

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES**



Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Mémoire de Magister

Présenté par :

M^{elle} : BENFADEL Karima

En vue de l'obtention du diplôme de **MAGISTER** en :

Filière : Sciences et Génie des Matériaux

Option : Physique et Mécanique des Matériaux

TITRE DU MEMOIRE

**Élaboration et caractérisation de panneaux
sandwichs à matrice cimentaire destinés à la
construction**

Devant le jury composé de :

BENMOUNAH Abdelbaki	Professeur	UMB-Boumerdès	Président
BEZZAZI Boudjema	Professeur	UMB-Boumerdès	Promoteur
GHOMARI Abdelhamid	Professeur	UAB-Mostaganem	Examineur
GHERNOUTI Youcef	MCA	UMB-Boumerdès	Examineur

Remerciements

*Tout d'abord je tiens à remercier Dieu tout puissant
Qui ma donner de la force et du courage pour terminer mes études dans les bonnes
conditions.*

*Aussi je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon promoteur **Pr. BEZZAZI
Boudjema** pour son accueil, son suivie, ces conseils et son soutien afin de
réaliser ce travail.*

*Je remercie très vivement le jury composé de : Monsieur **BENMOUNAH
Abdelbaki** professeur à **UMB-Boumerdès**, le président de jury, monsieur
GHOMARI Abdelhamid professeur à **UAB-Mostaganem** et monsieur
GHERNOUTI Youcef MCA à **UMB-Boumerdès** Pour l'honneur qu'ils me
font en acceptant de juger ce travail.*

*Aussi, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation
de ce projet à vous **Mr. ARIBI Chouaib**, **Mr HALIMI rafik**, **Mr IYADI** et **Mr
HAMIDOUCHE Fahim***

*Mes derniers remerciements et ce ne sont pas les moindres vont à tous les
membres de l'unité de recherche : **Matériaux – procédés et environnement** et
surtout à **Mr AIT HASSANE**, **Melle DJEMEL Fatiha**, **M^{elle} LAKRAB Nadia**
et **M^{elle} HAOUANOH Djedjiga**.*

*Sans oublié de remercier mes Exe collègues de la direction logistique du groupe
OLA CONSTRUCTION.*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à

Mes très chers parents,

Mes frères, sœurs et leur famille,

Sofiane et sa famille,

Et à tous ceux qui m'ont soutenu.

Résumé

Dans ce travail nous avons étudié un béton ou un mortier dénommé béton de polystyrène. Le choix des compositions donne des densités de béton très faibles. Pour remédier à cette légèreté qui influencera sur le comportement mécanique de ce béton, nous avons incorporé des fibres de verre sous forme de nappes (grilles).

Des essais préalables sur le dosage et la maniabilité nous avons amené à fixer les dosages des billes de polystyrène à introduire dans les mortiers.

Pour les formulations, chaque gâchée est préparée de la même manière. En effet le taux de polystyrène est variable.

Le but de notre travail est de faire varier le taux de polystyrène et le nombre de nappes afin d'obtenir la variante optimale.

Afin de réaliser cette étude plusieurs essais ont été effectués sur les différents mélange à l'état frais et durci, ainsi que des caractérisations sont effectuées sur l'ensemble des variantes des stratifiés et des sandwiches néanmoins la formulation est un paramètre très important dans ce travail, mais l'étude du comportement mécanique, soit à la compression, à la flexion ou à la fatigue est aussi important surtout en présence des fibres.

Mots clés : panneaux sandwiches, béton de polystyrène, fibres de verre, mortier, formulation, flexion trois point et fatigue.

Abstract

In this work we studied a type of concrete or mortar which is named concrete of polystyrene. The choice of the compositions gives densities of very weak concrete. To treat this lightness which will influence the mechanical behavior of this concrete, one incorporated glass fibers in the form of tablecloths (grids). Preliminary tests on proportioning and the handiness guided us to fix proportioning of the polystyrene chips to be introduced into the mortars.

For the formulations each batch is prepared same manner. Indeed the polystyrene rate is variable. The goal of our work is to vary the polystyrene rate and the number of tablecloths in order to obtain the alternative optimal.

In order to make a this study several tests carried out on the different ones mixes at the state fresh and hardened, thus of the characterizations are carried out on the whole of the alternatives of the laminates and of the sandwiches nevertheless the formulation is a very significant point in this work, but the mechanical study of behavior, is with compression, bending or with tiredness is also significant especially in the presence of fibers.

Key words: sandwich panels, concrete of polystyrene, glass's fibers, mortar, formulation, bending three points.

ملخص

في هذه الأطروحة درسنا نوع من الخرسانة أو الملاط المسمى بخرسانة البوليسترين. حيث ان صياغة التشكيلية تعطي خرسانة ذات كثافة منخفضة مما يؤثر سلبا على خصائصها الميكانيكية. في هذا الاطار تم تدعيمها بألياف الزجاج ذات شكل مسامي. لقد تم اجراء تجارب أولية من اجل ايجاد الصيغة المثلى التي تسمح بتحقيق الشروط الضرورية لخصائص الاسمنت قبل التصلب.

في هذا الاطار عدة صياغات تم تحقيقها تختلف فيما بينها من حيث نسبة البوليسترين و كذلك نمط التعزيز بألياف الزجاج. العينات المصاغة تم اخضاعها لمختلف التجارب الميكانيكية الروتينية (الثني ثلاثي النقط) و تجارب الاجهاد مما يسمح بتقييم اثر المضافات على هذا النوع من الخرسانة.

الكلمات المفتاحية : خرسانة البوليسترين , ألياف الزجاج , الخصائص الميكانيكية , الثني ثلاثي النقط و تجارب الاجهاد.

Sommaire

Liste des figures.....	I
Liste des tableaux.....	II
Introduction générale.....	01

Chapitre I : composites sandwichs.

I.1. Introduction :.....	4
I.2. Définition :.....	5
I.3. Les éléments constituant les panneaux sandwichs :.....	5
I.3.1. Les peaux :.....	5
I.3.2. Les âmes :.....	9
I.3.2.1. Les mousses :.....	9
I.3.2.2. Le bois :.....	11
I.3.2.3. Le nid d'abeilles :.....	11
I.3.3. Adhésifs (interface) :.....	11
I.4. Conception des structures sandwichs:.....	12
I.4.1. Géométries des sandwichs :.....	12
I.5. Comportement mécanique des structures sandwichs :.....	13
I.5.1. Comportement en flexion :.....	13
I.5.2. Comportement en cisaillement :.....	15
I.5.3. Comportement en traction compression :.....	15
I.5.4. Flambement des structures sandwichs :.....	16
I.5.4.1. Le phénomène de flambement :.....	16
I.5.4.2. Flambement global des sandwichs :.....	16
I.5.4.3. Flambement local des sandwichs :.....	17
I.5.5. Comportement en Fatigue :.....	17
I.6. Domaine d'application & avantages des panneaux sandwichs :.....	18

Chapitre II : Bétons légers préfabriqués.

II.1. Introduction :.....	20
II.2. Systèmes de construction :.....	20
II.3. Construction par panneaux :.....	20
II.3.1. Façades portantes :.....	21

II.3.2. Façades non portantes :	21
II.4. Les paramètres les plus importants pour le choix du système :	22
II.5. Nature des produits préfabriqués :	23
II.6. Les type des bétons légers :	23
II.6.1. Type de béton selon la nature de l'ouvrage :	24
II.6.1.1. Le béton léger structurel :	24
II.6.1.2. Le béton léger d'isolation ou de remplissage :	24
II.6.2. Dosage des constituants :	25
II.6.2.1. Les principes de dosage :	25
II.6.2.2. Les méthodes de dosage :	27
II.7. Granulats pour béton léger :	27
II.7.1. Les granulats usuels :	27
II.7.2. Les granulats légers :	28
II.7.2.1. Les granulats légers pour bétons structuraux :	28
II.7.2.2. Les granulats légers pour bétons isolants ou de remplissage :	30
II.7.2.3. Matériaux légers de recyclage :	30
II.8. Béton de polystyrène :	33
II.8.1. Définition :	33
II.8.2. Caractéristiques :	33
II.8.3. Domaines d'application :	34

Chapitre III: Matériaux et méthodes d'essais.

III.1. Introduction :	37
III.2. Elaboration du béton et de sandwich :	37
III.2.1. Matériaux utilisés :	37
III.2.2. Caractérisation des matériaux utilisés :	37
III.2.2.1. Caractérisation du ciment :	37
III.2.2.2. Caractérisation du sable :	39
III.2.2.3. Caractéristiques de polystyrènes expansés :	44
III.2.2.4. Caractéristiques de la fibre utilisée :	45
III.2.2.5. L'eau de gâchage :	45
III.3. Formulation des bétons :	46
III.3.2 confection des éprouvettes:	48
III.4. Essais effectués sur les bétons :	50
III.4.1. Caractéristique du béton à l'état frais :	50
III.4.1.1. La masse volumique (densité):	51

III.4.1.2. Essai de consistance :	51
III.4.1.3. Mesure de la quantité d'air occlus	52
III.4.2. Caractéristique du béton à l'état durci :	52
III.4.2.1. La masse volumique (densité):	52
III.4.2.2. l'absorption d'eau :	53
III.4.2.4. La résistance à la flexion :	55
III.4.2.5. La résistance à la compression :	56
III.4.2.6. Essai de fatigue :	56
III.4.2.7. Caractérisation thermique :	57
III.4.2.7.1. Théorie et évaluation :	58
III.5. Conclusion :	60

Chapitre IV: Résultats et discussion.

IV.1. Introduction :	62
IV.2. Etude de l'influence de dosage en polystyrène sur le comportement physico-mécanique du béton :	62
IV.2.1. La masse volumique du béton frais et durci :	62
IV.2.2. L'ouvrabilité du béton :	64
IV.2.3. Mesure de l'air occlus :	65
IV.2.4. Absorption capillaire :	68
IV.3. Etude de l'influence de l'introduction des fibres sur le comportement mécanique du béton :	71
IV.3.1. La résistance à la compression :	71
IV.3.2. La résistance à la flexion :	74
IV.3.2.1. Effet des fibres sur le comportement en flexion des bétons étudiés :	74
IV.3.2.1.1. Stratifiés à 50% de dosage en billes de polystyrène :	75
IV.3.2.1.2. Stratifiés à 60% de dosage en billes de polystyrène :	78
IV.3.2.1.3. Stratifiés à 70% de dosage en billes de polystyrène :	81
IV.3.2.1.4. Effet de fibres sur évolution de la charge en flexion des sandwichs :	83
IV.3.2.1.5 Interprétation générale de l'essai flexion trois points :	86
IV.3.2.2. Comportement en flexion statique et dynamique des bétons étudiés :	87
IV.3.2.2.1. Stratifiés à 50% de dosage en billes de polystyrène :	87
IV.3.2.2.2. Stratifiés à 60% de dosage en billes de polystyrène :	88
IV.3.2.2.3. Stratifiés à 70% de dosage en billes de polystyrène :	90
IV.3.2.2.4. Sandwichs à 50% de dosage en billes de polystyrène :	91

IV.3.2.2.5 Interprétation générale de flexion statique-dynamique :	91
IV.3.3. La résistance à la fatigue :	92
IV.3.3.1. Fatigue du béton dosé à 50% PSE:	92
IV.3.3.2. Fatigue du béton dosé à 60% PSE:	93
IV.3.3.3. Fatigue du béton dosé à 70% PSE:	94
IV.3.3.4. Fatigue des sandwichs :	94
IV.3.3.5. Fatigue des mortiers de référence :	95
IV. 4. Etude thermique :	96
Conclusion générale.....	99
Références bibliographiques.....	102
Partie annexe.....	108

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Chapitre I		
Figure I.1 :	Les différents constituants d'une structure sandwich.	4
Figure I.2 :	Matériaux pour les peaux.	5
Figure I.3 :	Pli unidirectionnel.	7
Figure I.4 :	fibre de verre et peau élaborée.	8
Figure I.5 :	(a) feuille de polystyrène expansé, (b) structure alvéolaire de polystyrène.	9
Figure I.6 :	Adhésif (interface).	11
Figure I.7 :	Schéma d'une structure sandwich.	12
Figure I.8 :	sollicitation mécanique.	12
Figure I.9 :	Essais de flexion : (a) flexion 3 points, (b) flexion 4 points.	13
Figure I.10 :	Essai de cisaillement.	14
Figure I.11 :	Flambement généralisé de l'âme.	16
Figure I.12 :	Flambement local.	16
Chapitre II		
Figure II.1 :	CSH (a), Portlandite (b).	26
Figure II.2 :	Granulats d'argile expansée.	29
Figure II.3 :	Granulats de schiste expansé.	29
Figure II.4 :	(a), (b) Billes et photo MEB de polystyrène expansé.	31
Figure II.5 :	Granulats de la perlite.	32
Figure II.6 :	Evolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des billes de polystyrène.	34
Figure II.7 :	Système d'application du béton de polystyrène : (a) panneau sandwich préfabriqué, (b) cloison projeté sur place.	35
Chapitre III		
Figure III.1 :	La courbe granulométrique du sable corrigé.	43
Figure III.2 :	Malaxage des constituants.	48
Figure III.3 :	(a) Moules prismatique 7x7x28cm, (b) éprouvettes confectionnées.	48
Figure III.4 :	Essai de consistance.	51
Figure III.5 :	Essai d'air mètre.	52
Figure III.6 :	Essai d'absorption capillaire.	53
Figure III.7 :	Essai d'absorption par immersion. (a) étuve de séchage, (b) bain Maré.	54
Figure III.8 :	Essai de résistance à la flexion.	55

Liste des figures

Figure III.9: Essai de résistance en compression.	56
Figure III.10 : Essai fatigue.	57
Figure III.11 : Analyse thermique par la méthode de la maquette.	58
Figure III.12 : Flux d'énergie thermique à travers un mur. Températures internes et externes air de mur: Θ_{La} , Θ_{La} , Θ_{Wi} , Θ_{Wa}	59

Chapitre IV

Figure IV.1 : La masse volumique des trois bétons à l'état frais.	63
Figure IV.2 : La densité des différents types d'éprouvettes confectionnées.	63
Figure IV.3 : Ouvrabilité des différentes gâchées en fonction du dosage en polystyrène.	65
Figure IV.4 : Absorption capillaire des différentes gâchées.	67
Figure IV.5 : Absorption d'eau par immersion à 20°C.	69
Figure IV.6 : Absorption d'eau par immersion à 40°C.	69
Figure IV.7 : Absorption d'eau par immersion à 60°C.	70
Figure IV.8 : Absorption d'eau par immersion à 80°C.	70
Figure IV.9 : Résistance à la compression des différentes variantes stratifiées.	71
Figure IV.10 : Résistance à la compression des différentes variantes sandwich.	71
Figure IV.11 : La répartition des billes de polystyrène dans une éprouvette.	72
Figure IV.12 : Eprouvette sandwich avant (a) et après (b) essai de compression.	73
Figure IV.13 : La résistance à la flexion des différentes variantes stratifiées.	74
Figure IV.14 : La résistance à la flexion des différentes variantes sandwichs.	74
Figure IV.15 : Effet de fibres sur évolution de la charge en flexion des stratifiés dosé à 50% de billes de polystyrène.	75
Figure IV.16 : Evolution de la charge en flexion des stratifiés dosé à 50% de billes de polystyrène et renforcés à triple faces.	76
Figure IV.17 : Evolution de la charge en flexion des stratifiés dosé à 50% de billes de polystyrène témoins et ceux renforcés à double faces.	77
Figure IV.18 : Effet de fibres sur évolution de la charge en flexion des stratifiés dosé à 60% de billes de polystyrène.	78
Figure IV.19 : Evolution de la charge en flexion du béton dosé à 60% de billes de polystyrène et renforcés à triple faces.	79
Figure IV.20 : Evolution de la charge en flexion du béton dosé à 60% de billes de polystyrène témoins et ceux renforcés à double faces.	80
Figure IV.21 : Effet de fibres sur évolution de la charge en flexion des stratifiés dosé à 70% de billes de polystyrène.	81
Figure IV.22 : Evolution de la charge en flexion des stratifiés dosé à 70% de billes de polystyrène et renforcés à triple faces.	82

Liste des figures

Figure IV.23 : Evolution de la charge en flexion des stratifiés dosé à 70% de billes de polystyrène témoins et ceux renforcés à double faces.....	83
Figure IV.24 : Effet de fibres sur évolution de la charge en flexion des sandwichs.....	84
Figure IV.25 : Evolution de la charge en flexion des sandwichs dosé à 50% de billes de polystyrène avec et sans renfort.....	84
Figure IV.26 : Evolution de la charge en flexion des sandwichs dosé à 60% de billes de polystyrène avec et sans renfort.....	85
Figure IV.27 : Evolution de la charge en flexion des sandwichs dosé à 70% de billes de polystyrène avec et sans renfort.....	85
Figure IV.28 : Evolution de la charge en flexion statique et dynamique des stratifiés dosé à 50% de billes de polystyrène et renforcés à triple faces.....	87
Figure IV.29 : Evolution de la charge en flexion statique et dynamique des stratifiés dosé à 50% de billes de polystyrène témoins et ceux renforcés à double faces.....	88
Figure IV.30 : Evolution de la charge en flexion statique et dynamique des stratifiés dosé à 60% de billes de polystyrène et renforcés à triple faces.....	88
Figure IV.31 : Evolution de la charge en flexion statique et dynamique des stratifiés dosé à 60% de billes de polystyrène témoins et ceux renforcés à double faces.....	89
Figure IV.32 : Eprouvettes soumettent aux charges de : (a) flexion statique et (b) fatigue.....	89
Figure IV.33 : Evolution de la charge en flexion statique et dynamique des stratifiés dosé à 70% de billes de polystyrène et renforcés à triple faces.....	90
Figure IV.34 : Evolution de la charge en flexion statique et dynamique des stratifiés dosé à 70% de billes de polystyrène témoins et ceux renforcés à double faces.....	90
Figure IV.35 : Evolution de la charge en flexion statique et dynamique des sandwichs dosé à 50% de billes de polystyrène et des sandwichs témoins.....	91
Figure IV.36 : Essais de fatigue des stratifiés dosé à 50% de billes de polystyrène.....	92
Figure IV.37 : Essais de fatigue des stratifiés dosé à 50% de billes de polystyrène des stratifiés renforcés à triple faces.....	93
Figure IV.38 : Fissuration d'une éprouvette soumet aux charges de fatigue.....	93
Figure IV.39 : Essais de fatigue des stratifiés dosé à 70% de billes de polystyrène des stratifiés renforcés à triple faces.....	94
Figure IV.40 : Essais de fatigue des sandwichs avec et sans renfort.....	94
Figure IV.41 : éprouvette sous forme sandwich soumet aux charges de fatigue.....	95
Figure IV.42 : Essais de fatigue du mortier témoin et de mortier sandwichs témoins.....	95
Figure IV.43 : Essai de fatigue des éprouvettes témoins : (a) stratifié témoin et (b) sandwich témoin.....	96
Figure IV.44 : Conductivité thermique des différents mélanges à l'état sec et humide.....	97

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
----------------	--------------	-------------

Chapitre I

Tableau I.1	: Les différents types de verre filables :	6
-------------	--	---

Chapitre II

Tableau II.1	: Propriétés du béton léger confectionné à partir d'argile expansée	29
Tableau II.2	: Propriétés du béton léger confectionné à partir de schistes expansés.	29
Tableau II.3	: Propriétés du béton léger confectionné à partir de billes de polystyrène.	31
Tableau II.4	: Propriétés du béton léger confectionné à partir de perlite	32

Chapitre III

Tableau III.1	: composition chimique de clinker	38
Tableau III.2	: composition chimique de clinker	38
Tableau III.3	: caractéristique physiques :	39
Tableau III.4	: caractéristique mécaniques :	39
Tableau III.5	: caractéristiques physiques du sable de Tazmalt.	40
Tableau III.6	: Analyse granulométrique de sable de Tazmalt.	40
Tableau III.7	: caractéristiques physiques du sable fin (Boussaâda).	41
Tableau III.8	: Analyse granulométrique du sable fin (Boussaâda).	41
Tableau III.9	: caractéristiques physiques du sable corrigé.	42
Tableau III.10	: Analyse granulométrique du sable corrigé.	43
Tableau III.11	: caractéristiques des billes de polystyrène expansé.	44
Tableau III.12	: Caractéristiques des feuilles du polystyrène.	44
Tableau III.13	: Caractéristiques de la fibre de verre.	45
Tableau III.14	: les compositions des mélanges réalisés	47
Tableau III.15	: différentes variantes des stratifiés.	49
Tableau III.16	: différentes variantes des sandwichs et mortiers témoins.	50

Chapitre IV

Tableau IV.1	: La masse volumique des différentes compositions de béton à l'état frais.	62
Tableau IV.2	: L'affaissement au cône d'Abrams des différentes compositions étudiées.	64
Tableau IV.3	: mesure de l'air occlus.	66
Tableau IV.4	: Coefficient d'absorption d'eau par capillarité.	67
Tableau IV.5	: absorption d'eau par immersion.	69
Tableau IV.6	: gain de masse G(%) après 24 h d'immersion.	70
Tableau IV.7	: Températures, les valeurs de k et les conductivités de différents matériaux utilisées.	96

Introduction générale

Ces dernières années, l'Algérie est entrée dans un programme quinquennal 2010-2014 dans le domaine du bâtiment et de la construction, mais à l'heure actuelle, des entreprises de réalisation ont marqué un retard important dans la réception des leurs projets, cela pour des raisons de délais ou de coût. Actuellement la construction exige des nouveaux matériaux afin d'optimiser les coûts, réduire les délais, améliorer la pérennité des ouvrages, intégrer la protection de l'environnement... L'industrie du béton répond aux exigences du marché en proposant de nombreuses solutions.

L'une des solutions proposée est un nouveau système de construction par panneaux préfabriqués pour cela nous devons choisir la nature des matériaux utilisés pour réaliser ce système.

Les produits préfabriqués sont de diverses natures. Il peut s'agir d'éléments en béton armé, en béton précontraint ou en composés mixte (polystyrène - fibres...).

Dans notre étude, le matériau utilisé est un béton léger au polystyrène qui est connu par sa faible densité qui influe négativement sur les propriétés mécaniques. Pour remédier à ce point faible nous avons renforcé ce béton par des fibres de verre sous forme d'une nappe tissée, plusieurs variantes d'éprouvettes ont été élaborées soit sous forme de stratifiés ou sandwiches. On faisant varier d'une part la densité du béton par la variation du dosage en polystyrène et d'autre part la variation du nombre et la distribution des nappes. Après élaboration des mélanges plusieurs essais ont été effectués pour bien caractériser et identifier ce type de nouveau béton.

Ce travail est structuré en quatre chapitres divisé en deux parties principales. La première partie est consacrée à l'étude bibliographique qui englobe le premier et le deuxième chapitre, la deuxième partie porte sur la partie expérimentale.

Le premier chapitre est consacré à la présentation de notre problématique et à une synthèse bibliographique concernant le système de construction défini par les composites sandwiches.

Le deuxième chapitre s'articule autour de deux thèmes. Le premier à caractère bibliographique où on détaille tout ce qui concerne les bétons légers et surtout le béton léger préfabriqué. Dans le second, on parle des granulats, leurs natures et origines.

La partie expérimentale qui fait l'objet du troisième et quatrième chapitre. Le troisième chapitre a pour but de présenter les matériaux et les méthodes de synthèse ainsi que les principales caractéristiques physiques et mécaniques, la formulation des différents échantillons ainsi que, le dispositif expérimental.

Le quatrième chapitre s'intéresse à l'analyse et à l'exploitation des résultats expérimentaux obtenus après les différents essais effectués. Les résultats concernant le comportement mécanique des différents échantillons testés qui ont été évalués par calcul, sont également exposés et exploités.

Une conclusion générale dressant un bilan des résultats obtenus et quelques perspectives compléteront ce manuscrit.

Chapitre I

Composites sandwichs

I.1. Introduction :

Le développement rapide des produits, des pratiques technologiques et industrielles sont accompagnés par de nouvelles générations de matériaux. Parmi ces matériaux, les composites qui évoluent sous différents types et formes. Parmi ces nouveaux composites, les matériaux appelés « sandwichs ». Ce sont des structures constituées de deux peaux minces et rigides, séparées par une âme plus épaisse et beaucoup plus souple et légère. Cette configuration assure un bon compromis, une structure à la fois légère et résistante. Par conséquent, leur utilisation est de plus en plus fréquente dans différents secteurs industriels tels que l'aéronautique, le transport, la construction etc. Historiquement, ce sont les premières structures composites allégées et performantes [1].

I.2. Définition :

Les panneaux sandwichs sont des produits de construction préfabriqués. Ils sont constitués (figure I-1) de deux peaux (ou semelles) en matériaux composites éloignés l'une de l'autre par une âme qui maintient leur écartement. L'âme est en matériau alvéolé de faible densité, aux caractéristiques mécaniques faibles par rapport à celles des deux peaux. Il existe une infinité de combinaisons de matériaux pour l'âme et pour les peaux, suivant les domaines d'utilisation, en génie civil et en construction spatiale. [2]

I.3. Les éléments constituant les panneaux sandwichs :

Une structure sandwich présente une solution de compromis permettant à la fois de rigidifier et d'alléger une structure. Elle est constituée généralement de trois composants de base possédant des propriétés différentes, mais complémentaires [3] : les peaux, l'âme et l'interface (adhésif). La figure I.1 présente les différents éléments constitutifs d'un matériau composite en construction sandwich [4] :

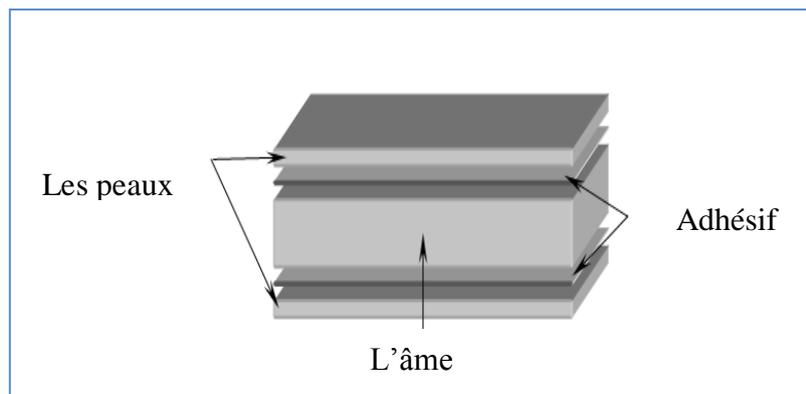


Figure I.1 : Les différents constituants d'une structure sandwich. [4]

I.3.1. Les peaux :

Généralement de faibles épaisseurs, les peaux sont constituées de matériau pouvant être obtenu sous forme de couche. Elles peuvent être en bois, métal ou matériau composite. Le choix de la nature de la peau s'effectue principalement en fonction des performances mécaniques exigées. Mais, généralement, une rigidité élevée et une excellente résistance à la compression et à la tension sont les principales qualités recherchées. [5]

Elles sont constituées le plus souvent :

- ✓ Pour les composites à moyennes et hautes performances, de stratifiés à matrice thermodurcissable (polyesters insaturés, époxydes ou thermoplastique polypropylène...) et d'un renfort fibreux (mat et tissu) de verre et de carbone ou d'aramide;
- ✓ Pour les structures portantes, de feuilles métalliques (aluminium, acier) ;
- ✓ Pour des structures de faibles à moyennes performances, de bois, laminé, stratifié, contre-plaqué.

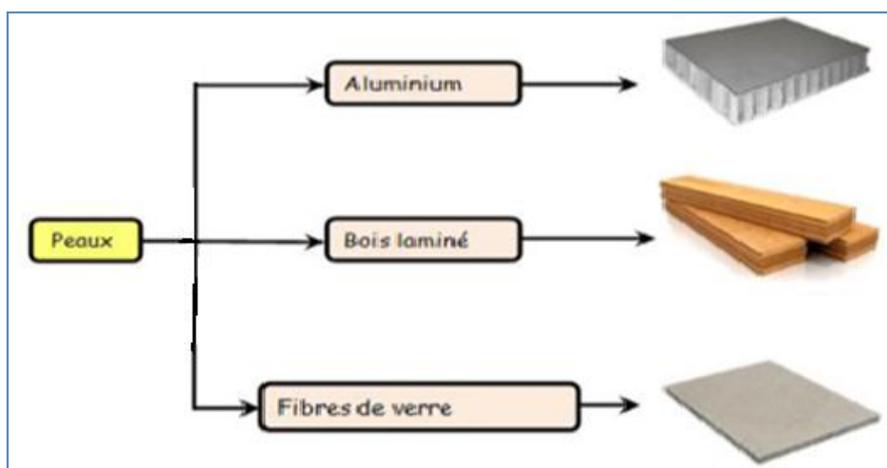


Figure I.2 : Matériaux pour les peaux. [6]

Les peaux des sandwichs sont généralement renforcées de fibres (mat ou tissu...) qui sont enrobées d'une matrice à base de résine [7]. Il existe plusieurs types de fibres parmi lesquelles on trouve :

- ✓ les fibres de verre ;
- ✓ les fibres de carbone ;
- ✓ les fibres d'aramide ;
- ✓ les fibres céramiques (bore et silice) ;
- ✓ les fibres végétales.

Les peaux utilisées dans ce travail sont renforcées par une fibre de verre.

La Fibre de verre :

Elles constituent le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elle est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore).

On distingue trois types de fibres :

- ✓ E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes ;
- ✓ R : pour les composites hautes performances ;
- ✓ D : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).

Les fibres de verre sont produites à partir du verre en fusion passant à travers des filières de 3 à 25 μm où il est refroidi. Les propriétés des fibres de verre dépendent de la nature du verre (pourcentage d'oxydes métalliques) et peu de leur technique de fabrication. Les fibres de verre possèdent de nombreuses propriétés intéressantes, elles sont non combustibles, non absorbantes, non hygroscopiques chimiquement stable, et possèdent une très grande résistance à la traction, ainsi que d'excellents propriétés thermiques, électriques et d'insonorisation. de ce fait, elles sont utilisées pour l'isolation thermique et acoustique.

Tableau I.1 : Les différents types de verre filables : [8]

Type	Caractéristiques générales
E	A usage général ; bonnes propriétés électriques
D	Hautes propriétés diélectriques
A	Haute teneur en alcali
C	Bonne résistance chimique
R, S	Haute résistance mécanique

Les fibres de verre ont un excellent rapport performance/prix qui les placent, de loin, au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composites. La fibre de verre est un filament de verre extrêmement fin. Elle peut être utilisée pour réaliser des formes surfaciques sous forme de plis de divers types : mats, tissus ou rubans, essentiellement développés dans le cas de fibres de verre.

- **Les plis unidirectionnels (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 UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes. Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère. Taux de déséquilibre très grand.

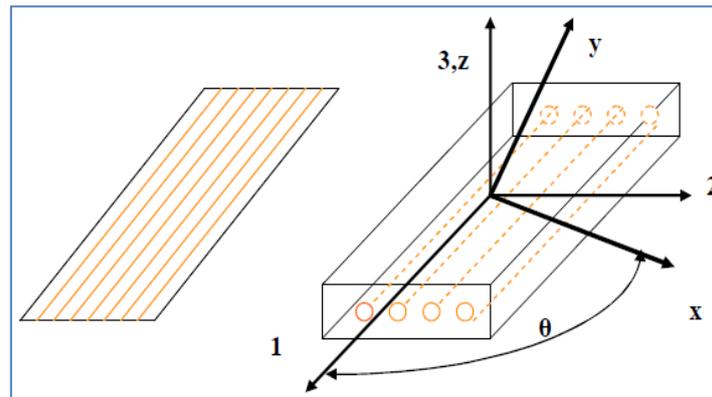


Figure I.3 : Pli unidirectionnel.

- **Les plis équilibrés (tissus équilibrés) :** Les tissus se composent de fils de chaîne et de trame perpendiculaires entre elles. Le mode d'entrecroisement ou armure les caractérise.

Dans l'industrie on peut trouver plusieurs types de ces tissés. Parmi eux on distingue [9] :

a- Toile ou taffetas :

Chaque fil de chaîne passe au dessus puis au dessous de chaque fil de trame, et réciproquement. Les tissus présentent une bonne planéité et une relative rigidité, mais sont peu déformables pour la mise en œuvre. Les nombreux entrecroisements successifs génèrent un embuvage important et réduisent les propriétés mécaniques.

b- Serge :

Chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs (n) fils de trame et chaque fil de trame flotte au-dessus de (m) fils de chaîne. Armure de plus grande souplesse que le taffetas ayant une bonne densité de fils.

c- Satin :

Chaque fil de chaîne flotte au dessus de plusieurs (n-1) fils de trame et, réciproquement. Ces tissus ont des aspects différents de chaque côté. Ces tissus sont assez souples et adaptés à la mise en forme de pièces à surfaces complexes. Ce type de tissus présente une forte masse

spécifique. Comme un tissu est difficilement déformable sur une surface gauche, on réalise également pour des utilisations spécifiques de l'armure bi ou tridimensionnelle.

Elles sont commercialisées sous plusieurs formes :

- Des rouleaux, des panneaux, des nappes cousues ;
- Mat de verre, fils simples ou mêlés à des plastiques ;
- Grilles pour renforcer les bétons, le bitume.

Les fibres de verres sont plus utilisées dans le domaine de matériaux composites tels que :

- Le renforcement des matériaux de gypse.
- Le renforcement des matériaux en plastique.
- Le renforcement des matériaux des éléments de construction en béton qui confère un grand intérêt pour l'industrie de bâtiment en raison de sa résistance élevée à la rupture par traction et sa masse volumique faible.



Figure I.4 : Fibre de verre et peau élaborée.

I.3.2. Les âmes :

Dans les matériaux sandwichs, l'âme doit être constituée d'un matériau ayant une faible masse volumique et de bonnes propriétés en cisaillement, pour transmettre les contraintes de traction et compression supportées par les peaux. Dans les faits, c'est le constituant de l'âme qui permet de classer les différentes structures sandwich. Les âmes creuses sont généralement utilisées pour les structures à hautes performances mécaniques, mais ont un coût de fabrication relativement élevé et se limite est généralement à des structures planes. Les âmes pleines, telles que les mousses ou le balsa, permettent la réalisation des structures sandwichs planes ou courbées avec un rapport performance/prix relativement élevé. Parmi les âmes les plus utilisées, citons celles en mousse, nid d'abeilles et en bois de balsa.

I.3.2.1. Les mousses :

Ce sont les plus fréquemment utilisées ; elles sont produites à partir de polychlorure de vinyle, polystyrène, polyuréthane ou d'autres polymères synthétiques. Leurs masses volumiques varient de 30 à 300 kg/m³. Elles sont thermoformables et permettent donc de réaliser des pièces de formes complexes. Leurs propriétés mécaniques sont bonnes ; elles adhèrent bien à la résine et absorbent peu d'eau.

✓ **Mousses organiques** : Les mousses organiques ont de très faibles densités. Elles permettent donc une diminution du poids d'une structure, tout en assurant la conservation des propriétés mécaniques de celle-ci. Au point de vue isolation thermique, celle-ci est améliorée par la présence des pores, idéalement fermés, nombreux, et de taille réduite. Ils assurent une discontinuité au sein de la structure. Ainsi, la conductivité thermique abaisse considérablement. L'éponge, la pierre ponce, le liège, ainsi que le balsa, sont des mousses organiques naturelles. Les mousses de polymères expansés (alvéolaires) Constituent la forme la plus courante de matériaux d'âme. Elles peuvent être produites à partir d'une grande variété de polymères synthétiques dont le polychlorure de vinyle (PVC), les polyoléfines (PE, PP), le polystyrène (PS) etc. Elles sont disponibles dans une gamme de masses volumiques allant de moins de 30 kg/m³ à plus de 300 kg/m³, sachant que les plus utilisées dans les structures composites couvrent la plage de 40 à 200 kg/m³.



Figure I.5 : (a) Feuille de polystyrène expansé, (b) structure alvéolaire de polystyrène.

✓ **Mousses métalliques** : Les plus utilisées sont les mousses d'aluminium, largement exploitées dans l'industrie automobile et aérospatiale. Il existe également des mousses de zinc, de plomb, d'étain, leurs alliages, ainsi que des possibilités d'emploi du bronze, du titane et du cuivre.

Dans le cadre de certaines applications, les mousses métalliques s'avèrent particulièrement bien adaptées. La densité permet de concevoir des montages flottants (appointements, aménagements portuaires...), et ce, d'autant plus que les cellules de la mousse sont fermées. De même, la bonne résistance des mousses d'aluminium à la compression permet l'utilisation de celles-ci dans des systèmes « anti-crash ».

- ✓ **Mousses minérales et céramiques :** La terre cuite allégée de manière artisanale est sans doute la mousse céramique la plus ancienne qui soit au monde. Malgré son âge, ce type de mousse conserve son intérêt. Il existe également des mousses de verre, de béton, de carbone vitreux, de carbure de silicium, de borate... On peut encore citer les billes d'argile expansées (utilisées dans l'hydroculture), les terres cuites acoustiques utilisées dans des écrans antibruit... Ces mousses ne présentent pas de caractéristiques mécaniques élevées. Leur principal avantage réside dans leur tenue en température.

1.3.2.2. Le bois :

Il est utilisé pour sa très bonne résistance à la compression notamment pour les supports d'accastillage. À l'échelle microscopique, il est similaire à celle d'un nid d'abeille synthétique à structure cellulaire hexagonale (figure I.7). Utilisée dans une structure sandwich, avec le grain perpendiculaire au plan des peaux, l'âme (pleine) en bois présente des propriétés similaires à celles de nids d'abeille artificiels. Le bois est le matériau le moins cher, mais il est le plus poreux.

1.2.2.3. Le nid d'abeilles :

Une autre famille d'âmes (creuses) regroupe des matériaux constitués de cellules généralement hexagonales régulièrement espacées faisant penser à un rayon de ruche, d'où l'appellation de « nids d'abeille » (figure I.8) ou encore « nida » en abrégé. Elle peut être réalisée en divers matériaux comme le papier et l'aluminium. Ses caractéristiques mécaniques dépendent du matériau et de la taille des cellules. Sa masse volumique varie de 15 à 100 kg/m³ et son épaisseur de 3 à 50 mm. On peut le courber modérément, mais les cellules se déforment et alors les propriétés mécaniques changent selon l'orientation. Le collage peut aussi être un problème, car il se réalise sur la tranche de la structure. Leurs propriétés sont exceptionnelles, mais ils sont difficiles à former et leur prix est élevé.

Les âmes que nous avons étudiées dans le cadre de ce travail sont des mousses expansées de polystyrène fournies par la société SARL POLYSTYRENE DES OASIS.

L'épaisseur de feuilles est de 40 mm, avec une densité de 25 kg/m³.

I.3.3. Adhésifs (interface) :

En plus de ces deux constituants de base, il faut rajouter : une interface qui assure la compatibilité renfort/matrice, qui transmet les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement relatif. Bonne adhérence en couche fine. Ces produits chimiques entrent aussi dans la composition du composite, qui peuvent jouer sur le comportement mécanique, mais n'interviennent pratiquement jamais dans le calcul de structure composite. Le choix d'un adhésif est principalement guidé par la recherche de performance de la structure par le biais d'une bonne adhésion entre l'âme et les peaux

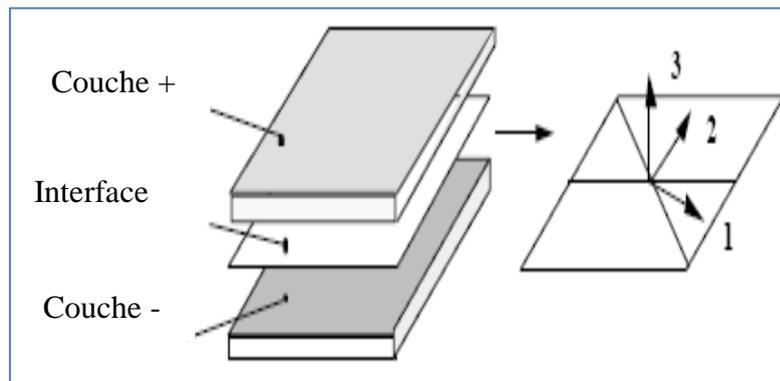


Figure I.6 : Adhésif (interface).

I.4. Conception des structures sandwichs:

De part la constitution des matériaux sandwichs, on peut adapter leurs propriétés mécaniques en faisant varier la nature des peaux et de l'âme ainsi que l'épaisseur de chacune des phases. En règle générale, les peaux ont la même épaisseur p . Le rapport p/c , (c étant l'épaisseur de l'âme) est compris entre 0,1 et 0,01. D'après Allen [10], on peut classer les sandwichs en trois catégories selon la valeur du rapport d/p (d étant la distance séparant l'axe neutre de chacune des peaux). Les principaux objectifs du concepteur d'un «sandwich» sont de choisir les matériaux appropriés constituant la structure ainsi que de déterminer les épaisseurs respectives des peaux et de l'âme de façon à résister aux moments fléchisseurs, au cisaillement et aux contraintes axiales induites par les forces appliquées sur elles.

En fonction des valeurs du rapport d/p , on peut classer les sandwichs de la manière suivante :

- ✓ si le rapport d/p est supérieur à 100, on parle de sandwichs à peaux très fines
- ✓ pour un rapport d/p compris entre 100 et 5,77 le sandwich est considéré comme ayant des peaux fines ;
- ✓ dans le cas où d/p est inférieur à 5,77 la structure est dite à peaux épaisses.

I.4.1. Géométrie des sandwichs :

Pour une structure en sandwich, étant donné l'épaisseur de chaque peau P et l'épaisseur totale du panneau D , la fraction de peaux s'écrit : $f = 2p/d$

Puisque la structure sandwich est utilisée le plus souvent pour sa légèreté, une caractéristique importante est la masse surfacique : $ms = 2p\rho_p + (d - 2p) \rho_c$ avec : ρ_p et ρ_c respectivement les masses volumiques des matériaux constitutifs des parements et du cœur. L'épaisseur relative du panneau est définie par d/i , où I est une dimension caractéristique d'essai (figure I.7). Ce rapport de forme est une grandeur clef qui contrôle typiquement le choix du mode de déformation prédominant, que ce soit en rigidité ou en résistance.

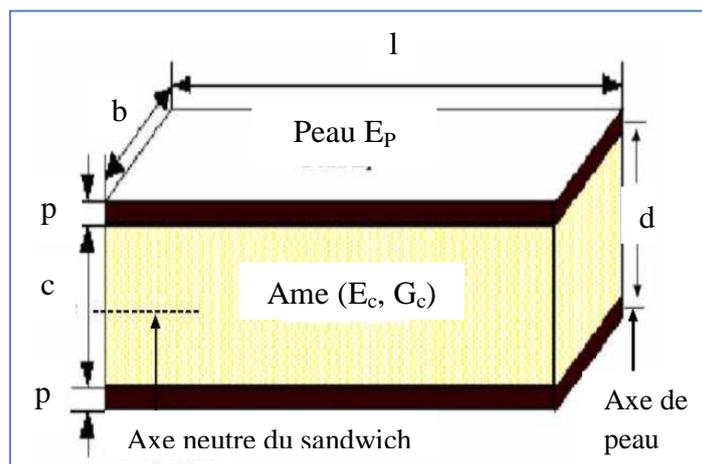


Figure I.7 : Schéma d'une structure sandwich.

I.5. Comportement mécanique des structures sandwichs :

L'objectif de cette partie est de mettre en évidence le comportement des matériaux sandwich vis-à-vis de différentes sollicitations mécaniques.

Un sandwich peut être soumis aux sollicitations données par la Figure I.8

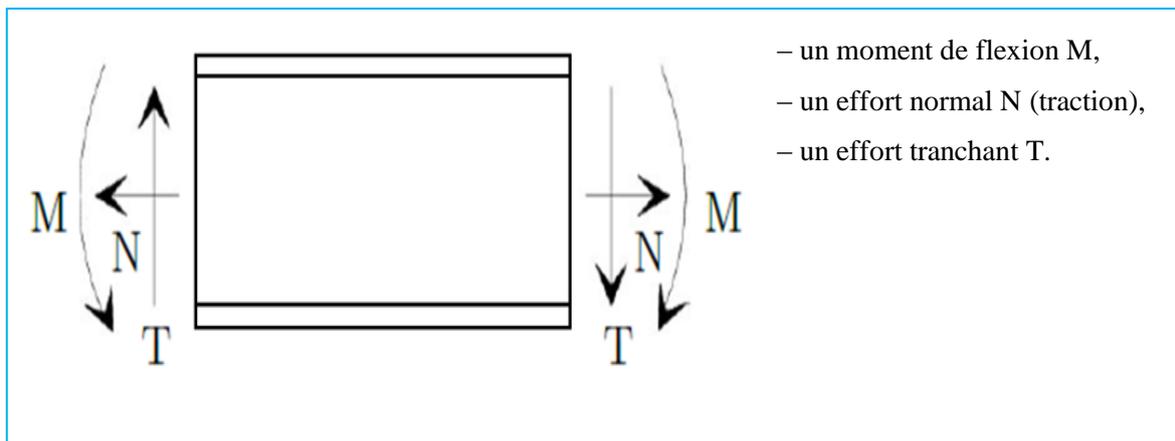


Figure I.8 : Sollicitations mécaniques.

I.5.1. Comportement en flexion :**a. Flexion en trois points :**

La flexion en trois points est un essai mécanique qu'en effectue on posant une poutre sur deux appuis simples. Les contacts entre ces appuis et la poutre sont considérés ponctuels et sont situés sur les extrémités de la poutre. On applique une charge concentrée au milieu de cette poutre. Le contact entre la charge et la poutre est considéré aussi comme une liaison ponctuelle [11]. Lorsqu'on augmente progressivement la charge sans dépasser la limite de résistance pratique, la poutre se déforme suivant une flèche déterminée selon la nature des composants constituant de la poutre.

b. Flexion en quatre points :

Dans ce cas on utilise les mêmes appuis simples, mais on applique deux charges au lieu d'une seule charge concentrée. Lorsqu'on augmente progressivement la charge sans dépasser la limite de résistance pratique la poutre se déforme suivant une flèche déterminée selon la nature des composants constituant de la poutre. Cet essai s'effectue sur la même machine que la flexion trois points. La flexion 4 points permet en particulier de créer un moment de flexion pur dans la zone centrale.

Ces essais sont normalisés et sont couramment utilisés à cause de leur simplicité de mise en œuvre. Ils permettent de déterminer certaines caractéristiques telles que :

- ✓ Caractéristiques élastiques des peaux (flexion 4 points) et de l'âme (flexion 3 points) avec une bonne fiabilité.
- ✓ Résistances de l'âme ou des peaux suivant les modes de rupture. Ceux-ci sont fonctions de la longueur de l'éprouvette :
 - Eprouvette courte : cisaillement de l'âme.
 - Eprouvette longue : rupture statique des peaux.



Figure I.9 : Essais de flexion : (a) flexion 3 points, (b) flexion 4 points. [12].

c. Délaminage

L'endommagement par délaminage est contrôlé par la qualité de l'interface entre l'âme et les parements. Qualitativement, il est observé que l'interface est plus sollicitée quand les deux matériaux sont rigides que lorsqu'un des deux est souple. Dans le second cas, la déformation a préférentiellement lieu dans le matériau souple. Lorsqu'une structure sandwich est endommagée par délaminage, une chute brutale de la force avec la déflexion est observée.

C'est pourquoi l'essai de flexion est souvent utilisé pour déterminer la qualité d'une interface.

I.5.2. Comportement en cisaillement :

La caractérisation au cisaillement de ces matériaux a toujours été délicate à mener. Certains montages permettent d'accéder aux caractéristiques élastiques mais sont mal adaptés pour déterminer les caractéristiques à la rupture en cisaillement plan. Le principal problème reste lié au mode de fixation des éprouvettes sur le montage. Sur les montages classiques, cette fixation est réalisée par perçage des éprouvettes et boulonnage sur le montage. Cette solution induit des concentrations de contraintes au niveau des trous qui perturbent le champ des contraintes de cisaillement. Pour remédier à ce problème dans le cas des structures sandwich les éprouvettes sont directement collées au montage ; cette solution reste lourde à mettre en œuvre : temps de collage lent, nettoyage des supports après essai. De plus, de par l'alignement du montage par rapport à l'axe de la machine, cette solution génère des déformations en traction nuisibles à l'uniformité du champ de cisaillement. [6]

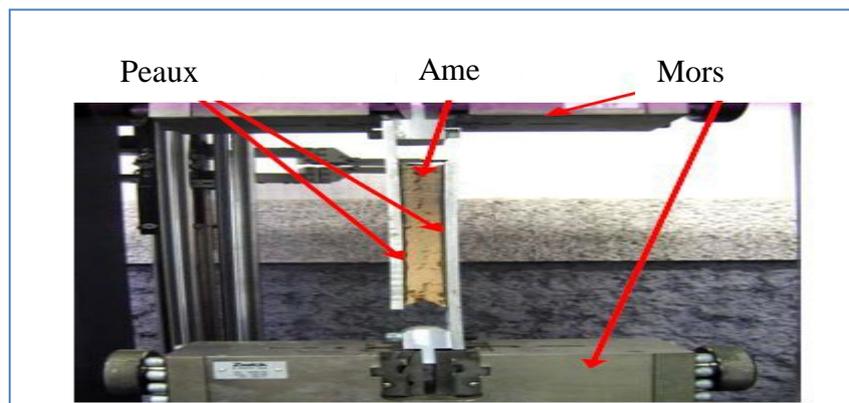


Figure I.10 : Essai de cisaillement. [12]

En général, on observe l'apparition des fissures au niveau de l'âme, ce qui explique que les contraintes de cisaillement sont encaissées par l'âme.

I.5.3. Comportement en traction compression :

Il s'agit du cas où les contraintes dans les peaux sont supérieures aux contraintes admissibles pour le matériau constituant les peaux. Ce phénomène peut être évité en utilisant un matériau dont les contraintes à rupture sont plus élevées, en augmentant l'épaisseur des peaux (ce qui réduit les contraintes appliquées), ou en augmentant l'épaisseur de l'âme (ce qui permet également de réduire les contraintes dans les peaux). La manière la plus adéquate de résoudre le problème est d'augmenter l'épaisseur de l'âme. Par contre, une âme de plus forte densité (plus rigide) n'affecte pas les contraintes dans la peau.

Ces propriétés mécaniques sont généralement calculées de la manière suivante :

- ✓ la contrainte axiale σ dans l'éprouvette est obtenue en divisant la force axiale mesurée par l'aire de la section utile de l'éprouvette au début de l'essai : $S = F/S_0$.
- ✓ le module d'Young est calculé en divisant la contrainte axiale par la déformation mesurée par la jauge : $E = S/\epsilon$.
- ✓ la contrainte à la rupture est habituellement identifiée comme étant la contrainte maximale enregistrée durant tout l'essai.

I.5.4. Flambement des structures sandwichs :

I.5.4.1. Le phénomène de flambement :

Le flambage ou flambement est un phénomène d'instabilité d'une structure, qui soumise à un effort normal de compression, a tendance à fléchir et se déformer dans une direction perpendiculaire à l'axe de compression (passage d'un état de compression à un état de flexion). [6]

I.5.4.2. Flambement global des sandwichs :

a. Flambement généralisé des peaux :

Une poutre sandwich soumise à une compression peut céder sous l'effet des conditions d'instabilité concernant toute la poutre : Le flambement généralisé peut aussi survenir quand les contraintes dans les peaux et dans l'âme sont inférieures aux résistances à la rupture. La charge qui cause le flambement du sandwich dépend de paramètres tels que les dimensions dans le plan de la poutre et les conditions aux limites. Ce type de déformation est causé par une épaisseur insuffisante de la structure, ou la faible rigidité de l'âme.

b. Flambement généralisé de l'âme :

Ce type de flambement est aussi appelé flambage irrégulier. Il se produit lorsque le module de résistance au cisaillement est trop faible (charge critique).

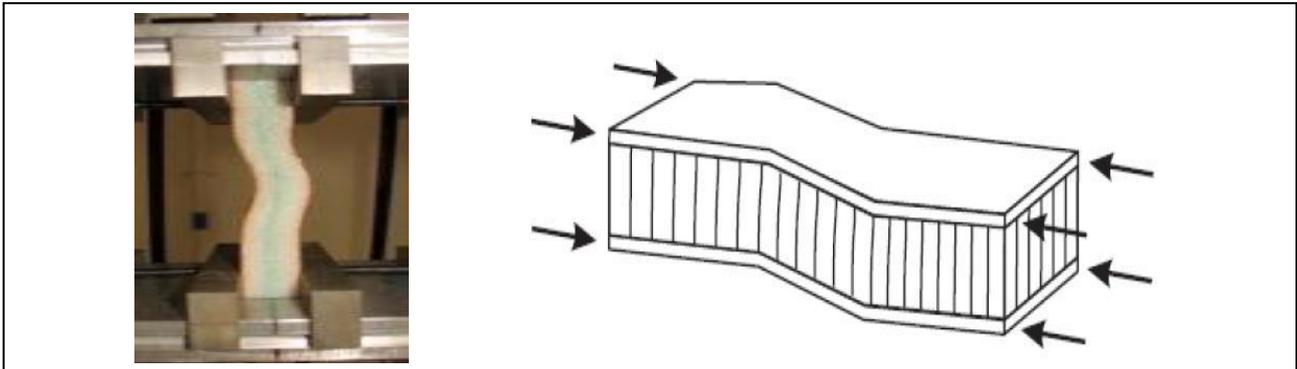


Figure I.11 : Flambement généralisé de l'âme.

Pour augmenter cette charge critique, il faut donc, soit augmenter l'épaisseur de l'âme, soit utiliser une âme avec un module de cisaillement plus élevé.

I.5.4.3. Flambement local des sandwichs :

Si la contrainte de compression dans les peaux dépasse une certaine limite, il se peut que l'âme ne soit plus capable d'empêcher le flambement. Dans ce cas, le flambement localisé des peaux, se produit. Contrairement au flambement généralisé, le flambement localisé peut prendre des configurations différentes qui ne dépendent, ni de la géométrie de la structure, ni des conditions aux limites. Par contre, il est influencé par les modules élastiques des peaux, élastique de l'âme, et de cisaillement de l'âme.

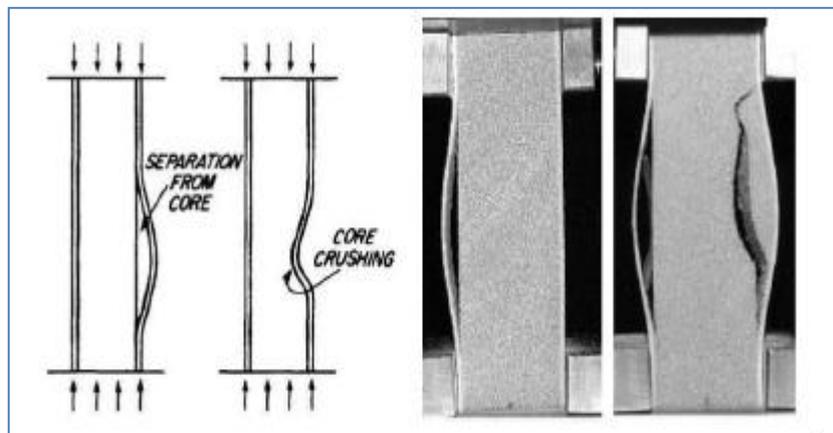


Figure I.12 : Flambement local.

I.5.5. Comportement en Fatigue :

Le phénomène de fatigue du matériau se caractérise par sa rupture après application d'un grand nombre de sollicitations dont l'amplitude est inférieure à la résistance à la rupture statique du matériau. Ce phénomène est rencontré fréquemment dans de nombreux domaines industriels qui mettent en jeu des sollicitations cycliques, sollicitations par vibration, etc. Les premières études fondamentales du phénomène de fatigue ont été entreprises par Wöhler sur les métaux. À l'heure actuelle, ce sont les matériaux pour lesquels on dispose des connaissances les plus étendues sur ce sujet. Sur d'autres matériaux complexes tel que les matériaux composites, en particulier les composites sandwichs, le phénomène de fatigue reste peu maîtrisé, ce qui limite leur utilisation.

Des travaux expérimentaux ont été développés [13] sur les matériaux composites sandwichs. Ils ont montré qu'au cours des essais de fatigue, l'augmentation de la fréquence de sollicitation se traduit par l'augmentation de la température interne des éprouvettes et en particulier pour les matériaux polymères. Certains travaux ont montré qu'au cours des essais de fatigue sur des matériaux sandwichs, la fréquence ne doit pas être élevée, afin d'éviter une augmentation significative de la température de la mousse. Cette augmentation de la température entraînerait une diminution des propriétés en cisaillement de l'âme. Les auteurs ont utilisé les courbes de Wöhler pour caractériser la durée de vie des composites sandwichs. Kulkarni et al ont constaté que la rupture en fatigue par flexion du sandwich est contrôlée par la rupture de l'âme. En effet, ils ont montré que la propagation de la fissuration se fait en trois phases: d'abord la décohésion entre l'âme et la peau supérieure, ensuite le cisaillement de l'âme suivie par une autre décohésion entre la peau inférieure et l'âme. La première phase représente environ 85% de la durée de vie en fatigue et correspond à une dégradation de la rigidité de 10% environ. Les auteurs ont mis en place des essais de fatigue de telle sorte que l'endommagement se manifeste par la propagation des fissures dans l'âme. En se basant sur ces résultats, ils ont développé un modèle de fatigue qui consiste à simuler la longueur de la fissure en fonction du nombre de cycles pour différents niveaux de chargement. [7]

I.6. Domaine d'application & avantages des panneaux sandwichs :

Les matériaux sandwichs connaissent un essor important ; ils sont largement utilisés dans tous les secteurs industriels et, notamment, les transports, la marine, l'aéronautique, l'aérospatial, les sports et loisirs, l'industrie lourde, le génie civil et l'armée. [14] Leur consommation ne cesse d'augmenter. Les sandwichs présentent un intérêt pour les

applications qui requièrent à la fois rigidité et légèreté, conférant de nombreux avantages par rapport à la construction sur site des systèmes :

- Installation rapide et facilité de manipulation.
- Pas de ponts thermiques et de bonnes propriétés d'isolation thermique.
- La souplesse de conception avec un choix de finitions de couleur.
- Les panneaux peuvent être installés horizontalement ou verticalement.
- Exceptionnelle non combustible et des performances acoustiques.

Chapitre II

Bétons légers préfabriqués

II.1. Introduction :

Depuis 50 ans environ, certains éléments du bâtiment sont préfabriqués en usine afin de faciliter et d'accélérer la construction de l'ensemble. Ils peuvent être ensuite montés et assemblés simplement sur chantier. La préfabrication peut ainsi concerner tous les éléments de murs, façades, planchers, portes, cloisons et panneaux de toiture. [15]

Elle se présente actuellement comme une branche d'activité indispensable au secteur de la construction moderne grâce à une optimisation de coûts, à une réduction des délais de fabrication en usine, à la disponibilité et à la facilité de mise en œuvre qui sont des atouts.

II.2. Systèmes de construction :

Au premier abord, l'industrie de la préfabrication peut donner l'impression qu'il existe une quantité de systèmes et de solutions techniques pour les immeubles en béton préfabriqué. Ils appartiennent toutefois, tous, à un nombre restreint de systèmes constructifs de base, dont les principes de conception se ressemblent plus ou moins. Les systèmes de structures portantes en béton préfabriqué les plus courantes sont :

1. la construction par portiques avec colonnes et grandes poutres de toiture.
2. la construction par ossature avec colonnes et poutres comme composantes de base.
3. les constructions par panneaux, utilisées pour des parois intérieures de bâtiments et des noyaux centraux. Elles sont surtout utilisées dans des bâtiments résidentiels ;
4. les constructions par cellules, composées de cellules en béton complètement préfabriquées.

En plus, il existe encore un nombre de systèmes préfabriqués complémentaires pour la réalisation de planchers, toitures et façades.

II.3. Construction par panneaux :

Les parois en panneaux préfabriqués sont en règle générale réalisées en béton armé. La hauteur correspond à la hauteur d'étage du bâtiment, et la longueur est généralement située entre 6 et 14 m. L'épaisseur standard varie entre 80 mm pour les panneaux non portants, à 150 - 200 mm pour les panneaux portants et jusqu'à 300 mm pour des applications spéciales. Les panneaux préfabriqués sont utilisés comme murs intérieurs et extérieurs pour bâtiments, cages d'ascenseur et d'escalier, etc. Les constructions par panneaux sont généralement utilisées pour des immeubles résidentiels.

Les panneaux préfabriqués peuvent être portants ou avoir uniquement une fonction de séparation. La surface des éléments est lisse, de part et d'autre, et prête à être peinte ou tapissée. Les derniers développements en matière de constructions par panneaux prévoient uniquement des murs portants au périmètre du bâtiment, avec des planchers allant d'une façade à l'autre.

II.3.1. Façades portantes :

Portante veut dire que les éléments de façade portent les planchers et la structure supérieure. Ils peuvent également contribuer à la stabilité horizontale du bâtiment. Un exemple classique est le panneau sandwich. Les éléments sandwich sont composés de deux panneaux en béton séparés par une isolation thermique. Les éléments de façade peuvent être monocouches ou à double panneau. Dans le premier cas, il s'agit de la partie extérieure de la façade, l'isolation ainsi que le mur intérieur sont rajoutés par après. Dans le deuxième cas, il s'agit d'une construction sandwich, dont seule la feuille intérieure est portante et dont le revêtement extérieur est en béton architectonique, Comme par exemple les panneaux de béton préfabriqués : ils correspondent à une hauteur d'étage, ces panneaux peuvent comporter à des reliefs extérieurs décoratifs, ils sont utilisés soit en structure, soit en remplissage de façade. [16.17]

II.3.2. Façades non portantes :

A côté de leur utilité pour la physique du bâtiment, les façades non portantes n'ont qu'une fonction de revêtement. Les éléments peuvent être chacun fixés à la structure du bâtiment ou bien autoportants. Dans le premier cas, les éléments reposent sur les poutres ou colonnes de façade, généralement à hauteur de chaque étage. Dans le second cas, ils portent les uns sur les autres et ne sont ancrés qu'horizontalement à la structure portante. La réaction verticale de la façade est alors transférée à la fondation ou à la structure inférieure par une poutre d'appui. En principe, il n'y pas de limitations à la conception formelle des éléments. Les parois non portantes sont en général utilisées dans le cas de structures à ossature, ou pour les parois latérales de façades portantes. Les éléments monocouche sont surtout utilisés pour le revêtement de murs, colonnes, allèges etc. [16]

Selon leurs constituants on peut distinguer deux types de façades non porteuses : les façades légères et les façades de remplissage maçonné [17].

Les façades légères : se dénomme mur-rideau ou façade-rideau si elle passe les devant les abouts des planchers, alors qu'un mur-panneau ou façade-panneau caractérise le fait que les ossatures horizontales et/ou verticales restent apparentes.

Elle est constituée de matériau de faible masse comme par exemple

- les panneaux sandwichs d'allège, de toitures ou des cloisons sont réalisés par collage de parements décoratifs et protecteurs en tôles, verre, fibrociment, plastiques sur des âmes en isolants (polystyrène expansé, mousses de polyuréthane, de PVC, phénolique) et sur des cadres en métal ou en bois qui apportent la rigidité et la protection latérale.
- Les cloisons sont réalisées par collages de plaques de plâtre ou de contreplaqué sur des âmes isolantes ou en carton nid-d'abeilles.
- Les panneaux de doublage isolants sont réalisés par collage de plaques de plâtre sur des plaques d'isolants thermiques ou phoniques (polystyrène expansé, mousse de polyuréthane, laine de verre), en utilisant en général des colles vinyliques en émulsion

Selon les cas, ces panneaux sandwichs doivent résister aux intempéries, apporter étanchéité ou isolation thermique ou phonique, ou doivent contribuer à la résistance mécanique de l'immeuble.

II.4. Les paramètres les plus importants pour le choix du système :

- **Le type de projet :** Les constructions par panneaux constituent un choix plutôt évident lorsque la construction est composée de nombreux murs extérieurs et intérieurs. La méthode utilisée peut en effet être vue comme une forme industrialisée de murs coulés en place ou maçonnés.
- **La masse des éléments :** La masse d'un panneau préfabriqué en béton varie entre 2 à 3 t à plus de 10 t, en fonction de la longueur et de l'épaisseur des éléments. La longueur choisie dépend du projet. Il existe également des solutions en béton léger.
- **La finition :** Comme déjà mentionné précédemment, les panneaux préfabriqués sont lisses des deux côtés, prêts à être peints ou tapissés. Le temps de construction s'en retrouve ainsi fort raccourci, ce qui peut être déterminant dans le choix du système.
- **L'isolation thermique et acoustique :** Grâce à leur masse importante, les murs en béton disposent d'une excellente isolation contre les bruits aériens. En augmentant l'épaisseur, l'isolation peut être facilement adaptée à des exigences spécifiques. Dans

la plupart des cas, des murs massifs d'une épaisseur de 150 mm offrent une isolation acoustique suffisante pour la majorité des projets.

- **La résistance au feu :** Les murs en béton ont une résistance au feu de 2 à 6 heures en fonction de l'épaisseur et de la charge. D'ailleurs, ils sont couramment utilisés comme murs pare-feu.

II.5. Nature des produits préfabriqués :

Les produits préfabriqués sont de diverses natures. Il peut s'agir d'éléments en béton armé ou en béton léger ou en composés mixte (polystyrène ou fibre végétale ...). [18]

Dans ce présent travail on s'intéresse aux bétons légers ; ce sont des bétons de masse volumique plus faible que celle des bétons ordinaires [19]. Ces matériaux peuvent être obtenus grâce à la substitution des granulats traditionnels par des granulats plus légers [20]. Le béton léger est constitué en partie ou en totalité de granulats légers, d'un liant hydraulique (ciment). En fait, la majorité de ces bétons a une masse volumique apparente faible comprise entre 400 et 1800 kg/m³, comparativement à celle des bétons conventionnels comprise entre 2200 et 2500 kg/m³.

En général, on distingue les bétons légers confectionnés à partir de granulats légers de source naturelle, de ceux constitués à partir de granulats légers artificiels. Pour développer un béton léger, on doit prendre en considération deux aspects : la formulation et le choix des constituants.

II.6. Les type des bétons légers :

Les bétons légers sont classés selon la formulation, c'est-à-dire la nature des constituants entrants dans la composition du béton. L'étude de la formulation d'un béton consiste à définir la composition optimale des granulats et le dosage en ciment et en eau, de façon à atteindre les propriétés du béton recherchées [21].

Dans l'ensemble, le processus de formulation comprend les étapes suivantes :

- définir la nature de l'ouvrage et propriétés du béton selon la nature de l'ouvrage
- établir le dosage des constituants permettant ainsi d'atteindre les propriétés recherchées. [22]

Quoique ces étapes soient claires, aucune méthode de formulation ne permet d'obtenir directement par analyse et manipulation algébrique une formulation finale. La méthode choisie permet simplement d'établir une formulation de départ, pouvant convenir aux propriétés recherchées, et devra être optimisée par des essais en laboratoire.

II.6.1. Type de béton selon la nature de l'ouvrage :

La formulation du béton est tributaire de la nature de l'ouvrage. A ce titre, il convient de distinguer deux grandes familles de béton léger :

II.6.1.1. Le béton léger structurel :

Il est défini comme un béton ayant une résistance à la compression à 28 jours supérieure à 15 MPa dont la masse volumique est inférieure à 1850 kg/m^3 . [22]

Dans la catégorie des bétons légers structuraux, la diminution du poids spécifique du béton provient essentiellement de l'utilisation de granulats ayant des densités nettement inférieures à celles des granulats usuels. Le gain de poids, qui peut être plus ou moins important selon le type de béton, entraîne une diminution des sections des éléments structurels assurant la transmission des charges [23].

II.6.1.2. Le béton léger d'isolation ou de remplissage :

Il est défini comme étant un béton ayant une résistance à la compression à 28 jours comprise entre 0,7 et 7 MPa et dont la masse volumique varie entre 240 à 1440 kg/m^3 . [9]

On peut obtenir un béton de masse volumique aussi faible de trois façons :

1. **Les granulats ultra-légers** : Les granulats ultra-légers regroupent les matériaux tels que la perlite, la vermiculite et les billes de polystyrène. Avec ces matériaux, on obtient d'excellentes propriétés thermiques et acoustiques. Ils sont utilisés principalement dans les toitures, les murs coupe-feu ou comme matériaux isolants.
2. **Les agents moussants (Béton cellulaire)** : Les agents moussants sont utilisés dans le béton pour produire un volume d'air important. Ces bétons légers sont produits à partir d'agents moussants constituent la famille des bétons cellulaires pour lesquels il est difficile d'identifier des propriétés spécifiques puisqu'elles varient proportionnellement au volume d'air incorporé. Les bétons cellulaires ont généralement une masse volumique et une résistance à la compression extrêmement faibles. Pour les usages courants, la masse volumique se situe entre 350 et 550 kg/m^3 [24]. Leur poids léger permet une économie de masse sur les structures et les fondations. [25]
3. **Béton caverneux** : Les bétons caverneux sont obtenus en supprimant la totalité ou une partie du sable dans le béton [22]. Ce sont des bétons à structure ouverte de granulométrie discontinue, avec, à l'état durci, des vides entre les plus gros éléments granulaires. La

porosité ouverte utile (pourcentage de vides communiquant entre eux et avec l'extérieur) représente plus de 10 % du volume du béton compacté [26].

On utilise le béton pour faire des parties de bâtiments ou d'ouvrage dans lesquelles la résistance n'est pas spécialement recherchée : murs en béton banché, béton de remplissage, etc. [21]

II.6.2. Dosage des constituants :

Le dosage en soit consiste essentiellement à déterminer la proportion des constituants de manière à produire le béton répondant aux qualités du béton recherchées.

Cependant, ce dosage n'est pas aléatoire puisque l'obtention des qualités recherchées repose sur des principes (qualité de la pâte, type de granulat, rhéologie, etc.).

II.6.2.1. Les principes de dosage :

Le principe de dosage d'un béton repose sur des concepts fondamentaux reliés au Comportement du béton à l'état frais et durci. On peut, a priori, admettre que le béton est constitué essentiellement de deux phases : la pâte de ciment hydraté et les granulats. Malgré les principes de dosage font référence à quatre principaux facteurs, de façon à mieux comprendre l'influence de chacun de ces facteurs sur le dosage d'un béton, on les présente individuellement.

- **La pâte de ciment :** La pâte de ciment représente approximativement 30 % du volume d'un béton [27]. Malgré cette faible proportion, la qualité de la pâte est grandement responsable de la qualité du béton. La pâte de ciment est constituée de quatre phases distinctes : Les hydrates, les grains non hydratés de ciment, les pores capillaires et les bulles d'air. Deux principaux hydrates résultent de l'hydratation du ciment Portland : les silicates de calcium hydratés, les C-S-H, qui sont insolubles, et la chaux hydratée, le CH, qui est soluble. La phase C-S-H est la phase majoritaire issue de l'hydratation du ciment anhydre et dont dépend l'évolution des propriétés mécaniques. [28]

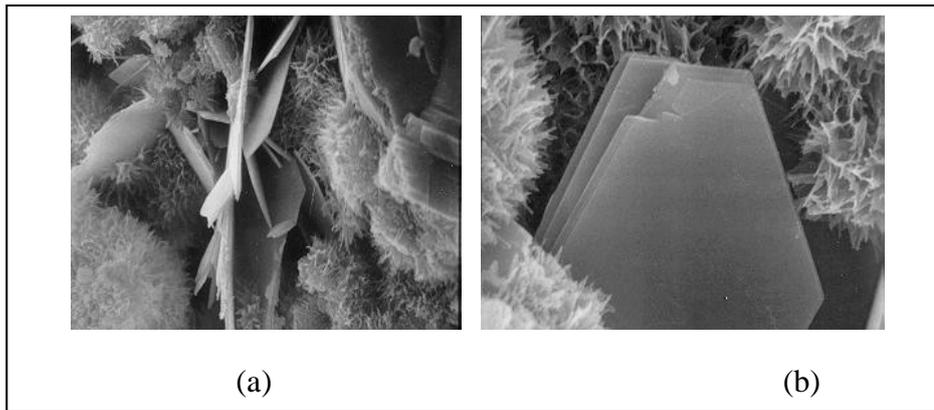


Figure II.1: CSH (a), Portlandite (b) [29].

- **Les granulats** : Comme les granulats représentent à peu près 70 % du volume total d'un béton, leur influence est significative. En effet, le granulat représente l'ossature du béton [27]. Les granulats utilisés doivent être composés de particules propres, dures, résistantes et durables. De plus, elles doivent être exemptes de tout produit chimique nuisible. Les granulats influencent le dosage, le coût et les propriétés du béton à l'état frais et durci. La granulométrie, la forme, la texture, la densité, l'absorption, la résistance mécanique, la résistance à l'abrasion, la réactivité, la propriété thermique et la résistance au gel sont autant de caractéristiques d'un granulat qui vont influencer directement la formulation du béton.
- **La rhéologie** : Les paramètres de dosage susceptibles d'influencer la rhéologie sont : le rapport E/L, la granulométrie, la forme et la texture des granulats et la présence ou non d'adjuvants. Le rapport E/L est sans doute le critère le plus important puisqu'il définit les caractéristiques de la pâte (viscosité, seuil d'écoulement, etc.). La granulométrie de la masse granulaire est le deuxième aspect important pour obtenir une bonne rhéologie à l'état Frais.
- **Les propriétés mécaniques recherchées** : Lorsqu'on cherche à concevoir un béton, il faut tout d'abord établir les conditions d'application et, par le fait même, les propriétés recherchées. Celles-ci se résument aux propriétés mécaniques et à la durabilité. De façon générale, la résistance mécanique du béton est grandement attribuable à la qualité de la pâte de ciment hydraté et à la qualité des granulats. Un rapport E/L faible et l'utilisation de granulats de qualité sont essentiels pour garantir de bonnes propriétés mécaniques et une durabilité appropriée au béton. Toutefois, en ce qui concerne la durabilité, la qualité de la pâte et des granulats est souvent insuffisante.

II.6.2.2. Les méthodes de dosage :

Le dosage, ou formulation, des bétons vise à déterminer la combinaison de matériaux et de leurs proportions la plus économique et la plus pratique pour faire face aux conditions d'application. Les méthodes de dosage sont nombreuses. Dans la majorité des cas, elles proposent de fixer initialement un rapport E/L correspondant à la résistance à la compression recherchée. Par la suite, les autres paramètres sont établis à partir de concepts empiriques issus de l'expérience et diffusés sous forme d'abaques.

De façon générale, toutes les méthodes de dosage conçu pour les bétons conventionnels s'appliquent au cas d'un béton léger moyennant quelques modifications [21].

Parmi les méthodes fiable celle des volumes absolus développée par American Concrete Institute (ACI). Cette méthode est semi analytique et est donc basée en partie sur l'expérience, laquelle a été traduite sous forme algébrique. Cette méthode propose de déterminer le volume de granulat fin en soustrayant de 1 m³ le volume absolu des ingrédients connus.

$$\text{Volume (m}^3\text{)} = \frac{\text{Masse du matériau en vrac (kg)}}{\text{Densité}} * 1000 \text{Kg/m}^3$$

II.7. Granulats pour béton léger :

On peut définir trois catégories de granulat, directement associées aux propriétés recherchées du béton : 1) les granulats usuels

2) les granulats légers

3) les granulats recyclés.

La fabrication d'un béton léger repose essentiellement sur l'utilisation de granulats légers. Considérant l'importance de ceux-ci, il convient donc d'exposer les principales caractéristiques et les types de granulats utilisés dans la confection de bétons légers.

II.7.1. Les granulats usuels :

Les granulats dits usuels sont ceux que l'on utilise dans le béton d'utilisation courante, c'est-à-dire pour les fondations, les ponts, les routes, etc. Ces granulats sont des sables et des pierres naturels dont la masse volumique absolue à voisine 2700 kg/m³. La masse volumique absolue est la masse d'un corps par unité de volume de matière pleine, imperméable, sans vide entre les grains [21].

II.7.2. Les granulats légers :

Les granulats légers sont caractérisés par une structure poreuse, ce qui explique leur légèreté. Ils peuvent être d'origine naturelle ou artificielle et ayant subi ou non des transformations. Leur utilisation dans le béton a pour but de diminuer de façon plus ou moins importante, selon le granulat léger choisi, la masse volumique. Par contre, cette réduction de la masse volumique a pour conséquence de diminuer la résistance à la compression.

Dans la documentation, on dénombre trois catégories de granulats légers : ceux destinés aux bétons légers structuraux, ceux pour les bétons légers isolants et ceux pour les bétons légers de remplissage. Les normes ASTM-C330 Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete et ASTM-C332 Standard specification for lightweight aggregates for insulating concrete regroupent les exigences ainsi que la description des essais de contrôle pour les granulats et les bétons légers de structure et les bétons légers isolants.

II.7.2.1. Les granulats légers pour bétons structuraux :

Les bétons légers structuraux sont fabriqués à partir de granulats de source naturelle telle que les pierres ponce, les scories ou le tuf. Plusieurs granulats légers de type expansé ou fritté sont couramment utilisés : argile expansée, schiste expansé, cendres volantes frittées, laitiers expansés, perlite, vermiculite. Le procédé d'expansion de ce type de granulat consiste principalement à chauffer la matière première homogénéisée sous forme de pâte préalablement extrudée à des températures comprises entre 1000 et 1500 C°. Cette chaleur intense a pour effet de produire la formation d'un gaz ou de vapeur d'eau au sein de la matière forçant ainsi son gonflement. Il en découle un matériau poreux et plus léger.

- **L'Argile expansée** : Les argiles ne sont pas toutes susceptibles de gonfler sous l'effet de la chaleur. En effet, seules les argiles contenant de la pyrite, de l'hématite ou de la dolomie sont réactives. À la fin du processus d'expansion, on obtient des particules de forme généralement arrondie, présentant une peau brune rougeâtre enveloppant une texture alvéolaire noirâtre.



Figure II.2 : Granulats d'argile expansée.

Certaines argiles ont la propriété de gonfler sous l'action de fortes températures de l'ordre de 1000 C°. Dont la masse volumique apparente varie entre 300 et 1000 kg/m³.

Tableau II.1 : Propriétés du béton léger confectionné à partir d'argile expansée

	ρ (kg/m ³)	R _c (MPa)	Traction (MPa)	E (GPa)	Retrait (mm/m)	Dilatation (mm/m C°)	λ (kcal/m.h C°)
Argile expansée	600 à 1800	5 à 35	(R _c /R _T) 4 à 8	6 à 20	0.3 à 0.6	6 à 7 *10 ⁻⁶	0.20 à 0.75

- **Schiste expansé** : Les schistes servant à la fabrication des granulats légers peuvent provenir de diverses origines, soit de schistes naturels (schistes carbonifères, houillers), ou de schistes plus classiques, en provenance de carrière ou encore d'ardoise. Le procédé de fabrication de ces granulats commence par le broyage des matières premières pour réduire la taille des particules à environ 800 µm de diamètre. Ensuite, on mélange cette poudre à 10 % d'eau pour obtenir une pâte que l'on va extruder aux environs de 80 C° sous forme de coudes. Les nodules extrudés de 5 à 15 mm sont ensuite séchés et expansés au four à une température de 1300 à 1450 C°.

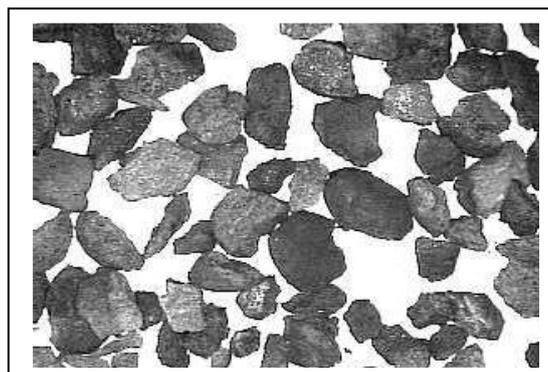


Figure II.3 : Granulats de schiste expansé.

Les bétons légers confectionnés à partir de schistes expansés atteignent des masses volumiques parmi les plus élevées et, par le fait même, les meilleures résistances à la compression.

Tableau II.2 : Propriétés du béton léger confectionné à partir de schistes expansés.

	ρ (kg/m ³)	R_c (MPa)	Traction (MPa)	E (GPa)	Retrait (mm/m)	Dilatation (mm/m C°)	λ (kcal/mh C°)
Schiste expansé	800 à 1800	10 à 50	(R_C/R_T) = 10 à 15	>20	0.5 à 0.7	6 à 7 *10 ⁻⁶	0.15 à 0.60

II.7.2.2. Les granulats légers pour bétons isolants ou de remplissage :

Les billes de polystyrène expansé, la perlite, la vermiculite ou tout simplement des agents moussants sont couramment utilisés pour la confection de bétons légers isolants ou de remplissage.

- **Billes de polystyrène:** Le polystyrène est connu depuis 1930. C'est l'une des plus anciennes résines thermoplastiques. Est une mousse plastique alvéolaire, naturellement blanche [30]. On distingue le polystyrène expansé modifié non résistant au feu et le polystyrène expansé modifié résistant au feu ; la masse et les propriétés spécifiques d'isolation thermique sont adaptées en cours de fabrication. En effet, la conductivité thermique par exemple est liée à la masse volumique ainsi que cette dernière est en fonction de la taille des billes, de leur vitesse d'introduction et du débit de vapeur [31]. Les billes de polystyrène sont obtenues par expansion de billes pleines. L'expansion est arrêtée lorsque la granulométrie souhaitée est atteinte. Elles sont parfaitement sphériques, La coupe d'une bille révèle une structure alvéolaire et une enveloppe constituée de deux membranes. Ceci explique, d'une part, son extrême légèreté et d'autre part, sa totale imperméabilité à l'eau [32]. La matière première servant à la formation de ces billes de polystyrène est constituée de granules de polystyrène non expansé renfermant un porogène. Le porogène, sous l'action de la chaleur, passe à l'état gazeux, ce qui provoque l'expansion. Une fois expansées, les perles peuvent atteindre plusieurs fois leur diamètre initial de 0,4 à 2 mm [22]. Le polystyrène présente une masse volumique parmi les plus faibles (10 à 40 kg/m³).

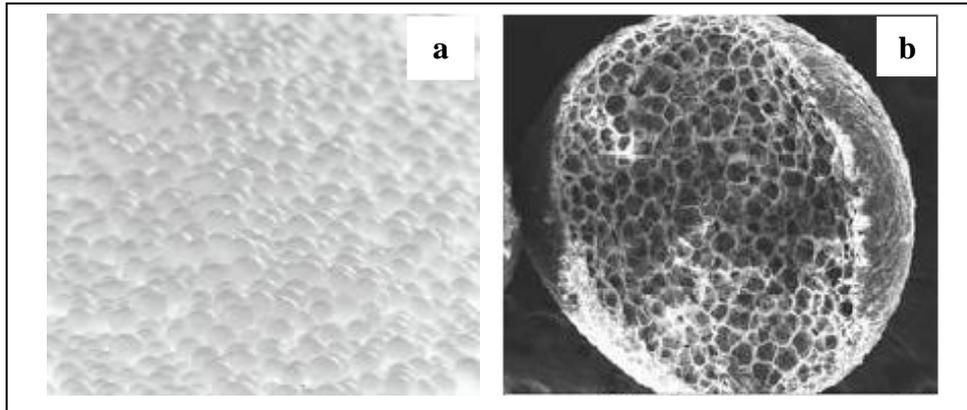


Figure II.4 : (a), (b) Billes et photo MEB de polystyrène expansé.

Les bétons confectionnés à partir de polystyrène ont une masse volumique aussi faible que 550 à 800 kg/m³ selon que l'on emploie une portion de sable ou non. Ces bétons offrent de piètres performances mécaniques : une résistance à la compression de l'ordre de 2 à 4 MPa en fonction du pourcentage de sable utilisé. Il a été montré que la masse volumique de ces perles n'ont aucun apport quant aux caractéristiques mécaniques de ces bétons.

Tableau II.3 : Propriétés du béton léger confectionné à partir de billes de polystyrène.

	ρ (kg/m ³)	R_c (MPa)	Traction (MPa)	E (GPa)	Retrait (mm/m)	Dilatation (mm/m C°)	λ (kcal/mh C°)
polystyrène	300 à 1000	1 à 10	0.3 à 1.5	2	1.0 à 2.0	10 *10 ⁻⁶	0.05 à 0.25

- **La Perlite** : La perlite est une pierre volcanique de la famille des siliceux amorphes. Elle est composée principalement de silice (70 %) et de d'alumine (15 %). Elle se présente sous forme de granulés ou de panneaux et est surtout utilisée pour l'isolation des toitures-terrasses, des combles perdus, en insufflation entre parois et en plancher phonique. Elle est ininflammable mais son pouvoir isolant diminue lorsque les granulés absorbent de l'humidité. Cette pierre peut augmenter son volume de 20 fois lorsqu'elle est chauffée à des températures variant de 900 à 1100 C°. Une fois expansée et concassée, on obtient un granulats dont la masse volumique est aussi faible que 120 à 190 kg/m³.



Figure II.5 : Granulats de la perlite.

Les bétons contenant seulement de la perlite permettent d'obtenir des mélanges dont la masse volumique est aussi faible que 330 à 560 kg/m³ et dont les résistances à la compression varient de 0.7 à 3.1 MPa. En additionnant du sable au mélange. Les masses volumiques peuvent augmenter au-delà de 1000 kg/m³ et accroître ainsi les résistances à la compression de 6,2 à 17,3 MPa (Wilson, 1981).

Tableau II.4 : Propriétés du béton léger confectionné à partir de perlite

	ρ (kg/m ³)	R _c (MPa)	Traction (MPa)	E (GPa)	Retrait (mm/m)	Dilatation (mm/m C°)	λ (kcal/mh C°)
Perlite	300 à 800	1 à 5	0.1 à 0.5	0.5 à 1.8	-	-	0.07 à 0.18

II.7.2.3. Matériaux légers de recyclage :

L'utilisation de matériaux recyclés dans le béton favoriserait, d'une part, la récupération des matériaux en circulation et, d'autre part, la protection des ressources naturelles.

Il existe plusieurs types de matériaux recyclés. Cependant, compte tenu des critères de sélection établis (disponibilité, coût, masse volumique, résistance mécanique, etc.), deux matériaux retiennent particulièrement l'attention : les plastiques et les caoutchoucs. La documentation concernant L'ajout de ces matériaux dans le béton est passablement limitée et les paragraphes suivants en présentent les éléments pertinents.

- **Les plastiques :** Il existe deux groupes de plastique : les thermodurcissables, dont le durcissement, obtenu à chaud, est irréversible, et les thermoplastiques, qui se ramollissent sous l'effet de la chaleur et durcissent au froid de façon réversible. Les matières plastiques occupent une place importante dans l'ensemble des produits de consommation. Pour les

thermoplastiques, la méthode consiste à réduire les produits récupérés en petites particules et de les faire fondre pour obtenir une toute nouvelle résine pouvant servir au moulage de nouveaux produits. Puisqu'il est impossible de les faire refondre, les thermodurcissables sont concassés en particules de dimension désirée et sont utilisés comme matériaux de remplissage.

- **Les caoutchoucs :** Les caoutchoucs peuvent être utilisés dans le béton comme matériaux de substitution à la masse granulaire. La plus grande source de caoutchouc susceptible d'être recyclée est sans contredit les résidus de pneu, les pneus représentent une excellente source d'approvisionnement pour la fabrication des bétons. Les pneus sont composés d'un mélange très complexe d'élastomères, de fibres de textiles, et de fils d'acier. Parmi ces élastomères, on trouve en grande partie le styrène-butadiène incorporé pour ses propriétés de traction et de résistance à l'abrasion Lee et coll. (1998). De plus, le caoutchouc offre des caractéristiques intéressantes du point de vue de la densité et de l'élasticité. La documentation fait état de quelques essais réalisés sur des bétons contenant des particules de pneu. Cependant, ces études ne concernent pas les bétons légers, mais elles permettent de comprendre de façon globale l'influence d'une incorporation de particules de pneus recyclés dans le béton.

II.8. Béton de polystyrène :

Les bétons traditionnels sont connus par leur masse volumique élevée qui est de l'ordre de 2300 à 2400 kg/m³. Cette dernière peut être abaissée, notamment par l'adjonction de matériaux plastiques expansés. Les bétons obtenus présentent alors de meilleures propriétés d'isolation thermique et acoustique et pourraient avoir des applications intéressantes dans le domaine du bâtiment [35]. Parmi ces matériaux, nous nous intéressons spécialement aux bétons légers de polystyrène expansé.

II.8.1. Définition :

Le béton léger polystyrène est un mortier de masse volumique faible, à base de billes de polystyrène constitué de ciment, de billes de polystyrène expansé, d'adjuvants appropriés, et éventuellement de sable, permet d'alléger les constructions.

II.8.2. Caractéristiques :

Le béton léger polystyrène est un mortier prêt à l'emploi hors du champ d'application de la norme NF EN 206-1 et des normes "mortiers" en vigueur pour les applications en

remplissage. Il est dans le champ d'application du DTU 26.2 (NF P 14-201-1) "Chapes et dalles à base de liants hydrauliques" pour ses utilisations en ravoir âgé ou en chape. Le béton léger polystyrène est un mortier léger constitué de ciment, de billes de polystyrène expansé, d'adjuvants appropriés, et éventuellement de sable. Bien qu'ils soient technologiquement très prometteurs, les bétons de polystyrène posent encore de nombreux problèmes au niveau de la compréhension de leurs propriétés mécaniques. Chafi.N [33] a travaillé sur le béton de fibre de polystyrène expansé de densité comprise entre 1100 et 2200 kg/m³. Ces résultats ont montré que la résistance à la compression de ce type de béton diminue sensiblement lorsqu'on augmente le taux de fibre. A titre d'exemple, un béton de densité 1000 kg/m³ résiste à environ 1/10 du béton de densité 2000 kg/m³. Ainsi que l'étude réalisée par k.Miled et al [34] montrent que la résistance à la compression du béton de polystyrène diminue sensiblement lorsqu'on augmente la taille des billes de polystyrène.

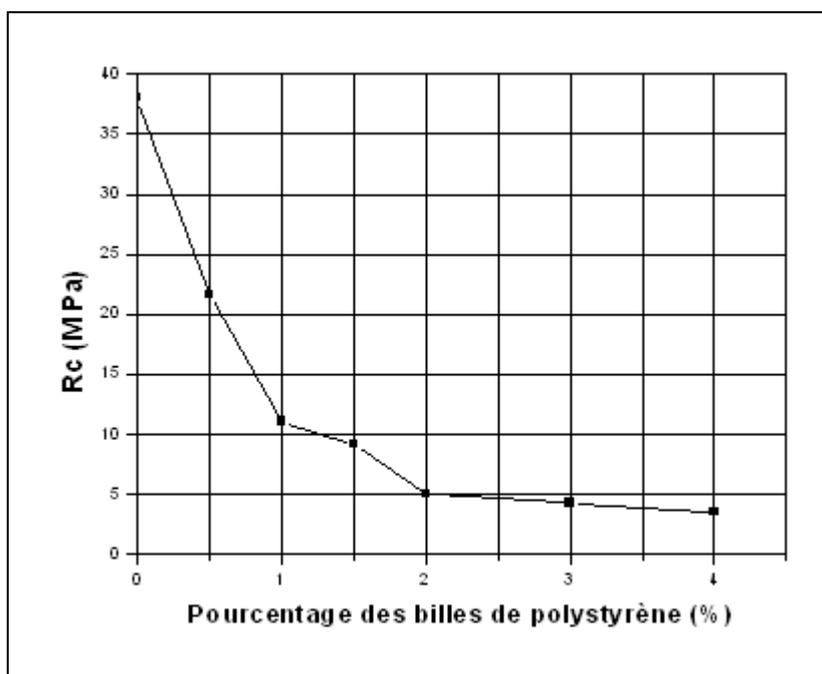


Figure II.6 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des billes de polystyrène [33]

II.8.3. Domaines d'application :

Le béton léger polystyrène est utilisable pour les applications structurelles et/ou non où l'on recherche un produit léger et facile à mettre en œuvre sur toute la plage de masse volumique disponible (de 400 à 1 200 kg/m³). Ces bétons légers peuvent avoir trois domaines d'application.

1) Celui des bétons d'isolation pure, non porteurs : leur masse volumique est faible (600 kg/m^3) de même que leur résistance à la compression (de 1.5 à 5 MPa). Ces bétons sont utilisés principalement en forme de pente isolante pour toiture-terrasse (Figure II-9) ou en isolation de sols sur terre-plein.

2) Celui des bétons porteurs et isolants (avec sable léger obtenu par broyage): leur masse volumique varie de 1000 à 1300 kg/m^3 et leur résistance à la compression est de l'ordre de 15 à 20 MPa. Ces bétons peuvent être employés pour réaliser des murs banchés ou préfabriqués ou encore des blocs à maçonner.

3) Celui des bétons légers de structure: confectionnés avec du sable de rivière et de l'argile ou du schiste expansés conformes à la norme NF 18-309, ils ont une masse volumique de 1700 à 1800 kg/m^3 et leur résistance caractéristique à la compression dépasse 20 MPa. [50]

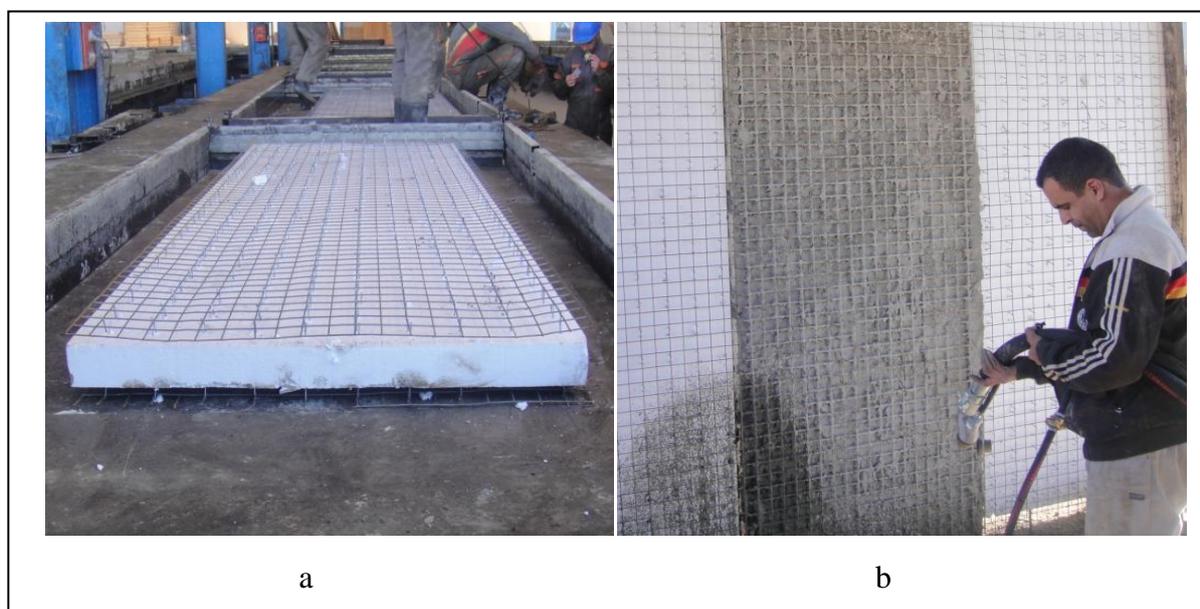


Figure II.7 : Système d'application du béton de polystyrène :(a) panneau sandwich préfabriqué, (b) cloison projeté sur place.

Chapitre III

Matériaux et méthodes d'essais

III.1. Introduction :

Ce chapitre présente la première partie de l'étude expérimentale qui est consacrée à l'élaboration et la caractérisation des échantillons. Nous étudierons tout d'abord les compositions et les formulations des bétons après traitement et analyse des matériaux utilisés dans ce travail, ainsi que la confection des éprouvettes, pour les stratifiés ou les sandwichs. Ensuite, nous nous attarderons sur une présentation complète des différentes expériences réalisées.

L'étude la plus importante concerne le comportement mécanique des éprouvettes confectionnées, vu l'influence de l'incorporation de la fibre de verre.

Cette étude a été menée sur des éprouvettes prismatiques normalisées 7*7*28 cm «NF P 18 407» au Laboratoire mécanique de l'unité de recherche matériaux procédés et environnement. Une étude sur le comportement thermique de ce type de béton vu l'influence de dosage en polystyrène a ainsi été réalisée.

III.2. Elaboration du béton et de sandwich :**III.2.1. Matériaux utilisés :**

Pour la réalisation de notre étude on utilise les matériaux suivants :

1. Ciment CEM II/B 32.5R de Lafarge Algérie
2. Sable gros lavé provenance carrière Tazmalt W-Bejaia.
3. Sable fin (sable de dune) de correction provenant de Boussaâda.
4. Des billes et feuilles de polystyrène provenance SARL Polystyrène des Oasis.
5. Fibre de verre sous forme de graille.
6. Adjuvant Médaccel T85.

III.2.2. Caractérisation des matériaux utilisés :**III.2.2.1. Caractérisation du ciment :**

Le ciment utilisé pour la confection du béton est un Ciment Portland au Calcaire NA 442 - CEM II / B 32,5 R qui provenait de Lafarge Ciment de M'sila LCM.

La composition chimique, les caractéristiques physiques, les résistances mécaniques et la composition minéralogique du ciment sont portées sur les tableaux suivants :

Tableau III.1 : Composition chimique de clinker

Composition chimique	Teneur %
SiO ₂	13.97
Al ₂ O ₃	3.29
Fe ₂ O ₃	2.4
CaO	61.56
MgO	1.22
K ₂ O	0.51
Na ₂ O	0.02
SO ₃	2.31
CaO Libre	0.923
Cl ⁻	0.023
R ind	0.92
PAF	14.46



Tableau III.2 : Composition minéralogique de clinker.

Phase	Constituants minéraux de clinker	Teneur apportées au clinker (%)
Clinker	C3S	59
	C2S	16
	C3A	06
	C4AF	12
	CaO .L	01
Régulateur de prise	Gypse	05
Ajouts	calcaire	30

Tableau III.3 : Caractéristique physiques :

Consistance normale(%)	H ₂ O	27.0
Temps de prise (mm)	Début	160
	fin	235
Stabilité (mm)	froid	-
	chaud	0.0
Essai de retrait (µm/m)	03 jours	166
	07 jours	413
	28 jours	763
Essai de gonflement (µm/m)	03 jours	0
	07 jours	0
	28 jours	0
Masse volumique absolue du ciment g/cm ³		2.95
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g)		4417

Tableau III.4 : Caractéristique mécanique :

Echéances en jours	Flexion (MPa)	Compression (MPa)
02 jours	3.8	17.2
07 jours	5.8	31.2
28 jours	7.3	41.3

III.2.2.2. Caractérisation du sable :

Le sable utilisé est un sable lavé, semi concassé, provenant de carrière Tazmalt wilaya de Bejaia. Les résultats des caractéristiques physiques ainsi que l'analyse granulométrique sont portés sur les deux tableaux suivants.

Tableau III.5: caractéristiques physiques du sable de Tazmalt.

Caractéristique	Résultats	Unités
Densité apparente	1.51	/
Densité absolue	2.60	/
ESV	85	%
ESP	81	%
Absorption	1.2	%
Humidité	4.0	%
Porosité	3.5	%

Tableau III.6 : Analyse granulométrique de sable de Tazmalt.

NF P 18-560 EQV à NA 2607

Ouverture des tamis	Refus partiel	Refus partiel	Refus cumulés	Tamisat
	G	%	%	%
6.3	1,5	0,15	0,15	99,85
5	7	0,7	0,85	99,15
2.5	249	24,9	25,75	74,25
1.25	235	23,5	49,25	50,75
0.63	112,5	11,25	60,5	39,5
0.315	161	16,1	76,6	23,4
0.16	128	12,8	89,4	10,6
0.08	84	8,4	97,8	2,2
F.T	22			
Module de finesse Mf				3,03

Remarque :

On remarque que le sable grossier de Tazmalt a un module de finesse élevé (3.03) donc une correction est nécessaire par un sable fin de Boussaâda.

Tableau III.7 : caractéristiques physiques du sable fin (Boussaâda).

Caractéristique	résultats	Unités
Densité apparente	1.38	/
Densité absolus	2.66	/
ESV	84	%
ESP	79	%
Absorption	0.95	%
Humidité	0.85	%
Porosité	2.25	%

Tableau III.8 : Analyse granulométrique du sable fin (Boussaâda).

Ouverture des tamis	Refus partiel	Refus partiel	Refus cumulés	Tamisat
	G	%	%	%
2.5		0	0	100
1.25	2	0,2	0,2	99,8
0.63	17	1,7	1,9	98,1
0.315	57	5,7	7,6	92,4
0.16	423	42,3	49,9	50,1
0.08	479	47,9	97,8	2,2
F.T	22			
Module de finesse M_f				0.6

Remarque :

d'après les résultats obtenus par l'analyse granulométrique, on remarque que le sable gros (Tazmalt) a un module de finesse élevé (3.03), donc une correction est nécessaire par le sable fin de Boussaâda qui a un module de finesse très petit (0.60) pour cela, la correction est faite selon la méthode d'Abrams.

La correction de sable :

Le module de finesse désiré est $MF_x=2.5$.

$$\text{Sable gros} = \frac{MF_x - MF_2}{MF_1 - MF_2} * 100$$

$$\text{Sable gros} = \frac{2.5 - 0.60}{3.03 - 0.60} * 100 = 78.18\%$$

$$\text{Sable fin} = \frac{MF_1 - MF_x}{MF_1 - MF_2} * 100$$

$$\text{Sable fin} = \frac{3.03 - 2.5}{3.03 - 0.60} * 100 = 21.81\%$$

Mf_x : module de finesse désiré.

Mf_1 : module de finesse de sable fin.

Mf_2 : module de finesse de sable gros.

Tableau III.9 : caractéristiques physiques du sable corrigé.

Caractéristique	Résultats	unités
Densité apparente	1.48	/
Densité absolue	2.62	/
ESV	0.83	%
ESP	0.79	%
Absorption	0.97	%
Humidité	0.51	%
Porosité	2.35	%

Tableau III.10: Analyse granulométrique du sable corrigé.

Ouverture des tamis	Refus partiel	Refus partiel	Refus cumulés	Tamisât
	G	%	%	%
6.3	1	0,1	0,1	99,9
5	2	0,2	0,3	99,7
2.5	125	12,5	12,8	87,2
1.25	241	24,1	36,9	63,1
0.63	126	12,6	49,5	50,5
0.315	178	17,8	67,3	32,7
0.16	180	18	85,3	14,7
0.08	77	7,7	93	7
F.T	70			
Module de finesse Mf				2.52

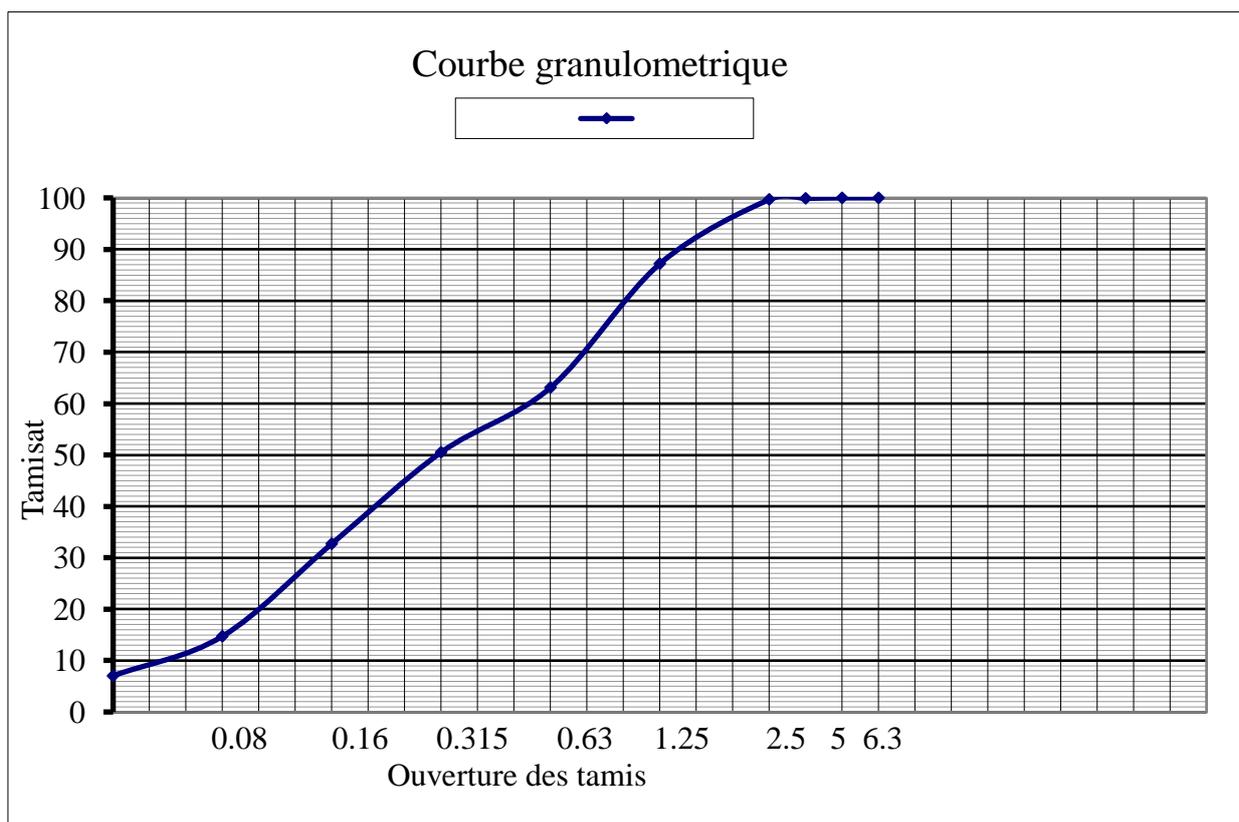


Figure III.1 : La courbe granulométrique du sable corrigé.

III.2.2.3. Caractéristiques de polystyrènes expansés :

Les billes de polystyrène utilisées pour réaliser ce travail proviennent de l'entreprise OASIS. Elles sont obtenues par expansion de billes pleines. L'expansion est arrêtée lorsque la granulométrie souhaitée est atteinte. Elles sont parfaitement sphériques, la granulométrie utilisée dans ce travail est de 1.5 à 2.5 mm elles sont adéquates pour être incorporées dans les mortiers et les bétons. Les différentes caractéristiques des billes de polystyrène expansé utilisées dans le cadre de cette recherche sont synthétisées dans le tableau III.11

Tableau III.11 : Caractéristiques des billes de polystyrène expansé.

La granulométrie (mm)	15-25
La masse volumique apparente (kg/m ³)	18-25
La masse volumique absolue (kg/m ³)	25
Conductivité thermique (W/m. K)	0.04

Tableau III.12 : Caractéristiques des feuilles du polystyrène.

Matière première	Styropor (styren)
Densité (kg/m ³)	20 à 25
Conductivité thermique (W/m. K)	0.038
Réaction au feu	Produit ignifuge Norme DIN 4102
Dimension (mm)	280x70x40
Domaine d'utilisation	Isolation thermo-acoustique pour intérieur des murs, terrasses tous types de bâtiments

Certificats de confor mité au laboratoire VERITAL, en date du 04/10/2012, n° 058
Norme ISO844.

III.2.2.4. Caractéristiques de la fibre utilisée :

Cette fiche est préparée par des solutions intégrée et vérifiée par des tests de laboratoire et spécifique, en collaboration avec le «INFM (Institut national de physique de la matière) de Gênes.

Tableau : III.13 Caractéristiques de la fibre de verre.

Description	Treillis de fibre de verre 152g/m ² , 100% fibre de verre Anti-alcaline
Dimension de maille	5.0 x 4.0 mm
Domaine d'utilisation	Armure revêtement à couche
Numéro de fil	Dans la direction longitudinale, au moins 50 f/m Dans le sens transversal au moins 20 f/m
épaisseur	0.47 mm
Résistances à la traction	Charge de rupture longitudinale 2.000 N/5cm Charge de rupture transversale 1.900 N/5cm
conditionnement standard	Bobines d'une largeur de 1000 mm longueur du rouleau 50m
Couleur	Blue (NAF 14004B)
stockage	les rouleaux peuvent être stockés jusqu'à une température de 50 ± 10°C

L'aspect qualitatif des produits de saisie conforme aux administrateurs stipulé dans Q/NSQ01-1999 et normes internationales DIN EN ISO 13934-1.

III.2.2.5. L'eau de gâchage :

L'eau utilisée pour le gâchage est l'eau potable, de robinet de la zone industrielle d'oued smar.

III.2.3. Formulation des bétons :

Après préparation et caractérisation des constituants, on passe à l'élaboration de notre béton. Comme le bétonnage est réalisé à l'échelle industrielle dans un laboratoire auto contrôle, nous avons utilisé le matériel suivant : Balances, brouette récipients, truelles et un malaxeur.

La formulation des échantillons élaborés est basée principalement sur la proportion des constituants afin d'obtenir les propriétés physiques ou mécaniques souhaitées. Dans le présent travail, la propriété recherchée est la densité du béton, bien que les propriétés mécaniques soient obtenues par le renforcement de béton par la fibre de verre.

Lorsqu' il s'agit de confectionner des bétons traditionnels. Il existe de nombreuses méthodes de choix de la composition du béton classique. À titre d'exemple, la méthode de Dreux- Gorisse qui est la plus utilisée dans l'industrie du béton en Algérie, mais dans le cas d'un béton léger de polystyrène on utilise une méthode numérique plus expérimentale, à partir des masses volumiques réelles du ciment, sable et granulats de polystyrène ainsi que du rapport E/C pour obtenir un mètre cube du béton avec la densité souhaitée.

Donc pour réaliser ce travail, on doit fixer la teneur de l'un des constituants, on fixe le volume de polystyrène pour un mètre cube (1m^3) du béton. Ce dosage est converti à un pourcentage du poids du ciment. À partir des masses volumiques absolues des constituants et du rapport E/C, les compositions des bétons légers ont été calculées pour les trois densités étudiées en se basant sur les formules suivantes :

$$\text{Volume du béton} = V_C + V_E + V_{Adj} + V_S + V_{PSE} = 1000 \text{ l.}$$

Pour avoir les trois différentes densités on joue sur le dosage en polystyrène tel que :

➤ *Pour une densité de 550 kg/m^3 on a*

- Masse du béton = $M_C + M_E + M_{Adj} + M_S + M_{PSE} = 550 \text{ kg}$
- Volume (C + E + Adj + S) = 300 l
- Volume PSE = 700 l

➤ *Pour une densité de 850 kg/m^3 on a*

- Masse du béton = $M_C + M_E + M_{Adj} + M_S + M_{PSE} = 850 \text{ kg}$
- Volume (C + E + Adj + S) = 400 l

- Volume PSE = 600 l

➤ Pour une densité de 1050 kg/m^3 , on a

- Masse du béton = $M_C + M_E + M_{Adj} + M_S + M_{PSE} = 1050 \text{ kg}$
- Volume (C + E + Adj + S) = 500 l
- Volume PSE = 500 l

Tableau III.14 : Les compositions des mélanges réalisés

Constituants		Densité (kg/m^3)	550	850	1050
Ciment	Masse (kg)		360	380	400
	Volume (l)		122	128.81	135.5
Eau	Masse (kg)		177.3	187.15	197
	Volume (l)		177.3	187.15	197
Adjuvant	Masse (kg)		2.7	2.85	3
	Volume (l)		2.7	2.85	3
Sable	Masse (kg)		0	262	340
	Volume (l)		0	100	164.5
Polystyrène	Masse (kg)		17.5	15	12.5
	Volume (l)		700	600	500
	%		4.86	3.95	3.1

Ceci pour bien mettre en évidence l'influence de dosage en polystyrène. Bien entendu, nous avons pour chaque caractéristique étudiée, comparé nos résultats avec un mortier de référence (mortier normalisé).

Il résulte du malaxage de sable, ciment, d'eau et des billes de polystyrène, en suite on confectionne les éprouvettes en introduisant la fibre de verre.

Le malaxeur est humidifié avant l'incorporation des matériaux. Les matériaux sont mis dans le malaxeur, dans l'ordre suivant : les billes de polystyrène, le ciment puis le sable. Le malaxage est effectuée à sec pendant une minute, puis l'eau et l'adjuvant sont introduits au

fur et à mesure pendant le malaxage, durant deux minutes. Après l'introduction de l'eau, le malaxage continue pendant trois minutes pour bien homogénéiser le mélange, donc pour préparer un mélange homogène, on a utilisé un Malaxeur à béton de tel le volume de la cuve est de 140 litres, charge 90 l, avec moteur électrique, 220/ 40 V, 50 Hz, 0.3 CV, dimensions 72x132x128 cm, poids 84 kg.



Figure III.2 : Malaxage des constituants.

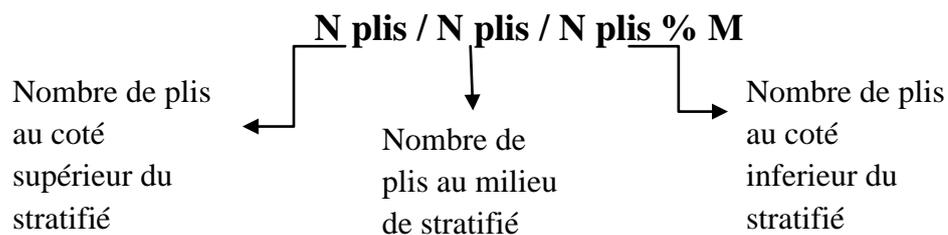
III.2.4 confection des éprouvettes:

Après élaboration des trois compositions du béton, on fait varier le nombre des plis de la fibre de verre afin de formuler les différentes variantes des stratifiés composant le sandwich. Pour cela, nous avons confectionné pour chaque variante, 05 éprouvettes prismatiques normalisées (NF P 18-400, NA2600) de dimensions 7x7x28 cm. Pour l'étude des caractéristiques mécaniques telles que la résistance à la flexion 3 points, la résistance à la compression et la résistance à la fatigue.



Figure III.3 : (a) Moules prismatique 7x7x28cm, (b) éprouvettes confectionnées.

Le nomenclature des échantillons est codifié comme suit :



% M : le pourcentage de dosage volumique de la matrice.

Par exemple, une éprouvette numérotée par 3/1/3 40% représente un échantillon qui contient trois plis en haut, un pli au milieu et trois plis en bas, alors que le chiffre 40 % est le pourcentage de dosage volumique de la matrice.

L'ensemble des variantes élaborées sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau III.15 : différentes variantes des stratifiés.

	Nombre de plis	1ere composition 30% Matrice	2eme composition 40% Matrice	3eme composition 50% Matrice
01	0	T 30%M	T 40%M	T 50%M
02	2	1/1 30%M	1/1 40%M	1/1 50%M
03	4	2/2 30%M	2/2 40%M	2/2 50%M
04	6	3/3 30%M	3/3 40%M	3/3 50%M
05	3	1/1/1 30%M	1/1/1 40%M	1/1/1 50%M
06	5	2/1/2 30%M	2/1/2 40%M	2/1/2 50%M
07	6	2/2/2 30%M	2/2/2 40%M	2/2/2 50%M
08	7	3/1/3 30%M	3/1/3 40%M	3/1/3 50%M
09	8	3/2/3 30%M	3/2/3 40%M	3/2/3 50%M
10	9	3/3/3 30%M	3/3/3 40%M	3/3/3 50%M

Tableau III.16 : Différentes variantes des sandwichs et mortiers témoins.

	Nombre de plis	1ere composition 30% Matrice	2eme composition 40% Matrice	3eme composition 50% Matrice
01	0	T 30%M sandwich	T 40%M sandwich	T 50%M sandwich
02	02	1/1 30%M sandwich	1/1 40%M sandwich	1/1 50%M sandwich
03	04	2/2 30%M sandwich	2/2 40%M sandwich	2/2 50%M sandwich
04	06	3/3 30%M sandwich	3/3 40%M sandwich	3/3 50%M sandwich
Les mortiers témoins				
01	00	Stratifié témoin : (S/C=3, E/C=0.5)		
02	00	Sandwich témoin : (S/C=3, E/C=0.5 + feuille de 40mm polystyrène)		

III.3. Essais effectués sur les bétons :

Différents essais cités ci-dessous ont été effectués afin de déterminer les propriétés de béton de polystyrène et les comparées avec les propriétés des mortiers témoins (les mêmes essais effectués sur les stratifiés et les sandwichs).

- La masse volumique ;
- Affaissement au cône d'Abrams ;
- Air occlus ;
- Essai d'absorption ;
 - ✓ L'absorption capillaire ;
 - ✓ L'absorption par immersion.
- La résistance à la flexion ;
- La résistance à la compression ;
- Essai de fatigue ;
- Caractérisation thermique.

III.3.1. Caractéristique du béton à l'état frais :

Durant les opérations de malaxage, la masse volumique, l'affaissement au cône d'Abrams et l'essai de l'air occlus sont réalisés pour chaque gâchée. La mesure de l'affaissement permet de contrôler l'ouvrabilité, celle-ci devant être constante quelque soit la

formulation des bétons. La quantité de superplastifiant est ajustée afin de maintenir l'affaissement pour un béton plastique. L'essai de l'air occlus nous permet de déterminer la teneur en air des bétons.

III.3.1.1. La masse volumique (densité):

Conformément à la norme NF 18 422, on peut mesurer la densité réelle du béton ou mortier frais en utilisant un récipient de volume connu (dans ce travail, on a utilisé un récipient de cinq litres). La densité réelle est obtenue à partir de différence de poids du récipient (pesé vide « M_1 » puis remplis de béton ou de mortier « M_2 ») sur le volume de ce récipient « V » (cinq litres). La densité réelle est donc calculée par l'expression suivante :

$$\rho = (M_2 - M_1) / v \quad (\text{Kg/m}^3)$$

III.3.1.2. Essai de consistance :

L'ouvrabilité des différents bétons composés a été appréciée à partir des mesures de consistance par affaissement au cône d'Abrams (Figure III.4) (Slump-Test) a été effectué conformément à la norme NF P 18- 415. L'essai est consisté à :

- Remplir le cône de trois couches, tassées avec une tige d'acier pointue de 16 mm de diamètre à raison de 25 coups par couche ;
- Soulever le moule avec précaution et mesurer l'affaissement en cm. [36]



Figure III.4 : Essai de consistance.

III.3.1.3. Mesure de la quantité d'air occlus

Cet essai est réalisé à l'aide d'un aéromètre, la méthode est basée sur la compressibilité de l'air contenu dans le béton frais. Un volume déterminé de béton est mis en communication avec un volume connu d'air en surpression. La valeur de la pression résultante permet de déterminer la teneur en air du béton qui est lue directement sur un manomètre équipant l'appareil. Cet essai est réalisé en suivant la norme NF P 18-353-1985. L'air occlus correspond au volume d'air entraîné au sein du matériau lors des opérations de malaxage et qui reste piégé dans le béton après mise en œuvre (remplissage des moules, vibration). Celui-ci dépend du mélange de granulats, de l'ouvrabilité du béton (lié à l'utilisation du superplastifiant) et enfin de l'énergie de serrage développée lors de la mise en œuvre (l'énergie de vibration). [32]



Figure III.5 : Essai d'air mètre.

III.3.2. Caractéristique du béton à l'état durci :

III.3.2.1. La masse volumique (densité):

La masse volumique du béton durci a été déterminée pour les différents bétons confectionnés, conformément à la norme européenne NF EN12390 – 7.

Elle a été déterminée, à l'âge de 28 jours sur une éprouvette prismatique (7x7x28 cm) de masse (m) constante après séchage à l'étuve de volume réel (V). [35]

La masse volumique du béton durci et la mesure moyenne des trois éprouvettes. Elle est donnée par la formule suivante :

$$D = \frac{M}{V}$$

III.3.2.2. Absorption d'eau :

❖ *l'absorption capillaire* : Nous nous sommes intéressés à l'absorption capillaire du béton de polystyrène pour connaître son comportement en présence d'eau. L'essai d'absorption capillaire a été réalisé conformément au mode opératoire de la norme européenne NF EN 480 - 5 [36]. L'essai consiste à déterminer la quantité d'eau absorbée par remontée capillaire en fonction du temps. Pour ce faire, il suffit de positionner les éprouvettes dans le sens vertical dans 7 mm d'eau après avoir pris d'enrouler la base dans du papier aluminium. La méthode utilisée pour déterminer l'absorption capillaire consiste à placés les éprouvettes au contact d'une nappe d'eau libre de 07mm de hauteur, maintenue à niveau constant. Cette technique a été adoptée par de nombreux auteurs, notamment HALL C. et al [51] et PRAZAK Jet al [53].



Figure III.6 : Essai d'absorption capillaire.

La masse d'eau absorbée est déterminée par pesées successives des échantillons. Puis, on procède à de relevés de masses successifs sur des intervalles de temps très courts, au début, puis de plus en plus espacés, au fur et à mesure que l'on avance dans l'expérience. La seule précaution à prendre consiste, avant chaque pesée et à l'aide d'un papier absorbant ou d'un chiffon sec, à éliminer la pellicule d'eau retenue à la face inférieure de l'échantillon. Au cours de l'essai d'absorption, seule la quantité d'eau globale ayant pénétré dans l'échantillon est mesurée, et non la hauteur maximale atteinte par le liquide. Une fois les relevés de masses effectués, on déduit par un calcul,

le coefficient d'absorption capillaire W_{Ca} qui permettra de tracer la courbe de la remontée capillaire en fonction du temps.

$$M_{eau} = W_{Ca} \cdot S \cdot \sqrt{t}$$

M_{eau} : masse d'eau adsorbée,

W_{Ca} : coefficient d'adsorption par capillarité en $[g/m^2 \cdot h^{0.5}]$,

S : section en contact avec l'eau.

t : le temps en heure.

Le coefficient d'adsorption d'eau par capillarité w est calculé d'après l'eau adsorbée entre 1 et 24 heures, sur la base d'une régression linéaire (Figure III.6).

❖ **Absorption par immersion:** La teneur en eau absorbée par un matériau se mesure habituellement en faisant sécher l'échantillon à masse constante, en l'immergeant dans l'eau et en mesurant l'augmentation de masse exprimée en pourcentage de la masse sèche [34]. Dans cette étude, on cherche à mesurer la teneur en eau absorbée par le matériau en fonction de la température pour bien éclaircir l'influence de la chaleur et de l'humidité. Le coefficient d'absorption d'eau est défini comme le rapport de l'augmentation de masse de l'échantillon après imbibition par l'eau à la masse sèche de l'échantillon [36]. Le coefficient d'absorption W_a est ainsi défini par :

$$W_a = \frac{M_{Tt} - M_s}{M_s} * 100\%$$

Où M_s désigne la masse sèche de l'échantillon après passage à l'étuve à 105°C.

M_{Tt} masse de l'échantillon après un temps t d'immersion et à une température T



Figure III.7 : Essai d'absorption par immersion. (a) étuve de séchage, (b) bain Maré.

III.3.2.4. La résistance à la flexion :

L'essai de flexion 3 points conforme à la norme NF P18 - 407 (NA 428) sur des éprouvettes prismatiques 7x7x28 cm, en prenant comme faces de chargement ses faces en moulage. Les essais sont effectués sur une machine de type Zwick équipée d'un capteur de force de 100 KN.3000 KN

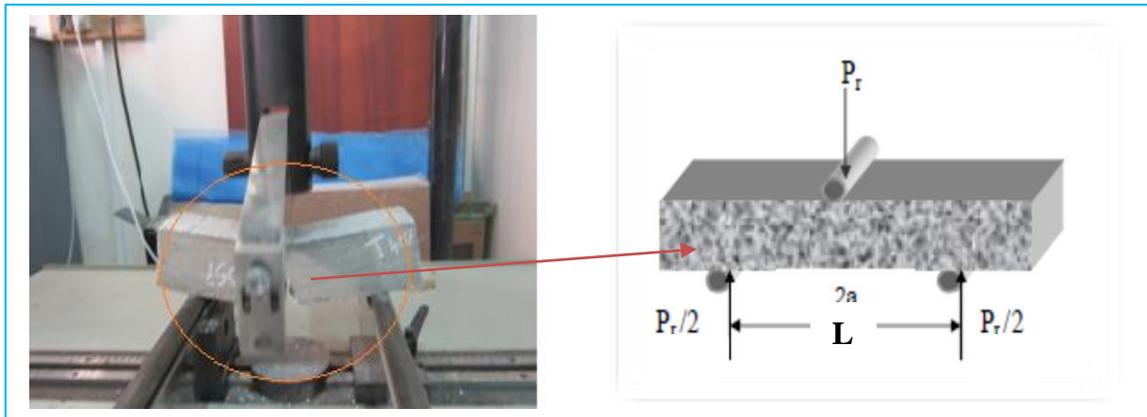


Figure III.8 : Essai de résistance à la flexion.

Les éprouvettes ont été disposées dans la machine d'essai comme indiqué sur la figure (III.8). Après un centrage parfait, la mise en charge a été effectuée avec une vitesse de montée de charge constante P_r .

Au moment de la rupture, on ouvre lentement la vanne de chargement. L'aiguille du manomètre intégrée dans la machine indique la charge de rupture.

Les résultats obtenus déterminent le déplacement et la force à la rupture. La résistance à la flexion R_f et le module de Young E_f [55] sont calculés respectivement selon les formules suivantes :

$$R_f = \frac{3P_r L}{2ab^2} \quad (MPa)$$

$$E_f = \frac{P_r L^3}{4ab^3 y} \quad (MPa)$$

P_r : charge appliquée par la panne, exprimée en newton

L : distance entre les deux appuis en millimètres

a et b : largeur et épaisseur de la section (mm);

R_f : est obtenue en méga pascal.

E_f : module à la flexion (MPa) ;

Y : la flèche de l'éprouvette (mm).

III.3.2.5. La résistance à la compression :

L'essai de compression sur des cubes équivalents de 7x7x7 cm, a été réalisé sur une machine de compression de type Zwick équipée d'un capteur Piloté par un micro ordinateur. Sa capacité maximale est de 3000 KN. Elle est programmée pour les essais de compression et cela pour différentes dimensions des corps d'éprouvettes (épreuve4R5TFGGvettes cylindriques ou prismatiques).

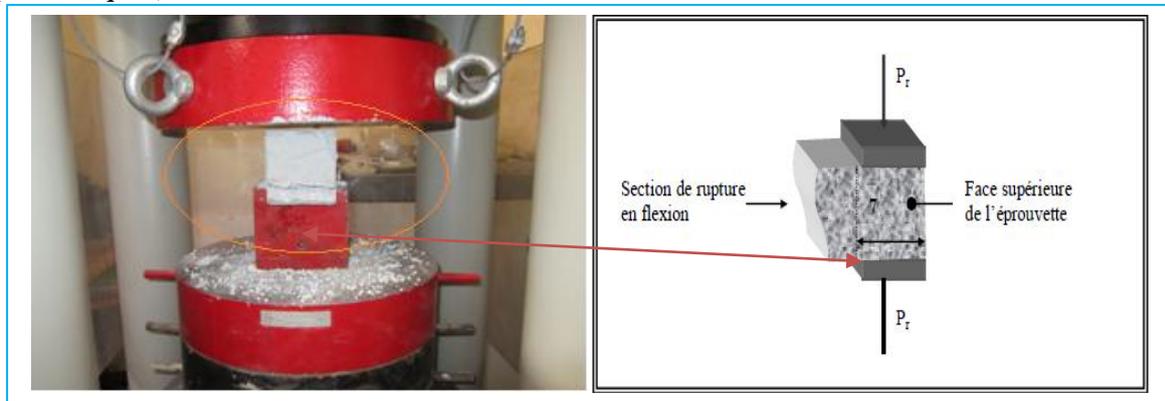


Figure III.9: Essai de résistance en compression.

Les demi-prismes des éprouvettes 7x7x28 obtenues après rupture en flexion ont été rompus en compression comme indiqué sur la figure (III.9).

La contrainte en compression sur cube est alors :

$$R_c \text{ (Mpa)} = \frac{Pr \text{ (N)}}{4900}$$

Pr : la charge de rupture en Newton.

R_c : résistance obtenue en méga pascal.

III.3.2.6. Essai de fatigue :

Les essais de fatigue par flexion trois points sont réalisés en mode cyclique par palier avec un pas d'augmentation de force égale à 10 N pour chaque palier, en commençant par un niveau de charge égal à 30% de la charge ultime. Donc, cet essai est commandé par charge à l'aide d'une machine d'essai ZOWIK/ROELL Z250. Les expériences sont exécutées en utilisant 3 points. La fréquence d'essai de fatigue de 0.5 Hz, a été choisie pour empêcher n'importe quelle dégradation des composés de l'éprouvette. [54].

La figure suivante présente la machine d'essai et une éprouvette testée.



Figure III.10 : Essai fatigue.

III.3.2.7. Caractérisation thermique :

De nombreux dispositifs expérimentaux utilisés pour mesurer la conductivité thermique des matériaux ont été proposés par différents auteurs. Les techniques utilisées dépendent surtout de l'état du milieu à tester (solide, liquide, granulaire, ...). Sans être exhaustif, nous citerons la méthode de la boîte chaude gardée [43], la méthode de la plaque chaude gardée [44, 45], la méthode du flux radial [42], la méthode des boîtes [46, 47], la méthode de flash laser [48]. Toutes ces méthodes consistent à soumettre l'échantillon à un flux thermique de caractéristiques connues et à mesurer par la suite, soit un profil de température, soit un flux de chaleur en un ou plusieurs endroits de l'échantillon. L'analyse thermique a été effectuée sur des éprouvettes sous forme de plaque ou de mur de petite dimension (120x160x40 mm) en utilisant la méthode de la maquette thermique (figure III.13) Puisque les différences des température mesurées jouent un rôle dans l'évaluation des résultats expérimentaux, l'accord des thermocouples doit être vérifié et toute déviation doit être prise en considération dans l'évaluation. Pour la mesure des températures de mur, le bout du thermocouple devrait être fermement fixé au niveau des trous latéraux et aussi étroitement comme possible sur la ligne centrale perpendiculaire du mur. Les fils doivent également être fixés à la structure de maison pour assurer le passe-fils.

Une lampe incandescente de 100 W avec un chapeau de bêche est utilisée pour le chauffage, la température intérieure étant conservée pratiquement constante par un thermostat de chauffage. L'alimentation d'énergie pour le chauffage est présentée par l'intermédiaire de la prise de thermostat. Le commutateur de la température est placé sur la quatrième division

ceci produisant, dans l'état d'équilibre, une température interne dans la chambre, d'environ 60°C.

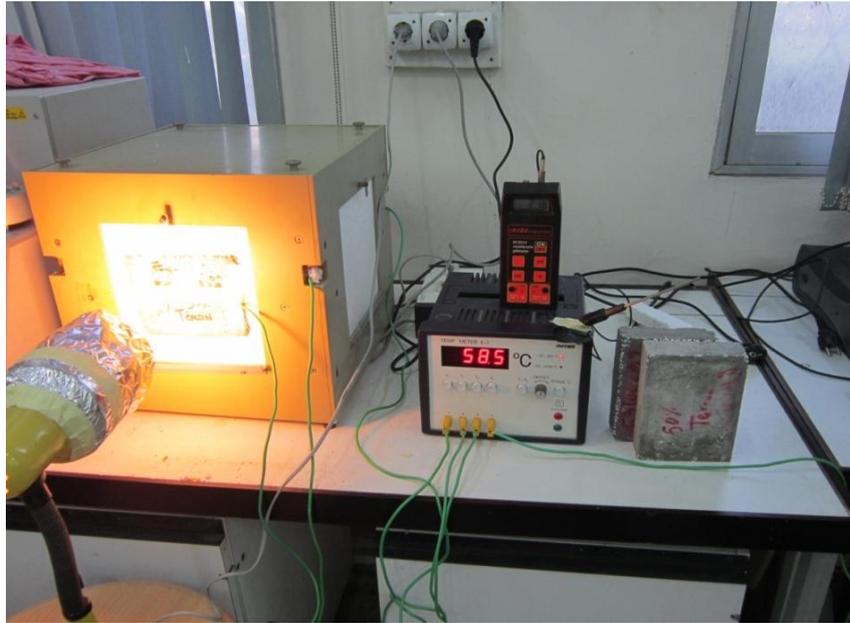


Figure III.11 : Analyse thermique par la méthode de la maquette.

III.3.2.7.1. Théorie et évaluation :

Le flux d'énergie thermique nommé par P , un mur plat homogène est déterminé à l'état d'équilibre (état permanent) au moyen du transfert de chaleur air-paroi et la conduction de chaleur dans le mur. Le flux d'énergie est régi par la surface spécifique de la paroi et les différences de température particulières:

Transfert de chaleur air-paroi, interne, (α_i = coefficient de transfert de chaleur interne)

$$P = \alpha_i \cdot A \cdot (\phi_{Li} - \phi_{Wi})$$

Transmission de chaleur mur-air, externe, (α_a = coefficient de transfert de chaleur externe)

$$P = \alpha_a \cdot A \cdot (\phi_{Wa} - \phi_{La})$$

La conduction de la chaleur dans la paroi, (d = épaisseur, λ = conductivité thermique)

$$P = \frac{\lambda}{d} \cdot A \cdot (\phi_{Wi} - \phi_{Wa})$$

Les restructurations et la somme de ces trois équations rendements

$$P = K \cdot A (\phi_{Li} - \phi_{La})$$

Dans laquelle, le coefficient de transmission thermique ou valeur de k . La formule suivante s'applique alors:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_a}$$

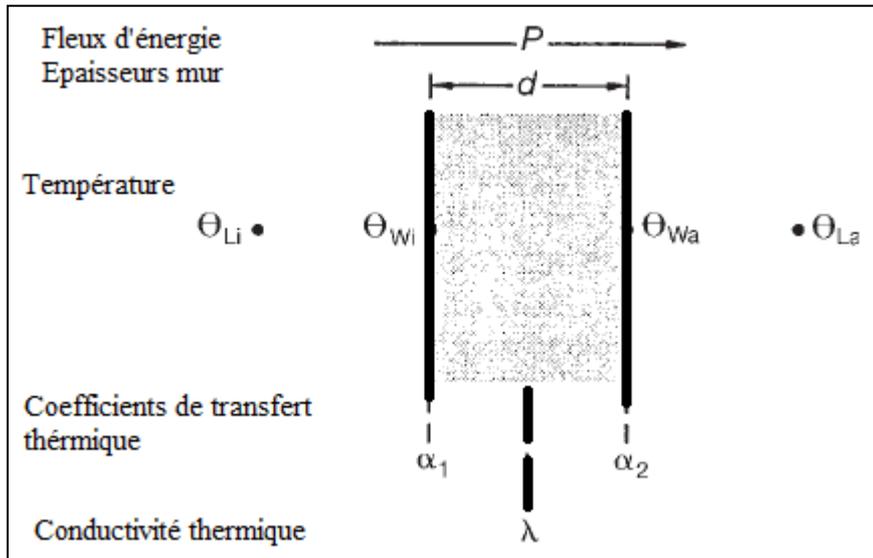


Figure III.12 : Flux d'énergie thermique à travers un mur. Températures internes et externes air de mur: $\Theta_{La}, \Theta_{Li}, \Theta_{Wi}, \Theta_{Wa}$.

Le paramètre Λ qui est régi uniquement par le matériau et l'épaisseur de la paroi que l'on appelle le coefficient de transmission thermique. Les inverses de, K et A sont des valeurs de résistance thermique qui sont désignés de la résistance de transfert de chaleur, la résistance à la transmission thermique et la résistance à la transmission de chaleur. Dans une paroi constituée de couches successives.

$$\Lambda = \frac{\lambda}{d}$$

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\Lambda_1} + \frac{1}{\Lambda_2} + \dots + \frac{1}{\Lambda_n} + \frac{1}{\alpha_a}$$

Les phénomènes qui participent au transfert de chaleur à travers une couche d'air sont la conduction, la convection et le rayonnement.

Le flux d'énergie thermique à travers une paroi est déterminé à partir de la différence dans la paroi extérieure et la température de l'air extérieur. Le coefficient de transfert de chaleur dans le cas de la circulation d'air naturel dans des locaux fermés et pour tous les matériaux des parois rencontrées dans la pratique $\alpha = 8.1 \text{ W/Km}^2$

Cours du calcul:

on commence par l'obtention de P/A , puis on obtient la valeur de k et enfin la conductivité thermique λ en utilisant les équations mentionnées précédemment.

III.4. Conclusion :

Durant toutes les étapes de réalisation de ce travail, le respect du plan du mémoire et des normes en vigueur des différents essais effectués, ont donné une manière à cette partie pratique pour mieux organiser ce travail, néanmoins plusieurs paramètres susceptibles d'influencer l'étude sur les propriétés du mortier dans un laboratoire, car cela nécessite du temps, des moyens de grandes précision on comparaison du matériau béton.

La compréhension de ce sujet conduit à une division en deux volets distincts dans cette étude, dans un premier part la formulation et le type du béton élaboré qui influe sur le comportement physico-mécanique ainsi que sur les propriétés thermiques. D'autre part l'effet des fibres selon leurs nombre et répartition sur résistance en compression et beaucoup plus la résistance à la flexion et à la fatigue.

Les procédures d'essais étant décrites ci avant, les différents résultats obtenus seront Présentés et commentés dans le chapitre suivant.

Chapitre IV

Résultats et discussion

IV.1. Introduction :

Dans ce travail, on a étudié un type de béton ou mortier qui est nommé béton de polystyrène d'où le choix de composition qui donne des densités de béton très faible, pour remédier cette légèreté qui va influencer sur le comportement mécanique de ce béton, on a incorporé des fibres de verre sous forme de nappes (grilles).

Des essais préalables sur la le dosage et la maniabilité nous ont guidé pour fixer les dosages des billes de polystyrène à introduire dans les mortiers.

Pour les formulations, chaque gâchée est préparée de la même manière. En effet le polystyrène est variable, ainsi que le nombre et la répartition des fibres. C'est d'ailleurs l'objet de notre recherche.

IV.2. Etude de l'influence de dosage en polystyrène, sur le comportement physico-mécanique du béton :**IV.2.1. La masse volumique du béton frais et durci :**

- **Sur le béton frais :**

Après chaque gâchée et avant de confectionner les éprouvettes, on mesure la masse volumique du béton frais, les résultats obtenus sont inscrits dans le tableau suivant.

Tableau IV.1 La masse volumique des différentes compositions de béton à l'état frais.

Désignation	Béton témoin (mortier)	Béton à 50% Matrice	Béton à 40% Matrice	Béton à 30% Matrice
Dosage massique en PSE (%)	0	4.86	3.95	3.1
ρ (Kg/m ³)	2125	1042	851	546
ρ / ρ_0 (%)	100	49.03	40.04	25.7

ρ_0 : la masse volumique de béton témoin.

ρ : la masse volumique des différents mélanges.

On peut interpréter les chiffres mentionnés dans le tableau ci-dessus dans un graphe qui va éclaircir les résultats obtenus.

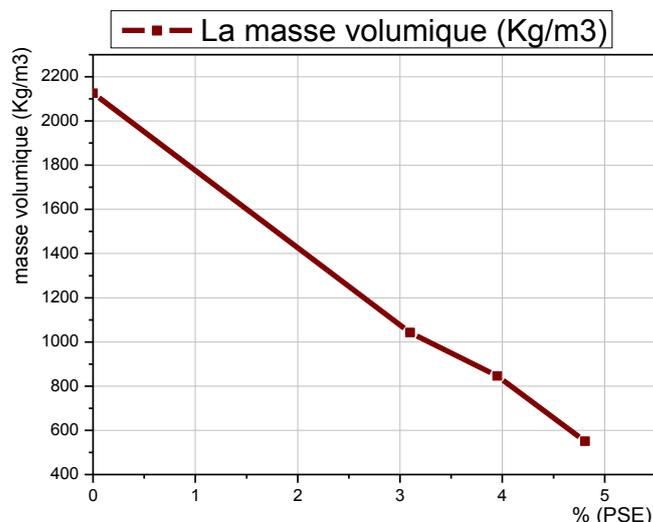


Figure IV.1 La masse volumique des trois bétons à l'état frais.

• **Sur le béton durci :**

Avant l'incorporation de la fibre de verre, on a confectionné huit (08) types de d'éprouvettes en faisant varier le dosage des billes de polystyrène et la construction de l'éprouvette, soit sous forme de stratifié, soit sous forme sandwich, tenant compte les éprouvettes témoins.

Les résultats obtenus sont bien éclaircis dans la figure ci-dessous.

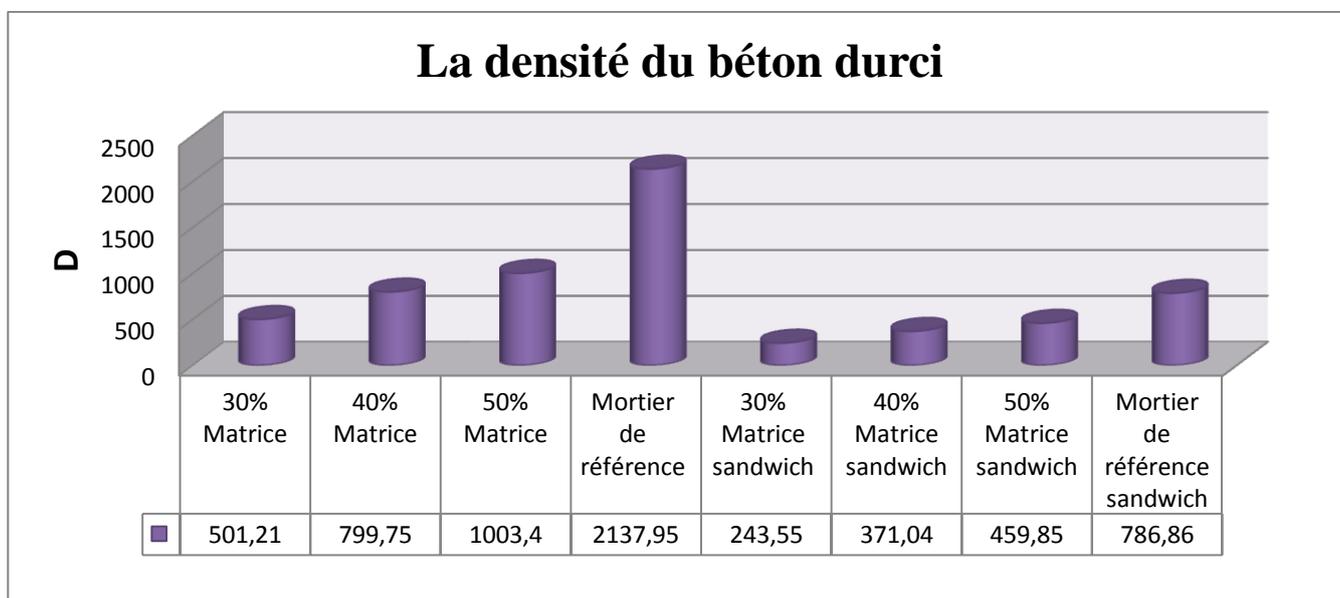


Figure IV.2 Les densités des différents types d'éprouvettes confectionnées.

D'après les résultats obtenus, on remarque que la masse volumique du béton allégé décroît avec l'augmentation du pourcentage des billes de polystyrène. La diminution de la masse volumique est expliquée par la légèreté des billes de polystyrène ($\rho_{PSE} = 25 \text{ kg/m}^3$). Par exemple la masse volumique du béton de référence (mortier témoin) est de 2125 Kg/m^3 , alors que celle d'un béton dosé à 4.86 % de polystyrène n'est que de 1042 Kg/m^3 , ce qui correspond à une diminution de presque 50 %. La masse volumique d'un béton de référence.

Pour ce qui concerne les bétons durcis, on remarque une différence entre les masses volumiques obtenues expérimentalement et celles calculées théoriquement (les valeurs visées), mais cette variation reste toujours très proche de la masse volumique recherchée, et elle peut être expliquée en grande partie, par la fluctuation de la teneur en air dans les bétons [9]. On remarque aussi une chute de la densité pour les éprouvette de forme sandwich qui est expliquée par la faible densité de l'âme de sandwich.

IV.2.2. Ouvrabilité du béton :

L'influence des billes de polystyrène sur l'ouvrabilité des bétons étudiés est apparait dans l'essai d'affaissement au cône d'Abrams qui devrait être constante quelque soit la formulation du béton. La quantité de l'adjuvant introduit dans la composition est ajustée afin de maintenir l'affaissement entre 12 et 13 cm. Les résultats obtenus pour les différentes gâchées sont mentionnés dans le tableau IV.2.

Tableau IV.2 L'affaissement au cône d'Abrams des différentes compositions étudiées.

Désignation	Béton témoin (mortier)	Béton à 30% polystyrène	Béton à 40% polystyrène	Béton à 50% polystyrène
Affaissement AC_0 Sans adjuvant (cm)	12	10	9	9
Affaissement AC avec adjuvant (cm)	/	13	13	12

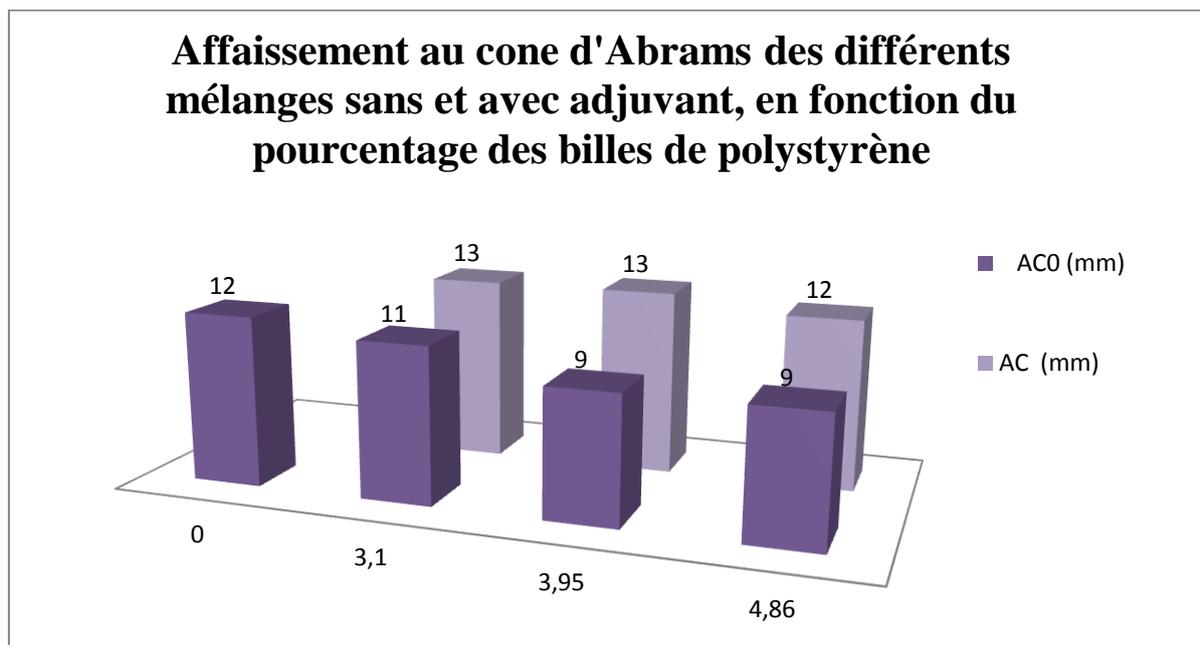


Figure IV.3 L'ouvrabilité des différentes gâchées en fonction du dosage en polystyrène.

Ces résultats sont obtenus après plusieurs essais préalable afin d'obtenir des mélanges à maniabilité comparable comme nous l'avions visé, en jouant sur la quantité d'adjuvant introduite.

D'après les résultats obtenus, on voit clairement que les bétons élaborés auparavant c'est-à-dire sans introduire de fluidifiant, donnent des mélanges fermes, ce qui nous a obligé d'ajouter un adjuvant pour corriger la consistance de tout les mélanges pour les rendre en état plastique, donc, la quantité d'adjuvant introduite est ajustée afin de maintenir l'affaissement entre 12 et 13 cm, et c'est l'ouvrabilité recherchée.

IV.2.3. Mesure de l'air occlus :

La quantité d'air occlus dans le béton est mesurée comme mentionné précédemment dans le chapitre III, à l'aide d'un air mètre suivant la norme NF P18 353. Le béton est placé en 3 couches consolidées avec 25 coups de pilon. La surface supérieure du béton est ensuite arasée à l'aide d'une règle.

La mise en place du béton conduit ce dernier à toujours renfermer une certaine quantité d'air, appelé air occlus. Ce volume dépend de l'énergie de serrage : plus l'énergie de serrage est importante, plus il sera possible de réduire la quantité d'air occlus [38].

Le tableau ci-dessous présente des résultats obtenus pour la mesure de l'air occlus.

Tableau IV.3 : Mesure de l'air occlus.

Désignation	Béton témoin (mortier)	Béton à 30% polystyrène	Béton à 40% polystyrène	Béton à 50% polystyrène
Pourcentage d'air occlus du béton non adjuvanté (%)	3.5	2.84	2.41	1.73
Pourcentage d'air occlus du béton adjuvanté (%)	/	2.88	2.55	1.82

Les teneurs en air présentées dans le tableau VI.3 ont été établies par le calcul des volumes absolus, en partant de la masse volumique mesurée en laboratoire.

Les résultats obtenus montrent que le pourcentage d'air occlus est influencé par différents facteurs. Néanmoins le rapport E/C et l'affaissement telle que l'augmentation de ces deux derniers engendrent une décroissance de la teneur d'air. Certaines études montrent que lorsque la consistance passe de ferme à plastique, très plastique puis fluide, le pourcentage d'air occlus est important dans les bétons fermes et tend vers la valeur 1 % pour les bétons très plastiques à fluides. Les résultats de mesure de l'air occlus sont dispersés et, par conséquent, pas trop fiables ceci est en concordance avec les travaux de de-Larrard [29].

De façon globale, les teneurs en air calculées pour chacun des trois bétons demeurent tout à fait acceptables.

IV.2.4. Absorption capillaire :

Cette caractérisation a pour but de connaître le comportement des bétons renforcés de polystyrène, en présence d'eau.

Comme déjà expliqué dans le chapitre précédent, les essais d'absorption d'eau par capillarité ont été réalisés à température ambiante sur des éprouvettes préalablement conditionnés par un étuvage à 80°C. Les essais ont des durées de plus de 24 heures. La fréquence de mesures est plus élevée pendant la première heure où l'absorption d'eau est la plus importante et les cinétiques d'absorption sont présentées par les variations de la masse de l'éprouvette.

Les résultats obtenus à chaque échéance sur trois éprouvettes de chaque type du béton sont exprimés sous la forme de la moyenne de trois valeurs mesurées.

Le coefficient d'adsorption a été mesuré pour les trois compositions du béton de polystyrène ainsi que pour de béton témoin (mortier normal).

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV.4 : Coefficient d'absorption d'eau par capillarité

Echantillon W_{Ca} (t)	Mortier témoin 100 % Matrice	Béton de 50% Matrice	Béton de 40% Matrice	Béton de 30% Matrice
0	0	0	0	0
30 min	458.55	115.625	93.75	93.75
01 h	481.25	143.75	112.5	109.375
1 ^h :30 min	512.5	178.125	137.5	118.75
03 h	562.5	193.75	156.25	134.375
06h	609.375	206.25	181.25	140
09 h	618.75	212.5	184.375	162.5
24 h	625	215.625	193.75	168.75

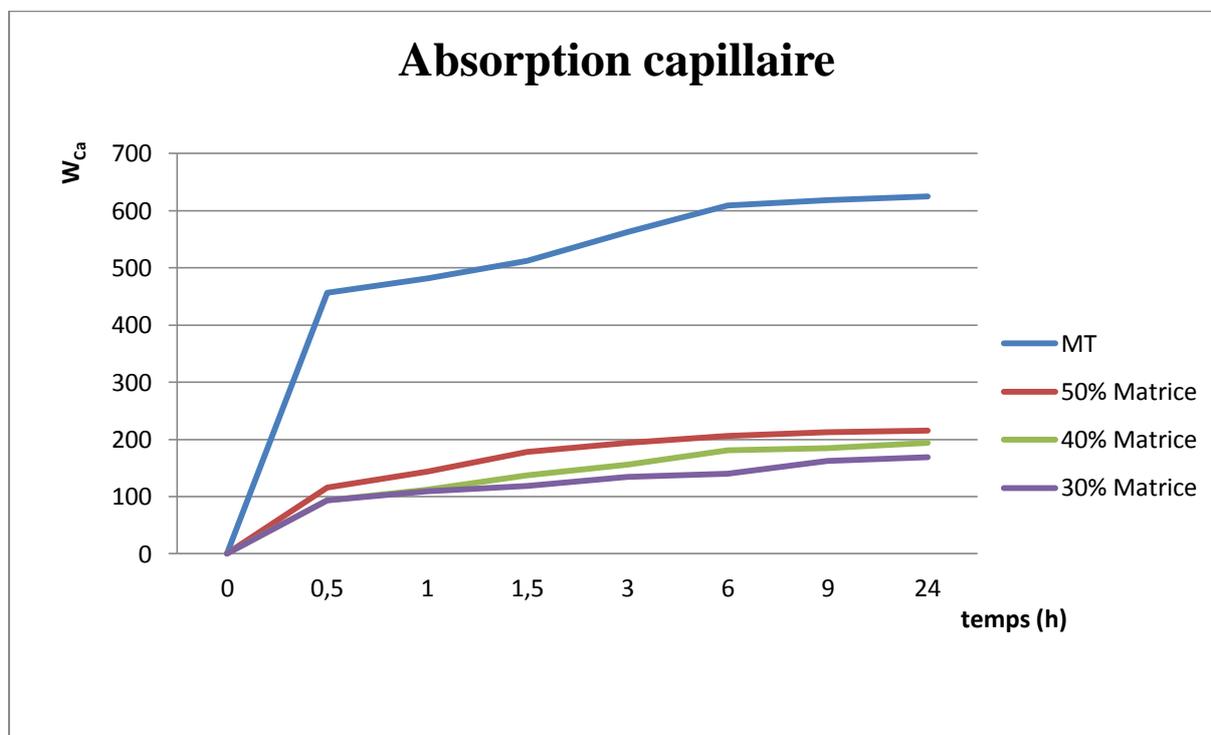


Figure IV.4 Absorption capillaire des différentes gâchées.

Vu la pente, on constate en premier lieu, qu'une grande partie de l'eau absorbée se fait au bout d'une heure et la seconde partie des courbes illustre le remplissage des capillaires de diamètres plus fins. Ainsi, la vitesse d'absorption capillaire est plus faible, d'où ces pentes

plus raides. La pente décroissante indique qu'au fur et à mesure de l'essai, ce sont des capillaires de plus en plus fins qui sont intéressés par le processus d'absorption d'eau [49].

Donc plus le béton est riche en polystyrène il absorbe moins d'eau.

Ce phénomène peut être expliqué par :

- le polystyrène est un matériau non poreux, l'eau ne peut pas pénétrer à l'intérieure des billes de polystyrène
- Un mortier témoin est composé d'un grand nombre de vides, or, lorsqu'on introduit les billes de polystyrène dans le mélange, elles occupent la place des vides, empêchant ainsi l'eau de les remplir. En effet, lorsque le mortier est immergé dans l'eau, cette dernière entre par les capillaires et infiltre dans le matériau pour aller remplir les vides existants, faisant ainsi augmenter les poids total. Cependant, les billes que l'on introduit dans le mortier, prennent la place des vides, l'eau pénètre, mais en plus faibles quantité dans le matériau considéré tandis que le poids total augmente peu.

IV.2.5. Absorption par immersion :

L'essai d'absorption par immersion dans cette étude nous permet d'étudier le pouvoir absorption d'eau par le matériau et d'étudier aussi les propriétés hygrométriques. L'expérience se déroule comme suit :

- On calcule la masse de l'échantillon avant séchage m_0 puis on le sèche dans l'étuve à 105°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante m_s
- On met les échantillons secs dans le bain en faisant fixer la température du bain d'immersion à des températures de 20°C , 40°C , 60°C et 80°C et à chaque heure, on mesure la masse des échantillons pendant 08 heures ainsi après 24 heures.

Avant l'immersion, on calcule le pourcentage d'humidité résiduelle pour chaque échantillon

$$H_r \text{ par la relation : } H_r = \frac{M_0 - M_s}{M_s} * 100\%$$

Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau IV.5

Tableau IV.5 : Absorption d'eau par immersion.

			W _a (%) en fonction de temps				
Temp échantillon	H _r	T (°C)	02 h	04 h	06 h	08 h	24 h
Mortier témoin	32.54	20°C	44.21	44.33	44.86	44.97	45.24
		40°C	42.72	43.08	43.11	43.12	43.48
		60°C	43.16	43.19	43.21	43.20	43.34
		80°C	43.23	43.23	43.22	43.23	43.32
Béton à 50% matrice	28.04	20°C	36.46	36.55	36.63	36.66	36.78
		40°C	36.45	36.47	36.51	36.50	36.67
		60°C	36.45	36.5	36.5	36.51	36.55
		80°C	36.43	36.44	36.43	36.43	36.46
Béton à 40% matrice	24.83	20°C	31.39	31.46	31.46	31.47	31.53
		40°C	31.12	31.11	31.11	31.12	31.18
		60°C	31.09	31.12	31.12	31.13	31.23
		80°C	31.07	31.10	31.11	31.10	31.09
Béton à 30% matrice	22.17	20°C	28.87	28.92	29.02	29.02	29.11
		40°C	28.73	28.70	28.71	28.71	28.77
		60°C	28.75	28.75	28.74	28.74	28.77
		80°C	28.73	28.71	28.71	28.72	28.72

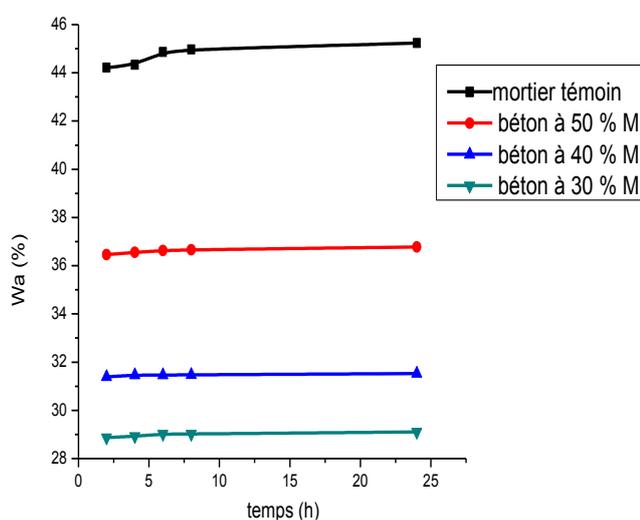


Figure IV.5 : Absorption d'eau par immersion à 20°C

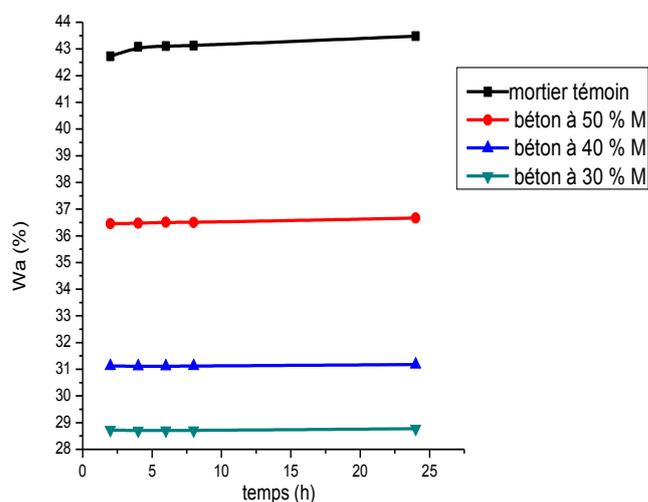


Figure IV.6 : Absorption d'eau par immersion à 40°C

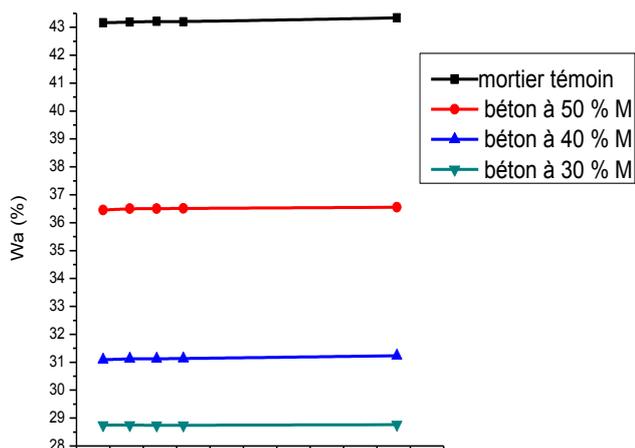


Figure IV.7 : Absorption d'eau par immersion à 60°C

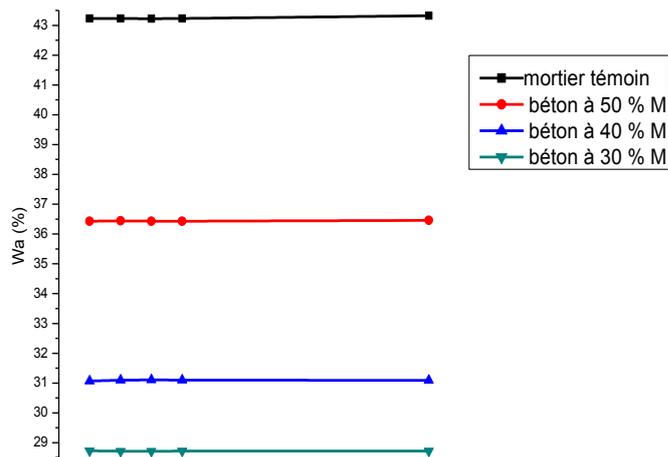


Figure IV.8 : Absorption d'eau par immersion à 80°C

Après différentes durées d'immersion, les caractéristiques liées à l'absorption d'eau des échantillons sont déterminées par le pourcentage en masse d'eau absorbée W_a .

Ce qui est bien remarquable dans les figures précédemment présentées, est l'évolution faible du coefficient d'absorption en fonction du temps pour tous les échantillons testés, même à différents degrés de température, néanmoins le W_a n'est pas trop significatif à l'échange de température mais aussi les coefficients W_a et H_f sont proches, ce qui montre que les échantillons n'ont pas absorbés beaucoup d'eau et il atteint la saturation très tôt.

Ces résultats ne montrent que le béton à faible dosage en polystyrène est plus sensible à l'absorption d'eau que celui fortement dosé en polystyrène. Le gain en masse mesurés après immersion est mentionné dans le tableau suivant.

Tableau IV.6 : Gain de masse $G(\%)$ après 24 h d'immersion.

Echantillon Gain de masse	Mortier témoin	Béton à 50% matrice	Béton à 40% matrice	Béton à 30% matrice
$G(\%)$ avant immersion	0	0	0	0
$G(\%)$ à 20°C	39.13	31.17	26.98	31.30
$G(\%)$ à 40°C	33.62	30.77	25.57	29.76
$G(\%)$ à 60°C	33.19	30.34	25.77	29.76
$G(\%)$ à 80°C	33.12	30.02	25.21	29.54

D'après ces résultats, on peut constater que la sensibilité à l'eau des échantillons testés est considérée faible, vu l'évolution du gain en masse. On remarque aussi que le béton faiblement dosés en polystyrène (30%) a retenu plus d'eau que celui dosé à 40%, elle peut être expliqué par l'humidité résiduelle, c'est-à-dire, avant le séchage et par la porosité fermée.

IV.3. Etude de l'influence de l'introduction des fibres sur le comportement mécanique du béton :

IV.3.1. La résistance à la compression :

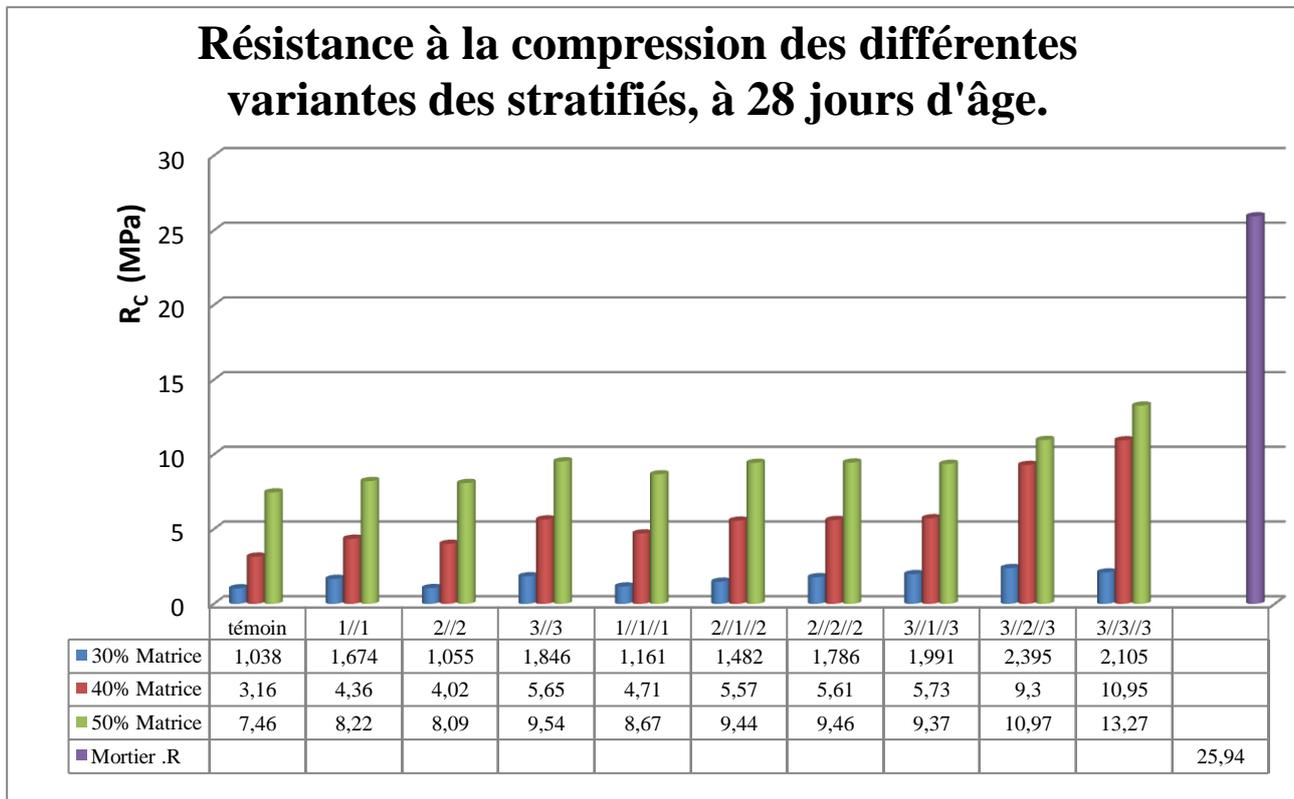


Figure IV.9 : La résistance à la compression des différentes variantes stratifiées.

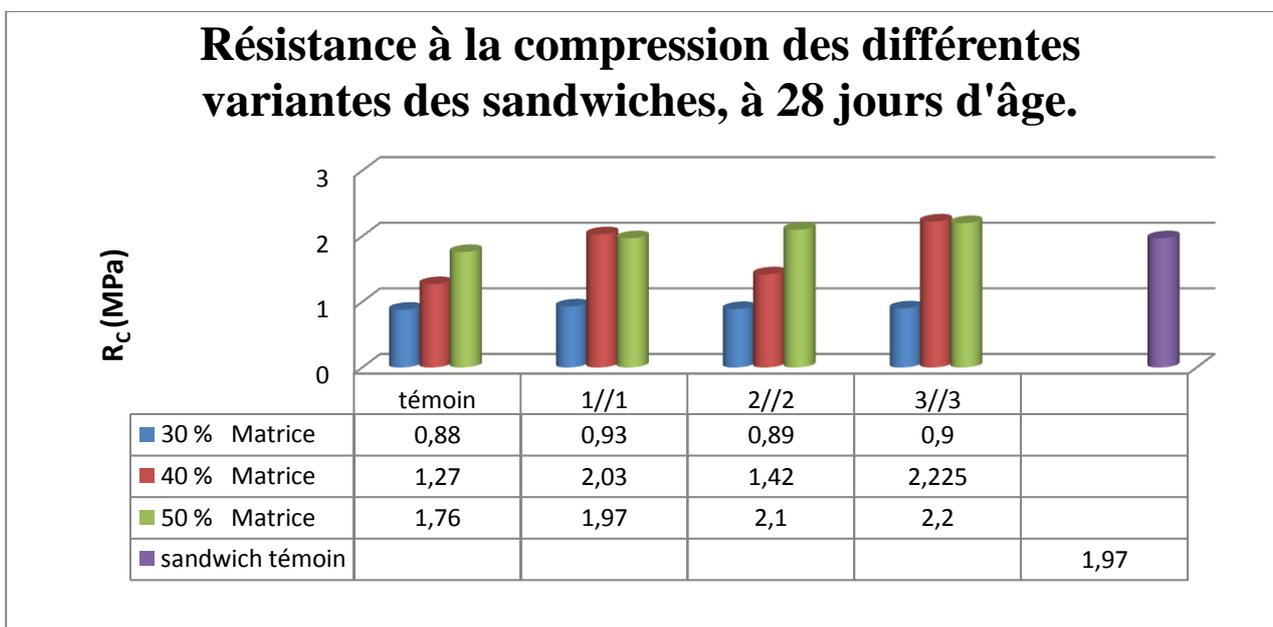


Figure IV.10 : La résistance à la compression des différentes variantes sandwiches.

Toutes les caractérisations qui viennent à la suite de ce chapitre, traitent des propriétés mécaniques des différentes variantes d'éprouvettes étudiées.

On observe toutefois, que dans le domaine expérimental, aucune composition ne permet d'atteindre les objectifs visés, fi la fois pour la densité et les propriétés mécaniques. Pour y parvenir, il reste à modifier la composition du mélange d'additifs.

D'après les deux figures précédentes (IV.09 et IV.10), on voit que les résistances à la compression augmentent en fonction du dosage en billes de polystyrène quel que soit le nombre et la répartition des fibres de verre. Ceci est dû à la formulation du béton, d'où la densité de l'échantillon, tel que La résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la densité du béton [55]. Ceci explique les résultats obtenus lorsque le béton faiblement dosé en polystyrène, est plus dense. Ainsi il développe de meilleures résistances à la compression. On observe aussi que le béton étudié, malgré la bonne répartition des billes de polystyrène (figure IV.11) il demeure de faible résistance, vu la légèreté des agrégats utilisés.



Figure IV.11 : La répartition des billes de polystyrène dans une éprouvette.

On a expliqué précédemment la méthode d'élaboration des différentes variantes, en jouant sur la composition (densité), c'est-à-dire, le dosage en polystyrène ainsi sur le nombre et la distribution des fibres de verre, cette dernière aussi de son rôle influencé sur la résistance à la compression, cette influence a apparu clairement dans les éprouvettes qui contiennent un nombre important de fibres. La distribution des feuilles de fibres de verre est ainsi importante, citons par exemple, les éprouvettes qui contiennent trois feuilles (nappes) de fibres de verre dans ces deux faces, résistent mieux à l'effort de compression que de celle qui contient deux nappes dans les trois faces, les cas des éprouvettes 3/3 M et 2/2/2 M.

Alors le nombre et la distribution de la fibre de verre engendre un gain de résistance très important en comparaison avec les éprouvettes non renforcées de fibres, citons une résistance de 1.038 MPa et 2.105 MPa pour deux échantillons de même formulation (30 % Matrice). Mais le deuxième est renforcé de neuf feuilles de fibres réparties en 3/3/3. On remarque une évolution de la résistance à la compression de plus que le double 102.79 %, même dans le cas des autres formulations on gagne 77.88% de résistance à la compression quand on renforce le béton de 50% Matrice par les neuf feuilles de fibres de verre.

Donc, ce mélange est classé parmi les bétons les plus légers, grâce à sa densité. Prenant par exemple, le béton dosé à 50% de billes de polystyrène en volume. Sa densité en moyenne qui n'est que 1000 donne une résistance à la compression moyenne sur éprouvette 7*7*28cm égale à 7.46 MPa et pour une même composition alors, cette fois, l'éprouvette est renforcée par neuf (09) nappes en fibres de verre, on trouve un gain de la résistance à la compression d'une valeur de 5.81 MPa.

Un phénomène remarqué dans les essais de compression des éprouvettes est la contraction, que ce soit pour les stratifiés ou pour les sandwichs comme se montre la figure IV.12, une éprouvette qui se contracte et se détruit sous l'effet des forces de compression, mais elle reprend une partie de son volume initial, après quelques instants après la fin de l'essai. Ce phénomène peut s'expliquer par la légèreté des billes de polystyrène qui présentent des maillons faibles ayant des propriétés plastiques.

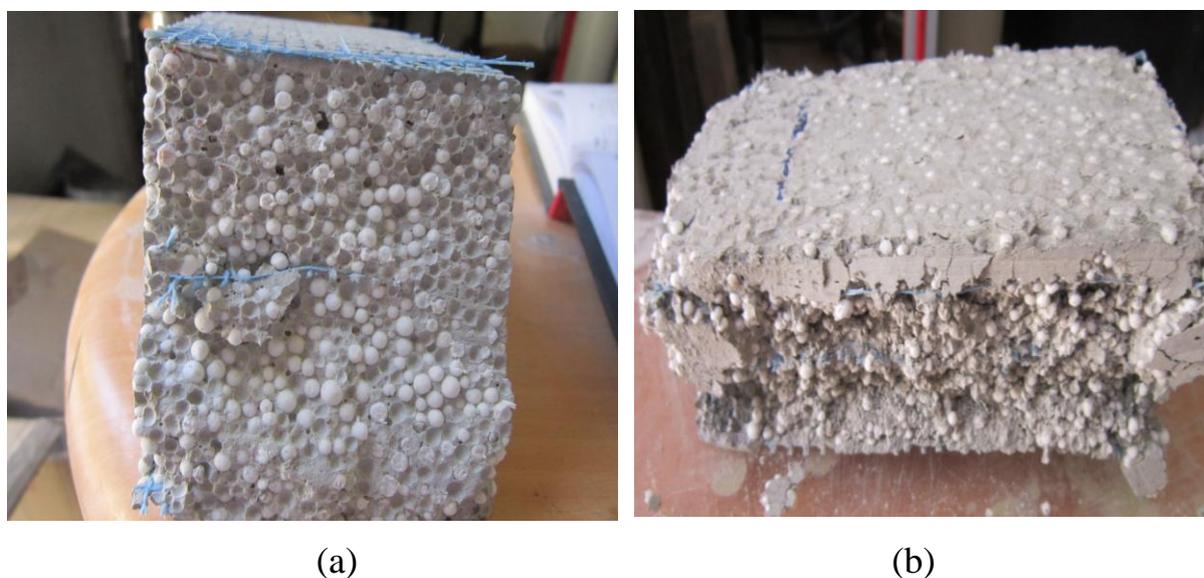


Figure IV.12 : Eprouvette sandwich avant (a) et après (b) essai de compression.

IV.3.2. La résistance à la flexion :

La résistance à la flexion est une caractéristique critique et très importante vis-à-vis de celle de compression grâce à la présence des fibres de verres sous forme d'une nappe. Pour cette raison cette caractérisation prend une bonne partie dans ce travail, d'ailleurs, on commence par une illustration de toutes les valeurs obtenues sous formes des histogrammes pour bien éclaircir la différence en valeur entre les différents échantillons étudiés. Ce qui présente les deux figures suivantes.

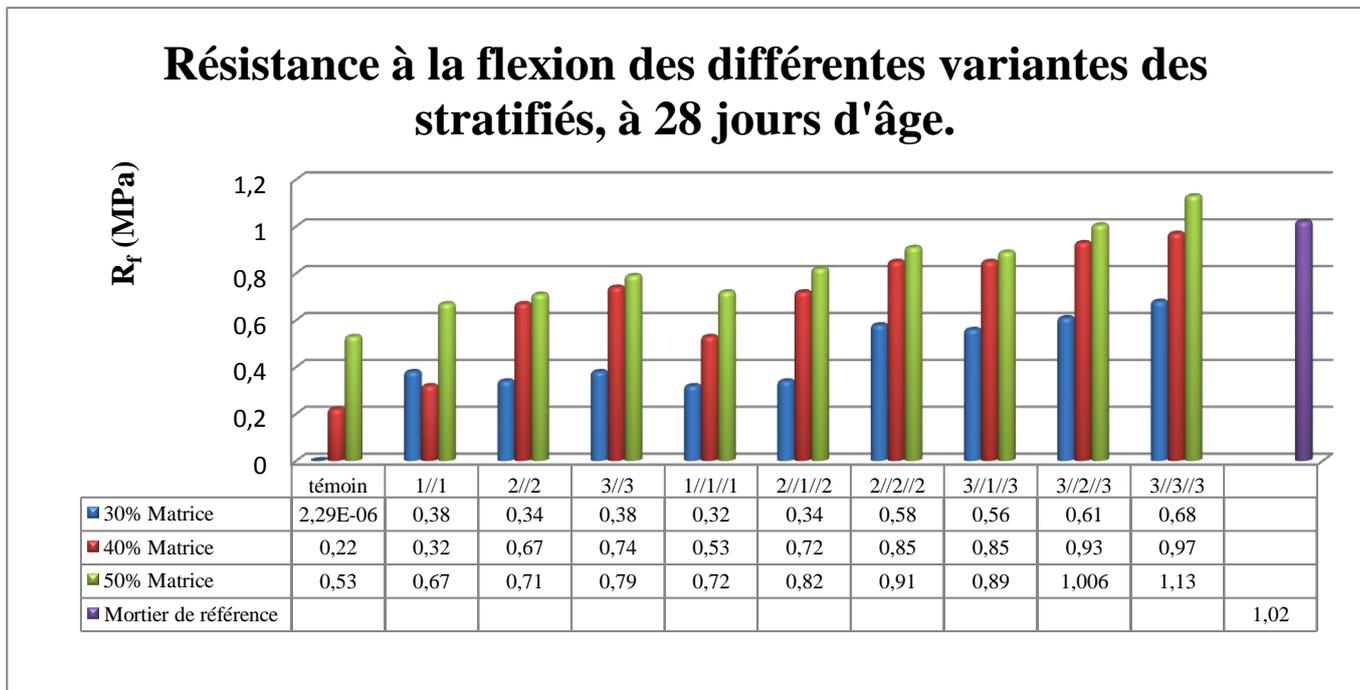


Figure IV.13 : Résistance à la flexion des différentes variantes stratifiées.

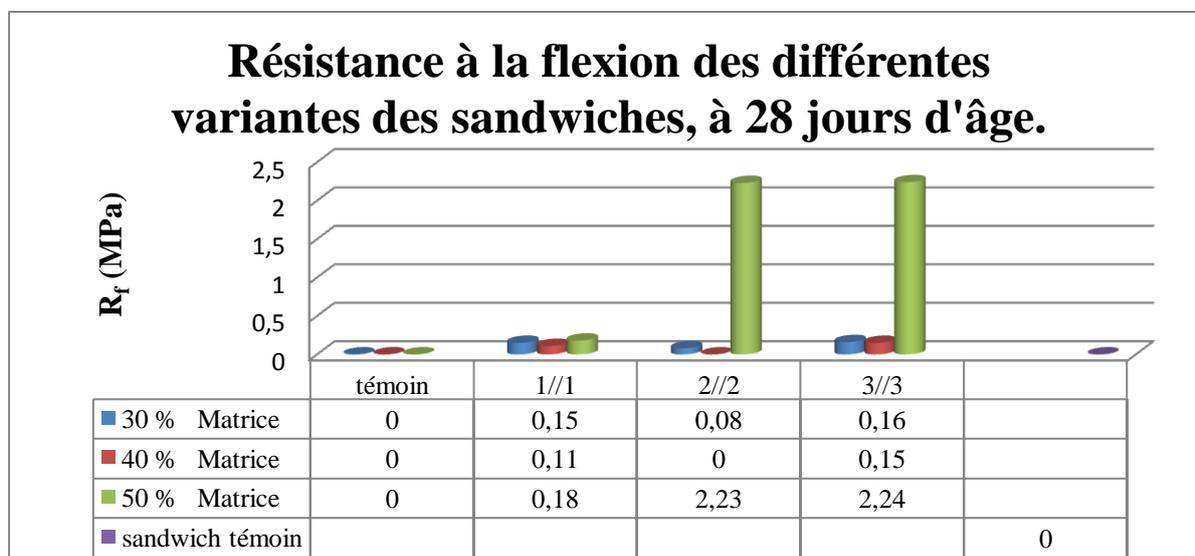


Figure IV.14 : Résistance à la flexion des différentes variantes sandwichs.

D'après les deux figures précédentes (IV.13 et IV.14), on remarque néanmoins que la résistance à la flexion est très faible pour tous les bétons qui ne sont pas ductiles, en comparaison avec la résistance à la compression [52]. Cependant, le béton étudié dans ce mémoire est très léger alors il se comporte très faiblement durant l'effort de flexion. Ce qui est très remarquable aussi, l'évolution de cette résistance pour les échantillons de type 3/3/3 50% M par rapport au mortier de référence, malgré que la densité de ce dernier soit plus que le double de la densité de ce béton. Cette remarque est conservée pour les échantillons de forme stratifiée. Si on parle des autres de forme sandwich, on remarque une évolution importante des résistances à la flexion pour les échantillons qui ont un nombre important de fibres.

IV.3.2.1. Effet des fibres sur le comportement en flexion des bétons étudiés :

IV.3.2.1.1. Stratifiés à 50% de dosage en billes de polystyrène :

Les figures suivantes servent à étudier le rôle du renfort (les fibres de verre) sur le comportement en flexion d'un même type de béton (même composition et même densité).

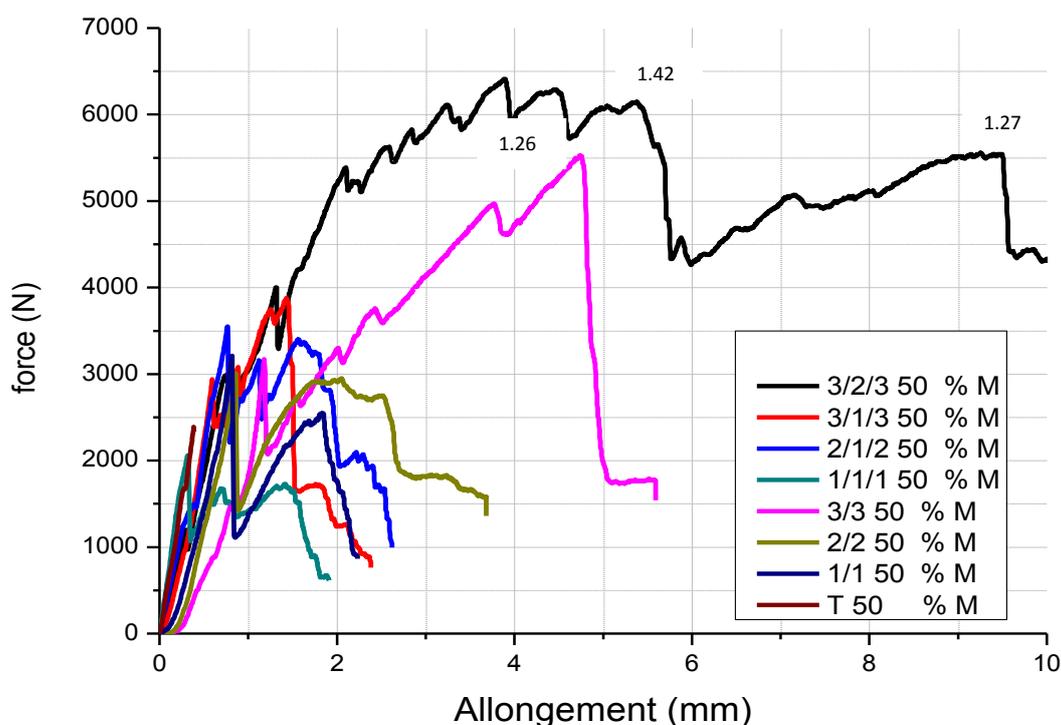


Figure IV.15 : Effet de fibres sur évolution de la charge en flexion des stratifiés dosés à 50% de billes de polystyrène.

Cette figure (IV.15) représente les courbes d'évolution des efforts appliqués par flexion trois points de l'ensemble des stratifiés élaborés en dosant 50% de billes de polystyrène. Ces courbes (force-déplacement), nous permettent de suivre cette évolution par rapport à tous les échantillons d'une même composition. On remarque d'après cette figure l'hétérogénéité du comportement en flexion d'un échantillon à un autre, selon le renforcement par la fibre de verre [70], tels que les échantillons stratifiés fortement renforcés par les fibres (les 3/3/3 et les 3/3) soient résistantes à la flexion par rapport aux autres.

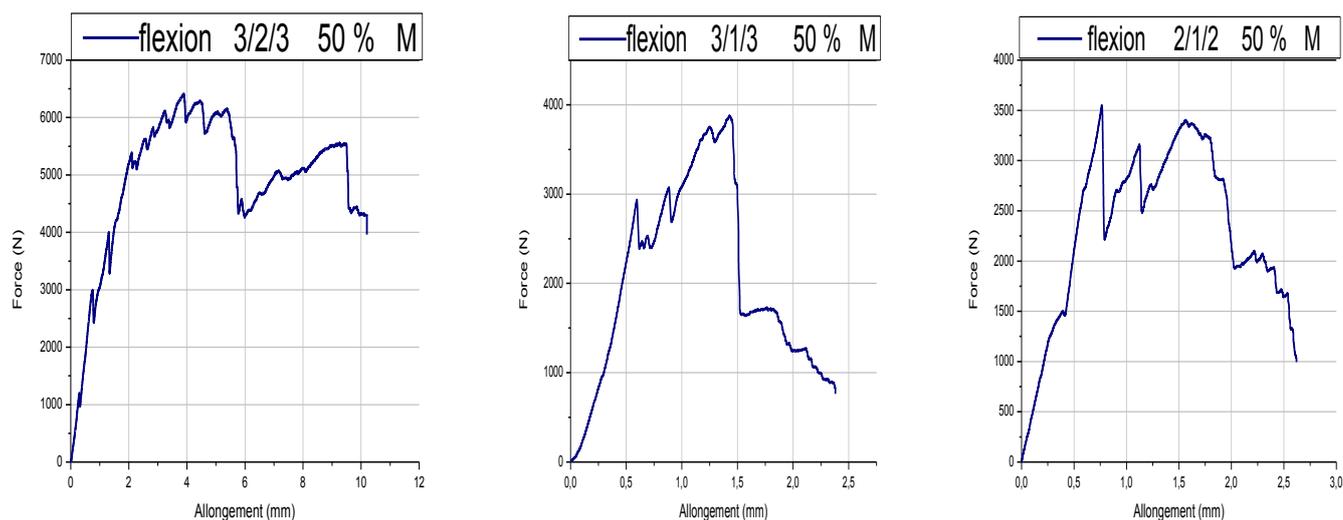


Figure IV.16 : Evolution de la charge en flexion des stratifiés dosés à 50% de billes de polystyrène et renforcés à triple faces.

Cette figure englobe trois courbes qui représentent l'essai de flexion statique (flexion trois points) pour des stratifiés de même densité et de même répartition des fibres, la seule différence est le nombre des fibres.

On observe, d'après ces figures que les éprouvettes qui ont soumis aux efforts statiques de flexion reprennent leur résistance à la flexion, même après une première et une deuxième rupture, donc il ya plusieurs points de rupture, ce qui montre qu'après la rupture de la matrice cimentaire ou du béton, les fibres jouent le rôle de renfort et continuent à travailler, même après rupture du béton. [56]

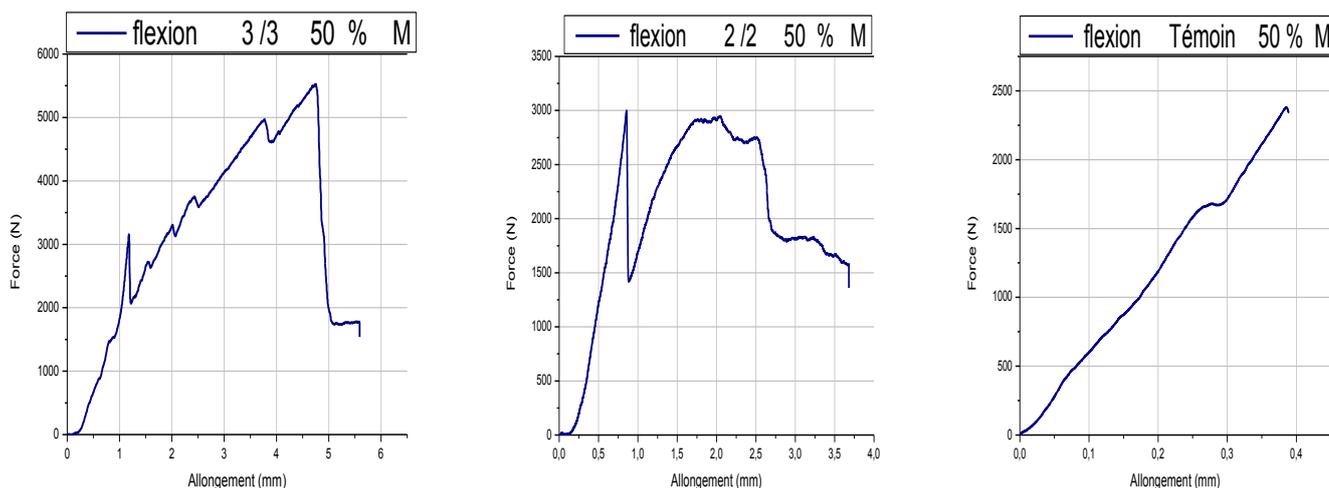


Figure IV.17 : Evolution de la charge en flexion des stratifiés dosés à 50% de billes de polystyrène témoins et ceux renforcés à double faces.

Cette figure englobe aussi trois courbes qui représentent l'essai de flexion statique (flexion trois points) pour des stratifiés de même densité, telles que les deux premières courbes sur la droite sont des stratifiés renforcés en double faces (en haut et en bas) et la troisième courbe représente l'évolution de la charge appliquée en flexion, des stratifiés témoins.

On observe d'après ces figures que les éprouvettes qui ont soumis aux efforts statiques de flexion reprennent leur résistance à la flexion même après une rupture du béton, mais ce n'est pas de la même façon comme elle s'est comportée avec les éprouvettes renforcées dans les trois faces (en haut, en bas et au milieu), ce qui montre qu'après rupture de la matrice cimentaire ou du béton les fibres jouent le rôle de renfort et continuent à travailler, même après rupture du béton, mais avec un intervalle de déplacement très court, donc, les fibres sont superposées l'une sur l'autre et une fois se rompent, les éprouvettes perdent leur ductilité et ne seront plus capables de résister à la force appliquée. Contrairement au témoin, il représente un seul point de rupture, ce qui montre clairement le rôle des fibres. [57]

IV.3.2.1.2. Stratifiés à 60% de dosage en billes de polystyrène :

Les figures suivantes servent à étudier le rôle du renfort (les fibres de verre) sur le comportement en flexion d'un même type de béton (même composition et même densité) pour bien éclaircir cette caractérisation. Cette fois, les échantillons stratifiés sont moins denses par rapport aux premiers.

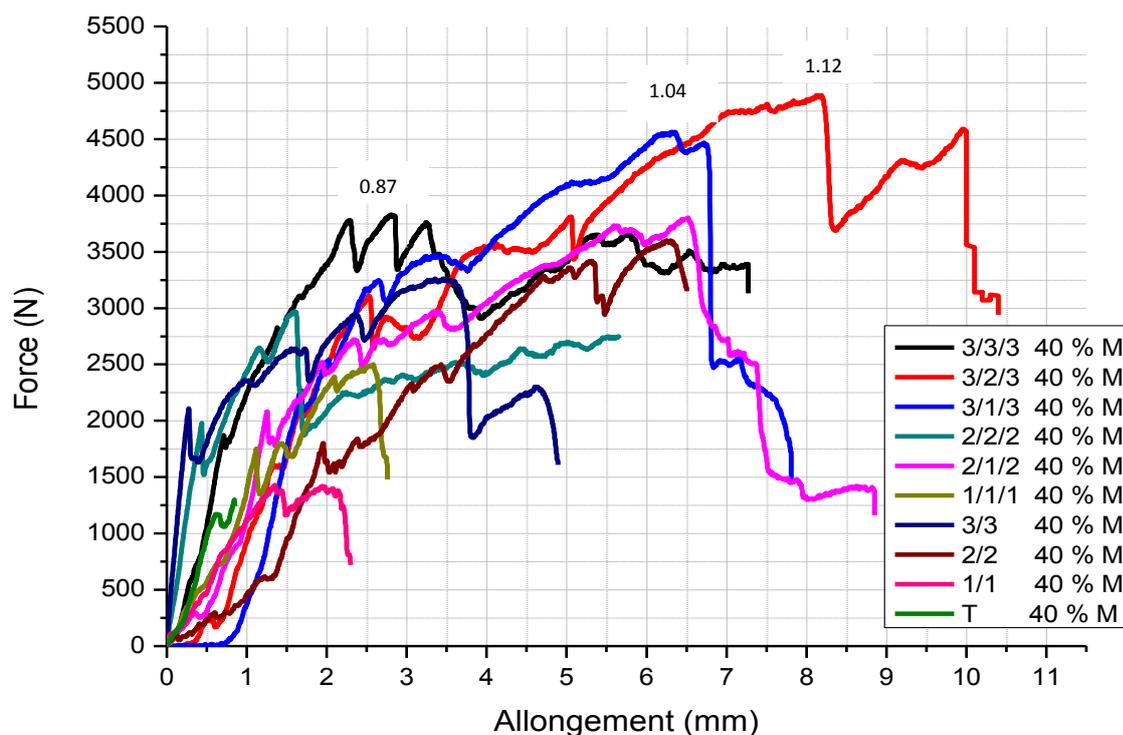


Figure IV.18 : Effet de fibres sur évolution de la charge en flexion des stratifiés dosés à 60% de billes de polystyrène.

Cette figure (IV.18) représente les courbes d'évolution des efforts appliqués par flexion trois points de l'ensemble des stratifiés élaborés en dosant 60% de billes de polystyrène. Ces courbes nous permettent de suivre cette évolution par rapport à tous les échantillons d'une même composition. On observe, d'après cette figure, que le comportement en flexion d'un échantillon à un autre est différent du point de vue nombre de points de rupture. Tout dépend du nombre des fibres de verre renforcées par éprouvette, tels que les échantillons stratifiés fortement renforcés par les fibres qui ont bien résisté à la flexion par rapport aux autres.

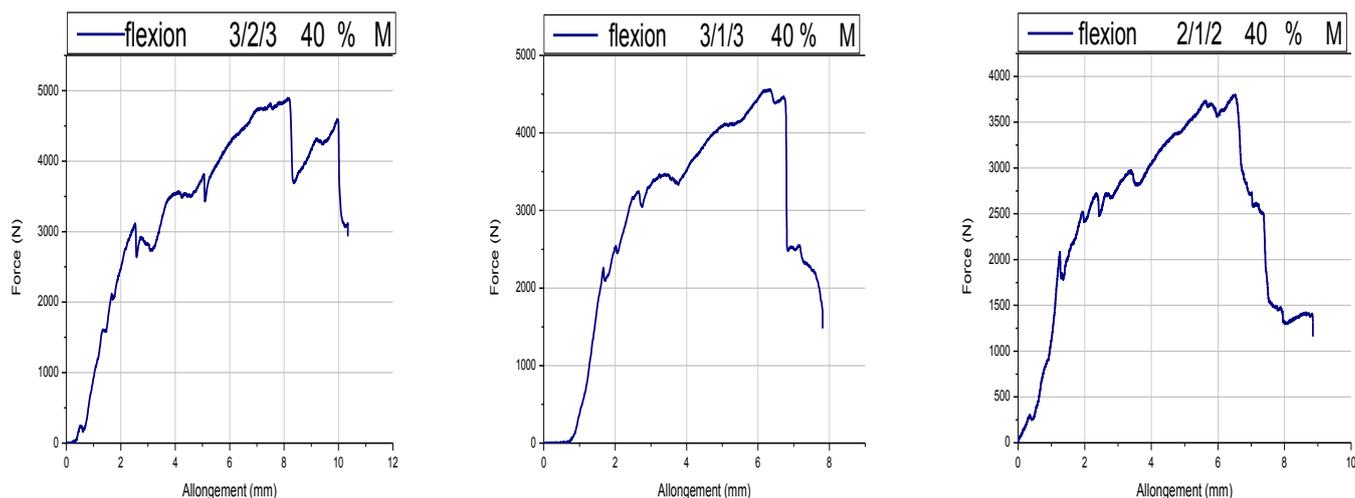


Figure IV.19 : Evolution de la charge en flexion du béton dosés à 60% de billes de polystyrène et renforcés à triple faces.

Cette figure englobe trois courbes qui représentent l'essai de flexion statique (flexion trois points) pour des stratifiés de même densité et de même répartition des fibres, la seule différence est le nombre des fibres.

Comme les stratifiés précédemment testés (figure IV.16), on observe que ces éprouvettes ont soumis aux efforts statiques de flexion représentées sur la figure IV.19. Elles reprennent leur résistance à la flexion, même après une première et une deuxième rupture, donc, il ya plusieurs points de rupture, ce qui montre que, après rupture de la matrice cimentaire ou de béton, les fibres jouent le rôle de renfort et continuent à travailler, même après rupture du béton. La seule différence entre les deux figures, est la force appliquée tels que les stratifiés dosés à 60% de billes de polystyrène sont moins résistants aux efforts de flexion par rapport à ceux dosés à 50% de billes de polystyrène, même si le nombre et la répartition des fibres sont les mêmes. [58]

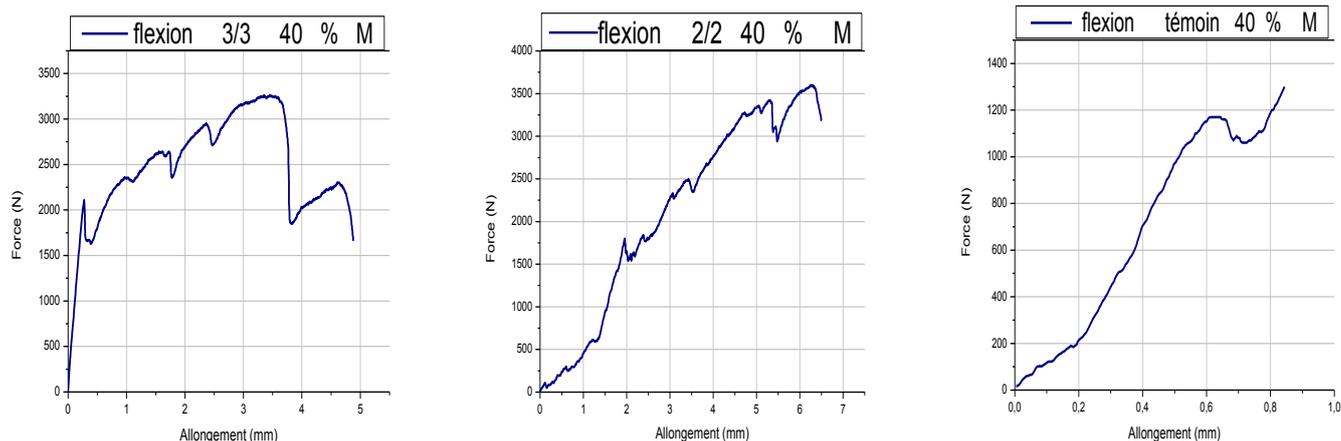


Figure IV.20 : Evolution de la charge en flexion du béton dosés à 60% de billes de polystyrène témoins et ceux renforcés à double faces.

Cette figure englobe aussi trois courbes qui représentent l'essai de flexion statique (flexion trois points) pour des stratifiés de même densité, telles que les deux premières courbes sur la droite qui sont des stratifiés renforcés en double faces (en haut et en bas) et la troisième courbe représente l'évolution de la charge appliquée en flexion des stratifiés témoins. Dans cette figure, les stratifiés testés sont dosés à 60% de billes de polystyrène.

On observe, d'après ces figures que, les éprouvettes qui ont soumis aux efforts statiques de flexion reprennent leur résistance à la flexion, même après une rupture du béton, mais pas de la même façon comme elles sont comportées les éprouvettes renforcées dans les trois faces (en haut, en bas et au milieu), ce qui montre que, après rupture de la matrice cimentaire ou de béton les fibres jouent le rôle du renfort et continuent à travailler même après rupture de béton, mais avec un intervalle de déplacement très court, donc, les fibres sont superposées l'une sur l'autre et une fois se rompent, les éprouvettes perdent leur ductilité et ne seront plus capables de résister à la force appliquée.[59]

IV.3.2.1.3. Stratifiés à 70% de dosage en billes de polystyrène :

Les trois figures suivantes servent à étudier le rôle du renfort (les fibres de verre) sur le comportement en flexion d'un même type de béton (même composition et même densité). Les stratifiés testés sont dosés à 70% de polystyrène. Pour bien éclaircir cette caractérisation, on présente toutes les courbes des différents échantillons dans une seule figure, puis on étudie quelques unes dans des courbes à part.

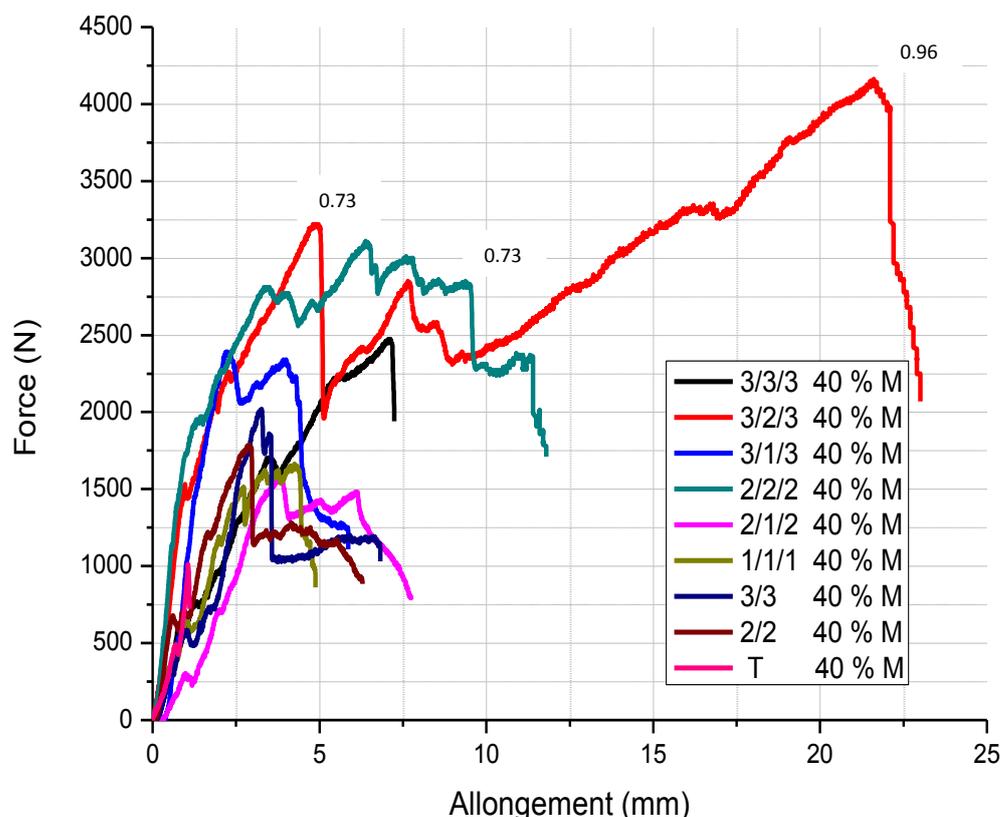


Figure IV.21 : Effet de fibres sur évolution de la charge en flexion des stratifiés dosés à 70% de billes de polystyrène.

Cette figure (IV.21) représente les courbes d'évolution des efforts appliqués par flexion trois points de l'ensemble des stratifiés élaborés en dosant 70% de billes de polystyrène. Ces courbes nous permettent de suivre cette évolution par rapport à tous les échantillons d'une même composition. On remarque, d'après cette figure, la différence de comportement en flexion d'un échantillon à un autre, selon le renforcement par la fibre de verre, tels que les échantillons stratifiés fortement renforcés par les fibres (les 3/3/3 et les 3/3) sont bien résistants à la flexion, par rapport aux autres.

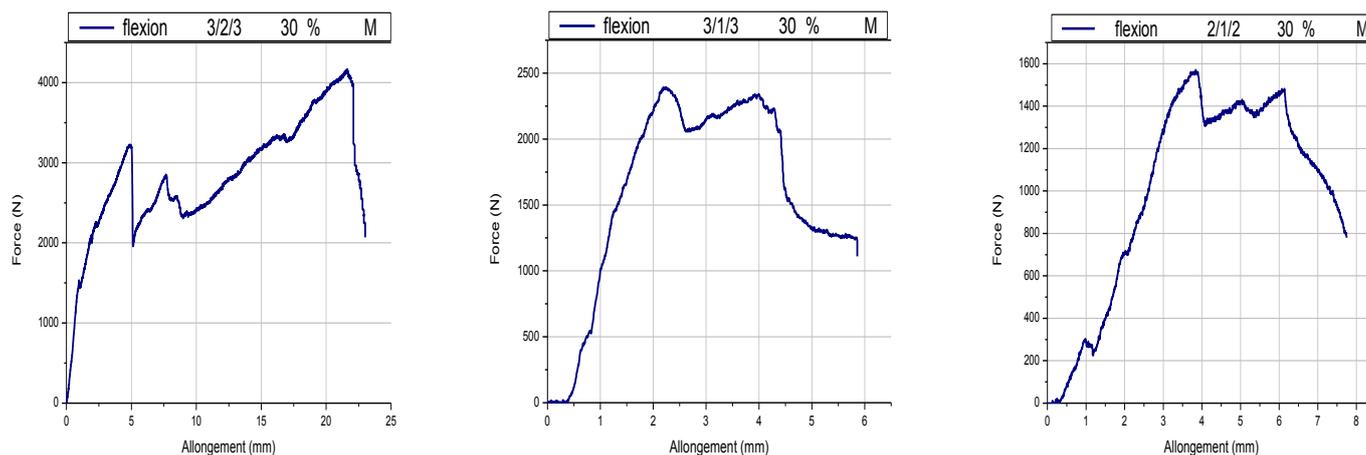


Figure IV.22 : Evolution de la charge en flexion des stratifiés dosés à 70% de billes de polystyrène et renforcés à triple faces.

Cette figure englobe trois courbes qui représentent l'essai de flexion statique (flexion trois points) pour des stratifiés de même densité et de même répartition des fibres, la seule différence est le nombre de fibres.

On observe, que ces éprouvettes ont soumis aux efforts statiques de flexion, représentées sur la figure IV.22 se comportent comme les autres éprouvettes de même types, et reprennent leur résistance à la flexion même après une première et une deuxième rupture, donc il ya plusieurs points de rupture, ce qui montre qu'après rupture de la matrice cimentaire ou de béton, les fibres jouent le rôle de renfort et continuent à travailler, même après rupture de béton. On observe, aussi que, la force appliquée sur ces échantillons est plus faible en comparaison avec les autres échantillons testés précédemment, tels que, les stratifiés dosés à 60% de bille de polystyrène qui sont moins résistants aux efforts de flexion par rapport à ceux qui ont dosés à 50% et 60% de billes de polystyrène, même si le nombre et la répartition des fibres sont les mêmes. Le PSE a une influence négative sur la résistance en traction des bétons, par rapport aux autres isolants. [65]

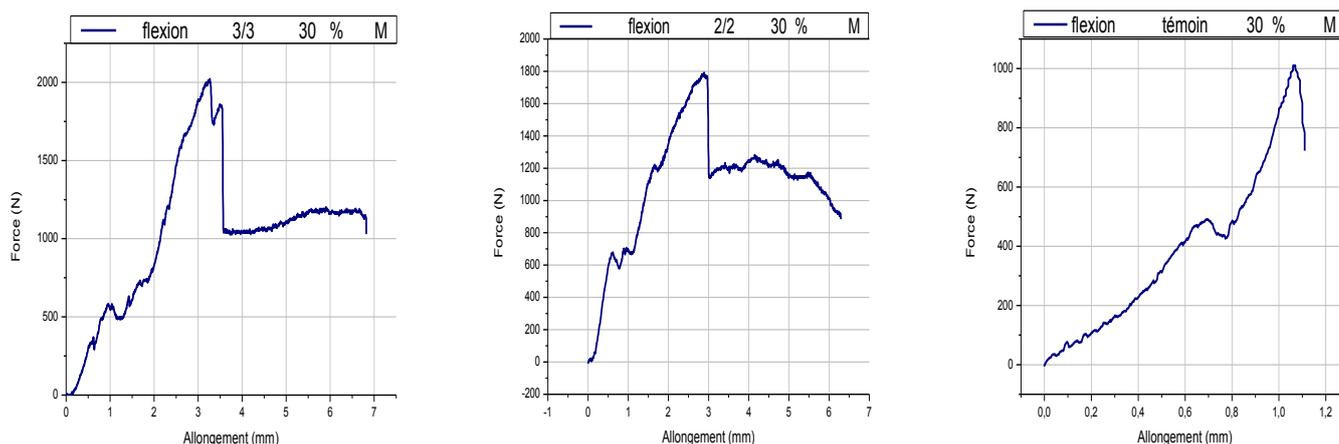


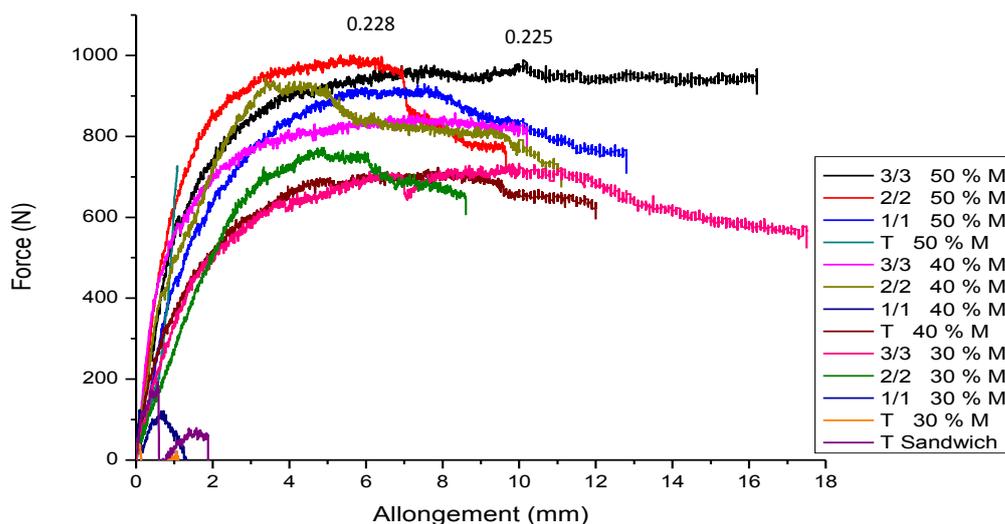
Figure IV.23 : Evolution de la charge en flexion des stratifiés dosés à 70% de billes de polystyrène témoins et ceux qui ont renforcés à double faces.

Cette figure aussi englobe trois courbes qui représentent l'essai de flexion statique (flexion trois points) pour des stratifiés de même densité, telles que les deux premières courbes sur la droite, qui sont des stratifiés renforcés en double faces (en haut et en bas) et la troisième courbe représente l'évolution de la charge appliquée en flexion des stratifiés témoins. Dans cette figure, les stratifiés testés sont dosés à 70% de billes de polystyrène.

On observe, d'après ces figures que les éprouvettes qui ont soumis aux efforts statiques de flexion, reprennent leur résistance à la flexion même après une rupture de béton, mais pas de la même façon comme elle s'est comportée les éprouvettes renforcées dans les trois faces (en haut, en bas et au milieu), ce qui montre qu'après rupture de la matrice cimentaire ou de béton, les fibres prennent le rôle de renfort et continuent à travailler même après rupture du béton, mais avec un intervalle de déplacement très court, donc, les fibres sont superposées l'une sur l'autre et, une fois se rompent les éprouvettes perdent leur ductilité et ne seront plus capables de résister à la force appliquée. [60]

IV.3.2.1.4. Effet de fibres sur évolution de la charge en flexion des sandwiches :

Les quatre figures suivantes servent à étudier le rôle du renfort (les fibres de verre) sur le comportement en flexion des éprouvettes sous forme sandwich à différents dosage de polystyrène, avec et sans renfort. Pour bien éclaircir cette caractérisation, on présente toutes les courbes des différents échantillons dans une seule figure, puis on étudié quelques unes dans des courbes indépendantes.



Figure

IV.24 : Effet des fibres sur l'évolution de la charge en flexion des sandwichs.

Cette figure (IV.24) représente les courbes d'évolution des efforts appliqués par flexion trois points de l'ensemble des stratifiés élaborés. Ces courbes nous permettent de suivre cette évolution par rapport à tous les échantillons sous forme sandwich. On observe, d'après cette figure que, tous les échantillons testés se comportent en flexion de la même façon, ce qui bien apparent dans la figure. Toutes les courbes ont la même allure, sauf les sandwichs non renforcés qui présentent des courbes avec des ruptures brutes, ce qui montre et prouve l'effet des fibres.

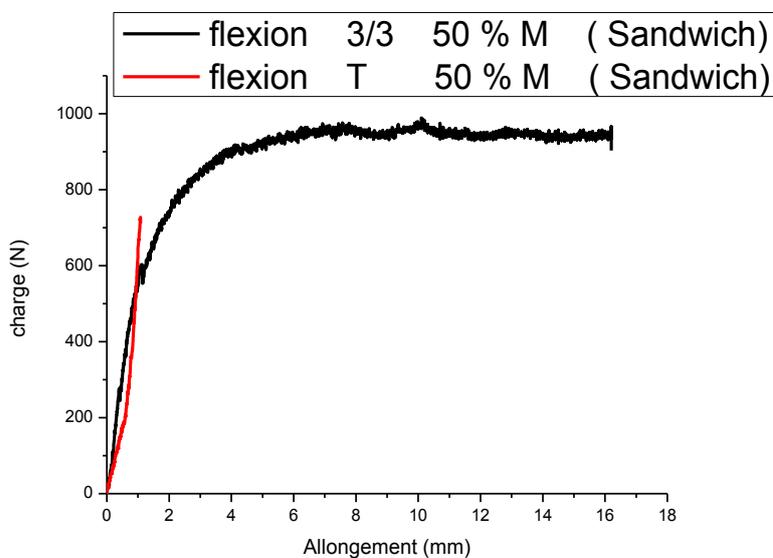


Figure IV.25 : Evolution de la charge en flexion des sandwichs dosés à 50% de billes de polystyrène avec et sans renfort.

Cette figure nous donne un aperçu sur le rôle des fibres et leurs influences sur l'évolution de la résistance à la flexion, on remarque que les éprouvettes sous formes sandwichs sont moins résistantes aux efforts de flexion, à cause de la présence de l'âme en polystyrène, donc, malgré la faible densité des ces échantillons. Cependant, on remarque que le sandwich qui est renforcé par la fibre de verre continue à résister aux efforts de flexion et représente un palier jusqu'à la rupture complète de l'éprouvette. Contrairement aux sandwichs non renforcés, les éprouvettes perdent rapidement leur résistance et se rompent. Ainsi, cette figure illustre clairement le domaine élastique et plastique des deux échantillons. L'éprouvette non renforcée de fibres de verre (témoin) ne présente que le domaine élastique, ce qui prouve la fragilité de ce béton et que, l'éprouvette renforcée de fibres de verre a un comportement ductile en présence des deux domaines élastique et plastique. [68]

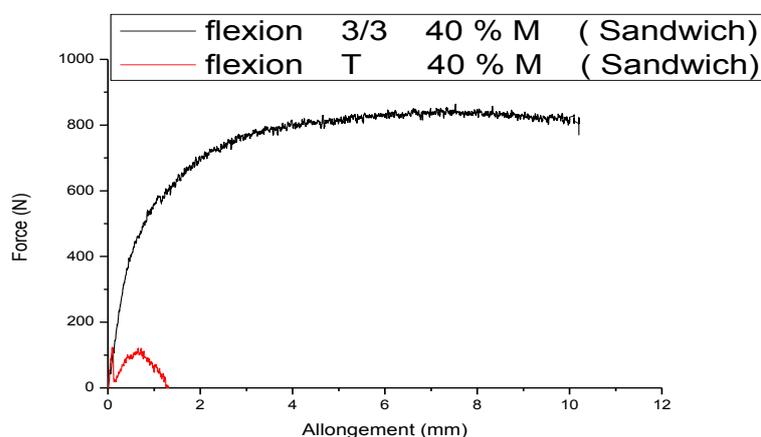


Figure IV.26 : Evolution de la charge en flexion des sandwichs dosés à 60% de billes de polystyrène avec et sans renfort.

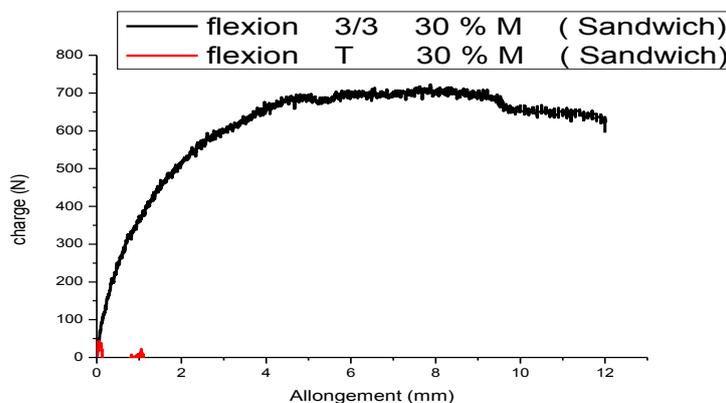


Figure IV.27 : Evolution de la charge en flexion des sandwichs dosés à 70% de billes de polystyrène avec et sans renfort.

Ces deux figures IV.26 et IV.27 nous montrent l'influence de fibres de verre sur résistance à la flexion. Malgré la légèreté de ces deux bétons, ils résistent très bien aux charges appliquées par flexion trois points, lorsque on les renforcés par les fibres de verre, contrairement aux échantillons non renforcés qui ne résistent presque pas.

Donc, on peut conclure que, le béton de polystyrène est de béton très fragile, sa résistance à la flexion est proche de zéro, mais il se comporte comme un matériau ductile, après renforcement par les fibres de verre. [68]

IV.3.2.1.5 Interprétation générale de l'essai de flexion trois points :

On constate d'après toutes les figures qui illustrent l'essai de flexion que, c'est très difficile de tirer des conclusions de ces essais de flexion 3 points pour un type de béton de ce genre, pour raison de présence des fibres, ce qui influe sur leur comportement, telle que la courbe force-déplacement de n'importe quel échantillon montre différents domaines élastiques. On peut voir trois zones, où on constate que la première partie du diagramme est une zone sans dégradation, ce qui traduit la phase élastique, avant l'apparition de la première fissure. La microfissuration reste très discrète dans cette partie, puis une zone présentant un léger infléchissement correspondant au début de la fissuration, c'est la limite au-delà de laquelle les fissures se développent de manière instable. Une troisième phase plastique très apparente, caractérisée par l'augmentation des flèches à charge relativement constante. [66]

IV.3.2.2. Comportement en flexion statique et dynamique des bétons étudiés :

L'objectif de cette étude est de faire une comparaison entre le comportement en flexion statique et dynamique, on s'appuie sur l'évolution du module d'élasticité. Pour bien valoriser cette étude, on divisera les échantillons testés selon la composition et la répartition des fibres.

IV.3.2.2.1. Stratifiés à 50% de dosage en billes de polystyrène :

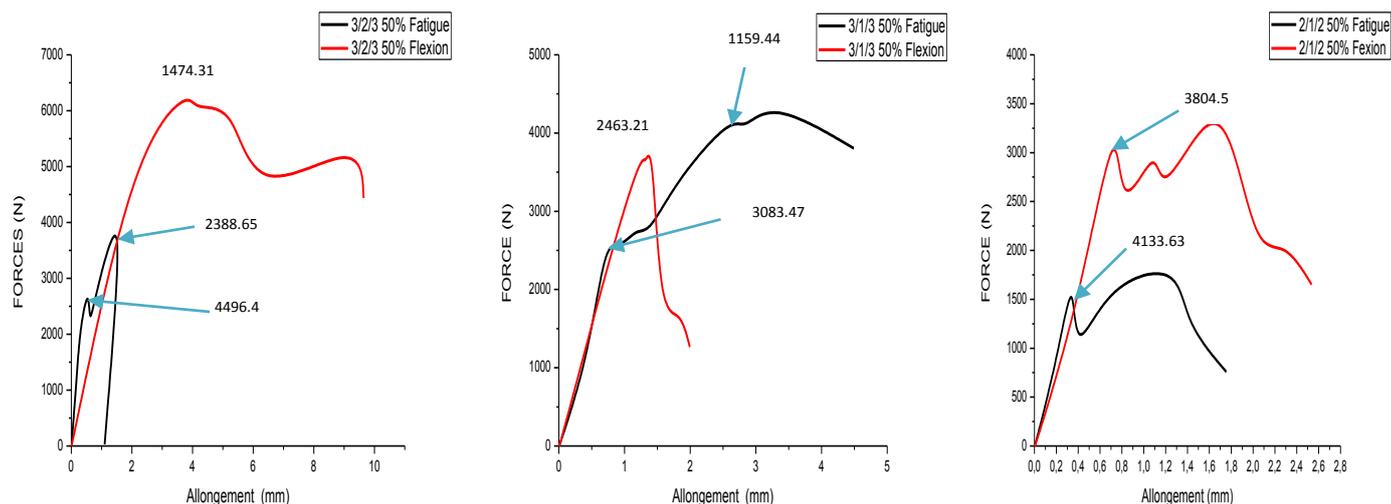


Figure IV.28 : Evolution de la charge en flexion statique et dynamique des stratifiés dosés à 50% de billes de polystyrène et renforcés à triple faces.

Les propriétés mécaniques des bétons de polystyrène sont améliorées par l'ajout de fibres qui réduisent la fragilité de ces matériaux. Les résultats obtenus en flexion statique et dynamique des bétons renforcés de fibres de verre sont illustrés dans la figure IV.28. Il apparaît que les résistances mécaniques en flexion augmentent avec l'augmentation du nombre des fibres. Le développement de la microfissuration s'accompagne d'un affaiblissement du module d'élasticité ainsi que du développement d'une déformation irréversible après déchargement. [63]

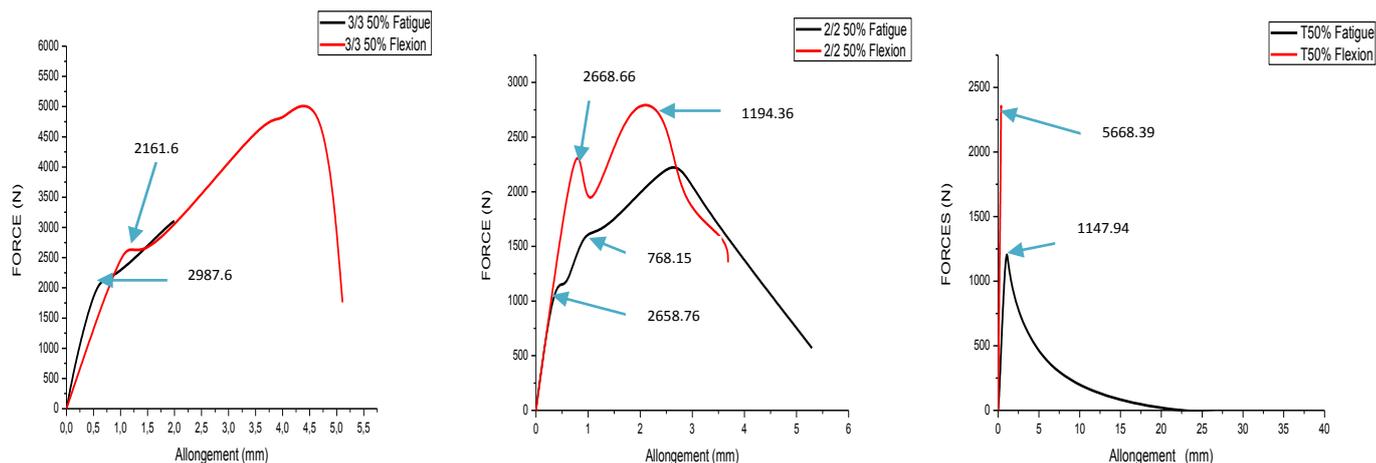


Figure IV.29 : Evolution de la charge en flexion statique et dynamique des stratifiés dosés à 50% de billes de polystyrène témoins et ceux renforcés à double faces.

Cette figure illustre le comportement en flexion d'un essai statique et d'un autre dynamique, des stratifiés renforcés à double faces par la fibre de verre. On observe que les valeurs du module d'élasticité dans les deux sollicitations sont très proches dans la partie linéaire, c'est-à-dire, que le domaine élastique est très significatif. [71]

IV.3.2.2.2. Stratifiés à 60% de dosage en billes de polystyrène :

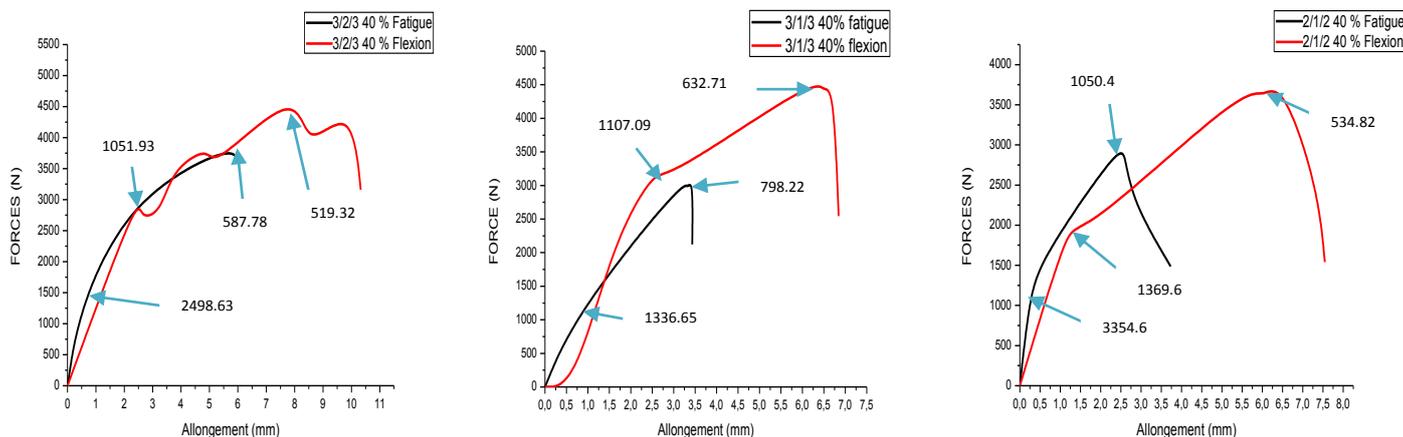


Figure IV.30 : Evolution de la charge en flexion statique et dynamique des stratifiés dosés à 60% de billes de polystyrène et renforcés à triple faces.

D'après cette figure, on réserve les mêmes remarques et observations et on peut ajouter une remarque très importante qui concerne l'allure des deux courbes celle de flexion statique et dynamique qui ont apparu presque identiques.

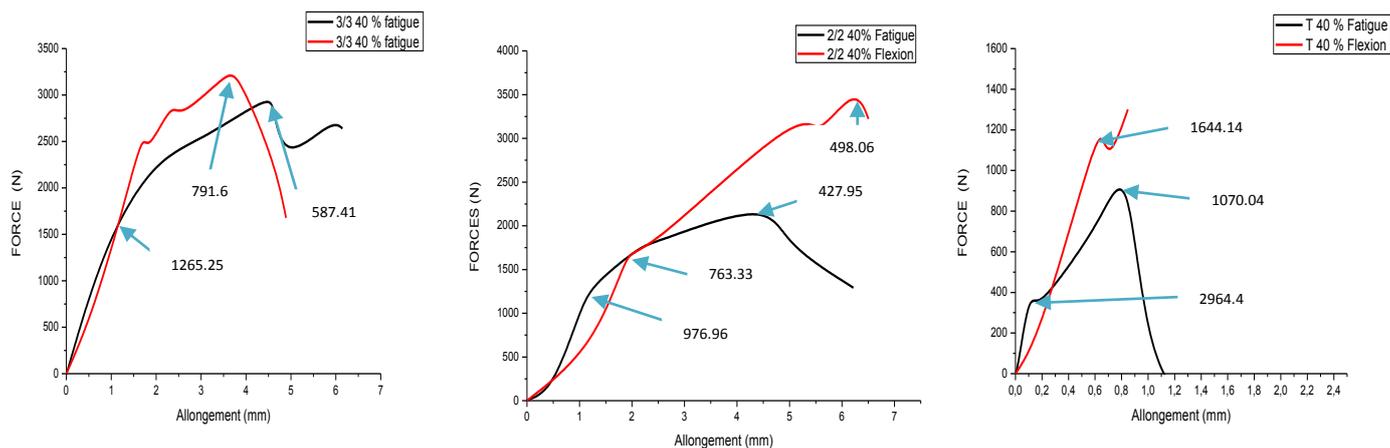


Figure IV.31 : Evolution de la charge en flexion statique et dynamique des stratifiés dosés à 60% de billes de polystyrène témoins et ceux renforcés à double faces.

Les courbes illustrées dans la figure IV.31 montrent que le module d'élasticité statique ou dynamique est diminué après une première rupture et ne s'améliore pas après reprise de résistance. Ainsi on remarque que les échantillons fibrés ont un comportement rigide malgré leur faible module de Young. La figure suivante montre l'essai de flexion trois points et l'essai de fatigue de deux éprouvettes d'un même échantillon, il apparaît que la fissuration la même profondeur façon ce qui explique le rapprochement des comportements des deux éprouvettes.



Figure IV.32 : Eprouvettes ont soumis aux charges de : (a) flexion statique et (b) fatigue.

IV.3.2.2.3. Stratifiés à 70% de dosage en billes de polystyrène :

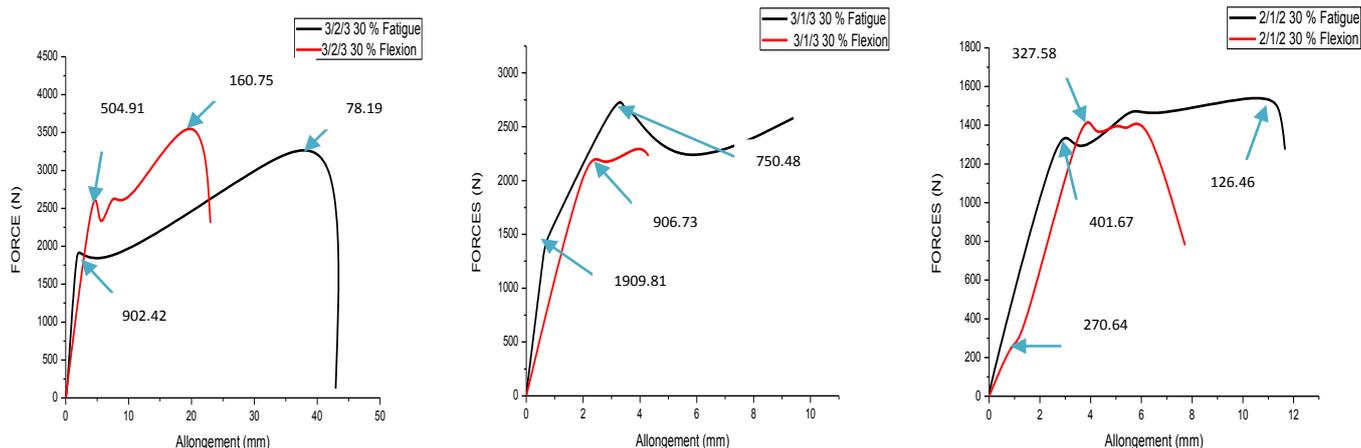


Figure IV.33 : Evolution de la charge en flexion statique et dynamique des stratifiés dosés à 70% de billes de polystyrène et renforcés à triple faces.

Les propriétés mécaniques des bétons de polystyrène sont améliorées par l'ajout de fibres qui réduisent la fragilité de ces matériaux même à faible densité. Il apparaît que les résistances mécaniques en flexion augmentent avec l'augmentation du nombre des fibres et le développement de la microfissuration s'accompagne d'un affaiblissement du module d'élasticité ainsi que du développement d'une déformation irréversible après déchargement. Mais, il reste à signaler que les valeurs des modules d'élasticité obtenues sont faibles par rapport au celles des figures précédentes, à cause du dosage élevé en polystyrène. [62]

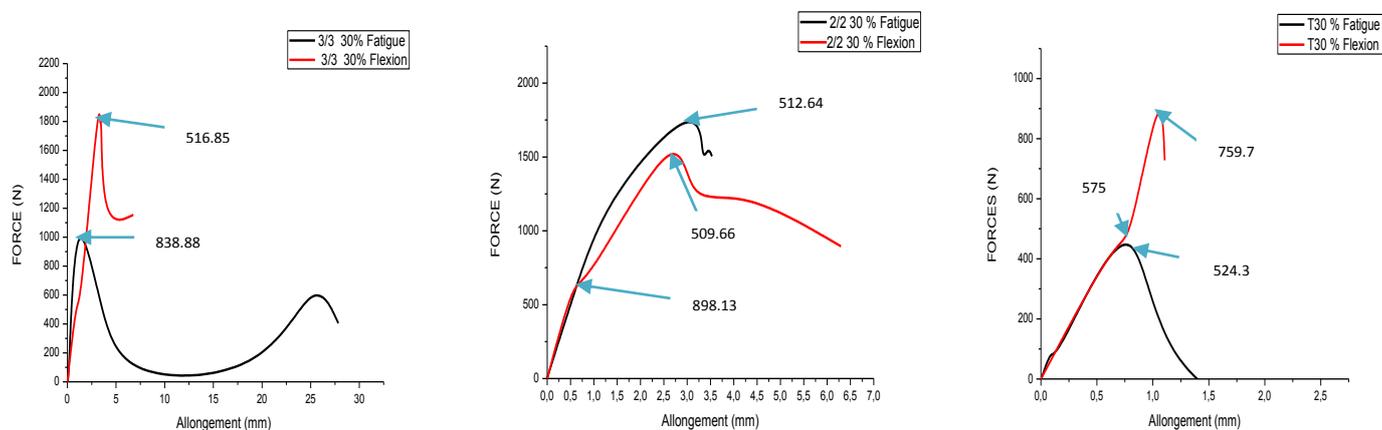


Figure IV.34 : Evolution de la charge en flexion statique et dynamique des stratifiés dosés à 70% de billes de polystyrène témoins et ceux renforcés à double faces.

Les résultats obtenus en flexion statique et dynamique des bétons renforcés de fibres de verre sont illustrés par la figure IV.34. Il apparaît que les résistances mécaniques en

flexion augmentent avec l'augmentation du nombre de fibres. Le développement de la microfissuration s'accompagne d'un affaiblissement du module d'élasticité, le domaine élastique est une partie commune pour les deux types de sollicitations.

IV.3.2.2.4. Sandwiches à 50% de dosage en billes de polystyrène :

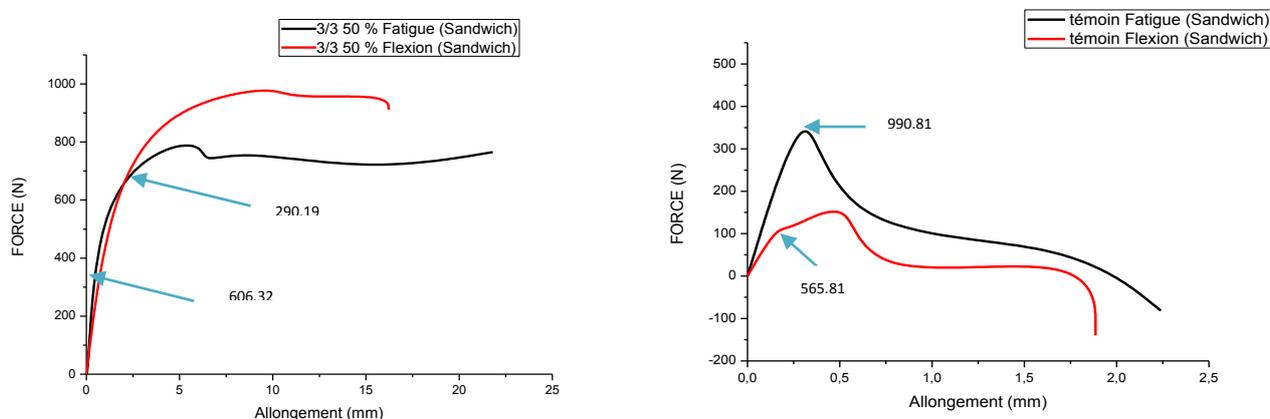


Figure IV.35 : Evolution de la charge en flexion statique et dynamique des sandwichs dosés à 50% de billes de polystyrène et des sandwichs témoins.

Cette figure nous permet de bien voir l'effet des fibres sur le comportement mécanique en flexion statique et dynamique, tels que les résultats obtenus montrent que, même si la densité du béton et le module d'élasticité sont faibles, un renforcement par les fibres améliore leur comportement, mieux qu'un béton dense mais non fibré.

IV.3.2.2.5 Interprétation générale de flexion statique et dynamique :

D'une manière générale, on peut remarquer que ce type de béton étudié dans ce travail est très particulier de point de vue composition et comportement mécanique, tel que un béton de polystyrène est connu par sa légèreté très élevée grâce à la densité très faible de ces granulats (billes de polystyrène), ces derniers ainsi que leurs propriétés plastiques jouent le rôle des maillons faibles, bien que le PSE ne soit pas un matériau solide lui-même, mais son utilisation avec d'autres matières solides est possible, donc le béton peut être utilisé avec le PSE pour créer un système structural composite solide. [69]

D'après les résultats obtenus pour les différents échantillons testés, on constate que malgré que le béton de polystyrène soit très léger et présente un comportement fragile comme les autres types de bétons, mais l'incorporation des fibres fait changer ce comportement, d'où il apparaît ductile en présence du domaine élastique et plastique, donc les fibres jouent le rôle d'un renfort ainsi améliorent le comportement mécanique de ce type de béton, que se soit en

flexion ou en fatigue. Ce qui est très remarquable est le rapprochement du module d'élasticité dans le domaine élastique ce qui prouve l'homogénéité des mélanges,

IV.3.3. La résistance à la fatigue :

Les essais de fatigue sont des essais cycliques. Ils sont caractérisés par une suite de sollicitations alternées. Les plus courants sont ceux de traction-compression. Cependant, on utilise l'essai de fatigue par flexion. L'objectif de ces essais est d'obtenir un comportement à la fatigue du matériau, qui caractérise son évolution, au fur et à mesure des cycles de sollicitations. [62]

Les figures suivantes illustrent l'essai de fatigue de quelques échantillons à différents dosage en billes de polystyrène.

IV.3.3.1. Fatigue du béton dosé à 50% PSE:

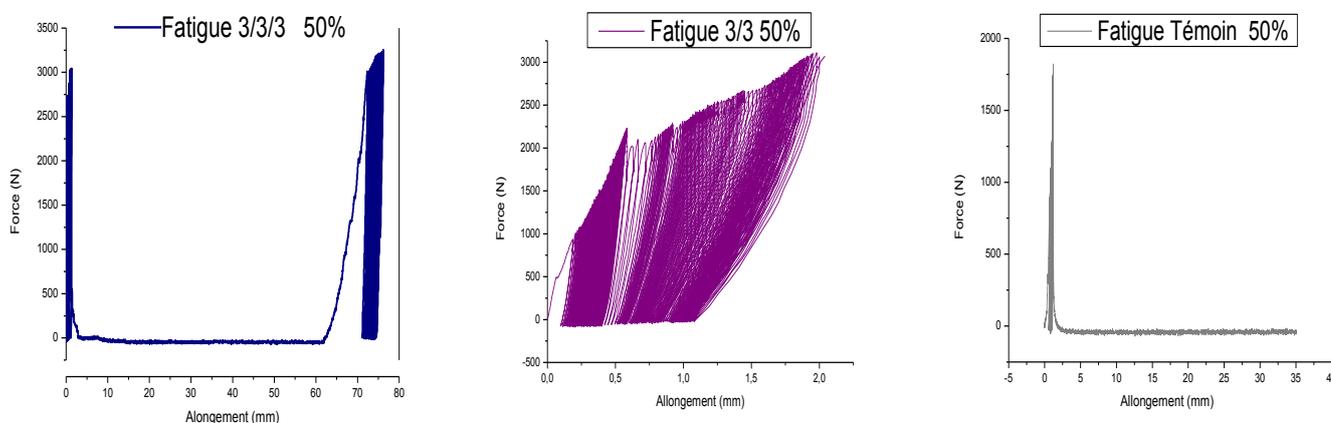


Figure IV.36 : Essais de fatigue des stratifiés dosés à 50% de billes de polystyrène.

Cette figure illustre les essais de fatigue des stratifiés dosés à 50 % de polystyrène. D'après ces trois courbes, on remarque que la résistance à la fatigue de ces échantillons dépend du nombre et de la répartition des fibres, comme on observe clairement que, les stratifiés fortement renforcés de fibres sont plus résistants à la fatigue. On voit que après rupture l'éprouvette perd sa résistance mais elle la reprend, même d'une force meilleure, ce qui est apparait dans la courbe du stratifié de type 3/3/3. Cette observation est valable pour les échantillons de type 3/3 mais avec un intervalle de déplacement court, contrairement aux échantillons non renforcés de fibres la rupture de l'éprouvette a apparu une fois et est définitive. [64]

IV.3.3.2. Fatigue du béton dosé à 60% PSE:

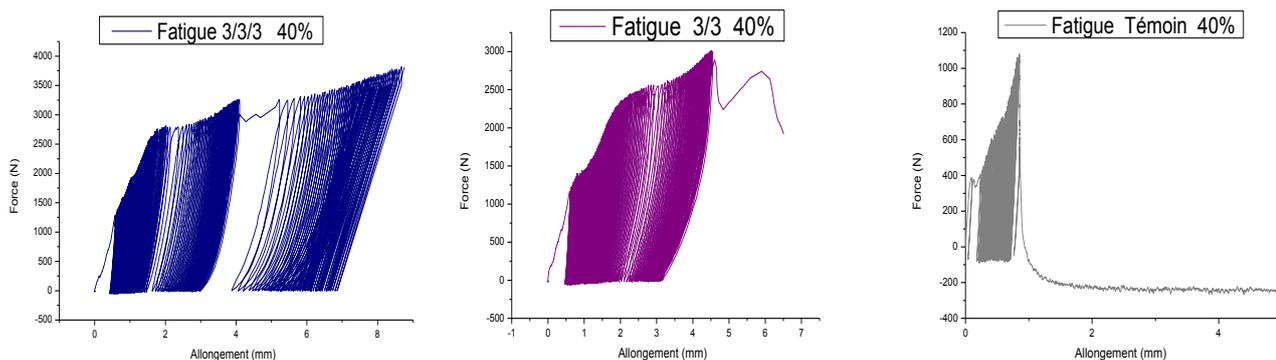


Figure IV.37 : Essais de fatigue des stratifiés dosés à 50% de billes de polystyrène des stratifiés renforcés à triple faces.

Cette figure illustre les essais de fatigue des stratifiés dosés à 60 % de polystyrène. D'après ces trois courbes, on réserve les remarques et observations tirées de la figure précédente. La présence des vides est expliquée par la rupture des fibres de verre ce qui favorise une rupture rapide du béton à cause de sa fragilité. On voit alors une chute brutale des résistances et la présence d'autres nappes de fibres favorisent un redémarrage de la résistance une nouvelle fois. On remarque aussi qu'après un certain nombre de cycles, la fissure profonde d'une façon très remarquable, par fois mener à la détérioration partielle ou totale de l'éprouvette. la figure suivante illustre clairement la prolongation des fissures d'un stratifié renforcé en double faces par trois nappes de fibres de verre.



Figure IV.38 : Fissuration d'une éprouvette soumise aux charges de fatigue.

IV.3.3.3. Fatigue du béton dosé à 70% PSE:

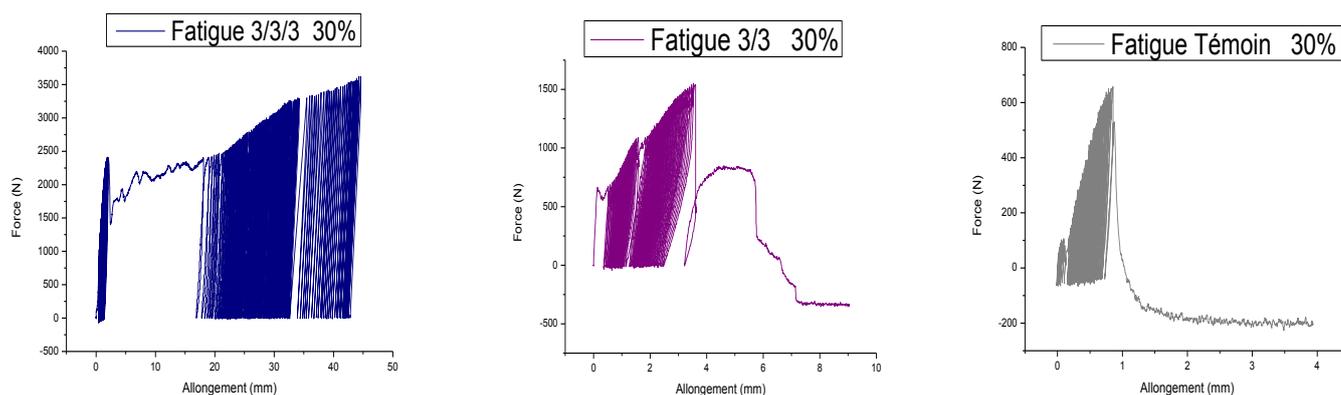


Figure IV.39 : Essais de fatigue des stratifiés dosés à 70% de billes de polystyrène des stratifiés renforcés à triple faces.

Comme les deux figure qui précèdent cette figure caractérise et montre aussi le rôle important des fibres, malgré que ce béton soit très léger alors il ne résiste pas aux sollicitations de fatigue par flexion ce qui apparait bien sur la courbe du béton non renforcé, mais cette propriété est se développe et s'évolue par le renforcement des fibres de verre de plus de 10%.

IV.3.3.4. Fatigue des sandwichs :

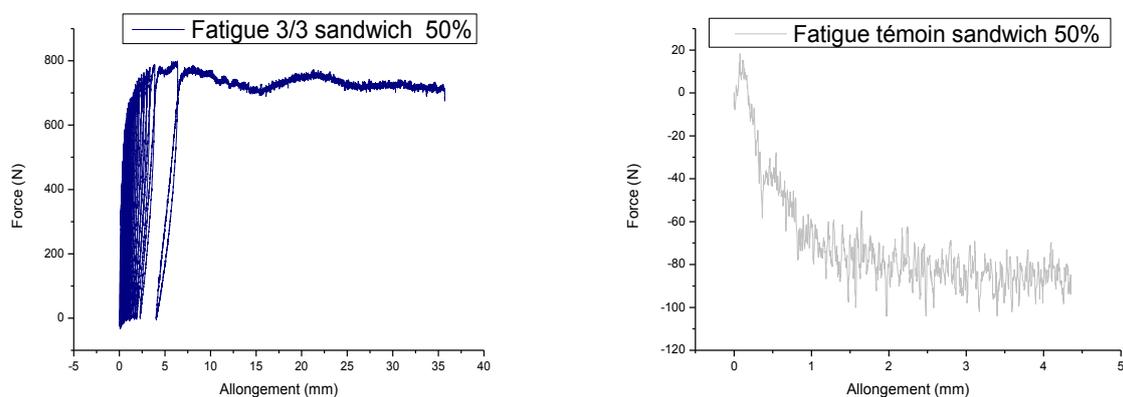


Figure IV.40 : Essais de fatigue des sandwichs avec et sans renfort.

Cette figure est à pour but de faire une comparaison entre le comportement en fatigue des éprouvettes sous forme sandwichs, avec et sans fibres. Pour éclaircir cette caractérisation il suffit de choisir une seule composition. On peut constater que ce type de béton (béton de

polystyrène) est un béton de faible comportement mécanique et, seule l'introduction des fibres permet de modifier ce comportement. La figure suivante montre comment une éprouvette sous forme sandwich se déforme.



Figure IV.41 : Eprouvette sous forme sandwich soumise aux charges de fatigue.

Il apparait, d'après cette figure que la fissuration de sandwichs est différente de celle des stratifiés, à cause de la présence de l'âme dans les éprouvettes sandwichs, ce que fait changer la direction des fissures ou bien casse la fissures, donc, on observe une fissuration au niveau de la première peau de sandwich, puis la fissuration de l'âme après sa rétraction, enfin une fissuration au niveau de la deuxième peau de sandwich, avec un délaminage entre la peau et l'âme.

IV.3.3.5. Fatigue des mortiers de référence :

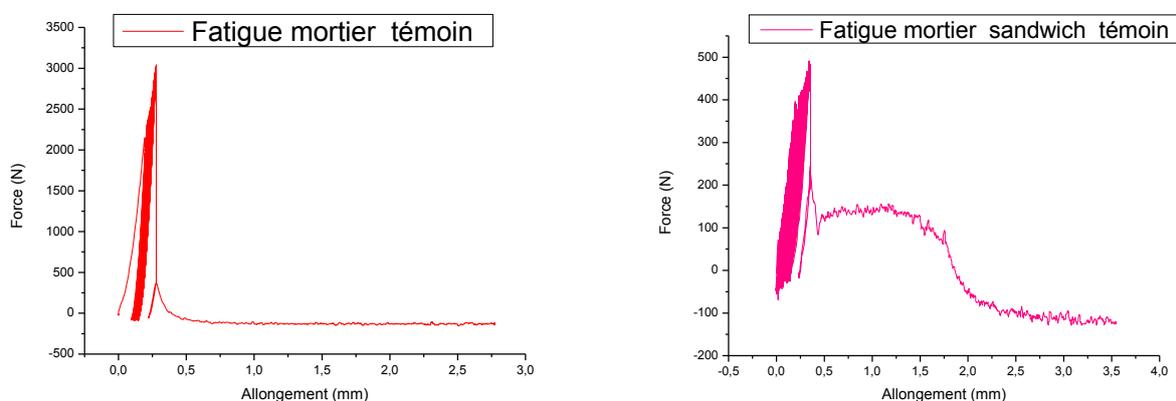


Figure IV.42 : Essais de fatigue du mortier témoin et du mortier sandwich témoin.

Cette figure illustre le comportement en fatigue par flexion des mortiers de référence ; un sous forme stratifiée et l'autre sous forme sandwich. On observe que la densité de mortier témoin est plus de double de celle de béton à faible dosage en polystyrène, élaboré dans cette

étude, mais il se comporte mal en fatigue que se soit le stratifié ou le sandwich. Donc, un béton fibré résiste mieux qu'un béton non fibré malgré que sa faible densité.

La figure suivante illustre l'essai de fatigue des deux éprouvettes de mortier témoin, l'une sous forme stratifiée et l'autre sous forme sandwich. Cette figure montre que l'essai de flexion dynamique ou fatigue par flexion trois points est significatif dans le cas des bétons fibrés. Même si la densité de ces deux échantillons est très élevée par rapport à ceux qui contenant les billes de polystyrène, mais l'absence des fibres réduit leur résistance aux efforts de flexion dynamique et la fissure brutale conduit à la rupture totale de l'éprouvette.



Figure IV.43 : Essai de fatigue des éprouvettes témoins : (a) stratifié témoin et (b) sandwich témoin.

IV. 4. Etude thermique :

Le tableau ci-dessous contient toutes les données de mesure calculées et les résultats des différents mélanges étudiés à l'état sec et humide.

Tableau IV.7 : Températures, valeurs de k et conductivités de différents matériaux utilisés.

Matériaux	E [cm]	Θ_{Li} [°C]	Θ_{wi} [°C]	Θ_{wa} [°C]	Θ_{La} [°C]	P/A [W/m ²]	K [W /m ² C°]	λ [W / m °C]
50% PSE Sec	2	63.1	49.6	31.2	21.5	78.57	1.88	0.468
60% PSE Sec	2.4	62.9	45.3	30.8	20	87.48	2.03	0.42
70% PSE Sec	2.8	62.3	47.7	31.4	21.3	81.81	1.99	0.398
50% PSE Humide	2	62.8	55.2	32.6	20.4	98.82	2.33	0.64
60% PSE Humide	2.4	62.3	54.9	33	21	97.2	2.34	0.54
70% PSE Humide	2.8	61.7	53.8	32.4	20.9	93.15	2.28	0.46

d : Epaisseur en cm

Le tableau IV.7 donne les valeurs de P/A, k et λ calculées à partir des mesurés de températures prises sur l'appareil dénommé « la maison de haute isolation », en appliquant la méthode dite méthode de la maquette thermique, cette méthode très ancienne, demeure toujours crédible.

Les valeurs du coefficient de conductivité λ , trouvées dans la littérature pour un même matériau sont :

- Pour un polystyrène (masse volumique = 15 à 30 kg/m³) = 0.035 à 0.041. W / m °C
- Pour un béton ordinaire $\lambda = 0.92$ W / m °C

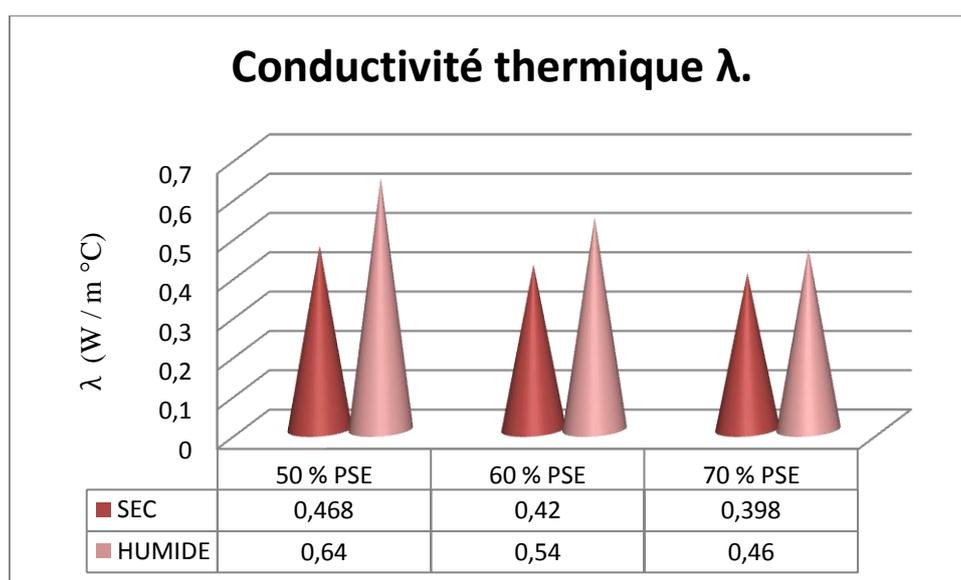


Figure IV.44 : Conductivité thermique des différents mélanges à l'état sec et humide.

L'analyse des courbes de la figure IV.44 permet d'observer une décroissance de la conductivité thermique avec l'augmentation de la teneur en polystyrène PSE, et une augmentation de la conductivité thermique sous l'effet de l'humidité. Ceci s'explique par le fait que les matériaux que nous avons étudiés sont poreux. A l'état sec, la conductivité thermique n'est fonction que de celles de la matrice solide et de l'air, donc, elle est très inférieure à la conductivité thermique de l'eau, qui va remplacer progressivement l'air contenu dans les pores. Au cours de l'humidification, il s'ensuit une augmentation de la conductivité thermique apparente du matériau. Cette dernière sera d'autant plus importante que la teneur en eau est élevée. Ce résultat a été observé sur d'autres matériaux telle que la brique creuse de terre stabilisée au ciment [72], le mortier à base de ciment [73], le béton cellulaire [74] et le béton classique [75].

Conclusion générale

Le développement et la modernisation des procédés et systèmes de construction contribuent à introduire de nouveaux matériaux dans le bâtiment pour but de réduire les coûts, les délais et bien sûr pour améliorer ses propriétés.

Dans ce contexte que s'inscrit notre travail, dont l'objectif principal est d'étudier le comportement mécanique d'un béton très léger renforcé par des fibres, mais avant d'arriver à ces caractérisations, une étude de formulation est ainsi faite pour trouver la composition des bétons élaborés.

A la lumière de toutes les caractérisations et études effectuées, on peut conclure que :

- La formulation du béton léger de ce type est très difficile à calculer ou on peut dire que elle n'existe pas une formulation numérique pour le calcul des composant d'un béton très léger bien que les composants entrant dans cette composition sont particuliers.
- Une formulation empirique est obligatoire pour l'élaboration d'un béton de polystyrène.
- Le béton de polystyrène est un béton léger mais il se comporte différemment des autres bétons de sa classe vis-à-vis de l'eau et de l'humidité.
- Le béton de polystyrène est à base de granulats légers non poreux.

Ces remarques sont réservées pour les mélanges élaborés, alors si on parle du comportement mécanique, un béton de densité comprise entre 500 ou 1000 est considéré très faible envers les sollicitations mécaniques pour cette raison qu'on a réfléchi à renforcer ces mélanges par la fibre de verre et de confectionner des éprouvettes 7*7*28 cm à différents dosages en polystyrène et avec la variation du nombre de nappes et leurs distribution.

Les caractérisations mécaniques ont été effectuées sur des échantillons avec et sans fibres. Ces échantillons sont du type stratifiés et sandwichs. Les éprouvettes ont subi les essais de résistance à la compression, la résistance à la flexion trois points et la résistance à la fatigue.

Les résultats des essais de compression, de flexion et de fatigue montrent que la résistance en compression et principalement la résistance en flexion sont fonction du nombre de nappe et beaucoup plus à la répartition de fibres. Nous avons mis en évidence plusieurs points importants concernant l'influence de l'induction des fibres sur ces mélanges.

- L'introduction des billes de polystyrène fait diminuer considérablement la résistance, ceci a été vérifié avec la masse volumique.

- Le renforcement de ces bétons par la fibre de verre améliore la résistance à la compression, tel que la résistance de ces bétons ne dépasse pas 7 MPa malgré que leurs densités atteignent les 1500, dans notre étude un béton de densité environ 1000 développe des résistances à la compression qui atteignent presque le double soit 13.27 MPa.
- L'introduction des fibres change complètement le comportement mécanique de ce béton en comparaison avec les échantillons non fibrés que se soit des sandwichs ou des stratifiés.

Comme perspectives, du fait des caractéristiques trouvées, plusieurs applications peuvent être envisagées pour ce type de béton.

En effet, ses très bonnes capacités thermiques, son gain de poids permettent de réaliser des chapes, cloisons isolants (tous en allégeant les structures).

De plus, l'imputrescibilité et l'élasticité permet d'absorber les chocs sans les transmettre, d'où un gain acoustique non négligeable.

L'introduction des fibres confère au mortier une meilleure résistance au feu par rapport aux isolants classiques.

Nous recommandons d'étudier l'influence d'autres paramètres sur le comportement mécanique de ce béton comme, l'élanement des fibres, l'orientation de fibres, le rapport E/C, la géométrie des fibres et d'utiliser d'autres types de fibres (d'autres natures)....etc.

Aussi d'autres études comme :

- Etude thermique en utilisant des nouvelles méthodes ;
- Durabilité des composites ;
- Enfin une étude économique.

Références bibliographiques

- [1] **J E. ARBAOUI.** « Etude comparative et caractérisations mécaniques des structures sandwichs multicouches », thèse de doctorat, université de l'université Paul Verlaine – Metz. Soutenue le 22 Octobre 2009
- [2] **B. CASTANIE,** « contribution à l'étude des structures sandwichs dissymétriques », thèse de doctorat soutenue à l'école nationale supérieure des aéronautiques et de l'espace. février 2000 N° d'ordre 295.
- [3] **A.MAROUENE.** « Comportement sous choc des composites sandwichs et influence des paramètres des matériaux et du test », mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, université de Montréal 2010.
- [4] **M.REYNE.** « Technologies des composites ». (3ème édition revue et augmentée). - Paris : HERMES, 1998. - 222 p.
- [5] **NOOR AK., et al.,** « Computational Models for Sandwich Panels and Shells». Appl Mech Rev, vol. 49, pp. 155-199, 1996
- [6] **LACHGUER Abdelkarim, AKYOUN Mohamed ;** « Les matériaux sandwichs et les risques d'instabilités géométriques locales ». Ecole des mines de Douai.2012-2013.
- [7] **Mustapha ASSARAR,** « Etude expérimentale et modélisation du comportement dynamique des composites stratifiés et sandwichs ». Thèse de doctorat, université du MAINE, soutenue le 13 décembre 2007.
- [8] **JEAN. MARIE,** « chapitre 2 : les éléments constitutants d'un matériau composite » 2010.
- [9] **CARMA.** « Glossaire des matériaux composites ». Actualisation octobre 2006.
- [10] **Allen H. G.** «Analysis and design of structural sandwich panels». Pergamon Press, London, U.K. 1961.
- [11] **REYNE M.** « Technologies des composites ». (3ème édition revue et augmentée). - Paris : HERMES, 1998. - 222 p.
- [12] **ABDELLAH MIR.** « Etude mécanique, thermomécanique et hygrothermique d'un matériau composite sandwich à âme en liège et peaux en jute/époxy ». Thèse de doctorat, université M'hamed Bougara- Boumerdès. Soutenue le 20-06-2010.
- [13] **R. BERBAOUI** « Identification et analyse de l'endommagement par fatigue des matériaux granulaires à base polymère », thèse de doctorat université du Maine Soutenue le 21 janvier 2010.
- [14] **M. IDRIS,** «Analyse expérimentale et par éléments finis du comportement statique et vibratoire des matériaux composites sandwichs sains et endommagés », thèse de doctorat soutenue à l'université de Maine le 12/03/2013.
- [15] **Philippe COGNARD, C 961** « Techniques de l'Ingénieur, traité Construction Colles et adhésifs. Applications dans le bâtiment ».
- [16] **leçon 8 : Façade en béton architectonique. Document PDF**

- [17] « **Les Façades** » Momento technique du bâtiment pour le chargé d'opération de construction publique. Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques juillet 2003.
- [18] **Franck CASSAGNABERE**, « produits préfabriqués en béton file : vers l'amélioration des performances du matériau pour mieux gérer le procédé de production. . Thèse de doctorat, université PAUL SABATIER TOULOUSE III. Soutenue le 25 septembre 2007.
- [19] **YASAR, E., ERDOGAN, Y.E.** «Strength and thermal conductivity in lightweight building Materials », Bull. Eng. Geol. Environ., Vol. 67, pp. 513- 519, (2008).
- [20] **SHINK, M.** « Compatibilité, élastique, comportement mécanique et optimisation des bétons de granulats légers » ; thèse de doctorat (Ph. D.), Université Laval Québec (2003).
- [21] **Georges DREUX, Jean FESTA** « Nouveau guide du béton et de ses constituants » 8ème édition Eyrolles Paris 1998.
- [22] **MARC, CONTANT.** Confection de bétons légers pour la fabrication d'éléments architecturaux ; maîtrise en génie de la construction. Université de Québec 2000.
- [23] **F. Niang et al /** « modélisation numérique du comportement mécanique du béton léger de plastiques recyclés » *J. Sci.Vol. 2, N° 1 (2002).*
- [24] : **J. WERMUTH ; UMGO-FFB** « construction en béton cellulaire syndicat national des fabricants de béton cellulaire ». PARIS 2009.
- [25] **KAMMOUN-SALIM** ; « brochure_béton_cellulaire «blocs béton cellulaire – thermopierre » distribué par édition EZ-ZAHIA, 2011.
- [26] **Teymur B., Tuncel E.Y.** « Comparer les propriétés d'EPS et mousse de verre mélangé avec du ciment et du sable » Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013
- [27] **S LALDJI.** Cours-béton ETS ; « Caractéristiques fondamentales du béton », hiver 2012.
- [28] **AHMED GMIRA** ; Etude texturale et thermodynamique d'hydrates modèles du ciment. Thèse de doctorat, université d'ORLÉANS. Soutenue publiquement le 10 Juillet 2003.
- [29] GHOMARI Fouad ; « **Science des matériaux de construction** » université Aboubekr Belkaid, faculté des sciences de l'ingénieur, département de génie civil, 2009.
- [30] **J. MBLOCHLAINE** « Guide pratique de l'isolation thermique des bâtiments ». Edition Eyrolles paris 1977.
- [31] **P. MEUKAM.** « Caractérisation de matériaux locaux en vue de l'isolation thermique de bâtiments ». Thèse de doctorat, université de Yaoundé I. Soutenue le Novembre 2004.
- [32] **DE LARRARD, F.** « Structures granulaires et formulation des bétons », (2000). Volume OA34. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France. Central des Ponts et Chaussées, France.
- [33] **Chafi, N.** « Matrice cimentaire renforcée de fibres » ; mémoire de magistère, Constantine (2005).

- [34] **Miled, K., Sab, K., et Le Roy, R.** « Effet d'échelle dans le béton léger de polystyrène expansé. In Colloque Microstructure et Propriétés des matériaux », ENPC (2005).
- [35] **Marechal, J.C., Devisme, J.M.** « Matériaux de construction » ; Vol. 7, (1974).
- [36] **A. MAKANI.** « Influence de la nature minéralogique des granulats sur le comportement mécanique différé des bétons » Thèse de doctorat, université de TOULOUSE, soutenue Le 11 Juillet 2011.
- [37] **B.SAFI.** « Méthodes d'essais pour béton ».cours et faculté science de l'ingénieur, université de Boumerdes.2012.
- [38] **S.M.A. Boukli Hacene et al** « Etude expérimentale et statistique de l'influence de l'affaissement et de l'air occlus sur la résistance a la compression des bétons ». Laboratoire EOLE, Département de Génie Civil, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université AbouBekr Belkaid, Tlemcen. Libanaise Science Journal, Vol. 10, No. 2, 2009
- [39] **NF EN 480-5, Norme Européenne** « Adjuvants pour Béton, Mortier et Coulis. Méthodes d'essai- partie 5 : détermination de l'absorption capillaire ». Éditions AFNOR, Paris, sept 1996.
- [40] **A. MIR, B. BEZZAZI, et al,** « Caractérisation mécanique d'un panneau sandwich à âme en liège et peaux jute/époxy ». Comptes Rendus des JNC 17 – Poitiers.2010.
- [41] **G. BAUDUIN, J. MOUANDA et M. TAHA.** « Mise au point d'un nouveau béton léger de polystyrène expansé : I- étude des constituants principaux. » Eur. Polym J. Vol. 23, No. 6, pp. 441-445, 1987.
- [42] **Crausse, P.** « Etude fondamentale des transferts couplés de chaleur et d'humidité en milieux poreux non saturé ». Thèse de Doctorat, Toulouse (1983).
- [43] **Fournol, A.** « La chambre thermique de la station expérimentale de Champs-sur-Marne » ; Cahiers du CSTB n° 216, (1955).
- [44] **Tye, R.P.** «Thermal conductivity »; Academic Press London and New York, Vol. 1, (1969).
- [45] **H. PEREIRA.** « Cork Biology, production and uses ». Book 336 pages. Elsevier, Amsterdam 2007.
- [46] **Loukou, K.** « Etude experimental des caractéristiques acoustiques et thermophysiques de bétons de terre stabilisé au ciment » ; thèse de doctorat, Lyon (1994).
- [47] **Zegadi, S.** « Etude théorique et expérimentale des transferts thermiques dans des milieux granulaires », Alger (1997).
- [48] **Min, S., Blumm, J., Lindemann, A.** « A new laser flash system for measurement of the thermophysical properties ». Thermochemica Acta, vol. 46, (2007).
- [49] **BALAYSSAC.J.P, DETRICHE.H, GRANDET.J,** «Intérêt de l'essai d'absorption d'eau pour la caractérisation du béton d'enrobage».Materials and structures, 1993. pp226-230.

- [50] **Source internet** : Bétons de granulats légers artificiels, Techniques de l'Ingénieur, C 2 318. Sciences et Techniques - Granulats : sables, graviers et concassés de carrières, http://www.techniques-ingenieur.fr/dossier/granulats_sables_graviers_et_concasses_de_carrieres/C902_11_1993
Ciments CALCIA - Les bétons légers,
<http://www.interbeton.be/View.aspx?Content=146>.
- [51] **HALL.C et al**: «Water movement in porous building materials». The sorptivity of mortars. Building and environment. 1986, Vol.21, N°2, PP113-118.
- [52] **Blandine, A., B. Essaïd, et G. Bernard**. Comparison of the weathering behavior of a very high strength concrete with that of a standard concrete, Cerâmica, (2008).
- [53] **PRAZAK J. and P.LUND**: 1992, «Capillary suction on AAC. Advances in Autoclaved Aerated Concrete». Edition wittman Balkema. Retterdam, ISBN 9054100869, PP119-129.
- [54] **R.Vijayalakshmi Rao et al** : «Behavior of sandwich composites under flexural and fatigue loading: effect of variation of core density». International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST). Vol. 3 No.10 October 2011.
- [55] **CROSTON.T** Cours-flexion iso 178, «Détermination des propriétés en flexion- NF EN ISO 178 » Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux 2006.
- [56] **M, Neville Adam**. « Propriétés des bétons ».Editions Eyrolles, Paris, 2000 p. 103 - 726
- [57] **KRAWCZAN. P** « Essais mécaniques des plastiques, caractéristiques instantanées ». Article AM3 510 ; Technique de l'ingénieur.2008
- [58] **ERIC Ségarde et al**. « Influence de l'interface fibre/matrice sur le comportement jusqu'à rupture d'un polypropylène renforcé de fibres de verre courtes ». Mécanique et industries, AFM, EDP Sciences 2005.
- [59] **B. Benmokrane, A. El-Ragaby et E. El-Salakawy**. « Comportement à la fatigue de dalles de ponts en béton armé de barres en matériaux composites de PRFV ». Chaire de recherche du CRSNG sur les Matériaux composites de PRF innovateurs pour les infrastructures, Département de génie civil, Faculté de génie, Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Québec) J1K 2R1.2001
- [60] **Demers, C.E**. «Fatigue Strength Degradation of E-glass FRP Composites and Carbon FRP Composites. ». *Journal of Construction and Building Materials*, (12), 311-318. (1998).
- [61] **A. Djebbar, M. Salvia, M. Djelil**, « Etude du comportement mécanique d'un matériau composite à fibres courtes sollicité par flambement »; *Matériaux & Techniques* 97, 189-200 (2009).
- [62] **Mazard J**. « Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure. ». Thèse de doctorat, Université Paris 6, France. 1984.
- [63] **A. Blaga**. « Propriétés et comportement des matières plastiques ». Division des recherches en bâtiment, Conseil national de recherches Canada, Digest de la construction au Canada 157F, Ottawa, 1975.

- [64] **J.P. Gorninski, D.C. Dal Molin, C.S. Kazmierczak**, « Study of the modulus of elasticity of polymer concrete compounds and comparative assessment of polymer concrete and portland cement concret, 2011.
- [65] **MARTIN Jean-Francois** « Influence de la mise en œuvre du béton frais en contact avec des isolants sur les propriétés mécaniques du béton ». Projet de Fin d'Etude Génie Civil 2009.
- [66] **F. Setti, K. Ezziane et al.** «Étude du comportement des poutres en béton renforcé de fibres métalliques sous chargement monotone croissant ». Colloque international «réduction du risque sismique», Chlef les 10 et 11 octobre 2012.
- [67] **Madi. R, Guenfoud. M**, « Analyse du comportement des poutres en béton armé renforcées par matériaux composites » 19ème Congrès Français de Mécanique Marseille, 24-28 août 2009.
- [68] **FORTUNIER. R**, « Comportement Mécanique des Matériaux ». Ecole Nationale Supérieure des Mines.158 cours Fauriel. 42023 Saint-Etienne cedex 2. 2007.
- [69] **D. J, Cook**; « Expanded polystyrene beads as lightweight aggregate for concrete, Precast Concrete » 4:691–3, 1973.
- [70] **B, Chen, Liu, J**; « Properties of light weight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber ». Cement and Concrete Research, 34, 1259 – 1263, 2004.
- [71] **S, Deusan**; « Comportement expérimental de poutres en béton armé sous chargement statique et dynamique ». Mémoire de fin d'études cycle ingénieur de l'université de Cluj-Napoca (Roumanie).LMT-Cachan, 2006.
- [72] **Meukam, P., Noumowe, A., Jannot, Y., Duval, R.** « Caractérisation thermophysique et mécanique de briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiment » ; Materials and Structures. Vol. 36, pp 453-460. August-September (2003).
- [73] **Boukhattem, L., Mir, R., Kourchi, M., Bendou, A.** « Caractérisation thermophysique du mortier a base du ciment et de sable » ; Revue internationale d'héliotechnique énergie-environnement, Vol. 36, pp. 03-12, (2007).
- [74] **Boutin, C.** « Conductivité thermique du béton cellulaire autoclavé : modélisation par méthode autocohérente » ; Matériaux et Constructions, vol.29, pp.609- 61, (1996).
- [75] **Khab, H., Chaker, A.** « Influence des ciments locaux sur les propriétés hygrothermiques des bétons » ; Revue algérienne de physique, Vol. 3, pp. 46- 49, (2009).

Partie annexe

Annexe 01 : Fiches technique des matériaux utilisés :

1. Fiche technique de ciment :



RAPPORT D'ESSAI N° : 1070/13

ORDRE DE SERVICE N° 01095/2013 DU 30/06/2013

CIBA -OGGAZ

CONTROLE DE QUALITE

NE :1075/13

La reproduction du présent rapport d'essai n'est autorisée que sous sa forme intégrale.
Il comporte (08) pages (y compris les annexes).
Le client dispose d'un délai de dix (10) jours, à compter de la date de réception du présent rapport d'essai, pour présenter ses éventuelles réclamations à la Direction Technico-Commerciale

I - ESSAIS REALISES:

1.1 - Essais mécaniques:

- détermination des résistances mécaniques à 2, 7 et 28 jours

1.2 - Essais physiques:

- détermination de la consistance normalisée
- détermination du temps de prise
- détermination de la stabilité
- mesure de la masse volumique absolue du ciment
- détermination de la finesse
- détermination du retrait et gonflement.

1.3 - Essais chimiques:

- détermination de la perte au feu
- détermination du résidu insoluble
- détermination de la teneur en chlorures
- analyse élémentaire par spectrophotométrie de fluorescence X
- dosage de la chaux libre

1.4 - Essai minéralogique

2. MODALITE DES ESSAIS:**Essais mécaniques:**

La détermination des résistances mécaniques à 2, 7 et 28 jours est réalisée sur ciment selon les modalités de la norme EN 196-1.

Essais physiques:

Les déterminations de la consistance normalisée, du temps de prise sur pâte ciment et de la stabilité sur ciment sont réalisées suivant les modalités de la norme EN 196-3.

Les déterminations de la finesse par perméabilité de l'air et la masse volumique absolue du ciment sont réalisées suivant les modalités de la norme EN 196-6.

La détermination du retrait et du gonflement sur ciment est réalisée suivant les modalités de la norme NF P15-433.

Essais chimiques:

Les déterminations de la perte au feu, du résidu insoluble sont réalisées sur ciment selon les modalités de la norme EN 196-2.

La détermination de la teneur en chlorure sur ciment selon les modalités de la norme EN 196-2

L'analyse élémentaire ciment par spectrométrie de fluorescence X est réalisée selon les modalités de la norme NF P15-467

Le dosage de la chaux libre est réalisé suivant les modalités de la méthode PT207 CERILH 1970

Essai minéralogique

La détermination des constituants du clinker est réalisée sur ciment selon les modalités de la norme ENV 196-4

3- RESULTATS DES ESSAIS:**3-1- Résultats des essais physiques:**

Date d'exécution des essais : 01.07.13

		Résultats
Consistance normalisée (%)	H ₂ O	27.0
Temps de prise (mn)	Début	160
	Fin	235
Stabilité (mm)	Froid	-
	Chaud	0.0
Essai de retrait (µm/m)	03 jours	166
	07 jours	413
	28 jours	763
Essai de gonflement (µm/m)	03 jours	0
	07 jours	0
	28 jours	0
Masse volumique absolue du ciment (g/cm ³)		2.95
Finesse suivant la méthode Blaine (cm ² /g)		4417

3.2- Résultats des essais mécaniques :

Masse Totale au démoulage des 06 Eprouvettes (g)		3477.1
Echéances en jours	Flexion (N/mm²)	Compression (N/mm²)
02 jours	3.8	17.2
07 Jours	5.8	31.2
28 Jours	7.3	41.3

3.3 - Résultats des essais chimiques:

Date d'exécution des essais: 10.07.13

Composition Chimique	Teneur %
SiO ₂	13.97
Al ₂ O ₃	3.29
Fe ₂ O ₃	2.40
CaO	61.56
MgO	1.22
K ₂ O	0.51
Na ₂ O	0.02
SO ₃	2.31
CaO libre	0.923
Cl ⁻	0.023
Ins.	0.92
P.F	14.460

3.4 - Résultats des essais minéralogiques :

Date d'exécution des essais: 11.07.13

Phase	Constituants minéraux du Clinker	Teneur rapportée au Clinker (%)
Clinker	C ₃ S	59
	C ₂ S	16
	C ₃ A	06
	C ₄ AF	12
	CaO.L	01
Régulateur de prise	Gypse	06
AJOUTS	Calcaire (L)	30

Commentaire :

Le ciment portant le code CM 13 04031 et analysé par nos soins est un ciment portland composé, dont les caractéristiques physico mécaniques et chimiques satisfont aux exigences des ciments CPJ CEM II/B 42.5 selon norme en vigueur.

Fait à Boumerdes le 04. AOÛT. 2013

**Le Sous Directeur Labo.
Liants et Bétons**


Ahmed RELAL

**Le Directeur
des Laboratoires**

Belaid SERKHAN



2. Fiche technique de polystyrène :



**FICHE TECHNIQUE DESCRIPTIVE
DU POLYSTYRENE EXPANSE**

I. Procédé de fabrication :

- Le polystyrène expansé est produit par polymérisation du produit de base :
- Le styrène (granulé translucide) avec l'incorporation d'un agent gonflant.
- Le polystyrène expansé obtenu par moulage.

<i>Expansé moulé</i>	<i>Type</i>	<i>Masse volumique (kg/m³)</i>	<i>Conductivité Thermique (W/mC)</i>
	Classe I	09-13	0.044
	Classe II	13-16	0.042
	Classe III	16-20	0.039
	Classe IV	20-25	0.039
	Classe V	25-30	0.037

II. Détermination de la densité :

- Les échantillons ont été laissés se stabiliser pendant trois jours à l'air libre
- La densité a été déterminée conformément à la norme **NF EN 15037-4** et **NF EN 15037-2**

DENSITE 15 :

<i>Echantillon N°</i>	01	02	03	04
<i>Désignation</i>				
Poids (g)	40.25	38.8	37.3	37.9
Volume (Cm ³)	25 x 25 x 4			
Masse Vol	16.1	15.52	14.92	15.16

DENSITE 20 :

<i>Echantillon N°</i>	01	02	03	04
<i>Désignation</i>				
Poids (g)	51.25	54	49.8	49.95
Volume (Cm ³)	25 x 25 x 4			
Masse Vol	20.5	21.6	19.92	19.98

DENSITE 25 :

<i>Echantillon N°</i>	01	02	03	04
<i>Désignation</i>				
Poids (g)	61.7	66.6	58.3	62.3
Volume (Cm ³)	25 x 25 x 4			
Masse Vol	24.68	26.64	23.32	24.92

DENSITE 30 :

<i>Echantillon N°</i>	01	02	03	04
<i>Désignation</i>				
Poids (g)	80.5	77.5	73.3	78.6
Volume (Cm ³)	25 x 25 x 4			
Masse Vol	32.2	30.6	29.32	30.64

III. Tenue à la chaleur :

- Le polystyrène expansé se ramollit à une température de 90 C.

IV. Essai d'émersion totale dans l'eau :

- Emersion pendant 48 heures après 24 heures de la fabrication du polystyrène expansé.

<i>Désignation</i>	<i>Densité</i>	D 30	D28	D27	D25
Poids Initial l'éprouvette		72.9	67.4	77.3	60.8
Poids éprouvette imbibée d'eau		152.4	94.1	100	77.5
tt d'eau absorbée		79.5	26.7	22.7	16.7
tt d'eau absorbée par 100 cm ³		3.18	01.07	00.908	00.688

V. Conclusion :

- La maîtrise du procédé de fabrication, ainsi que l'équipement ont permis l'obtention du polystyrène de bonne qualité

Cachet et signature



3. Fiche technique des fibres de verre :



RETE PER CAPPOTTO IN FIBRA DI VETRO				
Codice	Peso specifico	Colore	Lunghezza / Larghezza	Confusione
NAF1400BB	152 gr/m ²	Blu	mt. 50x1 mt.	1.500 m ²

IMPIEGO:
per isolamenti "a cappotto" ed armatura di intonaci.





Scheda Tecnica

art. NAF14004B

Rete in fibra di vetro 152 g/m²



Scheda tecnica elaborata da "Sint Soluzioni Integrate S.r.l." di Osimo e verificate con laboratori e test specifici, in collaborazione con l'I.N.F.M. (Istituto Nazionale per la Fisica della Materia) di Genova.

Descrizione:	Rete tessuta al 100% in fibra di vetro	
Larghezza maglia:	5,0 x 4,0 mm	
Appretto:	Antialcalino	
Impiego:	Armatura per rivestimenti a cappotto	
N. Fili:	In senso longitudinale minimo a dm 50 In senso trasversale minimo a dm 20	
Spessore rete:	0,47 mm	
Peso nominale:	Rete greggia	g/m ² 117 ±3%
	Rete apprettata	g/m ² 152 ±3%
Resistenza a trazione:	Carico rottura longitudinale	circa 2.000 N / 5 cm.
	Carico rottura trasversale	circa 1.900 N / 5 cm.
Confezione standard:	Rotoli con larghezza rete 1.000 mm Rotoli lunghezza 50 m Rotoli per pallet 30	
Colore:	Blu (NAF14004B)	
Stoccaggio:	I rotoli devono essere immagazzinati ad una temperatura da -10°C a +50°C	

L'aspetto qualitativo di questo prodotto è conforme alle direttive stipulate nel Q/NSQ01-1999 e standard internazionali DIN EN ISO 13934-1

AKIFIX S.p.A. - Viale Caduti sul Lavoro, 9/11/13 - 60030 Monsano (AN) - Italia
Tel. +39 0731 619025 - Fax +39 0731 619280
www.akifix.com - commerciale@akifix.com

4. Fiche technique de l'adjuvant :

NOTICE TECHNIQUE

2 1 5 2

MEDACCEL T85

Conforme à la norme EN 934-2: TAB 1 et tab 6. NA 1943

Accélérateur de prise pour béton**DESCRIPTION**

Le **MEDACCEL T85** est un accélérateur de prise sous forme liquide, très efficace, sans chlore, qui permet d'obtenir des décoffrages en temps réduit.

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétonnage par temps froid
- Décoffrage rapide
- Scellement, colmatage des voies d'eau
- Travaux en galerie
- Travaux en zone de marnage
- Préfabrication

PROPRIÉTÉS

Le **MEDACCEL T85** agit sur le béton en activant la chaleur d'hydratation du ciment, améliorant ainsi le temps de début de prise.

Il permet de réduire le temps de décoffrage et d'accélérer la rotation des moules. Par ailleurs il réduit les pressions sur les coffrages.

	Début de prise	Fin de prise
Témoin	3h40	4h48
Medaccel T85 0,75 %	2h30	3h50

Temps de prise de ciment adjuvanté (CPJ CEMII/A 42,5. T20°C)

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect liquide
- Densité 1,00 ± 0,01
- pH 9,5 - 10,5
- Teneur en chlore <0,1g/l

MODE D'EMPLOI

Diluer le **MEDACCEL T85** dans la 2^{ème} partie de l'eau de gâchage et bien mélanger pendant une minute.

Tenir compte de la quantité de MEDACCEL T85 dans la détermination de la quantité d'eau de gâchage.

Le **MEDACCEL T85** peut être utilisé en association avec les plastifiants et super plastifiants : **MEDAPLAST SP, MEDAFLUID SF, MEDAPLAST SP 40**.

Température d'emploi : de 5°C à 30 °C

DOSAGE

Le dosage du **MEDACCEL T85** varie entre 0,4% et 0,75% par rapport au poids du ciment, soit 0,4 litre à 0,75 litre

Des essais préalables sont recommandés pour déterminer le dosage optimal.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Bidons de 10 kg et fûts de 225 kg,.

Durée de conservation :

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur.

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex-dz.com

PV d'essais conforme aux normes, établi par le **CNERIB** en Mai 2007

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.

42

**Granitex**

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com



Annexe 02 : Granulats de polystyrène :



A02-1 : enrobage des billes de polystyrène.



A02-2 : billes de PSE enrobée.



A02-3 : Confection des éprouvettes avec des billes de polystyrène enrobée et non enrobée.

(a) : Les mélanges, (b) les éprouvettes durcies.

Annexe 03 : Autres figures des résultats (fatigue) pour des échantillons testés :

