

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



UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU

FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

LABORATOIRE : LAMOMS



MEMOIRE DE MASTER RECHERCHE

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Thème

*Analyse expérimentale des éléments de
structures renforcés par des composites*

Promoteur :

Pr K. AIT TAHAR

Réalisé par :

BEN CHABANE Tarik

-Promotion 2013-

Remerciements

Mes plus vifs remerciements vont, en premier lieu, à mon promoteur professeur : AIT TAHAR Kamal, qui m'a offert l'opportunité d'effectuer ce thème auprès de son équipe et m'a dirigé tout au long de l'année et m'a formé à la recherche. Sa disponibilité, sa compétence et son optimisme ont permis le déroulement de la recherche et les travaux d'étude expérimentale et son achèvement dans les meilleures conditions. Sans son aide, ce document n'aurait pas vu le jour.

J'adresse également mes remerciements à madame KHELOUI pour sa participation à mes essais et pour sa gentillesse et les aides qu'elle a apportées à mon travail.

Mes remerciements sincères s'adressent également à monsieur BOUKAIS pour son assistance continue durant la réalisation des essais et sa disponibilité durant tout le cursus de master

Mes remerciements vont à monsieur BOUAMARA.Y pour ses motivations et conseils qui m'ont beaucoup servis ainsi que ses encouragements à la réalisation de la partie simulation qui n'a pas eu lieu, faute de temps.

Je tiens à remercier très sincèrement monsieur DEHMOUS pour ses conseils et sa volonté de m'aider durant ses passages au laboratoire.

Je voudrais remercier les ingénieurs du laboratoire de génie civil monsieur MAMMOU pour sa disponibilité et les moyens mis à notre disposition pour le bon déroulement des essais, et monsieur BOUHERAOUA pour sa présence et sa gentillesse.

Je remercie toutes les personnes qui ont contribué à la fourniture des matériaux, monsieur HAOUILI, madame AIT AISSI. Z.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à la personne qui m'a beaucoup aidé et à surmonté toutes les difficultés rencontrées, et c'est avec elle que j'ai préparé tous mes études et examens durant mon cursus d'étude et également ce thème, Mlle BOUDIA OUIZA.

Dédicaces

Je dédie ce travail à une personne qui m'est très chère, ses conseils pour les études m'ont beaucoup encouragés, ses souvenirs m'ont beaucoup motivés.

« À la mémoire de ma mère »

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Comportement du Béton	
Introduction du chapitre.....	2
1.1 Les constituants du béton.....	3
1.2 Caractéristiques mécanique du béton.....	6
1.2.1 Essai de compression.....	6
1.2.2 Essai de traction.....	8
1.2.3 Modules de déformation longitudinale.....	9
1.2.4 Module d'élasticité transversale « G »	9
1.2.5 Coefficient de poisson	10
1.2.6 Modèle de calcul à l'E.L.U.....	10
1.2.7 Modèle de calcul à l'E.L.S.....	11
1.2.8 Essai de poinçonnement	11
1.2.8.1 Rupture par poinçonnement.....	12
1.2.8.2 Comportement mécanique des dalles	12
1.2.8.3 Approche mécanique du comportement des dalles non fissurée.....	14
1.2.9 Résistance au choc	17
1.2.10 Essai d'impact	17
1.2.10.1 Impact Sur Dalle <i>essais EDF-CEMETE</i>	18
1.2.10.2 Définition de l'essai.....	18
Chapitre 2 : Matériaux Composites	
Introduction	20
2.1 Définition d'un matériau composite.....	20
2.2 Constituants des matériaux composites.....	21
2.2.1 La matrice.....	21
2.2.1.1 Les résines thermodurcissables.....	22
2.2.1.2 Les résines thermoplastiques.....	22
2.2.1.3 Les matrices naturelles.....	22
2.2.1.4 Résines époxydes.....	22

2.2.1.5	Phénoplastes ou phénols-formols.....	22
2.2.1.6	Les résines thermostables.....	23
2.2.2	Les renforts.....	23
2.2.2.1	Les fibres.....	23
2.2.2.2	Architecture des fibres.....	24
2.2.2.3	Les charges.....	25
2.3	Structure du composite.....	26
2.3.1	Les monocouches.....	26
2.3.2	Les stratifiées.....	26
2.3.3	Les sandwichs.....	27
2.4	Procédé de fabrication des composites.....	27
2.5	Avantages et inconvénients des composites.....	28
2.6	Détermination expérimentale des caractéristiques mécaniques	29
2.6.1	Les essais mécaniques.....	29
	Conclusion du chapitre.....	32
Chapitre 3 : Techniques de Renforcement.		
	Introduction	33
3.1	Techniques de renforcement des ouvrages par collage des matériaux composites.....	33
3.1.1	Application des matériaux composites en génie civil	33
3.1.2	Techniques de renforcement.....	34
3.2	Autres méthodes de renforcement des structures.....	38
3.2.1	Renforcement par adjonction d'armature complémentaire.....	38
3.2.2	Béton projeté.....	38
3.2.3	Tôles collées.....	39
3.2.4	Précontrainte additionnelle.....	41
Chapitre 4 : Investigation Expérimentale		
	Introduction.....	42
4.1.	Matériau Béton.....	42
4.1.2.	Elaboration des spécimens	42
A.	Matériaux utilisés.....	42
B.	La composition du béton	43
C.	Préparation et fabrication des moules.....	43
D.	Malaxage et mise en œuvre du béton.....	44

4.2. Matériaux Composites.....	46
4.2.1. Présentation et préparation des matériaux étudiés.....	46
a. Matrice	47
b. Les Renforts	48
1. Fibre de verre	48
2. Polypropylène	49
3. Le Liège	50
4. La Fonte	54
5. Le Plomb	57
4.2.2 Elaboration des composites	58
1) Technique de mise en œuvre des matériaux composites	58
2) Modes opératoire	60
a) La réalisation de la plaque en composite.....	60
b) La réalisation de la plaque en composite à renfort polypropylène :	61
c) La réalisation des plaques en matrice chargée.....	63
3) Compositions des éprouvettes	
4.3. Association BETON-COMPOSITE	68
4.4. Essais Mécaniques.....	71
4.4.1. Détermination de la résistance mécanique en compression	71
4.4.2 Essai de traction sur éprouvettes en matériaux composites	72
A. Machine d'essai	75
B. Résultats des essais de traction et interprétation.....	76
4.4.3. Essais de flexion.....	95
4.4.4. Essai de poinçonnement	104
A. Instrumentation de l'essai.....	104
B. Résultats des essais de poinçonnement et interprétation.....	105
4.4.5. Essai au choc	117
4.5. Conclusion du chapitre	126
Conclusion générale	127
Références bibliographiques	

Listes des Figures

Figure :1.1 La première réalisation en béton armé Barque de Joseph Louis Lambot 1849.	2
Figure1.2 :Pont bi-poutre de Chazelet,1875, Joseph Monier	2
Figure 1.3 : cylindre soumis à la compression.....	7
Figure 1.4 : Evolution de la résistance a la compression dans le temps.....	7
Figure 1.5 : diagramme des contrainte-déformation en compression	7
Figure 1.6 Essai de fendage sur éprouvette cylindrique.....	8
Figure 1.7 : Essai de traction sur une éprouvette	8
Figure 1.8 : Evolution de la résistance à la traction f_{tj} en fonction de celle à la compression f_{cj}	9
Figure 1.9 : Diagramme contrainte.....	11
Figure 1.10 : rupture par poinçonnement d'une dalle en béton	12
Figure 1.11 : Phases successives du comportement d'une dalle en flexion	14
Figure 1.12 : Dalle rectangulaire articulée sur quatre cotés	15
Figure 1.13 : Distribution des moments dans une dalle rectangulaire pour différentes valeurs du rapport des côtés a/b et pour $\nu=0$	16
Figure 1.14 : Géométrie de la dalle	18
Figure 1.15 : Force d'impact.....	19
Figure 1.16. : Déplacement vertical au centre de la dalle.....	19
Figure.2.1 : Matériaux composites	21
Figure.2.2: Différentes familles de matrices	22
Figure2.3: Les différents types de renfort de base	23
Figure 2.4 : Géométries des renforts	24
Figure.2.5 : composite stratifié	26
Figure.2.6 : Composite sandwichs	27
Figure2.7. Traction Longitudinale.....	30

Liste des Figures

Figure.2.8 Traction transversale	31
Figure2.9. Traction hors axes.....	32
Figure 3.1 : principales applications de renforcement par composites collés sur ouvrages	36
Figure 3.2 : description des procédés de renforcement	37
Figure 3.3 : Réparation de poutre par adjonction d'armature	38
Figure 3.4 Réparation de poutre par béton projeté.....	39
Figure 3.5 Renforcement d'un viaduc par tôles collées	40
Figure 3.6 : Différents types de réparation par précontrainte additionnelle	41
Figure 4.1.1: séchage des granulats	42
Figure 4.1.2 : Plastifiant MEDAFLOW-30	43
Figure 4.1.3 : Formes des Moules	44
Figure 4.1.4 : Malaxeur	45
Figure 4.1.5: Dispositifs vibratoires	45
Figure 4.1.6 : Spécimens après coulage.....	46
Figure 4.1.7 : Eprouvettes conservées dans l'eau	46
Figure 4.2.1. : Mat de verre	48
Figure 4.2.2 : Forme du Tissu en fibres de Polypropylène	49
Figure 4.2.3. : Liège aggloméré	51
Figure 4.2.4 : Liège à l'état brut	53
Figure 4.2.5 : Liège broyé	54
Figure 4.2.6 : Tamisage du liège	54
Figure 4.2.7 : Poudre de fonte.....	57
Figure 4.2.8 : Poudre de plomb.....	57
Figure 4.2.9 : principe de mise en œuvre des matériaux composites	58
Figure 4.2.10 : Moule fabriqué avec les dimensions 300x300x2mm	59
Figure 4.2.11 : modèle de moules 230x280x2mm	59

Liste des Figures

Figure 4.2.12: 03 moules en série 100x400x2 mm	59
Figure 4.2.13 : Principales étapes de réalisation des éprouvettes (résine + charges+mat)..	60
Figure 4.2.14 : imprégnation du renfort dans la résine	61
Figure 4.2.15 : Orientation des fibres de tissu pp.....	62
Figure 4.2.16 : Plaque (résine époxy+ 2 tissus de polypropylène)	62
Figure 4.2.17 : granulométrie du liège	63
Figure 4.2.18 : Principales étapes d'élaboration des éprouvettes (Résine époxy +Liège) ..	64
Figure 4.3.1 : Préparation des supports béton.....	68
Figure 4.3.2 : Principales étapes de renforcement du béton par collage du matériau composite	69
Figure 4.4.1 : machine d'essai de compression et système d'acquisition de données	71
Figure 4.4.2 : Courbe de contrainte déformation du béton en compression	72
Figure 4.4.3 : Géométrie des éprouvettes	73
Figures 4.4.4 : Aspect de quelques éprouvettes élaborées.....	73
Figures 4.4.5: Conservation des éprouvettes dans l'étuve.....	75
Figure 4.4.6 : Machine d'essai IBERTEST	76
Figure 4.4.7 : Courbe Force déplacement fonte 5%	77
Figure 4.4.8 : Courbe Force déplacement fonte 10%	77
Figure 4.4.9 : Courbe Force déplacement fonte 15%	78
Figure 4.4.10 : Courbe Force déplacement fonte 10% étuve.....	78
Figure 4.4.11 : Courbe Force déplacement fonte 15% étuve.....	79
Figure 4.4.12 : Courbe Force déplacement Liège 15%	79
Figure 4.4.13 : Courbe Force-déplacement Liège 15% étuve.....	80
Figure 4.4.14 : Courbe Force-déplacement Liège 20%	80
Figure 4.4.15: Courbe Force-déplacement Liège 20% étuve.....	81
Figure 4.4.16: Courbe Force-déplacement Liège varié Lv20%	81
Figure 4.4.17: Courbe Force-déplacement Liège L20% D0.3mm	82

Liste des Figures

Figure 4.4.18: Courbe Force-déplacement Liège L20% D0.5mm	82
Figure 4.4.19: Courbe Force-déplacement Liège L20% D0.5mm étuve	83
Figure 4.4.20: Courbe Force-déplacement Liège L20% D 1mm	83
Figure 4.4.21: Courbe Force-déplacement polypropylène PP 1 tissu	84
Figure 4.4.22: Courbe Force-déplacement polypropylène PP 2 Tissus	84
Figure 4.4.23: Courbe Force-déplacement polypropylène PP 2 Tissus étuve	85
Figure 4.4.24 Courbe Force-déplacement Plomb 5%	85
Figure 4.4.25: Courbe de comparaison Force-déplacement fonte 5% ,10% et 15%.....	86
Figure 4.4.26: Courbe de comparaison Force-déplacement f10% et f10étuve.....	86
Figure 4.4.27: Courbe de comparaison Force-déplacement f15% et f15étuve.....	87
Figure 4.4.28: Courbe de comparaison Force-déplacement f10% étuve et f15étuve.....	87
Figure 4.4.29: Courbe de comparaison Force-déplacement f5% et Pb5%	88
Figure 4.4.30 : Courbe de comparaison Force-déplacement Liège15% et fonte15%	88
Figure 4.4.31. Courbe de comparaison Force-déplacement selon la granulométrie du liège	89
Figure 4.4.32. Courbe de comparaison Force-déplacement Liège : 20% et 20% étuve.....	89
Figure 4.4.33. Courbe de comparaison Force-déplacement Liège : 15% et 15% étuve.....	90
Figure 4.4.34 : Courbe de comparaison Force-déplacement PP1tissu et PP2 tissus.....	90
Figure 4.4.35. Courbe de comparaison Force-déplacement PP2tissus et PP2 tissus Etuve.....	91
Figure 4.4.36.Histogramme des résistances à la traction des éprouvettes.....	91
Figure 4.4.37.Influence du volume de la charge et le gradient thermique sur la résistance.....	92
Figure 4.4.38. Variation de la résistance à la traction en fonction de la granulométrie du liège et le gradient thermique	93
Figure 4.4.39 Influence de la morphologie de la structure sur la résistance à la traction des éprouvettes	93
Figure 4.4.40.Influence du renfort polypropylène ainsi que le gradient thermique sur la résistance à la traction	94

Liste des Figures

Figure 4.4.41. Position des Prismes renforcés en composite à matrice chargé prisme soumis à l'essai de flexion	95
Figure 4.4.42. : Courbe force-déplacement prisme témoin	97
Figure 4.4.43: Courbe force-déplacement prisme F5%	98
Figure 4.4.44: Courbe force-déplacement prisme F10%	98
Figure 4.4.45. : Courbe force-déplacement prisme F15%	99
Figure 4.4.46. : Courbe force-déplacement prisme Pb5%	99
Figure 4.4.47 : Influence du volume de la charge sur la résistance des prismes	100
Figure 4.4.48: comparaison des courbes force-déplacement	100
Figure 4.4.49: courbe de comparaison prisme Pb5% et prisme F5%	101
Figure 4.4.50: influence du volume de la charge sur la résistance des prismes	102
Figure 4.4.51 : influence du volume de la charge sur la résistance des prismes	102
Figure 4.4.52: Evolution de la résistance des prismes en fonction du volume de la Charge	103
Figure 4.4.53: Mécanismes de rupture des spécimens	103
Figure 4.4.54. Mise en point de l'essai de poinçonnement	104
Figure 4.4.55. Dalle renforcées	105
Figure 4.4.56.a. Courbe force-déplacement Dalle F5%	106
Figure 4.4.56.b. Courbe force-temps Dalle F5%	106
Figure 4.4.57.a. Courbe force-déplacement Dalle F10%	107
Figure 4.4.57.b. Courbe force-temps Dalle F10%	107
Figure 4.4.58.a. Courbe force-déplacement Dalle L15%	108
Figure 4.4.58.b. Courbe force-temps Dalle L15%	108
Figure 4.4.59.a. Courbe force-déplacement Dalle L20%	109
Figure 4.4.59.b. Courbe force-temps Dalle L20%	109
Figure 4.4.60.a. Courbe force-déplacement Dalle Lv20%	110
Figure 4.4.60.b. Courbe force-temps Dalle Lv20%	110

Liste des Figures

Figure 4.4.61.a. Courbe force-déplacement Dalle PP2 tissus	111
Figure 4.4.61.b. Courbe force-temps Dalle PP2 tissus	111
Figure 4.4.62.a. Courbe force-déplacement Dalle témoin.....	112
Figure 4.4.62.b. Courbe force-temps Dalle témoin	112
Figure 4.4.63.a. Courbe de comparaison force-déplacement.....	113
Figure 4.4.63.b. Courbe de comparaison force-déplacement	113
Figure 4.4.63.c. Courbe de comparaison force-déplacement.....	114
Figure 4.4.63.d. Courbe de comparaison force-déplacement	114
Figure 4.4.63.e. Histogramme des forces	115
Figure 4.4.64: Mécanismes de rupture des spécimens sous l'effort de poinçonnement	117
Figure 4.4.65: Principe de fonctionnement de la tour de chute	118
Figure 4.4.66: Comparaison énergétique.....	120
Figure 4.4.67: Variation de la vitesse d'impact	120
Figure 4.4.68: Influence de la hauteur de chute sur l'énergie potentielle et la vitesse d'impact	121
Figure 4.4.69: variation de l'énergie potentielle en fonction de la vitesse	121

Liste des Tableaux

Tableau 4.1 : Composition du béton	43
Tableau 4.2 : Caractéristiques de la résine époxy	48
Tableau 4.3 : Caractéristique du mat de fibres de verre	49
Tableau 4.4.a : Propriétés mécaniques du polypropylène	50
Tableau 4.4.b : Caractéristiques du tissu de polypropylène	50
Tableau 4.5.a : Composition minérale du liège	52
Tableau 4.5.b : Composition chimique du liège	52
Table 4.6 : Fiche technique de granulat de liège	53
Table 4.7 : Propriétés mécaniques des fontes grises	56
Table 4.8 : Composition chimique des blocs moteurs en fonte grise	57
Tableau 4.9 : Composition des matériaux composites étudiés	65
Tableau 4.10 : Composition des matériaux composites à matrice chargée (Charge naturelle).....	67
Tableau 4.11 : le nombre d'éprouvettes réalisées ainsi que les composants des spécimens et leurs destinations	70
Tableau 4.12 : Résultats des essais de traction	76
Tableaux 4.13: résultats des essais de flexion.....	96
Tableau 4.14.Résultats des essais de poinçonnement	105
Tableau 4.15: Modes de rupture des éprouvettes	116
Tableau 4.16 : Résultats des essais aux chocs	119

RESUME

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

L'objectif principal de ce travail consiste à mettre en évidence, à travers une investigation expérimentale très riche, l'influence du renforcement du béton par des composites, de nature variée, sur la résistance et la ductilité des spécimens considérés.

En outre, les résultats obtenus à partir de cette étude expérimentale, confirment que le gain en termes de résistance est fonction de plusieurs paramètres, tels que : la nature des charges, la fraction massique, le type de renfort, la résistance du béton témoin,

Mots Clés : Béton, composites, renforcement, expérience, analyse.

ABSTRACT

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

The main aim of this work consists in highlighting, through a very rich experimental investigation, the influence of the reinforcement of the concrete by composites with varied nature, on the resistance and the ductility of the specimens subjected to the different mechanical test.

More over, the obtained results starting from this experimental study, confirm that the profit in terms of resistance is function of several parameters, such as: the nature of the loads, ration of the fibres, the type of reinforcement, the resistance of the pilot concrete,

Keys words : Concrete, composites, reinforcement, experiment, analysis.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

Dans le monde entier, la plupart des ouvrages sont aujourd'hui réalisés en béton armé ou précontraint : ponts et ouvrages d'art, barrages, enceintes de centrales nucléaires, ouvrages sensibles de défense,.... vu d'une part, les résistances mécaniques développées par ces matériaux et leur cout de revient d'autre part.

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

L'objectif de cette étude est d'appréhender expérimentalement le comportement des éléments en béton ordinaire renforcés par collage des plaques en matériaux composites.

La présente étude est structurée en quatre chapitres ;

- ✓ Le premier chapitre consiste à présenter une synthèse bibliographique sur l'état des connaissances sur le comportement du béton sous diverses sollicitations telles que la compression, la traction, la flexion, le poinçonnement des dalles et en fin le choc.

- ✓ Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des matériaux composites et les différents constituants des composites ainsi que les procédés de fabrication de ces matériaux suivi des essais mécaniques pour déterminer les caractéristiques des composites expérimentalement.

- ✓ Le troisième chapitre décrit les différentes techniques de renforcement des structures en génie civil par collage des matériaux composites suivis d'autres techniques de renforcement.

- ✓ Le quatrième chapitre, qui constitue l'objectif de cette étude, porte sur une investigation expérimentale très riche, où nous avons développé toutes les étapes suivies pour l'élaboration des corps d'éprouves en première partie, en second partie nous avons présenté les essais mécaniques réalisés au laboratoire et les différents résultats obtenus. Enfin, une interprétation et une analyse est insérée.

Une conclusion générale termine cette étude.

CHAPITRE I

COMPORTEMENT DU BÉTON

1. INTRODUCTION

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

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



Figure :1.1 La première réalisation en béton armé Barque de Joseph Louis Lambot 1849.



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

Un nouvel essor est apporté par l'invention, vers 1930, du béton précontraint par Eugène Freyssinet. Un pas conceptuel important est alors franchi, qui constitue une véritable révolution dans l'art de construire, tant par la mise en pratique de la notion de précontrainte que par l'approfondissement de la compréhension du comportement mécanique et rhéologique du béton. L'utilisation de la précontrainte autorise, en effet, la maîtrise de la distribution des contraintes dans la matière. Elle permet, en particulier, de tirer profit de la grande résistance à la compression du béton tout en évitant les inconvénients dus à sa faible résistance à la traction.

La reconstruction qui suit la Seconde Guerre mondiale voit la généralisation de l'emploi du béton précontraint pour la réalisation des ouvrages d'art français. Yves Guyon et Pierre Lebellet précisent alors les principes de calcul des structures précontraintes et mettent à la disposition des ingénieurs les méthodes nécessaires à leur conception. La Société Technique pour l'Utilisation de la Précontrainte (STUP) met en œuvre les idées novatrices et les brevets d'Eugène Freyssinet et donne une forte impulsion au développement de l'emploi du béton précontraint dans le monde.

Les recherches menées depuis 1970 sur le béton, et particulièrement sur ses constituants actifs, conduisent à un nouveau bond qualitatif et quantitatif de ses propriétés. Aux États-Unis et au Japon, on fabrique et on met en œuvre, dans les années 1980, des bétons à hautes performances dont la résistance à la compression atteint 100 MégaPascals (MPa) (environ 1000 kg/cm²), et même 140 MPa (1400 kg/cm²) dans un immeuble à Seattle aux États-Unis. En laboratoire, on obtient, d'ores et déjà, des résistances supérieures à 600 MPa (6000 kg/cm²). [1]

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

1.1 Les constituants du béton

➤ Ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine s'hydratant en présence d'eau. Il forme une pâte faisant prise qui durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide

➤ Eau

De façon générale, l'eau de gâchage doit avoir les propriétés de l'eau potable. Il est exclu d'employer de l'eau de mer, qui contient environ 30 g/l de chlorure de sodium, pour la fabrication de bétons armés ou précontraints. L'eau donne au béton sa maniabilité d'une part par son action lubrifiante sur les différents grains, d'autre part par la cohésion due à la pâte provoquée par l'association des grains fins avec elle. L'eau permet aussi l'hydratation du ciment et donc le durcissement du béton. Toute variation de la quantité d'eau entraîne des modifications de la vitesse de durcissement et des performances mécaniques.

Le dosage en eau ne peut pas être augmenté au delà d'une certaine valeur afin d'améliorer l'ouvrabilité sans entraîner des inconvénients. Les conséquences d'un excès d'eau sont :

- Risque de ressuage.
- augmentation de la porosité.
- risque de ségrégation des constituants du béton.
- diminution de la compacité et corrélativement des résistances.
- augmentation du retrait.

➤ **Granulats**

Les granulats (sables, gravillons) constituent le squelette du béton. Ils doivent être chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air. Les formations géologiques à partir desquelles il est possible de produire des granulats à béton peuvent être d'origine détritique (essentiellement alluvionnaire), sédimentaire, métamorphique ou éruptive. Selon leur origine, on distingue les granulats roulés, extraits de ballastières (ou sablières) naturelles ou dragués en rivière ou en mer, et concassés, obtenus à partir de roches exploitées en carrière.

On utilise en général, pour les ouvrages courants, des granulats constitués uniquement par du sable et des gravillons.

On emploie également des granulats légers qui sont le plus souvent artificiels et fabriqués à partir de matières minérales, comme les argiles, les schistes (argiles expansées) et les silicates (vermiculite et perlite). Les premiers permettent la fabrication de bétons de structure légers, dont la résistance peut atteindre de 40 à 50 MPa. Les seconds servent à la fabrication de parois en béton très léger, à fort pouvoir d'isolation thermique. Le poids volumique apparent de ces granulats varie d'environ 0.6 à 8 kN/m³. Malgré leur intérêt technique, leur coût énergétique de fabrication en réduit l'emploi à des applications particulières. Les granulats lourds sont soit des riblons ou de la grenaille de fer, soit des minéraux naturels comme la magnétite, la limonite ou la barytine. Ils sont utilisés dans les bétons destinés à assurer une protection contre les rayonnements atomiques. Leur poids volumique apparent varie de 30 à 50 kN/m³.

➤ **Les additions minérales**

Les additions sont des particules de faibles dimensions qui, ajoutées en quantités de l'ordre de 10% du poids de ciment, améliorent notablement les performances et la durabilité du béton grâce à leurs propriétés physico- chimiques (cendres volantes, laitier, fillers, ...). Les fumées

de silice, ou microsílices, sont les plus utilisées, ce sont des oxydes de silicium à structure amorphe en forme de microsphères de diamètre de l'ordre de 10 μm . [1]

➤ **Les adjuvants**

Les adjuvants sont des produits chimiques incorporés au béton frais en faibles quantités (en général moins de 3% du poids de ciment, donc moins de 0.4% du poids du béton) afin d'améliorer certaines propriétés. Leur efficacité est liée à l'homogénéité de leur répartition dans la masse du béton. Les principaux adjuvants sont :

▪ **Les plastifiants et superplastifiants**

Ils jouent un double rôle. Ils permettent, d'une part, d'obtenir des bétons frais à consistance parfaitement liquide, donc très maniables, par défloculation des grains de ciment. A maniabilité donnée, ils offrent, d'autre part, la possibilité de réduire la quantité d'eau nécessaire à la fabrication et à la mise en place du béton. La résistance du béton durci peut ainsi être notablement augmentée. La durée d'action de ces adjuvants est de 1 à 3 heures. [2]

▪ **Les retardateurs de prise de ciment**

Ils prolongent la durée de vie du béton frais. Ils trouvent leur utilisation dans le transport du béton sur de grandes distances ou la mise en place par pompage, en particulier par temps chaud. Ils sont aussi employés pour éviter toute discontinuité lors de reprises de bétonnage.

▪ **Les accélérateurs de prise**

Adjuvants dont la fonction principale est de diminuer les temps de début et de fin de prise du ciment dans le béton, mortier ou coulis. Un effet secondaire peut être de modifier le développement des résistances du béton, mortier ou coulis. [3]

▪ **Les accélérateurs de durcissement**

Adjuvants dont la fonction principale est d'accélérer le développement des résistances initiales du béton, mortier ou coulis. Un effet secondaire peut être de modifier la durée de prise. [3]

▪ **Les entraîneurs d'air**

Ils confèrent au béton durci la capacité de résister aux effets de gels et de dégels successifs en favorisant la formation de microbulles d'air réparties de façon homogène. Le volume d'air occlus doit être de l'ordre de 6% de celui du béton durci.

- **Les Fluidifiants**

Adjuvants qui, introduits dans un béton, mortier ou coulis peu de temps avant sa mise en œuvre, ont pour fonction principale de provoquer, sans ségrégation, un accroissement important de l'ouvrabilité du mélange. [4]

Ces adjuvants sont employés pour faciliter la mise en œuvre des bétons dans les coffrages. Il y a lieu de faire attention aux surdosages car ils peuvent entraîner une ségrégation ou un retard de prise important. De plus, leur action est limitée dans le temps. Leur introduction dans le béton frais doit donc être déterminée en fonction des délais de transport et des cadences de bétonnage.

- **Hydrofuges de masse**

Adjuvants dont la fonction principale est de réduire la pénétration de l'eau à travers les bétons et mortiers durcis. [3]

1.2 Caractéristiques mécanique du béton

Le béton est caractérisé par une bonne résistance à la compression **fcj** et une résistance médiocre en traction **ftj**. Un module d'Young qui prend deux valeurs selon que l'on considère des déformations instantanées **Eij** ou des déformations à long terme, déformations différées, **Evj**.

1.2.1 Essai de compression

➤ Procédure de l'essai

Expérimentalement la résistance à la compression se mesure le plus souvent sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 16cm et de hauteur 32cm, ou de diamètre 11cm et d'une hauteur de 22cm. Elle est notée **fc28** et choisie en fonction des conditions de fabrication du béton, de la classe du ciment utilisé et de son dosage au m³.

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

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

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

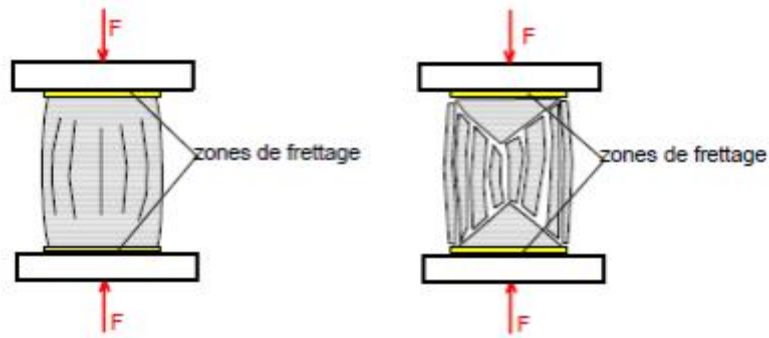


Figure 1.3 : cylindre soumis à la compression

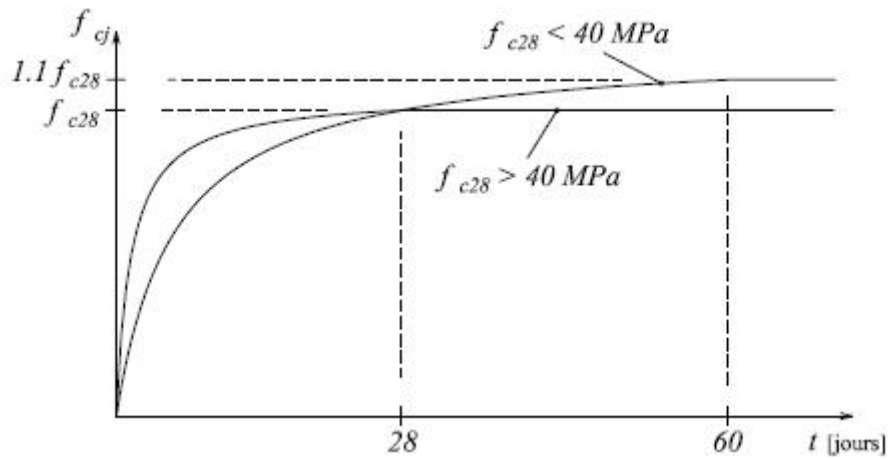


Figure 1.4 : Evolution de la résistance a la compression dans le temps

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

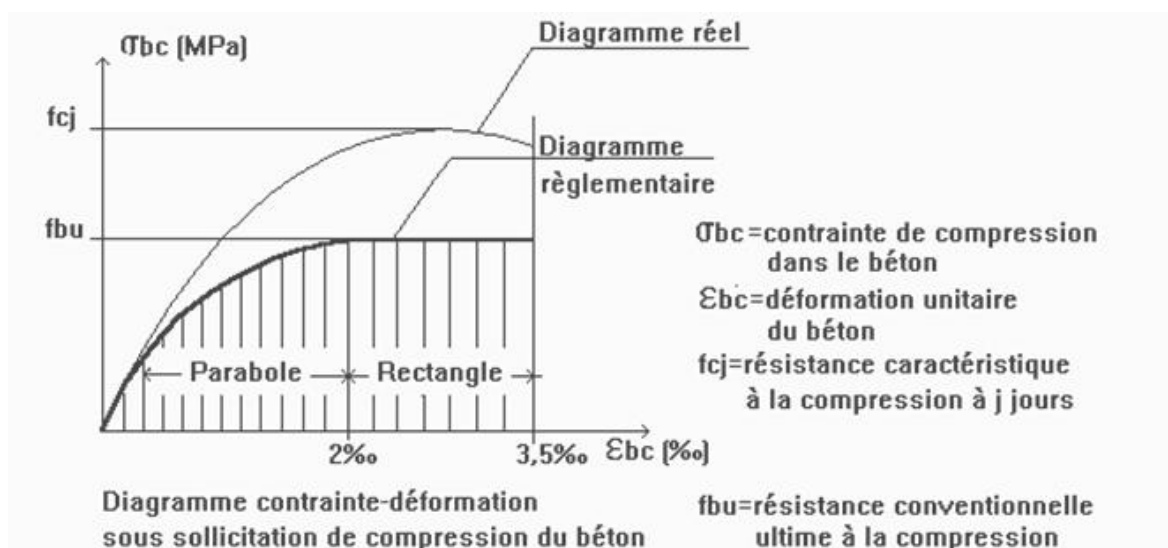


Figure 1.5 : diagramme des contrainte-déformation en compression

1.2.2 Essai de traction

➤ Procédure de l'essai

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

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

- pour $f_{cj} < 60 \text{ MPa}$ $f_{tj} = 0,6 + 0,06.f_{cj}$
- pour $f_{cj} \geq 60 \text{ MPa}$ $f_{tj} = 0,275 \times f_{cj}^{2/3}$

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

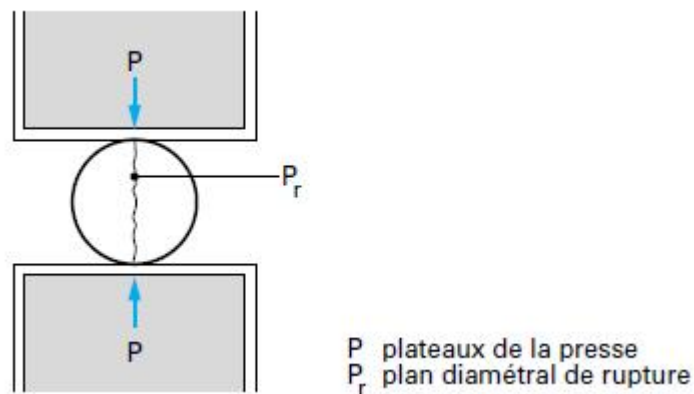


Figure 1.6 Essai de fendage sur éprouvette cylindrique

b) Traction par flexion NFP 18-407

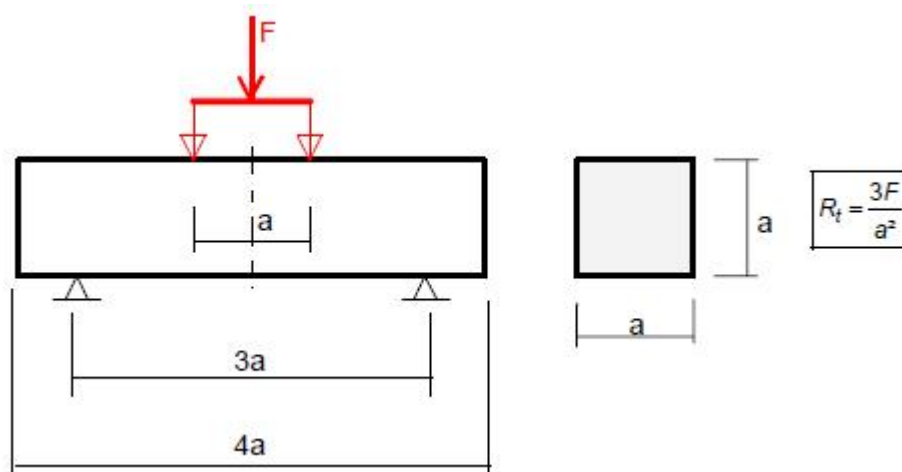


Figure 1.7 : Essai de traction sur une éprouvette

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

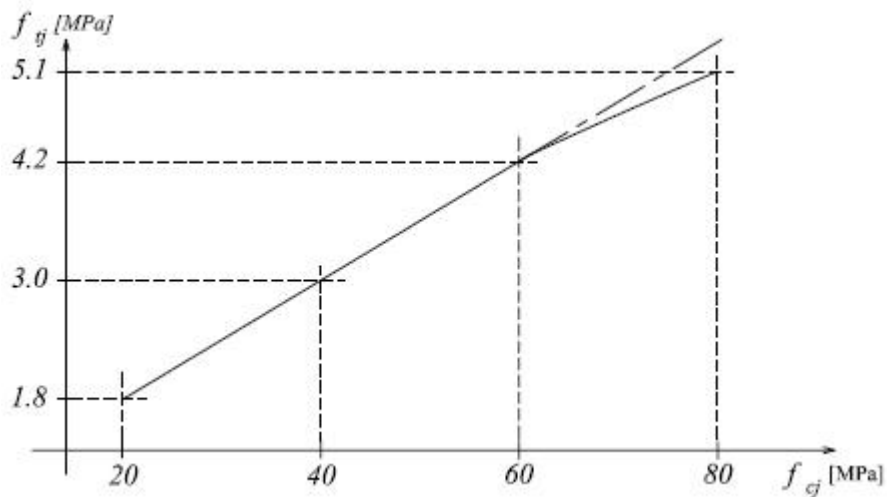


Figure 1.8 : Evolution de la résistance à la traction f_{tj} en fonction de celle à la compression f_{c_j}

1.2.3 Modules de déformation longitudinale

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

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

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

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

$$E_{vj} = 3700(f_{c_j})^{1/3} \dots\dots\dots \text{ si } f_{c_{28}} \leq 60\text{MPa (Art -2.1, 2)}$$

$$E_{vj} = 4400(f_{c_j})^{1/3} \dots\dots\dots \text{ si } f_{c_{28}} > 60\text{MPa, sans fumée de silice (AnnexeF)}$$

$$E_{vj} = 6100 f_{c_j} \dots\dots\dots \text{ si } f_{c_{28}} > 60\text{MPa, avec fumée de silice (Annexe F)}$$

1.2.4 Module d'élasticité transversale « G »

Le module d'élasticité transversale G caractérise la déformation du matériau sous l'effet de l'effort tranchant.

Il est donné par la relation suivante :

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

Avec :

E : Module de Young (module d'élasticité)

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

$\Delta d/d$: Déformation relative transversale

$\Delta l/l$: Déformation relative longitudinale

1.2.5 Coefficient de poisson :

Le coefficient de poisson sera pris égale à $\nu = 0$ pour un calcul de sollicitations à L' E.L.U et $\nu = 0,2$ pour un calcul de déformations à L'E.L.S (Art – 2.1,3).

1.2.6 Modèle de calcul à l'E.L.U

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

Alors on à

* $\epsilon_{bc1} = 2\text{‰}$

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

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

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

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

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

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

γ_b : Coefficient de sécurité partiel

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

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

-La valeur de la contrainte admissible de compression du béton est :

$$\sigma_{bc} = 0,6 f_{cj} = 0,6 f_{c28} .$$

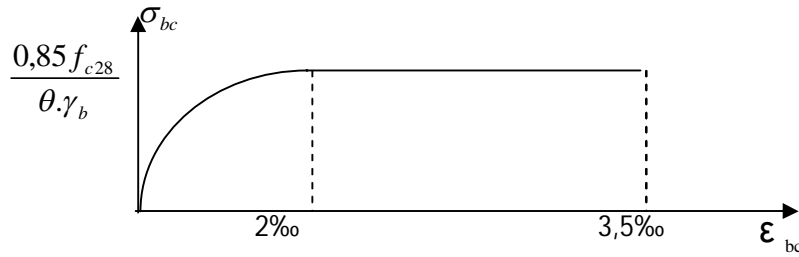


Figure 1.9 : Diagramme contrainte déformation

1.2.7 Modèle de calcul à l'E.L.S

Contrainte de compression du béton limite de service (BAEL91/Art4.5, 2)

$$\bar{\sigma}_{bc} = 0,6 \times f_{c28}$$

Contrainte limite ultime de cisaillement : (BAEL91/Art5.1, 1)

La contrainte tangentielle du béton pour une section rectangulaire est définie par :

$$\tau_u = \frac{V_u}{b \times d}$$

V_u : Valeur de l'effort tranchant dans la section étudiée (calculée à ELU)

b : Valeur de la longueur de la section cisailée

d : Valeur de la hauteur utile ($d = h - c$).

➤ Fissuration peu préjudiciable :
$$\bar{\tau}_u \leq \min \left(\frac{0,2 \times f_{c28}}{\gamma_b} ; 5 \text{ MPa} \right)$$

➤ Fissuration préjudiciable :
$$\bar{\tau}_u \leq \min \left(\frac{0,15 \times f_{c28}}{\gamma_b} ; 4 \text{ MPa} \right)$$

➤ Fissuration très préjudiciable :
$$\bar{\tau}_u \leq \min \left(\frac{0,15 \times f_{c28}}{\gamma_b} ; 4 \text{ MPa} \right)$$

1.2.8 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 pour permettre l'évaluation de la capacité portante de structures existantes.

1.2.8.1 Rupture par poinçonnement

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

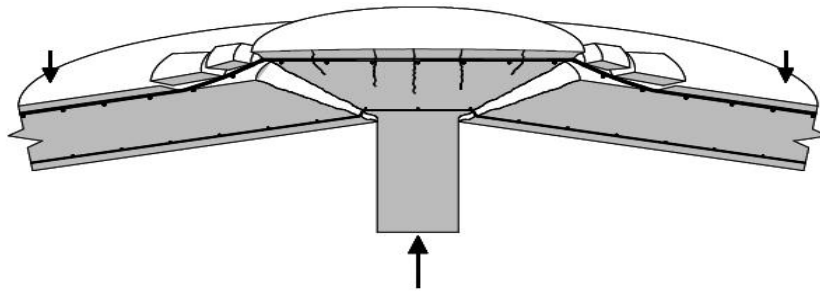


Figure 1.10 : rupture par poinçonnement d'une dalle en béton

Bien que les contraintes dues au poinçonnement puissent être réduites en augmentant l'épaisseur des dalles, en prévoyant des poutres de renfort ou en munissant les têtes de poteaux de chapiteaux, il est souvent plus avantageux de construire des dalles minces. Une hauteur sous plafond constante permettra de réduire la hauteur du bâtiment et ainsi de gagner du temps et d'économiser les matériaux. [5]

1.2.8.2 Comportement mécanique des dalles

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

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

- les dalles portant dans une direction (dalles sur deux appuis). Ces dalles ont un comportement unidirectionnel et se comportent essentiellement comme des poutres, et se dimensionnent selon les mêmes principes,
- les dalles portant dans deux directions (dalles sur quatre appuis). Ces dalles ont un comportement bidirectionnel et transmettent la charge à laquelle elles sont soumises dans les deux directions du plan en direction des appuis,

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

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

Le comportement flexionnel des dalles comprend plusieurs phases qu'il est important de distinguer. [6]

- **Phase élastique linéaire**

Dans cette première phase de chargement (stade I figure I.13), la dalle se comporte pratiquement comme une structure douée d'un comportement élastique linéaire.

- **Phase de fissuration**

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

- **Phase d'écoulement**

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

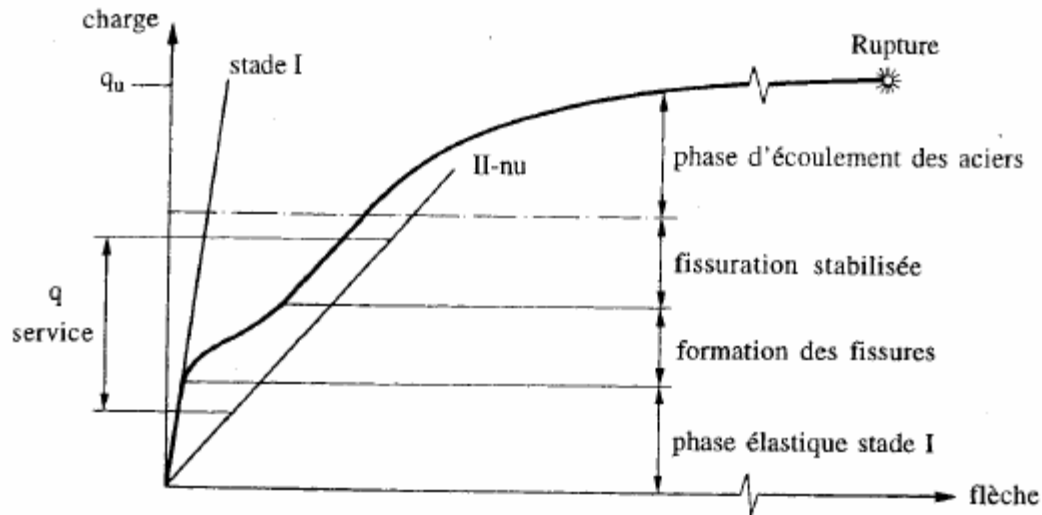


Figure 1.11 : Phases successives du comportement d'une dalle en flexion

- **Phase de rupture**

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

Dans le domaine élastique, l'équation différentielle de Lagrange donne la relation entre la déformée $w(x,y)$ et la charge appliquée $q(x,y)$. Selon les conditions d'appuis, on trouve différentes solutions, le plus souvent sous forme de séries de Fourier (solution de Navier pour les dalles articulées sur leurs quatre côtés, solution de Maurice Lévy pour les dalles articulées sur deux côtés opposés). Dans le domaine post-élastique, la méthode cinématique est applicable aux dalles en partant d'un mécanisme admis a priori, c'est la théorie des lignes de rupture développées initialement par Johansen.

1.2.8.3 Approche mécanique du comportement des dalles non fissurées

Approche par la théorie des plaques

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

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

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

B : représente la rigidité flexionnelle de la dalle

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

ν = coefficient de poisson,

h = épaisseur de la dalle.

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

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

Les coefficients $A_{m,n}$ sont donnés par la formule :

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

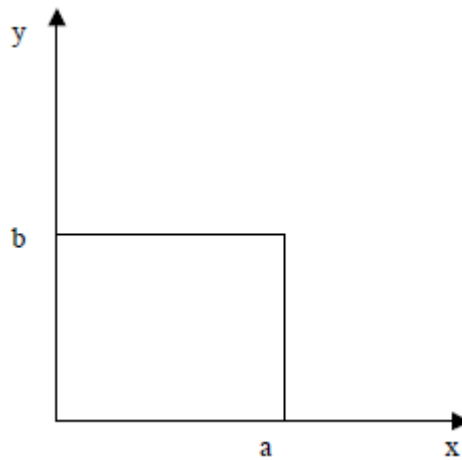


Figure 1.12 : Dalle rectangulaire articulée sur quatre côtés

La déformée devient :

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

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

$$M_1 = \frac{1}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{m,n} \frac{\frac{m^2}{a^2} + \nu \frac{n^2}{b^2}}{\left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right)^{3/2}} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{m\pi y}{b}$$

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

Ces séries convergent très rapidement. En effet, il suffit de ne considérer que le premier terme pour obtenir la déformée w , et les trois premiers termes pour obtenir les moments à 2 ou 3% près. La figure suivante montre la distribution des moments au milieu d'une dalle de côtés a et b pour diverses valeurs du rapport a/b [Favre R. *et al.* 1997].

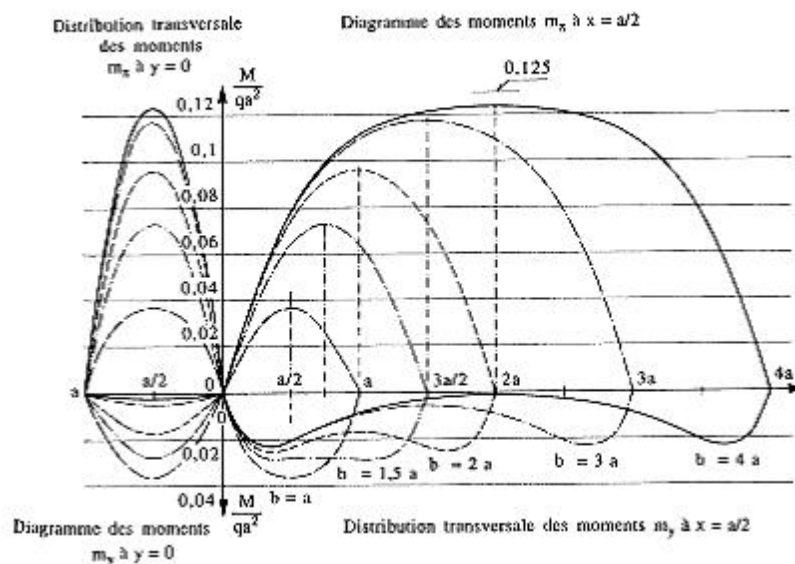


Figure 1.13 : Distribution des moments dans une dalle rectangulaire pour différentes valeurs du rapport des côtés a/b et pour $\nu=0$

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

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

Pigeaud permettent, pour un rapport donné des côtés de la dalle et un rapport donné des dimensions de la zone rectangulaire chargée qui a le même centre que la dalle, de calculer le moment à mi-travée dans chacune des deux directions [Thonier H. 1998].[6].

1.2.9 Résistance au choc [7]

La notion de "choc" est relativement floue. Dans le langage courant, elle désignera l'impact d'un solide en mouvement, plus ou moins déformable, sur une structure : véhicule sur une pile de pont, navire ou iceberg sur une plate-forme pétrolière, avion sur une enceinte de centrale nucléaire, etc. Dans la plupart de ces cas, le solide impacteur est d'une taille comparable à celle de la structure et possède une vitesse élevée, lorsqu'il est arrêté brutalement par la structure, le produit de sa masse par la décélération est grand, ce qui implique que des effets d'inertie importants sont mis en jeu également au niveau de la structure.

Des solides de dimension plus réduite peuvent aussi venir frapper les structures en béton ; c'est le cas lors de la chute d'outils sur un ouvrage en construction, mais aussi lors de la pénétration/perforation de balles, missiles, etc. la vitesse d'impact apparaît comme un paramètre primordial pour distinguer le "simple" choc (qui mettra en jeu une réponse généralement globale de la structure) des phénomènes plus complexes de pénétration et perforation locales du matériau.

On assimile souvent les effets d'une explosion à ceux d'un choc, ne serait-ce que parce que fréquemment une onde de choc vient frapper la structure et causer une variation brutale du chargement appliqué. Bien qu'il n'y ait pas d'impact de solide, la structure est chargée rapidement ou mise brutalement en mouvement.

1.2.10 Essai d'impact [8]

L'histoire des essais d'impact sur des plaques en béton armé est présentée succinctement en introduction dans [Sugano *et al.* 1993-a]. Les premiers essais ont été effectués dès la première moitié du XXe siècle avec des projectiles 'rigides' et 'durs', relativement légers et à haute vitesse. En effet seuls les projectiles militaires (balles, obus, missiles,...) étaient concernés. Les premières formules de perforation empiriques (formule de Petry, formule NDRC... [Li *et al.* 2005]) en ont été déduites [Kennedy 1976].

A partir des années 1970, ce ne sont plus seulement les militaires, mais l'industrie nucléaire qui s'est intéressée à la perforation. Il s'agissait de connaître le comportement des enceintes de confinement soumises à l'impact de projectiles éjectés par la turbine ou l'alternateur [Woodfin et Sliter 1981, Romander et Sliter 1984], et surtout à l'impact d'avion. Des essais

ont alors été entrepris avec des projectiles plus lourds et des vitesses plus lentes ; et d'autres formules ont été établies.

Pour les chocs traditionnellement qualifiés de 'durs' ou avec projectile 'rigide' (c'est-à-dire sans écrasement du projectile), une liste critique très complète des formules de perforation et d'écaillage est donnée par Li [Li *et al.* 2005]. A partir des références fournies par cet auteur, il est possible de retrouver tous les essais qui ont servis à établir ces formules.

1.2.10.1 Impact Sur Dalle *essais EDF-CEMETE*

Dans ce test ils ont examiné non plus la réponse d'une poutre, mais celle d'une dalle : il s'agit d'un essai d'impact sur une dalle plane en béton armé effectué au laboratoire CEMETE d'EDF en 1979 [Dulac et Giraud 1981, Dulac 1982].

1.2.10.2 Définition de l'essai

Il s'agit de tests effectués au CEMETE : une dalle en béton armé simplement appuyée sur ses quatre côtés, subit un chargement dynamique obtenu en écrasant un tube en son centre. Ce chargement est suffisamment important pour solliciter fortement la dalle dans le domaine plastique.

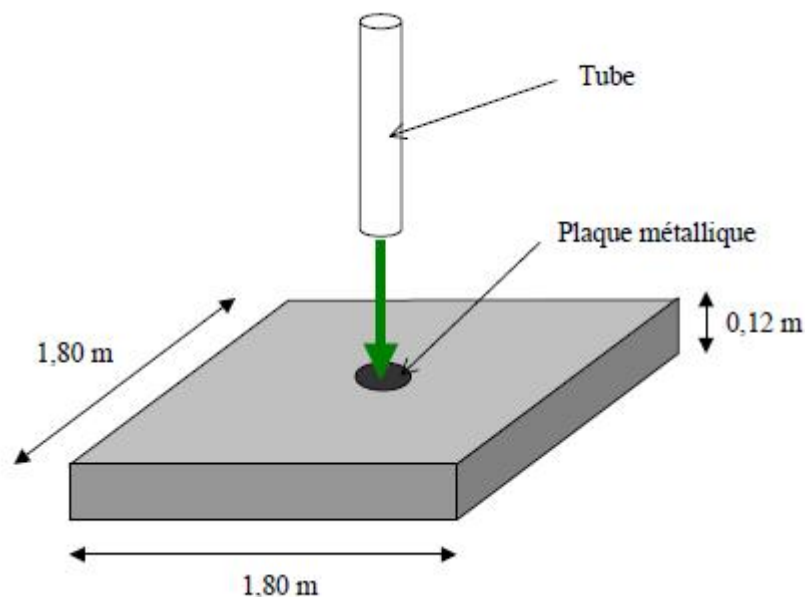


Figure 1.14 : Géométrie de la dalle

Les caractéristiques des différents matériaux utilisés pour couler la dalle sont récapitulées ci-dessous :

Béton :

- Module de Young : $E_b = 37400$ MPa
- Contrainte limite en traction : $f_t = 4,2$ MPa

- Contrainte limite en compression : $f_c = 52,2 \text{ MPa}$
- Coefficient de Poisson : 0,22
- Masse volumique : $\rho_b = 2400 \text{ kg/m}^3$

Acier :

- Module de Young : $E_a = 210000 \text{ MPa}$
- Contrainte limite élastique en traction : $\sigma_Y = 510 \text{ MPa}$ ($\epsilon_Y = 2. \cdot 10^{-3}$)
- Coefficient de Poisson : 0,3
- Module plastique $E_{ap} = 473 \text{ MPa}$
- Masse volumique : $\rho_a = 7800 \text{ kg/m}^3$.

Le tube s'écrase sur une plaque de métal de 30 cm de diamètre qui, posée sur la face supérieure de la dalle, transmet les efforts à la structure .La force d'impact, mesurée à l'aide de capteurs installés sur la plaque métallique, est approchée selon la courbe de la figure suivante avec un plateau à 215 kN pendant 27 ms.

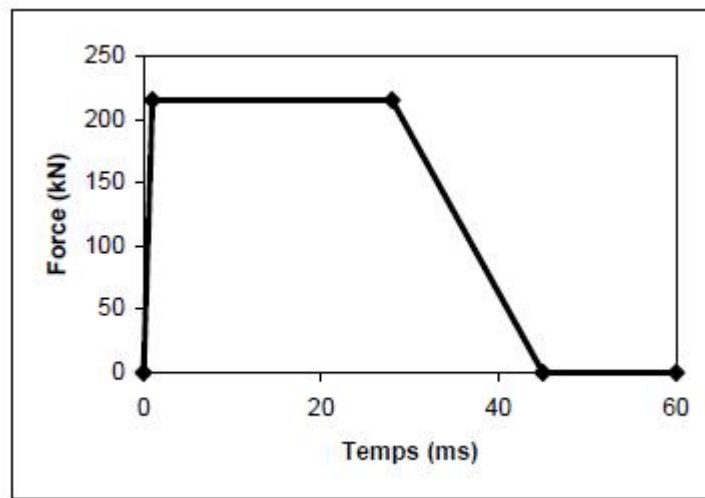


Figure 1.15 : Force d'impact

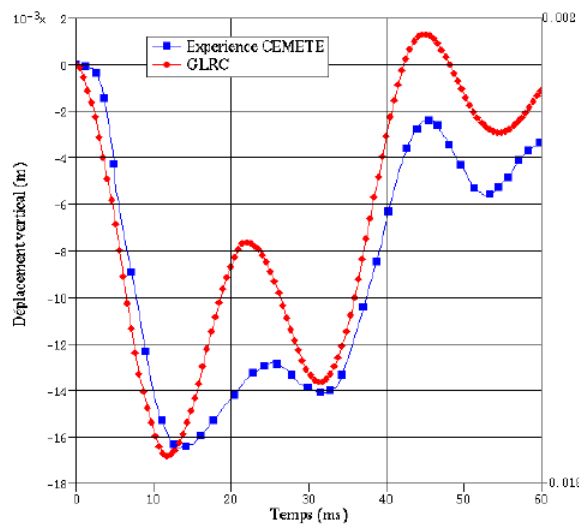


Figure 1.16. : Déplacement vertical au centre de la dalle

CHAPITRE II

MATERIAUX COMPOSITES

Introduction

Un des objectifs de ce premier chapitre est d'apporter une connaissance des matériaux composites par une description de leurs constitutions, de leurs propriétés et de leurs structures. Etant donné l'importante diversité de ces matériaux, il serait aussi hors de propos de se livrer à un exposé complet de tout type de composites.

La première partie de ce chapitre est consacré à la présentation des différents constituants des matériaux composites. Dans la deuxième partie, on va présenter le procédé de fabrication de ce type de matériaux.

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

2.1 Définition d'un matériau composite

Un matériau composite peut être défini d'une manière générale comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux. On appelle de façon courante « matériaux composites » des arrangements de fibres qui sont noyées dans une matrice. La matrice assure la cohésion et l'orientation des fibres, elle permet également de transmettre les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces [10].

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

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

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

bonne tenue mécanique comparable aux matériaux homogènes comme l'acier et à leur faible masse volumique [11].

2.2 Constituants des matériaux composites

Les matériaux composites sont constitués principalement :

- D'une matrice à laquelle sont ajoutés, dans certains composites des charges,
- D'un renfort.

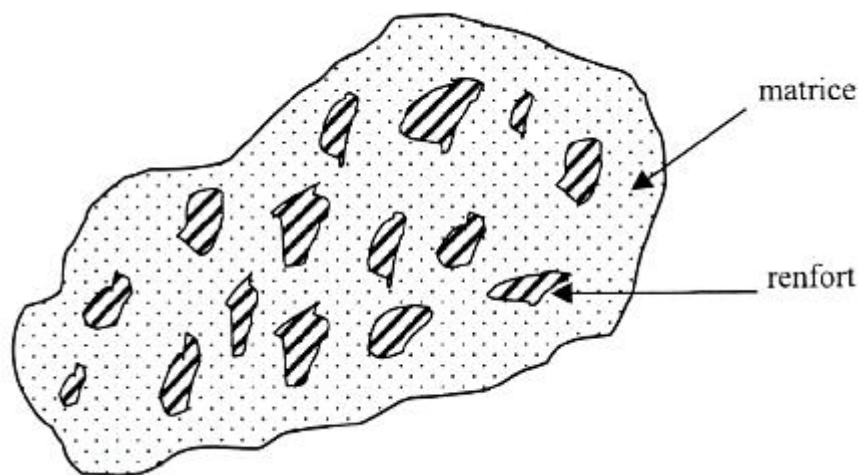


Figure.2.1 : Matériaux composites [12]

2.2.1 La matrice

La matrice permet de lier les fibres du renfort fibreux entre elles, ainsi que de répartir les efforts (résistance à la compression ou à la flexion). La matrice est facilement déformable et assure la protection chimique des fibres. Généralement, c'est un polymère ou une résine organique.

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

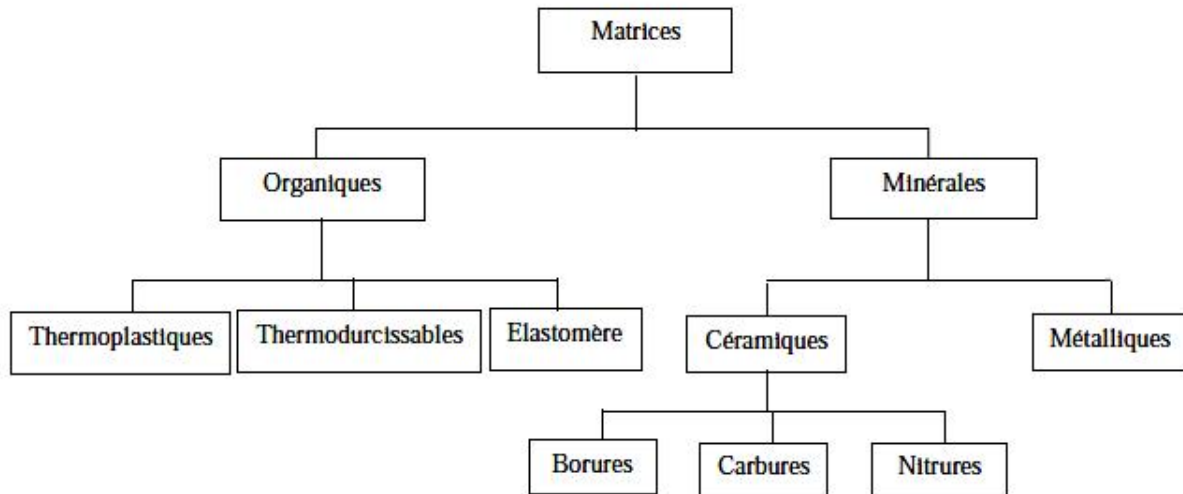


Figure.2.2: Différentes familles de matrices [13]

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

2.2.1.1 Les résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables sont des polymères, qui, après un traitement thermique ou physico-chimique (catalyseur, durcisseur), se transforment en des produits essentiellement infusibles et insolubles. Ces résines ont donc la particularité de ne pouvoir être mises en forme qu'une seule fois [13].

2.2.1.2 Les résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques sont des solides généralement solubles, formés de chaînes distinctes bien compactées, liées entre elles par des seules liaisons secondaires (force de van der Waals, liaisons d'hydrogène) et mis en forme par chauffage et refroidissement [14].

2.2.1.3 Les matrices naturelles

Ce sont des matériaux synthétisés par les êtres vivants, animaux et micro-organismes. La famille la plus importante est celle des polysaccharides comme l'amidon, la cellulose la lignine [15].

2.2.1.4 Résines époxydes

Le terme époxyde désigne une grande variété de pré-polymères comportant un ou plusieurs motifs époxydiques dont les principales applications concernent les matériaux composites (matrice époxyde avec des renforts en fibre de verre ou de carbone) [16].

2.2.1.5 Phénoplastes ou phénols-formols

Les phénoplastes sont des matières thermodurcissables obtenues par polycondensation d'un phénol et d'un aldéhyde avec élimination d'eau et formation d'un réseau tridimensionnel [17].

2.2.1.6 Les résines thermostables

Elles se distinguent essentiellement des autres résines par leurs performances thermiques. Les résines thermostables sont développées surtout dans les domaines de l'aviation et de l'espace [18].

2.2.2 Les renforts

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme filamentaire, allant de la particule de forme allongée à la fibre continue qui donne au matériau un effet de résistance orientée [19].

Les différents types de renforts sont cités dans l'organigramme ci-dessous.

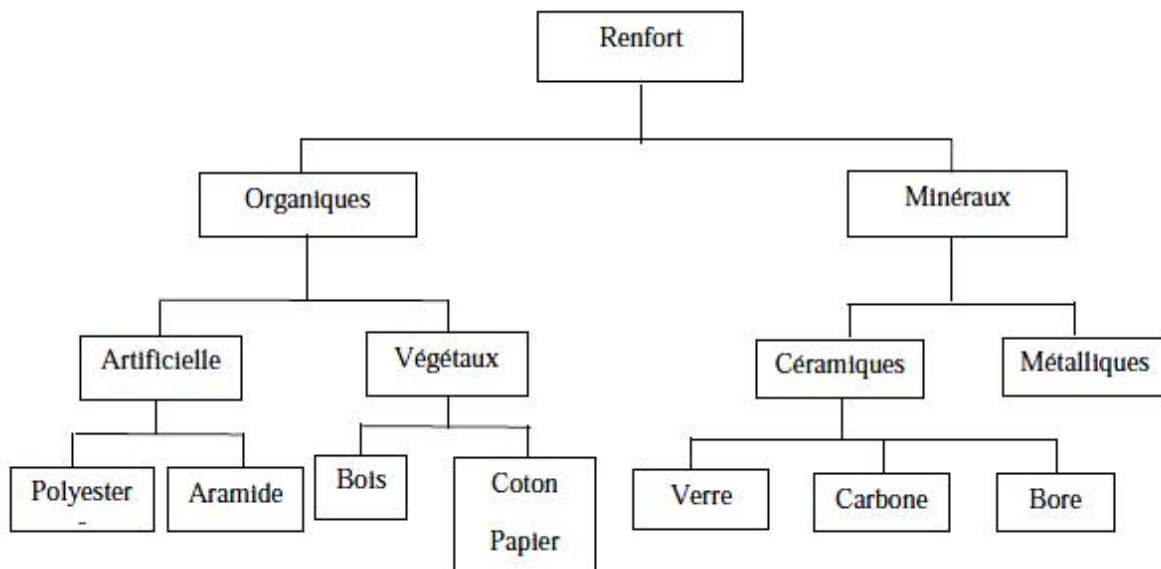


Figure2.3: Les différents types de renfort de base [13]

2.2.2.1 Les fibres

Les fibres utilisées se présentent soit sous forme continues (fibres longues), soit sous forme discontinues (fibres courtes) [20].

- **Les fibres de verre**

Le terme fibres de verre désigne à la fois les fibres utilisées comme isolant thermique et celles utilisées comme renforts associées à des matrices organiques pour donner des composites. La principale application des fibres de verre textile est le renforcement des plastiques. Cependant leur champ d'applications s'est élargi à d'autres matrices (ciment, plâtre, bitume...) et à d'autres utilisations [21].

- **Les fibres de carbone**

La fibre de carbone est obtenue à partir de la pyrolyse d'une fibre organique appelée précurseur. Les fibres de carbone se différencient par le taux de carbone plus ou moins élevé. Ces fibres sont utilisées en tant que carbone pour les propriétés de cet élément et en tant que fibre flexible et qui convient à toutes les formes de produits finis [22].

- **Fibre d'aramide**

La fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes :

- Les fibres bas module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles ;
- Les fibres haut module : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances.

- **Fibre de bore**

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

- **Fibre de silice**

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

2.2.2.2 Architecture des fibres

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

Il existe différentes géométries et textures de renforts :

Les unidirectionnels (1D), Toile ou taffetas, Serge, et Satin

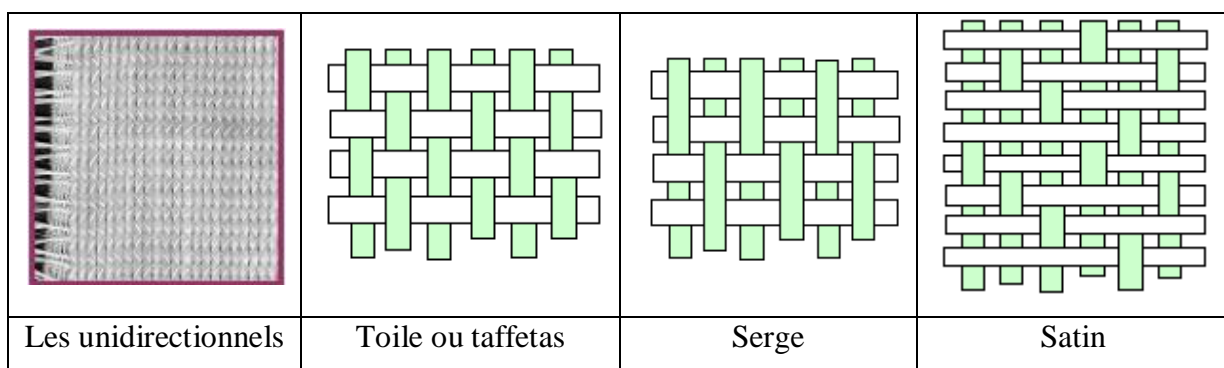


Figure 2.4 : Géométries des renforts [10]

2.2.2.3 Les charges

On désigne sous le nom général de charge toute substance inerte, minérale ou végétale qui, ajoutée à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques.

➤ Les charges organiques

- Charges cellulosiques, utilisées en tant que charges des résines thermodurcissables (phénoplastes et aminoplastes).
- Les avantages de ces matières cellulosiques sont leur coût peu élevé et leur faible densité.
- Farines de bois
- Farines d'écorces de fruit et de noyaux
- Fibres végétales
- Pâtes de cellulose
- Amidons

➤ Les charges minérales

- La silice(SiO_2), à l'état pur ou combinée avec des oxydes métalliques, est utilisée comme charge sous différentes formes, suivant son origine, sa cristallinité, sa dureté et la taille des particules.
- Les talcs sont utilisés pour améliorer l'isolation thermique et la résistance à l'eau, et faciliter l'opération de moulage.

➤ Oxydes et hydrates métalliques

- L'alumine, les oxydes de zinc, de magnésium, de titane et d'antimoine sont utilisés sous forme de poudres fines comme charges du polypropylène, des compositions polyvinyliques, des résines époxydes, des polyesters insaturés.

➤ Le verre

- Une nouvelle variété de poudre de verre de granulométrie 13 μm est apparue sur le marché et son incorporation confère aux thermodurcissables de meilleures résistances à l'abrasion et à la compression ; elle permet par ailleurs d'obtenir un retrait plus faible et plus homogène des pièces moulées.
- Les billes de verre creuses, de densité comprise entre 0,1 et 0,5, sont obtenues par chauffage de billes de verre contenant un agent gonflant.

➤ Le carbone

Le noir de carbone est utilisé depuis très longtemps dans l'industrie des plastiques, à la fois comme colorant. Le noir de carbone améliore la résistance à la chaleur du polyéthylène réticulé par irradiation. La conductivité thermique augmente avec le taux de charges, indépendamment de la taille des particules [10].

2.3 Structure du composite

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types :

- ✓ Les monocouches
- ✓ Les stratifiées
- ✓ Les sandwiches

2.3.1 Les monocouches

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles 1D, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes.

2.3.2 Les stratifiées

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié. Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques [23].

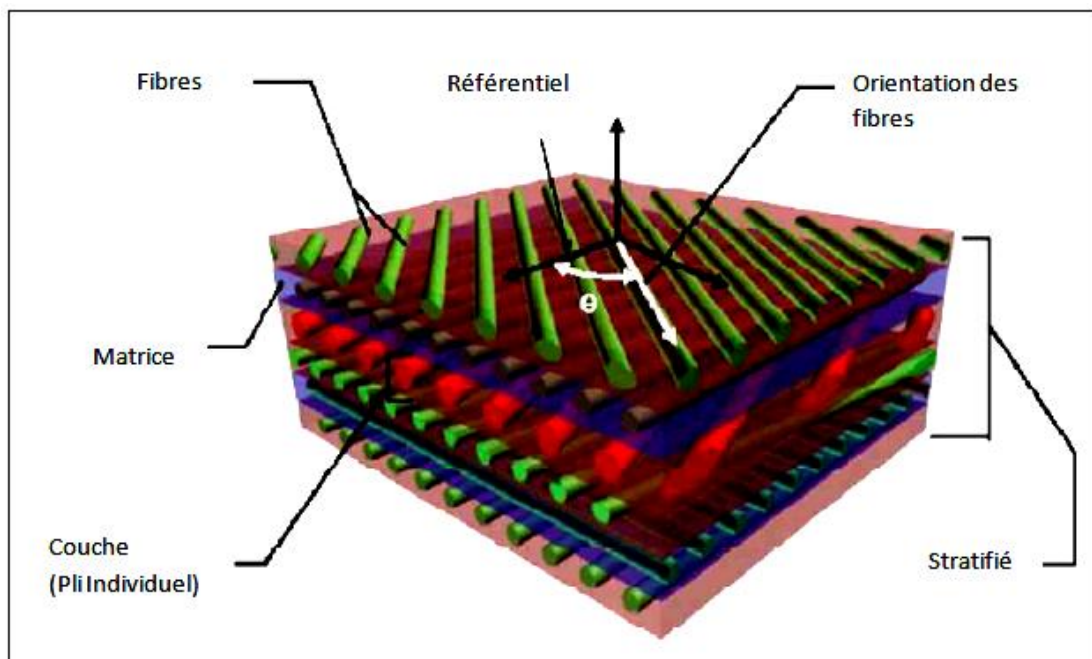


Figure.2.5 : composite stratifié [24]

2.3.3 Les sandwichs

Les matériaux composites de types sandwichs sont principalement constitués de deux composants nommés : peau et noyau.

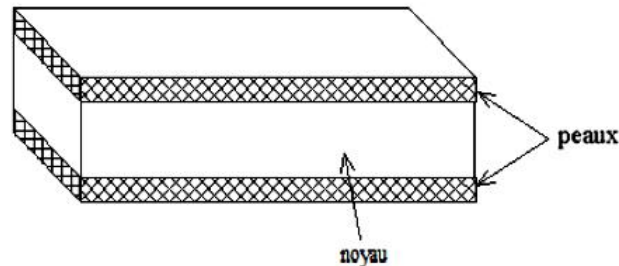


Figure.2.6 : Composite sandwichs [25]

Les propriétés de ce type de matériaux dépendent de celles du noyau et des peaux, de leurs épaisseurs et des caractéristiques de liaison entre elles.

- **Le noyau**

Il existe un grand nombre de matériaux qui peuvent être utilisés comme noyau. Ces matériaux sont divisés en trois classes :

- Matériaux solide à faible densité : balsa et d'autres types de bois.
- Matériaux à haute densité augmentés en forme cellulaire : nid d'abeilles.
- Matériaux à haute densité augmentés sous la forme ondulée : feuilles ondulées.

- **La peau**

Une large variété de matériaux est utilisée comme peau, par exemple : les feuilles de métaux comme l'aluminium, le titane, ... etc.

Le choix des matériaux utilisés comme peau est important du point de vue de l'environnement de travail, car la présente partie entre en contact direct avec ce dernier [25].

2.4 Procédé de fabrication des composites

Trois opérations sont indispensables :

- Imprégnation du renfort par le système résineux.
- Mise en forme à la géométrie de la pièce.
- Durcissement du système :
 - soit par polycondensation et réticulation pour les matrices thermodurcissables.
 - soit par simple refroidissement pour les matières thermoplastiques.

Les procédés les plus importants sont :

- 1) **Moulage au contact** : consiste à disposition successivement sur un moule :
 - Un agent de démoulage
 - Un gel coat
 - Une couche de résines thermodurcissable liquide.et à réaliser l'imprégnation du renfort par une opération manuelle à l'aide d'un rouleau [27].
- 2) **Moulage par projection simultanée** : est une évolution de procédé de moulage au contact et est particulièrement adaptée aux pièces de moyennes et grandes dimensions [27].
- 3) Injection thermodurcissable BMC (BulkMolding Compound ou pré-imprégné en vrac). Les renforts sont mis en place entre le moule et le contre moule. La résine est injectée. La pression de moulage est faible [26].
- 4) **Compression thermodurcissable** Il s'agit de moulage par compression et les moules sont très proches, par leur conception, de ceux utilisés lors de la mise en œuvre d'autres matières thermodurcissables [28].
- 5) **Pultrusion** : dans ce cas, les renforts passent dans un bain de résine catalysé où sont imprégnés. Ils traversent ensuite une filière chauffée dans laquelle ont lieu simultanément mise en forme du profilé et polymérisation de la résine. Ce procédé est applicable aux résines thermoplastiques et thermodurcissables [18].
- 6) **Enroulement filamentaire (ou bobinage)**: le renfort imprégné de résine catalysée est enroulé avec une légère tension, sur un mandrin cylindrique ou de révolution en rotation. Ce type de moulage est bien adapté aux surfaces cylindriques et sphériques, et permet une conception avancée des pièces [18].

Il existe d'autres procédés : drapage en autoclave, centrifugation, stratification en continu, thermoformage sous vide, estampage...

2.5 Avantages et inconvénients des composites

Les composites sont préférés à d'autres matériaux parce qu'ils offrent des atouts liés à :

- Leur légèreté ;
- Leur résistance à la corrosion et aussi à la fatigue ;
- Leur insensibilité aux produits comme les graisses, les liquides hydrauliques, les peintures et les solvants ;
- Leur possibilité de prendre plusieurs formes, d'intégrer des accessoires et permettre la réduction de bruit.

Cependant certains inconvénients freinent leur diffusion :

- les coûts des matières premières et des procédés de fabrication;
- la gestion des déchets engendrés et la réglementation de plus en plus stricte.

L'industrie des matériaux composites doit donc aujourd'hui relever certains défis tels que :

- La maîtrise des émanations de produits organiques volatiles, par exemple le styrène;
- La maîtrise des procédés de transformations et des performances des matériaux qui sous entend une très bonne connaissance des constituants mis en place;
- La mise en place de technologies et des filières pour la gestion des déchets en fin de

vie qui est la partie la plus difficile à satisfaire en raison du caractère thermostable de la plupart des composites.

De plus, dans ce dernier point, le recyclage est actuellement très limité parce que le broyage ou les autres procédés sont très coûteux et fournissent une matière de faible qualité. Ces quelques inconvénients et défis à relever, ont poussé les chercheurs et les pouvoirs publics à investir et orienter les recherches vers les ressources renouvelables et biodégradables [11].

2.6 Détermination expérimentale des caractéristiques mécaniques [18]

Le comportement élastique d'un matériau composite peut être décrit entièrement par la connaissance de :

- Neuf (9) coefficients dans le cas d'un matériau composite orthotrope.
- Cinq (5) coefficients dans le cas d'un matériau composite unidirectionnel.

Dans le cas particulier d'un état de contraintes planes, le nombre de coefficients nécessaires pour décrire le comportement d'un matériau composite (qu'il soit orthotrope ou unidirectionnel) se réduit à quatre (4). Ces quatre coefficients sont :

- Le module de Young longitudinal E_L
- Le module de Young transversal E_T
- Le coefficient de Poisson ν_{LT}
- le module de Coulomb G_{LT}

Les essais utilisés pour la détermination de ces quatre coefficients seront développés dans le paragraphe qui suit.

2.6.1 Les essais mécaniques

a. Essai de traction longitudinale

Dans cet essai, la force F est appliquée suivant la direction des fibres (Figure 2.7). Dans le sens des fibres dans le cas d'un matériau composite unidirectionnel. Dans le sens de la chaîne dans le cas d'un matériau composite tissu.

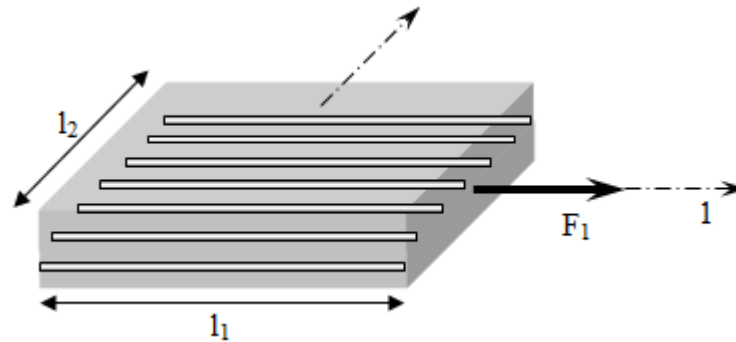


Figure 2.7. Traction Longitudinale

La contrainte σ_1 est donnée en fonction de la force F_1 appliquée suivant l'axe 1, perpendiculairement à la section transversale S_1 , comme suit :

$$\sigma_1 = \frac{F_1}{S_1}$$

L'étude expérimentale consiste, à mesurer sur l'éprouvette les paramètres suivants :

- * La charge appliquée F_1
- * L'allongement de l'éprouvette selon l'axe 1 (suivant la longueur l_1) Δl_1
- * la variation de la longueur transversale l_2 (suivant la longueur l_2) Δl_2

La déformation longitudinale ε_{11} est donnée par : $\varepsilon_1 = \frac{\Delta l_1}{l_1}$

La déformation transversale ε_{22} est donnée par : $\varepsilon_2 = \frac{\Delta l_2}{l_2}$

On déduit le module d'élasticité longitudinal E_L (Young) : $E_L = \frac{\sigma_{11}}{\varepsilon_{11}}$

Le coefficient de Poisson ν_{LT} : $\nu_{LT} = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}}$

b. Essai de traction transversale

Dans cet essai, la force F est appliquée suivant la direction transverse aux fibres (Figure 2.8). Perpendiculairement aux fibres dans le cas d'un matériau composite unidirectionnel. Dans le sens de la trame dans le cas d'un matériau composite tissu

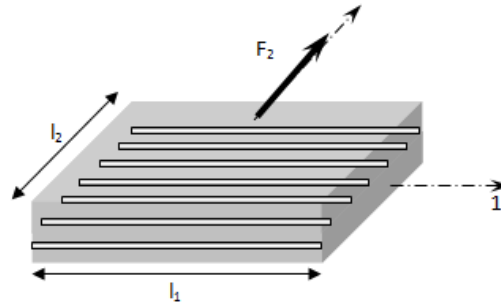


Figure.2.8 Traction transversale

La contrainte σ_2 est donnée en fonction de la force F_2 appliquée suivant l'axe 2, perpendiculairement à la section transversale S_2 , comme suit :

$$\sigma_2 = \frac{F_2}{S_2}$$

L'étude expérimentale consiste, à mesurer sur l'éprouvette les paramètres suivants :

- * La charge appliquée F_2
- * L'allongement de l'éprouvette selon l'axe 2 (suivant la longueur l_2) Δl_2
- * la variation de la longueur transversale l_1 (suivant la longueur l_1) Δl_1

La déformation transversale ε_{22} est donnée par : $\varepsilon_2 = \frac{\Delta l_2}{l_2}$

La déformation longitudinale ε_{11} est donnée par : $\varepsilon_1 = \frac{\Delta l_1}{l_1}$

On déduit : le module d'élasticité transversal E_T (Young) : $E_T = \frac{\sigma_{22}}{\varepsilon_{22}}$

Le coefficient de Poisson ν_{TL} : $\nu_{TL} = -\frac{\varepsilon_{11}}{\varepsilon_{22}}$

Les valeurs ainsi obtenues doivent vérifier la relation suivante : $\frac{\nu_{LT}}{E_L} = \frac{\nu_{TL}}{E_T}$

c. Essai de traction hors axes

Dans cet essai, la force F est appliquée suivant une direction qui fait un angle de 45° avec les fibres (Figure2.9). 45° par rapport à la direction des fibres dans le cas d'un matériau composite unidirectionnel. 45° par rapport à la direction de la trame dans le cas d'un matériau composite tissu.

La contrainte σ_x est donnée en fonction de la force F appliqué suivant l'axe x , perpendiculairement à la section transversale S , comme suit :

$$\sigma_{xx} = \frac{F}{S}$$

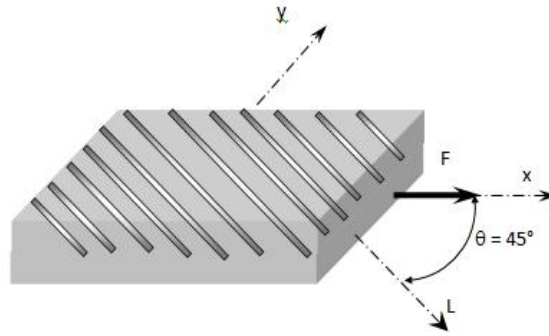


Figure 2.9. Traction hors axes

L'étude expérimentale consiste, à mesurer sur l'éprouvette les paramètres suivants :

- * La charge appliquée F_2
- * L'allongement de l'éprouvette selon l'axe x (suivant la longueur l_x) Δl_x

La déformation suivant l'axe x ϵ_{xx} est donnée par : $\epsilon_{xx} = \frac{\Delta l_x}{l_x}$

On déduit :

le module d'élasticité suivant l'axe x, E_{xx} (Young) : $E_x = E_{45} = \frac{\sigma_{xx}}{\epsilon_{xx}}$

Nous savons que :

$$\frac{1}{E_x} = \frac{1}{E_{45}} = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{E_L} + \frac{1}{E_T} + \frac{1}{G_{LT}} - 2 \frac{\nu_{LT}}{E_L} \right)$$

Nous constatons que dans cette relation, seul le module de cisaillement (Coulomb) G_{LT} est une inconnue. Nous déduisons alors :

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{4}{E_{45}} - \frac{1}{E_L} - \frac{1}{E_T} + 2 \frac{\nu_{LT}}{E_L}$$

Conclusion du chapitre

L'objectif des producteurs des matériaux composites est de concurrencer et de surpasser les métaux qui, de leur côté, ne cessent d'optimiser leurs propres caractéristiques. La diversité des matériaux composites et leur souplesse, qui permet de fabriquer ou de composer des caractéristiques à la carte, rendent cet objectif légitime. Pour atteindre ces objectifs, ce secteur doit se développer par l'innovation.

Les composites trouvent leurs principales applications dans le transport, le bâtiment, l'aérospatiale, etc. Ces applications nécessitent une connaissance des propriétés thermo-physiques et des méthodes de mesures de ces matériaux.

CHAPITRE III

TECHNIQUES DE RENFORCEMENT

Introduction

Ce chapitre présente, le contexte général du renforcement des structures de génie civil par collage de matériaux composites. Les principales applications sont brièvement décrites, de manière à identifier les facteurs susceptibles d'affecter la durabilité des réparations dans les conditions usuelles de service.

3.1 Techniques de renforcement des ouvrages par collage des matériaux composites

Alliant légèreté et performances mécaniques exceptionnelles, les matériaux composites sont utilisés depuis de nombreuses années dans les secteurs industriels de pointe comme l'aéronautique ou l'automobile. D'importants efforts de recherche ont été consentis par les entreprises concernées et les pouvoirs publics pour optimiser les constituants de base et faire évoluer les procédés de fabrication de ces matériaux, si bien que les composites sont aujourd'hui capables de répondre à des exigences de qualité et de durabilité très strictes et peuvent concurrencer les matériaux traditionnels comme l'acier.

L'utilisation des matériaux composites dans le secteur de la construction et du génie civil est quant à elle beaucoup plus récente. Confrontés au problème du vieillissement des infrastructures et à l'augmentation du trafic routier, les ingénieurs en génie civil ont pris conscience du potentiel des matériaux composites pour les applications structurelles et le renforcement des ouvrages en béton vers la fin des années 80. Là encore, les remarquables performances mécaniques, la résistance à la corrosion, la légèreté et la grande facilité de mise en œuvre sur chantier constituent les principaux atouts des composites par rapport aux matériaux traditionnels. Le renforcement d'ouvrages par collage externe de matériaux composites, développé à partir des années 1990, s'est ainsi progressivement imposé au détriment de la technique de réparation classique par tôles d'acier collées, cette dernière nécessitant le recours à de lourds équipements de chantier et le traitement anticorrosion des tôles métalliques [29]. La technique de renforcement par collage de tissus ou de lamelles stratifiées à base de fibres de carbone (Figure 1) est aujourd'hui devenue une pratique courante dont l'efficacité est reconnue dans le monde entier [30], [31], [32], [33], [34].

3.1.1 Application des matériaux composites en génie civil

Les chantiers de renforcement d'ouvrages par collage externe de polymère renforcés de fibres (PRF) se sont fortement multipliés à travers le monde au cours de la dernière décennie. En effet, cette technique de renforcement est maintenant considérée comme une solution efficace

et financièrement compétitive pour prolonger la durée de vie des infrastructures en béton armé. [35]

Le recours à un renforcement structurel peut être nécessaire pour plusieurs raisons :

- Au cours de son cycle de vie, une structure en béton armé peut être atteinte de pathologies diverses entraînant une diminution progressive de sa capacité structurelle. La corrosion des armatures en acier est la cause la plus fréquente de détérioration des ouvrages. Initiée dans les zones carbonatées du béton armé où la diminution de pH engendre une dépassivation des aciers, la dégradation des aciers (et les phénomènes de fissuration du béton associés) peut réduire considérablement la résistance en traction d'un élément de structure, menaçant alors potentiellement la stabilité de l'ouvrage. Le renforcement de l'élément endommagé par collage de matériaux composites peut alors permettre de restaurer, voire d'améliorer les capacités structurelles initiales, tout en bloquant la propagation des fissures et en constituant une barrière physique contre la pénétration d'agent délétères (eau, chlorures,...).
- des causes accidentelles (collision de véhicules, incendies) ou des actes de vandalisme peuvent également affecter l'intégrité d'un ouvrage et justifier une réhabilitation par collage de renforts composites.
- la capacité structurelle définie à la conception de l'ouvrage peut devenir insuffisante en cas d'évolution de l'affectation de l'ouvrage. Dans le cas des ponts routiers, les travaux de modification de l'ouvrage (par exemple son élargissement en vue d'augmenter le nombre de voies) visent bien souvent à accroître sa capacité à assumer un trafic routier plus important. Le renforcement de certains éléments de structure peut alors permettre de remettre à niveau l'ouvrage et de maintenir un niveau de sécurité satisfaisant pour les usagers.
- le renforcement préventif des infrastructures peut être indiqué dans les zones à fort risque sismique (particulièrement pour les piles de ponts), ou lorsqu'il s'agit d'ouvrages présentant un risque élevé pour la population (barrages, infrastructures situées en zone classée Seveso,...) et/ou un intérêt sociétal important (hôpitaux, ponts à fort trafic,...).

3.1.2 Techniques de renforcement

De manière générale, toutes les parties d'un ouvrage sont susceptibles d'être renforcées par collage de matériaux composites. Il existe trois applications principales en fonction du type de renforcement recherché [36]:

- les poutres, dalles et hourdis peuvent être renforcés à la flexion en collant des renforts composites unidirectionnels sur la face en traction (Figure 3-1 (a)), les fibres du composite étant orientées selon l'axe longitudinal de l'élément de structure, suivant ainsi la direction des contraintes principales de traction.
- les mêmes éléments peuvent être renforcés à l'effort tranchant par collage de PRF (Polymères renforcés de fibres) sur les faces latérales, les fibres étant orientées perpendiculairement par rapport à l'axe longitudinal de la structure (Figure 3-1 (b)),
- les colonnes peuvent être renforcées vis-à-vis des efforts axiaux, en les enveloppant par des PRF collés, les fibres étant orientées selon la direction circonférentielle (Figure 3-1(c)). Sous l'effet d'un effort de compression axial, la colonne se dilate et fait travailler le composite en traction. Ce dernier développe un effet de confinement qui maintient le béton dans un état de contrainte triaxial. Le confinement augmente significativement la résistance et la ductilité de la colonne.

La figure suivante présente la description des principales applications de renforcement par composites collés sur ouvrages de génie civil

- Renforcement à la flexion de poutres (a),
- renforcement à l'effort tranchant de poutres (b).
- confinement de colonnes (c).

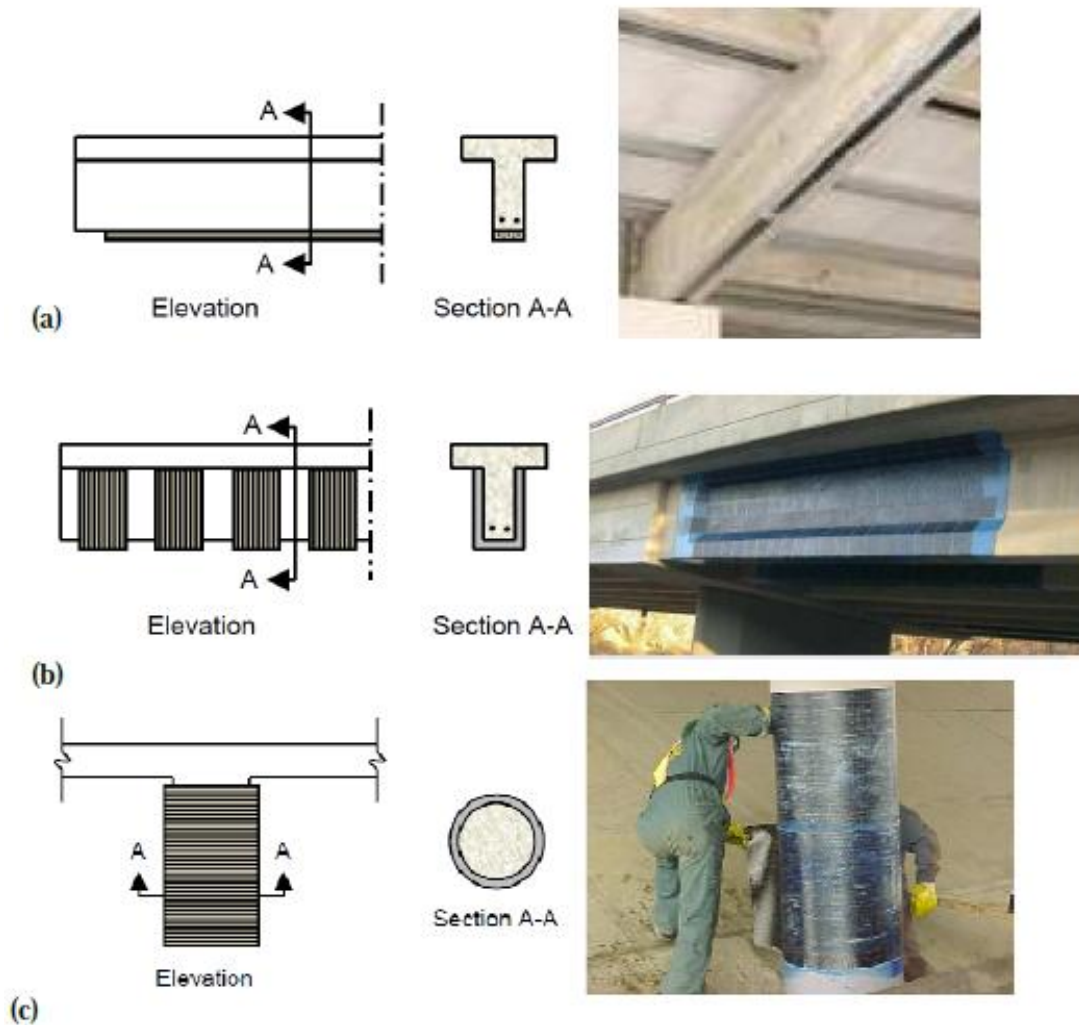


Figure 3.1 : principales applications de renforcement par composites collés sur ouvrages [36]

Il existe principalement deux méthodes pour la mise en œuvre des renforts composites et leur installation sur ouvrage :

- La première technique consiste à imprégner des tissus de fibres souples au moyen d'une résine époxy liquide et à les placer ensuite sur la structure à renforcer. Il s'agit d'une stratification au contact, dans laquelle la résine joue à la fois le rôle de matrice du composite, et celui d'adhésif assurant la liaison entre le composite et le substrat béton (Figure 3-2 (a)). La résine doit être suffisamment fluide pour assurer une bonne imprégnation du tissu et sa formulation doit permettre une polymérisation à température ambiante. La souplesse du tissu autorise l'emploi de cette technique pour le renforcement d'éléments de formes complexes.

- la seconde méthode consiste à utiliser des lamelles stratifiées rigides fabriquées en usine par le procédé de pultrusion (ce sont en général des composites carbone/époxy). Ces lamelles sont collées sur la surface en béton au moyen d'un adhésif époxy de consistance pâteuse et polymérisable à température ambiante (Figure 3-2 (b)). Les lamelles rigides ne pouvant pas épouser les formes du support, cette technique est plutôt adaptée à des surfaces planes ou ayant de grands rayons de courbure.

Dans les deux types de procédé, plusieurs couches de tissus ou de lamelles peuvent être superposées en fonction de la rigidité recherchée du renfort.

La figure suivante présente la description des procédés de renforcement par collage de tissus de fibres de carbone (a) ou par collage de lamelles composites (b) (ici deux lamelles superposées).

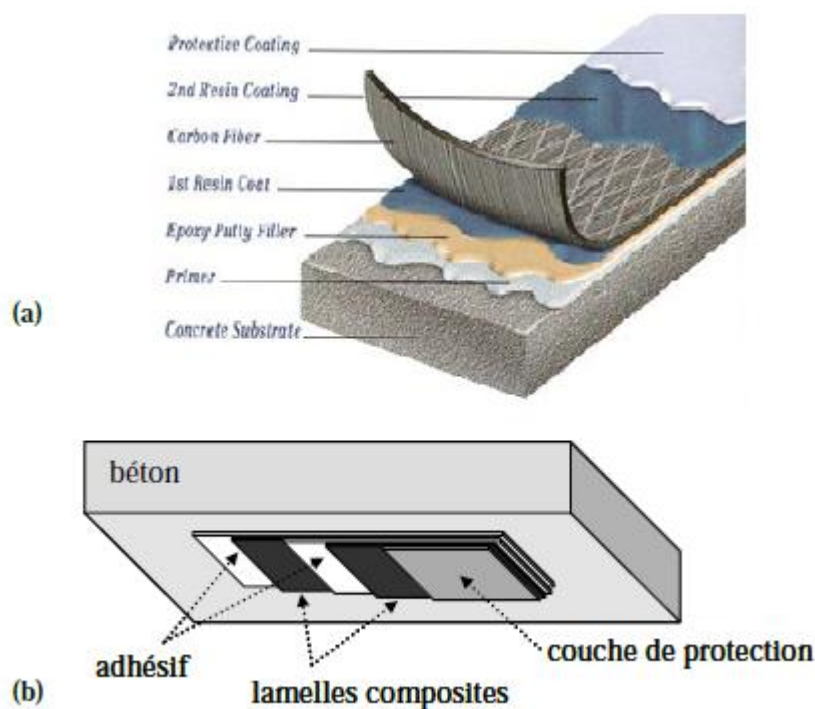


Figure 3.2 : description des procédés de renforcement

Au cours de la dernière décennie plusieurs guides de recommandations ont été publiés dans divers pays, en vue de recenser les bonnes pratiques en matière de conception, dimensionnement et mise en œuvre des renforcements par composites collés.

3.2 Autres méthodes de renforcement des structures

Les différentes technologies de renforcement et de maintenance des ouvrages sont couramment utilisées depuis de nombreuses années

3.2.1 Renforcement par adjonction d'armature complémentaire

Des armatures complémentaires sont à prévoir lorsqu'il s'agit de remplacer des aciers corrodés ou coupés accidentellement ou lorsqu'il s'agit de renforcer une structure. Les armatures complémentaires doivent s'opposer à la fissuration, et participer à la résistance des sections renforcées. La protection de ces armatures est assurée par un béton coulé ou projeté et leurs jonctions avec les armatures existantes peuvent se faire par des procédés classiques (recouvrement, soudure, manchonnage) (figure 3.3).

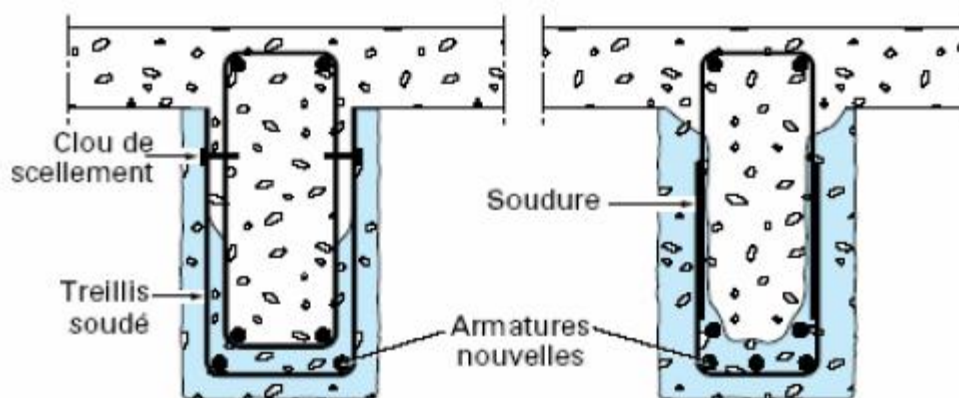


Figure 3.3 : Réparation de poutre par adjonction d'armature

3.2.2 Béton projeté

Cette technique, très au point, utilisée tant pour le renforcement de structures insuffisantes ou défailtantes que pour la réparation d'ouvrage endommagés, exige pour sa mise en oeuvre un personnel spécialisé. Le béton projeté peut être, ou non, combiné avec l'adjonction d'armatures complémentaires. La projection est réalisée soit par voie sèche, soit par voie mouillée. Dans le premier cas, la grande vitesse de projection (80 à 100 m/s) fait que le procédé par voie sèche est particulièrement recommandé pour la réparation des ouvrages car il permet d'obtenir un béton très compact. Dans le second cas, la faible vitesse de projection (10 à 40 m/s) rend indispensable l'exécution préalable d'une couche d'accrochage. Après durcissement, le béton projeté possède les propriétés d'un béton coulé, puis vibré. La projection est possible dans toutes les directions, en particulier en plafond (figure 3.4). Une

description détaillée de cette technique est donnée dans l'ouvrage de Resse [Resse C. et Venaut M. 1981].

Selon Resse, les travaux de réparation par béton projeté se regroupent en deux catégories : les réparations superficielles et les réparations profondes. Grâce à son adhérence au support, à ses caractéristiques très proches de celles du béton coffré, aux possibilités de mise en place et d'enrobage d'armatures de renfort qu'il procure, le béton projeté permet de réaliser économiquement de telles réparations.

La difficulté de l'emploi de cette méthode provient essentiellement du mode d'application et de mise en œuvre (matériels, main d'œuvre et problèmes d'hygiène et de sécurité).

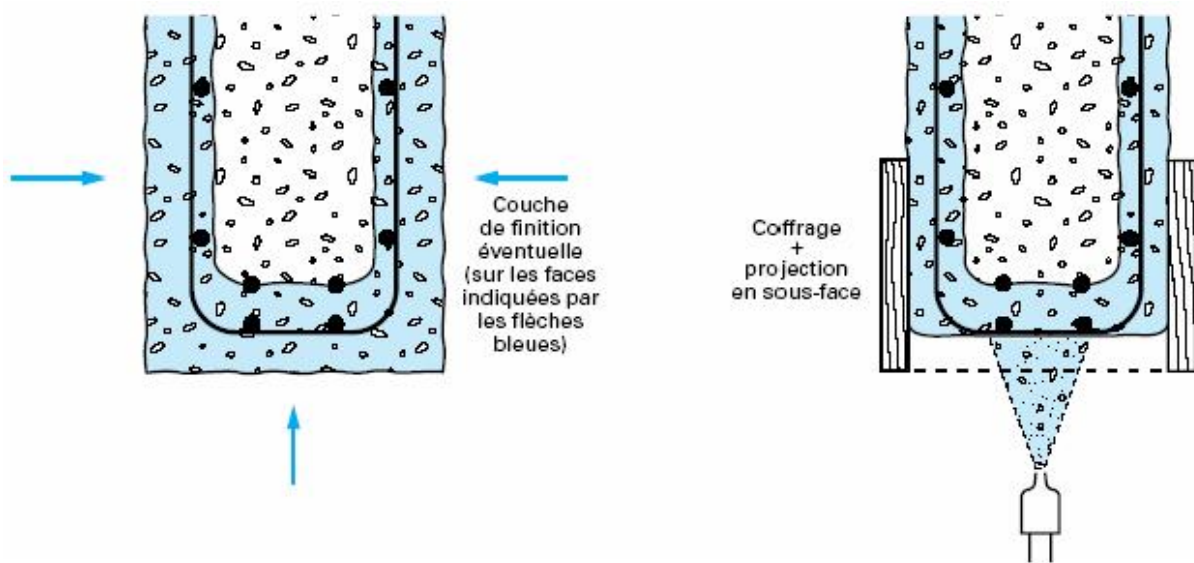


Figure 3.4 Réparation de poutre par béton projeté

3.2.3 Tôles collées

Le renforcement de structure par plats métalliques, mieux connue sous le nom de procédé l'Hermite, consiste à coller des plats en acier sur les faces tendues de structures en béton armé. Ainsi, L'Hermite [Hermite R.L. et al. 1967] s'est intéressé, dès le début des années soixante, à l'utilisation de ces composés adhésifs de type époxy polymérisant à froid pour associer béton et acier.

Selon [Theillout J. N. 1997], trois problèmes mécaniques se posent lors de l'utilisation de tôles extérieures collées au béton pour le renforcement des structures :

- la mise en flexion locale de la tôle au voisinage des fissures qu'elle recouvre,
- la répartition des efforts repris par les tôles dans le cas d'utilisation d'empilement,

- la répartition des déformations entre les aciers internes au béton et les aciers collés extérieurement.

L'acier de renfort est constitué, dans la plupart des cas, de tôle d'acier de nuance E24, d'épaisseur de 3 à 5 mm.

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...).

La mise en place des tôles nécessite une très bonne préparation de chantier ainsi qu'une excellente coordination des équipes. Le collage impose un dispositif de serrage pouvant être un étaielement, un serrage par serre-joint ou un serrage par vérins plats. L'emploi de ce mode de réparation est particulièrement limité à cause de sa mise en œuvre difficile et onéreuse.

Ce procédé consiste en un apport d'armatures extérieures soit pour consolider un élément dont les dégradations mettent en péril la résistance, soit pour remplacer des aciers oubliés, ou mal positionnés. La préparation des surfaces, la mise en œuvre des colles, la réalisation du placage, etc., doivent impérativement être confiées à des entreprises spécialisées ou à des laboratoires du fait de la difficulté de la mise en œuvre de cette technique, certains procédés font d'ailleurs l'objet de brevets (ex. : brevet UTI-L'HERMITE, inventeur de la technique) (figure 3.5).



Figure 3.5 Renforcement d'un viaduc par tôles collées

Dans les locaux devant, du fait de leur destination, présenter une certaine résistance au feu, l'étude mécanique des renforcements doit être complétée par celle de l'isolation thermique permettant de soustraire la colle aux effets des incendies dans les conditions requises.

La colle utilisée est, généralement, une résine époxyde. Son épaisseur est de 0,5 à 1 mm. Les tôles d'acier, de qualité courante, ont une épaisseur limitée à 3 mm [Luyckx J 1999]. Toutefois, le collage de tôles métalliques présente aussi quelques difficultés :

- sensibilité de l'acier à l'oxydation (il demande donc une protection et un entretien quotidien) ;
- impossibilité de mobilisation de toute la résistance en traction des tôles, même sous faible épaisseur ;
- nécessité d'un collage sous pression (vérins), pour assurer une adhésion suffisante et éviter les bulles d'air dans la couche de résine ;
- impossibilité de généraliser cette technique à des surfaces importantes (masse manipulées trop importantes), ce qui limite d'autant les possibilités de réparation.

3.2.4 Précontrainte additionnelle

Contrairement aux techniques présentées ci-dessus et qui consiste en l'ajout de matière (béton ou acier), la précontrainte additionnelle consiste en un ajout de force dans des ouvrages existants en vue soit de leur redonner leur état de service initial, soit de leur donner un nouvel état de service. Elle permet, en effet, d'appliquer des efforts d'une intensité connue, en des points et suivant des directions bien définies, capables de s'opposer aux efforts générateurs des désordres. Elle est réalisée le plus souvent par la mise en oeuvre d'armatures de précontrainte (câble ou barres). La précontrainte additionnelle peut être employée pour traiter une grande variété d'ouvrage (ponts, barrages, réservoirs, bâtiment). Cette méthode est particulièrement adaptée au renforcement en flexion et vis-à-vis de l'effort tranchant par l'emploi d'étriers actifs. (Figure 3.6).

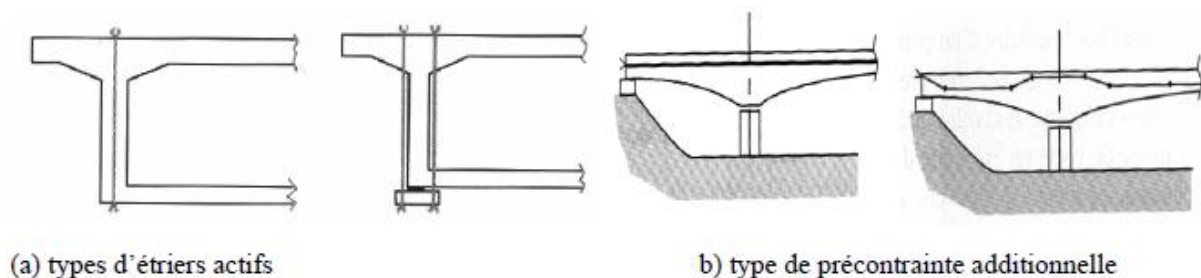


Figure 3.6 : Différents types de réparation par précontrainte additionnelle
[Fargeot B. 1997]

En revanche, la mise en oeuvre de tout ce qui concerne la protection définitive des armatures nécessite un niveau particulier de qualité. De plus, le recours à des unités de plus en plus puissantes pour en limiter le nombre implique une étude particulièrement soignée des zones d'ancrage, très fortement sollicitées [Calgaro J. et Lacroix R., 1997].

CHAPITRE IV

INVESTIGATIONS

EXPERIMENTALES

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les trois étapes munies lors de l'étude expérimentale investie au laboratoire de Génie Civil de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou. La première consiste en la réalisation des corps d'épreuves notamment les éprouvettes en béton et l'élaboration du renfort en matériaux composites, en suite le collage des renforts sur les supports en béton, la second est consacrée pour les essais mécaniques en suite on termine par une analyse des résultats et une conclusion.

4.1. Matériau Béton

4.1.2. Elaboration des spécimens

Pour le besoin de notre étude nous réalisons trois types d'éprouvettes , prismatique $10 \times 10 \times 40 \text{cm}^3$ pour les essais de traction par flexion et des dalles de dimensions $28 \times 23 \times 3 \text{cm}^3$ pour les essais de poinçonnement et d'impact et cylindriques $10 \times 20 \text{cm}^3$ pour caractériser le béton en compression

A. Matériaux utilisés

- **Ciment** : le ciment utilisé est un ciment portland importé de marque CIMPOR de classe CEM II/A-L 42.5R
- **Granulats** : le sable et le gravier utilisés proviennent d'une sablière, stocké à l'université, les granulats sont de nouveau 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).



Figure 4.1.1: séchage des granulats

- **L'eau** : l'eau de gâchage utilisé est l'eau du robinet, (eau potable)
- **Plastifiant** : nous avons utilisé un plastifiant MEDAFLOW-30 fabriqué par Granitex



Figure 4.1.2 : Plastifiant MEDAFLOW-30

B. La composition du béton

Une seule composition du béton est utilisée. Elle à été formulée selon la méthode de DREUX GORISSE Le tableau 4.1 répertorie les constituants avec leurs rapports pour la formulation d'un m³ de béton.

Tableau4.1 : Composition du béton

Composant	masse pour 1m ³ de béton
Ciment (Kg/m ³)	350+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

C. Préparation et fabrication des moules

Les divers formes et types de moules utilisés pour le collage des dalles de 28x23x3 cm sont des moules métalliques de dimensions 28x23x7 cm et on a fabriqué un autre

coffrage en bois permettant le coulage de dix dalles à la fois de dimensions 28x23x3 cm, afin d'avoir la même gâchée pour chaque série de dalles.

Pour les prismes 10x10x40 cm et les cylindres 10x20cm, nous avons utilisé des moules métalliques.

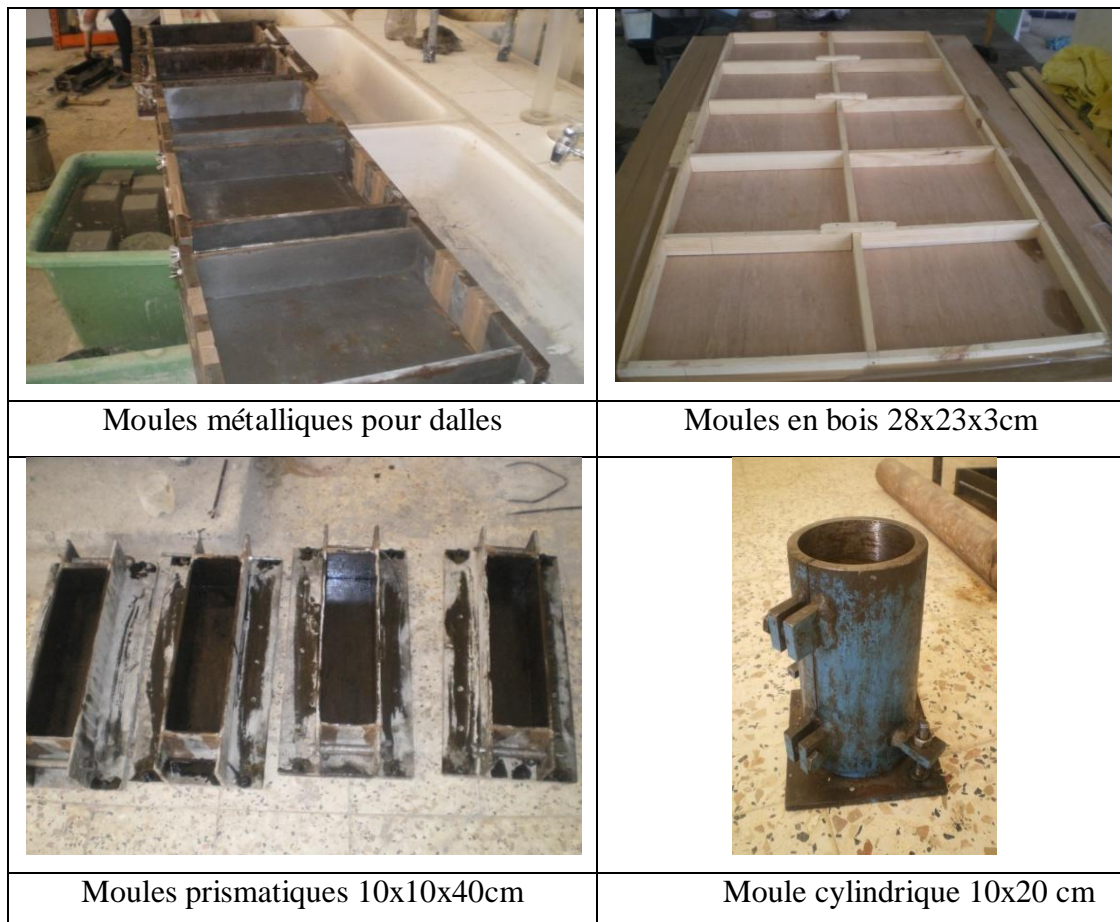


Figure 4.1.3 : Formes des Moules

D. Malaxage et mise en œuvre du béton

Après avoir pesé les quantités des matériaux utiles, on les a introduites dans le malaxeur. Le malaxage de béton est réalisé avec un malaxeur à axe vertical de capacité 65L (*Figure 4.1.4*), l'opération est arrêtée après l'obtention d'une consistance homogène du mélange.



Figure 4.1.4 : Malaxeur

Les moules étant rincés avec de l'huile de vidange. La mise en place du béton dans les moules a été effectuée dans les différents moules destinés aux éprouvettes programmées aux essais et suivie de vibration à l'aide des dispositifs vibratoires traditionnels, principalement une table vibrante, et une aiguille vibrante pour la vibration du béton mise en place dans le moule en bois vue ses dimensions importantes.



Figure 4.1.5: Dispositifs vibratoires

Une fois coulés, les échantillons ont été recouverts d'un film plastique humide pour éviter l'évaporation de l'eau (effet de retrait).



Figure 4.1.6 : Spécimens après coulage

Le démoulage à été effectué à près 24 heures

Après le démoulage toutes les éprouvettes ont été émergées dans un bac à eau pendant 28 jours



Figure 4.1.7 : Eprouvettes conservées dans l'eau

4.2. Matériaux Composites

Dans cette partie on procède à la réalisation des différentes plaques en composites en fibres à matrice chargée et des plaques résineuses à matrice chargée, pour le renforcement des dalles et des prismes en béton

4.2.1. Présentation et préparation des matériaux étudiés

a. Matrice

La matrice d'un composite a pour rôles :

- d'enrober les renforts, les protégeant ainsi du milieu extérieur.
- d'assurer une répartition spatiale homogène des renforts.
- de transmettre aux renforts les efforts extérieurs et de les répartir.
- de conférer la forme à la pièce de matériau composite : ce sont elles qui conditionnent l'aptitude à la mise en forme du composite.

➤ Résine époxyde :

Les adhésifs époxydiques destinés au génie civil sont des systèmes bi-composants, constitués d'une base époxy (prépolymère comportant des fonctions réactives oxyranes) et d'un durcisseur qui est le plus souvent constitué d'un mélange d'amines aliphatiques ou cycliques ou de polyamides. Les groupements fonctionnels de la résine et du durcisseur sont capables de réagir par polycondensation à température ambiante pour former un réseau polymère réticulé avec une réaction entre le diglycidyl éther de bisphénol A ou DGEBA (qui est une des bases époxydes les plus couramment utilisée) et une diamine aliphatique.

La résine qui constitue notre matrice est une résine époxy destiné à la stratification sur différents supports, elle se présente se forme de kit pré dosé de 2 composants :

- Élément **A** : Résine
- Élément **B** : durcisseur

➤ Propriétés

- Très bonne tenue aux produits chimiques
- Très bonne adhérence sur supports béton et acier, mortier de ciment
- Bonne mouillabilité du support et de la fibre de verre
- Durcissement rapide
- Etanchéité aux liquides et à la vapeur d'eau
- Résistances mécanique élevées
- Sans solvant

➤ Caractéristiques

Le Tableau4.2 résume les caractéristiques de la résine fournies par le fabricant :

Tableau 4.2 : Caractéristiques de la résine époxy

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 ($\Omega \cdot m$)	10^{10} à 10^{13}

b. Les Renforts

Les renforts étudiés sont les mats de fibres de verre et le tissu de polypropylène décrit ci-dessous :

1. Fibre de verre

Le mat de fibres de verre présenté sous la forme de feuillets conçus de fils de verre de type E sectionnés à 50 mm de long et liés par émulsion de résine.

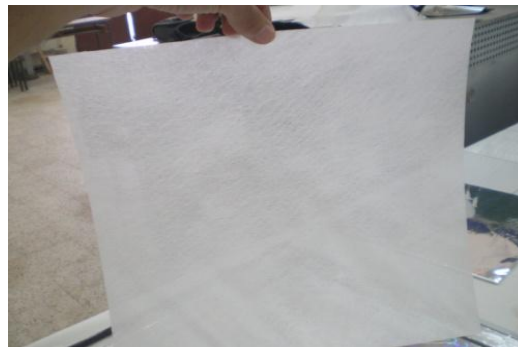


Figure 4.2.1. : Mat de verre

➤ **Propriétés**

- Résistant à la traction, aux chocs et à l'usure.
- Pose aisé sur tous supports.
- Combustible.
- Très bonne stabilité dimensionnelle.
- Non toxique.
- Imputrescible.
- Très belle aspect de surface après peinture.
- Faible absorption lorsque le mat reçoit de la peinture.

➤ **Caractéristiques**

Masse surfacique moyenne	450g/m ²
Largeur	80cm
Longueur	50m

Tableau 4.3 : Caractéristique du mat de fibres de verre

2. Polypropylène

Le tissu de polypropylène étudié est unidirectionnel constitué de fibre de polypropylène à maille ellipsoïde

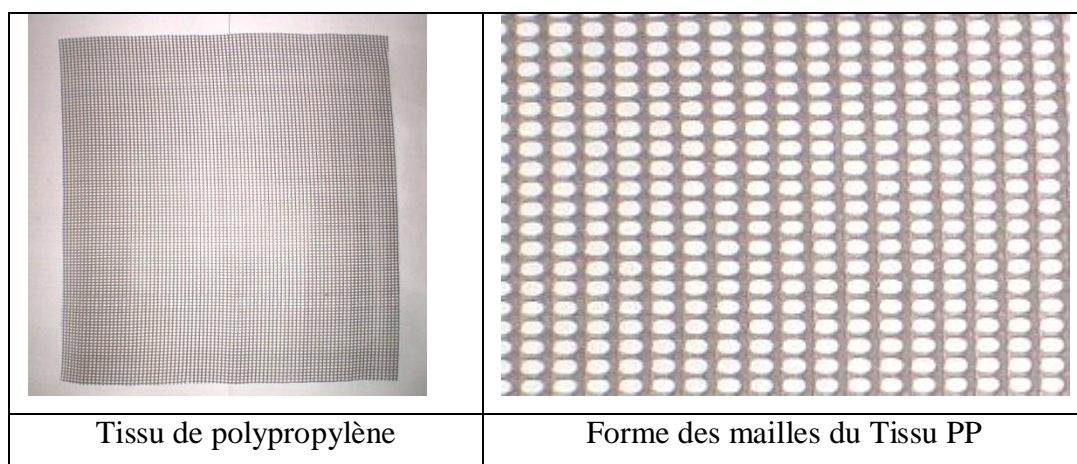


Figure 4.2.2 : Forme du Tissu en fibres de Polypropylène

➤ Propriétés

- Léger
- Faible coût
- Résistant à la traction
- Résistant aux chocs

➤ Caractéristiques

- Les Propriétés mécaniques du polypropylène à température ambiante :

Matériau	E [GPa]	ν	Re [MPa]	Rm [MPa]	A %	K_{Ic} [MPa.m ^{1/2}]
polypropylène	0.9 - 1.7	0.41	20 – 35	35 – 70	60 – 100	3 – 3.5

Tableau 4.4.a : Propriétés mécaniques du polypropylène

Le Tableau 4.5 résume les caractéristiques géométriques et physiques du tissu de polypropylène

Masse surfacique (g/m ²)	140g/m ²
Masse volumique (g/cm ³)	0.90
Dimensions des mailles (mm)	2mmx1.5mm
Nombre de maille/m ²	150000 mailles/m ²
Epaisseur du tissu (mm)	0.5 mm

Tableau 4.4.b : Caractéristiques du tissu de polypropylène

3. Le Liège

Le liège provient exclusivement de la partie extérieure de l'écorce du chêne-liège qui croit dans le nord de l'Afrique et au sud de l'Europe

Le liège est un matériau naturel présentant une hétérogénéité qui rend difficile toute normalisation

Le liège est un matériau renouvelable, recyclable, et réutilisable. Sans additifs, aggloméré par la propre résine du liège sous l'action de la vapeur et de la

pression on obtient un matériau de très bonne isolation phonique et une absorption acoustique, ainsi qu'une grande stabilité dimensionnelle et résistant à l'écrasement



Figure 4.2.3. : Liège aggloméré

De plus, de nombreuses références bibliographiques montrent que la composition organique du liège joue un rôle important sur les qualités de celui-ci. En effet, la subérine est le constituant principal du liège et la grande compressibilité et élasticité du liège sont dues à sa présence en quantité importante dans le liège (PEREIRA 1988/2). **Les céroïdes** repoussent l'eau et contribuent à l'imperméabilité du liège (RIBAS-MARQUES 1952). Quant à la **lignine** (substance qui imprègne les parois des cellules du bois et confère à celui-ci sa dureté), elle joue un rôle considérable dans la structure rigide des parois cellulaires (PEREIRA 1988/2).

Pereira (1988/1) trouve également que la composition organique du liège (subérine, lignine, polysaccharides) varie beaucoup à l'intérieur d'un même arbre. Une variation avec la localisation géographique est aussi trouvée pour les polysaccharides mais pas pour la subérine et lignine (PEREIRA 1988/1).

➤ Propriétés

Le liège possède 30 millions de cellules/cm³ et à une densité de 0,12 à 0,25. Sa composition et sa structure lui confèrent de nombreuses propriétés :

- Un très bon retour élastique.
- Une imperméabilité totale le rendant imputrescible.

- Une faible conductivité thermique, acoustique et vibratoire
- Très peu inflammable et faiblement fumeux, sans émanation de gaz toxique (à part de très faibles quantités de monoxyde de carbone et d’anhydride carbonique)
- Non absorption des poussières.
- Ne craint aucune attaque de ravageurs.
- Léger (densité : 0,15 en moyenne).
- Chimiquement quasiment neutre (après bouillage).
- Antistatique et isolant électrique.

Des analyses minérales du liège sont réalisées, le Tableau 4.6 présente l’ordre de grandeur des teneurs en éléments minéraux du liège

Eléments	Proportions
P	0.03-0.04 % m.s
K	0.14-0.27 % m.s
Ca	0.11-0.20 % m.s
Mg	0.01-0.02 mg/kg m.s
N	0.47-0.61 % m.s
Mn	25-52 mg/kg m.s
Cu	10.6-16.4 mg/kg m.s
Zn	7.2-11 mg/kg m.s
Fe	132-191 mg/kg m.s

Tableau 4.5.a : Composition minérale du liège

➤ **Composition chimique du liège:**

Composants	Subérine	Lignine	Cellulose et Polysaccharides	Tanins	Cires	Cendres et autres
Proportions	45%	27%	12%	6%	5%	5%

Tableau 4.5.b : Composition chimique du liège

➤ **Caractéristiques**

Sans liant à une température de l'ordre de 300°C la résine naturelle contenue dans le liège tient lieu de liant

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 / 1,25m ² 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

Table 4.6 : Fiche technique de granulat de liège

Concernant notre étude nous avons utilisé un matériau 100% naturel, extrait de forêts gérées durablement dans la région de YAKOURAN de TIZI-OUZOU

Le liège est récupéré à l'état brut



Figure 4.2.4 : Liège à l'état brut

Le liège est en suite broyé avec un broyeur spécial, le matériau est obtenu sous forme de granulats de diamètres allant jusqu'à 25mm.



Figure 4.2.5 : Liège broyé

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).



Figure 4.2.6 : Tamisage du liège

4. La Fonte

Une fonte est un alliage métallique dont l'élément essentiel est le fer, et dont la teneur en carbone est supérieure à 2%. Il est à noter que la présence de fortes teneurs en éléments carburigènes peut modifier cette limite de la teneur en carbone. Dans la pratique les pourcentages de carbone se situent le plus souvent entre 3 et 4%.

Dans une fonte, le carbone prend la forme de cémentite ou de graphite, ou simultanément sous ses deux formes (fonte truitée). La cémentite donne lieu à une cassure de couleur claire spécifique. C'est pour quoi une fonte dont tout le carbone est se forme de cémentite est dite blanche. Le graphite rendant la cassure grise, d'où la fonte elle-même est appelée fonte grise.

Dans notre étude nous avons utilisé une fonte qui provient des déchets d'usinage et réparation des blocs moteurs qui sont constitué d'une fonte grise à graphite lamellaire, de forme cubique.

➤ **Définition de fonte grise a graphite lamellaire**

Ces alliages sont peut-être plus connus sous le nom de **fontes « ordinaires »** car ce sont les plus anciennement utilisées en construction mécanique, en architecture métallique, chauffage domestique et industriel, équipement de voirie. Aujourd'hui encore, elles ont une place prépondérante en fonderie.

Leur structure comprend essentiellement du graphite en **lamelles** (en paillettes), **ramifiées** et arrangées en **ensembles cellulaires**, incluses dans une **matrice** le plus souvent **perlitique** ou **perlito-ferritique**. Elles peuvent contenir assez de phosphore pour former un réseau de cristaux analogues à des carbures mais moins durs.

➤ **Caractéristiques des fontes grises à graphite lamellaire :**

- leur résistance à la traction ne dépasse guère 400 MPa mais elles ont un meilleur comportement en compression, donc en flexion.
- leur dureté est modérée (200-280 HB).
- elles sont très facilement usinables et résistent particulièrement bien à l'usure sans grippage.
- elles amortissent bien les vibrations.
- elles résistent bien aux corrosions courantes et à la chaleur
- elles reçoivent couramment des revêtements protecteurs : émaillage, bleuissage.
- En revanche, elles cassent sans déformation plastique apparente, ce qui les fait considérer comme **fragiles**, résistant mal (sauf sous forme suffisamment massive) à des chocs directs importants.

➤ **Résistance au choc – Résilience des fontes grises :**

La résistance au choc des fontes grises, réputées fragiles à cause de l'effet d'entaille du graphite, est appréciée suivant la norme **NF A 03-202** en mesurant l'énergie **KG** absorbée par la rupture d'une éprouvette usinée – diamètre de 20 mm – soumise à la flexion par choc entre appuis distants de 100 mm sur un mouton-pendule de **49,05 J**. Pour l'ensemble des fontes grises, KG varie dans le même sens que **Rm** : **15 à 35 J** pour **Rm** variant de **150 à 400 MPa**. Dans le cas des fontes GS, on utilise une méthode de type Charpy (entaille en V de 2 mm de profondeur). Certaines nuances de fontes GS ferritiques ou austénitiques ont ainsi une « résilience » minimale garantie suffisante pour qu'on puisse les considérer comme « exemptes de fragilité » et par conséquent les utiliser dans la construction de certains appareils à pression soumis à réglementation < norme **NF A 32-160**>.

Bien entendu, ni la résilience, ni la résistance au choc déterminé sur éprouvettes ne peuvent prédire le comportement d'une pièce industrielle soumise à des sollicitations brusques.

Ainsi, une enclume en fonte grise suffisamment massive pourra résister à des chocs même violents. Beaucoup de pièces en fonte GS ou malléables perlitiques (matériaux dont la résilience Charpy V2 est à peine supérieure à celle des fontes grises) sont utilisées couramment pour des applications dites « de sécurité » et supportent très bien des chocs sans rupture (bras de suspension par exemple). À cet égard, le tracé de la pièce joue un rôle aussi important que la qualité du matériau.

Même les fontes blanches (indéniablement fragiles) sont utilisées dans des cas où les chocs sont importants (boulets de broyeurs par exemple).

➤ **Propriétés mécaniques des fontes grises :**

Matériau	E [GPa]	ν	Re [MPa]	Rm [MPa]	A %	K_{Ic} [MPa.m ^{1/2}]
Fontes grises	90 - 150	0.26	220 – 600	400 – 1000	0 – 15	5 – 20

Table 4.7 : Propriétés mécaniques des fontes grises

➤ **Composition chimique des blocs moteurs en fonte grise :**

Le Tableau 4.8 résume les proportions des composants chimiques comportant dans les blocs moteurs

Nuance	C%	Si%	Mn%	S%	P%	Céq	Sc Saturation carbone	Autre éléments chimiques
(FGL) FT25	3,16- 3,36	1,60- 1,90	0,60- 0,90	≤ 0,10	≤ 0,15	3,70- 4,00	0,83- 0,90	Traces

Table 4.8 : Composition chimique des blocs moteurs en fonte grise

Le matériau étudié dans notre cas est une poudre de fonte grise appartenant à des blocs moteurs ayant les caractéristiques citées précédemment.



Figure 4.2.7 : Poudre de fonte

5. Le Plomb

La poudre de plomb utilisée est obtenue manuellement à l'aide d'une lime. Des mesures de protection sont prises vu la nocivité du matériau.



Figure 4.2.8 : Poudre de plomb

4.2.2 Elaboration des composites

1) Technique de mise en œuvre des matériaux composites

➤ Moulage au contact

Le principe de moulage au contact est un procédé manuel pour la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression. Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détournée.

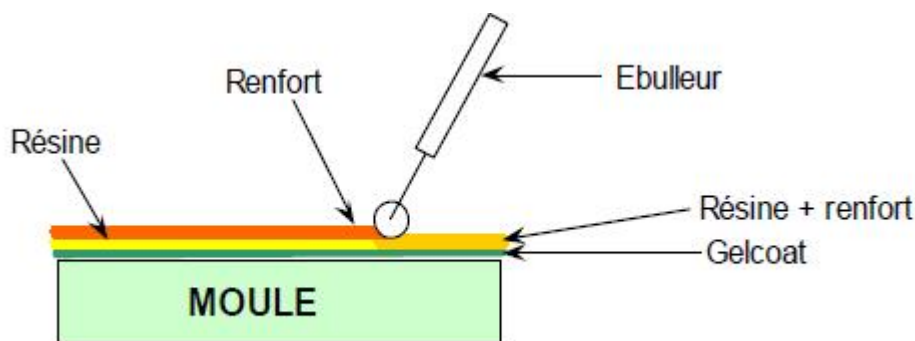


Figure 4.2.9 : principe de mise en œuvre des matériaux composites

➤ Moules utilisés

Nous avons fabriqué plusieurs types de moules et avec des dimensions différentes pour la réalisation des matériaux prévus pour les essais.

- Un moule de dimensions intérieures 300x300x2 mm pour la réalisation des éprouvettes destinées aux essais de caractérisation, (essai de traction).
- 06 moules de dimensions intérieures 230x280x2mm pour la réalisation des plaques en composites destinées au renforcement des dalles en béton de dimensions 23x28x3cm.(essai de poinçonnement et essai de choc).
- 03 moules de dimensions intérieures 100x400x2mm pour la réalisation des plaques en composites destinées au renforcement des prismes en béton de dimensions 10x10x40cm.

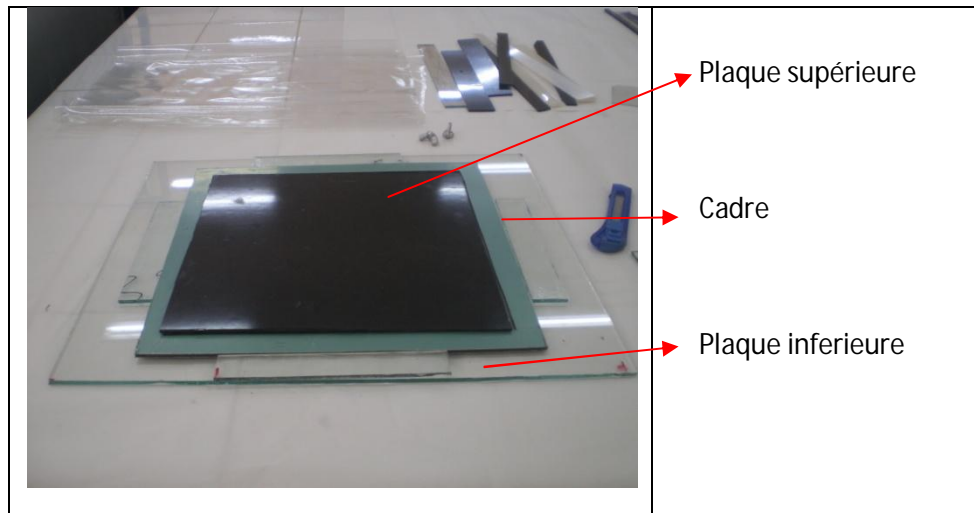


Figure 4.2.10 : Moule fabriqué avec les dimensions 300x300x2mm

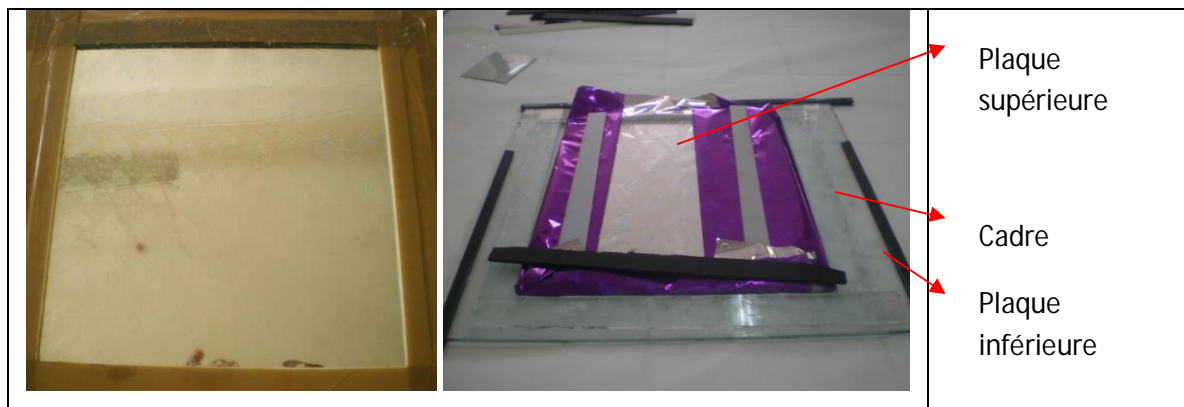


Figure 4.2.11 : modèle de moules 230x280x2mm

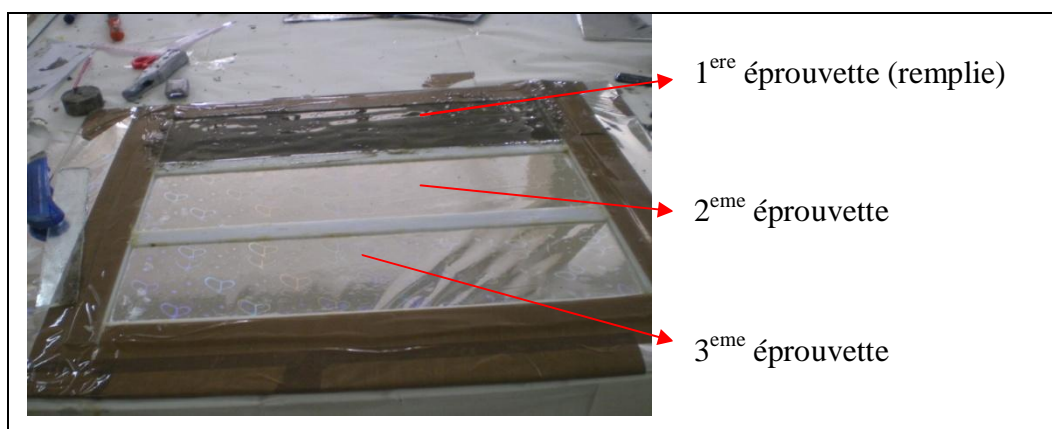


Figure 4.2.12: 03 moules en série 100x400x2 mm

2) Modes opératoire

- a) La réalisation des plaques avec les compositions suivantes se fait de la même manière
- **Matrice (Résine époxy) + renfort (mat) + charge (fonte)**
 - **Matrice (Résine époxy) + renfort (mat) + charge (plomb)**

Pour l'élaboration de ces éprouvettes on a respecté les étapes suivantes :

- Procéder au mélange des composants une fois que la préparation des moules est terminée.
- Ne préparer que les quantités de mélange pouvant être utilisée durant ce temps.
- Couper le mat de verre selon les dimensions du moule.
- Verser la résine et le durcisseur en quantités calculées dans le récipient.
- Ajouter la quantité de la charge selon la fraction massique calculée.
- Remuer le mélange pendant 03minutes avec un agitateur à faible vitesse de rotation, et racler plusieurs fois les parois du récipient afin d'assurer une dispersion totale.
- Après l'obtention d'un mélange homogène, on verse la moitié du mélange dans le moule, en suite on étale à l'aide d'une raclette et un rouleau afin de chasser les bulles d'aire.
- Poser le renfort (mat de verre) sur le contenu en appliquant une petite pression à l'aide d'un rouleau ou autres outils afin d'assurer une bonne imprégnation du renfort.
- Verser l'autre moitié du mélange sur le renfort en étalant bien sur toute la surface du renfort.
- Après avoir surfacé le mélange on pose le couvercle sur le moule toute en exerçant une petite pression afin d'avoir une surface lisse sur les deux cotés.
- Après 24 heures le matériau est durci , on procède au démoulage.

Les principales étapes de réalisation sont illustrées ci-après

		
<p>Mixage du mélange</p>	<p>Remplissage du moule(1^{ère} couche)</p>	<p>Etalement de la 1^{ère} couche</p>

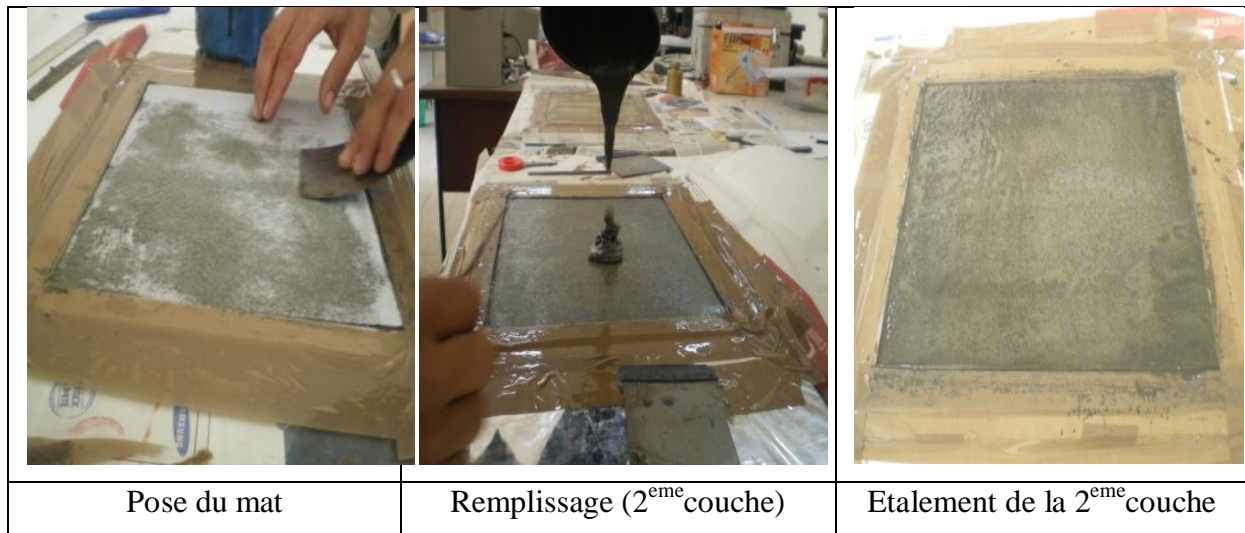


Figure 4.2.13 : Principales étapes de réalisation des éprouvettes (résine + charges+mat)

b) La réalisation de la plaque en composite à renfort polypropylène :

Pour l'élaboration de ces plaques nous avons suivi les étapes suivantes :

- **(résine époxy + 1 tissu de polypropylène)**
 - Couper le tissu de polypropylène unidirectionnel selon les dimensions du moule prévu.
 - Poser un tissu de polypropylène sur le moule d'une manière à orienter les fibres suivant la direction longitudinale du moule (plaque) c.-à-d. dans le sens L=28cm.
 - Verser les quantités calculées (résine +durcisseur) dans le récipient et mélanger.
 - Vider le mélange homogène sur le tissu.
 - Etaler le mélange et imprégner bien le renfort dans la résine.
 - Après 24 heures on procède au démoulage.

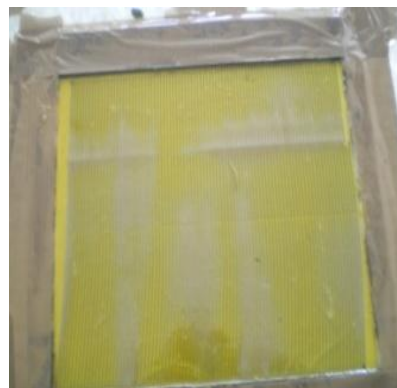


Figure 4.2.14 : imprégnation du renfort dans la

- (résine époxy+ 2 tissus de polypropylène)

Pour la réalisation de ces plaques on suit les mêmes étapes pour la réalisation d'une plaque à 1 tissu sauf la deuxième étape qui change, et que nous remplaçons par :

- Poser le 1^{er} tissu d'une manière à orienter les fibres suivant la direction $L=28\text{cm}$ et le 2^{ème} tissu suivant la direction $L=23\text{cm}$ c.-à-d. les deux tissus posés dans deux directions. (Figure 4.2.15)

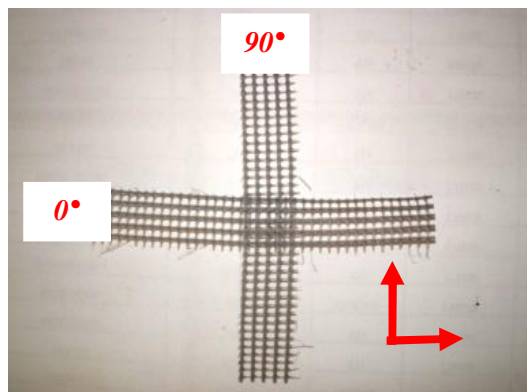


Figure 4.2.15 : Orientation des fibres de tissu pp

- Après durcissement de la résine on sépare la plaque du moule.

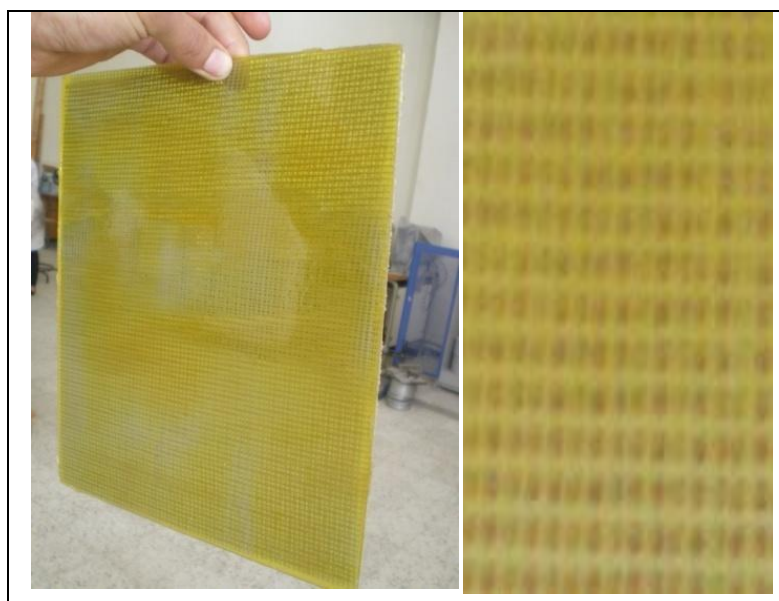


Figure 4.2.16 : Plaque (résine époxy+ 2 tissus de polypropylène)

c) La réalisation des plaques en matrice chargée

- Résine époxy + Liège

Pour l'élaboration de ces plaques nous avons trié les granulats de différents diamètres après le tamisage.

Pour les essais de caractérisation nous avons réalisé une plaque avec des fractions différentes des diamètres de grains

Les diamètres utilisés sont :

[1mm - 0.5mm - 0.3mm - 0.08mm (fond)] avec des fractions massiques calculées au préalable.

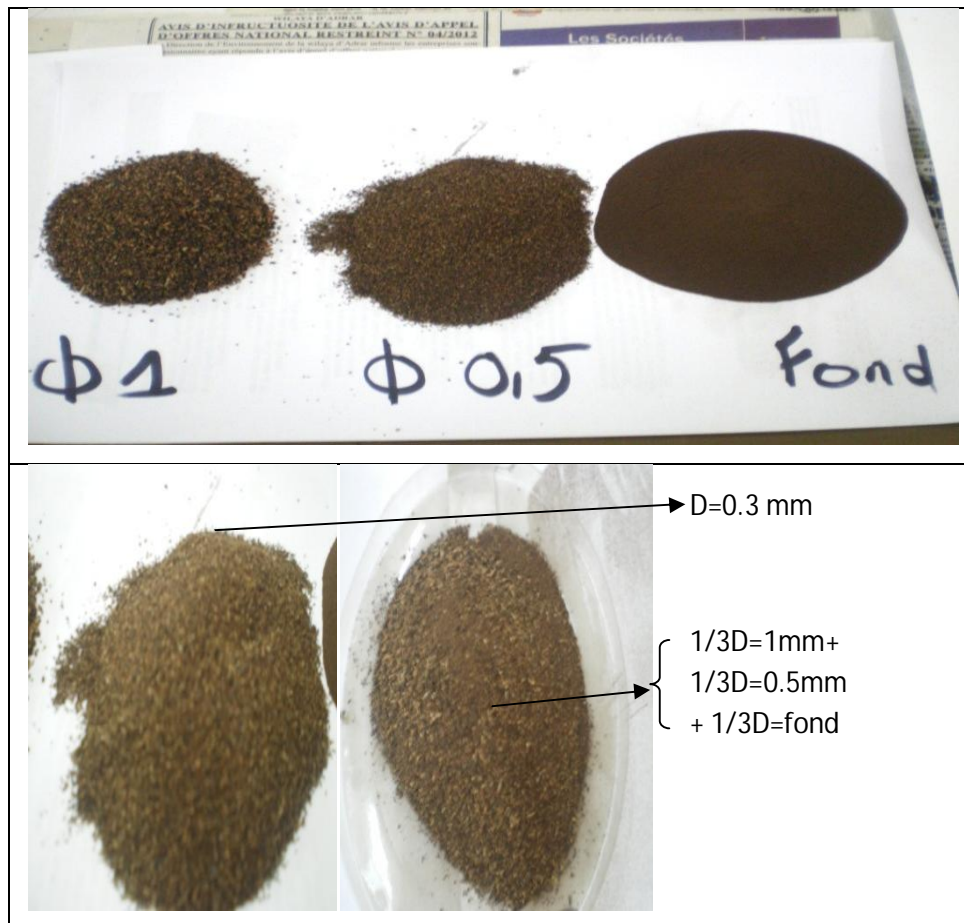


Figure 4.2.17 : granulométrie du liège

Et nous avons fait un mélange de grains de diamètres $D=1$ mm, $D=0.5$ mm et $D \leq 0.08$ mm avec des proportions calculés.

Le mode opératoire pour élaborer toutes ces éprouvettes est le suivant :

Après avoir préparé le moule et peser les quantités des matériaux, et mixer le tout, on verse le mélange (résine + durcisseur + charges) au milieu de la surface du moule. Après écoulement et étalement du mélange, on compacte manuellement à l'aide d'une raclette à dents qui permet de chasser l'excédent d'air et garantir une bonne répartition du mélange. Le démoulage est fait après 24 heures.



Figure 4.2.18 : Principales étapes d'élaboration des éprouvettes

(Résine époxy +Liège)

3) Compositions des éprouvettes

Les différents constituants des éprouvettes et les fractions volumiques et massiques des composants sont donnés dans les tableaux suivants :

notation	Type de composite	Dimension s	Composants	Volume	Densité	Quantités
F5%	Epoxy + charge (5% Fonte) + renfort (Mat)	300x300x2 mm	Epoxyde	171 cm ³	1.1 g/cm ³	144.2g
			Durcisseur			72.2g
			Fonte	9 cm ³	7.3 g/cm ³	75.5g
			Mat	900cm ²	450g/m ²	1 Tissu
F5%	Epoxy + charge (5% Fonte) + renfort (Mat)	280x230x2 mm	Epoxyde	122.4cm ³	1.1 g/cm ³	103.2g
			Durcisseur			51.6g
			Fonte	6.44cm ³	7.3 g/cm ³	54g
			Mat	644cm ²	450g/m ²	1 Tissu
F5%	Epoxy + charge (5% Fonte) + renfort (Mat)	100x400x2 mm	Epoxyde	76cm ³	1.1 g/cm ³	64.1g
			Durcisseur			32.05g
			Fonte	4 cm ³	7.3 g/cm ³	33.6g
			Mat	400 cm ²	450g/m ²	1 Tissu
F10%	Epoxy + charge (10% Fonte) + renfort (Mat)	300x300x2 mm	Epoxyde	162cm ³	1.1 g/cm ³	136.7g
			Durcisseur			68.35g
			Fonte	18 cm ³	7.3 g/cm ³	151.11g
			Mat	900cm ²	450g/m ²	1 Tissu
F10%	Epoxy + charge (10% Fonte) + renfort (Mat)	280x230x2 mm	Epoxyde	115.9cm ³	1.1 g/cm ³	97.75g
			Durcisseur			48.87g
			Fonte	12.88cm ³	7.3 g/cm ³	108.10g
			Mat	644cm ²	450g/m ²	1 Tissu
F10%	Epoxy + charge (10% Fonte) + renfort (Mat)	100x400x2 mm	Epoxyde	72cm ³	1.1 g/cm ³	60.72g
			Durcisseur			30.36g
			Fonte	8cm ³	7.3 g/cm ³	67.16g
			Mat	400cm ²	450g/m ²	1 Tissu
F15%	Epoxy + charge (15% Fonte) + renfort (Mat)	300x300x2 mm	Epoxyde	153cm ³	1.1 g/cm ³	129g
			Durcisseur			64.5g
			Fonte	27cm ³	7.3 g/cm ³	226.66g
			Mat	900cm ²	450g/m ²	1 Tissu
F15%	Epoxy + charge (15% Fonte) + renfort (Mat)	100x400x2 mm	Epoxyde	68cm ³	1.1 g/cm ³	57.34g
			Durcisseur			28.67g
			Fonte	12cm ³	7.3 g/cm ³	100.74g
			Mat	400cm ²	450g/m ²	1 Tissu

Notation	Type de composite	Dimensions	Composants	Volume	Densité	Quantités
Pb 5%	Epoxy + charge (5% Plomb) + renfort (Mat)	300x300x2mm	Epoxyde	171 cm ³	1.1 g/cm ³	144.2g
			Durcisseur			72.2g
			Plomb	9 cm ³	11.3 g/cm ³	101.97g
			Mat	900cm ²	450g/m ²	1 Tissu
Pb 5%	Epoxy + charge (5% Plomb) + renfort (Mat)	100x400x2mm	Epoxyde	76cm ³	1.1 g/cm ³	64.1g
			Durcisseur			32.05g
			Plomb	4 cm ³	11.3 g/cm ³	52.11g
			Mat	400 cm ²	450g/m ²	1 Tissu
PP 1tis	Epoxy + renfort (Polypropylène)	300x300x2mm	Epoxyde	171cm ³	1.1 g/cm ³	144.21g
			Durcisseur			72.1g
			Polypropylène	900cm ²	0.9g/cm ³	1 Tissu
PP 2tis	Epoxy + renfort (Polypropylène)	300x300x2mm	Epoxyde	162cm ³	1.1 g/cm ³	129g
			Durcisseur			64.54g
			Polypropylène	900cm ²	0.9g/cm ³	2 Tissus
PP 2tis	Epoxy + renfort (Polypropylène)	280x230x2mm	Epoxyde	115.9cm ³	1.1 g/cm ³	97.75g
			Durcisseur			48.87g
			Polypropylène	644cm ²	0.9g/cm ³	2 Tissus

Tableau 4.9 : Composition des matériaux composites étudiés

notation	Type de composite	Dimensions	Composants		Volume	Densité	Quantités
L15%	Epoxy + charge (15% Liège D≤0.08mm)	300x300x 2mm	Epoxyde		153 cm ³	1.1 g/cm ³	145.86 g
			Durcisseur				72.93 g
			Liège		27 cm ³	0.24 g/cm ³	8.43 g
L15%	Epoxy + charge (15% Liège D≤0.08mm)	280x230x 2mm	Epoxyde		109.48cm ³	1.1 g/cm ³	104.36 g
			Durcisseur				52.18 g
			Liège		19.32 cm ³	0.24 g/cm ³	6.03 g
L20%	Epoxy + charge (20% Liège D≤0.08mm)	300x300x 2mm	Epoxyde		144 cm ³	1.1 g/cm ³	137.28 g
			Durcisseur				68.64 g
			Liège		36 cm ³	0.24g/cm ³	11.23 g
L20%	Epoxy + charge (20% Liège D≤0.08mm)	280x230x 2mm	Epoxyde		103cm ³	1.1 g/cm ³	98.22 g
			Durcisseur				49.12 g
			Liège		25.76 cm ³	0.24g/cm ³	8.1 g
L20% (D1, D0.5, D0.3)	Epoxy + charge (20% Liège pour D _i =1, 0.5, 0.3mm)	300x300x 2mm	Epoxyde		144 cm ³	1.1 g/cm ³	137.28 g
			Durcisseur				68.64 g
			Liège		36 cm ³	0.24g/cm ³	11.23 g
Lv20%	Epoxy + charge (20% Liège varié)	300x300x 2mm	Epoxyde		144 cm ³	1.1 g/cm ³	137.28 g
			Durcisseur				68.64 g
			Liège	D ₁ =1mm	36 cm ³	0.24g/cm ³	D ₁ = 3.75g
				D ₂ =0.5mm			D ₂ = 3.75g
D ₃ =0.08 mm	D ₃ = 3.75g						
Lv20%	Epoxy + charge (20% Liège varié)	280x230x 2mm	Epoxyde		103cm ³	1.1 g/cm ³	137.28 g
			Durcisseur				68.64 g
			Liège	D ₁ =1mm	25.76 cm ³	0.24g/cm ³	D ₁ = 3 g
				D ₂ =0.5mm			D ₂ = 3 g
				D ₃ =0.08 mm			D ₃ = 3 g

Tableau 4.10 : Composition des matériaux composites à matrice chargée

(Charge naturelle)

4.3. Association BETON-COMPOSITE

Dans cette étape nous allons coller les plaques en composites sur les dalles et les prismes en béton, pour ce faire nous devons suivre les étapes suivantes :

Pour assurer une adhérence maximale du composite, après durcissement du béton, un nettoyage des faces inférieures a été réalisé afin d'enlever les poussières et les aspérités éventuelles (préparation du support béton).

Préparation du support selon la norme (NF P 74-203/DTU 59-3)

- Les éprouvettes doivent avoir au moins 28jours d'âge.
- Les supports doivent être secs et propres.

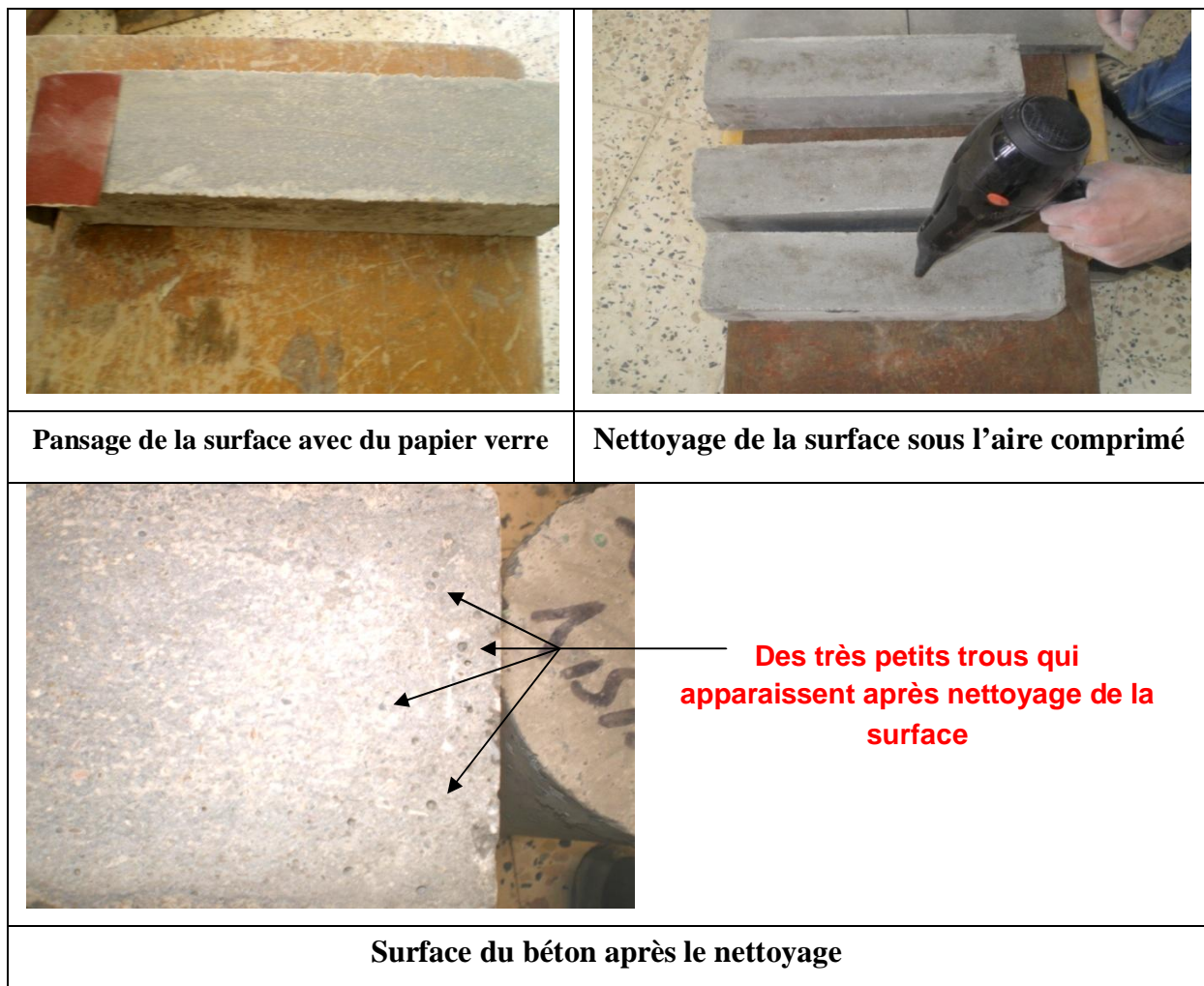


Figure 4.3.1 : Préparation des supports béton

- Nettoyer les surfaces des éprouvettes en béton à l'aide du papier verre pour se débarrasser des particules non adhérentes.
- Passer les éprouvettes sous l'air comprimé afin d'enlever la poussière et les petites particules sur les supports.
- Préparer une quantité de la résine et le durcisseur (2/3A+1/3B).
- Appliquer une couche du mélange sur l'éprouvette en béton et une autre couche sur l'éprouvette en composite.
- Poser le composite sur l'éprouvette en béton et appliquer une petite pression pour avoir un bon contact entre les deux éléments.

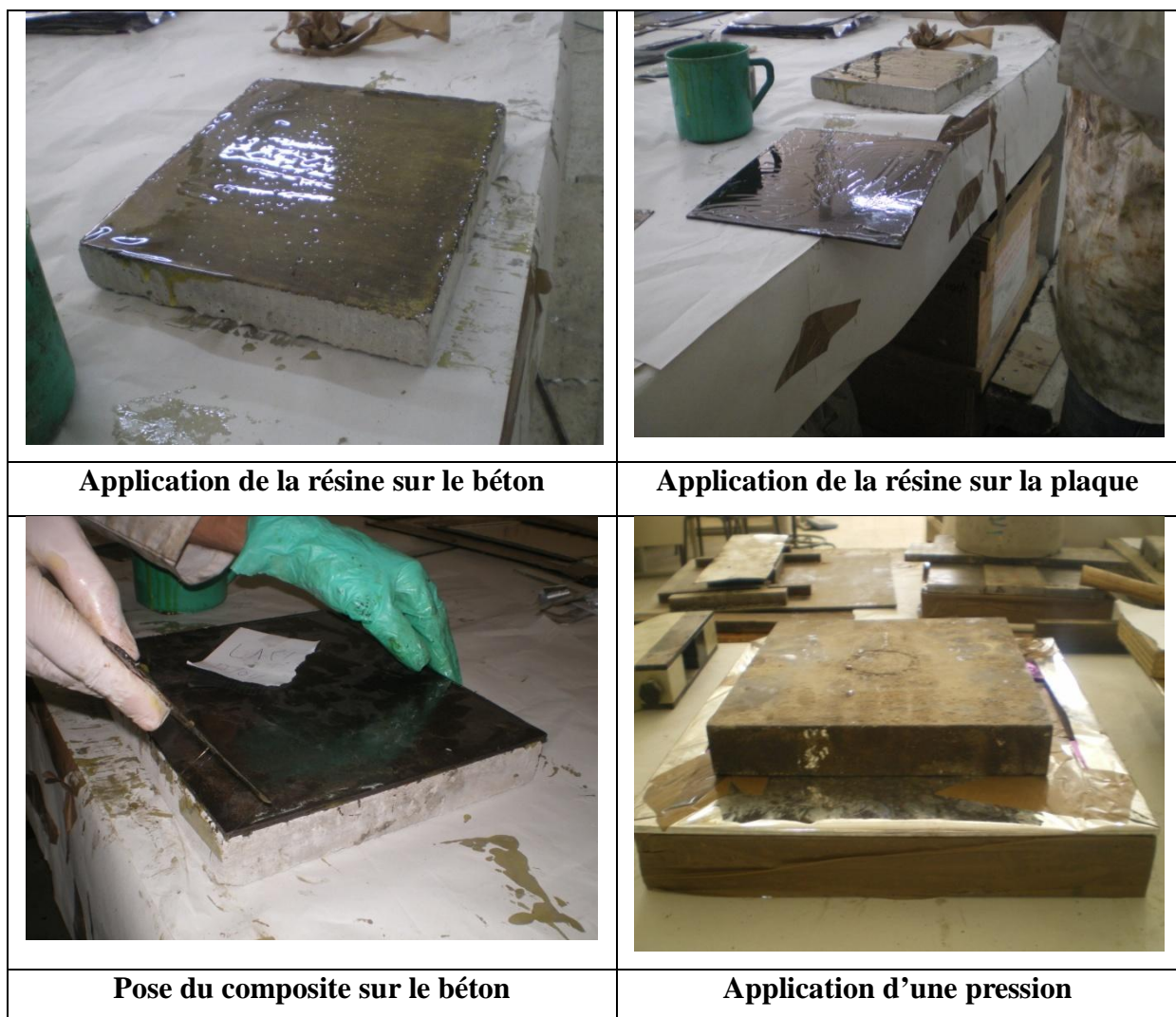


Figure 4.3.2 : Principales étapes de renforcement du béton par collage du matériau composite

Les mêmes étapes ont été suivies pour la préparation de toutes les éprouvettes renforcées (dalles et prismes).

Tableau 4.11 : le nombre d'éprouvettes réalisées ainsi que les composants des spécimens et leurs destinations

Appellations	Eprouvettes En Béton (cm)	Type du renfort et charges selon les essais prévus				
		Matrice	renfort	Charge		Type d'essai
				Type	vol%	
Dalle F5%	3 dalles 28x23x3	époxy	1 Mat	Fonte	5%	poinçonnement
Dalle F5%	3 dalles 28x23x3	époxy	1 Mat	Fonte	5%	Choc
Dalle F10%	3 dalles 28x23x3	époxy	1 Mat	Fonte	10%	poinçonnement
Dalle F10%	3 dalles 28x23x3	époxy	1 Mat	Fonte	10%	Choc
Dalle 2 PP 2t	3 dalles 28x23x3	époxy	2 PP	/	/	poinçonnement
Dalle 2 PP 2t	3 dalles 28x23x3	époxy	2 PP	/	/	Choc
Dalle L15%	3 dalles 28x23x3	époxy	/	Liège	15%	poinçonnement
Dalle L15%	3 dalles 28x23x3	époxy	/	Liège	15%	Choc
Dalle L20%	3 dalles 28x23x3	époxy	/	Liège	20%	poinçonnement
Dalle L20%	3 dalles 28x23x3	époxy	/	Liège	20%	Choc
Dalle Lv20%	3 dalles 28x23x3	époxy	/	Liège varié	20%	poinçonnement
Dalle Lv20%	3 dalles 28x23x3	époxy	/	Liège varié	20%	Choc
Dalle témoin	3 dalles 28x23x3	/	/	/	/	poinçonnement
Dalle témoin	3 dalles 28x23x3	/	/	/	/	Choc
Prisme F5%	3 prismes 10x10x40	époxy	1 Mat	Fonte	5%	Flexion
Prisme F10%	3 prismes 10x10x40	époxy	1 Mat	Fonte	10%	Flexion
Prisme F15%	3 prismes 10x10x40	époxy	1 Mat	Fonte	15%	Flexion
Prisme Pb5%	3 Prismes 10x10x40	époxy	1 Mat	Plomb	5%	Flexion
Prisme témoin	3 Prismes 10x10x40	/	/	/	/	Flexion
Cylindre	3 Cylindres	/	/	/	/	compression

4.4. Essais Mécaniques

4.4.1. Détermination de la résistance mécanique en compression uni-axiale du béton

Les spécimens utilisés pour déterminer la résistance mécanique en compression du béton étudiés sont des éprouvettes cylindriques de diamètre 10 cm et de hauteur 20 cm.

Le test de compression est effectué sur une presse hydraulique équipée d'une cellule de force d'une capacité 5000 kN, asservie de manière hydraulique. L'essai s'effectue avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s soit 5 kN/s selon la norme NF 12390-3.

Cette presse dispose d'un capteur de force très précis, elle nous donne la force et la contrainte maximales.

L'opération consiste à mettre l'éprouvette dans la presse et de mettre en place deux comparateurs, un pour mesurer les déformations longitudinales et l'autre pour mesurer les déformations transversales, après la mise en marche de la machine on mesure les déformations d'un pas de 10KN.

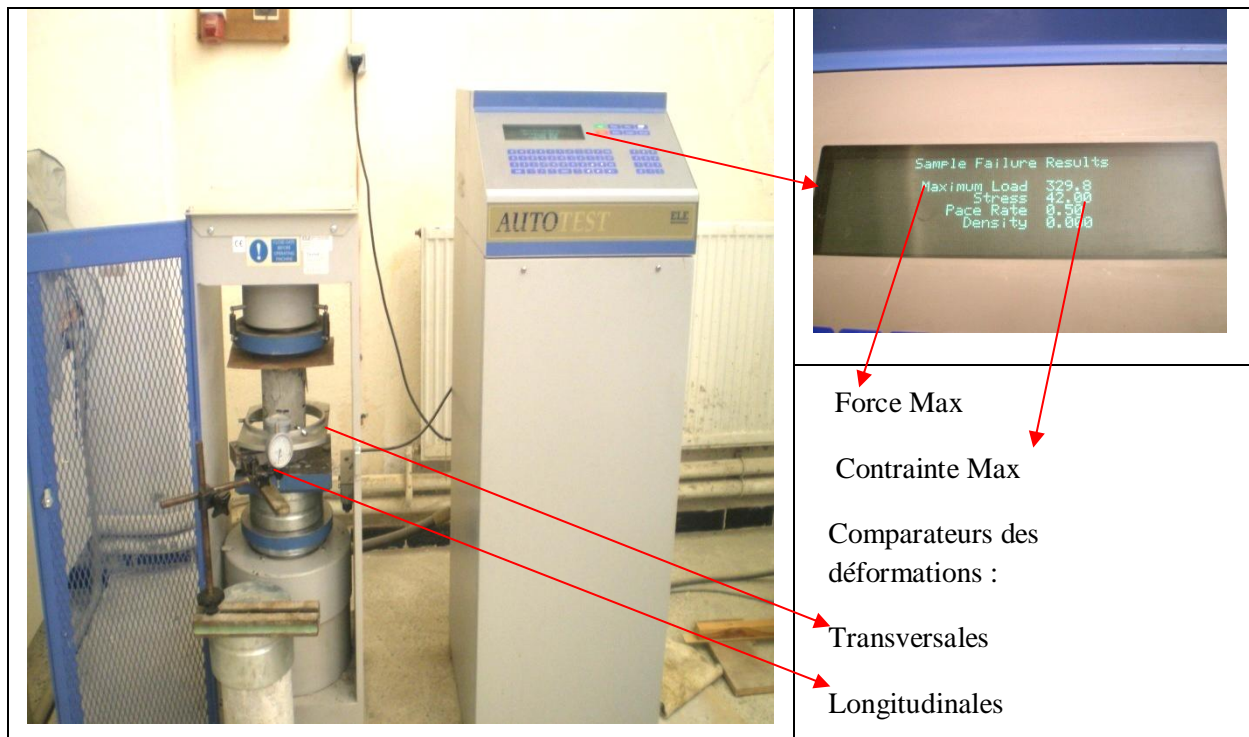


Figure 4.4.1 : machine d'essai de compression et système d'acquisition de données

La résistance caractéristique moyenne du béton à 28 jours trouvée lors de l'écrasement des éprouvettes est de 34.9 MPa.

Courbe contrainte déformation obtenue est la suivante

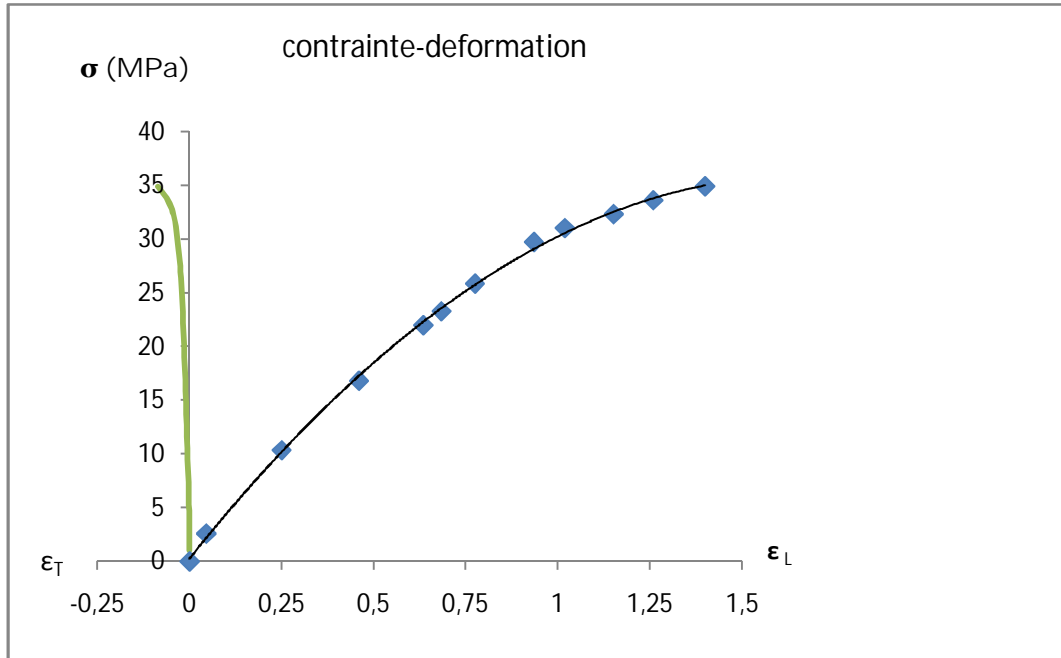


Figure 4.4.2 : Courbe de contrainte déformation du béton en compression

4.4.2 Essai de traction sur éprouvettes en matériaux composites

La connaissance des caractéristiques mécaniques d'un matériau composite et sa structure permettent de comprendre, voir de prédire son comportement en service. Toute conception d'une nouvelle structure nécessite une connaissance du comportement mécanique des matériaux utilisés ainsi que leurs propriétés mécaniques (module de Young, le coefficient de poisson, contraintes maximale, charge de rupture).

Afin de caractériser les éprouvettes élaborées nous avons eu recours aux essais de traction uni-axiale

Les éprouvettes soumises aux essais sont découpées dans les plaques de dimensions 300x300x2 mm prévue pour la caractérisation de chaque variante

Les dimensions des éprouvettes utilisées pour les 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 : $10 < b \leq 15\text{mm}$ $h \leq 5\text{mm}$.

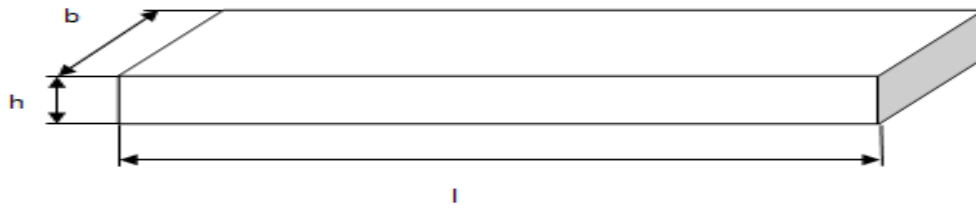
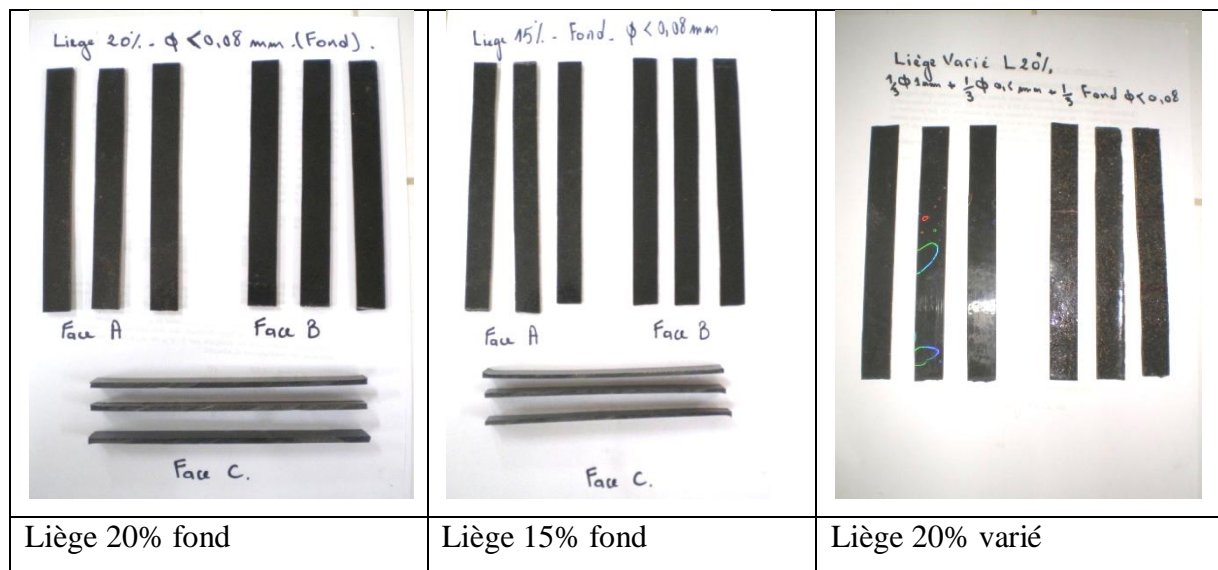


Figure 4.4.3 : Géométrie des éprouvettes

Les dimensions finales des éprouvettes sont :

Epaisseur	Longueur	Largeur
2 mm	140mm	14 mm

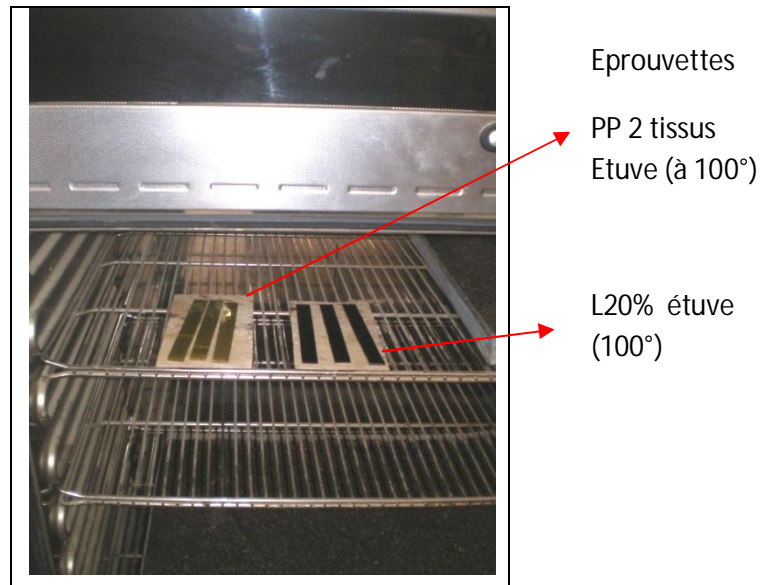
Les figures suivantes répertorient les différents types d'éprouvettes soumises à la traction :



<p>Liège 20% D=1mm</p>	<p>Liège 20% D=0.5mm</p>	<p>Liège 20% D=0.3mm</p>
<p>PP 2 tissus</p>	<p>PP 1 tissu</p>	<p>PP 2 tissus (étuve 100°)</p>
<p>Fonte (5%, 10% , 15%)+ Mat</p>	<p>PP2 tissus en rupture</p>	

Figures 4.4.4 : Aspect de quelques éprouvettes élaborées

Les éprouvettes nommées **F10%**, **F15%**, **L15%**, **L20%**, **L20%D0.5mm**, et **PP2tissus** ; ont été mise à l'étuve sous une température de 100°C pendant 10 minutes.



Figures 4.4.5: Conservation des éprouvettes dans l'étuve

A. Machine d'essai

Les essais de traction sur éprouvettes sont réalisés sur une machine de marque IBERTEST (figure 4.4.6). 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. La machine est pilotée à vitesse de traverse constante fixée à 10 mm/min soit 0.1KN/s. pour assurer une bonne reproductibilité des résultats, six éprouvettes au moins sont testées pour chaque série de test.



Figure 4.4.6 : Machine d'essai IBERTEST

B. Résultats des essais de traction et interprétation

- Les résultats obtenus lors des essais de traction sont : les forces maximales et les résistances à la traction de chaque éprouvette. Les résultats présentés dans les tableaux suivants sont les moyennes calculées pour chaque série de six éprouvettes.

Tableau 4.12 : Résultats des essais de traction

Eprouvettes	F5%	F10%	F15%	F10% étuve	F15% étuve	L15%	L20%	Lv20%	L20% D0,3mm
Résistance traction (MPa)	41,4	36,2	35,4	37,55	36,36	32,96	45,86	33,63	42
Force max(KN)	1,16	1,015	0,99	1,055	1,016	0,92	1,28	0,94	1,16

Eprouvettes	L20% D0,5mm	L20% D1mm	L15% étuve	L20% étuve	L20% D0,5mm étuve	PP 1tissu	PP 2 tissus	PP 2 tissus étuve	Pb 5%
Résistance traction (MPa)	31,76	34	36,6	49,33	38,86	42,5	53,2	77,75	23,3
Force max(KN)	0,89	0,95	1,026	1,38	1,146	1,186	1,49	2,18	0,65

➤ Courbes force-déplacement des différentes éprouvettes

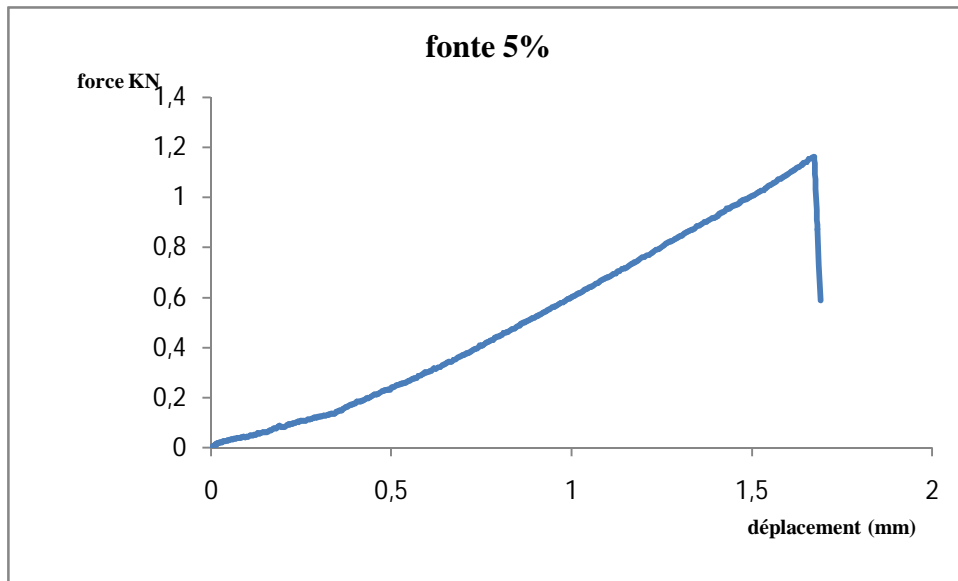


Figure 4.4.7 : Courbe Force déplacement fonte 5%

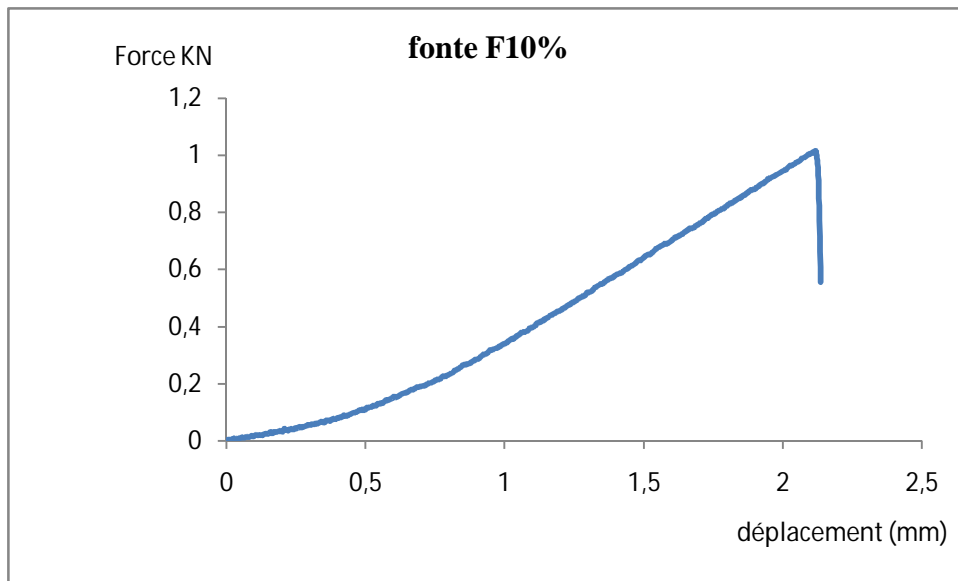


Figure 4.4.8 : Courbe Force déplacement fonte 10%

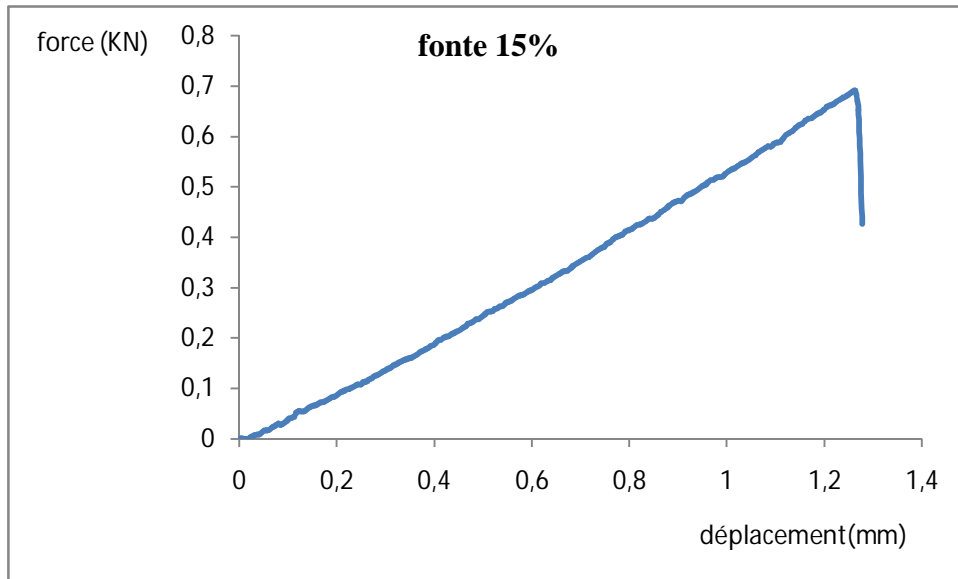


Figure 4.4.9 : Courbe Force déplacement fonte 15%

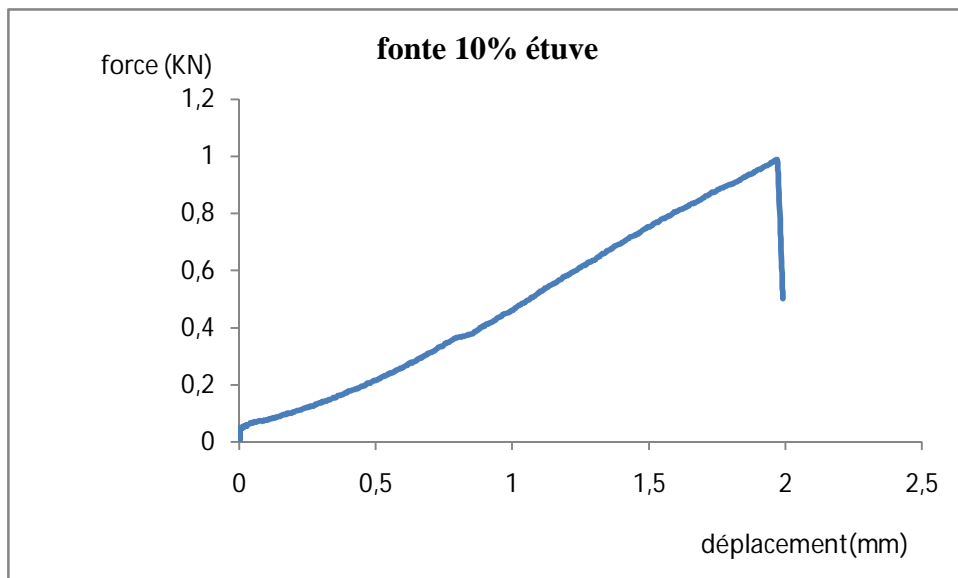


Figure 4.4.10 : Courbe Force déplacement fonte 10% étuve

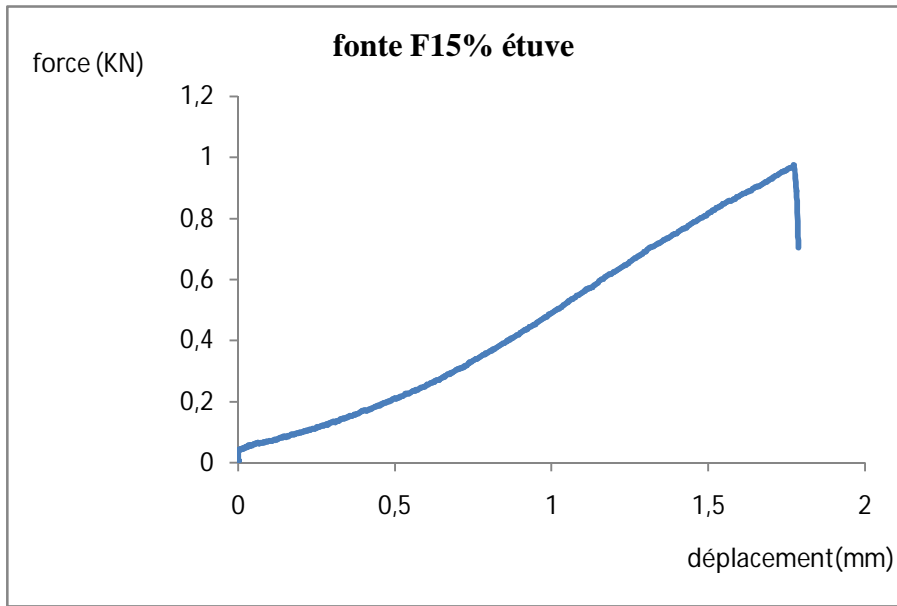


Figure 4.4.11 : Courbe Force déplacement fonte 15% étuve

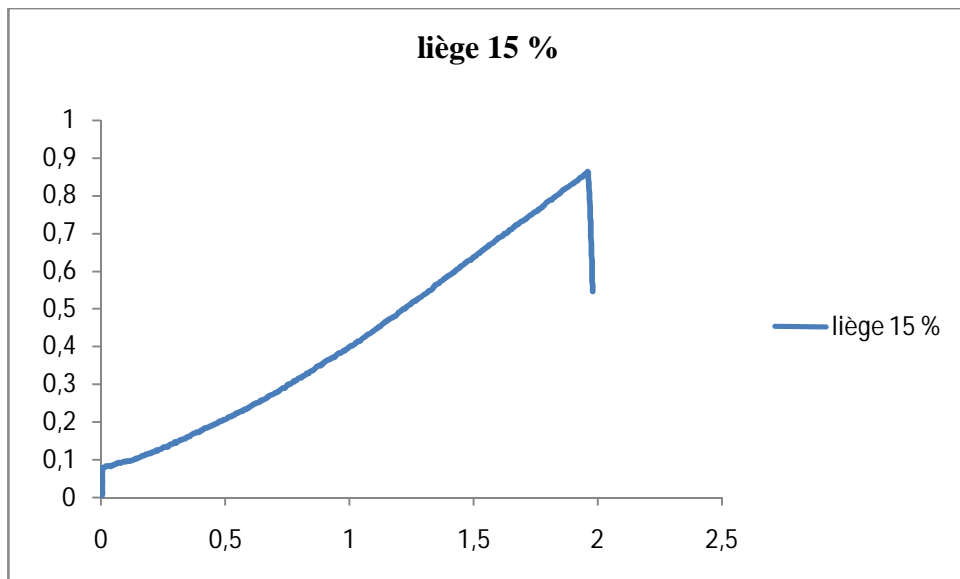


Figure 4.4.12 : Courbe Force déplacement Liège 15%

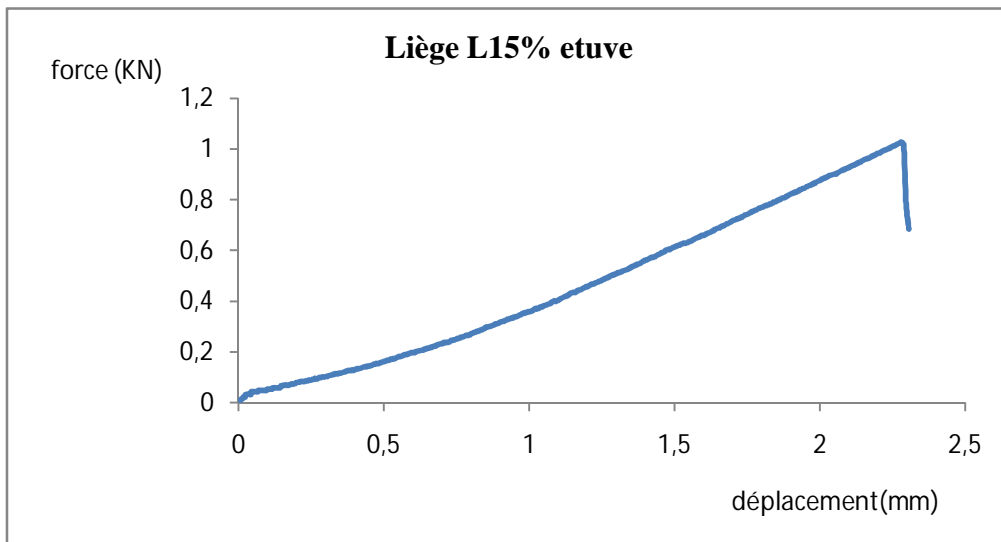


Figure 4.4.13 : Courbe Force-déplacement Liège 15% étuve

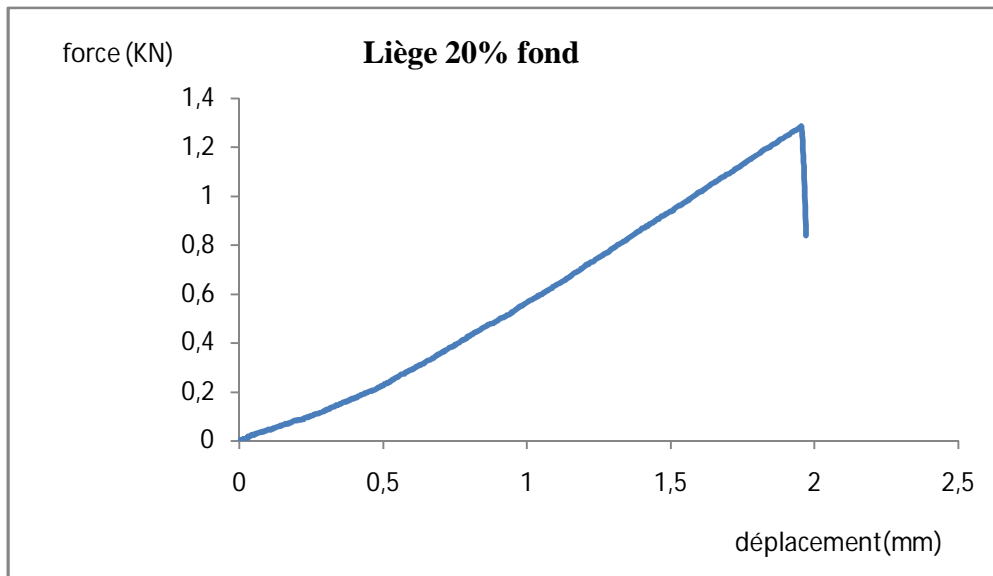


Figure 4.4.14 : Courbe Force-déplacement Liège 20%

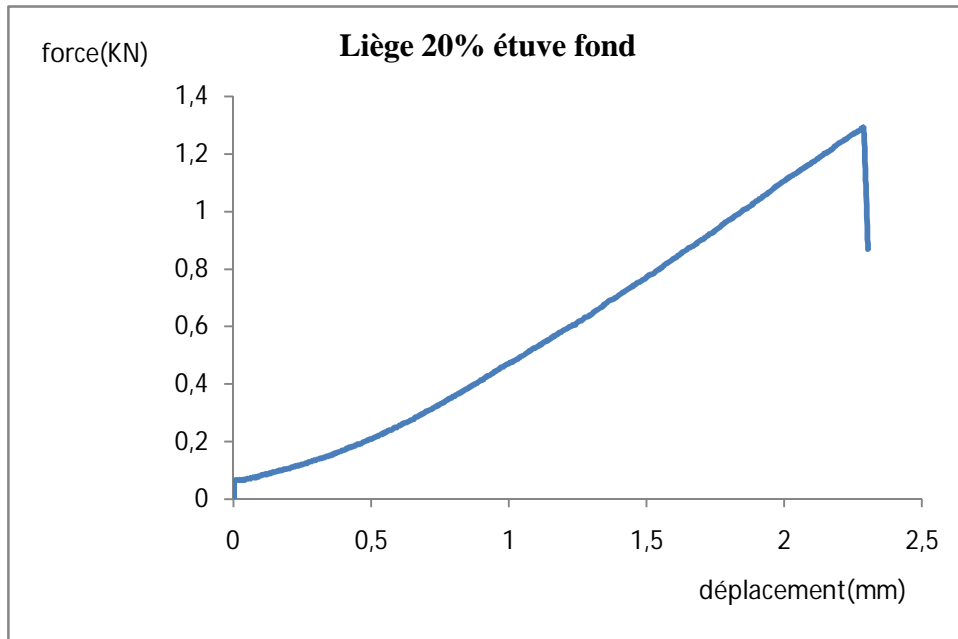


Figure 4.4.15: Courbe Force-déplacement Liège 20% étuve

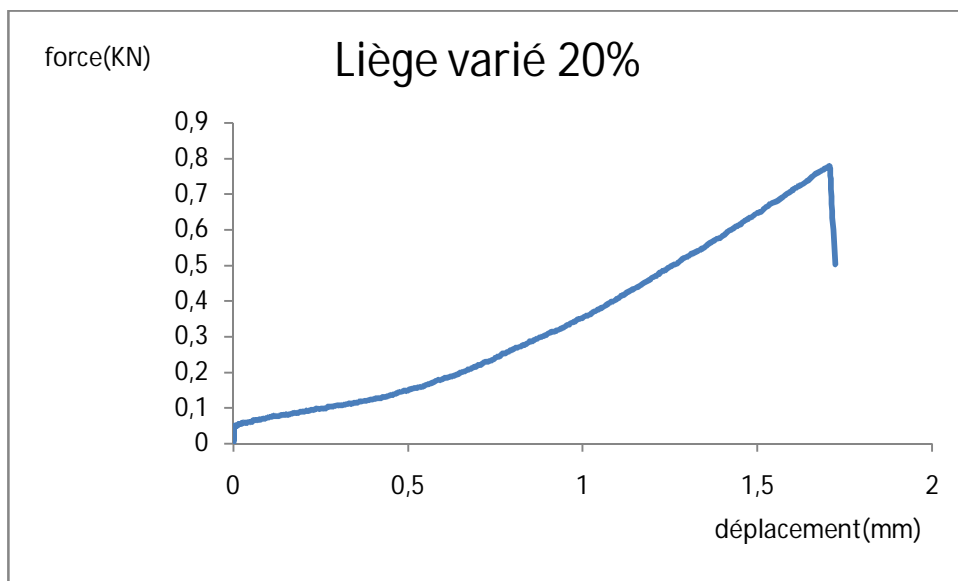


Figure 4.4.16: Courbe Force-déplacement Liège varié Lv20%

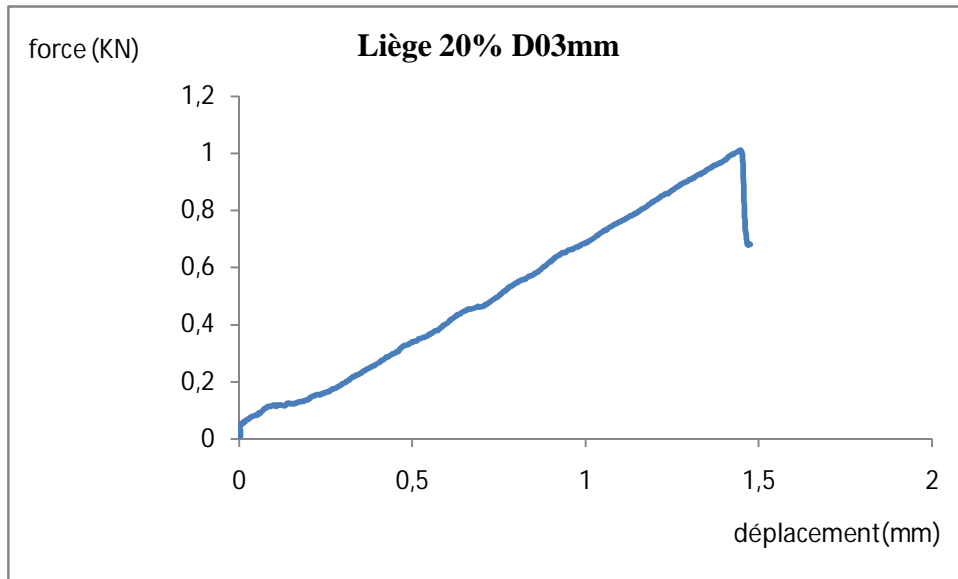


Figure 4.4.17: Courbe Force-déplacement Liège L20% D0.3mm

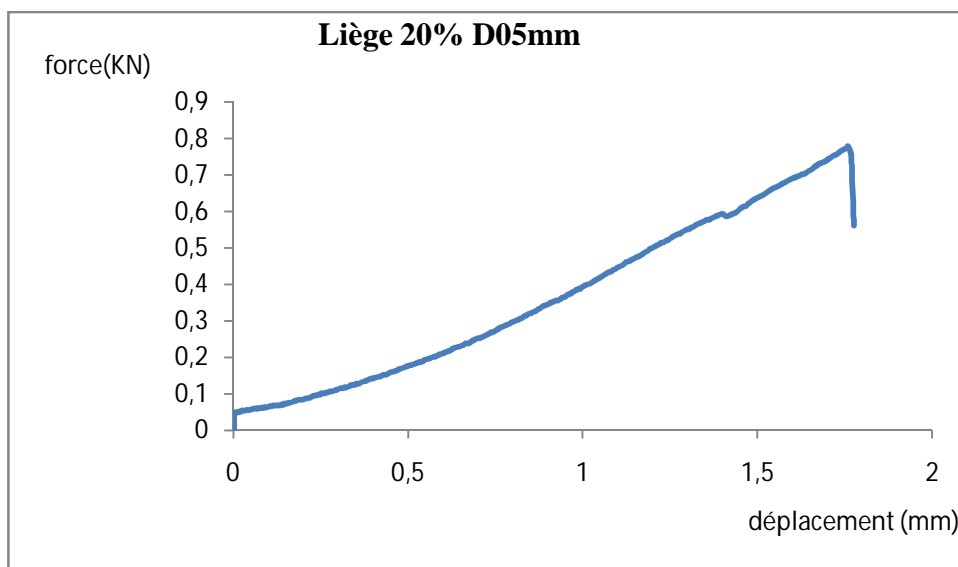


Figure 4.4.18: Courbe Force-déplacement Liège L20% D0.5mm

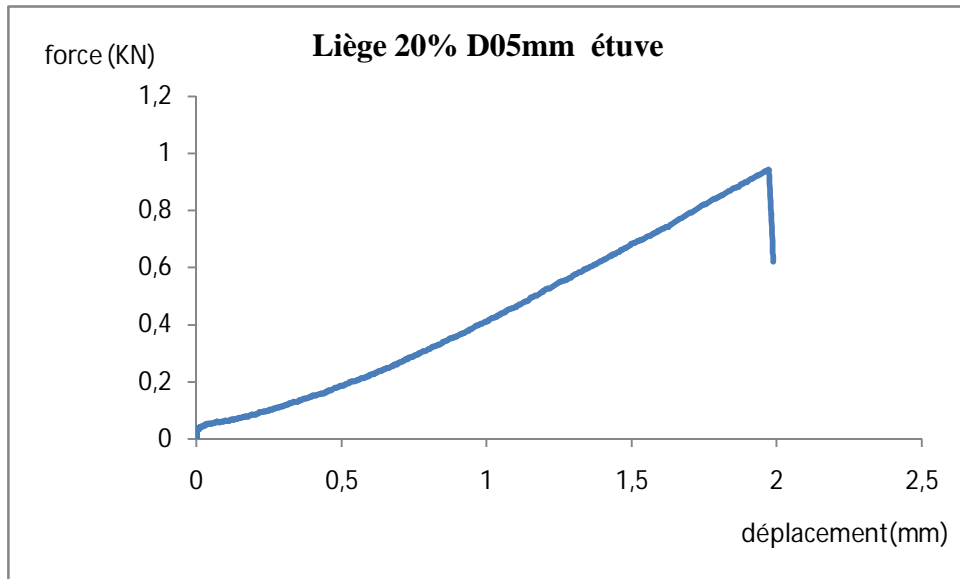


Figure 4.4.19: Courbe Force-déplacement Liège L20% D0.5mm étuve

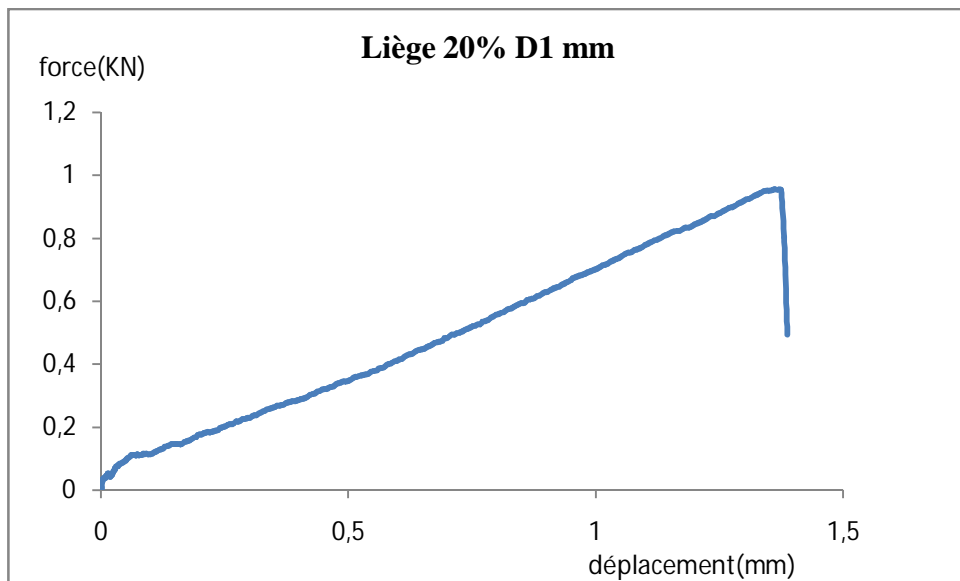


Figure 4.4.20: Courbe Force-déplacement Liège L20% D 1mm

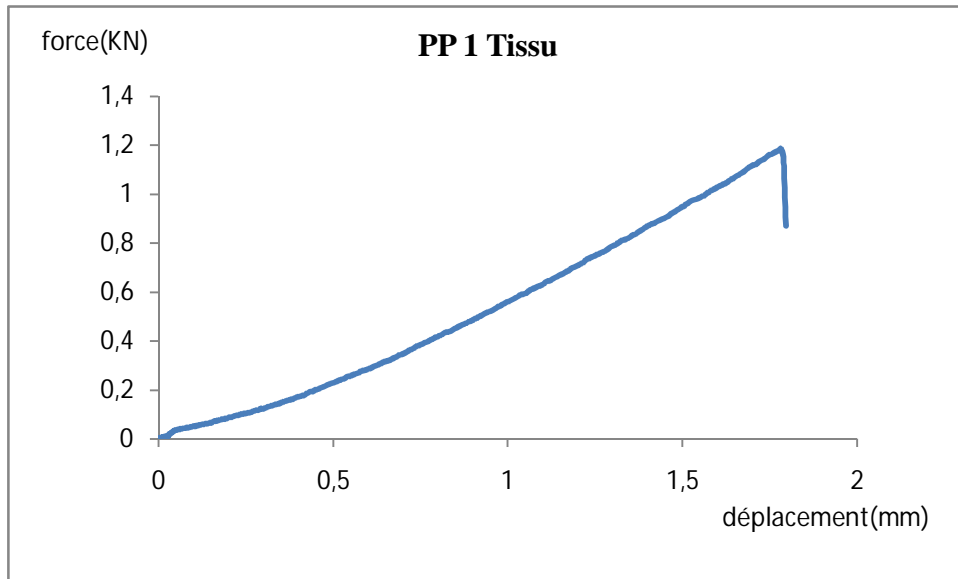


Figure 4.4.21: Courbe Force-déplacement polypropylène PP 1 tissu

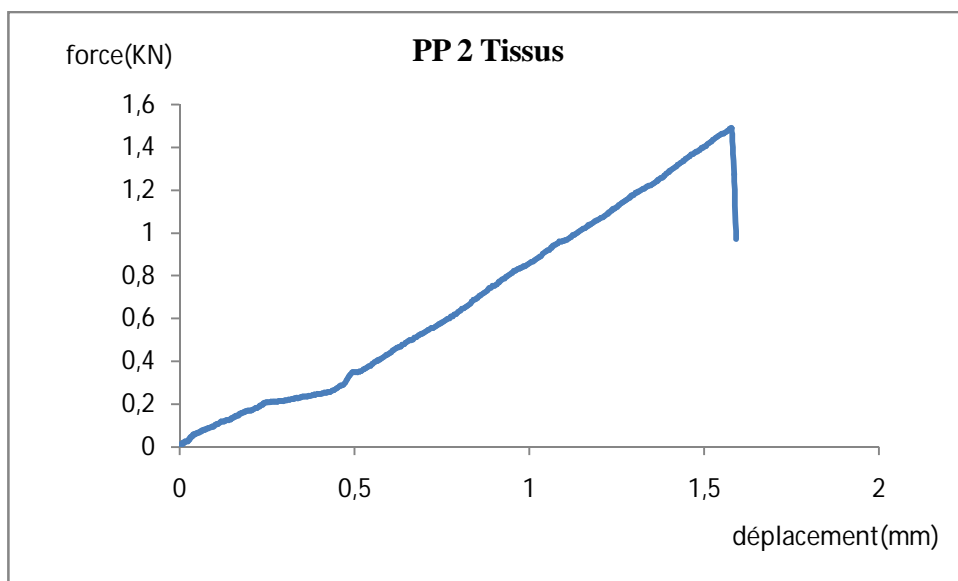


Figure 4.4.22: Courbe Force-déplacement polypropylène PP 2 Tissus

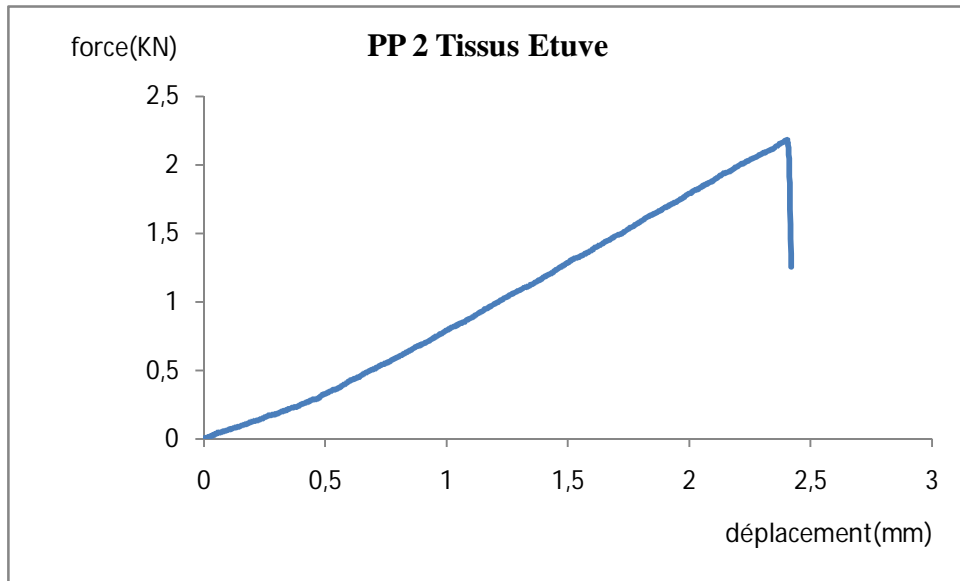


Figure 4.4.23: Courbe Force-déplacement polypropylène PP 2 Tissus étuve

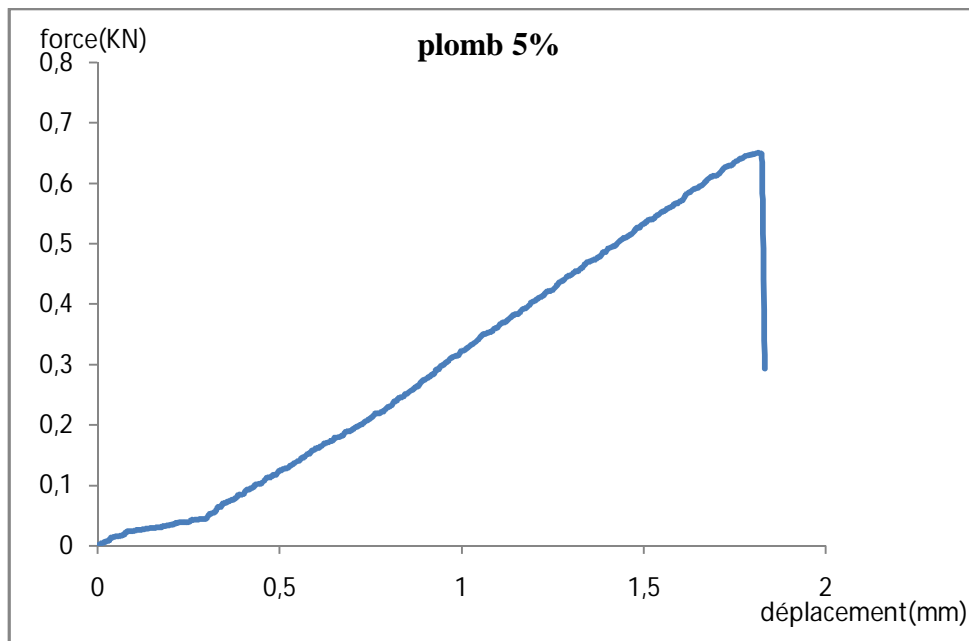


Figure 4.4.24 Courbe Force-déplacement Plomb 5%

L'allure des courbes montrées précédemment nous permet de conclure ce qui suit :

Le comportement des éprouvettes testées sous un effort de traction uni-axiale est fragile pour toutes les variantes.

Toutes les courbes ont une allure qui est très proche d'une droite et qui se caractérise par une valeur maximale au pic, d'où le comportement élastique de ces éprouvettes et qui ne comportent pas de domaine plastique.

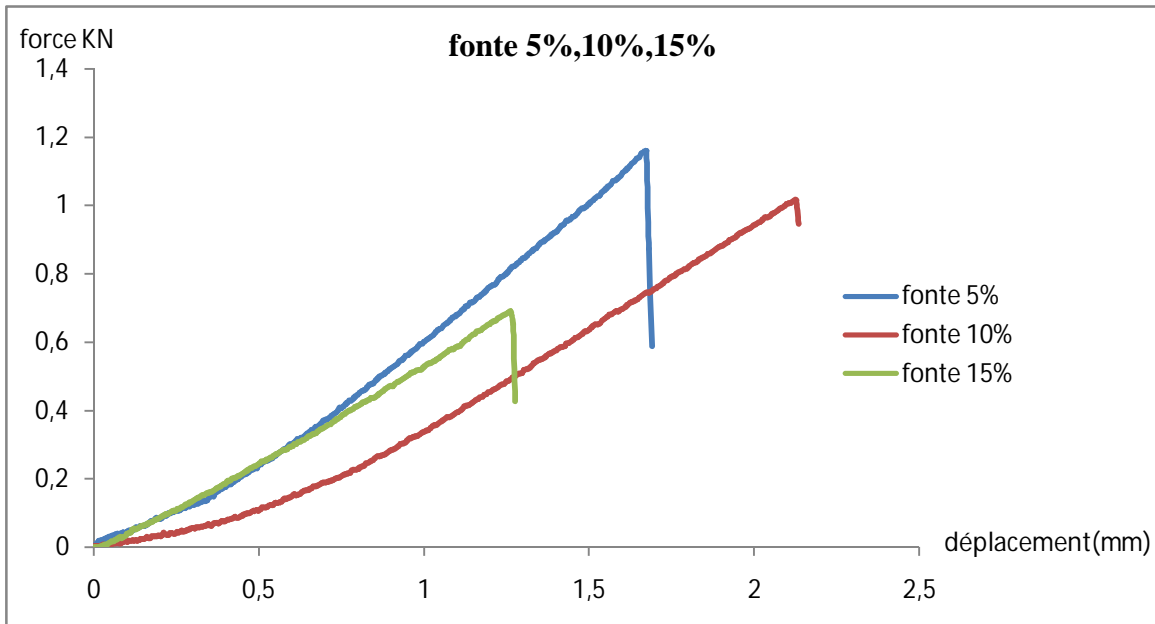


Figure 4.4.25: Courbe de comparaison Force-déplacement fonte 5% ,10% et 15%

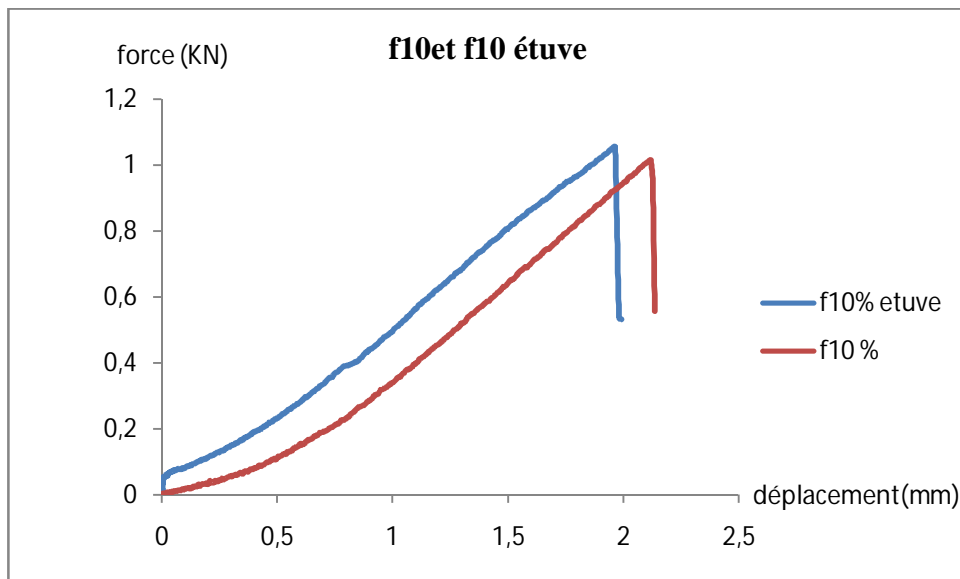


Figure 4.4.26: Courbe de comparaison Force-déplacement f10% et f10étuve

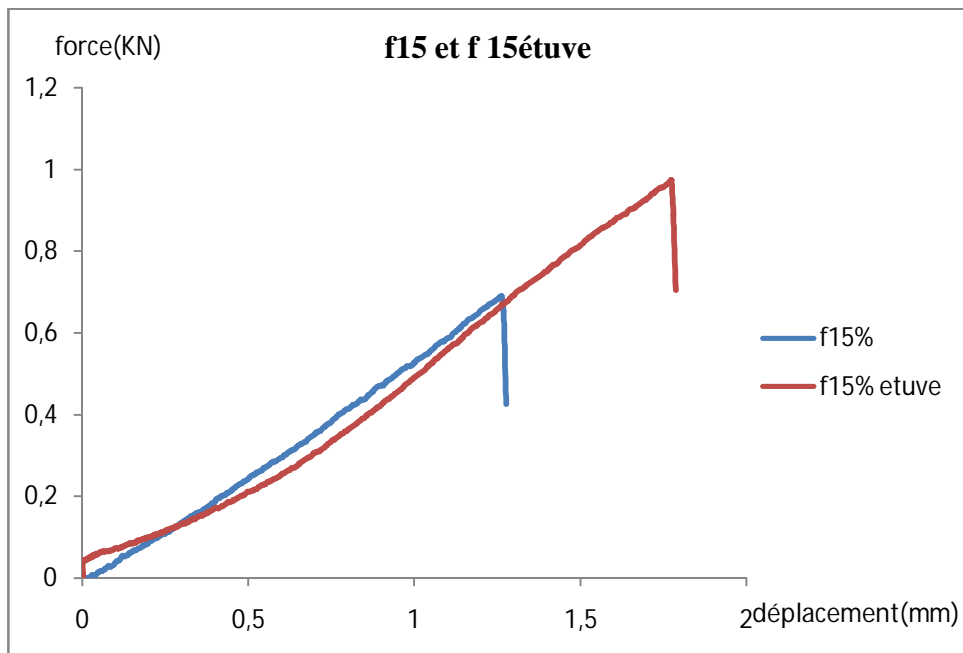


Figure 4.4.27: Courbe de comparaison Force-déplacement f15% et f15étuve

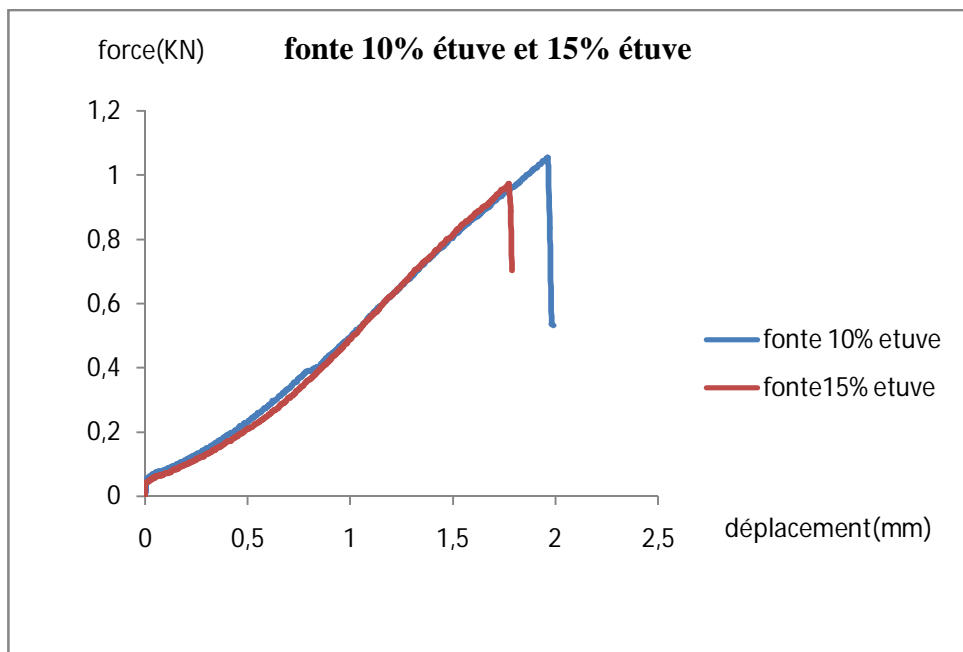


Figure 4.4.28: Courbe de comparaison Force-déplacement f10% étuve et f15étuve

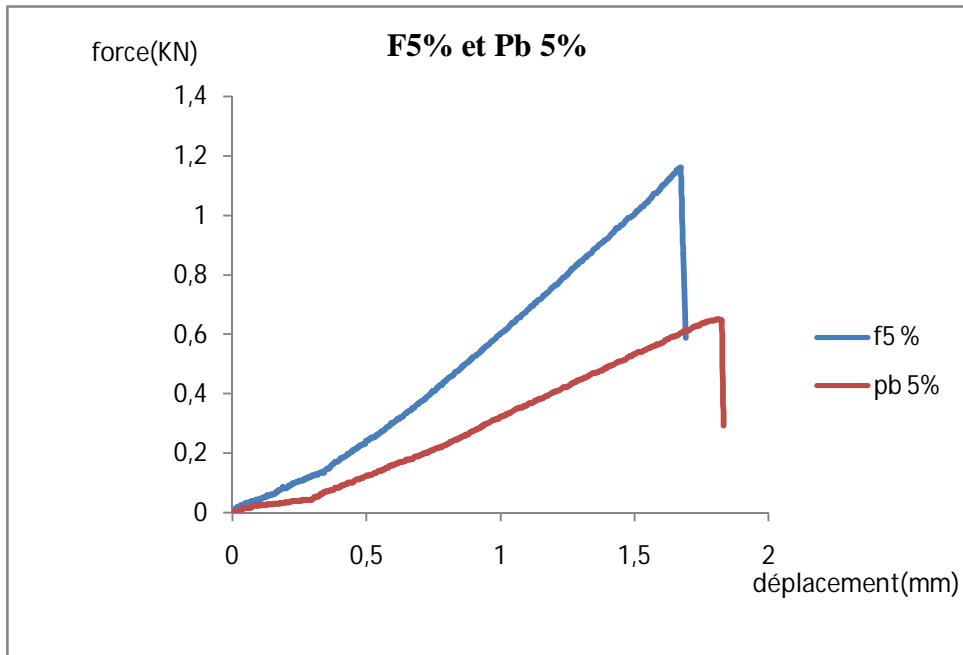


Figure 4.4.29: Courbe de comparaison Force-déplacement f5% et

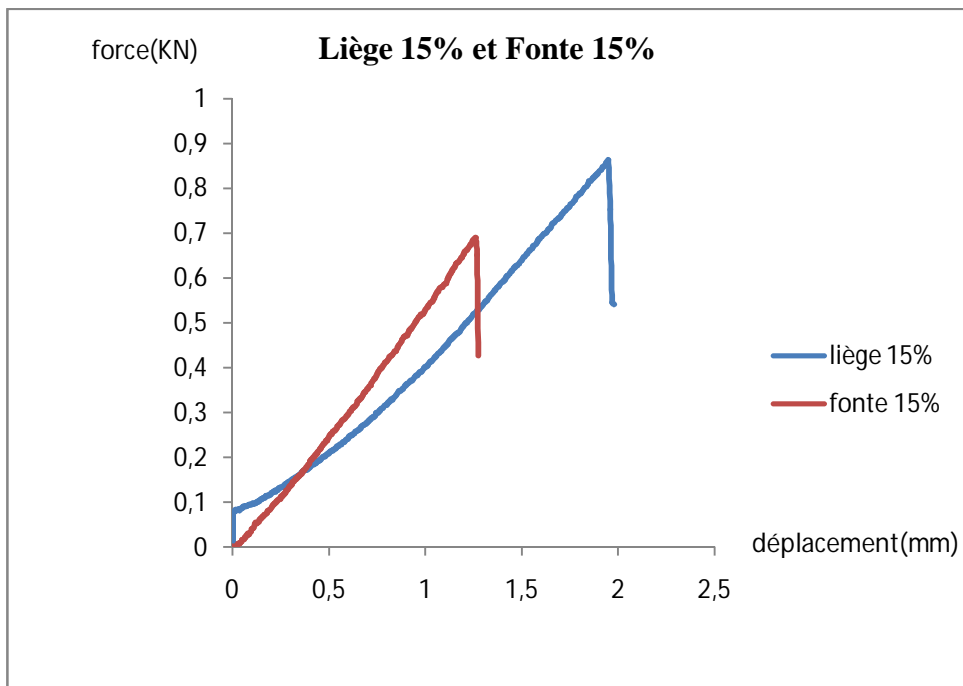


Figure 4.4.30 : Courbe de comparaison Force-déplacement Liège15% et fonte15%

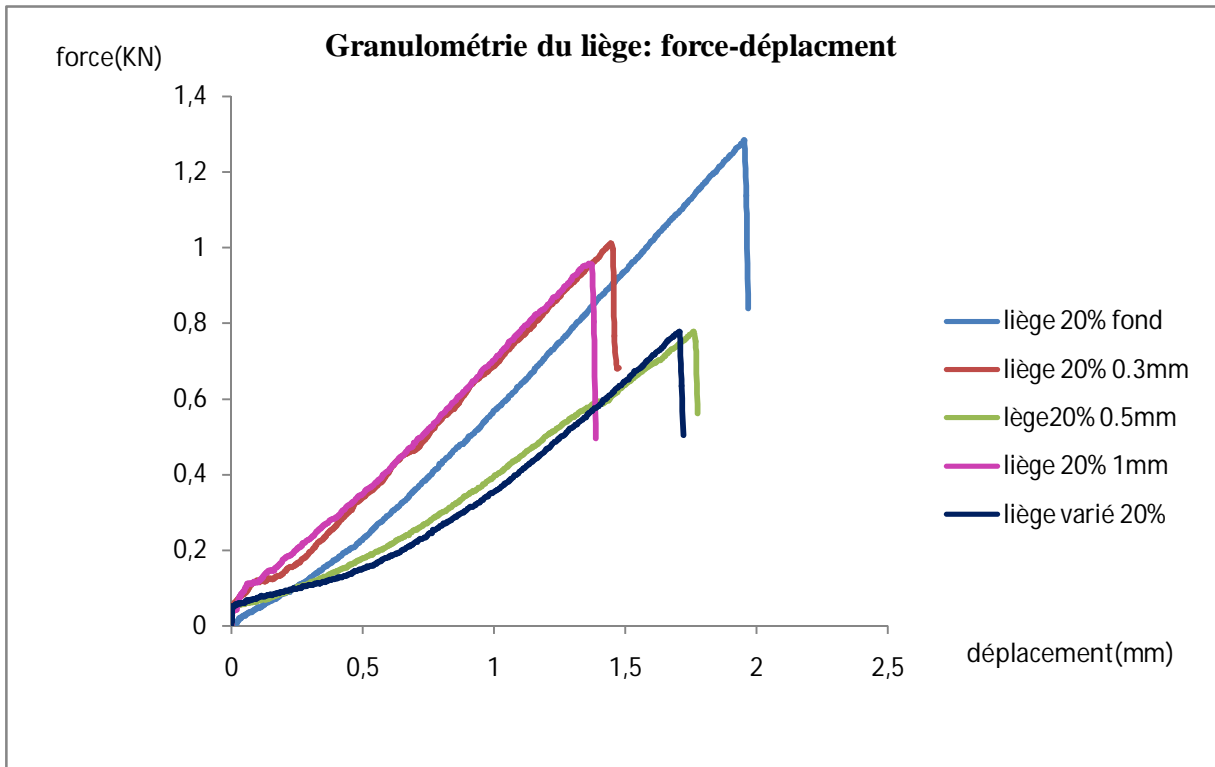


Figure 4.4.31. Courbe de comparaison Force-déplacement selon la granulométrie du liège

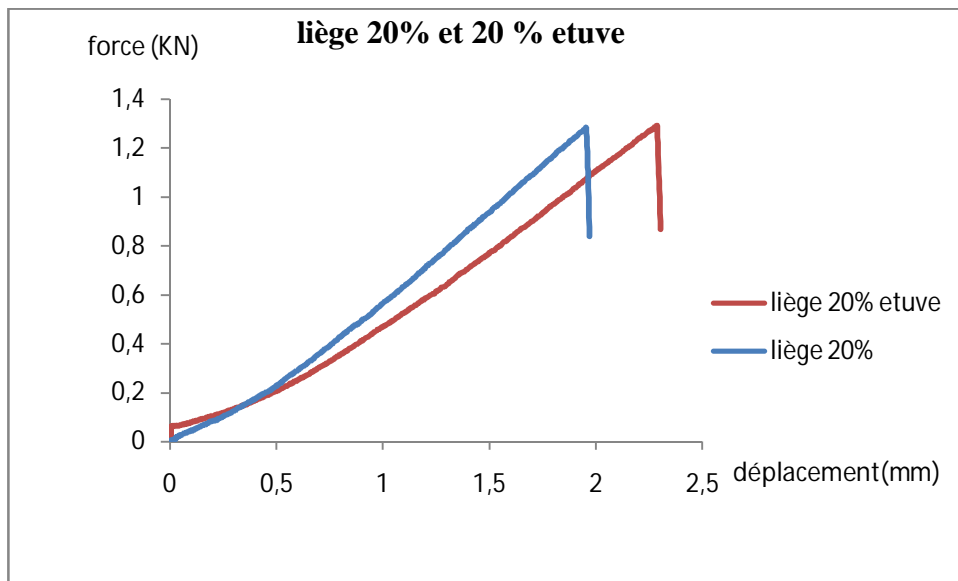


Figure 4.4.32. Courbe de comparaison Force-déplacement Liège : 20% et 20% étuve

La variation de la résistance de la variante L20% soumise à une température de 100° n'est pas importante car la polymérisation des éprouvettes en liège nécessite une durée plus longue du fait que le liège est un bon isolant thermique.

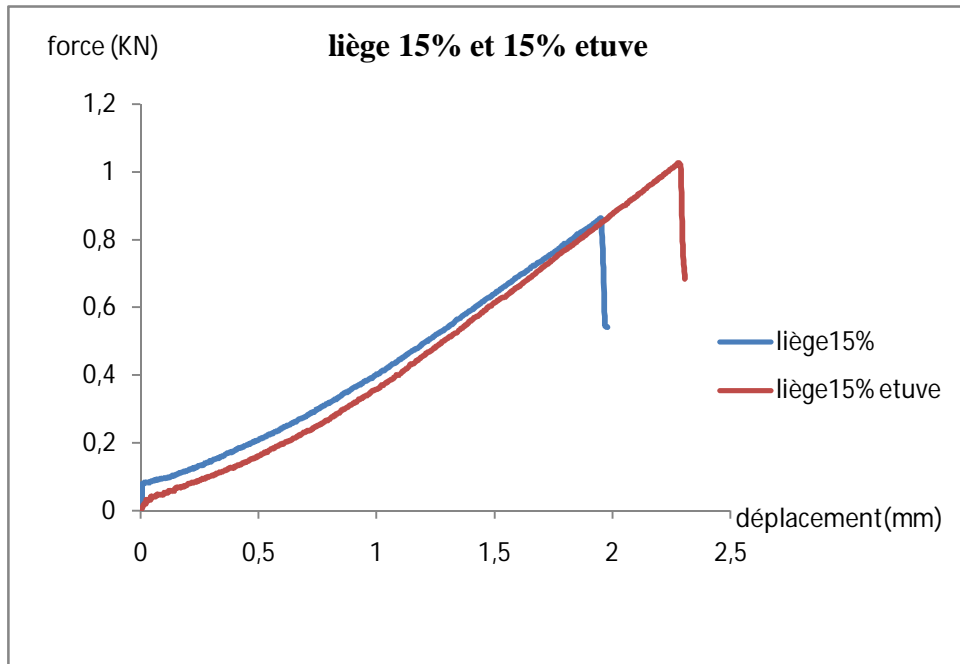


Figure 4.4.33. Courbe de comparaison Force-déplacement Liège : 15% et 15% étuvé

La variation de la force entre les deux variantes est observée sur les deux courbes, de ce fait, nous pouvons constater que la polymérisation pour la variante L15% est importante, comparativement à celle de la variante L20%, cela est dû à la diminution du volume du liège dans la matrice.

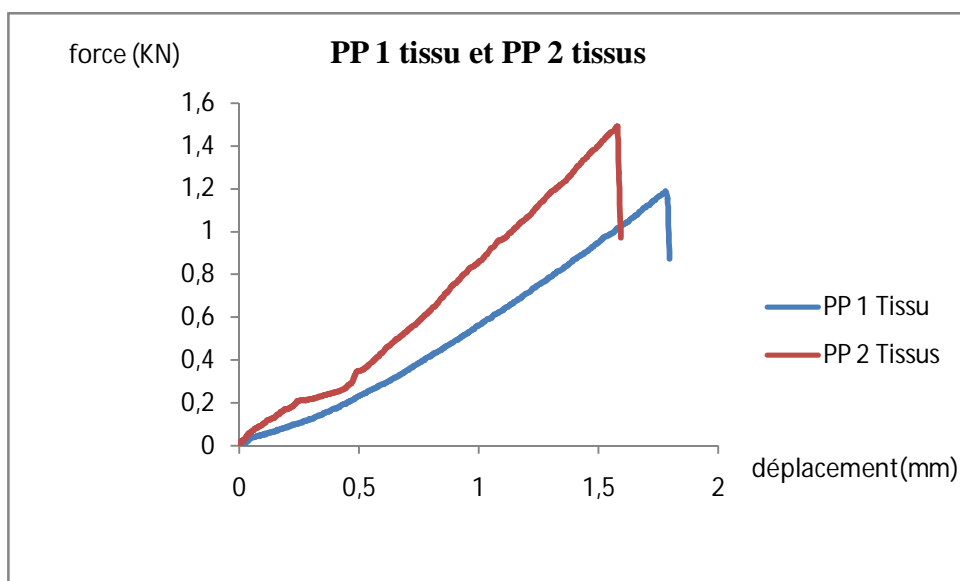


Figure 4.4.34 : Courbe de comparaison Force-déplacement PP1tissu et PP2 tissus

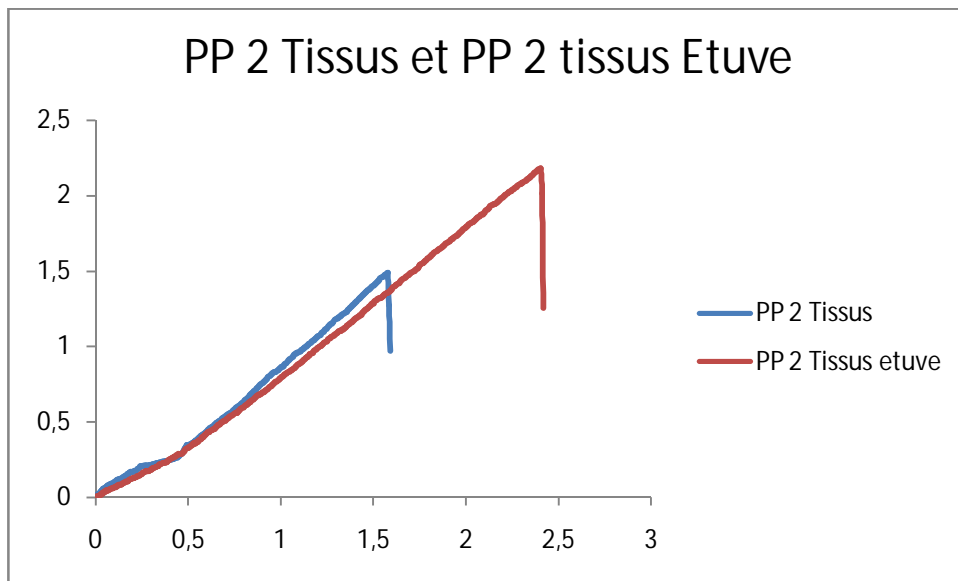


Figure 4.4.35. Courbe de comparaison Force-déplacement PP2tissus et PP2 tissus étuve

➤ Histogrammes des résistances à la traction des éprouvettes

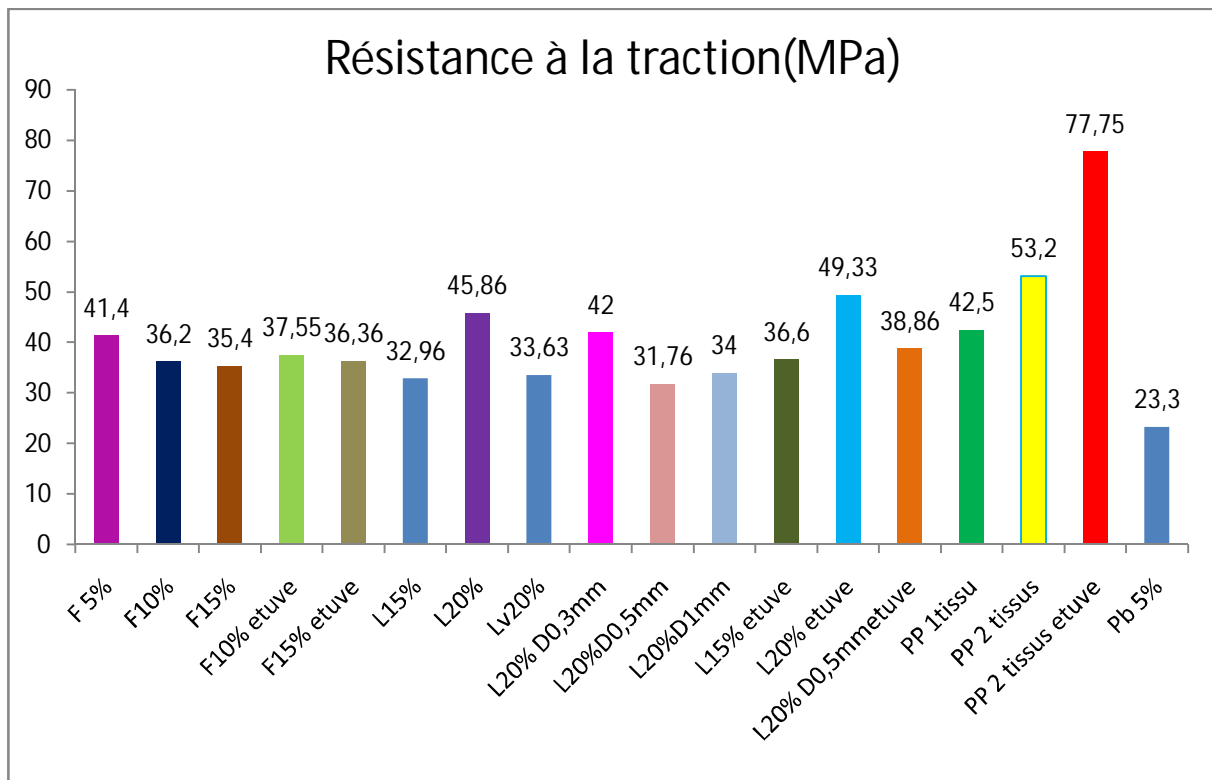


Figure 4.4.36. Histogramme des résistances à la traction des éprouvettes

L'analyse des différents résultats nous permet de conclure ce qui suit :

L'influence des types de charge et du renfort sur le comportement des éprouvettes est observée par la valeur de la résistance ultime au pic, en effet la variante «**PP2tissus étuve**» a donné le meilleur résultat ; une résistance ultime moyenne de **77.75 MPa**, ceci peut être expliqué par le fait que l'éprouvette est renforcée par 2 tissus en Polypropylène et a subi une polymérisation à travers l'étuve (meilleure homogénéisation de la matrice).

Par contre pour les éprouvettes chargées, la variante «**L20% étuve**» a donné une meilleure résistance ultime moyenne de **49.33MPa**.

Nous remarquons pour le composite à matrice chargée et renforcé de mat en fibres de verre, la variante «**F5%**» présente une résistance moyenne ultime de **41.4 MPa**

Concernant les autres variantes, les différents résultats des résistances moyennes varient entre 32 et 42 MPa selon les pourcentages et la nature des charges considérées ainsi que le type de renfort utilisé, excepté la valeur de la variante «**Pb5%**» qui est de l'ordre de **23.3 MPa**, ce la peut être expliquée par la présence très remarquable des bulles d'aire lors d'élaboration de la plaque ayant servie pour le découpage des éprouvettes de cette variante.

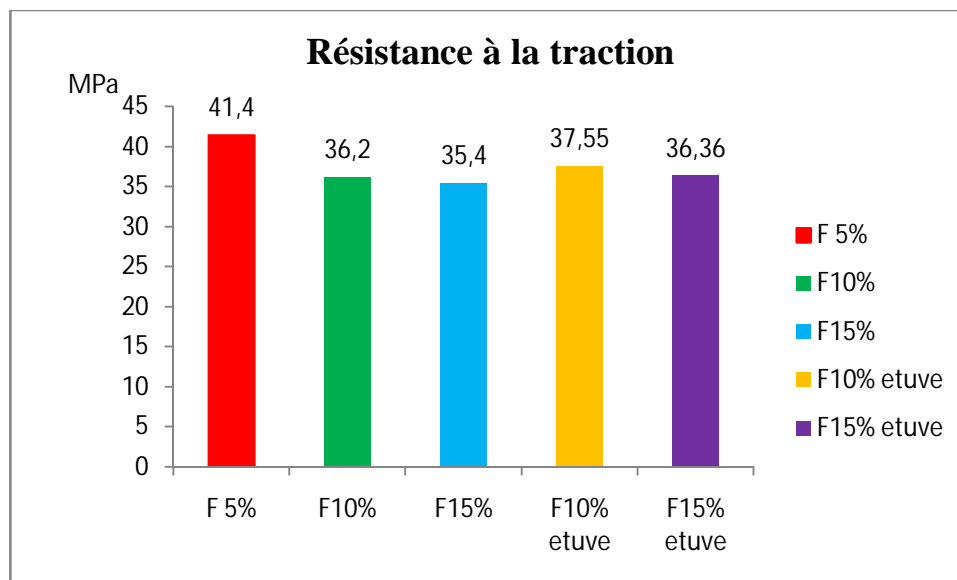


Figure 4.4.37. Influence du volume de la charge et le gradient thermique sur la résistance

La variation du volume de la charge influence directement sur la résistance à la traction de ces éprouvettes comme nous l'avons constaté sur l'histogramme présenté ci-avant.

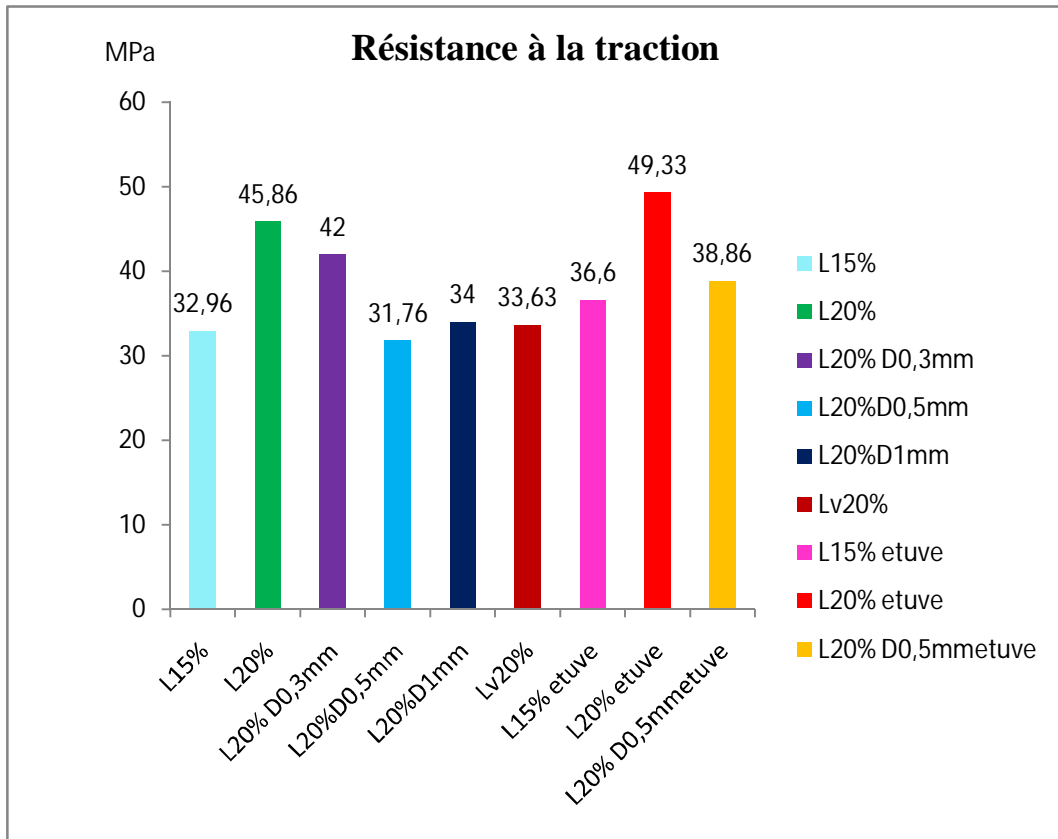


Figure 4.4.38. Variation de la résistance à la traction en fonction de la granulométrie du liège et le gradient thermique

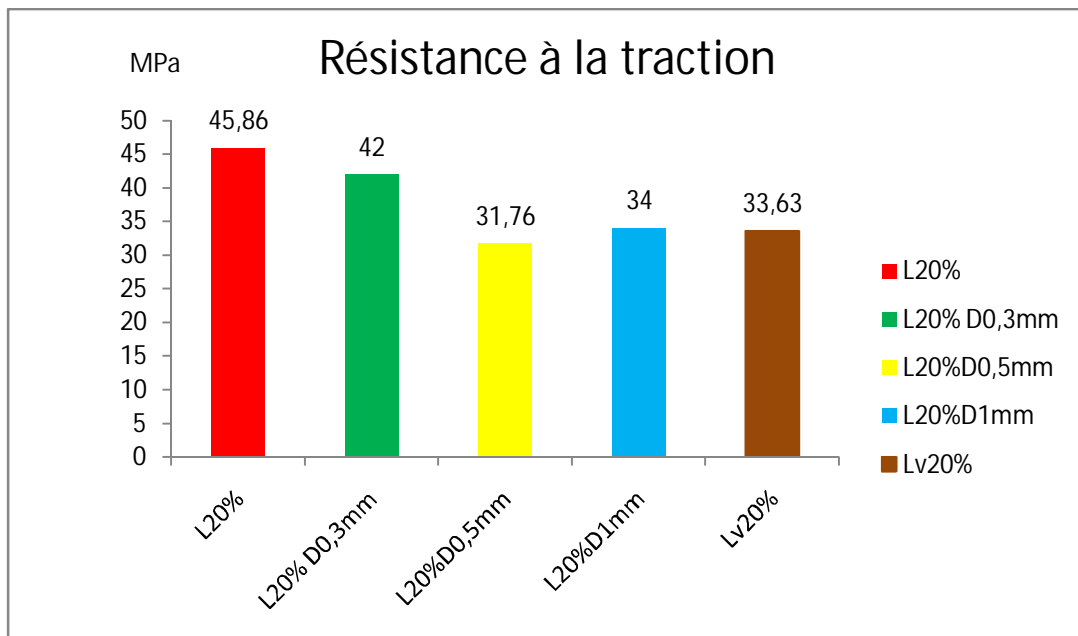


Figure 4.4.39 Influence de la morphologie de la structure sur la résistance à la traction des éprouvettes

D'après les deux histogrammes précédents, nous pouvons mettre en évidence l'influence de la granulométrie du liège sur la morphologie du matériau, qui influe sur la résistance à la traction des éprouvettes. Notamment la meilleure résistance est donnée par la variante **L20%** constituée d'une poudre de liège très fine de diamètre inférieure à 0.08mm, qui est de l'ordre de **45.86 MPa**, la résistance diminue en augmentant le diamètre des grains de 0.08mm jusqu'à 1 mm nous avons une résistance légèrement supérieure à celle de 0.5mm. Ceci peut être expliqué par la remonté des grains sur la surface de la plaque.

La variante **Lv20%** constitué du liège varié a donné une résistance voisine de celle **L20%D1mm** et une meilleure homogénéisation d'où l'importance du mélange.

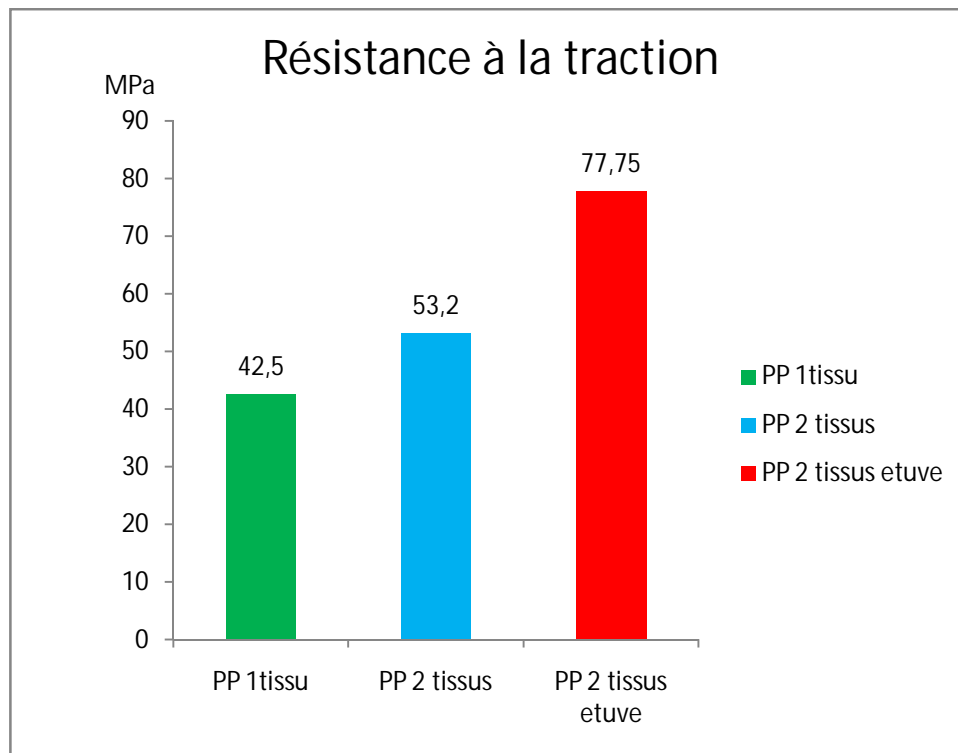


Figure 4.4.40. Influence du renfort polypropylène ainsi que le gradient thermique sur la résistance à la traction

L'analyse de l'histogramme ci-contre nous permet d'évaluer et de quantifier l'apport du tissu en fibres de polypropylène et son orientation vis à vis de l'effort de traction ainsi que l'importance de la polymérisation et l'homogénéisation des matériaux composites.

4.4.3. Essais de flexion

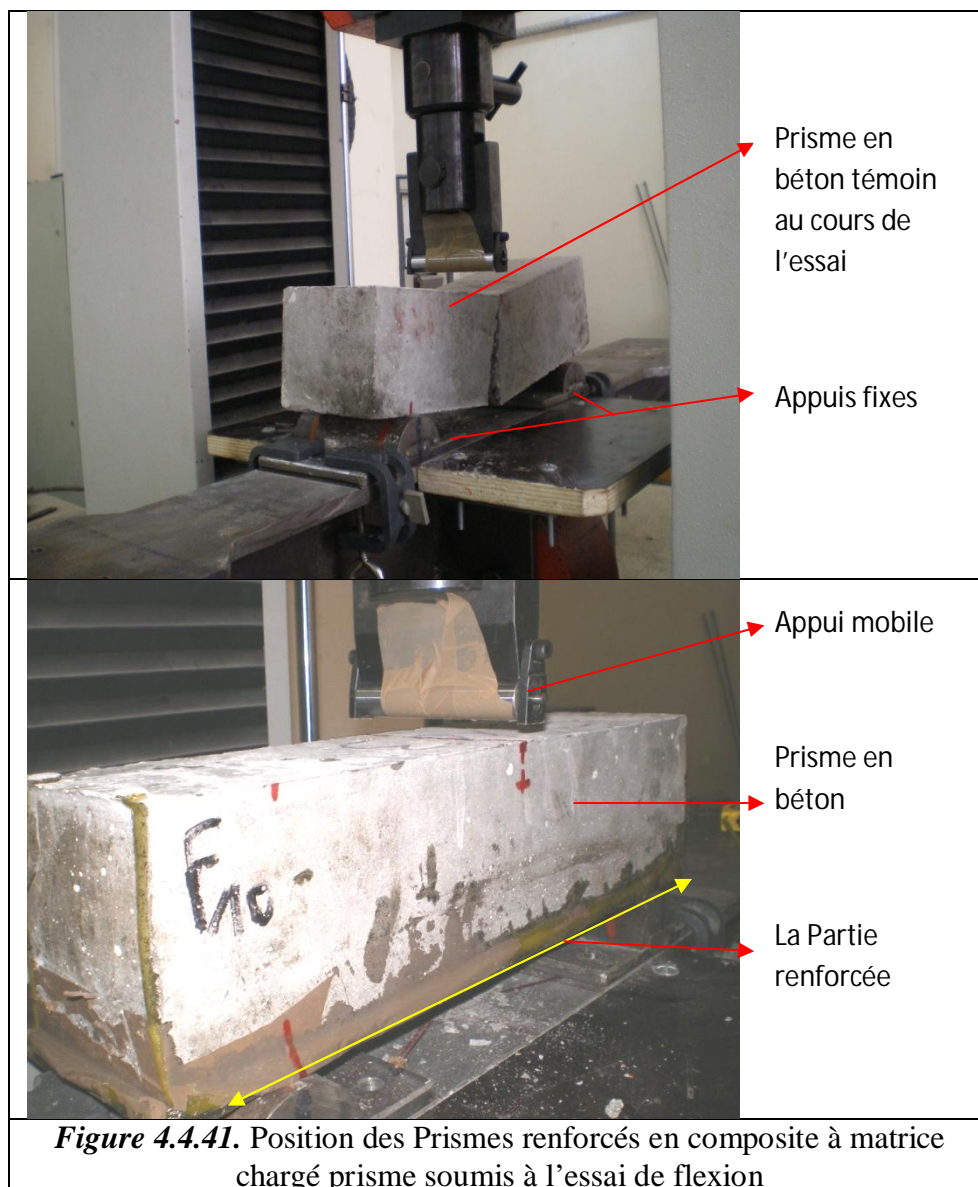
Cette partie du travail a eu pour but d'étudier le comportement en flexion du béton, et de découpler l'effet des composites à matrices chargées et renforcées de fibre de verre

Le test de flexion 3 points est effectué sur la même machine IBERTEST utilisée dans l'essai de traction, doté d'une cellule de 200 KN, la machine est réglée à une vitesse de chargement de 0.1KN/s .

Le prisme 10x10x40cm est posé sur un dispositif de flexion avec deux appuis. Notons que la distance entre le point de chargement et les appuis est de 15cm.

Les prismes renforcés sont posés sur la partie laquelle on a collé le composite (figure 4.68).

Les informations issues de cet essai sont récupérées sur le microordinateur de pilotage de la machine.



➤ **Présentation et interprétation des résultats des essais de flexion**

Les résultats obtenus de ces essais nous ont permis de calculer les forces moyennes de chaque série d'éprouvettes est de tracer les courbes force-déplacement.

Les tableaux suivants résument les résultats obtenus :

Tableaux 4.13: résultats des essais de flexion

Eprouvettes	Prismes témoins	Prismes F5%	Prismes F10%	Prismes F15%	Prismes PB 5%
Résistance (Mpa)	0,992	1,406	1,6	1,492	1,412

Type d'éprouvette	Masse d'éprouvette (Kg)	Force Max (KN)	Mode de rupture
Fonte 5% 1/3	9.97	19.70	Fragile
Fonte 5% 2/3	9.84	17.93	Fragile
Fonte 5% 3/3	9.98	18.67	Fragile
Fonte 10% 1/2	9.617	19.70	Fragile
Fonte 10% 2/3	10.03	22.19	Fragile
Fonte 10% 3/3	9.98	22.19	Fragile
Fonte 15% 1/3	10.16	19.81	Fragile
Fonte 15% 2/3	10.02	19.79	Fragile
Fonte 15% 3/3	9.90	20.08	Fragile
Plomb 5% 1/3	10.22	18.51	Fragile
Plomb 5% 2/3	10.10	19.09	Fragile
Plomb 5% 3/3	9.89	18.90	Fragile
Béton témoin 1/3	9.75	13.234	Fragile
Béton témoin 2/3	9.85	12.93	Fragile
Béton témoin 3/3	9.64	13.53	Fragile

Appellations	Eprouvettes En Béton (cm)	Type du renfort et charges				Forces maximales moyennes
		Matrice	renfort	Charge		
				Type	vol%	
Prisme F5%	3 prismes 10x10x40	époxy	1 Mat	Fonte	5%	18.76 KN
Prisme F10%	3 prismes 10x10x40	époxy	1 Mat	Fonte	10%	21.36 KN
Prisme F15%	3 prismes 10x10x40	époxy	1 Mat	Fonte	15%	19.89 KN
Prisme Pb5%	3 Prismes 10x10x40	époxy	1 Mat	Plomb	5%	18.83 KN
Prisme témoin	3 Prismes 10x10x40	/	/	/	/	13.23 KN

➤ **Courbes force –déplacement des prismes en flexion**

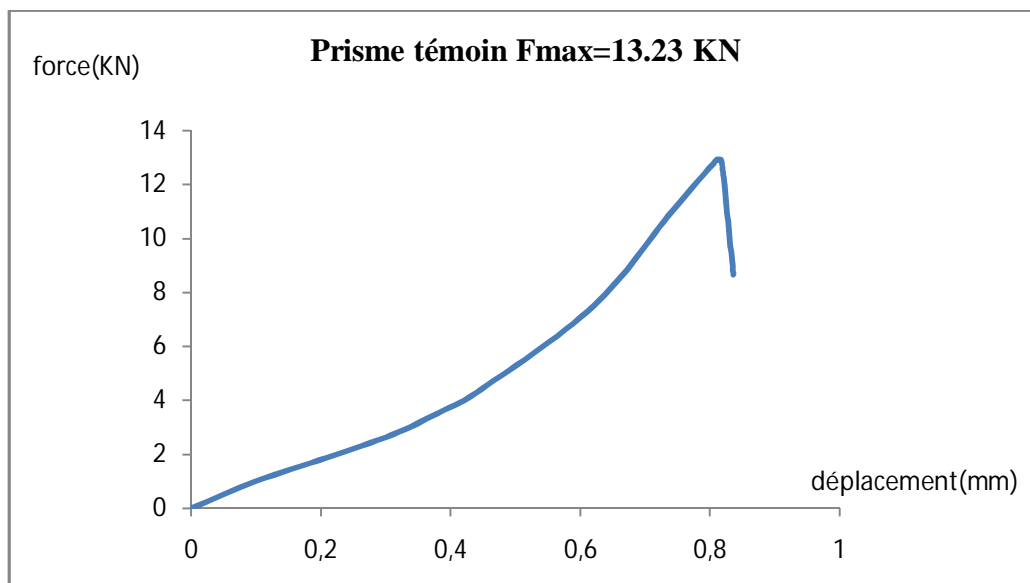


Figure 4.4.42. : Courbe force-déplacement prisme témoin

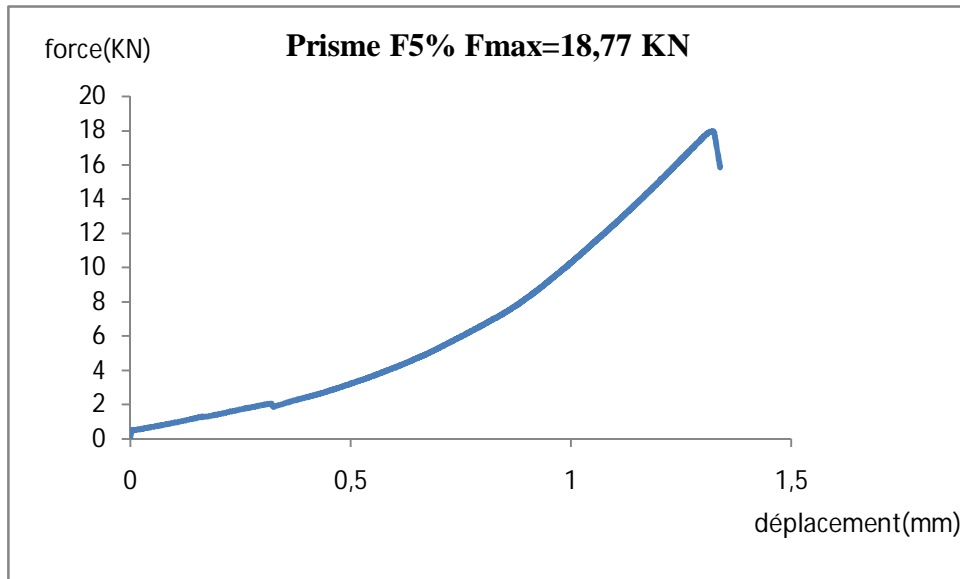


Figure 4.4.43: Courbe force-déplacement prisme F5%

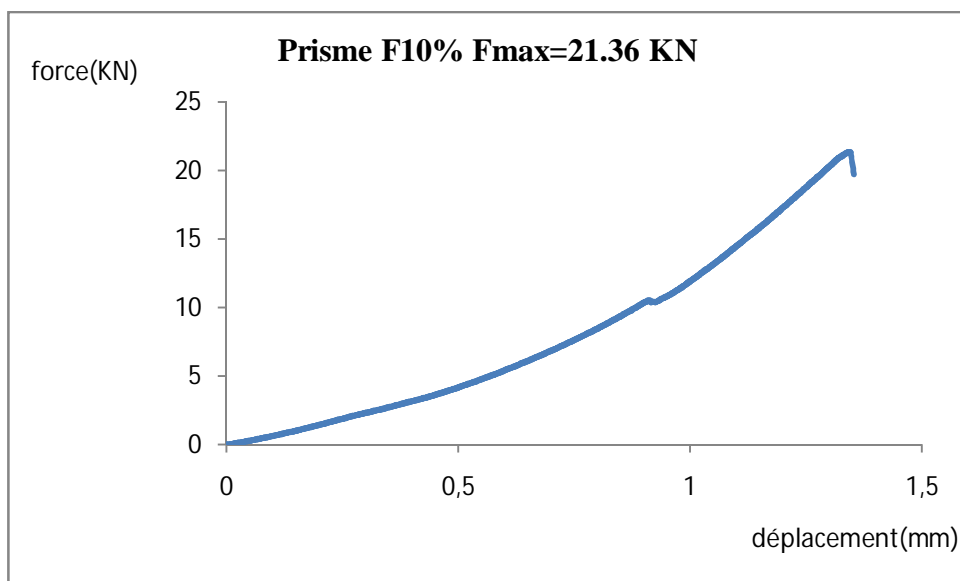


Figure 4.4.44: Courbe force-déplacement prisme F10%

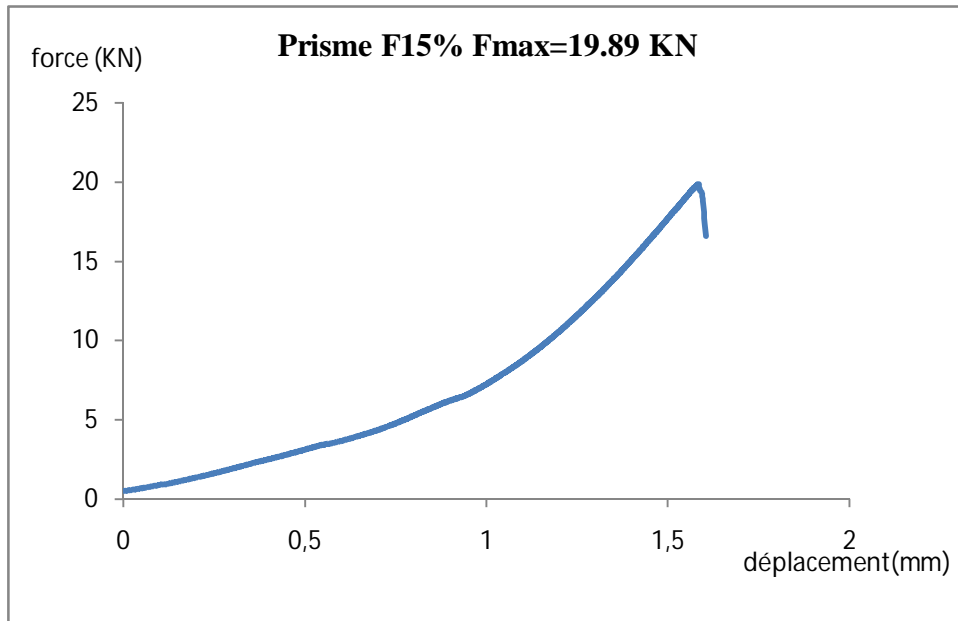


Figure 4.4.45. : Courbe force-déplacement prisme F15%

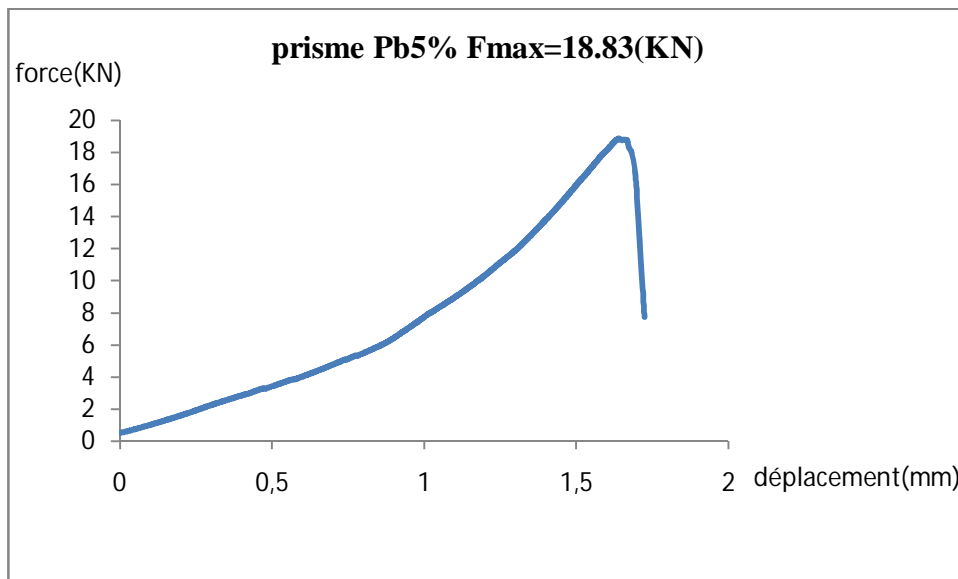


Figure 4.4.46. : Courbe force-déplacement prisme Pb5%

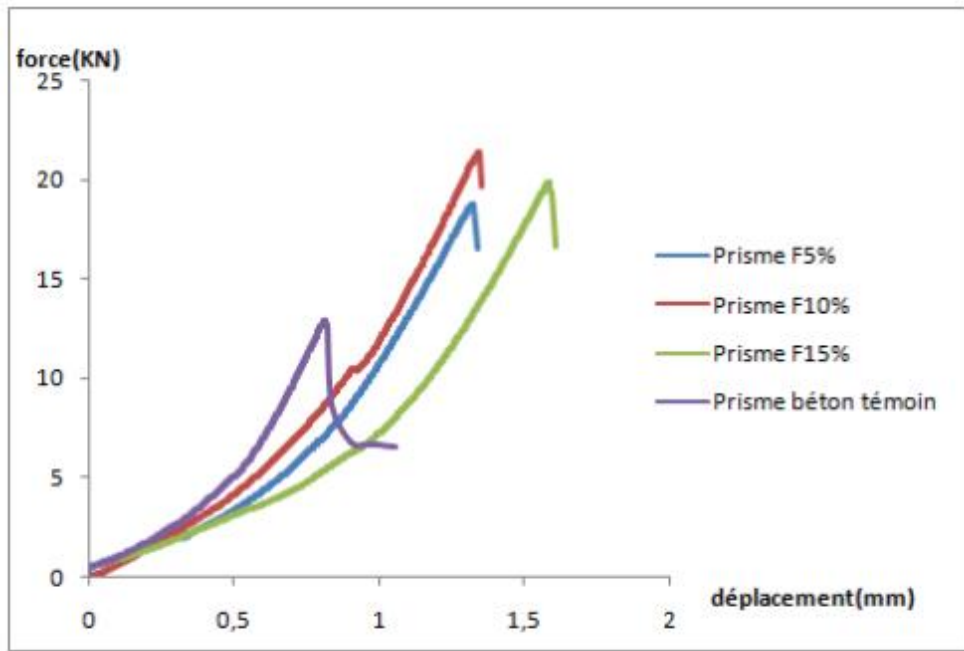


Figure 4.4.47 : Influence du volume de la charge sur la résistance des prismes

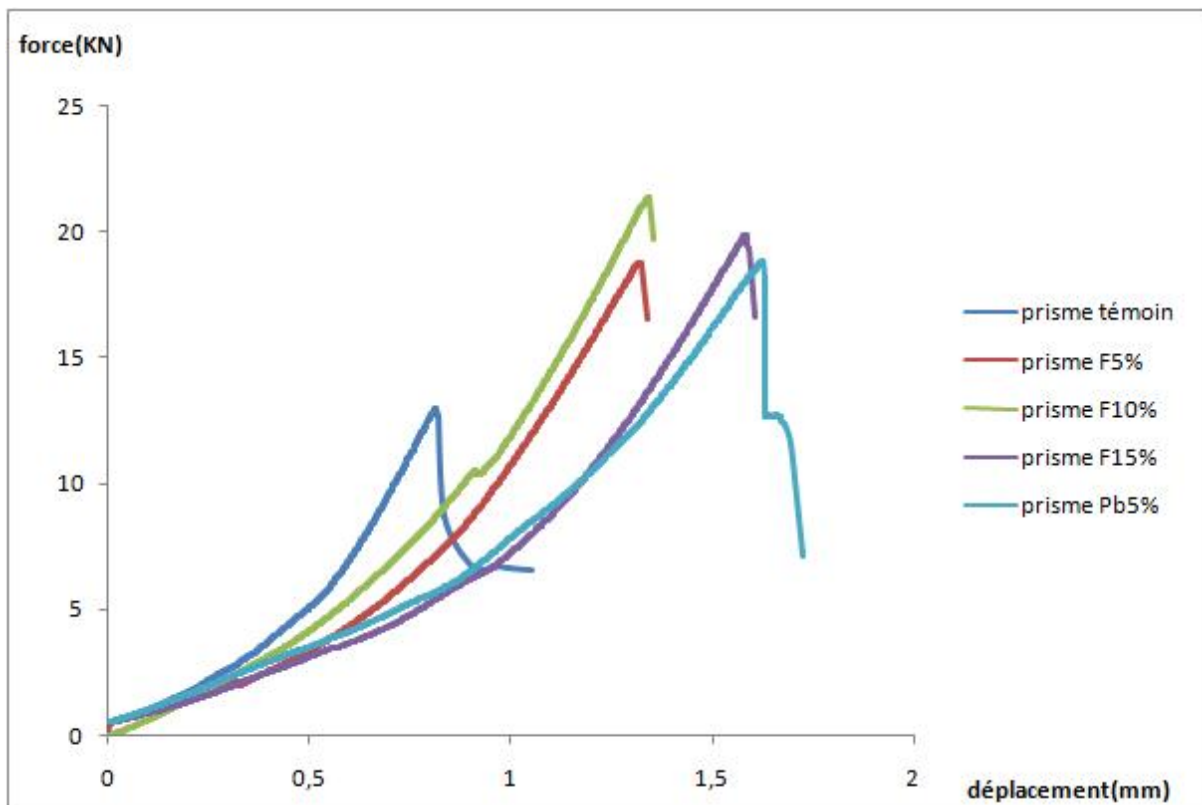


Figure 4.4.48: comparaison des courbes force-déplacement

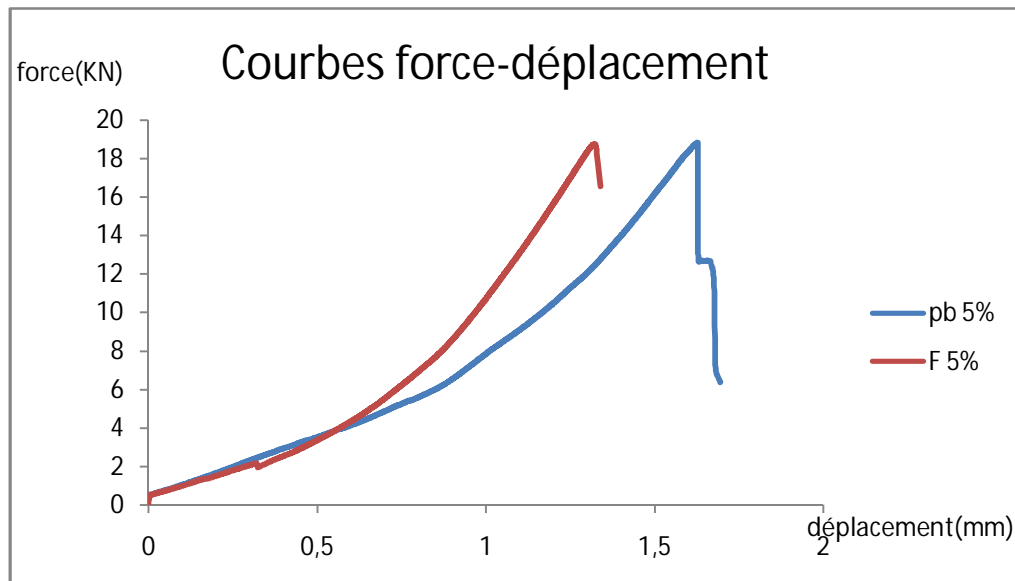


Figure 4.4.49: courbe de comparaison prisme Pb5% et prisme F5%

On note ici que les courbes de chargement de l'ensemble des spécimens ont montrés un comportement linéaire fragile

On remarque que les pentes des courbes de force et déplacement des éprouvettes sont quasi identiques, malgré la présence de quelques disparités au niveau de la capacité portante des éprouvettes. Mais, cette variation de la capacité portante est notable parmi les éprouvettes testées, du fait de la variation de la charge du matériau composite.

On déduit de ces courbes que le renforcement par la couche de composite en zone tendue augmente la résistance et la déformabilité du béton en flexion.

Les mécanismes de rupture des spécimens renforcés sont similaires; une fissure apparait dans la zone tendue qui tend à se propager rapidement vers la zone comprimé, induisant la rupture du spécimen en deux parties comme montré sur la Figure des mécanismes de rupture.

La rupture est survenue par dépassement de la résistance à la traction du béton et du composite.

➤ Histogrammes des résistances à la flexion des prismes

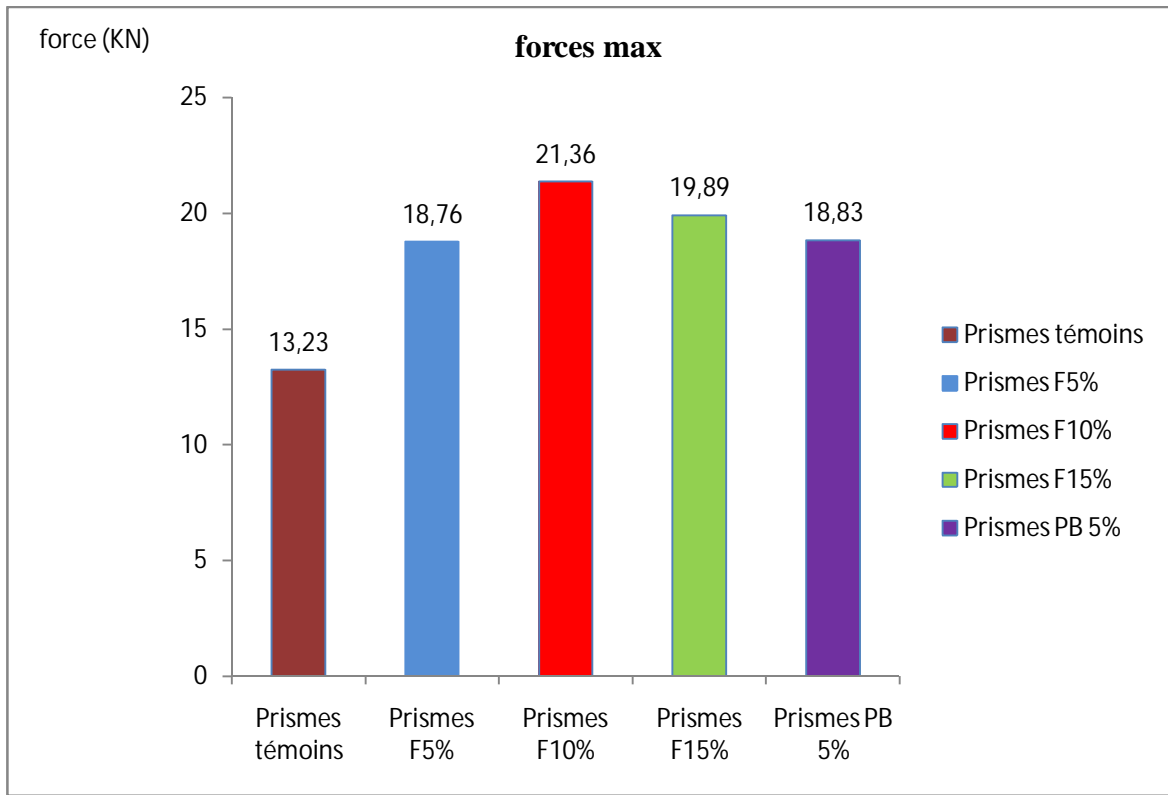


Figure 4.4.50: influence du volume de la charge sur la résistance des prismes

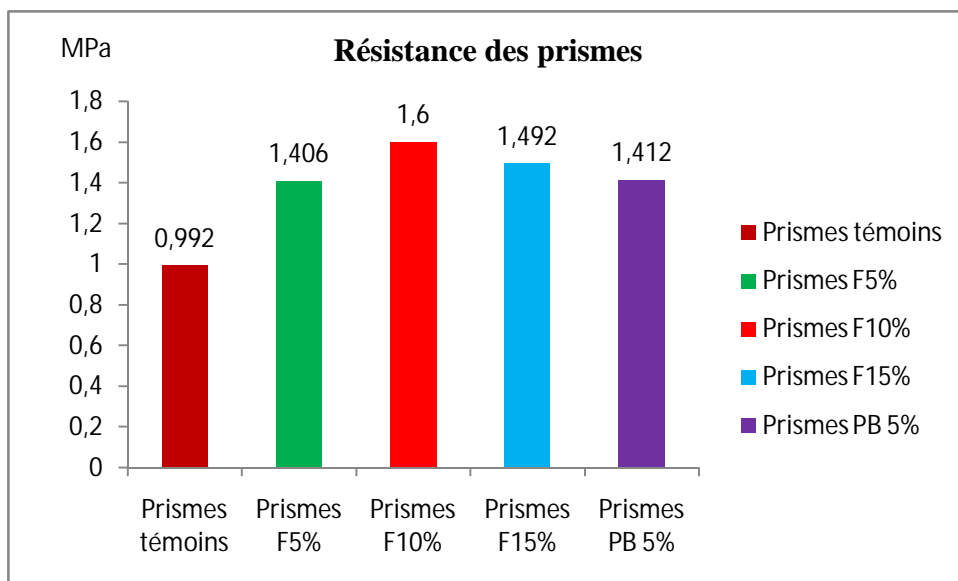


Figure 4.4.51 : influence du volume de la charge sur la résistance des prismes

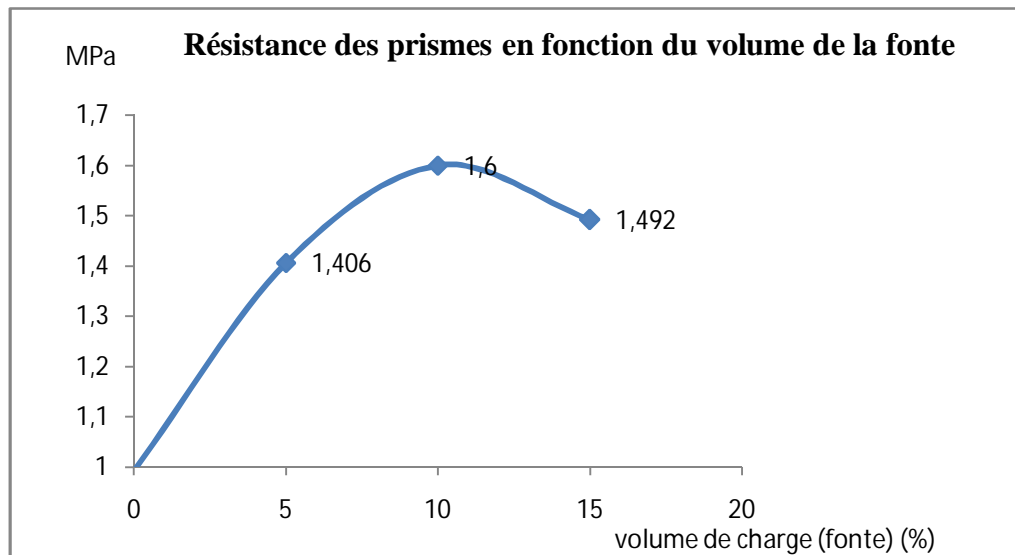


Figure 4.4.52: Evolution de la résistance des prismes en fonction du volume de la charge

D’après l’analyse des histogrammes et la courbe d’évolution de la résistance en fonction du volume de la charge (fonte) on constate ce qui suit :

La meilleure résistance des prismes en flexion est donnée par la variante « prismes F10% ». Les prismes renforcés à 5et 15% de charge ont donnés des résistances inférieures, ce qui nous permet de conclure que la charge optimale pour avoir une bonne résistance est celle de 10%. Ce ci peut être expliqué par le fait que lorsqu’on augmente le volume de la fonte, le matériau devient fragile, étant donnée la fonte est un matériau fragile.

➤ Mécanismes de rupture des prismes

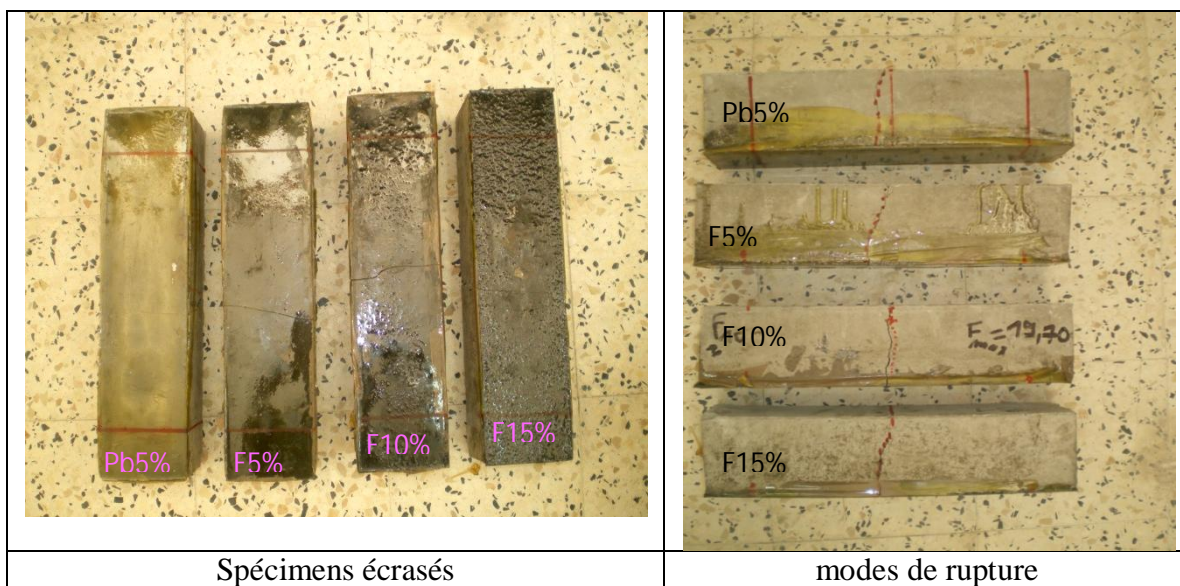


Figure 4.4.53: Mécanismes de rupture des spécimens

4.4.4. Essai de poinçonnement

L'objectif de cette partie est d'identifier expérimentalement, d'abord, l'influence des différents paramètres influençant le renforcement des dalles tels que le taux de renforcement, les propriétés du composite ou la gamme de résistance du béton, sur le comportement de l'ensemble du système de dalle renforcée vis-à-vis du poinçonnement.

A. Instrumentation de l'essai

La machine utilisée pour la réalisation de ce type d'essai est la même utilisée pour la traction et la flexion, sauf les accessoires qui changent.

La dalle est posée sur un dispositif de poinçonnement fabriqué sur mesure des dalles à expérimentées d'une manière à ce qu'elle soit reposée sur ces quatre cotés. Les dimensions du dispositif fabriqué sont 22cm de largeur et 27cm de longueur.

Les dalles renforcées sont posées sur la partie renforcées

Le point d'impact est de dimension 23x28mm soit un dixième de chaque coté

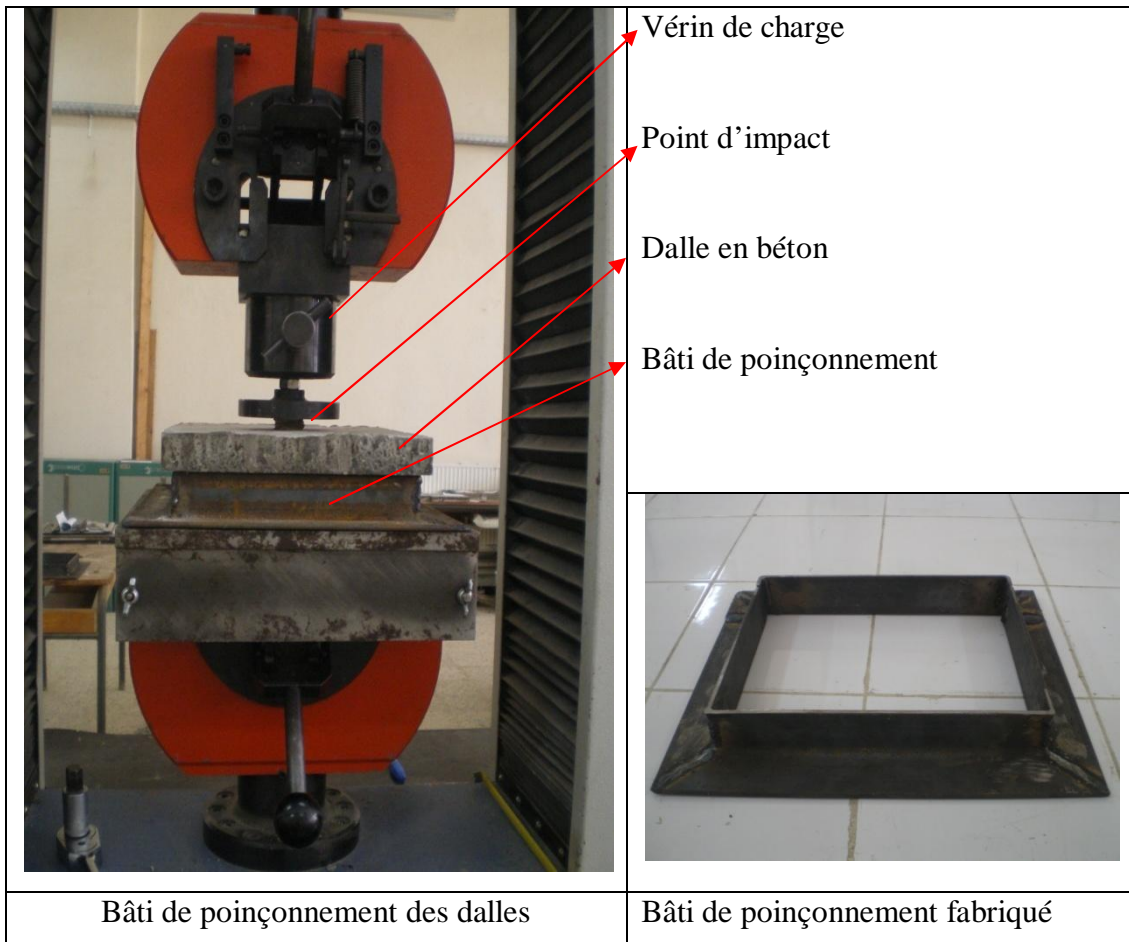


Figure 4.4.54. Mise en point de l'essai de poinçonnement

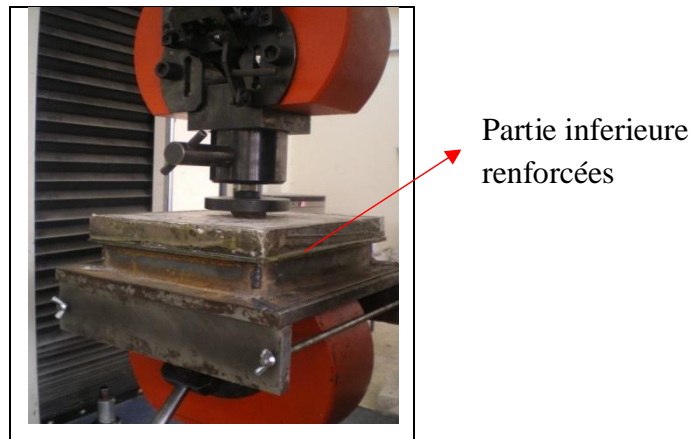


Figure 4.4.55. Dalle renforcées

B. Résultats des essais de poinçonnement et interprétation

Les résultats issus de cet essai nous ont permis de tracer les courbes force-déplacement et force-temps pour et d'établir la moyenne des résistances chaque série de dalle.

Tableau 4.14. Résultats des essais de poinçonnement

Spécimens	Force Moyenne (KN)	Résistance Moyenne (MPa)	Flèche maximale (mm)
Dalle témoin	4,78	0.692	2.17
Dalle+ composite PP 2 tissus disposés dans les 2 directions	9.50	1.376	3.545
Dalle +composite Fonte 5%+ mat de verre	14.73	2.134	4.335
Dalle +composite Fonte 10%+ mat de verre	12.82	1.858	2.545
Dalle + composite Matrice + 15% liège ($D \leq 0.08\text{mm}$, fond)	13.28	1.924	2
Dalle + composite Matrice + 20% liège ($D \leq 0.08\text{mm}$, fond)	13.12	1.902	2.133
Dalle + composite Matrice renforcée + 20% liège varié ($D_1=1\text{mm}+D_2=0.5\text{mm}+D_3 \leq 0.08\text{mm}$)	12.50	1.812	2.39

➤ Courbes force-déplacement et force-temps des dalles

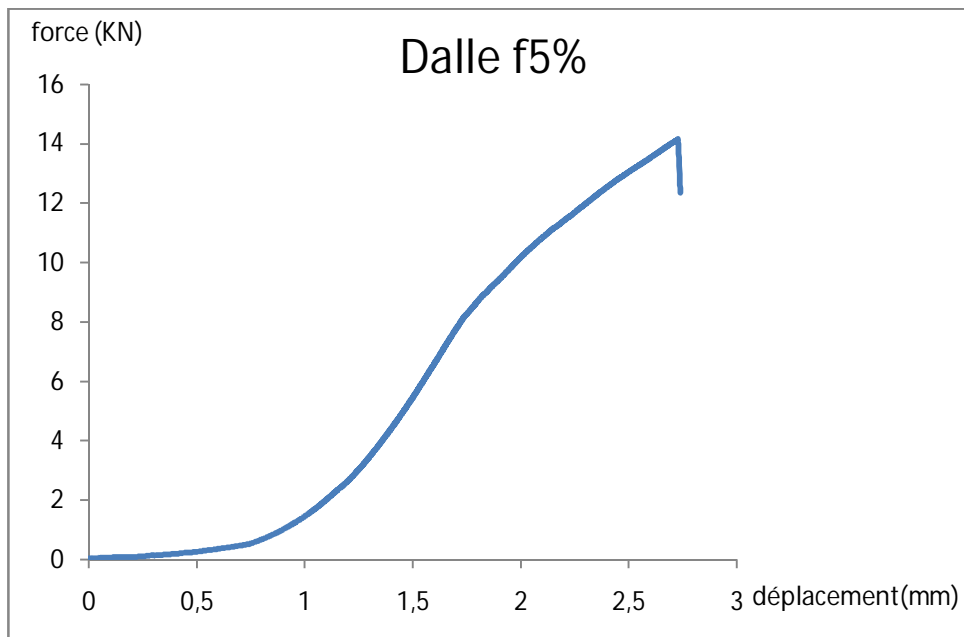


Figure 4.4.56.a. Courbe force-déplacement Dalle F5%

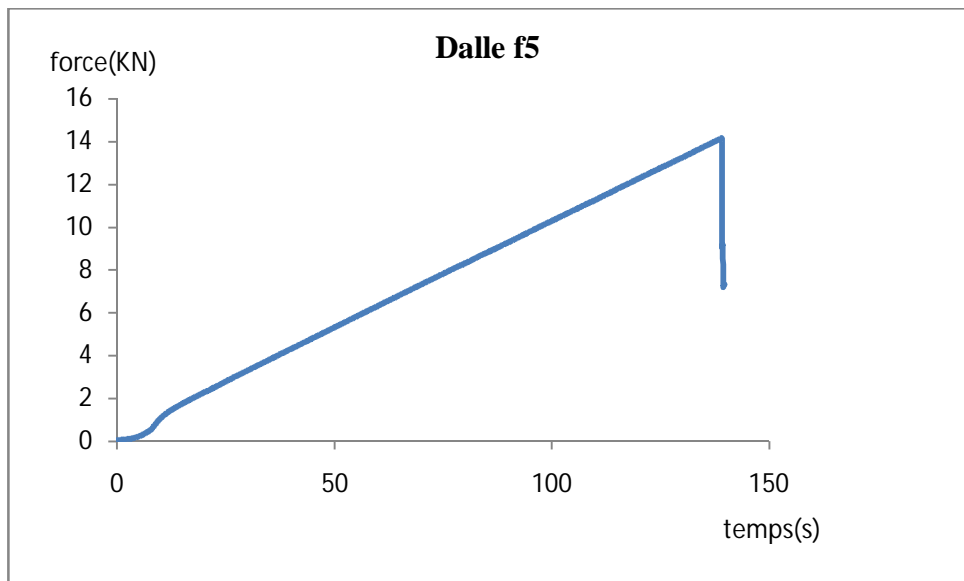


Figure 4.4.56.b. Courbe force-temps Dalle F5%

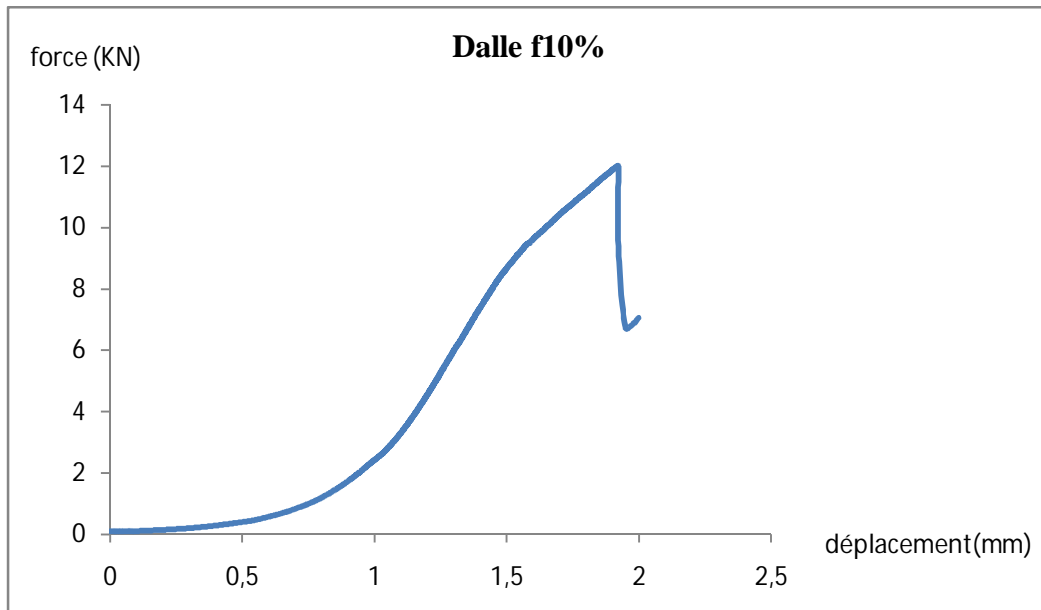


Figure 4.4.57.a. Courbe force-déplacement Dalle F10%

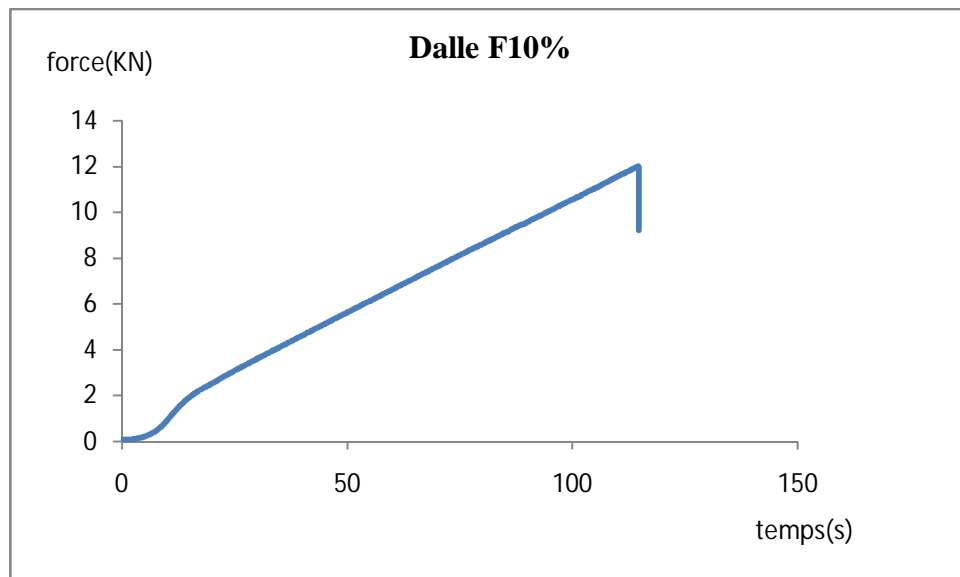


Figure 4.4.57.b. Courbe force-temps Dalle F10%

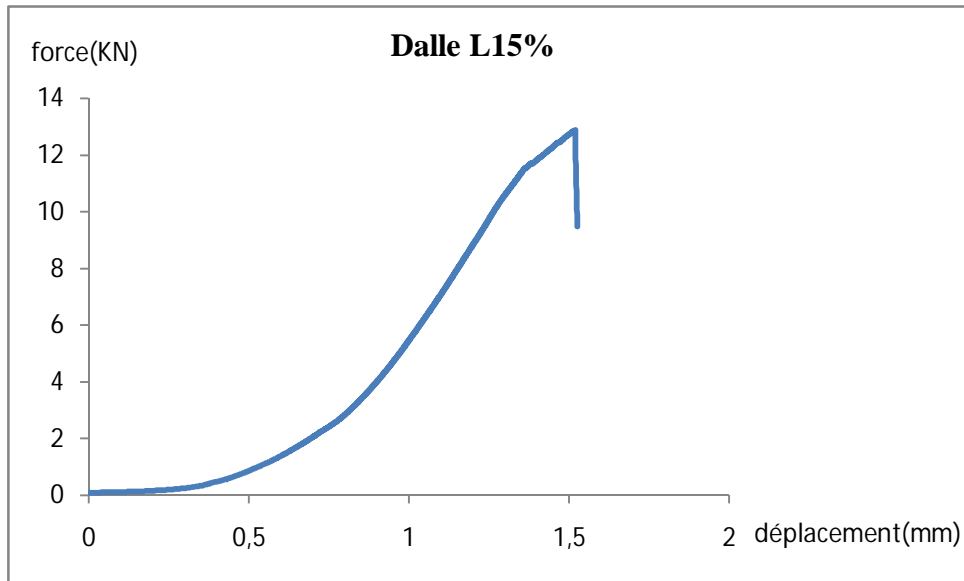


Figure 4.4.58.a. Courbe force-déplacement Dalle L15%

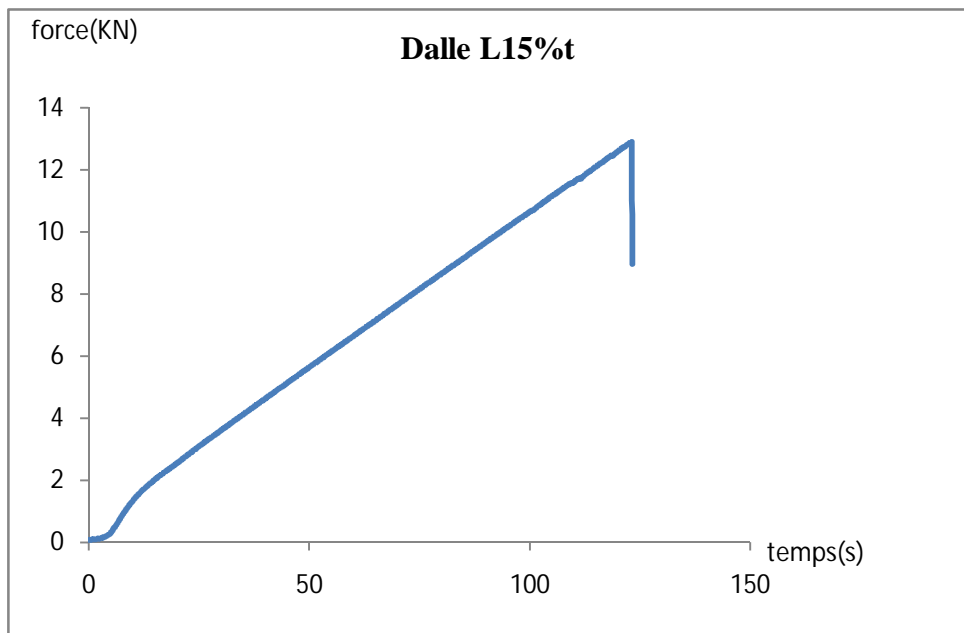


Figure 4.4.58.b. Courbe force-temps Dalle L15%

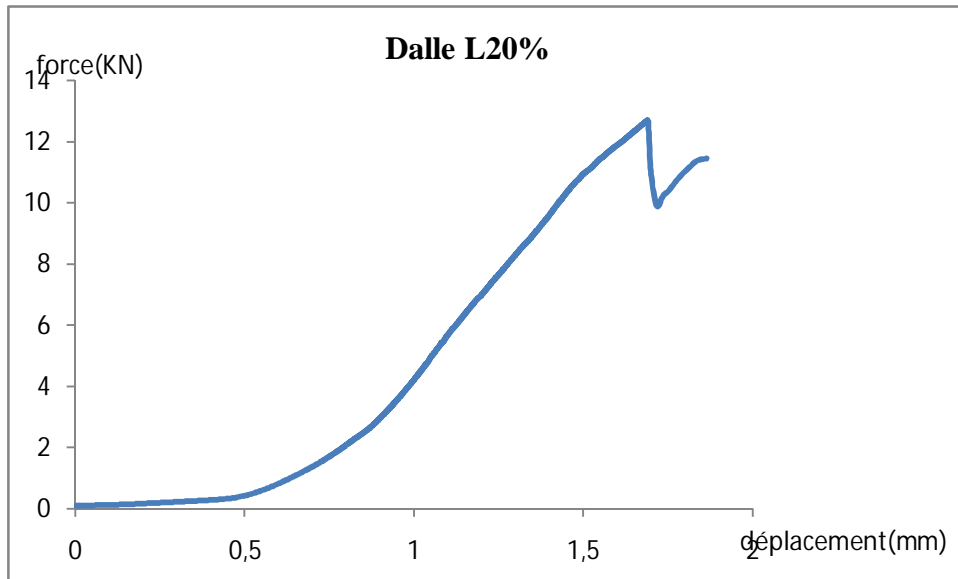


Figure 4.4.59.a. Courbe force-déplacement Dalle L20%

On remarque que la force augmente jusqu'à la rupture du composite en suite l'effort est repris par le béton qui cède à son tour

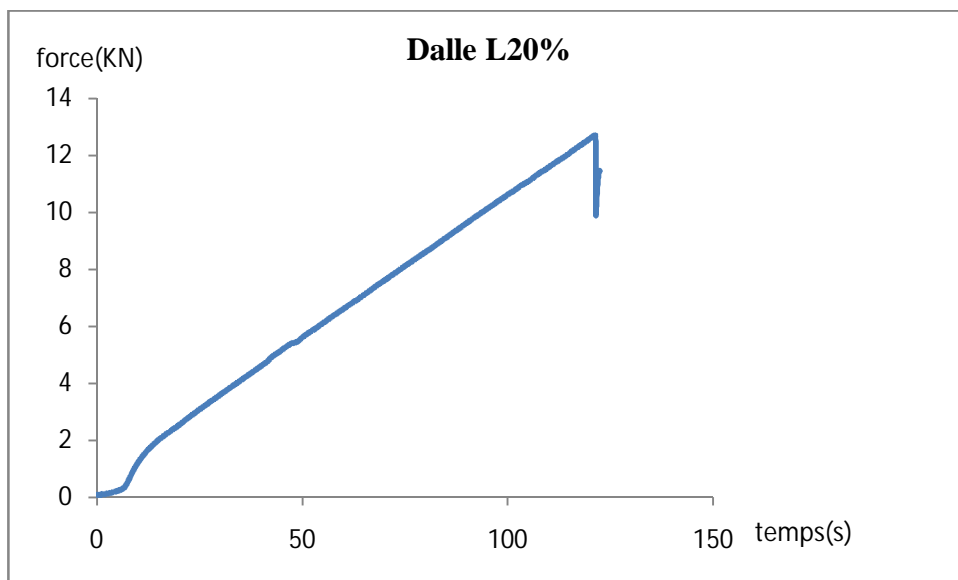


Figure 4.4.59.b. Courbe force-temps Dalle L20%

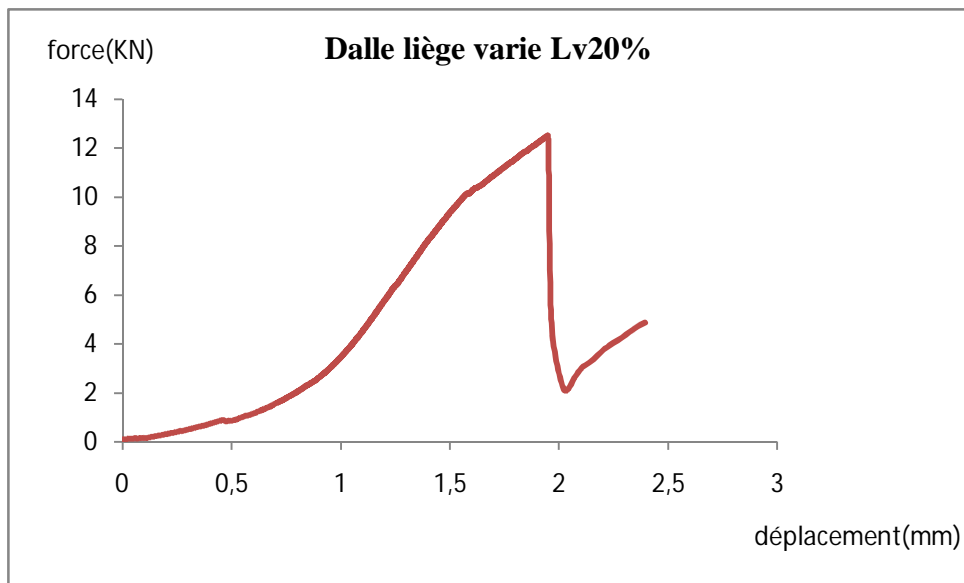


Figure 4.4.60.a. Courbe force-déplacement Dalle Lv20%

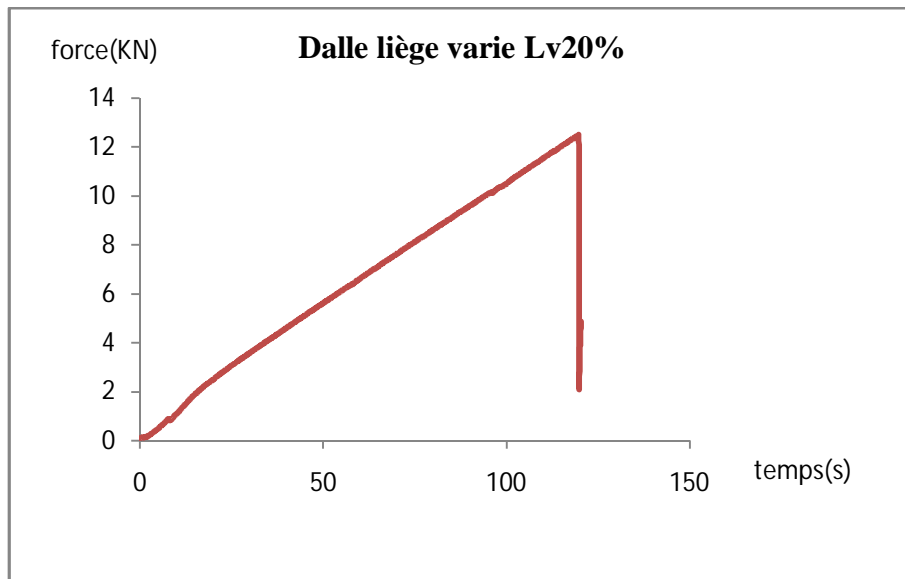


Figure 4.4.60.b. Courbe force-temps Dalle Lv20%

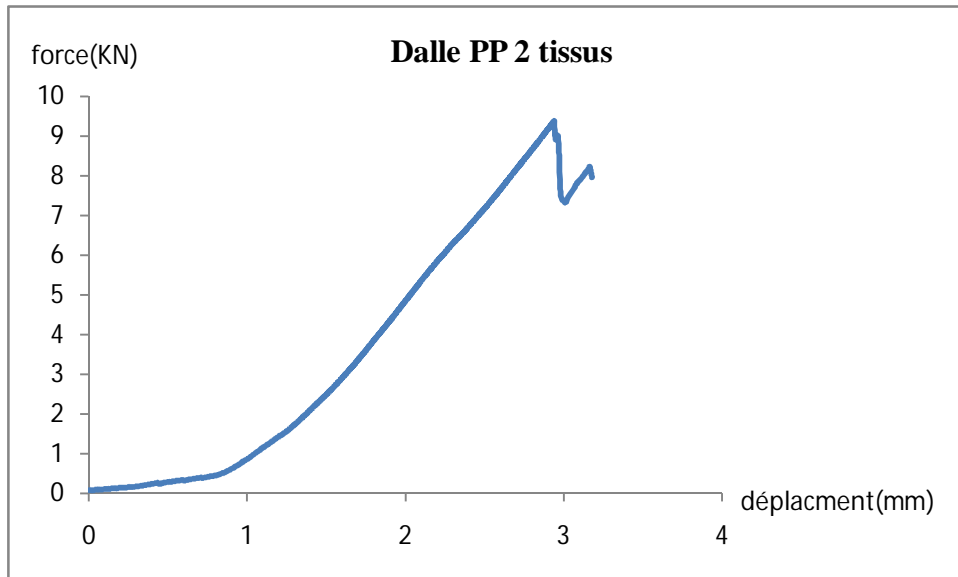


Figure 4.4.61.a. Courbe force-déplacement Dalle PP2 tissus

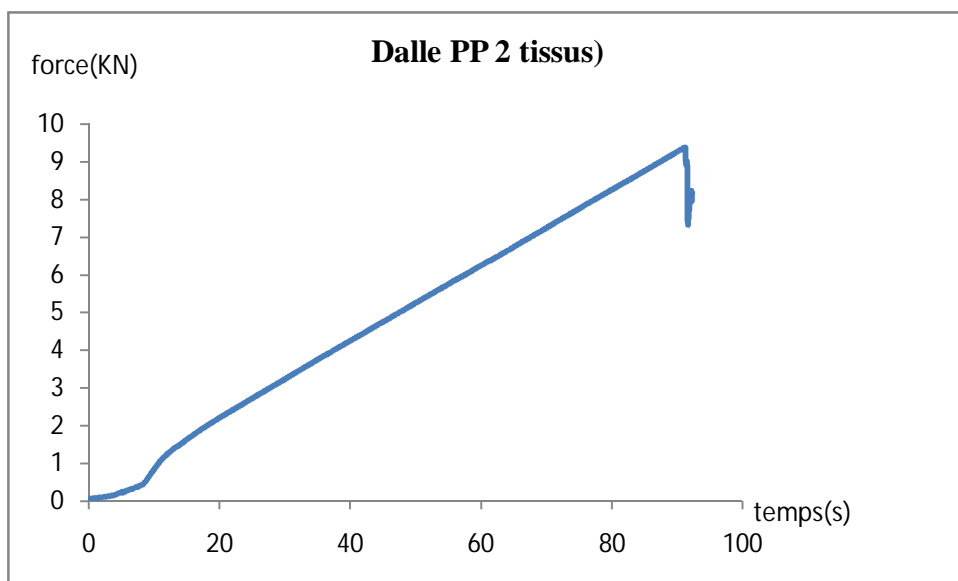


Figure 4.4.61.b. Courbe force-temps Dalle PP2 tissus

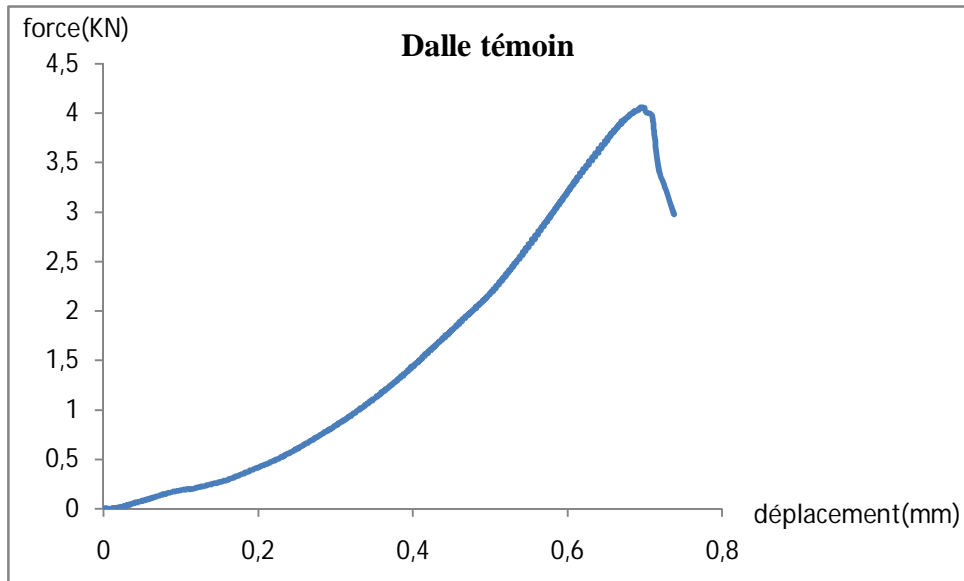


Figure 4.4.62.a. Courbe force-déplacement Dalle témoin

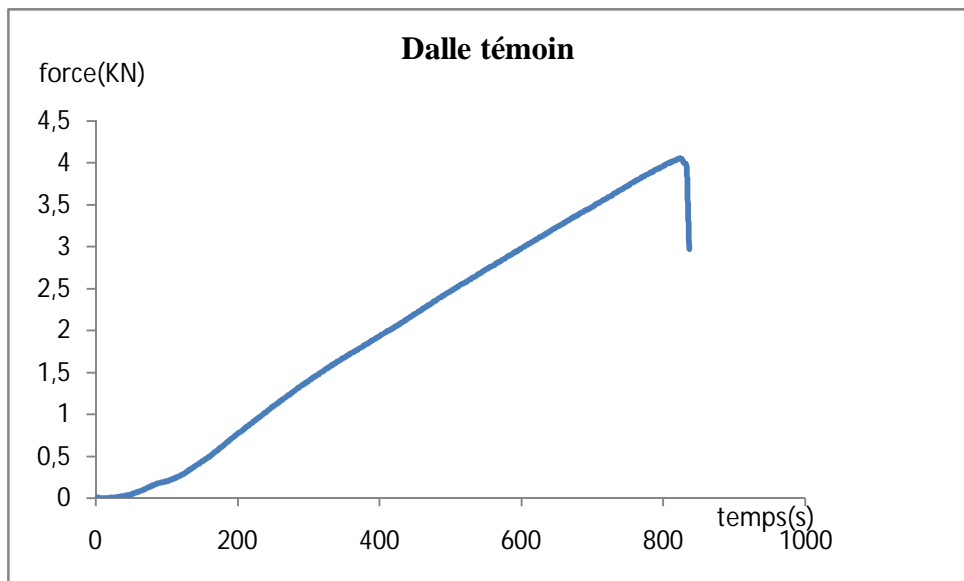


Figure 4.4.62.b. Courbe force-temps Dalle témoin

➤ Courbes de comparaison force-déplacement

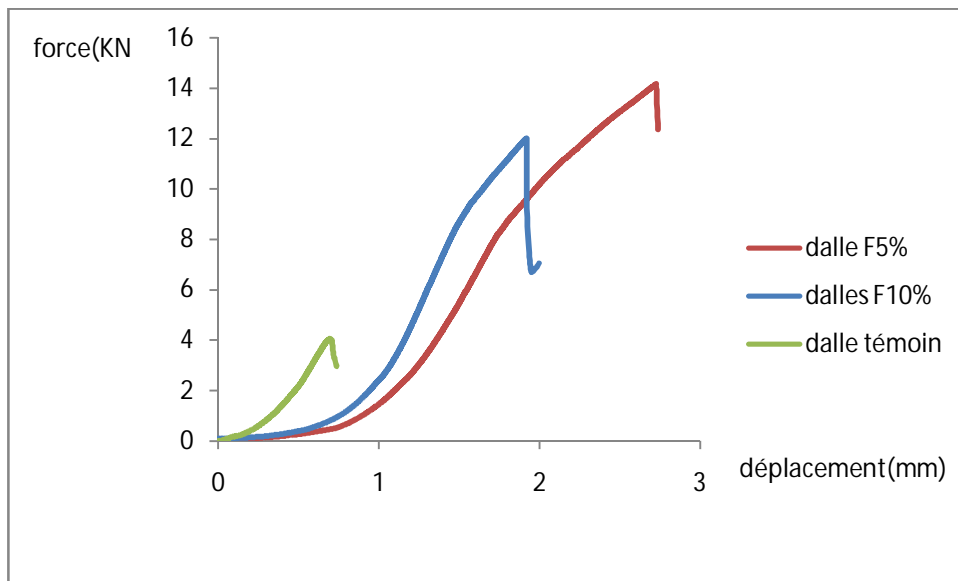


Figure 4.4.63.a. Courbe de comparaison force-déplacement

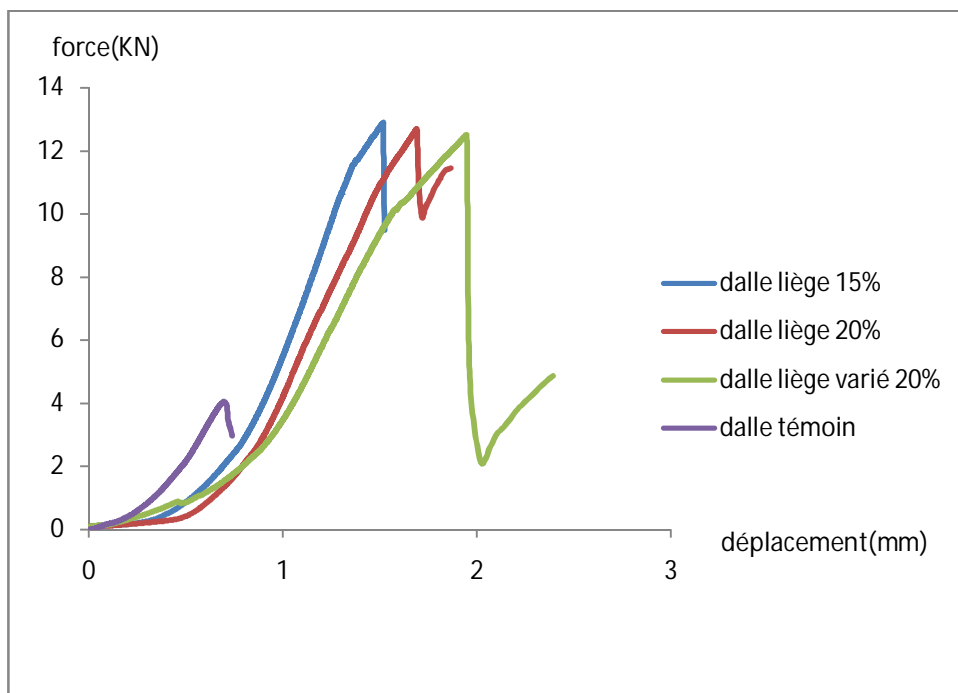


Figure 4.4.63.b. Courbe de comparaison force-déplacement

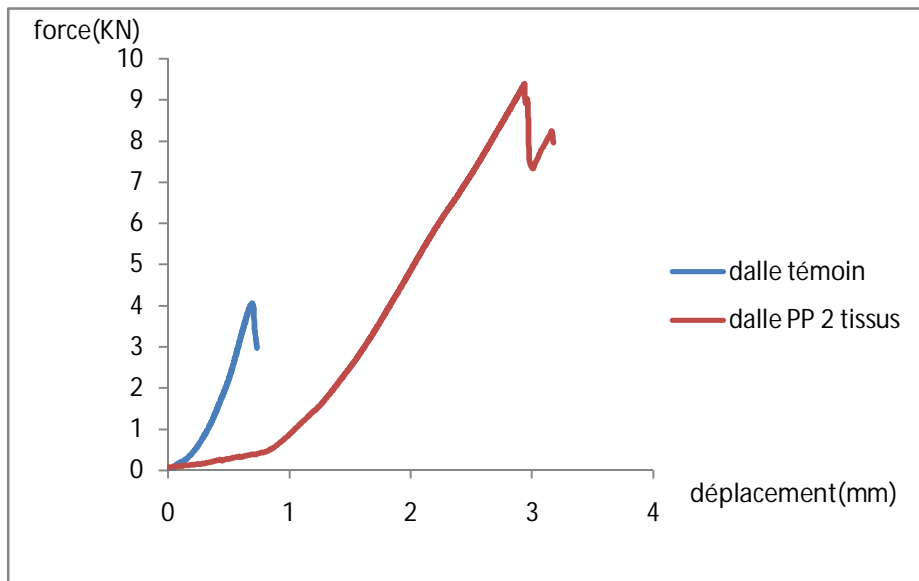


Figure 4.4.63.c. Courbe de comparaison force-déplacement

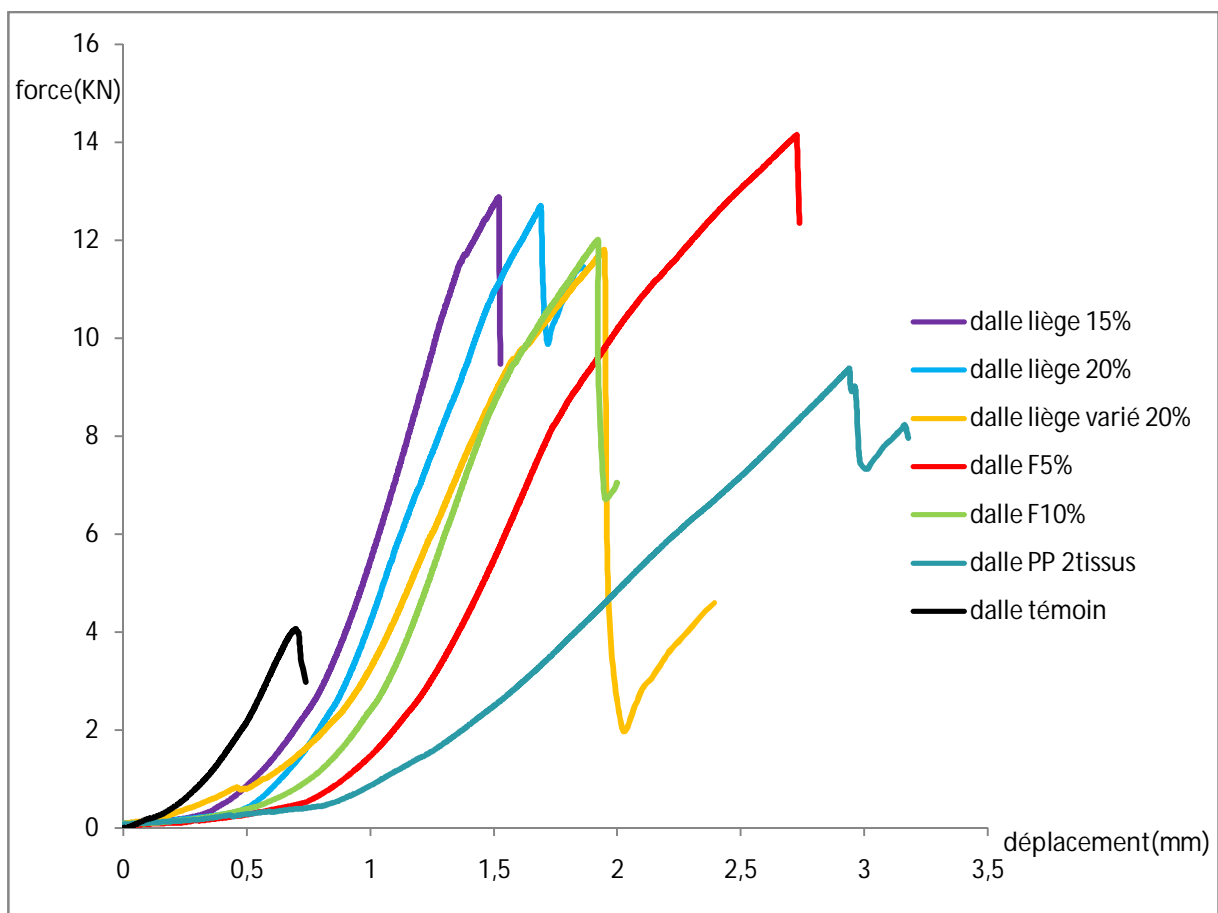


Figure 4.4.63.d. Courbe de comparaison force-déplacement

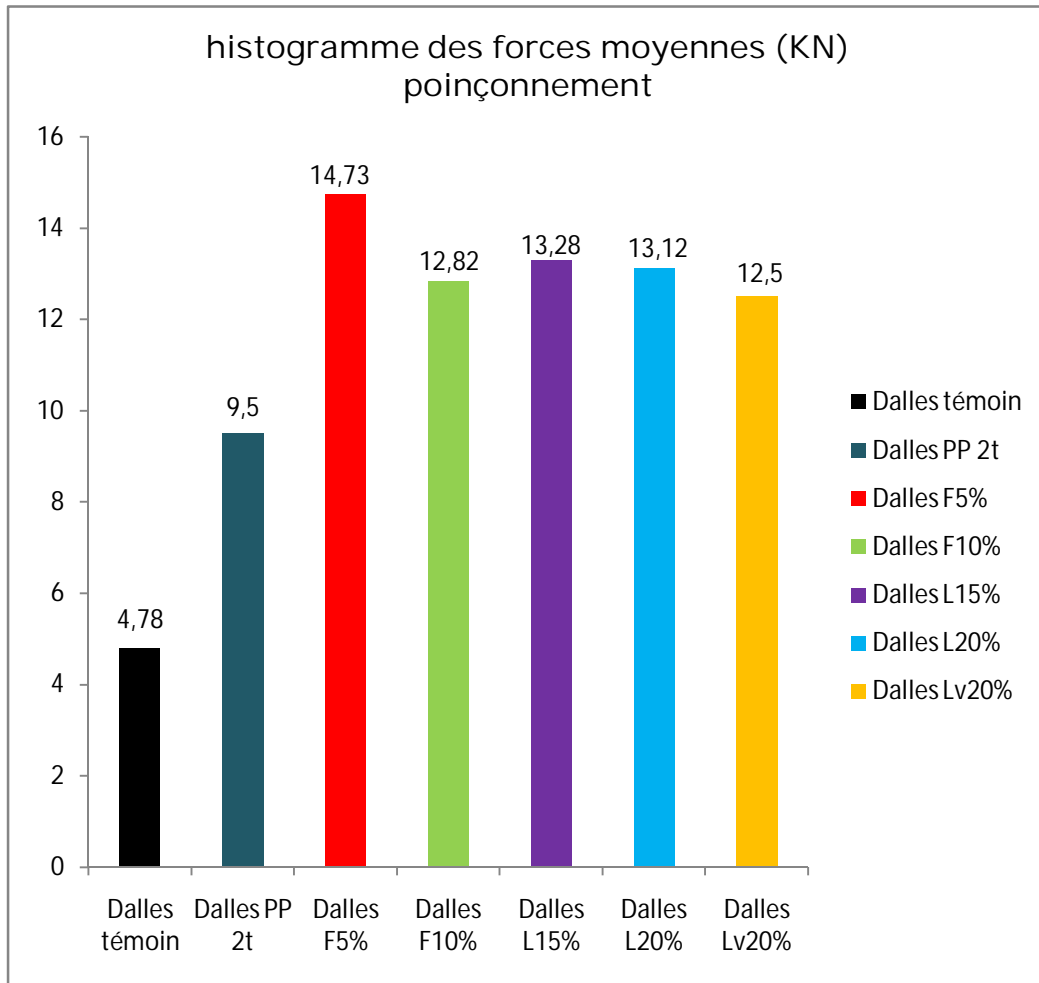


Figure 4.4.63.e. Histogramme des forces

La résistance ultime moyenne atteinte lors des essais est de **4.78 KN** pour les dalles en béton non renforcées (témoin) et de **14.73 KN** pour les dalles renforcées.

L'influence des propriétés des composites sur les dalles renforcées par des plaques en composites d'épaisseur 2.0 mm, en comparaison avec les dalles de référence, on remarque que l'ajout d'une plaque composite de 2 mm d'épaisseur permet d'augmenter la capacité ultime de la dalle de 308%.

Ce gain au niveau de la charge ultime est accompagné parfois par un accroissement en ductilité du comportement qui se traduit par une augmentation de la flèche au moment de la rupture, notamment pour les variantes « Dalles F5% et Dalles PP 2t ».

D'après les courbes, nous pouvons noter que l'évolution de la flèche est composée de trois phases :

- la première phase est telle que les petites valeurs de la force (avant environ 8KN) pour les dalles renforcées, n'entraînent pas de fissuration du béton tendu et ainsi les dalles se comportent élastiquement.

- la seconde phase est relative à la fissuration de la partie tendue au centre des dalles, qui induit une augmentation de la déformation et une raideur globale plus faible, avec un comportement sensiblement linéaire.
 - La troisième est la phase de rupture, Lorsque les lignes d'articulations ont atteint un stade de développement tel que la dalle est transformée en mécanisme, une très légère augmentation des charges conduit à des rotations importantes autour des lignes d'articulation conduisant ainsi à l'effondrement de la dalle.
- Le tableau suivant résume quelques exemples de modes de rupture des dalles les plus dominants

Tableau 4.15 : Modes de rupture des éprouvettes

Spécimens	Résistance	Mode de rupture
Dalle témoin 1/3	5.19 KN	-Rupture suivant le sens longitudinale -rupture par flexion
Dalle témoin 2/3	4.37 KN	-Rupture dans les deux directions -Rupture par flexion
Dalle +composite 1/3 PP 2 tissus disposés dans les 2 directions	9.424 KN	-Fissure très fines sur la dalle -Rupture du tissu
Dalles+ composites 2/3 PP 2 tissus disposés dans les 2 directions	9.577 KN	-fissures très fines surfacique -rupture du renfort - pas de rupture de la dalle (présence de fissures très fines)
Dalle +composite 1/3 Fonte 5%+ mat de verre	15.33 KN	-rupture de la dalle par poinçonnement -rupture du renfort par poinçonnement
Dalle +composite 2/3 Fonte 5%+ mat de verre	14.128 KN	-rupture par flexion -fissures surfacique sur la dalle
Dalle +composite 1/3 Fonte 10%+ mat de verre	11.99 KN	Rupture de la dalle et du renfort par flexion
Dalle +composite 2/3 Fonte 10%+ mat de verre	13.65 KN	-Rupture de la dalle et du renfort par flexion
Dalle + composite 1/3 Matrice + 15% liège (D ≤0.08mm, fond) Matrice chargée	13.10 KN	-Rupture de la dalle et du renfort par poinçonnement
Dalle + composite 2/3 Matrice + 15% liège (D ≤0.08mm, fond) Matrice chargée	13.88 KN	-Fissure très fines (dalles) -rupture du renfort par flexion
Dalle + composite 3/3 Matrice + 15% liège (D ≤0.08mm, fond) Matrice chargée	12.87 KN	-rupture du renfort par flexion -fissures très fines superficielle de la dalle
Dalle + composite 1/3 Matrice + 20% liège (D ≤0.08mm, fond) Matrice chargée	12.73 KN	Rupture par flexion du renfort -fissure très fine surfacique du béton
Dalle + composite 2/3 Matrice + 20% liège	13.75 KN	-rupture du renfort par flexion -fissures très fines superficielle du

(D ≤0.08mm, fond) Matrice chargée		béton
Dalle + composite 3/3 Matrice + 20% liège (D ≤0.08mm, fond) Matrice chargée	12.90	-rupture du renfort par flexion -fissures très fines superficielle du béton
Dalle + composite 1/3 Matrice + 20% liège varié (D ₁ =1mm+D ₂ =0.5mm+D ₃ ≤0.08mm) Matrice renforcée	12.50 KN	-Rupture par poinçonnement

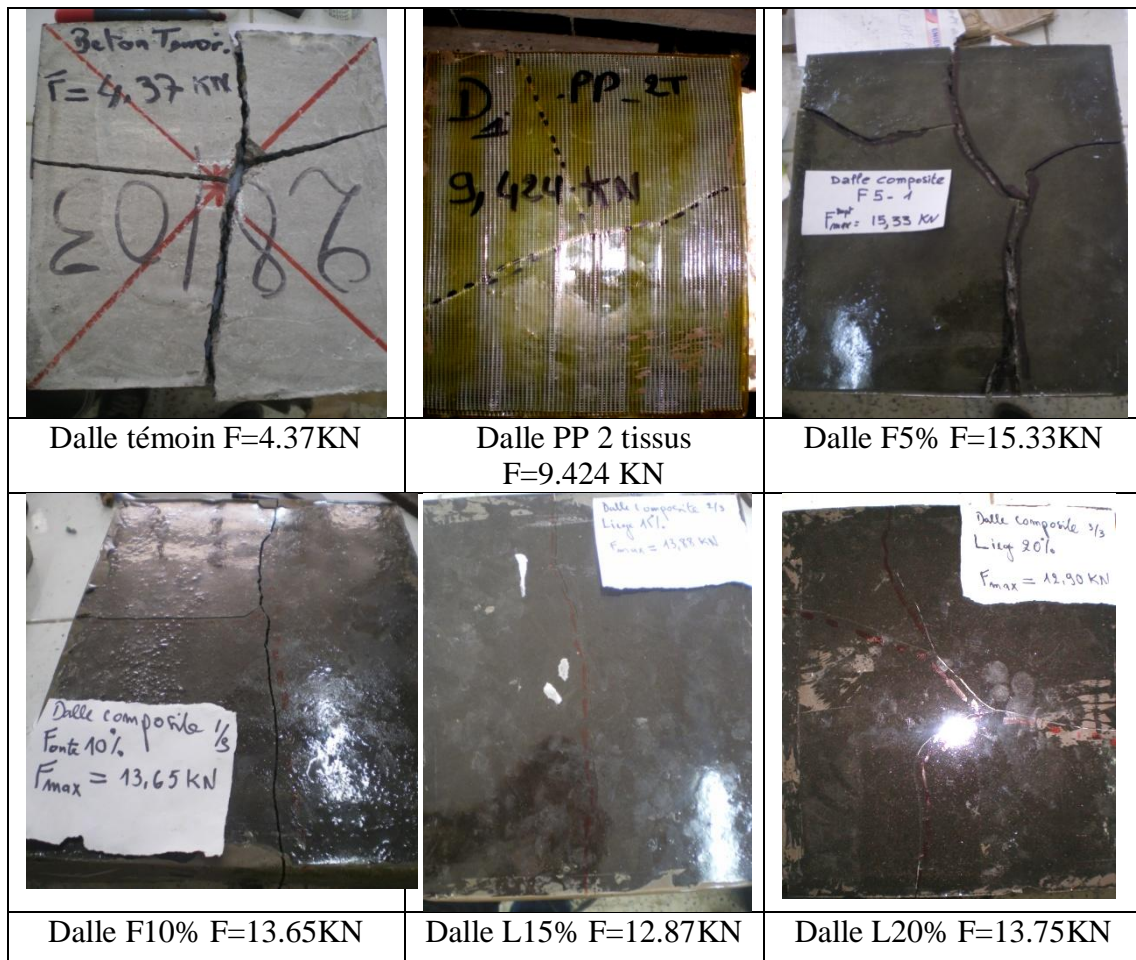


Figure 4.4.64: Mécanismes de rupture des spécimens sous l'effort de poinçonnement

4.4.5. Essai au choc

Dans cette partie on procède à l'expérimentation des dalles sous sollicitation dynamique. Il s'agit d'un essai de choc dur

L'essai de choc prévu est dû à l'impact d'un projectile cylindrique en acier de diamètre 6cm et d'une hauteur de 14cm en chute libre sous la pesanteur et sans vitesse initiale.

Toutes les dalles reposent sur les quatre cotés. S’agissant des dalles renforcées, c’est la partie renforcée qui est soumise au contact du projectile, pour que l’effet d’impact soit absorbé (diminué) par le renfort.

Pour le bon déroulement de ces essais nous avons fabriqué une tour de chute pour assurer la verticalité du projectile et de centrer l’effort de l’impact au milieu de la dalle.

Une fois la dalle est placée et centrée sous le dispositif de choc, on fixe le clapet d’arrêt sur la hauteur de chute, et on introduit la masse dans le tube, cette dernière s’arrête à la hauteur fixée, en suite on tire le clapet, la masse chute sur la dalle sans vitesse initiale.

Dans le cas de la chute libre d’une masse m l’énergie d’impact est définie par la hauteur de chute notée h . l’énergie d’impact est déterminée par l’énergie potentielle notée E_p .

$E_p = mgh$ Considérons la conservation de l’énergie (l’énergie potentielle égale à l’énergie cinétique) : $E_p = E_c = \frac{1}{2}mv^2$ avec $v = \sqrt{2gh}$ vitesse d’impact.

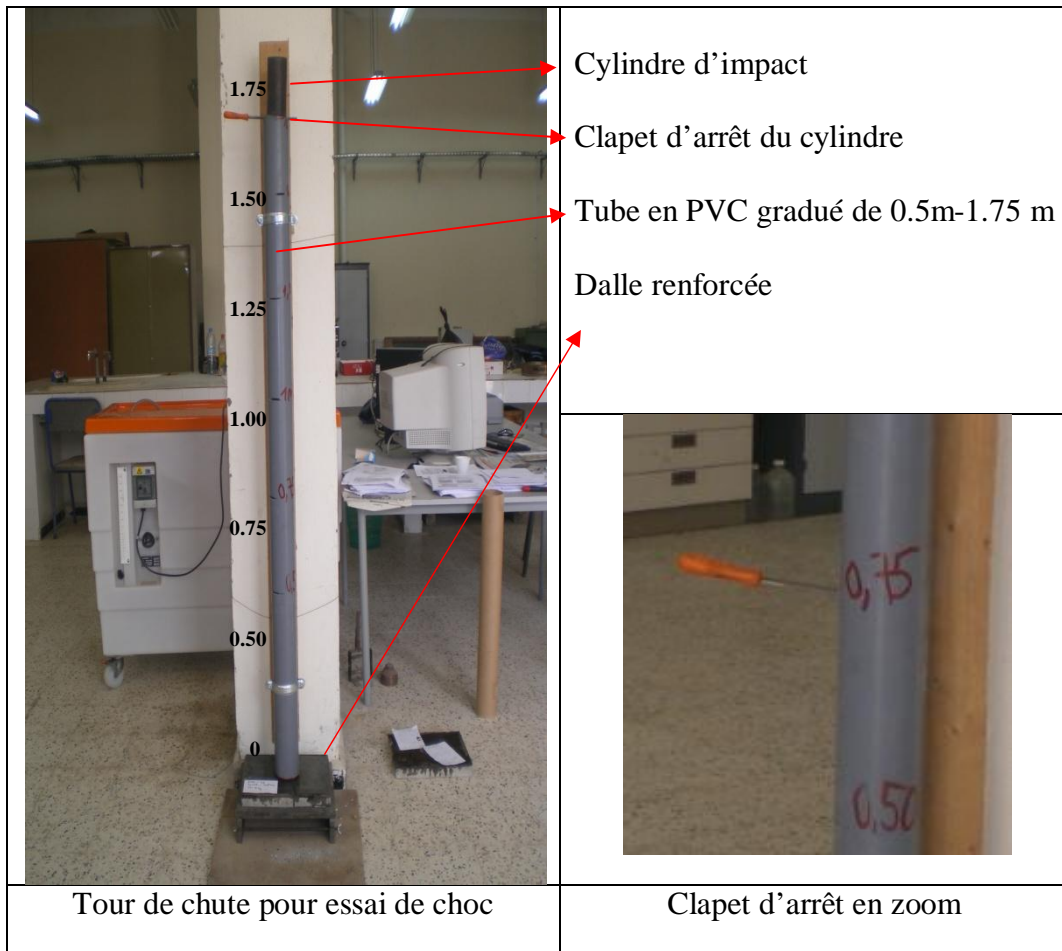


Figure 4.4.65: Principe de fonctionnement de la tour de chute

➤ Résultats des essais aux chocs des dalles

Tableau 4.16 : Résultats des essais aux chocs

Eprouvettes	Hauteur de chute (m)	Masse du projectile (Kg)	Vitesse d'impact (m/s)	Energie d'impact (joules)	Observations
Dalle F5%	1.25	3	4,95	36,7875	Aucune
	1.50	3	5,42	44,145	Micro fissure (béton)
	1.75	3	5,86	51,5025	Rupture
Dalle F10%	1	3	4,43	29,43	Aucune
	1.25	3	4,95	36,7875	Rupture
	1.25	3	4,95	36,7875	Rupture
Dalle 2 PP 2t	1.25	3	4,95	36,7875	Aucune
	1.50	3	5,42	44,145	Micro fissure (béton)
	1.75	3	5,86	51,5025	Rupture
Dalle L15%	1.25	3	4,95	36,7875	Aucune
	1.50	3	5,42	44,145	Rupture
	1.50	3	5,42	44,145	Rupture
Dalle L20%	1.25	3	4,95	36,7875	Aucune
	1.50	3	5,42	44,145	Rupture
	1.50	3	5,42	44,145	Rupture
Dalle Lv20%	1.25	3	4,95	36,7875	Aucune
	1.50	3	5,42	44,145	Rupture
	1.50	3	5,42	44,145	Rupture
Dalle témoin	1	3	4,43	29,43	Rupture
	0.75	3	3,84	22,0725	Rupture
	0.50	3	3,13	14,715	Rupture

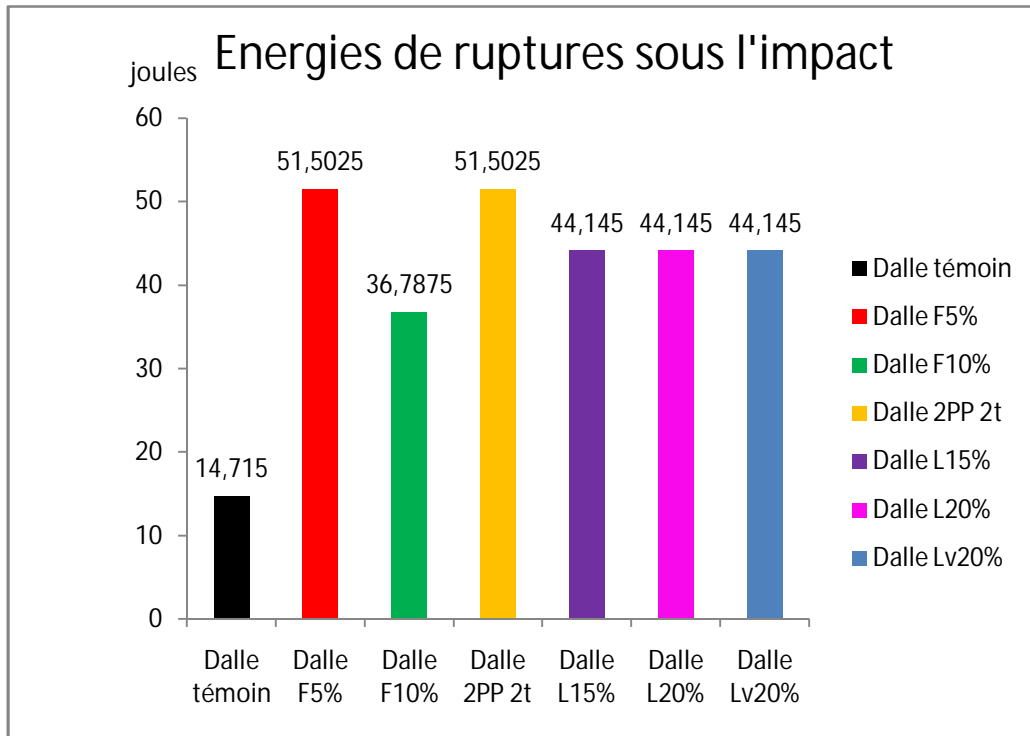


Figure 4.4.66: Comparaison énergétique

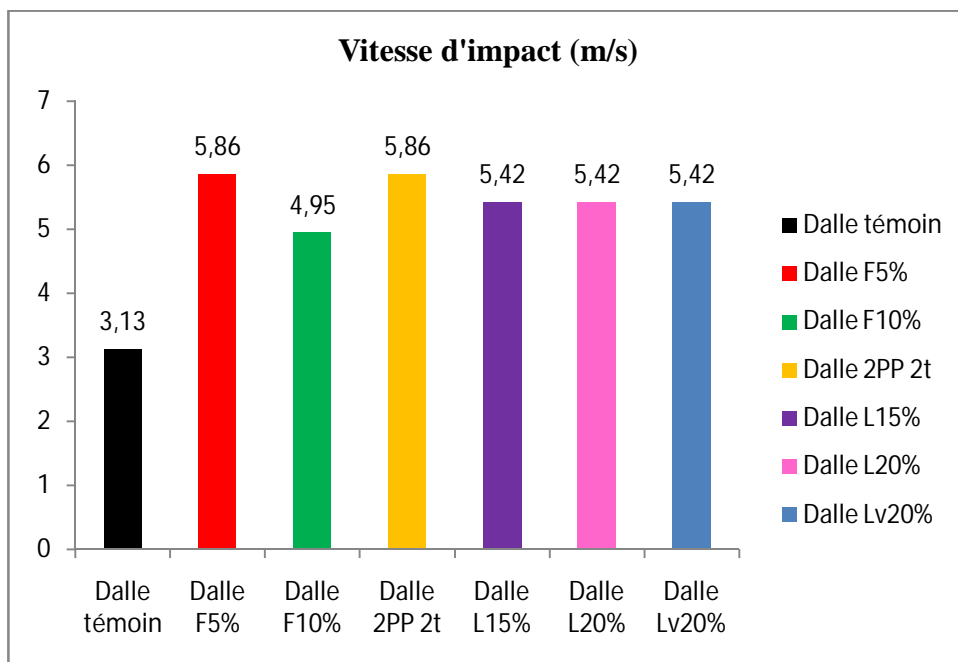


Figure 4.4.67: Variation de la vitesse d'impact

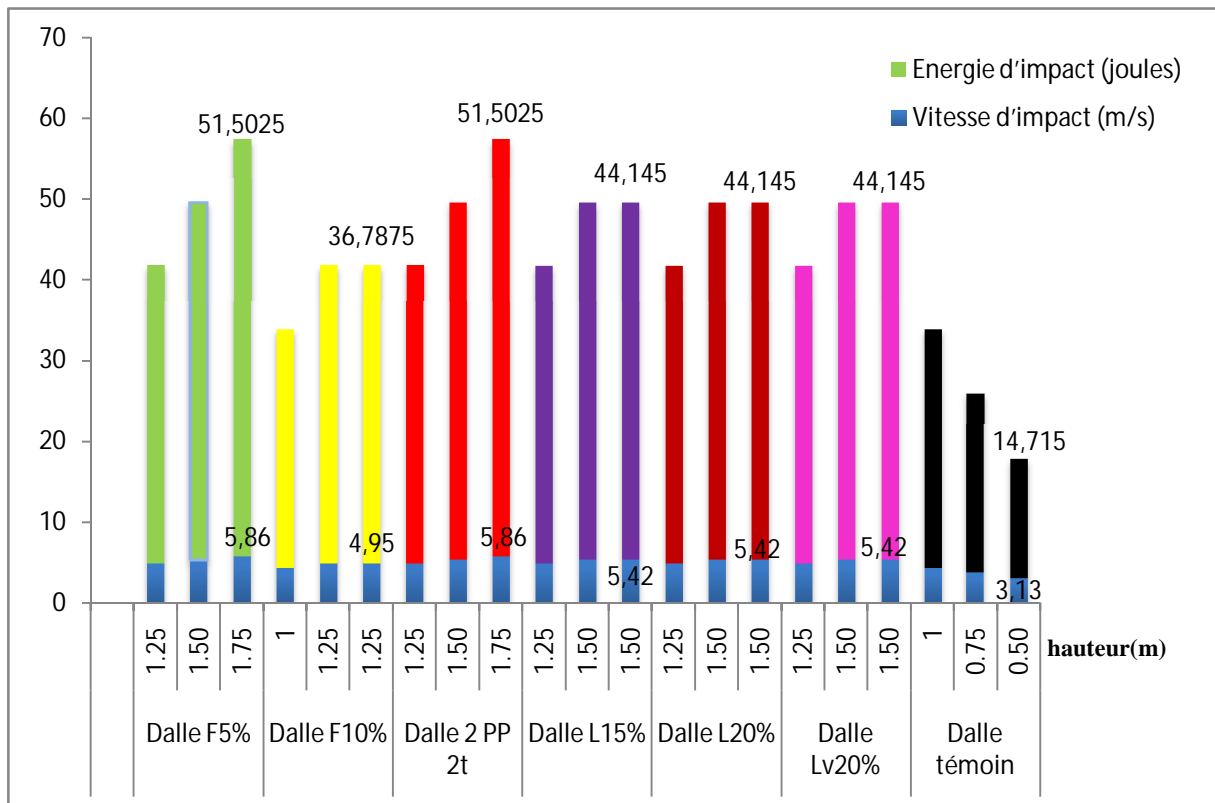


Figure 4.4.68: Influence de la hauteur de chute sur l'énergie potentielle et la vitesse d'impact

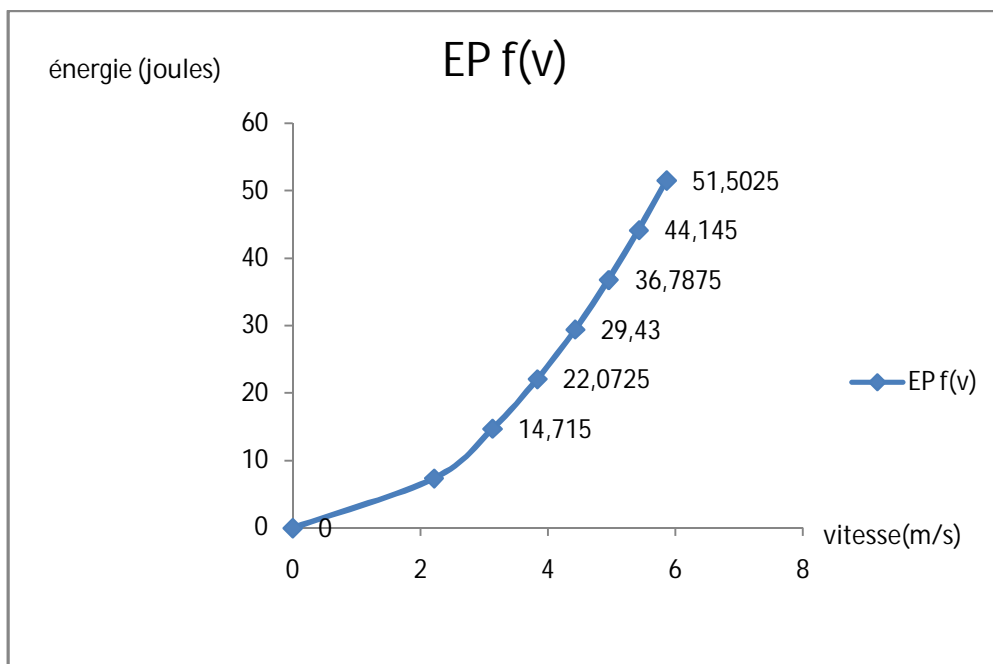


Figure 4.4.69: variation de l'énergie potentielle en fonction de la vitesse

L'analyse des résultats précédents nous permet de conclure ce qui suit :

L'énergie de rupture des dalles en béton (**témoin**) est évaluée à **14.715 joules**, par contre pour les dalles renforcées, la meilleure valeur de l'énergie de rupture est donnée par les variantes «**Dalle F5% et Dalle PP2t**» qui est de l'ordre de **51.502 joules**, l'amortissement du choc est assuré par le composite conçu pour protéger les dalles.


Pour rappel les flèches maximales enregistrées lors des essais de poinçonnement pour les mêmes types de dalles (**Dalle F5% et Dalle PP2t**) sont plus importantes par rapport autres variantes. Ce résultat peut être justifié par la ductilité et les caractéristiques des matériaux utilisés à savoir le mat en fibres de verre et le tissu en fibres de polypropylène.


La variante «**Dalle F10%** » a donné une énergie plus faible, en évidence l'incorporation excessif de la poudre de fonte fragilise le matériau, de la on peut déduire que le volume fonte nécessaire pour avoir un bon comportement vis-à-vis de l'impact est de 5%.


Quant aux dalles renforcées de matrices chargées de liège, toutes les variantes ont donné la même énergie de rupture à savoir **44.14 joules** mais le mode de rupture diffère d'une éprouvette à une autre. En effet les dalles renforcées de liège varié nommées «**Dalle Lv20%**» sont caractérisées par un bon retour élastique marqué par la surface d'impact tracée sur le composite après l'impact du cylindre.


La variation du pourcentage de la poudre de liège dans la matrice peut être remarquée sur le comportement à la rupture des dalles nommées «**Dalles L15%, Dalles L20%**» décrites ci-après.


➤ **Modes de rupture des dalles sous le choc**

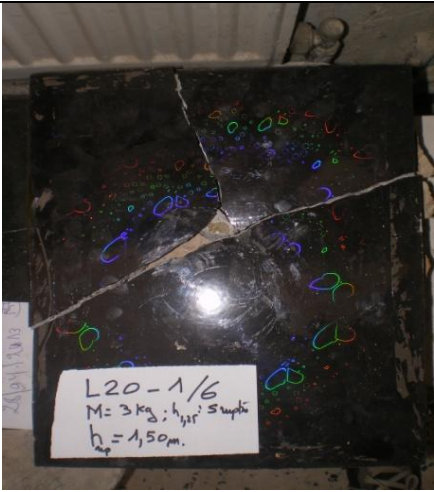
Type de dalle	Dalles témoins (béton)
Mode de rupture	- Rupture totale de l'élément - Les débris éparpillés
Hauteur Max	0.5m
Energie	14.715 joules
Photo de spécimen	


Type de dalle	Dalles renforcées en composite (époxy + 5% fonte +1 tissu mat de verre)
Mode de rupture	- Rupture de l'élément mais les débris restent liés - Non apparition de macro fissures
Hauteur Max	1.75m
Energie	51.5025 joules
Photo de spécimen	

Type de dalle	Dalles renforcées en composite (époxy + 10% fonte +1 tissu mat de verre)
Mode de rupture	<ul style="list-style-type: none"> - Rupture transversale de la dalle. - Apparition d'une seule fissure diagonale de la dalle - Non présence des fissures secondaires - Rupture du béton et du renfort simultanément.
Hauteur Max	1.25 m
Energie	36.7875 joules
Photo de spécimen	

Type de dalle	Dalles renforcées en composite (époxy + 2tissus polypropylène)
Mode de rupture	<ul style="list-style-type: none"> - Rupture du béton avec des petites fissures du renfort - L'élément reste complet (débris liés).
Hauteur Max	1.75 m
Energie	51.5025 joules
Photo de spécimen	

Type de dalle	Dalles renforcées avec matrice chargée (époxy+15% Liège fond)
Mode de rupture	- Rupture simultanée du béton et du renfort
Hauteur Max	1.50 m
Energie	44.145 joules
Photo de spécimen	

Type de dalle	Dalles renforcées avec matrice chargé (époxy+20% Liège fond)
Mode de rupture	- Rupture totale de l'élément (béton + renfort) avec éparpillement des débris.
Hauteur Max	1.50 m
Energie	44.145 joules
Photo de spécimen	

Type de dalle	Dalles renforcées avec matrice chargé (époxy+20% Liège varié)
Mode de rupture	<ul style="list-style-type: none"> - Champs de fissuration important - Surface d'impact compactée - Rupture de l'élément renforcé - Décollement des débris
Hauteur Max	1.50m
Energie	44.145 joules
Photo de spécimen	

Conclusion du chapitre

L'étude expérimentale nous a permis de mettre en exergue l'apport apporté par le matériau composite et la matrice chargée en termes d'amélioration des performances mécaniques telles que, les résistances en flexion, au poinçonnement et surtout au choc. L'analyse des résultats nous permet également de conclure que le choix de type de charge à considérer et la fraction massique/volumique sont des paramètres de conception primordiaux dans le cadre de la réhabilitation ou de confortement des éléments de structures en béton armé.

Aussi, nous considérons que d'autres investigations expérimentales poussées sont indispensables et nécessaire pour valider ces approches et d'établir un guide pratique et technique sur le choix des charges et des composites à utiliser pour reprendre les sollicitations mécaniques statiques ou dynamique aux quelles l'élément en béton est soumis.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE

Le contexte général de la présente étude sert à montrer le rôle primordial que joue le renforcement par des composites sur l'amélioration du comportement du béton en termes de résistance et de ductilité. Cela a été montré à partir d'une investigation expérimentale appliquée sur des spécimens cylindriques, prismatiques et plaques, soumis à des sollicitations statiques et dynamiques.

Le collage de tissu composite, permet d'augmenter considérablement la résistance caractéristique du béton à la flexion, au poinçonnement et au choc. Cette amélioration est due à la différence des rigidités entre le composite et le support béton. Cette technique de renforcement confirme que le béton gagne en ductilité et cela grâce au composite qui retarde la microfissuration et améliore le comportement post-fissuration.

Nous constatons que le type et la nature de charges utilisée dans la matrice époxyde permet d'améliorer les résistances et la déformabilité de la plaque composite. Aussi, cette performance est directement liée à la fraction massique des charges.

Nous avons également constaté que la résistance et la ductilité des spécimens renforcés augmentent en fonction du type de renfort (fibres de verre , tissu en polypropylène).

Cette technique sert aussi à montrer l'intérêt de renforcement des éléments de structures qui seront assujettis aux sollicitations dynamiques, telles que les impacts et les chocs. Cas très fréquent pour les piles de ponts, lors des accidents de la route.

Cette technique de renforcement peut s'avérer pratique en termes de gain en matière de résistance et de ductilité et en termes d'augmentation de la durée de vie de l'élément sans oublier la facilité de sa mise en œuvre.

Cependant, pour valider cette technique, nous considérons que d'autres essais et investigations sont nécessaires pour appréhender le comportement réel de ces éléments renforcés, d'optimiser le type de composite, la fraction massique et surtout de mettre au point des procédés innovants de renforcement des éléments de structures en béton renforcés par des composites.

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographique

- [1] : **F.Gabrysiak** « Matériaux-Les Bétons »p1-2
- [2] : **Collection Technique Béton Tome 1** « les constituants des bétons et des mortiers »
- [3] : **Stéphan ASSIÉ** « DURABILITE DES BETONS AUTOPLAÇANTS » thèse de doctorat INSA Toulouse 2004.
- [4] : **Hanaa Fares** « propriétés mécanique et physico-chimiques de béton autoplaçants exposés à une température élevée » thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise
- [5] : **STEFANO GUANDALINI** « Poinçonnement symétrique des dalles en béton armé » thèse de doctorat, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, 2005.
- [6] : **El Houssain ROCHDI** « contribution a l'analyse du comportement mécanique de dalles en béton armé renforcées par matériaux composites » thèse de doctorat université CLAUDE BERNARD - LYON 1. 2004.
- [7] : **François TOUTLEMENDE** « résistance au choc des structures en béton : du comportement du matériau au calcul des ouvrages » thèse de doctorat Ecole National des Ponts de Chaussés,1994.
- [8] : **Pierre KOEHLIN** « Modèle de comportement membrane-flexion et critère de perforation pour l'analyse de structures minces en béton armé sous choc mou ». Thèse de Doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie – Paris VI.2007
- [9] **L. Berreur, B. d. Maillard, and S. Nösperger**, "L'industrie française des matériaux composites," Ministère de l'économie des finances et de l'industrie, pp. 1-47, 2002.
- [10] "**GLOSSAIRE DES MATERIAUX COMPOSITES**," Centre d'animation régional en matériaux avances, 2006.
- [11] **B. E. H. LY**, "Nouveaux matériaux composites thermo-formables à base de fibres de cellulose," INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, 2008.

[12] **A. BOUDENNE**, "Etude expérimentale et théorique des propriétés thermo-physiques de matériaux composites à matrice polymère," Université PARIS XII, 2003.

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

[14] **H.-H. Kausch, N. Heymans, C. J. Plummer, and P. Decroly**, Matériaux polymères: propriétés mécaniques et physiques, 2001.

[15] **H. BEWA**, "Matériaux polymères biodégradables et applications Note de Synthèse II," Direction des Energies Renouvelables, des Réseaux et des Marchés Energétiques, pp.1-16, 2006.

[16] **P. BARDONNET**, "Résines époxydes (EP)," Techniques de l'Ingénieur, vol. A3465.

[17] **M. CHEVALIER**, "Phénoplastes ou phénols-formols PF," Techniques de l'Ingénieur, vol. A3435.

[18] **J.-M. Berthelot**, Matériaux composites: Comportement mécanique et analyse des structures, 1999.

[19] **L. Berreur, B. d. Maillard, and S. Nösperger**, "L'industrie française des matériaux composites," Ministère de l'économie des finances et de l'industrie, 2002.

[20] **C. LORRETTE**, "Outils de caractérisation thermo-physique et modèles numériques pour les composites thermo-structuraux à haute température," l'Université Bordeaux 1, 2007.

[21] **D. GUILLON**, "Fibres de verre de renforcement," Techniques de l'Ingénieur, vol. A2110.

[22] **J. LUYCKX**, "Fibres de carbone," Techniques de l'Ingénieur, vol. A2210.

[23] <http://www-ipst.u-strasbg.fr/cours/materiaux-composites/comp0.htm>.

[24] **S. BENSAID**, "CONTRIBUTION A LA CARACTERISATION ET A LA MODELISATION ELECTROMAGNETIQUE ET THERMIQUE DES MATERIAUX COMPOSITES ANISOTROPES," l'Université de Nantes, 2006.

[25] **N. Gupta**, "CHARACTERIZATION OF SYNTACTIC FOAMS AND THEIR SANDWICH COMPOSITES: MODELING AND EXPERIMENTAL APPROACHES," The Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, 2003.

[26] **D. Gay**, Matériaux composites, 5ième édition ed, 2005.

[27] **F. BERBAIN and A. CHEVALIER**, "Mise en œuvre des composites," Techniques de l'Ingénieur, vol. A 3 720.

[28] **P. JACQUINET**, "Moulage par compression des SMC polyesters et phénoliques," Techniques de l'Ingénieur, vol. A 3 727.

[29] **THEILLOUT J.N.**, "Le projet de renforcement ou de réparation des ponts en béton. In CALGARO (J.-A.), LACROIX (R.) et al. Maintenance et réparations des ponts", Paris : Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, pp. 425-459, (1997).

[30] **ACI COMMITTEE 440.2R-08**, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures", American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, (2008).

[31] **QUIERTANT M.**, "Matériaux organiques spécifiques pour la construction", Yves Mouton (Ed.), Chapitre 23, pp. 503–525, ISTE, Londres (2011).

[32] **KARBHARI, V. M.**, "Materials considerations in FRP rehabilitation of concrete structures", J. Mater. Civil Eng. 13(2), pp. 90-97, (2001).

[33] **Association Française de Génie Civil**, “Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites – Recommandations provisoires, Documents scientifiques et techniques”, (2011).

[34] **CROMWELL J.R., HARRIES K.A. and SHAHROOZ B.M.**, “Environmental durability of externally bonded FRP materials intended for repair of concrete structures”, *Construction and Building Materials* 25(5), pp. 2528-2539, (2011).

[35]:**Noureddine HOUHOU** « Durabilité des interfaces collées béton/renforts composites: développement d'une méthodologie d'étude basée sur un dispositif de fluage innovant conçu pour être couplé à un vieillissement hygrothermique. » **Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est 2012.**

[36]: **BISBY L.A. et al.**, “Educational Module 4 : An Introduction to FRP Strengthening of Concrete Structures”, ISIS Canada, (2006).

[37] : **El Houssain ROCHDI** «contribution a l'analyse du comportement mécanique de dalles en béton arme renforcées par matériaux composites » L'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON 1.