensions des patchs composites de renforcement. En effet, L'excentricité de la charge verticale induit un moment

de flexion additionnel qui va influencer la surface de rupture. L'augmentation de la force ponctuelle et l'ouverture de la fissure critique diminue la résistance par unité de longueur, par conséquent, la charge de rupture.

- Les déplacements verticaux des dalles en béton renforcées par des patches en matériaux composites sont particulièrement sensibles à la surface renforcée par le patch et aux propriétés du composites
- Pour la dalle DRCC4, avec l'augmentation de la charge, le composite commence à se décoller à partir des coins et les bords. La rupture finale s'est produite par poinçonnement.
- 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

CHAPITRE III :

MODELISATION

ANALYTIQUE

Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons deux modèles analytiques qui permettent de prédire le comportement des dalles renforcées à l'aide de patchs composites, collés sur la sous face de la dalle, soumises respectivement à une charge verticale de poinçonnement centrée et excentré. La charge verticale ponctuelle produit un effort tranchant dans la zone fortement comprimée autour de la surface d'application de l'effort vertical. Le développement de ces modèles, est basé sur les résultats expérimentaux obtenus et présentés au chapitre précédent. Les résultats montrent que les dimensions du patch composite ont une influence directe sur la déformée avant la rupture.

III.1. Comportement des matériaux utilisés:

Le comportement à la rupture des matériaux dépend de :

- la présence de fissures internes et superficielles,
- des conditions de leur propagation.

Sous l'effet d'une contrainte appliquée, l'accroissement de l'ouverture (la largeur de la fissure) entraîne une diminution de l'énergie totale [29].

Pour mieux comprendre le comportement d'une dalle en béton renforcée par un matériau composite, soumise à une charge de poinçonnement (centré et excentré), il est nécessaire, avant tout, de décrire le comportement des matériaux qui composent la dalle, à savoir : le béton et le patch composite.

III.1.1. Béton

Lors d'un essai de traction, on observe une réponse quasi-linéaire jusqu'à une déformation de l'ordre de quelques 10^{-3} et une contrainte de l'ordre de quelques MPa, puis une décroissance rapide de la contrainte (phénomène appelé adoucissement).

Par contre lors d'un essai de compression sur une éprouvette de béton, domaine d'excellence du béton, l'allure de la courbe contrainte-déformation est sensiblement différente de celle obtenue en traction. La partie linéaire de la réponse est nettement plus importante, puis la courbe s'infléchit progressivement jusqu'à atteindre une valeur maximale 7 à 8 fois plus élevée que la contrainte maximale en traction. Cette phase de croissance non linéaire de la

contrainte correspond au phénomène de durcissement. Elle est suivie d'une phase d'adoucissement, mais la décroissance de la contrainte est plus lente qu'en traction.[30],[31].

Le comportement mécanique du béton, en considérant aussi le comportement en traction, est décrit par le diagramme contrainte- déformation donné par la figure III.1.

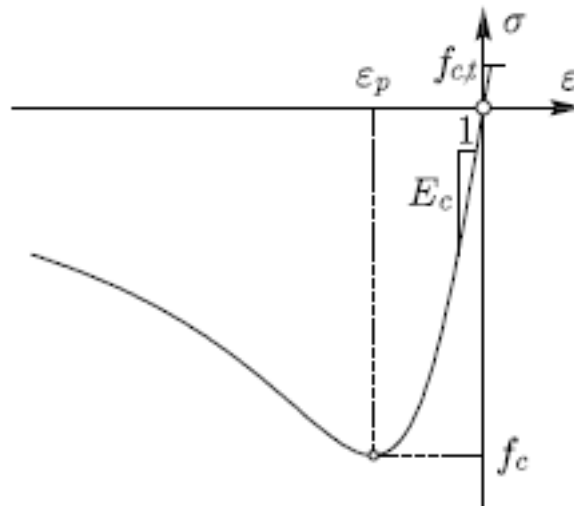


Figure III 1. Etat de comportement du béton σ - ε [20]

III.1.1.1. Comportement en compression

Le comportement en compression est caractérisé par trois phases [20],[22] :

- Une phase linéaire - élastique qui s'étend jusqu'à une contrainte d'environ 70- 80% de la résistance à la compression f_c . Le module d'élasticité E_c est valable en traction comme en compression.
- Quand la contrainte dépasse 80% de la résistance à la compression, des microfissures parallèles à la direction de la charge se développent et d'importantes déformations irréversibles se manifestent. La déformation associée à la résistance à la compression du béton f_c est appelée : déformation au pic ε_p . La déformation au pic est fonction de la résistance du béton; plus le béton est résistant plus la déformation au pic est petite.

- Dans un essai en déformation contrôlée, quand la contrainte dépasse la résistance à la compression f_c , les fissures continuent de s'ouvrir et les lamelles se désolidarisent de plus en plus. Dans ce cas, la contrainte diminue. Plus la résistance du béton est grande plus la diminution est plus rapide (comportement fragile).

Les caractéristiques du béton sont introduites dans le calcul, en considérant un diagramme en compression simplifié parabole - rectangle.

Les contraintes dans le béton sont calculées au moyen des équations suivantes:

$$\begin{aligned}
 \text{Si } 0 \geq \varepsilon \geq \varepsilon_1 = -\frac{2f_c}{E_c} & \quad \sigma = -f_c \left(2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_1} - \frac{\varepsilon^2}{\varepsilon_1^2} \right) \\
 \text{Si } \varepsilon_1 \geq \varepsilon \geq \varepsilon_{cu} = -0.0035 & \quad \sigma = -f_c \\
 \text{Si } 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_r = \frac{f_{ct}}{E_c} & \quad \sigma = \varepsilon \cdot E_c
 \end{aligned} \tag{III.1}$$

Bien que le comportement réel en compression du béton montre une diminution des contraintes après le pic de résistance maximale, le comportement idéalisé de type parabole-rectangle est une bonne approximation dans le cas d'éléments fléchis.

Cette formulation tient compte d'une manière simplifiée de la plastification du béton comprimé [22].

III.1.1.2. Comportement en traction

Le béton sollicité à la traction a un comportement linéaire-élastique jusqu'à sa résistance ultime. Son module d'élasticité dépend essentiellement de la composition des agrégats (facteur k_E déterminé par des essais) et de la résistance à la compression. Il peut être déterminé avec la relation empirique suivante [20],[22].:

$$E_c = k_E \cdot f_c^{1/3} \quad (f_c \text{ en MPa}) \tag{III.2}$$

La résistance à la traction est également liée à la résistance à la compression. La relation empirique suivante donne de bons résultats :

$$f_{ct} = 0,30 \cdot f_c^{2/3} \quad (\text{III.3})$$

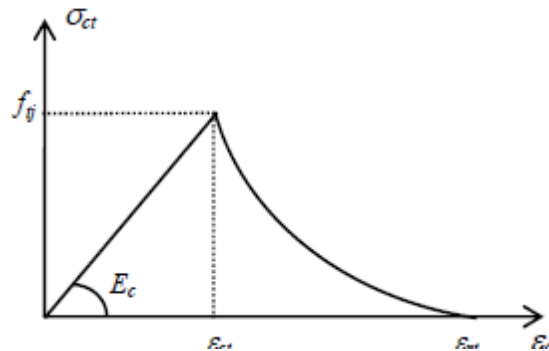


Figure III 2. Etat de comportement σ - ε du béton en traction [30].

III.1.2. Comportement de composite à la rupture :

En général, la formulation d'un composite doit satisfaire les critères de résistance, de rigidité et de tenue à l'action de l'environnement. Les propriétés finales dépendent des propriétés élémentaires de chaque constituant, à savoir la matrice et le renfort. L'évaluation des propriétés des matériaux composites se fait à différentes échelles. Il s'agit d'une approche multi-échelles : celle de la fibre élémentaire, du pli élémentaire puis du composite [32].

Dans notre travail, deux types de composites ont été considérés : composite à base de carbone et composite à base de liège (charge de liège).

Nous rappelons, brièvement dans ce qui suit, les principales propriétés du composite unidirectionnel.

III.1.2.1. Propriétés du composite unidirectionnel :

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 ($\varepsilon_{fu} < \varepsilon_{mu}$), soit par rupture transverse de la matrice dans le cas contraire. [32].

Dans le cas où $\varepsilon_{fu} < \varepsilon_{mu}$, les courbes contrainte-déformation sont illustrées sur la figure III.3. En admettant l'égalité des déformations dans la fibre et dans la matrice, la loi de mélange, au moment de la rupture, s'écrit:

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} V_f + (\sigma_m)_{\varepsilon_{fu}} (1 - V_f) \quad (\text{III.4})$$

Où : σ_{cu} est la contrainte à la rupture du composite,

σ_{fu} est la contrainte à la rupture des fibres,

$(\sigma_m)_{\varepsilon_{fu}}$ est la contrainte dans la matrice qui correspond à la déformation ε_{fu} à la rupture des fibres.

La contrainte $(\sigma_m)_{\varepsilon_{fu}}$ est inférieure à la contrainte à la rupture σ_{mu} de la matrice, d'où :

$$\sigma_{cu} \leq \sigma_{fu} V_f + \sigma_{mu} (1 - V_f) \quad (\text{III.5})$$

Généralement, l'expression retenue pour la contrainte à la rupture du composite est la loi des mélanges :

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} V_f + \sigma_{mu} (1 - V_f) \quad (\text{III.6})$$

En considérant une fraction usuelle de fibres, on peut estimer la contrainte du composite par la relation suivante :

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} V_f \quad (\text{III.7})$$

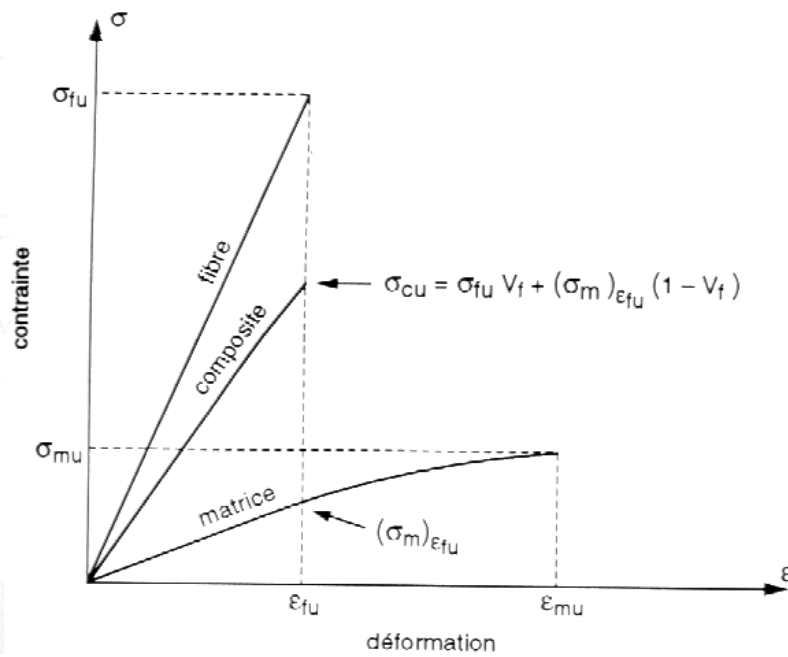


Figure III.3. Courbe contrainte-déformation d'un composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale, dans le cas où $\varepsilon_{fu} < \varepsilon_{mu}$ [32].

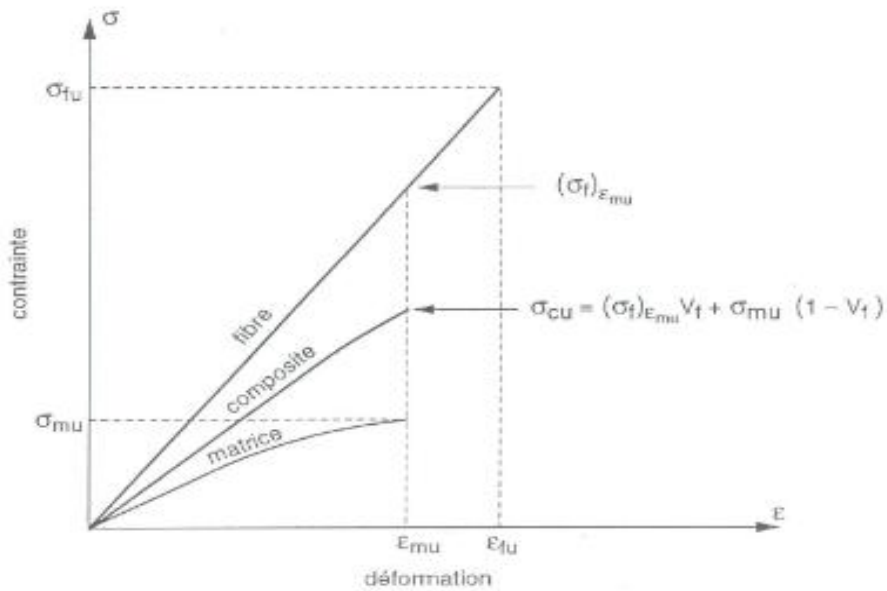


Figure III.4. Courbe contrainte-déformation d'un composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale, dans le cas où $\varepsilon_{fu} > \varepsilon_{mu}$ [32].

Dans le cas où, la déformation à la rupture de la matrice est inférieure à celle des fibres figure III.4, la contrainte à la rupture est donnée par l'expression (III.8).

$$\sigma_{cu} = (\sigma_f)_{\varepsilon_{mu}} V_f + \sigma_{mu} (1 - V_f) \quad (\text{III.8})$$

Où : $(\sigma_f)_{\varepsilon_{mu}}$ est la contrainte dans la fibre au moment de la rupture de la matrice.

La valeur de la contrainte à la rupture du matériau composite est alors bien inférieure à celle donnée par l'expression (III.4).

III.2. 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.5 montre une section de dalle en béton renforcée par un matériau composite et l'état d'équilibre de la section, lorsqu'elle est soumise à un moment de flexion développé par l'effort vertical [35].

Le comportement de la section est décrit par deux relations qui expriment deux grandeurs cinématiques.

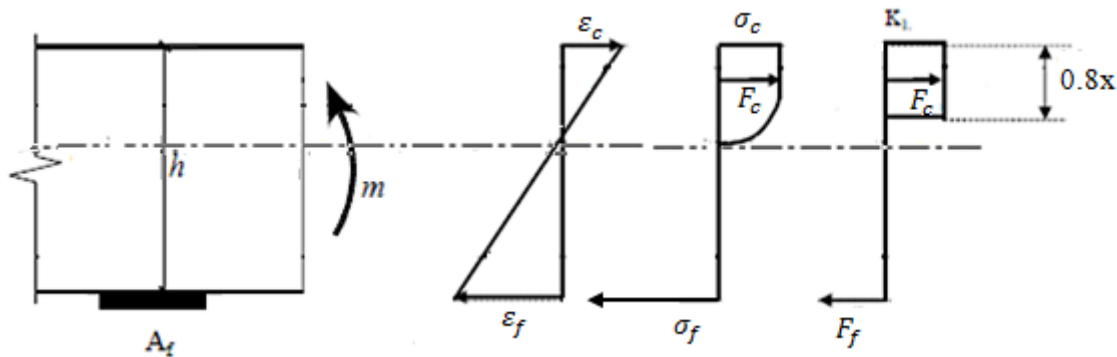


Figure III.5 : Diagramme des contraintes et des déformations d'une section rectangulaire en béton renforcé [35].

III.2.1. Conditions d'équilibre :

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

$$\int \sigma_c \cdot da_c + \int \sigma_f \cdot da_f = N \quad (\text{III.9})$$

$$\int \sigma_c \cdot z \cdot da_c + \int \sigma_f \cdot z \cdot da_f = M \quad (\text{III.10})$$

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

A partir du diagramme contrainte-déformation d'une dalle renforcée par des patches en matériau composite, l'équilibre de la section béton-composite s'écrit sous la forme suivante :

$$F_{rupture} = F_{béton} + F_{composite} \quad (III.11)$$

III.3. Développement analytique des modèles de comportement d'une section en béton renforcée par un patch composite :

Pour mieux comprendre le comportement des dalles renforcées par des patches composites, nous rappelons, dans ce qui suit, le mécanisme de rupture d'un élément dalle proposé par les auteurs Kinnunen et Nylander.

III.3.1. Mécanisme de rupture selon Kinnunen et Nylander :

D'après le mécanisme de rupture selon Kinnunen et Nylander, l'élément de dalle extérieur au cône de poinçonnement, délimité par la fissure de poinçonnement et deux fissures radiales, est retenu par l'armature supérieure et est appuyé sur un voile conique comprimé. Ce voile conique se développe entre la colonne et le fond de la fissure de poinçonnement. [33]

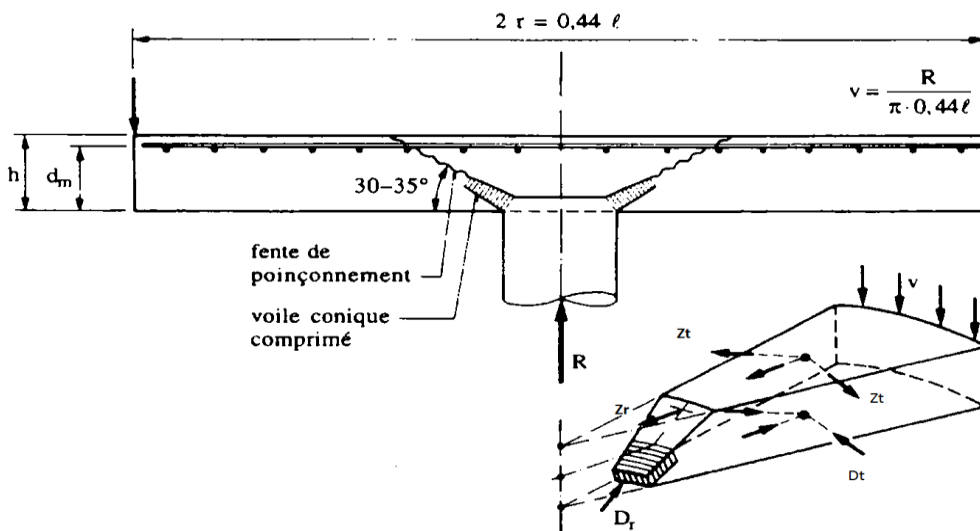


Figure III.6 : Mécanisme de rupture de Kinnunen et Nylander [33].

L'élément sectoriel de la figure III.6 est supposé être infiniment rigide dans un plan vertical. Lorsque la charge augmente, cet élément de dalle tourne d'un angle φ autour d'un axe horizontal passant par le sommet du voile conique.

Les forces agissantes sur un élément sectoriel sont :

$$Q \cdot \frac{\Delta\theta}{2\pi} : \text{force extérieure,}$$

D_r : force de compression dans le voile conique

Z_r : traction dans l'armature traversant la fissure de poinçonnement

Z_t : traction dans l'armature tangentielle

D_t : compression dans le béton le long de la fissure radiale.

On suppose que D_r , Z_r , Z_t et D_t sont proportionnels à l'angle de rotation φ .

L'inclinaison des génératrices du voile est déterminée par les conditions d'équilibre et de compatibilité des déformations. Il est admis que le béton du voile se déforme, en obéissant à la loi de Hooke, avec un module d'élasticité réduit.

III.3.1. 1. Critère de rupture dans le mécanisme de rupture 'KN' :

Le modèle 'KN' permet de distinguer les modes de rupture suivants [33] :

- 1) Rupture par partie d'adhérence des aciers (bond failure).
- 2) Rupture par cisaillement d'un plan horizontale situé au-dessous des armatures de flexion.
- 3) Rupture par écrasement du béton du voile conique (effet de D_r).
- 4) Rupture par écrasement du béton dans une direction tangentielle (effet de D_t) à une distance $r_s + x$.
- 5) Rupture par plastification des aciers de flexion ($Z_r = A_s \cdot f_y$).

Les modes de rupture 1 et 2 peuvent être évités au moyen d'un ancrage suffisant des aciers tendus et d'un espacement convenable des barres d'armature (ancrage des barres au-delà de $r = 0.22 l$).

Les trois derniers modes de rupture sont les plus importants, en ce qui concerne la rupture par poinçonnement.

L'intensité de la contrainte de compression dans le voile conique du modèle 'KN' constitue un bon critère de comparaison par rapport au risque de rupture réel.

Dans le modèle 'KN', la rupture du béton du voile se produit lorsque le raccourcissement spécifique du béton atteint une valeur caractéristique [33] :

$$\varepsilon_c = \frac{f_c^*}{E_c} \quad (\text{III.12})$$

Avec :

E_c = module de déformation réduit ;

f_c^* = contrainte de rupture du béton du voile conique.

La charge de rupture 'Dr', dans la coque conique, peut être calculée à partir de l'expression (III.13) :

$$Dr = f_c^* \cdot Ac \quad (\text{III.13})$$

Où Ac : est la section de la partie supérieure du voile, donnée par la relation (III.14).

$$Ac = f(rs, x, \alpha) \quad (\text{III.14})$$

L'équilibre des efforts verticaux permet d'écrire :

$$Qu = Dr \cdot \sin \alpha \quad (\text{III.15})$$

Les valeurs correspondantes de Z_r , Z_t et D_t peuvent être déterminées à partir des conditions d'équilibre et en fonction de la rotation φ de l'élément sectoriel autour d'un axe horizontal [33].

III.3.1.2. Force de rupture dans le béton seul

La Force de rupture dans le béton seul doit satisfaire la condition de non poinçonnement, donnée par le règlement BAEL [36] 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 [34] :

$$\text{Si } f_{cj} \leq 40 \text{ Mpa} \Rightarrow Q_U \leq (0.05 + 1.5\rho_1) u_c \cdot d \cdot \frac{f_{cj}}{\gamma_b} \quad (\text{III.16})$$

Avec :

ρ_1 : Pourcentage moyen d'armatures de flexion au droit de la charge, défini par :

$$\rho_1 = \min \left[\sqrt{\rho_{lx} \rho_{ly}} ; 0.015 \right] \quad (\text{III.17})$$

Avec : ρ_{lx} et ρ_{ly} sont, respectivement, les pourcentages dans les deux directions,

d : Hauteur utile,

f_{cj} : Résistance du béton en compression,

γ_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.16) et (III.17), $\rho_l = 0$ et $d = 0.9 h$, La condition de non poinçonnement peut être vérifiée par l'expression (III.18) :

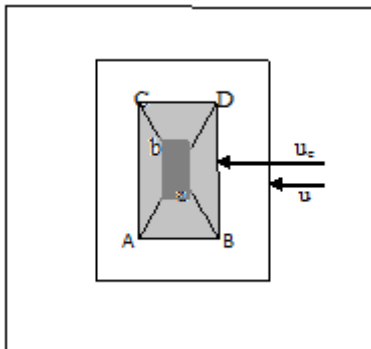
$$Q_U \leq 0,045 \cdot u_c \cdot h \cdot \frac{f_{cj}}{\gamma_b} \quad (\text{III.18})$$

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 : $U_c = AB + BC + CD$

a. Charge éloignée du bord



b. Charge près du bord

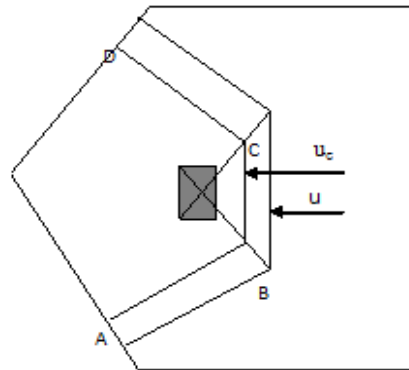


Figure III.7 : Périmètre du rectangle d'impact au niveau du feuillet moyen [34][36]

III.4. Développement des modèles analytiques :

D'après le mécanisme de rupture présenté par Kinnunen et Nylander, et en considérant la figure III.8, on peut écrire :

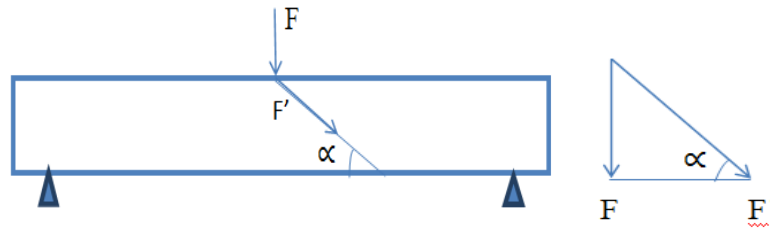


Figure III.8 : mécanisme de rupture de la dalle

$$\left\{ \begin{array}{l} \sin \alpha = \frac{F}{F'} \\ F = F' \cdot \sin \alpha \quad / \quad \alpha = 45^\circ \end{array} \right.$$

$$F' = \frac{F}{\sin \alpha} = \frac{F}{\frac{\sqrt{2}}{2}} = \frac{2F}{\sqrt{2}} \quad (\text{III.19})$$

III.4.1. Cas de poinçonnement centré :

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, où nous avons constaté , comme il a été montré dans le chapitre précédent, que les dimensions du patch (surface renforcée), la nature du renfort (caractéristiques géométriques et mécaniques) ont une influence directe sur la résistance de la dalle en béton renforcée par le patch composite

La force reprise par le patch composite peut être estimée par la relation linéaire (III.20) ;

$$F_{composite} = \alpha \cdot F_c = \left(\frac{S_i}{S}\right)^{0.2} \cdot \sigma \cdot e \cdot b \quad (\text{III.20})$$

En considérant la condition de non poinçonnement donnée par l'expression (III.18) et en remplaçant dans l'expression (III.11) la force reprise par le patch composite par l'expression (III.20), 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.21) suivante :

$$F_r = 0,045 \cdot u_c \cdot d \cdot \frac{f_{cj}}{\gamma_b} + \left(\frac{S_i}{S}\right)^{0.2} \cdot \sigma \cdot e \cdot b \quad (\text{III.21})$$

Avec :

σ : 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.4.1. 1. Application numérique

En tenant compte des valeurs réelles de la contrainte de traction du composite et de la résistance du béton en compression, données par les essais, les différents résultats obtenus par l'application de la relation (III.21), sont résumés dans le tableau III.1 et illustrés par la figure III.9.

Tableau III.1: Confrontation des résultats expérimentaux et théoriques

	Désignation	Dimensions (cm)	Valeur expérimentale kN	Valeur théorique kN	Erreur %
Dalle de Référence	DRef	-	4,62	4,5	2.59
Propriétés du patch : Composite à base de Liège	DRCL1	P=6x4	5,62	5,55	1,24
	DRCL2	P=12x8	7,33	7,32	0.14
	DRCL3	P=18x12	9,4	9,49	0,09
	DRCL4	P=25x22	9,6	15,62	38,54

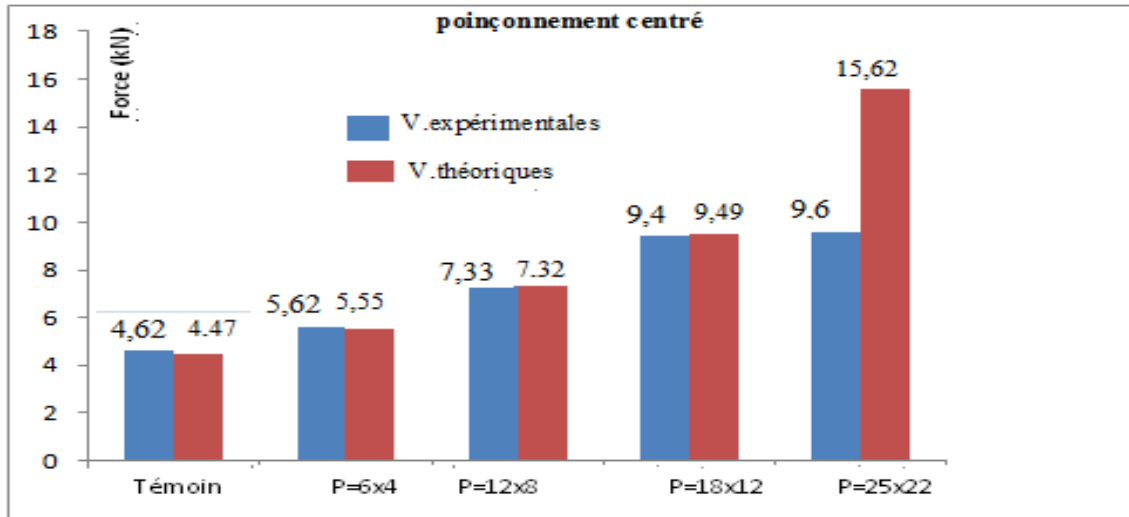


Figure III.9 : Histogramme de poinçonnement centré

A partir de ces résultats, on peut remarquer que, l'erreur maximale est de l'ordre de 2,5% excepté pour la dalle DRCL4 patch 25x22 cm, Pour ce dernier cas, le modèle proposé donne une erreur de l'ordre de 38 %, Ceci peut être expliqué par le fait que, dans le modèle proposé, le paramètre $(\frac{S_i}{S})^{0,2}$, perd totalement sa signification physico-mécanique et d'autre part, la plaque composite repose sur les appuis.

III.4.2. Cas de poinçonnement excentré :

Pour tenir compte de l'excentricité dans l'estimation de la valeur de la résistance à la rupture des dalles en béton renforcées par des patches composites, on considère un facteur d'excentricité de la forme suivante :

$$\left(1 + \frac{1}{4} \frac{|e_x| + |e_y|}{\sqrt{b_x \cdot b_y}}\right) \quad (\text{III.22})$$

Tels que :

e_x et e_y : sont les excentricités de la force selon les axes x et y, respectivement;

b_x et b_y : sont les longueurs de la surface du rectangle d'impact au feuillet moyen.

En introduisant ce facteur d'excentricité dans la relation précédente, la valeur de la résistance à la rupture sera donnée par la relation (III.23) .

$$F_r = \left(0,045 \cdot u_c \cdot d \cdot \frac{f_{cj}}{\gamma_b} + \left(\frac{S_i}{S}\right)^{0.2} \cdot \sigma \cdot e \cdot b\right) \cdot \left(1 + \frac{1}{4} \frac{|e_x| + |e_y|}{\sqrt{b_x \cdot b_y}}\right) \quad (\text{III.23})$$

III.4.2.1. Application numérique

Comme pour le cas de poinçonnement centré, en tenant compte des valeurs réelles de la contrainte de traction du composite et de la résistance du béton en compression, données par les essais, les différents résultats obtenus par l'application de la relation (III.23), les différentes valeurs de la résistance à la rupture des dalles renforcées sont résumés dans le tableau III.2 et illustrés par la figure III.10. Une confrontation avec l'expérimental est réalisée pour estimer l'erreur et valider le modèle proposé.

Tableau III.2: Confrontation des résultats expérimentaux et théoriques

	Excentricité (e)	Désignation	Dimensions (cm)	Valeur expérimentale kN	Valeur théorique kN	Erreur %
Dalle de Ref	1/3	DRef 1/3	-	6,12	6,17	0,81
	2/3	DRef2/3		8,58	7,87	8,27
Propriétés du patch : Composite à base de Liège	1/3	DRCL1e1/3	P=6x4	7,25	7,67	5,47
	2/3	DRCL1e2/3		10,89	9,79	10,1
	1/3	DRCL2e 1/3	P=12x8	8,13	10,11	19,58
	2/3	DRCL2e2/3		-	-	
	1/3	DRCL3e 1/3	P=18x12	8,55	13,1	34,58
	2/3	DRCL3e2/3		9,27	16,71	44,5

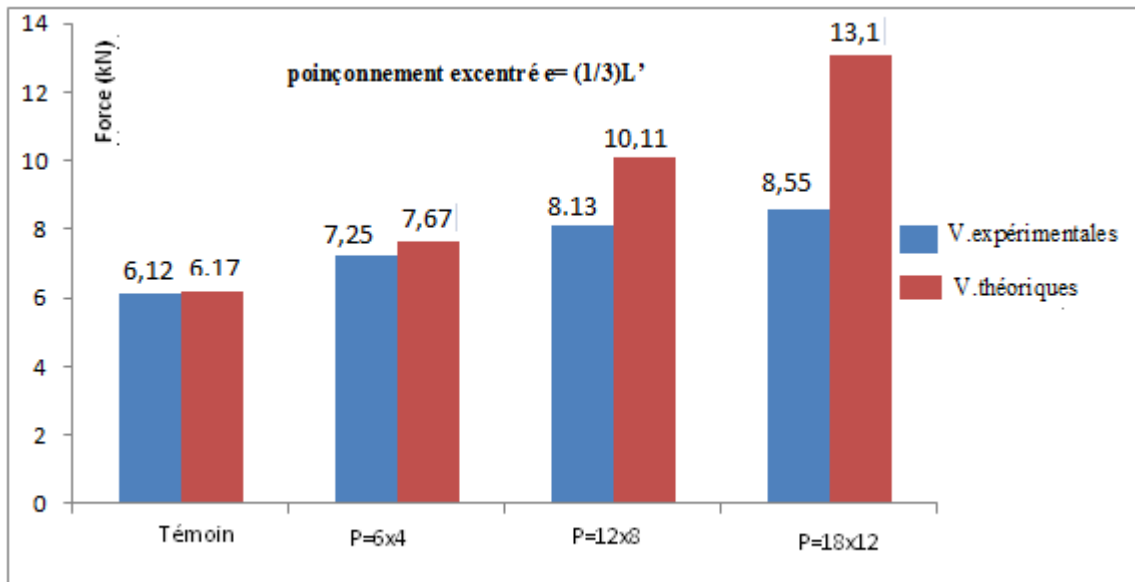


Figure III.10 : Histogramme des valeurs : Charge excentrée à $1/3L'$

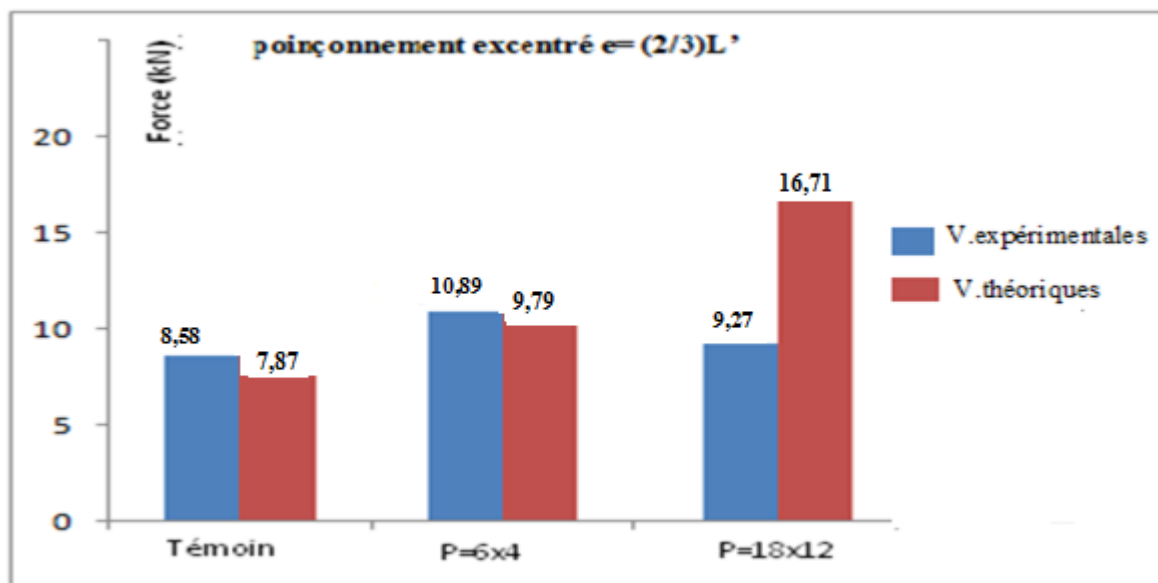


Figure III.11 : Histogramme des valeurs : Charge excentrée à $2/3L'$

A partir de ces résultats, on peut remarquer que, plus les dimensions du patch et le facteur d'excentricité augmentent, plus l'erreur est importante. Aussi, dans le cas d'un

poinçonnement très excentré, il est préférable d'utiliser un patch de petite dimension, pour renforcer juste la surface assujettie à la charge verticale.

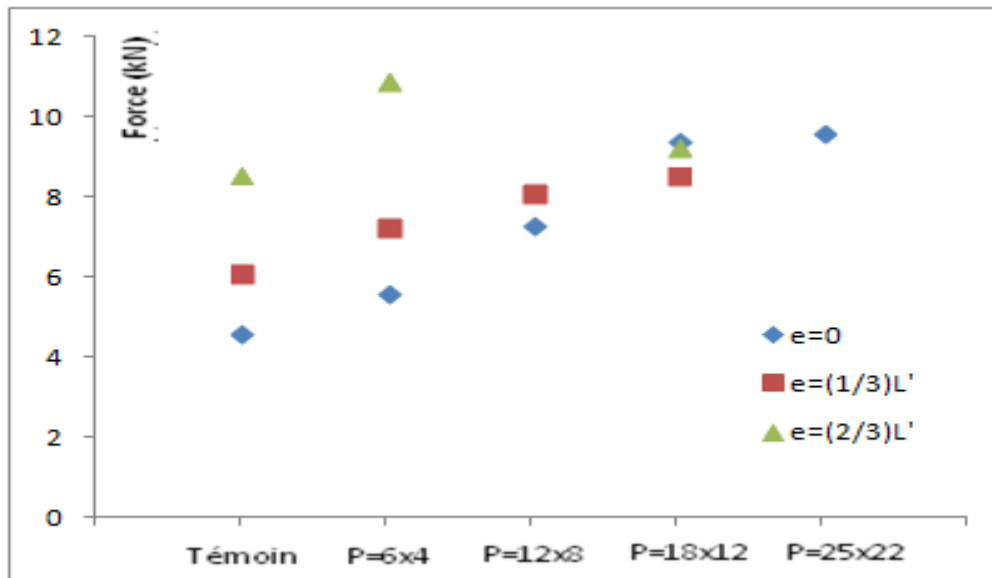


Figure III.12 : Variation de la force appliquée en fonction du type de patch et de l'excentricité

D'après la figure III.12, on remarque que la section du patch (18x12) cm² n'est pas entièrement exploitée lors de l'essai de poinçonnement excentré. Une grande partie de la section se trouve en dehors de la surface d'influence de la charge., par contre, le patch de dimension(6x4) cm² donne de meilleurs résultats quelque soit le type de poinçonnement centré ou excentricité. La surface est entièrement exploitée dans la reprise de l'effort appliqué.

Conclusion du chapitre

Les deux modèles proposés permettent d'estimer correctement les valeurs limites de la résistance à la rupture des dalles en béton renforcées par des patches composites. Les dimensions géométriques du patch ont une influence directe sur la résistance. Pour le cas du poinçonnement excentré , le facteur d'excentricité influe directement sur l'erreur donnée par l'application du modèle proposé. D'autres essais sont nécessaires pour mieux optimiser les paramètres des modèles proposés.

CHAPITRE IV :
ANALYSE
PARAMETRIQUE

IV.1. Introduction

Ce chapitre est totalement consacré à l'analyse paramétrique des différents paramètres des modèles de comportement des dalles renforcées par des patchs composites proposés et présentés dans le chapitre précédent, tels que : le rapport des sections patch / dalle en béton, l'excentricité de la charge et la position du patch composite par rapport au centre de gravité. L'objectif principal est de valider les modèles proposés et d'étudier l'influence des différents paramètres en procédant à une confrontation des résultats donnés par ces modèles avec les résultats expérimentaux.

IV.2. Calcul statistique:

En utilisant les résultats théoriques et expérimentaux, un calcul statistique est réalisé qui permet de calculer, pour chaque dalle : La valeur moyenne, la variance, l'écart type et le coefficient de variance. Les équations mathématiques utilisées sont présentées ci-dessous :

$$\text{Valeur moyenne : } \mu_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{IV.1})$$

$$\text{Variance : } \sigma_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)^2 \quad (\text{IV.2})$$

$$\text{Ecart type : } \sigma_x (\sigma_x \geq 0) \quad (\text{IV.3})$$

$$\text{Coefficient de variance : } V_x = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \quad (\text{IV.4})$$

La valeur de la résistance à la rupture, dans le cas de poinçonnement centré pour les dalles en béton renforcées par des patchs composites peut être estimée par la relation suivante :

$$F_r = 0,045 \cdot u_c \cdot d \cdot \frac{f_{cj}}{\gamma_b} + \left(\frac{S_i}{S}\right)^{0.2} \cdot \sigma \cdot e \cdot b \quad (\text{IV.5})$$

En introduisant ce facteur d'excentricité dans la relation précédente, la valeur de la résistance à la rupture est donnée par la relation

$$F_r = \left(0,045 \cdot u_c \cdot d \cdot \frac{f_{cj}}{\gamma_b} + \left(\frac{S_i}{S}\right)^{0.2} \cdot \sigma \cdot e \cdot b\right) \cdot \left(1 + \frac{1}{4} \frac{|e_x| + |e_y|}{\sqrt{b_x \cdot b_y}}\right) \quad (\text{IV.6})$$

Avec :

σ : 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.

e_x et e_y : sont les excentricités de la force selon les axes x et y , respectivement;

b_x et b_y : sont les longueurs de la surface du rectangle d'impact au feuillet moyen.

Les différents résultats sont donnés par les tableaux V1, V2 et V3.

Tableau IV.1 Cas de Poinçonnement centré

Essai	F_{exp} (kN)	F_{Th} (kN)	F_{exp}/F_{Th}
PL (6x4)	5,62	5,55	1.01
PL (12x8)	7,33	7,32	1.001
PL (18x12)	9,4	9,49	1.00
PL (25x22)	9.6	15,62	0.61
		Moyenne	0.91
		écart type	0.2

Tableau IV.2. Cas de Poinçonnement excentré : $e= 1/3 L'$

Essai	F_{exp} (kN)	F_{Th} (kN)	F_{exp}/F_{Th}
PL (6x4)	7,25	7,67	0.94
PL (12x8)	8,13	10,11	0.80
PL (18x12)	8,55	13,1	0.65
		Moyenne	0.8
		écart type	0.14

Tableau IV.3. Cas de Poinçonnement excentré : $e= 2/3 L'$

Essai	F_{exp} (kN)	F_{Th} (kN)	F_{exp}/F_{Th}
PL (6x4)	10.89	9,79	1.11
PL (18x12)	9,27	16,71	0.55
		Moyenne	0.83
		écart type	0.39

L'analyse des différents résultats donnés par ces tableaux, nous permet de conclure ce qui suit :

- Pour le cas de poinçonnement centré, l'écart type est de 20% et le coefficient de variance est de 21.98%. donc, le modèle proposé permet d'obtenir des valeurs très proches des valeurs expérimentales.

- Pour le cas de poinçonnement excentré, lorsque l'excentricité est égale à $e = 1/3L'$, l'écart type est de 14% et le coefficient de variance est de 17.5% et pour $e = 2/3L'$, l'écart type est de 39% et le coefficient de variance est de 46.99%. Ces valeurs montrent une dispersion plus importante comparativement aux cas des dalles renforcées soumises au poinçonnement centré.

IV.3. Variables considérées :

Les variables considérées dans cette étude sont : le rapport des sections patch / dalle en béton, l'excentricité de la charge et la position du patch composite par rapport au centre de gravité. Pour les deux cas de poinçonnement centré et excentré, nous représentons l'évolution de la charge en fonction de chaque paramètre considéré. Pour les cas utilisés dans l'investigation expérimentale, une confrontation des résultats est réalisée pour valider le domaine d'application des modèles proposés.

IV.4. Présentations des résultats.

IV.4. 1. Influence du rapport des sections patch / dalle en béton ' S_p / S_D ' .

a) Poinçonnement centré:

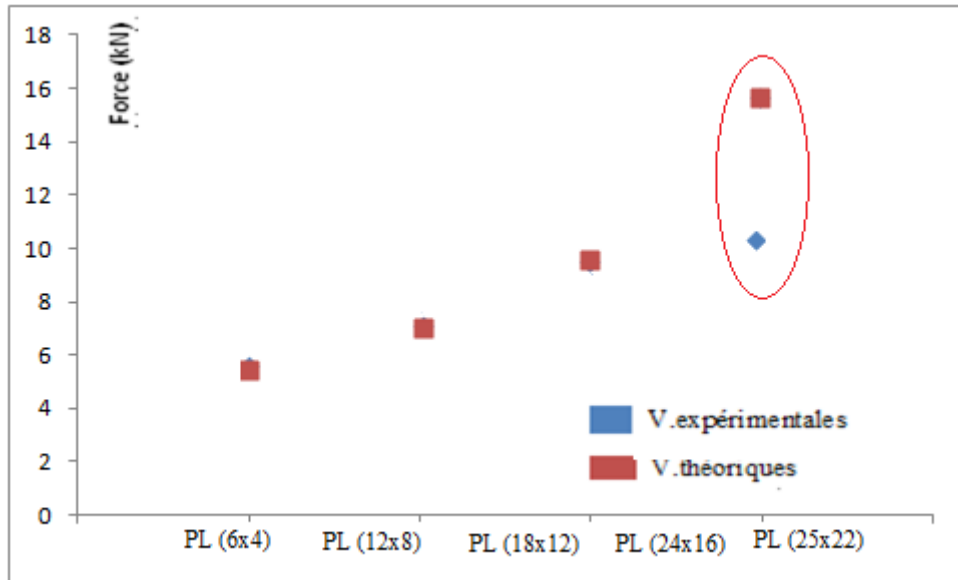


Figure IV.1 : Courbe de comparaison force- rapport des sections patch / dalle en béton (S_i/S_D) . Cas de poinçonnement centré.

Remarque : un écart très important est observé entre les valeurs théoriques et expérimentales de la charge de poinçonnement centré pour des rapports S_p/S_D supérieurs à 0.75.

Pour le cas des dalles renforcées PL (25x22) , lors des différents essais mécaniques, nous avons observé des légers décollements de la plaque aux extrémités . En effet sous l'action de la charge verticale de poinçonnement, la plaque au niveau des extrémités se décolle suite à la mauvaise liaison (adhérence) de la plaque composite avec le support béton et d'autre part, à la nature du contact avec le dispositif d'appui confectionné. Aussi, pour quelques dalles, nous avons remarqué que les extrémités de la plaque composite sont directement en contact avec le dispositif d'appui réalisé (problème de dimensions du dispositif). Alors que pour les plaques composites de petites dimensions, nous remarquons une meilleure concordance avec les résultats expérimentaux.

b)- Poinçonnement excentré:

- Excentricité à $1/3 L'$:

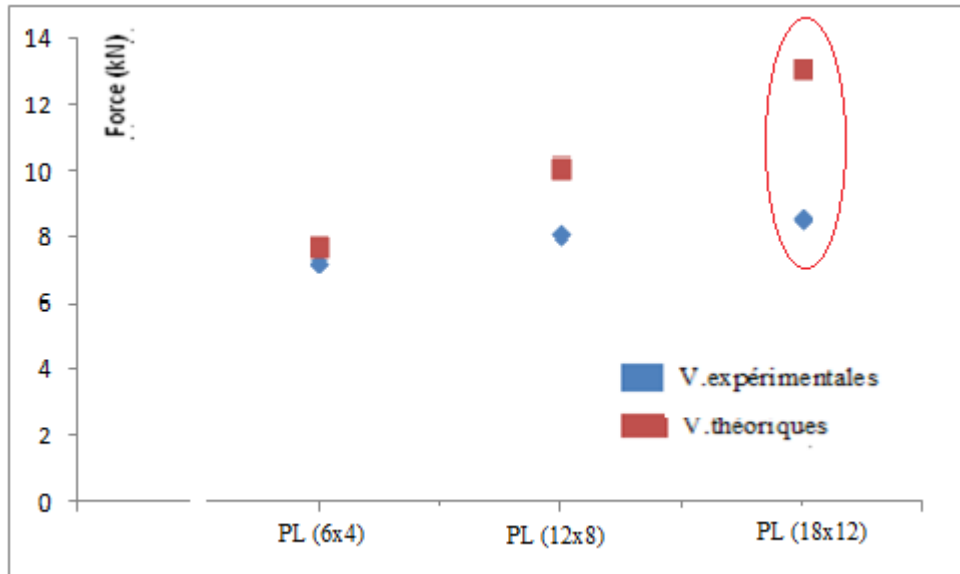


Figure IV.2: Evolution de la Charge en fonction du rapport (S_P/S_D) : Cas de poinçonnement excentré $e= 1/3 L'$.

- Excentricité à $2/3L'$:

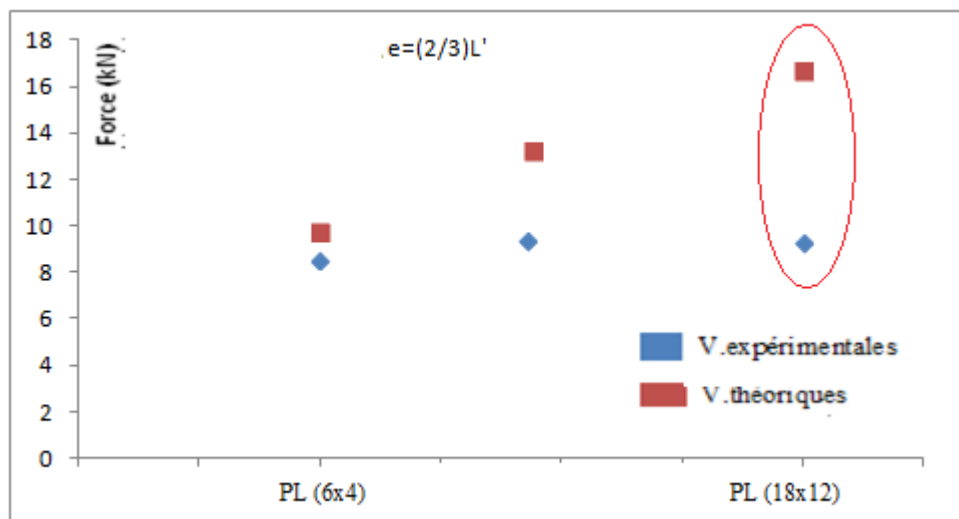


Figure IV.3: Evolution de la Charge en fonction du rapport (S_P/S_D) : Cas de poinçonnement excentré $e= 2/3 L'$.

A partir des figures IV.2 et IV.3, on remarque que plus le rapport (S_P/S_D) est important plus l'écart entre les valeurs théoriques et expérimentales de la charge de poinçonnement excentré est important. Ceci peut être expliqué par l'influence et l'interaction des autres paramètres sur le comportement global des dalles. En effet, dans le cas de poinçonnement excentré, non seulement la force est excentrée mais le patch composite est aussi excentré. , lorsque la valeur de l'excentricité est importante, Une partie seulement de la dalle est renforcée et donc la zone du moment maximal n'est pas totalement renforcée. L'excentricité de la charge verticale induit un moment de flexion additionnel qui a un effet sur la surface de rupture. L'augmentation de la charge verticale ponctuelle diminue la résistance par unité de longueur, par conséquent, la charge de rupture. Plus l'excentricité est importante, plus la rupture est ductile

IV.4. 2. Influence de l'excentricité de la charge et du patch composite

En considérant la même section du patch composite, soit le même rapport ($S_P/S_D = C^{te}$), on fait varier l'excentricité de la charge (le point d'application de l'effort normal de poinçonnement). Les courbes d'évolution de la charge en fonction de l'excentricité pour les différentes sections des patches composites sont illustrées par les figures (IV.4, IV.5).

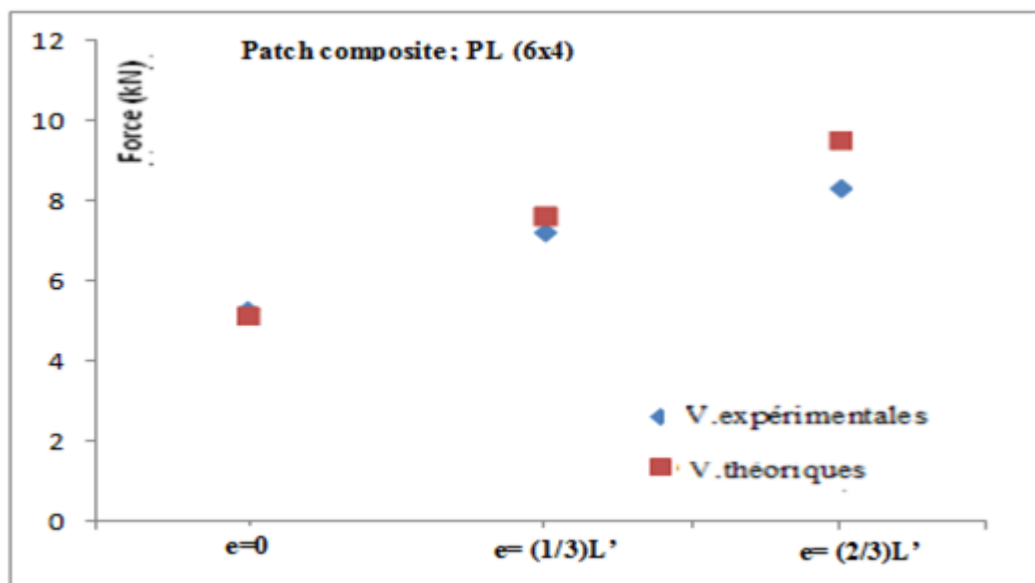


Figure IV.4: Evolution de la Charge en fonction de l'excentricité: Cas de renforcement par le patch (6x4)cm.

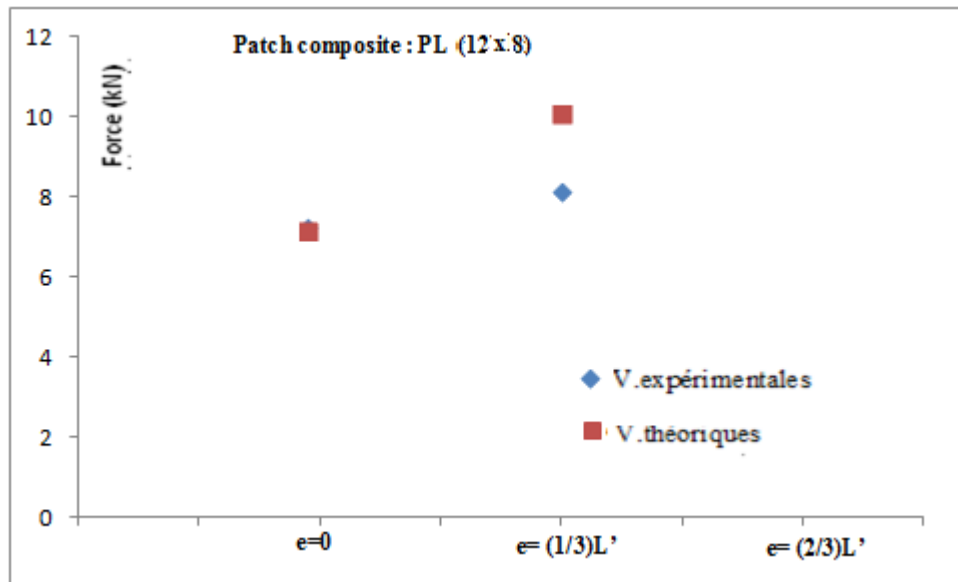


Figure IV.5: Evolution de la charge en fonction de l'excentricité: Cas de renforcement par le patch (12x8) cm

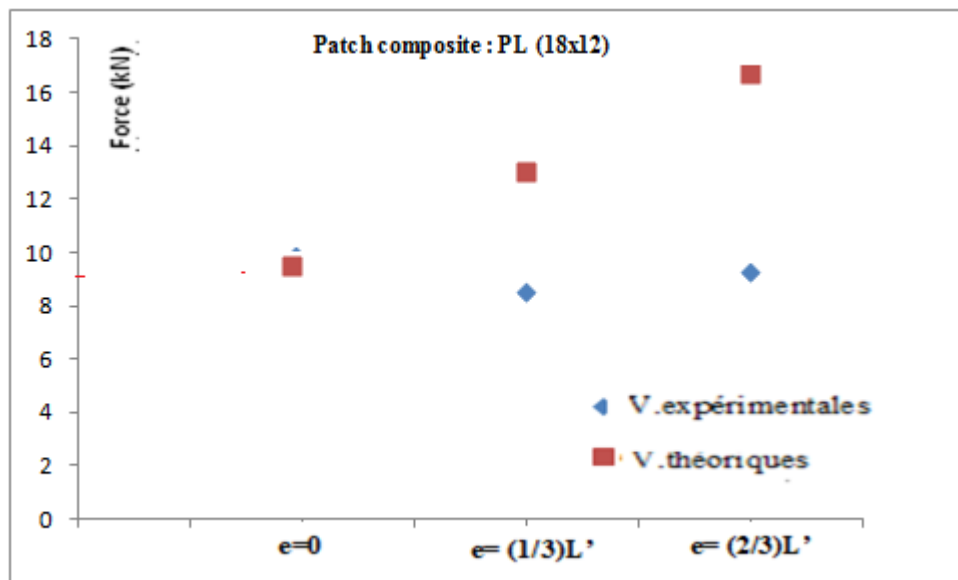


Figure IV.6: Evolution de la charge en fonction de l'excentricité: Cas de renforcement par le patch (18x12) cm

Les figures IV 4, IV 5, et IV 6 permettent de tirer les conclusions suivantes:

- Lorsque la dimension du patch composite est réduite, on observe une très bonne concordance entre les résultats donnés par les modèles proposés et ceux donnés par les essais mécaniques. Les modèles proposés permettent donc de décrire convenablement le comportement global des dalles renforcées par des patches de dimensions relativement moyennes par rapport aux dimensions des dalles

- Lorsque l'excentricité est importante du centre de la dalle et étant donné que le patch composite est appliqué sous le point d'application de la charge ; la surface renforcée ne couvre pas totalement la zone du moment maximal. L'excentricité de la charge verticale influe directement sur la surface de rupture. Plus l'excentricité est importante, plus la rupture est ductile

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

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. Pour le cas de poinçonnement, le renforcement par des patches composites s'avère un choix judicieux et rentable.

L'analyse des modes de rupture des spécimens étudiés confirme que la rupture se caractérise par un cisaillement du béton dans l'épaisseur de la dalle. Les dalles présentent un comportement flexionnel caractérisé par plusieurs phases.

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

- Le mode de rupture des dalles se caractérise par un cisaillement du béton dans l'épaisseur de la dalle.
- Le comportement réel des dalles renforcées par des patches composite se caractérise par la résistance aux efforts de flexion et de poinçonnement, le décollement de la plaque composite de renforcement dans le cas où toute la surface de la dalle est renforcée, les propriétés et les dimensions en plan des patches composites.
- Les résultats donnés sous forme de courbes déplacements mesurés au centre de la dalle en fonction de la force appliquée, montrent que la force de rupture et le déplacement ultime correspondant sont influencés par les propriétés du patch composite et la surface couverte par le patch composite. Dans les deux cas, on observe que la force de rupture et le déplacement ultime augmentent avec la surface du patch et les propriétés du composite. A titre indicatif, la charge de rupture augmente de 107.8% pour la dalle DRCL4, 113.6% pour la dalle DRCC4 et 142.2 % pour la dalle DRCC3 . Ce gain au niveau de la charge ultime n'est pas proportionnel à la surface du patch composite, du fait que la capacité ultime de la dalle est limitée par le phénomène du poinçonnement qui dépend plus des caractéristiques du béton

- Dans le cas d'une excentricité de $e = (1/3)L'$, le meilleur rapport résistance /section est obtenue pour le cas de renforcement avec un patch composite de section 12x8 cm. Alors que pour une excentricité de $e = (2/3) L'$, le renforcement avec un patch composite de section 6x4 cm procure à la dalle une meilleur résistance de l'ordre de 10,9 Kn. Ceci met en évidence l'influence de l'excentricité de la charge de poinçonnement sur les dimensions des patchs composites de renforcement.
- Dans le cas de poinçonnement centré, l'erreur maximale est de l'ordre de 4.13 % pour le cas de renforcement par les patchs composites, tandis que, dans le cas de renforcement de toute la surface de la dalle, le modèle proposé donne une erreur de l'ordre de 38 %.
- Lorsque les dimensions du patch composite sont réduites, on observe une très bonne concordance entre les résultats donnés par les modèles proposés et ceux donnés par les essais mécaniques et ceci pour les deux cas de poinçonnement considérés.
- Plus les dimensions du patch et le facteur d'excentricité augmentent, plus l'erreur est importante. Aussi, dans le cas d'un poinçonnement très excentré, il est préférable d'utiliser un patch de petites dimensions, pour renforcer juste la surface assujettie à la charge verticale.
- Les modèles proposés permettent de décrire convenablement le comportement global des dalles renforcées par des patchs de dimensions relativement moyennes par rapport aux dimensions des dalles.

Perspectives

Comme perspectives, nous proposons d'étudier l'influence de :

- la forme du patch composite (circulaire, losange, ...)
- l'excentricité de la charge verticale ponctuelle dans les deux directions

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BENZAID Riad “Contribution à l’Étude des Matériaux Composites Dans le Renforcement et la Réparation Des Éléments Structuraux Linéaires en Béton” ; université Constantine, thèse de doctorat 2010 - 288p.
- [2] 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.
- [3] RAGOUBI Mohamed “Contribution à l’amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne” ; Nancy université, thèse de doctorat 2010 – 220p.
- [4] GORNET Laurent “Généralités sur les matériaux composites”, version 1 ; Centrale Nantes, Ecole d’ingénieur 2008 – 47p.
- [5] ZE YI WU “Etude expérimentale du comportement des poutres courtes en béton arme pré fissurées et renforcées par matériaux composite sous chargement statique et de fatigue” ; école nationale des ponts et chaussée, thèse de doctorat 2004 – 244p.
- [6] SEYNI Abdoulaye “Propriétés physico-chimiques et d’usage de matériaux composites à charge dégradable produits par co-broyage” ; université de Toulouse, thèse de doctorat 2008 – 175p.
- [7] BENFARDI Saber “Caractérisation du comportement micromécanique d’un matériau composite par différentes approches mathématiques” ; université Constantine, thèse de magister 2010 – 161p
- [8] SAHRI Safia “Etude du comportement mécanique d’un matériau composite thermoplastique (PP)/ Verre : Effet de différents milieux” ; université de Tizi-Ouzou, thèse de magister 2012 – 123p
- [9] 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.
- [10] MERDAS Abde-elghani “Utilisation du TFC dans la réparation et le renforcement des poutres en BA” ; université de Constantine, thèse de magister 2005 – 135p.
- [11] 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

- [12] GIROUD Thomas “Mesure et calcul des contraintes résiduelles dans les pièces injectées en thermoplastiques avec et sans fibres de renfort” ; écoles des mines de Paris, thèse de doctorat 2001 – 222p
- [13] BELKACEMI Chérifa “Etude expérimentale du comportement mécanique des stratifiés à renfort en matière végétale” ; université Boumerdes, thèse de magister 2006 – 142p
- [14] MOKHTARI Abdessamed “Influence des ajouts de fines minérales sur les Performances Mécaniques des Bétons Renforcés de Fibres Végétales de Palmier Dattier” ; université Ouargla, thèse de magister 2006 – 98p
- [15] BOUMERDASSI Karima “Elaboration et caractérisation d’un composite biodégradable à matrice thermoplastique et renfort polysaccharides” ; université de Boumerdes, thèse de magister 2008 – 111p
- [16] GEHRING Florian “Etude du comportement mécanique et de l’endommagement de composites thermoplastiques renforcés de fibres courtes de chanvre : Approche expérimentale et modélisation” ; université de Lorraine, thèse de doctorat 2013 -155p.
- [17] YAHIAOUI Lamia “Caractérisation d’un composite à la rupture à base des fibres végétales (Diss)” ; université de Sétif, thèse de magister 2011 – 118p
- [18] BOUKHAZAR Mohcene “Réhabilitation et renforcement des poutres au moyen des matériaux composites” ; université de Constantine, thèse de magister 2009 – 123p
- [19] 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.
- [20] GUIDOTTI Roberto “Poinçonnement des planchers dalles avec colonnes superposées fortement sollicité” ; ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE N°4812, thèse de doctorat; 2010 – 226p.
- [21] DULUDE Christian “Poinçonnement des dalles bidirectionnelles en béton armé d'armature de polymères renforcés de fibres de verre” ; université de Sherbrooke, mémoire de maîtrise ès sciences appliquées 2011 – 142p.
- [22] GUANDALINI Stefano “Poinçonnement symétrique des dalles en béton armé” ; ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE N°3380, thèse de doctorat; 2005 – 289p.
- [23] TASSINARI Luca “Poinçonnement non symétrique des dalles en béton armé avec armature de poinçonnement” ; ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE N°5030, thèse de doctorat; 2011 – 197p.

- [24] CLEMENT Thibault “Influence de la précontrainte sur la résistance au poinçonnement des dalles en béton armé” ; ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE N°5516, thèse de doctorat; 2012 – 250p.
- [25] KRUGER Gaston “Résistance au poinçonnement excentré des plancher dalles” ; ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE N°2064, thèse de doctorat; 1999 – 191p.
- [26] ROUX Jean “Résistance des matériaux par pratique 4” ; Paris : Eyrolles, 2000 – 504p ; pp255-367.
- [27] LAROSE Serge “Mécanique des Structures 1 : solides élastique, plaque et coques ” ; 2° édition, Paris : Masson, 1999 – 292p.
- [28] CHORFI Sofiane “Analyse des plaques orthotropes minces sous l’effet des conditions extérieures” ; université de Constantine, thèse de magister 2010 – 211p
- [29] ROKBI Mansour “Comportement a la rupture et caractérisation mécanique de composites polyester-fibres de verre” ; université de M’sila, thèse de magister 2001 – 148p.
- [30] MARIGO Jean-Jacques “Plasticité et rupture” ; Programmes d’approfondissement mécanique, Innovation Technologique Energie du XXI° siècle, édition 2010 -218p, pp 4-5.
- [31] TRAN The Truyen “Contribution à l’étude du comportement mécanique et hydromécanique du béton” ; université de Liège, thèse de doctorat 2009 – 257p.
- [32] BERTHELOT Jean Marie “Matériaux composites : comportement mécanique et analyse des structures” 4° édition, Lavoisier 2005 - 645p.
- [33] ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE “Béton armé et précontraint” cours du département Génie Civil de l’EPFL, Tome II, Alger : édition Berti 1993 - 279p ; p265-268.
- [34] DAVIDOVICI Victor “Formulaire du béton armé 1” mémento technique, volume 1, 2° édition ; Paris : Le Moniteur ; 1996 – 270p.
- [35] HAMELIN Patrice “Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites” AFGC, Document scientifiques et techniques, recommandation provisoire, décembre 2003 – 148p.
- [36] Jean PERCHAT et Jean ROUX “Pratique du BAEL 91 cours avec exercices corrigés” ; Eyrolles, 4° édition 2002 - 466p.