



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE ou INSTITUT : GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE
DEPARTEMENT : GENIE CIVIL

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : BENALIA Saad et BOUCHAKOUR Houda

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNIQUES

FILIERE : GENIE CIVIL

OPTION : MATERIAUX EN GENIE CIVIL.

Thème

**Impact de l'incorporation des fibres
métalliques recyclées sur les
caractéristiques physico-mécaniques
d'un béton léger**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Bendjillali Khadra	MCA	Présidente
Belmechri Oum Habiba	MAA	Examinatrice
Ziregue Ahmed	MCB	Rapporteur

Promotion : Octobre - 2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الإهداء

الحمد لله الذي أنار لي طريقي وكان لي خير عون , إلى
أعلى ما أملك في هذه الدنيا , إلى من كان سببا لوجودي على
هذه الأرض , إلى من وضعت الجنة تحت أقدامها , إلى التي
أنحني لها بكل إجلال وتقدير , إلى التي أرجو قد أكون نلت
رضاها أُمِّي الغالية " أم هاني " أطال الله في عمرها .

إلى من أدين له بحياتي إلى من ساندني وكان شمعة تحترق
لتضيء طريقي , إلى من أكن له مشاعر التقدير والاحترام
والعرفان أبي " علي " . إلى كل أفراد عائلتي وأخص بالذكر
إخوتي : عطاء الله وزوجته وأولاده , مصطفى , محمد
الصغير وزوجته وأختي خيرة وأبنائها وزوجها وإلى كل
أصدقائي بدون استثناء , وإلى كل الأساتذة الذين قدموا يد
المساعدة , إلى كل هؤلاء أهدي هذا العمل المتواضع وأسأل
الله عز وجل أن يوفقنا لما فيه الخير لنا ولوطننا إنه نعم
المولى ونعم النصير .

سعد

الإهداء

الحمد لله رب العالمين والصلاة والسلام على خاتم الأنبياء
 والمرسلين.

أما بعد

أهدي ثمرة هذا العمل المتواضع إلى الوالدين الكريمين اللذين
لم يبخلا علي بدعائهما الجميل لي فلولاً دعائهما و مساعدتهما
لما وصلت إلى هذه المرحلة. إلى كل عائلتي الصغيرة و
الكبيرة إلى كل الصديقات والأصدقاء إلى من كانوا عوناً
وسبباً في ولوج باب العلم والمعرفة في كل الاطوار جزاهم
الله كل خير. إلى زميلي الذي تقاسمت معه متاعب هذا العمل
بن عليّة. إلى جميع خريجي دفعة 2020.

و نسأل الله أن يجعل هذا العمل نبراساً لكل طالب علم.

هدى



شكر وعرفان

الحمد لله السميع العليم ذي العزة والفضل العظيم والصلاة والسلام على المصطفى الهادي الكريم وعلى آله وصحبه أجمعين. وبعد مصداقا لقوله تعالى "ولئن شكرتم لأزيدنكم". نشكر الله العلي القدير الذي أنار لنا درب العلم والمعرفة وأعاننا على إتمام هذا العمل.

كما نتقدم بالشكر والإمتنان للدكتور "زيرق أحمد" لقبوله الإشراف على هذه الدراسة والذي لم يدخر وسعا في تقديم النصيحة والتوجيه لنا طيلة إجراء هذه الدراسة من خلال ارشاداته القيمة وتوجيهاته في كل خطوات البحث.

كما نتقدم بالشكر والإمتنان إلى الأستاذة رئيسة لجنة المناقشة "بن جيلالي خضرة" والأستاذة الممتحنة "بلمشري أم حبيبة" الذين تفضلوا بقبول مناقشة هذه الدراسة وبذل الوقت والجهد في التدقيق وإثراء هذا البحث شكلا ومضمون. كما نتقدم بالشكر والإمتنان إلي أساتذتنا الأفاضل بكلية الهندسة المدنية الذين ساهموا بتوجيهاتهم ونصائحهم ونتقدم بالشكر الى كل من مد لنا بيد العون من قريب او بعيد وساعدنا على انجاز هذا العمل.

RESUME

Le besoin urgent de trouver des sources de matériaux, ainsi que les exigences de préservation de l'environnement, dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire d'étudier toutes les possibilités de réutilisation et de valorisation des déchets et sous-produits industriels notamment dans le domaine de génie civil. Ce travail a pour objectif d'étudier la possibilité de valoriser les déchets des câbles électriques en vue de les utiliser sous forme de fibres pour le renforcement des bétons de granulats légers destinés à la fabrication d'éléments pré-fabriqués de plaquage. La méthodologie utilisée pour l'élaboration de ce travail consiste en premier lieu à optimiser la matrice cimentaire à base de sable calcaire et alluvionnaire ; ensuite, l'incorporation des granulats légers de liège à des proportions différentes, en dernier lieu l'introduction des fibres de cuivre à des proportions variables et de longueurs différentes afin de voir l'influence de ces fibres sur les caractéristiques physico-mécaniques en particulier le retrait et la résistance à la traction.

Et vue des circonstances actuelles du COVID-19 et la non possibilité de notre accès au laboratoire, notre travail n'est pas achevé complètement.

MOTS-CLETS: valorisation, déchets, liège, bétons légers, matrice cimentaire, sable, fibre de cuivre.

TABLE DES MATIERES

Table des matières

Dédicaces.....	I
Remerciements	III
Résumé	IV
Listes illustratives	X
Nomenclatures	XVII
INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I : Etude bibliographique	
I -1-Généralité sur les bétons légers	4
I-1-1-Définition du béton léger	4
I-1-2-Type des bétons légers	5
1-Le béton cellulaire.....	6
2-Le béton caverneux	7
3-Les bétons de granulats légers	8
I-1-3-Classification des bétons légers	9
I-1-4-Les avantages des bétons légers	11
1-Avantages techniques.....	11
2-Avantages de Mises En Œuvre.....	11
3-Avantages Economiques	11
I-1-5-Désavantages du béton léger.....	12
I-1-6-Différence entre bétons classiques et bétons légers	12
I-1-7- Les grandes familles de béton léger.....	13
1-Le béton léger structural.....	13
2-Le béton léger architectural.....	13
I-1-8-Propriétés des bétons légers	13
I-1-9-Domaine d'utilisation des bétons légers	14
I-1-10-Les bétons de granulats légers.....	15
I-1-11-Les granulats légers	15
I-1-12-Types de granulats légers	15
1-Granulats naturels	15
2-Granulats artificiels	16
I-1-13-Classification des granulats légers	19
I-1-14-Propriétés physico mécaniques et thermiques des granulats légers	20
I-2- Etat d'art sur le liège	27
I-2-1- Généralité sur le liège	27
I-2-2-Chêne liège (Quercus suber L) en Algérie	28
I-2-3-Anatomie du liège	29
I-2-4-Classification	30
I-2-5-Caractéristiques techniques du liège	31
I-2-6-Constitution du liège.....	31
I-2-7-Qualités du liège.....	32
I-2-8-Comparaison entre le liège et le bois.....	32

I-2-9-Production du liège.....	33
I-2-10-Utilité du liège.....	36
1-Bouchons en liège naturel	36
2-Isolation du liège	36
I-2-11-Autres applications	37
I-2-12-Tendances futures.....	38
I-3-Béton léger à base de granulats de liège	39
I-4- Les bétons de fibres	44
I-4-1-Définition des bétons fibrés.....	44
I-4-2-Définition des fibres	44
I-4-3-Choix du type de fibres	44
I-4-4-Différents types de fibres	46
I-4-5-Différentes nature de fibres	47
1-Fibres naturelle	47
2-Fibres minérales	47
3-Fibres organique.....	50
4-Fibres Métallique.....	51
I-4-6-Quelques exemples de trois grandes familles de fibres	52
I-4-7-Les atouts des fibres.....	53
I-4-8-Propriétés des fibres	53
1-La notion de fibres structurales	53
2-Le facteur d'élancement	54
3-La performance	54
4-La valeur de résistance résiduelle	54
5-La distribution des contraintes mécaniques	55
6-La résistance à l'abrasion	55
7--Les propriétés spécifiques à chaque type de fibres	55
I-4-9- Rôle des fibres dans le béton.....	56
1- Amélioration des caractéristiques mécaniques	56
2-Contrôle de la fissuration de retrait	57
I-4-10-Différents facteurs intervenant dans le comportement mécanique du BFM	57
1-Effet des types de fibres sur les résistances mécaniques.....	57
2-Influence du pourcentage des fibres	58
3-Influence de la longueur de fibres	59
4-Effet de l'orientation des fibres sur le comportement mécanique du BFM.....	59
5-Influence de la taille et la rugosité des granulats	60
6-Influence de l'adhérence fibres matrice.....	60
I-4-11-Formulation du béton de fibres	61
I-4-12-Mise en œuvre du béton de fibres	62
I-4-13-Composition du béton de fibres	62
I-4-14-Appareils recommandés pour l'étude de la mise en œuvre du béton de fibres	62
I-4-15-Fabrication du béton de fibres	63
I-4-16-Mécanismes de fonctionnement des fibres dans le béton	64

I-4-17-Durabilité des bétons de fibres	66
I-4-18-Avantages du béton fibré.....	68
I-4-19-Domaines d'utilisation du béton de fibre.....	69
1-5-Conclusion	71

Chapitre II : Matériaux et méthodes expérimentales

II-1- Introduction.....	73
II-2 -Matériaux.....	73
II-2-1- Sable.....	75
II-2-2-Le ciment	80
II-2-3-Le liège	83
II-2-4-L'eau	86
II-3-Essais mécaniques	87

Chapitre III : Résultats expérimentaux et interprétation

III-1-Introduction	89
III-2-Matériaux utilisés	89
III-2-1-Caractéristiques des matériaux premières	89
1-Le sable	88
2 -Le ciment.....	96
3 -Les granulats de liège	98
4 -L'eau	104
III-3- Formulation des bétons témoin	105
Conclusion Générale	108

LISTES ILLUSRTATIVES

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : Etude bibliographique

Tableau I-1 : Les propriétés comparées des bétons cellulaires	7
Tableau I-2 : Caractéristiques de béton léger caverneux	8
Tableau I-3 : Caractéristiques des bétons de granulats léger.....	9
Tableau I-4 : Classification des Bétons légers en fonction de la densité	9
Tableau I-5 : Classification des Bétons légers En Fonction de la densité	9
Tableau I-6 : Caractéristiques des granulats légers	23
Tableau I-7 : Module d'élasticité de quelques types de bétons légers	26
Tableau I-8 : Comparaison de la composition chimique du liège et de bois	33
Tableau I-9 : Propriétés d'isolation en liège aggloméré	37
Tableau I-10 : Caractéristiques mécaniques des fibres d'amiante.....	48
Tableau I-11 : Caractéristiques mécaniques des fibres de verre.	49
Tableau I-12 : Propriétés mécaniques des fibres de carbone.	50
Tableau I-13 : Propriétés mécaniques des fibres de polymère.....	51
Tableau I-14 : Les caractéristiques et les propriétés des fibres.....	53
Tableau I-15 : Facteur d'élancement.	54
Tableau I-16 : Domaines d'application privilégiés par type de fibres.	69
Tableau I-17 : Intérêt apporté par domaines d'application	70

Chapitre II : Matériaux et méthodes expérimentales

Tableau II-1 : caractéristiques chimiques du ciment.....	82
Tableau II-2 : Composition minéralogique du ciment.....	83

Chapitre III : Résultats expérimentaux et discussion

Tableau III-1 : Caractéristiques physiques des sables	89
Tableau III-2 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable calcaire 100%	90
Tableau III-3 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable alluvionnaire 100%	90

Tableau III-4 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable alluvionnaire 50%et50% sable calcaire	91
Tableau III-5 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable alluvionnaire 75%et25% sable calcaire	91
Tableau III-6 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable alluvionnaire 25%et75% sable calcaire	92
Tableau III-7 : les résultats coefficients d'uniformité cu et coefficients courbure Cc	96
Tableau III-8 : les résultats module de finesse	96
Tableau III-9 : Caractéristiques physiques du ciment	97
Tableau III-10 : Composition chimique du ciment CPJ45 de Sour El Gozlane	97
Tableau III-11 : Analyse minéralogique du ciment	98
Tableau III-12 : Résultats de l'analyse granulométrique des granulats de liège expansé 0/3	98
Tableau III-13 : Résultats de l'analyse granulométrique des granulats de liège naturel 0/3	99
Tableau III-14 : Caractéristiques physiques des lièges	101
Tableau III-15 : Essai d'absorption et désorption des granulats de Liège expansée 0/3 et liège naturel 0/3.	102
Tableau III-16 : Absorption d'eau des granulats de Liège expansé 0/3 et liège naturel 0/3.	102
Tableau III-17 : Désorption d'eau des granulats de liège expansé 0/3 et liège naturel 0/3.	102
Tableau III-18 : L'analyse chimique de l'eau de gâchage	104
Tableau III-19 : Compositions des différences constituantes des mortiers préparés	105
Tableau III -20 : Dosage de béton témoin	105
Tableau III-21 : Opération de malaxage	106

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Etude bibliographique

Figure I-1: Classification des bétons légers.....	5
Figure I-2: Représentation schématique des différents types de béton léger	6
Figure I-3 : Béton cellulaire	6
Figure I-4: Le béton léger caverneux.....	8
Figure I-5: Le béton de granulats léger	8
Figure I-6: Masse volumique sèche habituelle des bétons légers confectionnés avec différents types de granulats légers à 28 jours	10
Figure I-7: Différents granulats légers naturels.....	16
Figure I-8: Différents granulats légers artificiels	17
Figure I-9 : Four à très haute température à 1250°C, GEM, France	18
Figure I-10: Courbe d'absorption d'eau	20
Figure I-11: Relation entre la résistance en compression à 28j et la densité du béton frais d'un mélange avec des granulats légers.....	21
Figure I-12: Exemple de variation de la résistance en compression de bétons légers en fonction de la masse volumique	22
Figure I-13: Masse volumique sèche habituelle des bétons confectionnés avec différents types de granulats légers fondée partiellement sur la norme ACI 213R-87..	23
Figure I-14 : Relation entre la résistance à la compression à 28 jours (mesurée sur cube) et le dosage en ciment des bétons ayant un affaissement de 50 mm et confectionnés avec différents types de granulats.	24
Figure I-15: Relation entre la résistance à la compression et la masse volumique du béton léger de faible résistance	25
Figure I-16: Relation entre la résistance à la compression et la masse volumique du béton léger de grande résistance.	25
Figure I-17: Fuseau de la variation de la résistance du béton léger en fonction de celle des grains	25
Figure I-18 : Cartographie et description des peuplements porte-graines de chêne liège.	28
Figure I-19 : a)- Différentes sections de l'arbre : axiale, radiale et tangentielle b)- Modèle de la cellule de liège et de l'organisation des tissus : (a) cellule individuelle (à gauche) et Kelvin polyèdre (à droite) et (b) l'organisation des tissus.....	29
Figure I-20 : Ondulation d'une cellule et ses dimensions.....	30
Figure I-21 :- Lenticelles. 1- planche section axiale, 2- planche section radiale.....	30

FigureI-22 : Description du chêne liège.	31
Figure I-23 : Schéma de constitution de liège	33
Figure I-24 : Liège mâle et femelle.....	34
Figure I-25 : Récolte de liège	34
FigureI-26 : Différentes formes de panneaux isolants en liège	37
Figure I-27 :Bouchons agglomérés, panneau d'affichage, des semelles de chaussures et des revêtements de sol.....	38
FigureI-28 : Isolation de la toiture, isolation des murs creux et des toitures et des combles isolés	39
Figure I-29 : Variation de la résistance moyenne à la compression en fonction de la densité apparente.....	40
Figure I-30 : Variation de la résistance moyenne à la compression en fonction du volume de liège.	40
Figure I-31 : Masse sèche cumulé du matériau dégradé	41
Figure I-32 : Résistance moyenne à la compression du béton	41
Figure I-33 : Variation de la conductivité thermique apparente en fonction de la teneur volumique en eau : cas du béton de liège.	42
Figure I-34 : Micrographie d'échantillons de la composition liège - ciment fracturée (MEB).....	43
Figure I- 35 : Différentes formes géométriques de fibres métalliques.....	45
Figure I-36 : Vue microscopique des fibres d'amiante.	48
Figure I-37 : Fibres de verre	49
Figure I-38 : Fibres de Carbone.	50
Figure I-39 : Différentes forme des fibers.	51
Figure 1-40 : Géométrie des fibres métalliques.	52
Figure I-41 : Essais de l'ASTM C 1018.	55
Figure I-42 : Fissuration dans le béton sans et avec fibres.	56
Figure I-43 : Comportement de charge – déformation de béton avec et sans fibers. ..	56
Figure I-44 : Texture d'un béton fibré.	57
Figure I- 45 : Déformation du crochet et glissement de la fibre.	58
Figure I- 46 : Courbe schématique de l'évolution des caractéristiques mécaniques d'un BFM en fonction du pourcentage de fibre.....	59
Figure I- 47 : Processus de couture: a) Influence des fibres courtes dans le processus de couture des microfissures, b) Influence des fibres longues dans le processus de couture des microfissures.	59

Figure I- 48: Effet de la taille d'agrégat sur la distribution des fibres dans un carré avec une longueur égale à la longueur d'une fibre.	60
Figure I- 49: Abaques reliant la composition granululaire optimale du béton au pourcentage en fibres.	61
Figure I-50: compacité optimale d'un BFM obtenus par la méthode de Baron-Lesage.	62
Figure I-51: Essai V.B.	63
Figure I-52: Essai du cône inverse.	63
Figure I-53: Le Maniabilimètre LCPC.	63
Figure I-54: Comportement en traction directe en fonction du pourcentage en fibres métalliques.....	66

Chapitre II : Matériaux et méthodes expérimentales

Figure II-1 : Provenance de sable calcaire et alluvionnaire d'Oued M'zi.....	73
Figure II-2 : Echantillons de sable calcaire 0/3 et de sable alluvionnaire 0/3 et de ciment CPJ45.....	74
Figure II-3 : Echantillon de granulats de liège expansé 0/3 et granulats de liège naturel 0/3.	74
Figure II-4: Fibre de cuivre.....	75
Figure II-5 : Essai masse volumique absolue par la méthode de l'éprouvette graduée.	76
Figure II -6: Essai masse volumique apparente par la méthode de récipient.	77
Figure II -7 : Essai d'absorptions.....	78
Figure II -8 : Essai équivalent de sable	78
Figure II -9 : Appareil de tamisage.....	79
Figure II-10 : Dispositif expérimental de l'appareil Le Chatelier	80
Figure II-11: Dispositif expérimental du perméabilimètre de <i>Blaine</i>	81
Figure II-12: Essai masse volumique absolue par la méthode de pycnomètre.	84
Figure II-13: Appareil de mesure de la compression	87

Chapitre III : Résultats expérimentaux et discussion

Figure III-1 : Courbe granulométrique du 100% sable calcaire.....	93
Figure III-2 : Courbe granulométrique du 100% sable alluvionnaire.....	93
Figure III-3 : Courbe granulométrique du sable mixte (50% sable alluvionnaire +50% sable calcaire).	94
Figure III-4 : Courbe granulométrique du sable mixte (75% sable alluvionnaire +25% sable calcaire).	95

Figure III-5 : Courbe granulométrique du sable mixte (25% sable alluvionnaire +75% sable calcaire).	95
Figure III-6 : Diffractogramme du ciment CPJ 45	97
Figure III-7 : Courbes granulométriques des granulats de liège expansé et granulats de liège naturel	100
Figure III-8 : Cinétique d'absorption des granulats légers pendant 2 heures	103
Figure III-9 : Cinétique désorption des granulats légers pendant 2 heures	103
Figure III-10 : Les éprouvettes immergées dans l'eau.....	106
Figure III- 11 : Résistance à la compression en fonction pourcentage de sable mixte	107

Nomenclatures

Nomenclatures

ρ_{app} : Masse volumique apparent (kg/cm^3)

ρ_{abs} : Masse volumique absolue (kg/cm^3)

C_p : Porosité (%)

$A\%$: Coefficient d'absorption (%)

C_u : Coefficient d'uniformité

C_c : Coefficient de courbure

E/C : Rapport Eau/ciment (%)

C/S : Rapport Ciment/sable (%)

C_{abs} : Coefficient d'absorption d'eau des granulats (%)

P : Porosité du granulat (%)

V_v : Volume des vides (cm^3)

V : Volume totale (cm^3)

T : temps (mn, h)

M : Masse de moule rempli (kg)

V : Volume de moule (cm^3)

R_c : Résistance à la compression (MPa)

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les déchets sont de plus en plus variés et leur quantité ne cesse d'augmenter, ce qui influe négativement sur l'environnement. La valorisation et le traitement de ces déchets favoriseront la protection et la préservation de l'environnement.

De part son importance dans la composition des bétons et des mortiers, le sable naturel, notamment le sable alluvionnaire est l'un des composants principaux constituant des bétons. Les dépôts de sable naturel, surtout ceux qui sont situés près des grands centres urbains, risquent de s'épuiser ou d'entraîner des frais pour la protection de l'environnement. Plusieurs types de résidus et de sous-produits peuvent être utilisés comme granulats. Parmi ces résidus, on trouve ceux provenant de l'industrie des granulats en particulier des stations de concassage. Ceux-ci génèrent dans certaines régions des quantités importantes de résidus actuellement non exploités et qui constituent à la fois une gêne environnementale et une perte de matière première. L'importance de gisement que constituent ces déchets, de nature souvent calcaire, a conduit vers une valorisation susceptible de répondre aux besoins socioéconomiques, écologiques et de satisfaire les objectifs d'économie d'énergie notamment dans les pays en développement.

Les matières végétales, renouvelables et respectueuses de l'environnement, sont de plus en plus présentes dans une multitude d'applications industrielles. Dans le secteur de la construction, elles sont appréciées, entre autre pour leur légèreté, qui leur confère des propriétés d'isolation thermique importantes. Les déchets issues de la fabrication des agglomérées de liège expansé qui s'accumulent de jour en jour posant un soucis aux usines pour leur gestion. Valoriser ces déchets en les transformant en granulats légers constitue le principal objectif de ce travail

D'un autre coté l'évolution du monde actuel est contraint à repenser sur les modes de construction. En effet, aujourd'hui, le secteur de la construction consomme de l'énergie en quantité importante. Il est responsable d'environ d'un quart des émissions de dioxyde de carbone, sans oublier l'épuisement des ressources non renouvelables. Ce secteur doit donc s'innover pour limiter ses impacts sur l'environnement tout en garantissant un confort aux usagers.

Dans ce contexte, les agro-matériaux, matériaux issus en partie de la biomasse, sont de plus en plus développés et commercialisés sur le marché des matériaux de construction. Ces agro-matériaux, de par leur caractère écologique, ils permettent d'améliorer le bilan environnemental de la construction et en particulier du bâtiment. Parmi les agro-matériaux destinés à être utilisés dans le secteur du bâtiment on trouve les bétons végétaux. Le but de ce travail est l'élaboration d'un béton léger à base de granulats de liège destiné à la fabrication d'éléments préfabriqués d'isolation. Cependant ces éléments présentent de faibles résistances mécaniques en particulier la résistances à la flexion et la traction. L'idée d'utiliser des fibres pour le renforcement de ces éléments constitue le deuxième objectif de cette étude.

Les déchets de câbles électriques issus des travaux d'électricité du bâtiment s'accumulent de plus en plus, induisant une gêne pour l'environnement. Utilisé ces

déchets en les transformant en fibres s'avère une idée très intéressante non seulement pour des raisons techniques mais aussi pour des raisons environnementales et économiques.

L'objectif global de ce travail est l'élaboration d'un béton léger à base de granulats de liège incorporés dans une matrice cimentaire constituée d'une combinaison de sable alluvionnaire et de sable calcaire et renforcé par des fibre métallique.

Afin d'atteindre cet objectif, la méthodologie adoptée consiste en premier lieu à optimiser la matrice cimentaire en déterminant la combinaison optimale en sable alluvionnaire et en sable calcaire. En deuxième lieu il s'agit d'alléger la matrice par substitution d'une partie de sable par une même partie de granulats de liège 0/3. En dernier lieu on renforce le béton léger par des fibres de cuivre. Malheureusement, à cause de la situation sanitaire du Corona qu'a connu l'Algérie et le monde entier, les deux dernières étapes n'ont pas été réalisées.

A cet effet notre travail est subdivisé en trois chapitres. Après une introduction générale, le premier chapitre présente une revue bibliographique sur les bétons légers et les bétons à base de granulats de liège et un état de connaissance sur le liège et le béton fibré.

Un deuxième chapitre est dédié aux méthodes expérimentales ainsi que les matières premières, Il englobe la description des essais de caractérisation physico-mécaniques des matériaux élaborés sont présentés dans le deuxième chapitre.

Le troisième chapitre présente les caractérisations des matériaux utilisés et discussion des résultats expérimentaux obtenus.

Enfin, une conclusion générale résumant l'ensemble des résultats obtenus.

Chapitre I

Etude bibliographique

Ce chapitre est une synthèse des recherches bibliographiques à travers diverses documentations concernant les bétons légers et plus particulièrement les bétons de liège et l'influence de l'ajout de fibres métalliques sur les caractéristiques physiques et mécaniques des bétons de liège.

I-1-Généralité sur les bétons légers

La densité des bétons traditionnels varie entre 2,2 et 2,6. L'utilisation d'un béton de densité plus faible est bénéfique pour réduire le poids exercé sur les fondations et la structure qui l'entourent permettant une meilleure durabilité de l'ensemble de l'ouvrage. Un béton léger permet une plus grande souplesse dans la conception de l'ouvrage en construisant des bâtiments plus élancés. Il permet également un abaissement du coût global de l'ouvrage en diminuant les sections des éléments porteurs, les dimensions des fondations et en diminuant les coûts des transports et d'installation. Les bétons sont estimés légers lorsque leur densité à l'état sec est inférieure à 1,8. Un béton léger est un béton qui contient de l'air ; soit l'air est contenu dans la matrice cimentaire (« béton cellulaire »), soit l'air est contenu entre les granulats (« béton caverneux » ou dans les granulats « béton de granulats légers »). Dans la fabrication d'un béton léger, l'enjeu est de garder les performances mécaniques du béton traditionnellement utilisé. Les bétons légers ont par conséquent une qualité de la matrice cimentaire qui doit être augmentée pour compenser la présence d'air qui fragilise le matériau.

[1]

I-1-1-Définition du béton léger

Le béton est un terme générique qui désigne un matériau de construction composite fabriqué à partir de granulats (sable, gravillons) agglomérés par un liant. Le béton léger fait partie de la gamme des bétons spéciaux ses caractéristiques, suggèrent de nouvelles applications, ce qui le distingue du béton ordinaire est sa faible masse volumique. En effet la masse d'un béton de densité normale varie de 2200 à 2600 Kg/m³, tandis que celle du béton léger oscille entre 300 et 1850 Kg/m³. [3]

D'après ce que nous avons vu précédemment les bétons légers sont des bétons dont la masse volumique est inférieure à 1800 Kg/m³.

Le béton léger est constitué en partie ou en totalité de granulats légers, de liants hydrauliques ou de résines synthétiques (époxydes, mousses de polyuréthane, etc.). En fait, la majorité de ces bétons a une masse volumique faible, comparativement à celle des bétons conventionnels comprise entre 2200 et 2600 kg/m³. [4]

Ces bétons à des fins d'isolation et d'allégement ou les deux à la fois, il peut également être utilisé pour des éléments porteurs à condition que l'on possède les granulats permettant d'atteindre les résistances voulues, Donc les bétons légers de construction affectés par leurs masses volumiques et leurs résistances variées. Bien utilisés, ces deux facteurs permettent d'apporter dans tous les domaines de la construction des solutions optimisées sur les plans constructifs et économiques ainsi qu'au niveau de la physique du bâtiment. Ils permettent ainsi d'avancer vers de nouveaux horizons de la construction.

En fin Le béton léger se caractérise essentiellement par leur faible masse volumique, adaptable aux exigences, par leur excellent rapport poids/résistance et par leur bonne isolation thermique, leur résistance à la chaleur et au feu, leur résistance au gel ainsi que par leur insensibilité générale aux agressions physiques et chimiques traditionnelles dans le domaine de la construction.

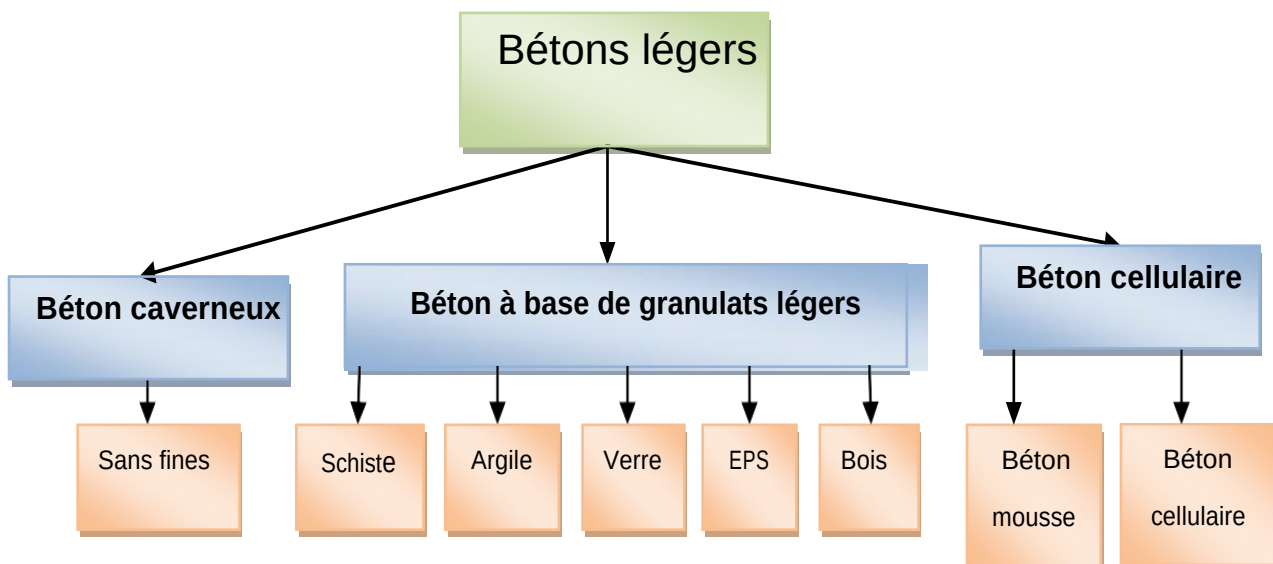


Figure I-1: Classification des bétons légers [5]

I-1-2-Type des bétons légers

Pour développer un béton léger, on doit prendre en considération deux aspects:

- 1) les particularités en matière de formulation des bétons légers,
- 2) la source des constituants spécifiques à la confection de bétons légers dont les matériaux légers naturels, artificiels et recyclés.

Ces deux aspects sont reliés avec la masse volumique qui diminue en remplaçant une quantité de matériaux par de l'air. Ces vides d'air peuvent être incorporés à trois endroits :

- soit dans les granulats.
- soit dans la pâte de ciment.

-Ou entre les gros granulats par élimination de granulats fins. Ceci produit trois types de dénominations pour ces bétons soient :

- 1- les bétons cellulaires.
- 2- les bétons sans fines (caverneux).
- 3 - les bétons de granulats légers (argile expansé...).

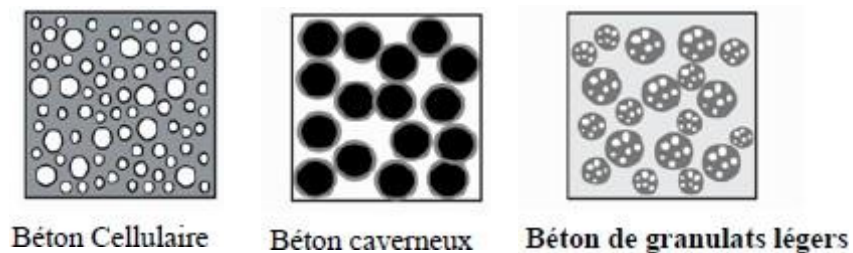


Figure I-2: représentation schématique des différents types de béton léger [6]

1-Le béton cellulaire

Les bétons cellulaires sont en général des mortiers remplis de petites bulles d'air. Ces mortiers sont des mélanges de sables (granulats à base de silice ou légers) et de ciment portland. Les bulles sont créées à l'intérieur de la pâte grâce aux agents moussants qui sont utilisés dans le béton pour produire un volume d'air important. On cite parmi Ces agents, la poudre d'aluminium ou soit par gâchage avec de l'eau savonneuse. La poudre d'aluminium réagit chimiquement avec le ciment et l'eau lors du malaxage pour donner, d'une part, un sel et, d'autre part, de l'hydrogène qui compose ainsi les petites bulles. Ces processus demandent une grande précision et des calculs de dosage précis; ils doivent être réalisés en atelier, et non pas sur le chantier [2].

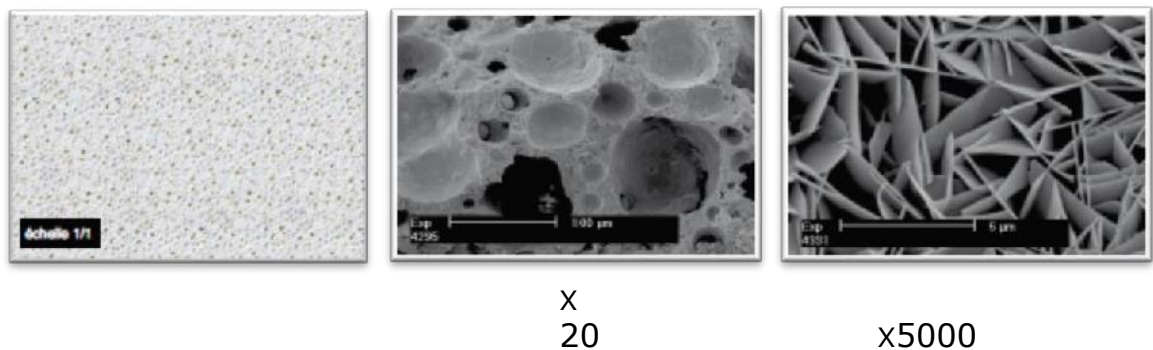


Figure I-3 : Béton cellulaire

Tableau I-1 : Les propriétés comparées des bétons cellulaires [4].

Masse volumique sèche	Résistance en compression	Résistance en flexion	Module d'élasticité	Conductivité thermique
kg/m ³	MPa	MPa	GPa	Jm/m ² s°C
450	3.2	0.65	1.6	0.12
525	4.0	0.75	2.0	0.14
600	4.5	0.85	2.4	0.16
675	6.3	1.00	2.5	0.18
750	7.5	1.25	2.7	0.20

Les résistances et le module d'élasticité augmentent en fonction de l'augmentation de la masse volumique du béton (voir **Tableau I-1**). En conséquence, il est possible d'obtenir une masse volumique souhaitée pour une résistance spécifique. Il est à noter que la résistance en flexion peut être améliorée par l'ajout d'armature ou de microfibras, celles-ci reprennent les efforts de flexion, et aide à contrôler la microfissuration lors de l'application d'une charge. [4] Le béton léger « cellulaire » ou « aéré » s'avère être le béton le plus susceptible de remplir les objectifs du système de plancher projeté. Le béton cellulaire est un matériau moulable, malléable, léger, durable et relativement résistant. Ce sont toutes des propriétés que la majorité des auteurs démontrent comme étant des propriétés à rechercher pour l'habitation à faible coût. Le béton cellulaire non traité à l'autoclave, nécessite peu d'outillage spécialisé et peut être assemblé sans trop de machinerie. [6] Les bétons cellulaires ont généralement une masse volumique et une résistance à la compression extrêmement faibles. L'utilisation la plus courante des bétons cellulaires se limite au béton de remplissage dans des murs, plafonds, planchers ou comme matériaux de remblai. [4]

2-Le béton caverneux

Béton léger et très poreux en raison de la présence dans sa masse de vides dus à l'absence de sable ou d'éléments fins. Il est obtenu à partir de gros granulats (courants ou légers) humidifiés et enrobés dans une pâte de ciment ou un mortier, et se met en place par couches épaisses (au moins 50 cm) et piquage. Il est utilisé comme béton de remplissage ou pour s'opposer aux remontées capillaires. [7]

Tableau I-2: caractéristiques de béton léger caverneux [8]

<i>Types de bétons spéciaux</i>	<i>Propriétés, caractéristiques particulières</i>	<i>Utilisation, domaines d'application privilégiés</i>
<i>Bétons légers caverneux</i> – béton caverneux de granulats légers – béton de bois – béton de liège	– masse volumique réduite – perméabilité à l'eau et à l'air – absorption acoustique	– allègement et drainage – absorption des bruits, réduction des bruits d'impact (écrans acoustiques, chapes flottantes, etc.)

**Figure I.4:** Le béton léger caverneux

3-Les bétons de granulats légers

Les bétons de granulats légers trouvent de nombreuses applications dans le domaine du bâtiment et des ouvrages d'art. Ils sont utilisés notamment pour alléger les structures telles que les poutres, les poteaux, les planchers, les tabliers de ponts etc. Les bétons légers sont également connus pour améliorer l'isolation thermique de l'enveloppe des bâtiments ou l'absorption acoustique des écrans acoustiques protégeant les riverains des nuisances sonores. Ils sont utilisés dans les structures préfabriquées ou réalisées sur chantier. Dans l'industrie du béton, cette famille de bétons est utilisée pour les produits de structure destinés aux bâtiments ou aux ouvrages de génie civil qu'ils soient en béton armé ou précontraint. Les bétons légers pour les produits de structure présentent des masses volumiques réelles sèches comprises entre 1200 et 2000 kg/m³ et des résistances à la compression comprises entre 25 et 80 MPa.

[9]

**Figure I-5:** Le béton de granulats léger

Tableau I-3: Caractéristiques de béton de granulats légers [8]

<i>Types de bétons spéciaux</i>	<i>Propriétés, caractéristiques particulières</i>	<i>Utilisation, domaines d'application privilégiés</i>
Bétons de granulats légers	- masse volumique réduite (entre 1 000 et 1 800 kg/m³) - bonne résistance mécanique	- allègement des produits et des ouvrages - isolation thermique et phonique

I-1-3-CLASSIFICATION DES BETONS LEGRS

Un béton léger est défini par deux caractères de base, dont dépendent les autres caractères ou données nécessaires au calcul. il s'agit :

- de la masse volumique sèche, désignée par γ_{bs} ;
- de la résistance à la compression à l'âge de 28jours.

La norme EN 206 classe les bétons légers dans les six catégories de densités suivantes, fonction de leur masse en kg/m³. [10]

Tableau I-4: Classification des bétons légers en fonction de la densité [3]

Classe de densité	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Densité kg/m ³	901 à 1000	1001 à 1200	1201 à 1400	1401 à 1600	1601 à 1800	1801 à 2000

La nouvelle version de la norme EN 206 classe les bétons suivant les fourchettes de masse volumiques indiquées dans le tableau ci- dessous:

Tableau I-5: Classification des bétons légers en fonction de la densité [10].

Classe de masses volumiques	LC 1,0	LC1,2	LC1,4	LC1,6	LC1,8	LC2,0
kg/m ³	>800 et ≤1000	>1000 et ≤1200	>1200 et ≤1400	>1400 et ≤1600	>1600 et ≤1800	>1800 et ≤2100

Une autre classification pour béton léger basée sur la masse volumique est logique, puisque la masse volumique et la résistance sont étroitement liées, ce qui explique pourquoi la norme ACI 213R -87^{13,141} classifie les bétons en fonction de la masse volumique (est comprise entre 1350 et 1900 kg/m³) en trois catégories :

1- le béton léger de structure : 1350 – 1900kg/m³

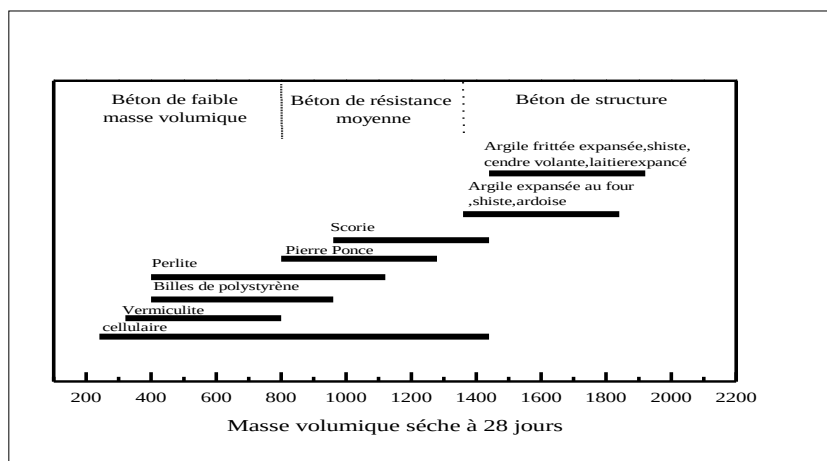
Dont la masse volumique est comprise entre 1350 et 1900 ce béton est utilisé pour des applications structurales et présente une résistance à la compression minimale de 17 MPa.

2- le béton léger de faible masse volumique : 300 – 800kg/m³

A une masse volumique comprise entre 300 et 800 kg/m³ n'est pas utilisé pour des applications structurales, mais surtout comme isolant thermique, $R_c < 7$ MPa.

3- le béton de résistance moyenne se situe entre les deux:

Sa résistance à la compression est comprise entre 7 et 17 MPa.



FigureI-6: masse volumique sèche habituelle de bétons légers confectionnés avec différents types de granulats légers à 28 jours [3]

Selon leur utilisation dans les structures, les bétons légers peuvent être classés en fonction de leurs masses volumiques apparentes comme suit :

- **Des bétons de remplissage :** leur masse volumique apparente est comprise entre 300 et 1000 kg/m³, leurs résistances en compression sont souvent faibles et leurs caractéristiques thermiques sont bonnes [12].
- **Des bétons porteurs isolants :** leur masse volumique apparente est comprise entre 1000 et 1400 kg/m³ [13], leurs résistances mécaniques sont nettement meilleures que celles des précédents et leurs caractéristiques thermiques sont acceptables. On les utilise généralement pour des éléments préfabriqués.

- **Des bétons de structure** : Leur masse volumique est comprise entre 1400 et 1800 kg/m³. Ils sont destinés à la constitution des structures grâce à leurs résistances mécaniques qui peuvent être du même ordre que celles des bétons ordinaires. Leur pouvoir isolant est relativement faible [11].

I-1-4-Les avantages des bétons légers

Le béton léger est utilisé pour plusieurs avantages, on peut les classés en trois catégories qui sont :

1-Avantages techniques

- **Légèreté** : plus léger qu'un béton classique, le béton léger a une densité de 0,4 à 1,2 en comparaison de 2,2 à 2,5 pour un béton classique.
- **Isolant** : Le béton léger a un pouvoir isolant thermique et phonique beaucoup plus important qu'un béton classique.
- **Non inflammable** : La chape en béton léger est classées M0 au test de réaction au feu à partir d'un certain dosage en ciment.
- **Imputrescible** : Le béton léger est un matériau à pH basique, constitué de ciment, de sables lavés et de perles de polystyrène expansé stabilisé.
- L'augmentation des propriétés d'isolation thermique et acoustique.
- les excellentes qualités de finition d'une pièce en béton léger ;

2-Avantages de mises en œuvre

- Exécution simple et rapide : accessibilité sur chantier entre 24 et 48 h après coulage, selon l'épaisseur.
- Maniabilité : pompable sur de longues distances et de grandes hauteurs, il est facile à mettre en œuvre, notamment en forte épaisseur.
- Coffrages plus légers ;
- Les pièces de béton léger sont aussi plus faciles à manipuler et à déplacer, en raison de leur relative légèreté.

3-Avantages Economiques

- une augmentation de la productivité sur le chantier en raison du faible poids du matériau [3].
- Le béton léger, par sa légèreté, réduit le poids mort des bâtiments, ce qui réduit considérablement la dimension, donc le poids, des fondations [3]

- Economie sur le ferrailage des éléments ;
- le plus faible volume de béton utilisé, il est aussi possible d'économiser sur les quantités de ciment par rapport au béton ordinaire ;

I-1-5-Désavantages du béton léger

- Le prix est plus élevé à cause du dosage en ciment plus important.
- Les fournisseurs sont plus restreints selon le béton léger choisi.
- Le prix est plus élevé à cause de l'utilisation de granulats légers, malaxage du béton plus long.
- La mise en place est délicate car le béton est plus sensible.
- Il est difficile de le mettre en place avec une pompe à béton.
- Consommation d'eau plus importante, granulats à porosité importante.
- Le module d'élasticité E est inférieur à celui du béton normal. [16]

I-1-6-Différences entre bétons classiques et bétons légers

Malgré leurs bonnes qualités, les bétons classiques ont toujours présenté des inconvénients à savoir :

- Le poids propre des éléments de béton très élevés qui peuvent présenter un grand pourcentage de charge de structure.
- Exigence d'un sol de forte capacité de portance.
- Mise en œuvre assez délicate (coffrage et coulage).
- Caractéristiques thermiques et phoniques médiocres. [14,15]

En revanche l'utilisation d'un béton de faible masse volumique peut être bénéfique en terme :

- D'éléments porteurs de faible section.
- Mise en œuvre facile et par conséquent une productivité élevée.
- Permet de construire sur des sols de faible capacité de portance.
- Procure une meilleure isolation thermique et phonique. [3]

La faible masse volumique des bétons légers provient de leur porosité élevée. Cette porosité peut être localisée dans trois endroits:

- Au sein des granulats : c'est le cas des bétons de granulats légers.
- Dans la pâte du ciment : c'est le cas des bétons cellulaires.
- Entre les gros granulats par suppression des granulats fins : c'est le cas des bétons caverneux.

I-1-7- Les grandes familles de béton léger

Il convient de distinguer deux grandes familles de béton léger :

- le béton léger structural,
- le béton léger architectural.

On présente de façon sommaire les distinctions entre ces deux familles

1-Le béton léger structural

L'Association canadienne du ciment Portland (ACCP) définit le béton léger structural comme un béton ayant une résistance à la compression à 28 jours supérieure à 15 MPa dont la masse volumique est inférieure à 1 850 kg/m³ [6]. 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. Les laitiers de haut fourneau, les argiles et les schistes expansés, les cendres volantes, les pierres ponce, Les scories et le tuff constituent en grande partie les sources disponibles de matière première pour fabriquer des granulats légers destinés à la confection de bétons légers structuraux.

Le béton léger structural est utilisé pour répondre à des exigences structurales spécifiques. Ainsi, on utilise du béton léger lorsque la capacité portante du sol ne permet pas l'érection d'une structure conventionnelle ; pour construire un bâtiment de grande hauteur pour lequel la diminution de poids est particulièrement intéressante compte tenu de la capacité portante du sol ; pour construire des plates-formes de forage dont la diminution de masse facilite le transport dans les zones à faible tirant d'eau. Règle générale, cette réduction de poids peut entraîner des économies substantielles dans la réalisation d'ouvrage [4].

2-Le béton léger architectural

Tout comme pour le béton léger structural, l'ACCP définit un béton léger architectural 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/m³. [4].

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

- par l'utilisation de granulats ultra- légers (la perlite, la vermiculite et les billes de polystyrène,...).
- par l'utilisation d'un agent moussant,
- par la confection d'un béton caverneux.

I-1-8- Propriétés des bétons légers

La description des propriétés des bétons sera davantage axée sur les éléments suivants:

- la faible masse volumique,
- la durabilité,
- la rhéologie à l'état frais.
- les propriétés mécaniques (résistance à la compression, module d'élasticité, etc.).

I-1-9- Domaine d'utilisation des bétons légers

Les bétons légers sont utilisés dans les domaines suivants :

- Bloc de maçonnerie.
- pistes de sport, cendrées,
- couches filtrantes pour stations d'épuration,
- chapes,
- fours, cheminées,
- panneau préfabriqué.
- porcherie, étables.
- Sous-couches de route : protection contre le gel et couche de base dans la construction des routes et des voies ferrées.
- Les pavés.
- Panneau préfabriqué.
- Mur antibruit.
- Bardage.
- Ouvrage extérieur.
- Elément de cave.
- Entre vous et hourdis.

On retrouve le béton léger dans diverses applications :

- **Fondation** : On peut retrouver du béton léger dans les fondations. En effet, ce dernier étant moins lourd que le béton classique, il peut être placé sur une structure demandant une résistance moins élevée à la charge. Ceci peut être un avantage car la structure est donc plus facile à mettre en place et par conséquent, des économies sont faites [9].
- **Rénovation** : Ce béton étant plus léger qu'un béton classique, cela permet donc de réaliser des rénovations sans avoir à renforcer au préalable la structure sur laquelle on souhaite l'appliquer [10].

- **Isolation** : Le béton léger a comme particularité d'être à la fois un bon isolant thermique et phonique. De ce fait, il est très utilisé lors de la conception de mur ou de dalle.
- **Chape** : Le béton léger peut aussi être utilisé afin de concevoir une chape sèche, qui est d'ailleurs considérée comme un bon isolant phonique et thermique [11].

Il s'utilise pour toutes les étapes de la construction, en intérieur comme en extérieur (murs, cloisons, plafonds,...), du gros œuvre extérieur aux divers aménagements et finitions intérieurs.

I-1-10-Les bétons de granulats légers

Ce sont des bétons dans lesquels des granulats normaux ont été remplacés par des granulats légers, il peuvent être pleins ou caverneux, dans ce dernier cas, la granulométrie est fortement discontinue et les éléments fins sont partiellement ou totalement supprimés.

Les comportements physiques et mécaniques des bétons de granulats légers sont dictés par le type de granulats légers utilisés, et par leurs propriétés physiques et mécaniques d'une part, et d'autre part par la nature de la matrice utilisée. Selon les exigences demandées et selon le béton utilisé, le choix du type de granulats et de la nature de la matrice s'avère important.

I-1-11-Les granulats légers

La recherche actuelle dans le domaine des matériaux de construction est orientée vers les granulats légers naturels ou artificiels pour assurer d'une part, la pérennité des granulats naturels conventionnels et l'allègement de certains éléments de construction et d'autre part, une économie d'énergie par la réduction de la conductivité thermique.

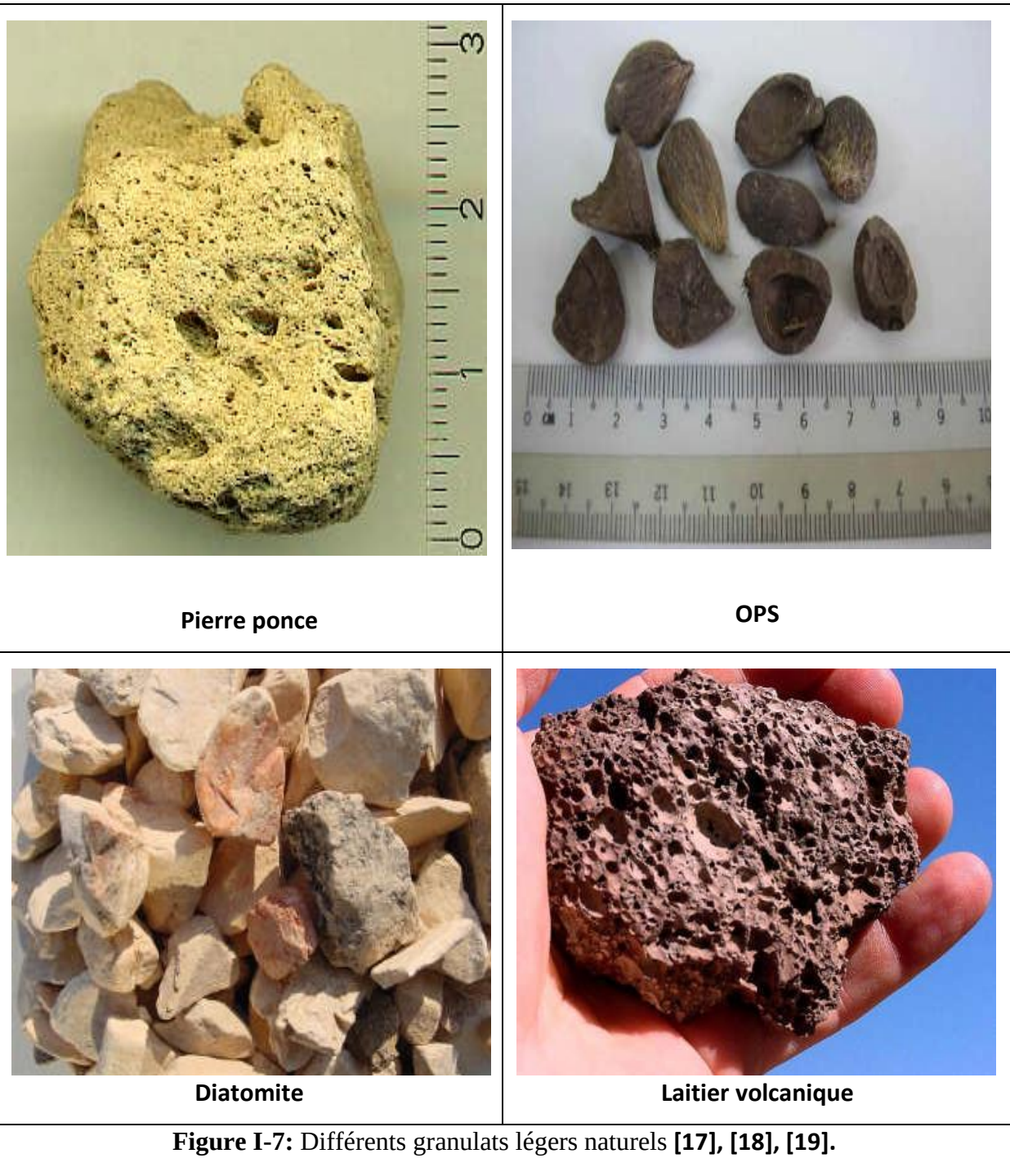
On retrouve ainsi, le verre expansé (Tasserie, 1991) le polystyrène (Vénuat, 1983) ou encore les granulats de bois (Ouadi, 1991)

I-1-12-Types de granulats légers

Nous pouvons distinguer les granulats légers selon leur origine : naturelle ou artificielle.

1-Granulats naturels

Certaines roches, comme la pierre ponce, ont à l'état naturel des densités faibles (inférieures à 2) ; en les concassant, on obtient donc des granulats légers. Il existe également d'autres matériaux naturels dans certains pays qui peuvent être utilisés comme granulats légers pour des utilisations locales. La **Figure I-7** présente quelques exemples de granulats naturels : OPS (Oil Palm Shell) [17], la diatomite [18] et le laitier volcanique [19].



2-Granulats artificiels

Des granulats légers peuvent être également produits artificiellement, soit à partir de matières premières naturelles comme l'argile, le schiste, l'ardoise, ou des matières spéciales dans certains régions, comme la vase à Taiwan [20] et NYT (**Neapolitan Yellow Tuff**) en Italie [21]; soit à partir de sous-produits industriels comme les laitiers, les cendres volantes frittées ou encore l'EPS (Polystyrène Expandé) [22],[23],[24],(Figure I-8).



Argile expansée



Schiste expansée



Laitier refroidi à l'air



Laitier expansée



Cendre volante



EPS

Figure I-8: Différents granulats légers artificiels [20], [23], [26].

Les granulats légers artificiels fabriqués à partir de matières premières naturelles sont produits en formant tout d'abord une pâte dense par mélange d'une poudre avec de l'eau.

Cette pâte est ensuite fractionnée en petits agrégats de quelques millimètres de taille, puis passée dans un four à très haute température (1000°C à 1250°C environ), (**Figure I-9**).

L'expansion de l'eau et la vitrification du minéral aboutissent à la formation de granulats plus ou moins sphériques, constitués d'une coque renfermant des bulles gazeuses dispersées dans une matrice. En jouant sur la marche des fours, on favorise plus ou moins l'expansion. Il apparaît alors une corrélation entre la taille moyenne des grains et leur densité absolue, les plus gros étant les moins denses. Les granulats artificiels sont généralement assez ronds ; les argiles expansées sont lisses et les schistes sont parfois plus rugueux. Leur masse volumique en vrac varie entre 300 et 800 kg/m³.



Figure I-9 : Four à très haute température à 1250°C, GEM, France

Les laitiers qui constituent la base d'une autre catégorie de granulats artificiels comprennent les laitiers de haut fourneau, les laitiers d'aciérie et autres laitiers métallurgiques.

Les laitiers métallurgiques sont uniquement utilisés comme matériau de remblai pour les routes et comme granulats pour le béton bitumineux. Seuls les laitiers de haut fourneau sont utilisés pour des bétons de structure. Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la transformation du minerai de fer en fonte brute. Il est refroidi lentement à l'air et donne un matériau cristallin et compact, connu sous le nom de «laitier refroidi à l'air ». Il peut également être refroidi rapidement et traité au moyen de jet d'eau pour obtenir un matériau léger désigné sous le nom de «laitier expansé». Le laitier expansé doit alors être concassé pour former des granulats. Un autre procédé permet de fabriquer du «laitier expansé bouleté». Le laitier fondu contenant des bulles de gaz est projeté à travers un jet d'eau pour former des

boulettes. Celles-ci sont de forme arrondie et ont un revêtement lisse en surface. Leur masse volumique en vrac est de l'ordre de 850 kg/m^3 .

Les cendres volantes qui peuvent également être à la base de granulats légers sont mélangées avec de l'eau et transformées en boulette soit dans un tambour ou un cône rotatif, soit par extrusion [24],[26], [26]. On a découvert que l'addition d'une faible quantité d'alcalis permet d'obtenir des boulettes ayant une meilleure résistance aux chocs Thermiques et mécaniques. Par la suite, les boulettes sont frittées dans des fours à grille mobile, la température atteint environ 1150°C à 1200°C et par conséquent, les petites particules de cendres volantes fusionnent et forment un aggloméré. Ces nodules frittés de forme arrondie, de bonne résistance et possédant une absorption d'eau modérée constituent de bons granulats. Leur masse volumique en vrac est comprise entre 1000 et 1200 kg/m^3 .

I-1-13-Classification des granulats légers

Les granulats légers sont des granulats ayant une masse volumique réelle ne dépassant pas 2000 kg/m^3 ($2,00 \text{ Mg/m}^3$) ou une masse volumique en vrac ne dépassant pas 1200 kg/m^3 . [NF EN 13055-1,2002]

Les granulats légers peuvent être classés selon leur nature comme suit :

- **Matériaux minéraux naturels non préparés** : Par définition ce sont des matériaux qui n'ont subi que des traitements mécaniques tels que lavage, broyage, tamisage. Les granulats les plus connus dans cette catégorie sont : la ponce, les pouzzolanes, roches d'origine volcanique, les tufs calcaires ou volcaniques. [27], [28]
- **Matériaux minéraux naturels préparés** : Ce sont des matériaux spécialement traités en usine en vue de leur emplois dans le béton légers, cette catégorie de granulats est la plus importante et on y trouve en particulier : l'argile, le schiste et l'ardoise expansées ou frittées, la perlite expansée et la vermiculite exfoliée.
- **Déchets industriels non préparés** : Ce sont des déchets de l'industrie qui ne subissent pas de traitement particulier à part, dans certains cas un traitement mécanique de tri. Le principal granulat dans ce type est le mâchefer, résidu de la combustion des charbons gras du coke ou des ordures ménagères. [28]
- **Déchets industriels préparés** : Ce sont en générale des sous-produits de l'industrie qui doivent subir divers traitements en vue de leur transformation en granulats légers. Les granulats de ce type les plus répandus sont : le laitier expansé ou granulé, les cendres volantes frittées ou expansés et le verre expansé.

- **Matériaux organiques** : dans cette catégorie on classe des produits qui sont soit des polymères solides de synthèse, soit des matériaux d'origine végétale, on peut ranger dans cette catégorie les granulats de polystyrène expansé qui sont assez répandus les granulats de bois (copeaux ou sciure) et le liège expansé.

I-1-14-Propriétés physico mécaniques et thermiques des granulats légers

❖ Propriétés physico mécaniques

➤ Masse volumique

C'est la caractéristique principale d'un béton léger, en raison de son grand effet sur les propriétés mécaniques et thermiques ou même variations dimensionnelles.

Elle dépend principalement du [29]:

- De la structure (béton plein caverneux, semi caverneux, cellulaire).
- De la masse volumique des granulats.
- Du dosage en ciment et de la quantité d'eau absorbée par les granulats.
- Porosité et absorption

Les granulats légers sont caractérisés par une très grande porosité qui varie entre 25 et 75% [27], [6],[29] . La taille et la distribution des pores influent la résistance des granulats, mais surtout leurs propriétés d'absorption.

L'absorption d'eau, importante et variable, des granulats légers a toujours été considérée par les constructeurs comme une grosse difficulté sur les chantiers car elle entraîne d'importantes variations de plasticité et d'ouvrabilité des bétons. [10]

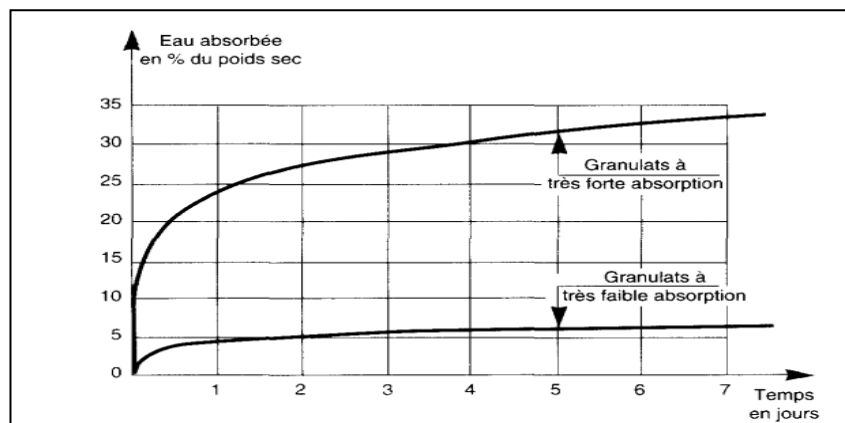


Figure I-10: Courbe d'absorption d'eau [10].

On remarque essentiellement deux choses :

- Une forte proportion de l'absorption se situe dans les premières minutes, ce qui permet d'envisager de minimiser ce phénomène par un prémouillage des

granulats.

- L'absorption a tendance à être plus faible si les granulats sont plus denses, donc moins poreux, et s'ils présentent une surface plus lisse donc plus fermée à l'absorption.

Selon les granulats, l'absorption après 48 heures d'immersion totale peut varier de 7 à 25 % en pourcentage du poids sec du granulat. **(Voir figure I-10).**

❖ Propriétés mécaniques des granulats légers

➤ résistance à la compression

Avec des granulats légers et une formulation de béton appropriée, il est possible d'obtenir des résistances à la compression comparables à celles obtenues avec du béton traditionnel. L'évolution des connaissances et des technologies du béton ont permis au fil des ans d'améliorer les propriétés des bétons, dont celles des bétons légers. Par exemple, l'utilisation d'ajouts minéraux (fumée de silice, cendres volantes, laitiers) et d'adjuvants (agents entraîneurs d'air, AEA, superplastifiants SP, agents réducteurs d'eau WR et accélérateurs de prise) ont donné la possibilité notamment de diminuer le rapport E/L tout en conservant une bonne maniabilité. Des résistances en compression de 100 MPa ont même été obtenues et sont présentées **(voir figure I -11).**

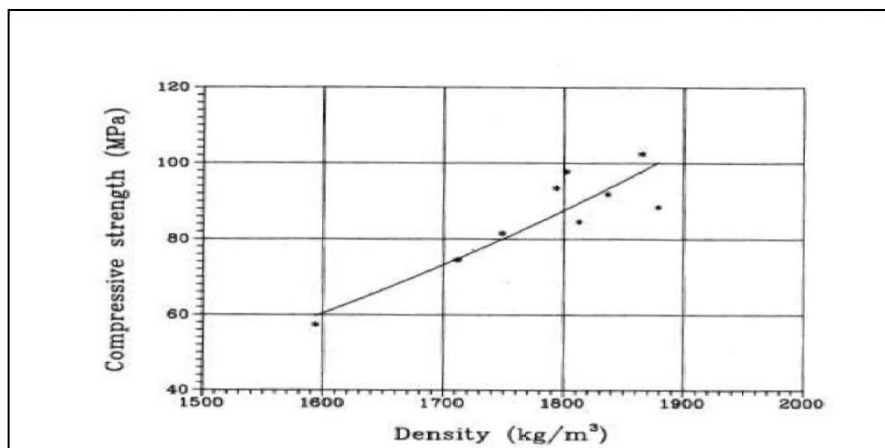


Figure I-11: Relation entre la résistance en compression à 28j et la densité du béton frais d'un mélange avec des granulats légers [30]

Dans le cas du béton léger, les granulats (légers) sont, contrairement au béton traditionnel, en général moins résistants que le mortier. Ils constituent le point faible du béton. Par contre, grâce à leur surface poreuse et aux liaisons qui en résultent, il y a une très bonne adhérence entre le mortier et les grains. La rupture se produit donc par cassure des granulats légers, dans des plans qui coupent un grand nombre de granulats. [27]

Cependant, il est judicieux de mentionner que des granulats légers ayant une même résistance à l'écrasement ne donnent pas nécessairement des bétons d'une même résistance à la compression, même si le rapport E/L est identique. En effet, d'autres paramètres doivent être pris en compte :

□ Les caractéristiques physiques et chimiques des granulats viennent modifier la zone d'interface entre la pâte et les gros granulats (ITZ en anglais, pour Inter facial Transition Zone). De plus, dans le cas des granulats légers, cette zone peut également s'étendre plus ou moins profondément dans les granulats légers eux-mêmes, selon la quantité de pâte absorbée dans les pores de surface. Une plus grande tendance à absorber entraîne la densification de l'ITZ au voisinage des granulats légers. Cette densification de l'ITZ engendre des bétons plus résistants. Par exemple, des granulats légers d'une capacité d'absorption 200 % plus grande (absorption au bout de 6 h d'immersion des granulats secs) donnent des résistances en compression jusqu'à 25 % plus élevées [31]

□ D'un point de vue chimique, deux phénomènes sont susceptibles d'être impliqués : d'une part, une réaction pouzzolanique entre le granulat (si le granulat a une réactivité pouzzolanique élevée) et la solution alcaline susceptible d'y pénétrer, et, d'autre part, un processus d'imprégnation au cours duquel des CH (Portlandite) se déposent dans le granulat. Ils pourraient semble-t-il conduire chacun à une augmentation de la résistance de l'ordre de 20 % entre 28 jours et 90 jours. [31]

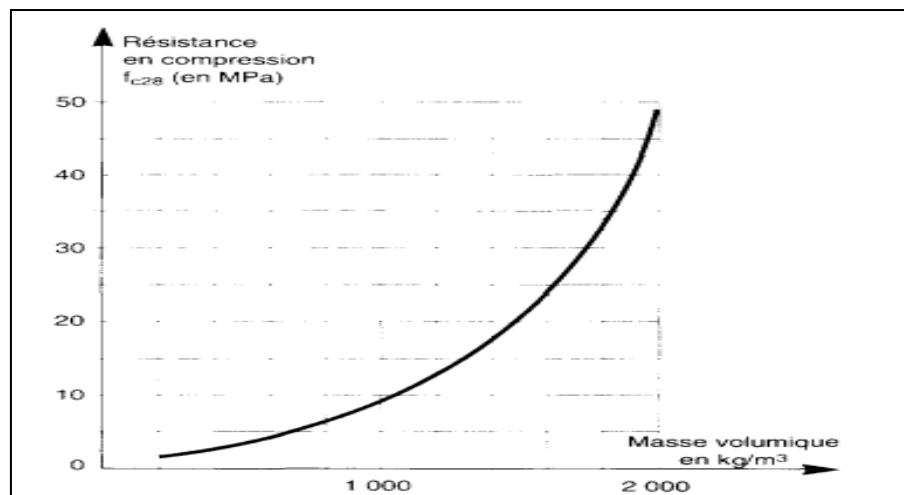


Figure I-12: Exemple de variation de la résistance en compression de bétons légers en fonction de la masse volumique [10].

❖ Propriétés thermiques des granulats légers

➤ Propriétés thermiques

La nature des granulats et le taux d'humidité ont une grande influence sur les caractéristiques thermiques. Le tableau I-6 donne certaines caractéristiques de granulats légers.

Tableau I-6 : Caractéristiques des granulats légers

Granulats	Masse volumique (kg/m ³)			Porosité (%)	Taux d'absorption à 28 jours	Conductivité thermique (W.m ⁻¹ K ⁻¹)
	Masse volu de la matière (kg/m ³)	Masse volu des grains (kg/m ³)	Masse volu appar (kg/m ³)			
Bois résineux légers	450/550	255	120	72	150/300	0.12
Bois résineux mi lourds	300/450	300	/	58	100/250	0.15
Polystyrène expansé	1100	20/80	10	90/97	1.37 / 4.63	0.027/0.037
Argile expansé	2660	848/1212	518 / 656	68	30	0.14
Schiste expansé	2710	1193	698	56	11.3	/
Laitier expansé	2900	1550	700 / 850	50	11	/
Perlite	/	30 / 180	/	/	/	0.06
Vermiculite	/	50 / 125	/	/	/	0.07
Pouzzolane	/	1865	780 / 910	55	21	/

Les bétons de granulats légers

➤ Masse volumique

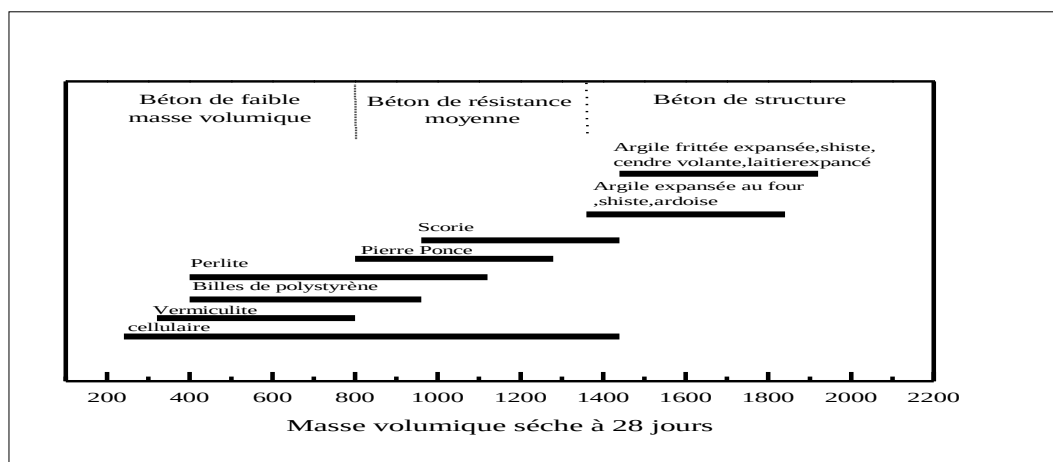


Figure I-13: Masse volumique sèche habituelle de bétons confectionnés avec différents types de granulats légers fondée partiellement sur la norme ACI213R-87.

➤ La résistance à la compression

La résistance à la compression d'un béton léger est d'autant plus élevée que la résistance spécifique des granulats légers utilisés et leur masse volumique sont elles-mêmes plus grandes. (**Béton armé**)

La qualité des granulats est considérée comme le principal facteur limitant la résistance en compression des bétons de granulats légers, vient ensuite la qualité de la matrice utilisée et la masse volumique du béton durci. [6]; [29] ; [32].

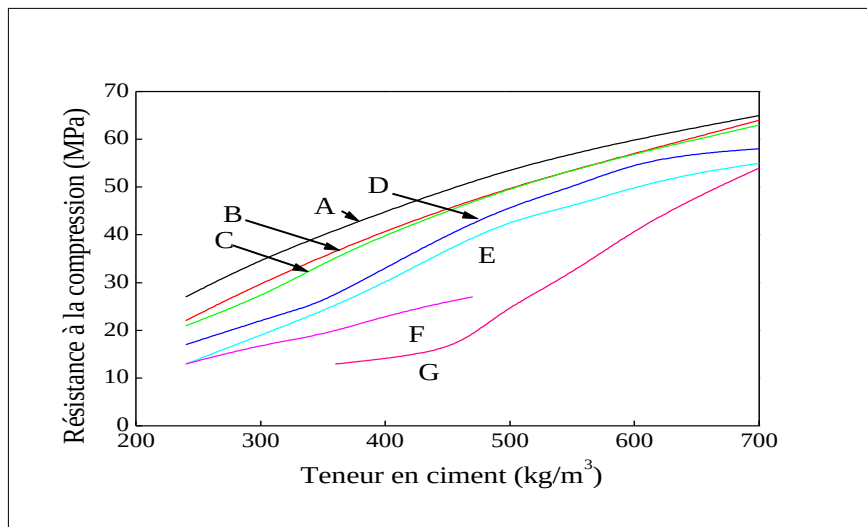
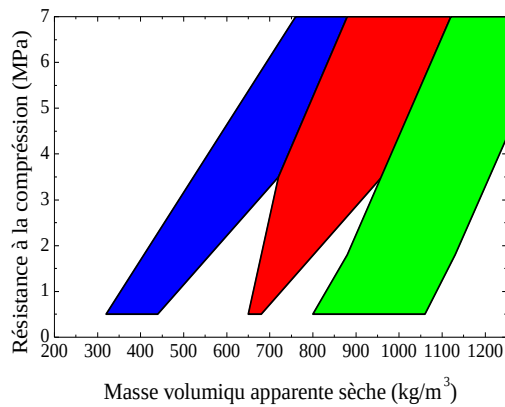


Figure I-14 : Relation entre la résistance à la compression à 28 jours (mesurée sur cube) et le dosage en ciment des bétons ayant un affaissement de 50 mm et confectionnés avec différents types de granulats [3].

Graphe	Désignation
A	cendres volantes frittées et granulats ordinaires
B	laitier de haut fourneau en boulettes et granulat fin ordinaire
C	cendres volantes frittées
D	schiste fritté
E	ardoise expansée
F	argile expansée et sable
G	laitier expansé



- Perlite, vermiculite
- ponce
- scorie expansée, schiste expansé

Figure I-15: Relation entre la résistance à la compression et la masse volumique du béton léger de faible résistance [33].

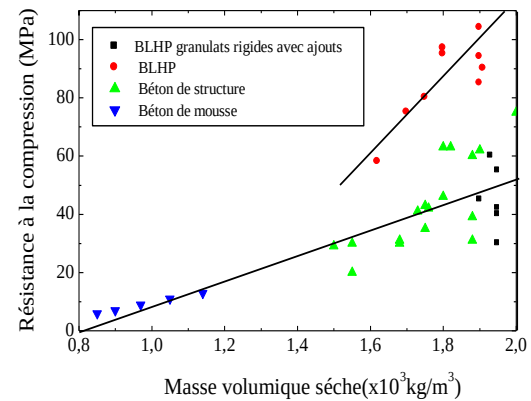


Figure I-16: Relation entre la résistance à la compression et la masse volumique du béton léger de grande résistance [6].

Relation entre résistance à la compression du béton de granulats léger et résistance du granulat

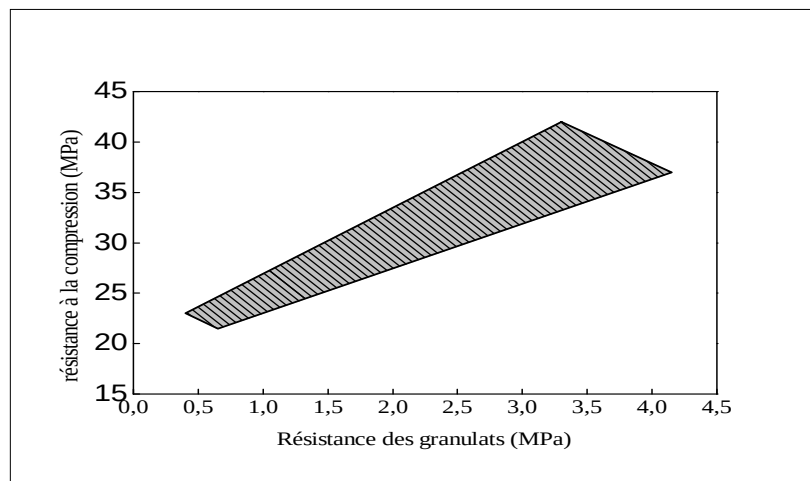


Figure I-17: Fuseau de la variation de la résistance du béton léger en fonction de celle des grains [27].

Résistance à la traction

La résistance à la traction des bétons légers est exprimée, selon BAEL, par la formule **(Béton armé)** :

$$F_t = 0.5 + 0.05 f_c \quad (f_c \text{ en MPa}) \dots\dots\dots \textbf{(I-1)}$$

M.BONZEL donne une autre formule de calcul de la résistance à la traction du béton léger en fonction de la compression. [3]

$$F_t = 0.23 f_c^{0.67} \dots\dots\dots \textbf{(I-2)}$$

➤ Module d'élasticité

Le module d'élasticité des bétons légers est fonction de leurs masses volumiques apparente et leur résistance à la compression. D'après [34] :

$$E_b = \delta_b \cdot 6000 \sqrt{\sigma_{jm}} \dots\dots\dots \textbf{(I-3)}$$

Avec : δ_b masse volumique apparente du béton en t/m^3 .

σ_{jm} résistance à la compression du béton sur cubes en kg/cm^2 à (j) jours.

Le tableau ci-dessous donne quelques valeurs pour différents types de béton légers.

Tableau I-7: Module d'élasticité de quelques types de bétons légers [34]

Type de béton	E_b (kg/cm^2)
Béton de ponce	30 à 70 000
Béton de laitier expansé	40 à 125 000
Béton de laitier expansé + sable	70 à 170 000
Béton d'argileou schist expansé	60 à 220 000
Béton de perlite	10 à 30 000
Béton de vermiculite	8 à 17 000
Béton cellulaire autoclavé	17 500
Béton de cendre volante fritté	100 à 220 000

I-2- Etat d’art sur le liège

I-2-1- Généralité sur le liège

Le liège est un matériau qui a été utilisé par homme durant les 5000 dernières années. C’est un matériau stratégique utilisé pour de multiples applications. Beaucoup de matériaux de liège actuels sont en composites, en particulier des matériaux de liège pour revêtements des sols et murs et plusieurs autres bâtiments et les applications industrielles. Les développements récents dans la recherche du liège sont passés de la relation liège vin classique de qualité et les questions environnementales, l’exploitation des résidus de l’industrie du liège et de nouveaux matériaux à base de liège. Au cours des dernières années un certain nombre de matériaux composites à base de liège nouveau ont été élaborés [35].

Le liège est l’écorce du chêne (*Quercus suber* L.), qui est périodiquement récolté de l’arbre, généralement tous les 9-12 ans, en fonction de la région de culture. *Quercus suber* L, est le nom botanique d’une croissance lente, le chêne à feuilles persistantes, qui ne s’épanouit que dans des régions spécifiques de la Méditerranée occidentale (Portugal, Espagne, sud de la France, une partie de l’Italie, l’Afrique du Nord) et la Chine [36][37].

Cet arbre exige beaucoup de lumière solaire et une combinaison très inhabituelle de faibles précipitations et l’humidité assez élevées.

L’Europe dispose d’environ 60% de la superficie totale de production (forêts de liège) et produit plus de 80% de liège au monde [38].

La qualité et l’épaisseur de l’écorce varient selon les conditions d’un arbre de croissance spécifique [37] [39].

Le liège est des plus souples matériaux naturels connus. C’est un matériau léger, élastique, flexible et imperméable aux gaz et liquides, impérissable, bon isolateur électrique et thermique, isolateur phonique et diélectrique [40].

La faible conductivité thermique du liège combinée à une raisonnable compression, font de ce matériau un excellent isolateur thermique lorsque des charges compressives sont présentes. Sa propriété de frottement (anti-glissement) le rend également bon pour des revêtements de sol ou dans les poignées. Aujourd’hui, les produits en liège sont utilisés pour isolation thermique des réfrigérateurs et des fusées, pour l’isolation acoustique des sous-marins et les studios d’enregistrement, tels des joints dans les instruments en bois et les chambres de combustion, et en tant qu’absorbeur d’énergie dans les planchers, les chaussures et l’emballage, et naturellement comme taquets [40].

I-2-2-Chêne liège (*Quercus suber* L) en Algérie

Benamirouche et Chouial ont caractérisé géographiquement et donné quelques descriptions des peuplements porte-graines de chêne liège (*Quercus suber* L.) dans les wilayas de Jijel, Mila et Bejaia (Nord-est algérien). Ils ont constaté que 22 peuplements occupant une superficie totale de 1025 hectares ont été retenus. Au centre de chaque peuplement un point GPS, a été pris, puis utilisé pour établir les cartes de localisation par wilaya. Dans un deuxième temps, les peuplements en question sont en cours pour description détaillée permettant leur délimitation plus précise possible, leur caractérisation éco-dendrométrique et le renseignement de fiche signalétique pour chaque peuplement. En parallèle, les données recueillies sont transcrites au fur et à mesure dans la base de données géographique préalablement élaborée [41].

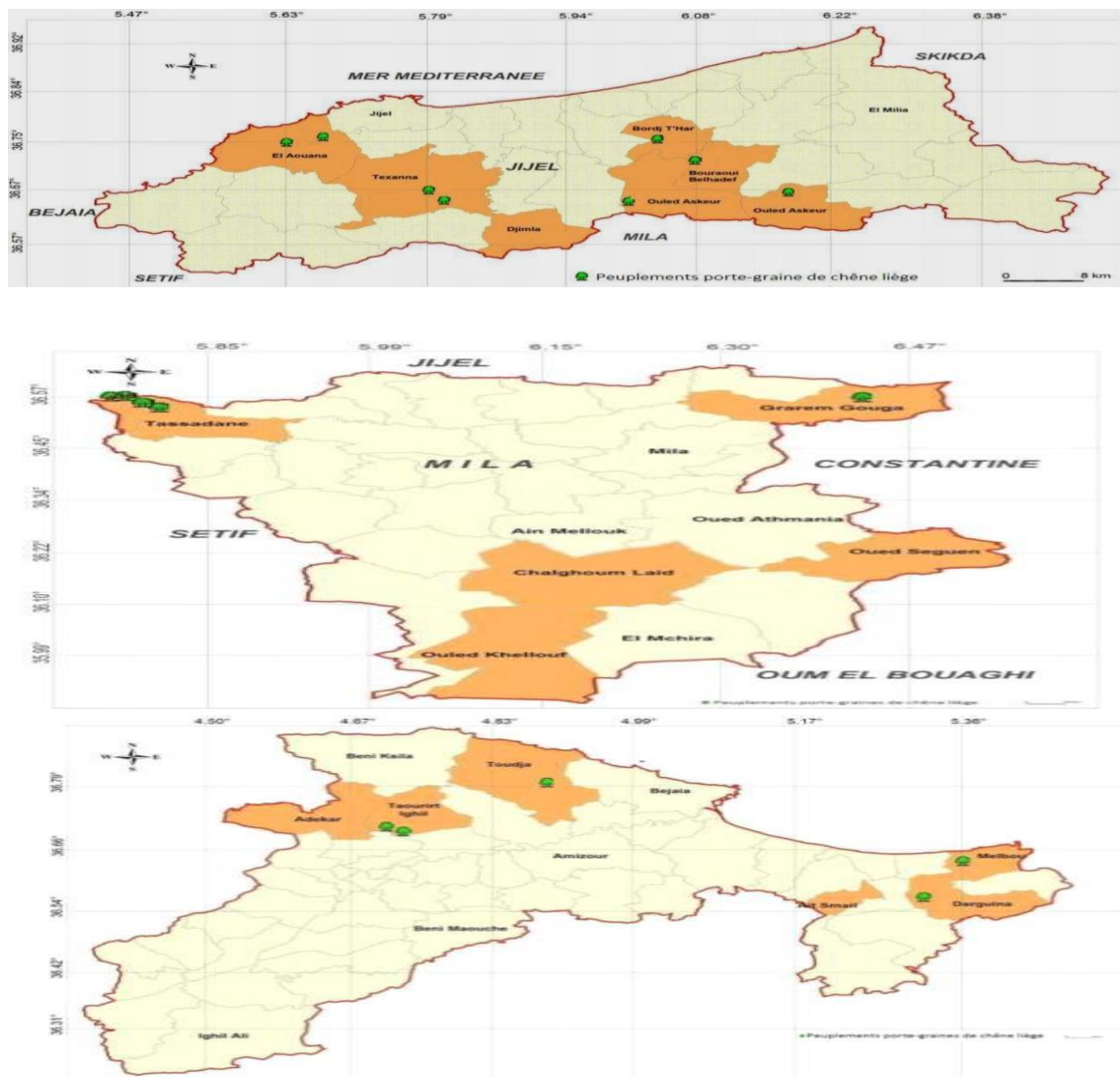


Figure I-18 : Cartographie et description des peuplements porte-graines de chêne liège [41].

I-2-3-Anatomie du liège

Les cellules du liège ont été étudiées au microscope optique, la première fois par Hooke en 1664, puis par microscopie électronique à balayage par Gibson et al. en 1981 [41]. Ces auteurs ont très bien décrit la forme et l'arrangement des cellules du liège selon les trois sections de l'arbre : axiale, radiale et tangentielle (**Figure I-19**).

Dans la section radiale, les cellules sont disposées en «nid d'abeilles» et ont une forme principalement hexagonale. Certaines peuvent avoir cinq, sept ou huit côtés. Cette disposition des cellules permet de considérer que le liège est un matériau isotrope dans le sens radial, impliquant que les directions axiale et tangentielle sont presque équivalentes [41].

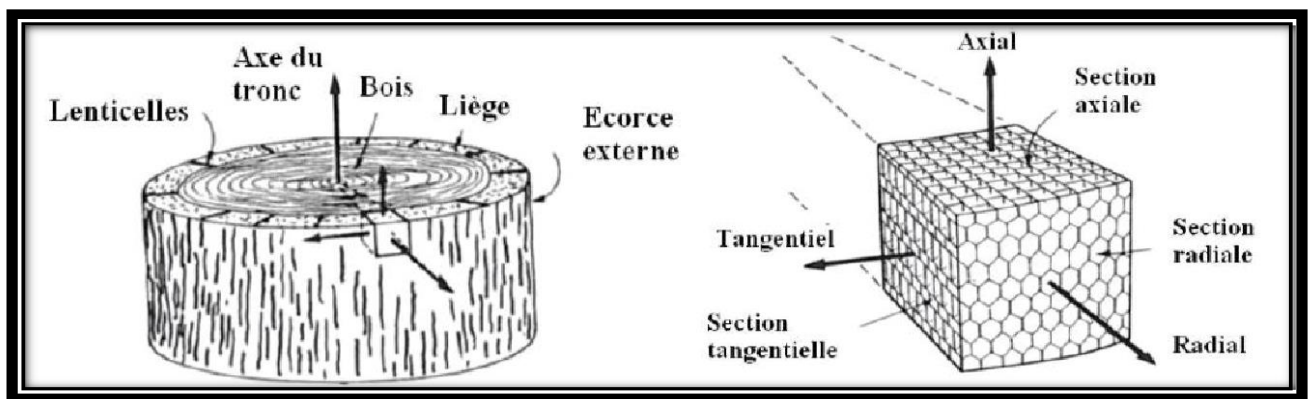


Figure I-19 : a)-Différentes sections de l'arbre : axiale, radiale et tangentielle [43]....[42]

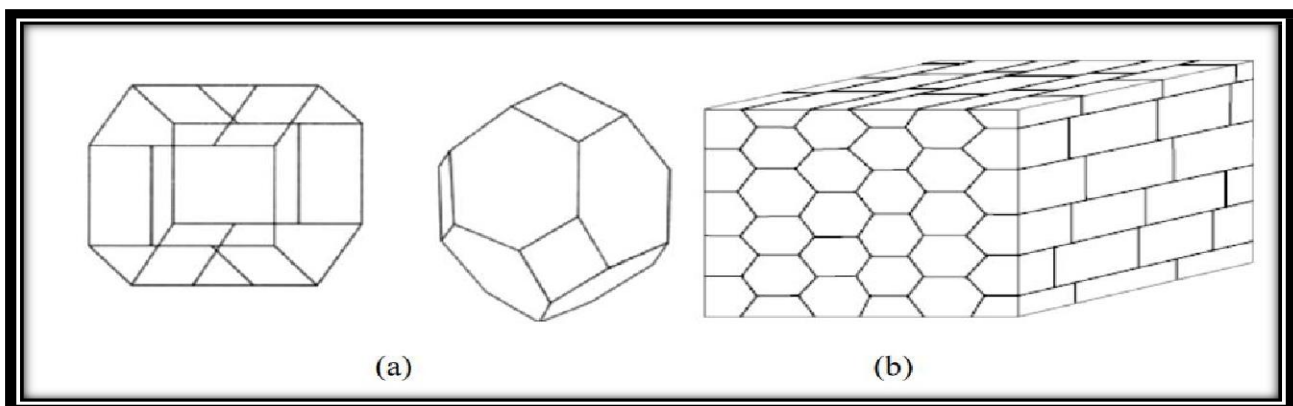
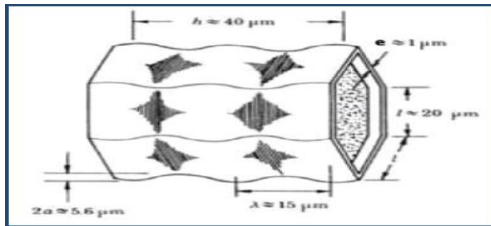


Figure I-19 : b)- Modèle de la cellule de liège et de l'organisation des tissus:(a)cellule individuelle (à gauche) et Kelvin polyèdre (à droite) et (b) l'organisation des tissus [44].

Gibson et al, ont également déterminé les dimensions d'une cellule et ont observé que chaque cellule possède deux ou trois ondulations complètes (**Figure I.19**).



- Epaisseur de la paroi (μm) : $1 \pm 0,5$
- Hauteur de la cellule h (μm) : 43 ± 4
- Longueur d'un côté de la face hexagonale l (μm) : 21 ± 4
- Volume de la cellule (μm^3) $(3\sqrt{3}/2) * l^2 * h$: 5×10^4
- Nombre de cellules N/mm^3 : 2×10^4
- Longueur de l'ondulation λ (μm) : $15 \pm 2,3$
- Amplitude de l'ondulation a (μm) : $2,8 \pm 1$

Figure I-20 : Ondulation d'une cellule et ses dimensions [42].

Ces dimensions peuvent varier légèrement selon les périodes de croissance du liège. C'est également dans cette direction radiale que s'effectue la croissance des lenticelles. Les lenticelles sont des portions du périderme parcourues par de nombreux espaces intercellulaires ou encore décrits comme des canaux cylindriques ou coniques macroscopiques présents à la surface des tiges, des racines et de certains fruits et légumes.

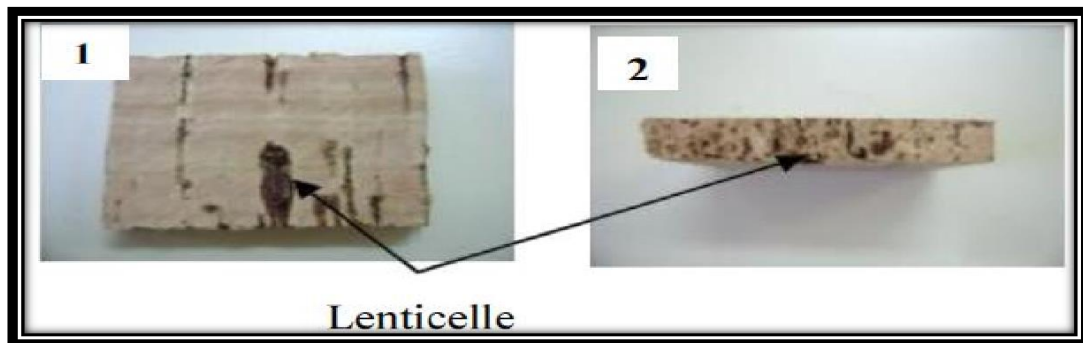


Figure I-21 :- Lenticelles. 1- planche section axiale, 2- planche section radiale [47].

I-2-4- Classification

Le chêne liège (*Quercus Suber*) est un arbre circonscrit-en Méditerranée Occidentale depuis l'ère tertiaire, ce qui lui donne une soixantaine de millions d'années d'existence. Il est décrit pour la première fois par LINNEE en 1753 [46].

Embranchement : *Angiospermes* Sous/Embranchement : *Dicotylédones* Famille : *Fagacées*
 Genre : *Quercus*

Espèce : *Quercus suber*

Nom vernaculaire : *Ballout el feline*

La particularité la plus intéressante du chêne-liège réside dans le fait qu'il produit une écorce extérieure homogène, formée d'un tissu élastique, imperméable et bon isolant thermique : le liège. Cette écorce est constituée de cellules mortes aux parois imperméabilisées par un composé chimique appelé subérine. Tous les arbres produisent des couches de cellules subérisées comme forme de protection, mais seul le chêne-liège est capable de « construire »

son écorce extérieure en ajoutant annuellement des anneaux de liège issus de l'activité d'un ensemble de cellules mères (le phellogène **figure I-22**).

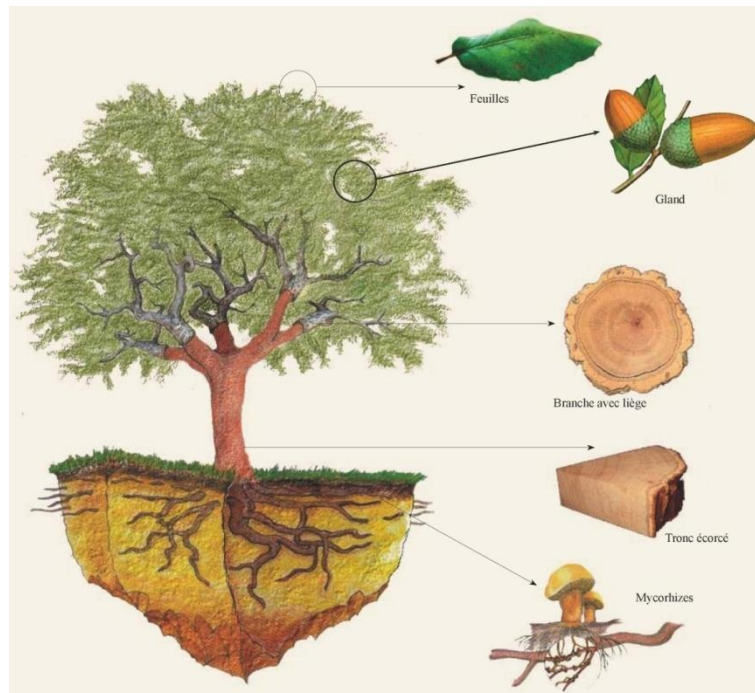


Figure I-22 : Description du chêne liège [46].

I-2-5-Caractéristiques techniques du liège

Le chêne liège est une espèce typiquement méditerranéenne, de taille moyenne 10 à 15 mètre, peut atteindre 20 à 25 m [47]. La moyenne de vie d'un chêne-liège est d'environ 170 ans.[48,49]

Le liège est constitué d'un empilement de cellules qui sont remplies de gaz d'une composition proche de l'air mais plus faible en CO₂. On estime que 1 cm³ de liège comporte entre 15 et 40 millions de cellules.[50]

I-2-6-Constitution du liège

Le liège est constitué de [50, 51,52]:

- **La subérine pour 45%** : Principale composante des parois des cellules du liège et lui permettant son élasticité.
- **La lignine pour 27%** : Elle permet la liaison entre les divers composants.
- **Les polysaccharides, cellulose pour 12%** : Composants des parois des cellules, contribuent à la définition de sa texture.
- **Les tannins pour 6%** : Ils déterminent la couleur.
- **Les céroïdes pour 5%** : Composés hydrophobes assurant l'imperméabilité.
- **Les autres constituants pour 5%** : Minéraux, eaux, glycérine....

Une étude menée par **Gil et al [49]** En utilisant des techniques de RMN, il a été vérifié que la subérine est responsable de l'imperméabilité à l'eau de liège.

I-2-7-Qualités du liège

La composition chimique, avec sa structure cellulaire particulière, fournit en liège avec d'excellentes propriétés [50, 53, 54, 49]:

- **Elasticité - Compressibilité – Souplesse** : Comprimé rapidement dans sa limite élastique, il reprend presque instantanément 85% de son volume initial. Il Amortit les vibrations par sa structure cellulaire et son élasticité.
- **Légèreté** : Sa faible densité est variable avec la qualité du liège. elle est due à l'air contenu dans ses cellules. Sa masse volumique est comprise entre 100 et 130kg/m³.
- **Imperméabilité - Etanchéité**: Il absorbe moins de 18 à 20% d'eau. Il résiste à l'action des hydrocarbures. Il ne conduit pas d'électricité.
- **Imputrescibilité – Durabilité** : Du fait de sa faible perméabilité, il résiste aux agents extérieurs. Il résiste aux parasites, termites et rongeurs. De plus il ne moisit pas.
- **Faible conductivité phonique et thermique** : Du au fait que l'air reste enfermé dans ses cellules (minuscules compartiments étanches) et isolé par une matière non hygroscopique (substance qui a tendance à absorber l'humidité de l'air) et de faible poids spécifique. Son coefficient de conductivité thermique est compris entre 0,035 et 0,045 W/m.K (à titre de comparaison, celui des différentes laines de verre est compris entre 0,035 et 0,060 W/m.K); c'est la raison pour laquelle le tissu subéreux du chêne liège figure parmi les substances douées de la plus haute capacité isolante. Il absorbe un maximum des ondes sonores grâce à sa structure cellulaire unique.

I-2-8-Comparaison entre le liège et le bois

Le granulé de liège peut être considéré comme un agrégat léger plutôt que des fibres de renfort. La différence la plus caractéristique de la composition chimique entre le liège et le bois est la présence de subérine dans le liège, la subérine est un polymère composé d'alcools aliphatiques à longue chaîne et de monomères d'acide. Il est hydrophobe et lorsqu'ils sont combinés avec des cires, il contribue de manière significative à l'imperméabilité du liège [49]

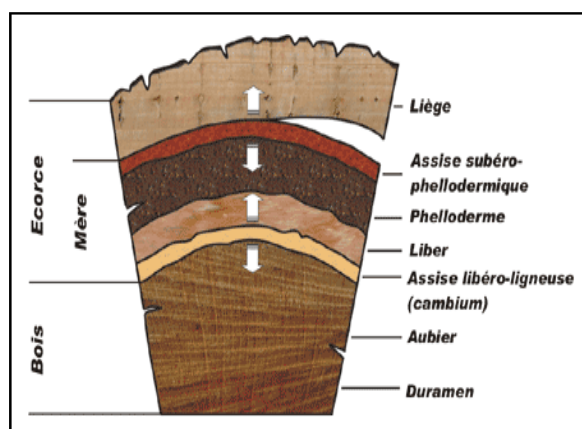
Tableau I-8 : Comparaison de la composition chimique du liège et de bois [49]

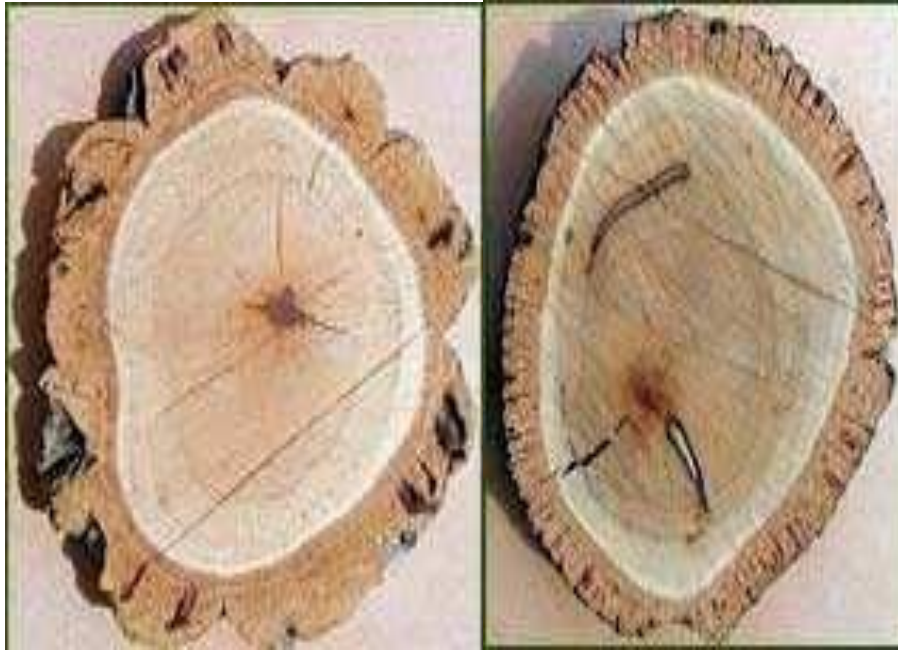
Constituents principales (% en poids)	bois		liège
	résineux	bois	
Cellulose	40 - 45	45 - 50	9
hémicelluloses	20 - 30	20 - 35	11
lignine	26 - 34	22 - 30	22
Extraits	0 - 5	0 - 10	15 - 20
Subérine	---	---	40

Il peut être vu que le bois est plus fort que le liège. Cela peut être dû au fait que le bois est un matériau cellulosique contenant de la fibre, alors que le liège est un matériau granulaire et ne contient que 9% de cellulose par rapport au bois, qui contient de 40 - 50% de la cellulose.[49]

I-2-9- Production du liège

L'écorce est composée de deux parties. La plus interne est dite écorce mère (**Figure I-23**) qui produit le liège, écorce qu'il ne faut pas abîmer lors de la récolte. La première écorce d'un arbre est dite mâle (**Figure I-24**): c'est un liège de mauvaise qualité, qui se développe naturellement sur le tronc et les branches de l'arbre. Il est susceptible d'atteindre une forte épaisseur (jusqu'à 25 ou 30 cm), mais il se crevasse fortement en vieillissant, devient compact, siliceux, dépourvu d'élasticité, ce qui ne permet pas de l'utiliser pour l'industrie.[51]

**Figure I-23:** Schéma de constitution de liège [51]



A : Liège male

B : Liège femelle

Figure I-24: Liège mâle et femelle

Pour récolter du liège de bonne qualité, écorce liégeuse, plus régulière, plus homogène, plus élastique et moins crevassée, il faut enlever cette écorce mâle sur des sujets assez âgés, et attendre que l'écorce mère produise à nouveau du liège. L'écorce primitive est coupée sur une hauteur de deux mètres environ, et les troncs présentent alors une couleur brun rouge très caractéristique sur toute la partie démasclée. L'écorce mère va donc produire à nouveau des Tanins, donc une épaisseur de liège dit écorce femelle (**Fig I-24**) que l'on récolte environ tous les dix ans. Cette opération s'appelle le levage (**Fig I-25**), et elle est faite par un leveur, avec un outil spécial. [55].

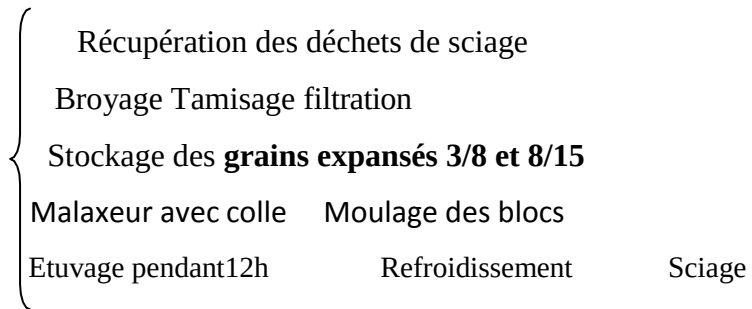
**Figure I-25 :** Récolte de liège

La moitié de l'écorce de ces arbres est soigneusement enlevé tous les 9-12 ans [49]. La qualité de liège est ensuite croissante puis elle finit par diminuer au fur et à mesure que l'arbre vieillit : Un chêne-liège peut ainsi subir entre 12 et 15 écorçages au cours de sa vie. [51]

Pour le liège expansé, le liège peut provenir directement de la levée, de liège à recycler ou peut être récupérer sur les branches et les arbres morts. Il est broyé puis stocké sous forme de granulés. Les granulés sont injectés dans des blocs. Ils sont passés au four à 380°C, Cuit à haute température, le liège se dilate et s'agglomère avec sa propre résine (la subérine) pour donner le liège expansé pur. A leur sortie du four, de l'eau est injectée dans les blocs pour permettre leur stabilisation et éviter la sur-cuisson. Les blocs sont stockés pendant une quinzaine de jours pour assurer leur stabilisation. Les blocs sont ensuite dimensionnés Comme voulu et découpés en plaques de largeur 50 cm et longueur 100 cm et d'épaisseur variant de 2 à 30 cm.

La fabrication des plaques en liège expansé au niveau de l'usine de Jijel se déroule selon les étapes suivantes : [56]

- 1) **Approvisionnement** : Matière première : lièges (Mâle, rebut, ramassage, bandes perforées (récupération)).
- 2) **Meunerie**
 - Concassage 0 à 50mm filtration
 - Broyage 0 à 22 mm filtration
 - Tamissage 3 à 22 mm stockage
 - > à 22 mm
 - Broyage 2^{ème} passe filtration
 - Tamissage 2^{ème} passe stockage
- 3) **Séchage**
 - Grain humide séchage filtration
 - Grain sec (taux humidité ≤ 8 %)
- 4) **Agglomération**
 - Cuission à la vapeur surchauffée T° = 380 °C
 - Capacité 260 blocs / 8 h chaque bloc (p = 21 à 22 kg, v = 0,17 m³)
 - Stockage des blocs
- 5) **Sciage**
 - Équarrissage (longitudinale -transversale)
 - Sciage des plaques (2, 3, 4, 5,630 cm)

6) Reagglomération**I-2-10- Utilité du liège****1-Bouchons en liège naturel**

Pendant plusieurs siècles, le liège s'est avéré être la fermeture la plus efficace pour le vin, la protection de ses qualités et lui permettait de développer et d'améliorer au fil du temps. La technique d'arrêt des bouteilles de vin au nettoyage, le liège non scellé a été perfectionné par les moines bénédictins au VIIe siècle [55, 56] puis, en 1680, la première utilisation de liège pour fermer champagne par Don Pierre Pérignon, a été le précurseur commencé d'une révolution dans le vin en bouteille

[36, 59, 60], l'imperméabilité du liège aux liquides et aux gaz, provenant du fait que ses parois cellulaires fermées sont principalement constituées de subérine, et sa grande compressibilité et la flexibilité. Il est idéal pour étanchéité des bouteilles [36, 59, 60]. Le liège est recommandé pour les bouteilles de vin de réserve et des vins qui ont besoin de l'âge dans la bouteille. Les bouchons en liège naturel sont perforés directement de la meilleure écorce de liège de qualité.

2-Isolation du liège

Pour les applications d'isolation, des agglomérats de granulés de liège (noir), sont employés. Ils sont fabriqués dans un autoclave fermé à une température élevée (environ 300°C) et de pression (environ 40 KPa), sans l'utilisation de colle [61, 62]. Ce processus industriel induit la dégradation thermochimique de la paroi cellulaire du liège [64], avant l'expansion de ces granules, comme discuté ailleurs [63]. Les sous-produits de dégradation agissent comme des adhésifs naturels entre les granules à former le liège [64, 65, 66]. Ces agglomérats expansés de noir sont produits à partir des bouchons de qualité résiduelle et plus faible, impropres à d'autres applications ou à partir de déchets de liège et les résidus provenant d'autres procédés industriels [40, 67, 68]. Isolation du liège aggloméré à trois applications principales : isolation thermique [61], absorption acoustique et amortissement des vibrations. Ainsi, les agglomérés de liège sont utilisés pour diverses applications de construction ; les murs intérieurs ou extérieurs, des bâtiments et des plafonds, pour fournir une isolation thermique et acoustique et l'isolation de sous-revêtement pour minimiser la transmission des bruits de répercussion

[69,70].

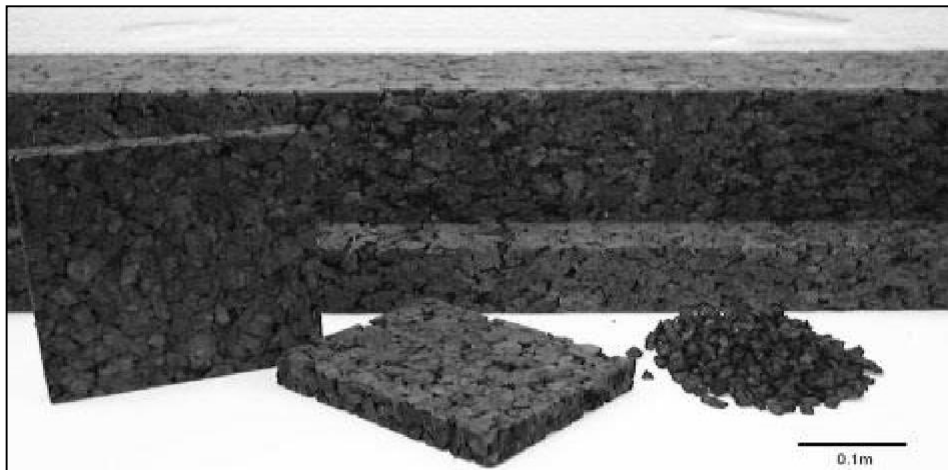


Figure I-26: Différentes formes de panneaux isolants en liège [71].

Tableau I-9 : Propriétés d'isolation en liège aggloméré [61, 70].

Propriété	Intervalle de valeurs
Densité [Kg m^{-3}]	100-130
Température de fonctionnement [K]	97–383
Conductivité thermique (20°C) [$\text{KJ m}^{-1} \text{S}^{-1} \text{K}^{-1}$]	4.1×10^5
Chaleur spécifique (20°C) [$\text{KJ Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]	1.7-2.1
Coefficient de dilatation thermique [W/C°]	40×10^{-6}
Perméabilité à la vapeur [$\text{Kg Pa}^{-1} \text{S}^{-1} \text{m}^{-1}$]	4.2×10^{12} à 12×10^{12}
Résistance à la traction [MPa]	0.05
Résistance à la compression à 10 % [MPa]	0.25
Flexion traction* [KN m^{-2}]	1.6×10^4

* Force pour matériau de flexion avec une surface transversale.

I-2-11-Autres applications

Au cours de la production de bouchon, une grande quantité de liège n'est pas utilisée car elle ne convient pas ou est éliminée au cours de la production. Ce matériau est granulé et utilisé dans une variété d'applications, principalement pour la production de composites de liège/caoutchouc à usage général aggloméré [72] et agglomérats de paroi [73] et revêtements de sol.

Pour la fabrication d'agglomérés, des granules de liège sont mélangés avec un liant polymère et compressés à chaud, sous pression. Les variables les plus importantes dans ce processus sont la taille et la fraction de granules de liège dans le mélange (aussi élevé que 90% en poids)

; le type de liant polymère (des polyuréthanes, des résines phénol-formaldéhyde, etc.) et de la densité de tassement. Les blocs obtenus sont stratifiés, en forme de dimensions finales et terminés. Des articles tels que des semelles de chaussures, [74] tableaux d'affichage, des cadeaux et des panneaux sont produits de cette manière. Les agglomérats de panneaux de sol décoratifs sont réalisés d'une manière similaire, mais plus rigide et plus solide. Ceci est habituellement accompli en changeant la pression de remplissage ou à l'aide d'un liant différent. Dans certains cas, une couche polymère de protection est utilisée pour augmenter la résistance à l'usure. Ces agglomérats peuvent être utilisés seuls ou en produits multicouches (ensemble avec les panneaux de fibres de bois à haute densité, polymère et des couches adhésives). Les propriétés les plus importantes du liège pour cette application sont sa haute résistance et d'absorption d'énergie, près de coefficient de Poisson zéro (pour plus de confort lors de la marche) et coefficient de friction élevé. Composites liège / caoutchouc sont produites par addition de granulés de liège pour une formulation de caoutchouc ; le mélange est ensuite aggloméré, vulcanisé et façonné. Presque tous les types de caoutchoucs peuvent être mélangés avec du liège [75]. La principale application de ces composites est: les joints [76] pour les voitures et les contenants d'huile. En plus ils sont imperméables aux liquides, le faible ratio de Poisson de liège signifie que ces joints ne souffrent pas d'extension latérale excessive [77].

I-2-12-Tendances futures

Le liège possède des propriétés spécifiques (physiques, chimiques et mécaniques) qui lui confèrent un grand potentiel pour de nouvelles applications. Par exemple, le liège a été choisi pour une application aéronautique en raison de ses propriétés thermiques, la vitesse de combustion lente et l'absorption des chocs capacités [78].

Sur les **figures I-27et I-28** sont les applications mentionnées ci- dessus, respectivement.



Figure I-27 : Bouchons agglomérés, panneau d'affichage, des semelles de chaussures et des revêtements de sol [79].

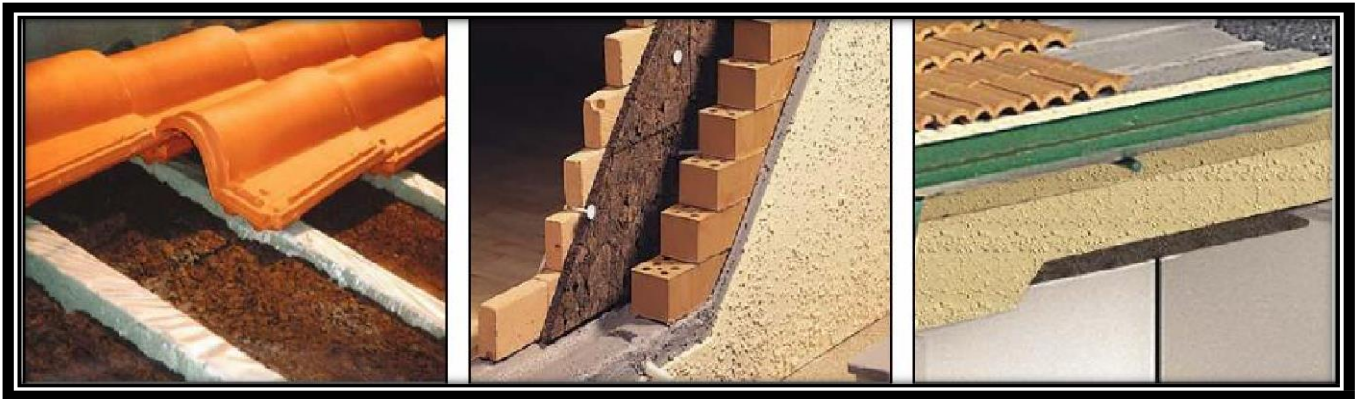


Figure I-28 : Isolation de la toiture, isolation des murs creux et des toitures et des combles isolés [79].

I-3-Béton léger à base de granulats de liège

Plusieurs études ont été faites sur l'incorporation des granulats de liège au ciment et au plâtre pour obtenir un matériau composite.

Parmi ces travaux on trouve :

Aziz et al. [80], ont utilisé des granulés de liège obtenu à partir de l'emballage des déchets d'étals de fruits à Singapour pour fabriquer des produits en ciment liège. Ils ont mélangé le ciment et le liège dans la ration de 1:1 à 1:3 en volume et faites des échantillons de béton avec un écart de densité de 475 à 890 kg/m³, qui avait des forces de compression dans la gamme de 4,2 à 12,0 MPa et résistance à la traction entre les 0,6 et 2,0 MPa. Ils n'ont pas signalé de problèmes de compatibilité entre le ciment et le liège.

Fernando G. Branco et al [54], ont utilisés deux types de granulés de liège (naturels et le liège expansé) au lieu des granulats calcaires grossières primaire et / ou du sable de rivière. Comme prévu, quand le pourcentage de liège granulé a augmenté, la résistance à la compression du béton est tombée.

Lorsque le liège expansé est utilisé pour remplacer les agrégats, la perte de résistance a été généralement plus élevée que lorsque le liège naturel a été utilisé.

La **figure I-29** montre la variation de la résistance à la compression avec la densité apparente. Les résultats indiquent que la force moyenne du béton contenant des granulats de liège est étroitement liée à sa densité apparente.

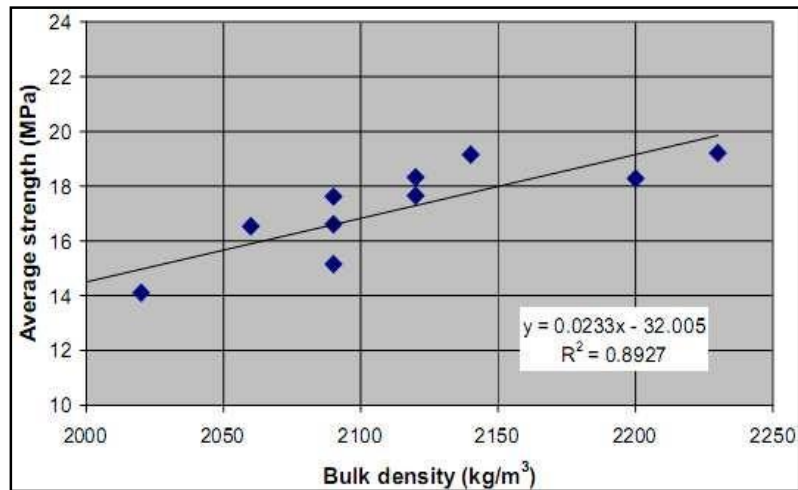


Figure I-29: Variation de la résistance moyenne à la compression en fonction de la densité apparente. [54]

La **figure I-30** montre la variation de la résistance moyenne à la compression avec la quantité de liège contenue dans le mélange. Une perte de force peut être observée avec l'augmentation du pourcentage de liège. Les deux types de liège étudié conduisent à des baisses similaires en force.

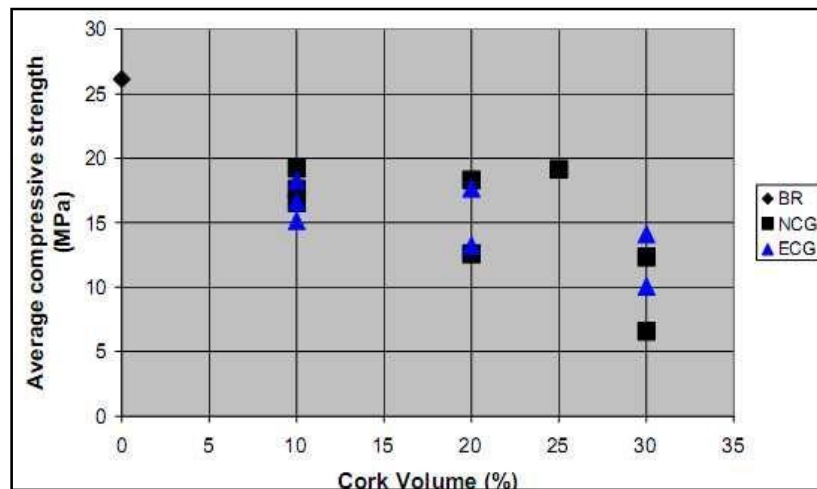


Figure I-30 : Variation de la résistance moyenne à la compression en fonction du volume de liège. [54]

Où : BR (béton de référence), NCG (granulat naturel de liège), ECG (granulat expansé de liège).

Harnandez-Olivares et al [81], ils ont utilisé des déchets de liège avec du gypse pour la fabrication de matériaux composites. Ils ont trouvé de bonnes propriétés d'isolation thermique du composite. Basé sur l'examen de la liaison entre le plâtre et le liège par microscope électronique à balayage (MEB), ils ont rapporté une bonne compatibilité entre le gypse et le liège.

Fernando G. Branco et al [82], ont évalué la durabilité du béton de liège vis-à-vis du phénomène de gel-dégel. Trois différentes compositions ont été étudiées : BR (béton de référence) , BAER (béton contenant un produit entraîneur d'air), BE (béton de granulat de liège expansé).

La **figure I-31** montre que BR est le plus dégradé que les autres bétons.

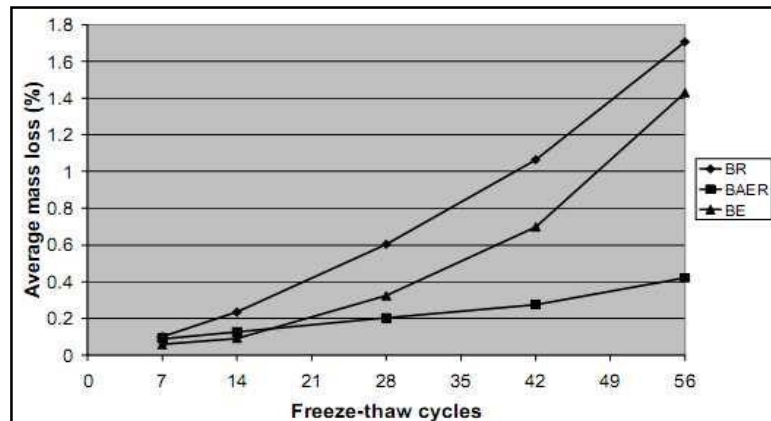


Figure I-31: Masse sèche cumulé du matériau dégradé. [82]

En termes de dégradation de la surface. La performance du béton BE est approché à celui de BR. La perte de sa résistance mécanique est similaire à celui observé en BR.

Une augmentation de la résistance à la compression avec l'âge a été observée, pour tous les types de béton testé. La perte de la résistance mécanique du béton BE est similaire à celui observé en BR.

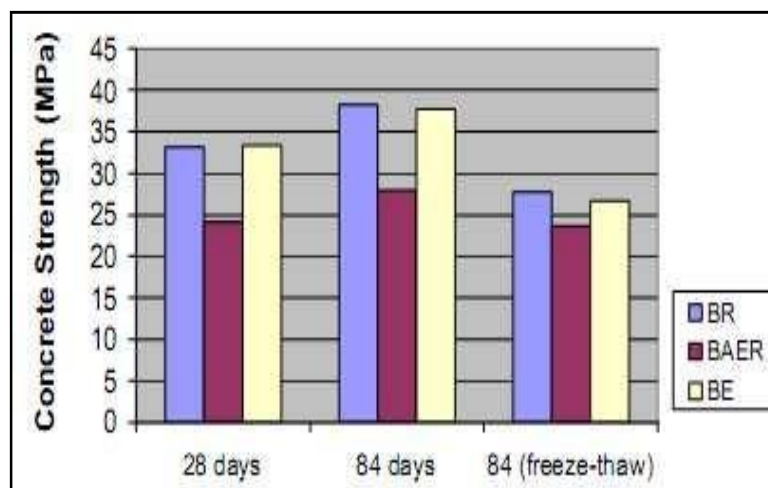


Figure I-32: Résistance moyenne à la compression du béton. [82]

Merabti Salem [83], a fait une étude expérimentale sur trois types de déchets de liège (expansé, cru et poudre de liège expansé) et mélangé en volume avec le ciment (C/L :1/1, C/L :1/2, C/L :1/3) pour obtenir un matériau composite.

Les résultats de l'étude expérimentale ont montré que la résistance à la compression et à la traction diminue avec l'augmentation du volume des granulats du liège et l'absorption d'eau par immersion est très élevée pour les deux matériaux (expansé, cru), elle est comparable à celle du béton léger. La conductivité thermique du matériau élaboré varie entre 0.19 à 0.34 W/m.°C selon le dosage de liège .

Le composite à base du liège expansé a une meilleure performance mécanique à celui à base du liège cru. Néanmoins, le composite à base du liège cru possède des bonnes performances d'isolation thermique et acoustique. Les résultats obtenus sur ces matériaux composites ont montré la possibilité de l'utilisation de ces matériaux dans l'isolation des toitures et des cloisons.

EL BAKKOURI.A et al [84], ont constaté une nette amélioration du pouvoir d'isolation thermique du béton incorporé du liège. Ceci s'explique par une porosité fermée très grande dans les granulats du liège. Ce résultat apparaît évident si on compare les valeurs de la conductivité thermique apparente à l'état sec, dans le cas du liège granulaire ($\lambda = 0.034$ W/m°C, **figure I-33**).

D'après les résultats obtenus, ils remarquent que la résistance à la compression diminue en augmentant la quantité du liège.

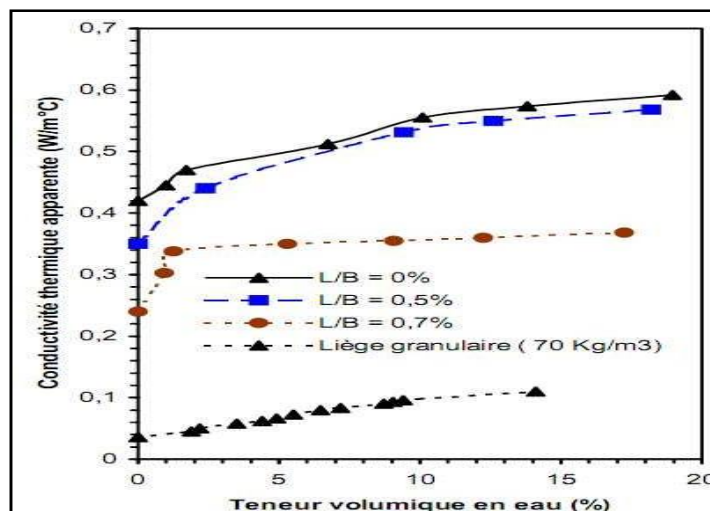
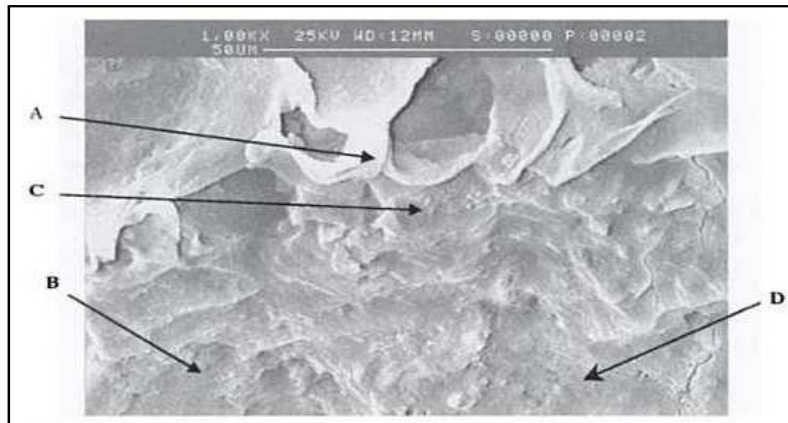


Figure I-33 : Variation de la conductivité thermique apparente en

fonction de la teneur volumique en eau : cas du béton de liège. [84]

Karade.S.R et al [49], ont trouvé une bonne liaison entre liège -ciment, que peut être vu dans la **figure I-34**. Après la fissuration de la pâte de ciment, le lien entre les cellules du liège et de la pâte de ciment est intact.



A : paroi cellulaire du liège, B : pâte de ciment hydraté, C : une bonne liaison entre la paroi cellulaire du liège et de la pâte de ciment, D : fissure dans la pâte de ciment.

Figure I-34 : Micrographie d'échantillons de la composition liège - ciment fracturée (MEB). [49]

Les résultats indiquent que les granulés de liège réduisent considérablement la résistance de la composition. L'avantage d'utiliser des granulés de liège est qu'ils contiennent plusieurs cellules ouvertes à leurs surfaces. Cela facilite une bonne liaison avec la pâte de ciment, comme on peut le voir dans la **figure I-34**. Depuis le liège contient environ 85% en volume de vides d'air, son ajout à la matrice de ciment réduit la densité du béton. Il en résulterait une conductivité thermique réduite.

Lorsque la charge est appliquée sur les cellules du liège, du gaz au sein de la cellule est compressé et donc aucune expansion latérale a lieu, ce qui permettra de réduire le fractionnement latérale de composites.

R. Eires et al [53], ont utilisés des déchets de l'industrie de liège contenant différentes tailles de particules dans la fabrication de plâtre et des panneaux de plâtre pressés, avec des pourcentages de 2,5% et 5% de la masse de gypse.

Les résultats obtenus montrent que l'incorporation de granulés de liège semble être possible et durable et réduire la densité du mélange notamment l'amélioration des comportements thermiques et acoustiques. Toutefois, réduit les performances mécaniques.

I-4- Les bétons de fibres

Le choix du renfort est très important. Il doit avoir de bonnes propriétés intrinsèques de résistance (module d'élasticité, géométrie, etc.), être compatible avec la matrice cimentaire et doit aussi avoir un coût acceptable. Les fibres métalliques, qui proviennent d'une source renouvelable, sont une voie de recherche intéressante.

Le béton ou le mortier renforcé de fibre métallique répond au souci de plus en plus important des pays développés pour la préservation de l'environnement, la valorisation des déchets, l'isolation thermique- acoustique et le coût.

I-4-1- Définition des bétons fibrés

Le béton fibré est un béton dans lequel est incorporé des fibres, Une technique récente, consiste à ajouter au béton des fibres afin d'en améliorer ces propriétés mécaniques (compression, fissuration, flexion).

A la différence des armatures les fibres sont réparties dans la masse du béton, elles permettent de constituer un matériau qui présente un comportement homogène, les fibres les plus couramment utilisées sont les fibres métalliques, les fibres organiques, les fibres synthétiques

I-4-2- Définition des fibres

Le terme fibre se rapporte à un corps solide flexible. La fibre est un composant filiforme (rapport longueur /diamètres est très élevé : 25-1500) de faible longueur (5- 60mm) et dont l'épaisseur est comprise entre 0.005-0.75mm les fibres sont disponibles sous différentes formes (rondes, plates, gaufrées) d'origine minérale, organique ou métallique, les fibres sont courtes et dispersées dans toute la masse de béton [85].

L'utilisation des fibres dans la construction remonte à plusieurs siècles. Depuis les trente dernières années, l'intérêt de leur utilisation ne cesse de croître pour la fabrication de béton prêt l'emploi du béton préfabriqué et du béton projeté fabriqué à partir soit d'acier, soit de plastique, de verre, de matériaux naturels. Elles sont ajoutées au béton lors du malaxage.

I-4-3- Choix du type de fibres

Il existe différents types de fibres dont les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques diffèrent selon leur nature ou leur géométrie.

Les fibres couramment utilisées pour la fabrication de bétons renforcés de fibres, sont généralement métalliques, synthétiques, de verre ou naturelles. Selon leur utilisation, ces différents types de fibres présentent des avantages ou des inconvénients. Certaines sont

affectées par des dégradations chimiques dans les matériaux cimentaires ou présentent un mauvais comportement dans les milieux alcalins (certaines fibres de verre ou fibres naturelles) [86].

Leur géométrie est très variable (**Figure I- 34**). Les fibres les plus utilisées sont les fibres droites. C'est l'adhérence de ces fibres avec la matrice cimentaire qui diminue la fragilité du béton par amélioration du comportement post-fissuration.

Il existe des fibres à crochets. Leurs extrémités recourbées développent un ancrage et dissipent une énergie de fissuration par plastification de la fibre et par frottement à l'interface avec la matrice [88].

On trouve aussi des fibres ruban, des fibres à tête d'ancrage ou encore des fibres ondulées dont les modes de fonctionnement sont les mêmes que ceux cités précédemment.

L'avantage des fibres à crochets ou ondulées est qu'elles développent un ancrage supplémentaire, en plus de l'adhérence avec la matrice, les rendant plus efficaces que les fibres droites. Cependant, ce type de fibres peut engendrer la formation d'oursins durant la fabrication entraînant alors une répartition non homogène dans le béton. Les fibres droites sont généralement utilisées pour pallier à ce problème, mais, ne fonctionnant que par adhérence avec la matrice, leur efficacité s'enrissent.

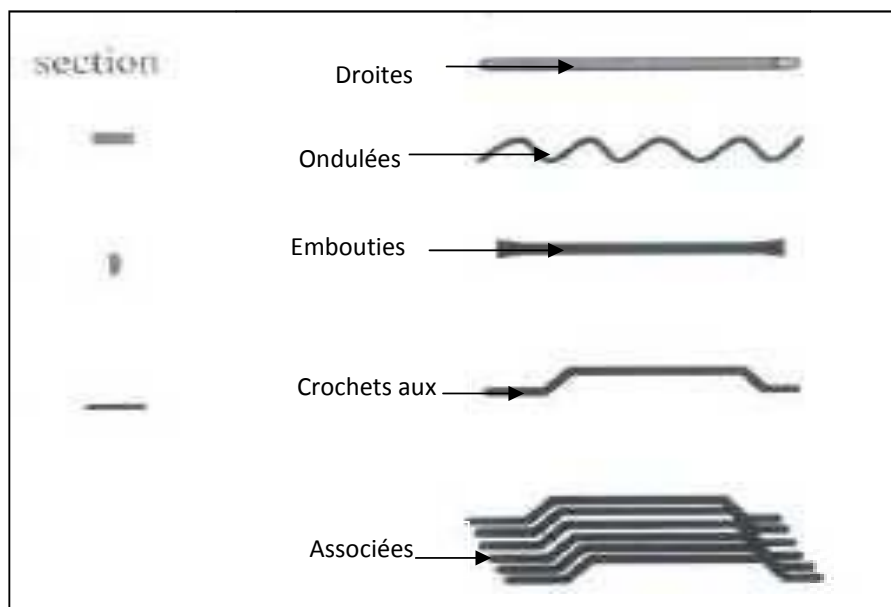


Figure I-35 : Différentes formes géométriques de fibres métalliques [87].

L'élanement ou le rapport longueur/diamètre joue un rôle prépondérant dans la maniabilité d'un béton renforcé de fibres (notamment métalliques) [87].

Pour une longueur de fibre et un volume donnés, plus le diamètre de la fibre sera faible,

plus la surface spécifique sera grande. Ceci conduit à des frottements plus importants entre la fibre et la matrice, mais aussi à un nombre de fibres élevé qui augmente la probabilité de contact entre celles-ci. Ceci conduit à une diminution de la maniabilité quand le rapport longueur/diamètre augmente.

Pour un rapport longueur/diamètre fixe et un dosage en fibres donné, si le diamètre diminue, la longueur va elle aussi diminuer. Selon le raisonnement précédent, ceci conduit à une diminution de la maniabilité ce qui est en décalage avec la réalité car dans ce cas, le poids unitaire de la fibre intervient.

En résumé, pour une maniabilité donnée, on peut utiliser un dosage important de fibres courtes ou un dosage faible de fibres longues.

De même, le rapport longueur de la fibre/diamètre du plus gros granulat est aussi un paramètre prépondérant concernant l'efficacité des fibres dans le béton. Rossi explique que dans le cas où la résistance de l'interface entre la matrice cimentaire et le granulat est inférieure à la résistance du granulat et de la matrice, les fissures se développent à cette interface avant de pénétrer dans la matrice. Si la longueur des fibres est proche du diamètre des plus gros granulats, une majorité d'entre elles ne pourront intercepter efficacement les fissures intergranulaires. Pour que les fibres interviennent au niveau de la structure, il est préconisé dans la littérature un rapport longueur de la fibre/diamètre du plus gros granulat de deux à trois.

Dans le cas où la résistance à l'interface entre la matrice cimentaire et les granulats n'est pas la plus faible, les fissures traversent à la fois la pâte et les granulats. Les fibres peuvent alors être pleinement sollicitées, et l'utilisation de fibres de longueur inférieure à trois fois le diamètre du plus gros granulat peut être envisagée. [107]

I-4-4- Différents types de fibres

Chaque type de fibre présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propre :

- ✓ Dimensions (diamètre, longueur...), forme (lisse, rugueuse, plate, ondulée, crantée...),
- ✓ Résistance à la traction et adhérence au béton, qui procurent un comportement mécanique spécifique aux structures renforcées de fibre [88].

I-4-5-Différentes nature de fibres

Les fibres sont classées selon leur origine(naturelle, synthétique ou artificielle), leur forme (droite, ondulée, aiguille, ...etc), leur dimension (macro ou micro-fibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques. Les principales fibres utilisées sont:

1-Fibres naturelle :

➤ Fibres végétales :

La principale fibre végétale est la cellulose qui résiste aux alcalis. Les fibres végétales résistent aussi à la plupart des acides organiques mais sont détruites par les acides minéraux forts. Il existe quatre sortes de fibres végétales : les fibres provenant des poils, les fibres du liber, et les fibres extraites des troncs de certaines graminées. Elles sont souvent utilisées dans la fabrication du papier et dans les panneaux de construction (fibres de bois) [88].

➤ Fibres animale :

Les fibres animales sont composées principalement de protéines. La kératine constitue les poils (dont les laines en tout genre) et les plumes. La soie est une sécrétion de fibroïne produite par le ver à soie, chenille d'un papillon du genre bombyx et les araignées. La laine et les plumes sont des très bons isolants pour la construction.

2-Fibres minérales :

➤ Fibres d'amiante :

Ces fibres sont considérées comme les renforcements les plus anciens des matrices cimentaires et aussi pour la confection de tissus résistants aux feux. Elles sont en fait, des bâchettes de micro- fibres extrêmement fines, difficilement fusibles (vers 1500°C) et ont l'avantage d'être inattaquables par les ciments. Elles possèdent une excellente tenue au feu, une bonne résistance à la traction et un module d'élasticité élevé. Elles sont aussi plus résistantes aux agressions chimiques et aux microorganismes, ainsi que leur résistance électrique élevée. Les fibres d'amiante sont utilisées dans les applications suivantes : voiles, tuyaux, panneaux, matériaux d'isolation thermique et protection contre le feu, tuyaux d'égout, plaques de toitures plates et ondulées, revêtements de mur [89].



Figure I-36: Vue microscopique de fibres d'amiante [89]

Tableau I-10: Caractéristiques mécaniques des fibres d'amiante [89].

Type de fibre	Amiante
Diamètre D (mm)	0.0002 - 0.002
Longueur (mm)	5
Masse Volumique ρ (g/cm ³)	2.6 - 3
Résistance à la rupture s_{fu} (MPa)	100 - 300
Module d'Young E (GPa)	80 - 150

➤ **Fibres de verre :**

Ces fibres sont fabriquées à partir de verre fondu qui passe dans une filière, chauffé par effet Joule, qui comporte 50 à 800 trous d'un diamètre de l'ordre de 10 à 100µm. Elles sont disponibles dans le commerce sous forme de bobines (découpage à la demande) ou sous forme de morceaux prédécoupés de 3, 6, 12, et 50 mm de long. Ils sont regroupés en trois types : La fibre de verre classique (silice, soude, chaux), la fibre de verre au zirconium et la fibre de verre au borosilicate. Ces fibres sont généralement caractérisées par les propriétés suivantes :

- Bonne adhérence avec la matrice ;
- Disponibilité sous toutes les formes (coupées, continues ...) ;
- Bonne résistance à l'humidité et à la corrosion ;
- Conductivité thermique relativement faible [89].



Figure I-37: Fibre de verre [89].

Tableau I-11: Caractéristiques mécaniques des fibres de verre [89].

Type de verre	E	R	S
Résistance à la rupture s_{fu} (MPa)	3400	4400	4900
Module d'Young E (GPa)	73	86	87
Masse Volumique ρ (g/cm ³)	2.54	2.55	2.54

➤ **Fibres de carbone :**

Le carbone est très dispendieux ce qui le rend beaucoup moins populaire que le verre moins disponible sur le marché, les fibres de carbone sont cependant reconnues comme étant les fibres les plus performantes.

Les types de fibres de carbone sont classés selon leurs propriétés mécaniques. Ces propriétés dépendent des cycles de pyrolyse ainsi que de la nature du précurseur.

On distingue deux types de fibres divisés en quatre grandes classes de fibres.

- Les types hauts modules soient les classes UHM (Ultra Haut Module) et HM (Haut Module),
- Les types hautes résistances soient les classes THR ou VHS (Très haute résistance ou very high strength) et HR ou HS (haute résistance ou high strength).

Les fibres de carbone sont très fragiles ce qui rend l'opération de malaxage du béton de ces fibres très difficile. Pour cela, elles sont ajoutées par la suite au béton par projection. Par ailleurs, le béton de ces fibres présente des caractéristiques de durabilité très intéressantes [90].

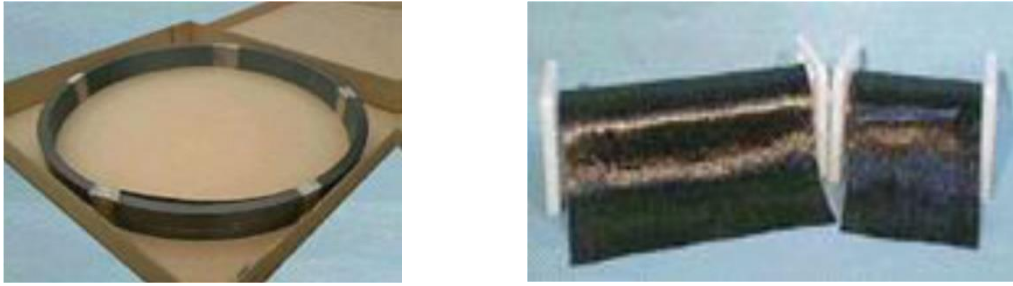


Figure I-38: Fibres de Carbone [90].

Tableau I-12: Propriétés mécaniques des fibres de carbone [90]

Type de carbone	H.R.	H.M.
Diamètre D (mm)	8	8
Masse Volumique ρ (g/cm ³)	1.75	1.81
Résistance à la rupture σ_{fu} (MPa)	3000 - 5000	2800
Module d'Young E (GPa)	220	400

3- Fibres organiques :

Les fibres de polymères ont d'origine plastique, on distingue trois familles principales de ces fibres à savoir [90]:

- Le polyamide, qui représente la famille la plus importante des plastiques par leur tonnage. Le PA résiste mal aux acides minéraux.
- Le polychlorure de vinyle (PVC), est une matière thermoplastique obtenue par polymérisation du chlorure de vinyle. Le PVC résiste bien aux acides et aux alcalis.
- Le polypropylène (PP), est un thermoplastique formé de chaîne linéaire constitué de motifs propylènes dans le cas d'un homopolymère et d'une altération contrôlée de motifs propylène et éthylène dans les copolymères. Le PP résiste bien aux alcalis et aux acides.

Le module de Young de ces fibres est de même ordre de grandeur que celui du béton. L'adhérence fibre-béton est généralement faible, du fait qu'il n'y a aucune liaison chimique possible entre les fibres et la matrice, ce qui limite la reprise des efforts par les fibres à l'interface fibre-matrice après la fissuration de la matrice.

Par contre, il faut noter l'excellente résistance de ces fibres (PVC, PP) vis-à-vis aux acides, aux sels et alcalins du béton [90].

De ce fait, de récentes études menées sur des bétons renforcés par ce type de fibres ont montrés que ce matériau composite présentait des propriétés mécaniques comparables à celle d'un béton renforcé par des fibres de verre [88].

Tableau I-13: Propriétés mécaniques des fibres de polymère [91].

Type de polymère	Référence	Module d'élasticité E (GPa)	Contrainte à la traction (MPa)
PA6.6	Rhône-poulenc A 218	3	90
PVC	PVC rigide de Solvay	2.5	50
PP	RY6100 de Shell	5	40

4-Fibres Métallique:

Les fibres métalliques caractérisées par un module d'élasticité élevé, offrent au béton, une meilleure résistance à la traction, au choc et améliore sa ductilité en augmentant son pouvoir de résister aux déformations dues à la rupture, de même donne une ténacité appréciable, leur forme et leur dimensions améliorent leur ancrage et leur adhérence (fibres, copeaux, fibres tréfilées, ondulées, déformées aux extrémités) [85].



Figure I-39: Différentes forme de fibers [91].

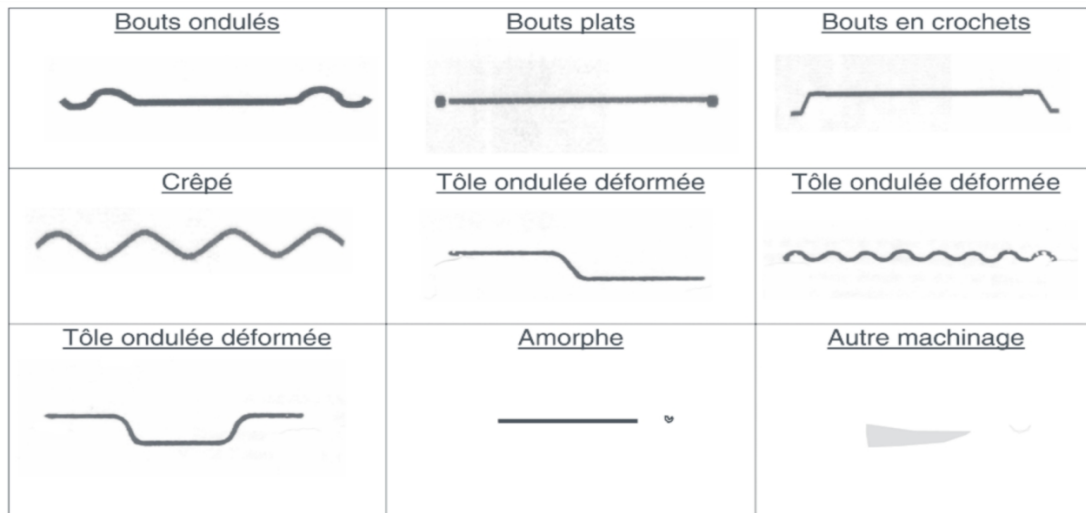


Figure 1-40: Géométrie des fibres métalliques [90].

➤ Les Fibres d'acier

Les fibres d'acier restent parmi les fibres les plus utilisées dans le renforcement des bétons ou mortiers. En effet, ces fibres présentent une bonne résistance à la traction et un module d'élasticité très élevé [92].

I-4-6-Quelques exemples de trois grandes familles de fibres

➤ Les fibres métalliques

- Acier ;
- Inox ;
- Fonte (amorphe) ;
- Cuivre.

➤ Les fibres organiques

- Polypropylène;
- Polyamide;
- Acrylique;
- Mélange polypropylène/polyéthylène;
- Kevlar;
- Aramide;
- Carbone.

➤ Les fibres minérales

- Verre;
- Wollastonite;
- Basalte;
- Mica.

Chaque famille de fibres présente des caractéristiques et des propriétés spécifiques

Tableau I-14 : Les caractéristiques et les propriétés des fibres.

	Masse volumique (g/cm ³)	Diamètre moyen (µm)	Résistance à la traction (N/mm ²)	Module d'élasticité (Gpa)	Allongement à la rupture (%)
Fibres métalliques	7,85	50-1000	1000-2500	150-200	3-4
Fibres de verre	2,6	9-15	2000-3000	80	2-3,5
Fibres polypropylène	0,9	>4	500-750	5-10	10-20

I-4-7-Les atouts des fibres

Grâce à leurs propriétés mécaniques, les fibres permettent de mieux mobiliser la résistance intrinsèque dimensions et d'offrir au du béton, de réaliser des pièces minces de grandes concepteur une plus grande liberté architecturale. Elles confèrent aux bétons de nombreux atouts :

- ✓ La maîtrise de la fissuration.
- ✓ Une facilité et rapidité de mise en œuvre.
- ✓ Un renforcement multidirectionnel et homogène.
- ✓ Un remplacement partiel ou total des armatures passives. [95]

I-4-8-Propriétés des fibres

1-La notion de fibres structurales

La notion de fibres structurales n'est applicable qu'à certains types de fibres métalliques pour lesquelles les résistances résiduelles s'apparentent à l'action structurale des armatures traditionnelles. Il est important de réaliser que le terme « fibre structurale » est inapplicable à la plupart des types de fibres.

Il est à noter que les applications de dalles sur sol ne sont pas considérées comme étant structurales. Les fibres métalliques et les macro fibres synthétiques peuvent être utilisées en concentration nécessaire pour satisfaire aux spécifications du devis. [94]

2-Le facteur d'élanement

Le facteur d'élanement est défini par un ratio géométrique. Le facteur d'élanement est donc le ratio qui représente le rapport de la longueur sur le diamètre équivalent de la fibre. Le **Tableau I-15** indique des valeurs de ratio pour certains types de fibres.

Le lien entre la matrice du béton et la fibre augmente proportionnellement avec le facteur d'élanement. Par contre, les fibres avec un facteur d'élanement supérieur à 60 et dotées d'une géométrie particulière sont potentiellement susceptibles de former des « oursins ».[94]

Tableau I-15: Facteur d'élanement

Types de fibres	Élanement (L/D)
Macrosynthétiques	50-100
Métalliques	25-100
Fonte amorphe	1200-1400
Polypropylène	140-1700
Carbone	150-400

3-La performance

La performance des fibres est directement reliée à la valeur de résistance résiduelle qu'il est possible d'obtenir pour une formulation donnée d'un béton. La performance des fibres est évaluée selon différentes normes japonaises et américaines.[94]

4-La valeur de résistance résiduelle

Les fibres dans le béton apportent une meilleure résistance aux déformations en flexion des ouvrages de béton soumis à des charges. C'est lorsque apparaît la première fissure que les fibres sont sollicitées et qu'il est possible de déterminer une valeur de résistance résiduelle. Effectivement, les fibres apportent une meilleure cohésion et résistance intrinsèque de la matrice et augmentent ainsi la résistance à la propagation et à l'augmentation de la fissuration. Les fibres permettent une reprise de charge en postfissuration.

Il existe trois méthodes d'essais de référence qui donnent des valeurs différentes pour la détermination de la résistance résiduelle :

- ASTM C1018 : détermine le facteur de résistance résiduelle;
- ASTM C1399 : détermine la résistance résiduelle moyenne;
- JCI SF-4 : détermine la résistance résiduelle équivalente.

L'essai JCI SF-4 est le plus utilisé pour les méthodes de conception.[94]

I-4-8-5-La distribution des contraintes mécaniques

Un des principaux avantages de l'ajout des fibres est le meilleur contrôle de la post fissuration du béton. Les fibres ont la particularité d'absorber l'énergie de fissuration et de redistribuer les contraintes mécaniques dans la matrice du béton.

La répartition des fibres dans la masse du béton permet de différer la rupture fragile du béton en s'opposant à la propagation des microfissures (**Figure I-41**). Selon les fibres utilisées et les ouvrages auxquels elles sont incorporées, ce rôle se traduit par des améliorations en postfissuration relatives à :

- la résistance à la traction;
- la résistance à la fatigue;
- la résistance à l'abrasion;
- la réduction des fissures de retrait.

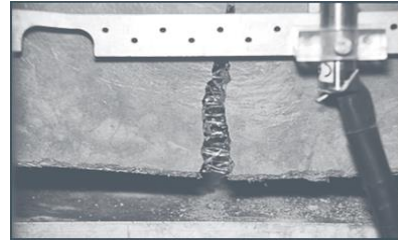


Figure I-41: Essais de l'ASTM C 1018[18]

6-La résistance à l'abrasion

L'essai de résistance à l'abrasion s'effectue selon **les normes ASTM C 418 et C 779**. Un article de la revue « Concrete Technology Today » de l'Association Canadienne du Ciment explique la résistance à l'abrasion de la manière suivante :

Les informations sur la résistance à l'abrasion du béton fibré sont rares et conflictuelles. Selon les valeurs disponibles, lorsque l'érosion est provoquée par la cavitation et par l'action abrasive d'un fort débit d'eau ou à l'impact de larges débris, c'est alors que le béton fibré améliore la résistance à l'abrasion. Par contre, pour une érosion de basse vitesse, c'est plutôt la propriété de la matrice et des granulats que celle de l'utilisation de fibres qui détermine la résistance à l'abrasion. De la même façon, c'est également la propriété de la matrice qui détermine la résistance à l'usure pour le pavage et les dalles sur sol. [94]

7-Les propriétés spécifiques à chaque type de fibres

Les fibres ont un rôle qui se traduit par des résultats variables, donc des applications différentes en fonction de leur nature. Pour apprécier l'apport des fibres au béton et leur influence sur ses lois de comportement, il importe de connaître leurs caractéristiques, aussi bien géométriques que mécaniques.

Selon leur type, les fibres métalliques, synthétiques ou naturelles ont une influence différente sur les propriétés du béton durci.

Le type de liant utilisé dans le béton, la géométrie et la composition des fibres, ainsi que leur orientation, leur distribution et leur densité à travers le béton, sont des facteurs qui influencent les propriétés du béton frais et durci. [94]

I-4-9- Rôle des fibre dans le béton

Dans les premières études, les chercheurs ont essayé, par l'incorporation de fibres dans le béton, d'augmenter ses caractéristiques mécaniques comme la résistance à la compression ou la résistance à la flexion, mais les résultats obtenus n'étaient pas ceux escomptés.[94]

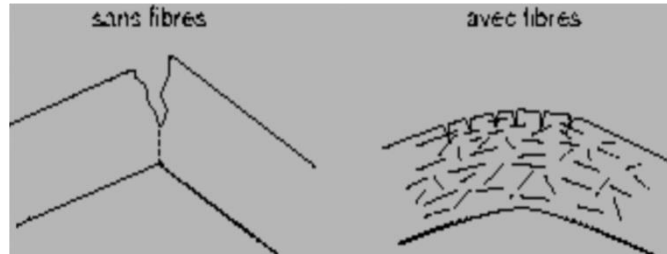


Figure I-42: Fissuration dans le béton sans et avec fibres.[94]

Il est à noter que le rôle principal des fibres dans un matériau peut-être lié à deux points essentiels:

- le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures, comme il est indiqué dans la **Figure I-42**
- la transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes voir **Figure I-43**. [94]

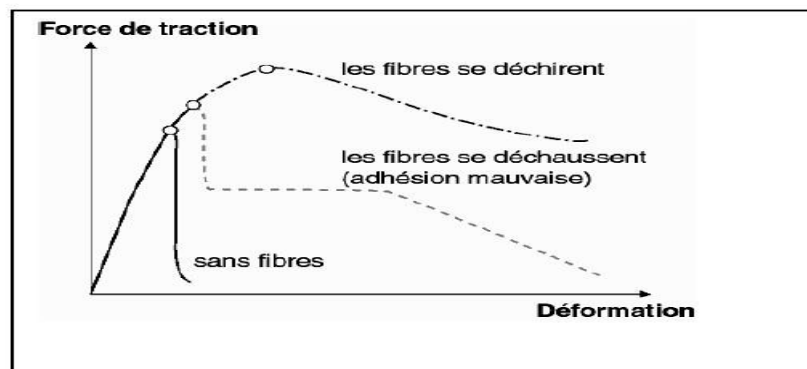


Figure I.43: Comportement de charge-déformation de béton avec et sans fibres. [94]

1- Amélioration des caractéristiques mécaniques

L'utilisation de fibres augmente la ductilité du béton, c'est-à-dire ses caractéristiques en postfissuration. De plus, l'utilisation de fibres peut apporter une amélioration en flexion, en tension, en torsion et en cisaillement ainsi qu'à la résistance aux impacts et à la fatigue. Un béton fibré continue donc à supporter des charges après la formation de fissures.

L'augmentation de la capacité en flexion est obtenue grâce à l'augmentation de la résistance résiduelle par l'utilisation des fibres. Cette propriété est aussi fonction de la nature, de la quantité et de l'efficacité des fibres utilisées. Il est important de se rappeler que la distribution uniforme des fibres dans le mélange est la condition essentielle pour obtenir une amélioration des caractéristiques mécaniques du béton fibré. [94]

2-Contrôle de la fissuration de retrait

Selon l'efficacité du type de fibres utilisé, il est possible de mieux contrôler et de diminuer le phénomène de fissuration et d'augmenter les propriétés mécaniques en postfissuration. Pour optimiser le contrôle de la fissuration, les fibres doivent être distribuées de manière homogène dans le béton tout en ayant un dosage adéquat (**Figure I- 43**). L'utilisation de fibres aide donc à diminuer la fissuration causée par le retrait plastique.

Pour le béton durci, le retrait de séchage reste présent, mais les fissures sont mieux contrôlées. Les fissures sont donc plus minces, moins longues et mieux distribuées sur la surface totale de l'ouvrage. Elles peuvent même s'avérer invisibles à l'œil nu. [94]



Figure I- 44: Texture d'un béton fibré [94].

I-4-10-Différents facteurs intervenant dans le comportement mécanique du BFM

1-Effet des types de fibres sur les résistances mécaniques

Dans la littérature, la ductilité dépend essentiellement du volume, de l'orientation et du type des fibres. Il a été montré par plusieurs chercheurs que les fibres déformées à leurs extrémités sont plus efficaces par rapport à celles déformées sur leur longueur entière. Cependant les fibres munies de crochets sont celles qui présentent le plus d'avantages à cause de leur bonne adhérence mécanique. Les fibres crochetées sont très efficaces, en offrant une meilleure

ductilité; un dosage de 30 à 60 kg/m³ est suffisant pour avoir une bonne ductilité. Le crochet développe progressivement un ancrage, puis dissipe de l'énergie par plastification de celui-ci et par frottement à l'interface avec la matrice. Il y a donc déformation du crochet et glissement de la fibre dans la matrice (**Figure I- 45**). [96]

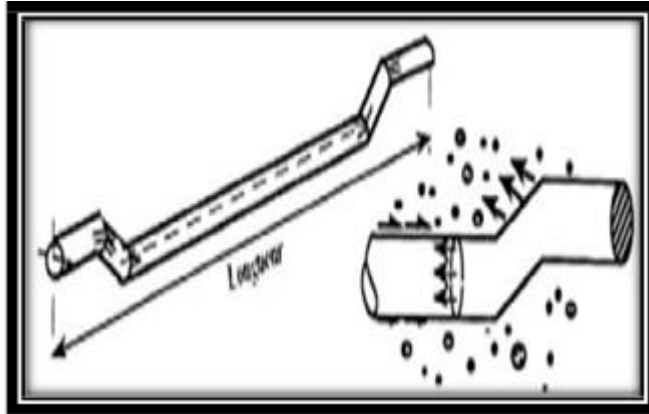


Figure I- 45: Déformation du crochet et glissement de la fibre. [96]

2-Influence du pourcentage des fibres

L'augmentation du pourcentage des fibres dans un BFM s'augmente leur efficacité vis-à-vis du comportement à l'échelle du matériau ou à celle de la structure. Que ce soit des fibres courtes ou des fibres longues.

La (**Figure I-46**) présente l'évolution d'une caractéristique mécanique quelconque d'un BFM en fonction du pourcentage de fibres. Il est évident que le choix de la fibre est lié à la caractéristique mécanique que l'on désire améliorer. Par exemple une fibre courte pour augmenter les résistances (traction, compression...) ou une fibre longue pour améliorer le comportement post fissuration du BFM. Que ce soit le seuil d'efficacité (P_e), ou le seuil de saturation (P_s), dépendent du type de fibre, de ses dimensions, du fait que la fibre fonctionne par ancrage réparti le long de la fibre ou concentré à ses extrémités, ou par adhérence, de l'orientation des fibres. Le pourcentage de fibre optimale du point de vue technico-économique se trouve dans l'intervalle [P_e , P_s] cet intervalle appelé, domaine d'efficacité d'un BFM. [96]

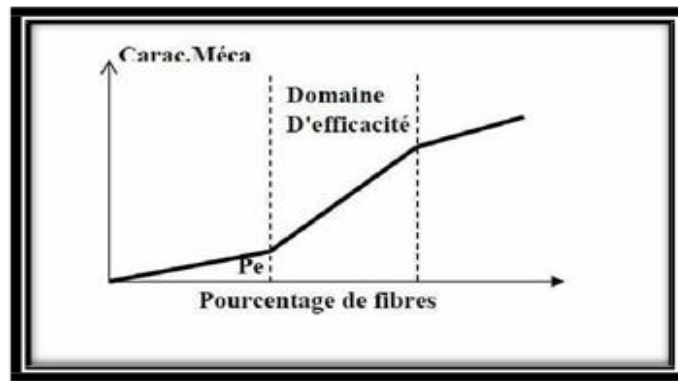


Figure I- 46: Courbe schématique de l'évolution des caractéristiques mécaniques d'un BFM en fonction du pourcentage de fibre. [96]

3-Influence de la longueur de fibres

Les fibres courtes qui, à même dosage, sont plus nombreuses peuvent être actives en jouant le rôle de couture sur des microfissures qui se développent aux premiers stades du chargement. La résistance à la traction peut se retrouver augmentée. Au fur et à mesure que la charge augmente l'ouverture des fissures augmente aussi. Ceci cause l'arrachement des fibres courtes, alors que les longues fibres peuvent continuer à transférer les efforts à travers les fissures et ainsi à contribuer à l'augmentation de la résistance résiduelle post-fissuration. Les fibres longues sont donc généralement actives dans l'amélioration de la ductilité (voir **Figure I. 47 a et b**). [96]

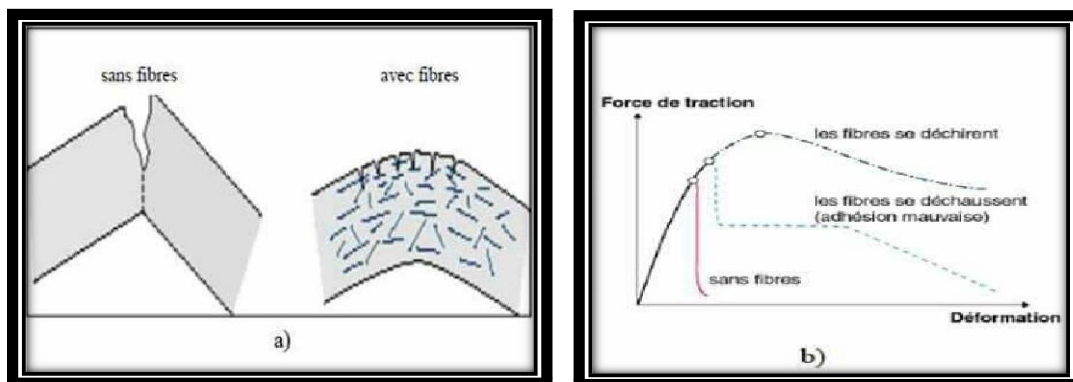


Figure I-47: Processus de couture: a) Influence des fibres courtes dans le processus de couture des microfissures, b) Influence des fibres longues dans le processus de couture des microfissures. [96]

4-Effet de l'orientation des fibres sur le comportement mécanique du BFM

L'orientation préférentielle des fibres est essentiellement causée par la mise en place du béton dans les moules ou les coffrages. Lors du coulage, les fibres s'orientent suivant l'axe de l'écoulement puis parallèlement aux parois au fur et à mesure que le béton remplit le coffrage. Cette orientation préférentielle est donc inévitable au voisinage des parois (effet de paroi). La

mise en œuvre et le compactage doivent être étudiés pour le béton considéré en fonction de sa maniabilité qui diffère généralement de celle des bétons ordinaires sans fibres.

La vibration interne peut aussi mener à une orientation préférentielle des fibres suivant l'axe de vibration, ainsi qu'à de la ségrégation. L'utilisation de la table ou de l'aiguille vibrante conduit à une orientation préférentielle différente des fibres. [96]

5-Influence de la taille et la rugosité des granulats

La dimension des granulats est très importante pour avoir un bon béton résistant et maniable car avec une présence d'une certaine quantité de gros grains, le béton peut avoir une mauvaise ouvrabilité. Les B.R.F sont composés, en plus des gros granulats, d'une quantité de fibres qui en entrant en contact avec ceux-ci tend à figer leur mouvement, fait qui se répercute principalement sur la maniabilité. Les multiples travaux de recherche montrent que la mise en œuvre des B.F.M est souvent difficile et a toujours posé de problème. Ainsi pour faciliter cette mise en œuvre, la composition du béton ne doit en aucun cas contenir des éléments dont la taille est supérieure au quart de la longueur de la fibre (une dimension maximale d'environ 8 à 15 mm), c'est la raison qui fait que les bétons de sable se révèlent compatibles à l'inclusion des fibres. [96]

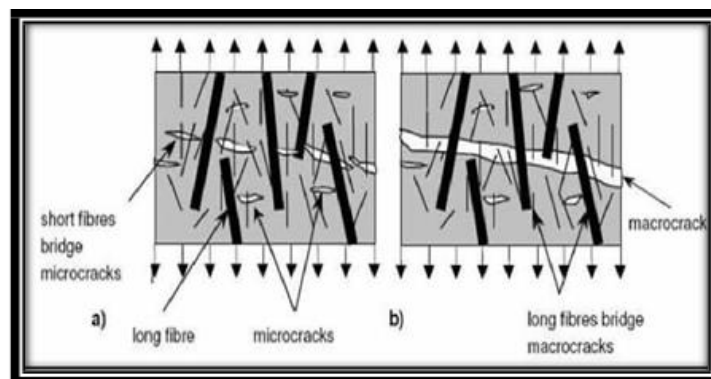


Figure I-48: Effet de la taille d'agrégat sur la distribution des fibres dans un carré avec une longueur égale à la longueur d'une fibre. [96]

6-Influence de l'adhérence fibres matrice

L'adhérence fibres-matrice est un facteur très important vis-à-vis de l'efficacité des fibres dans la matrice. L'adhérence entre fibres et matrice est assurée par trois liaisons:

- Une liaison élastique,
- Une liaison de frottement,

Une liaison créée par un ancrage mécanique dans le cas des fibres non rectilignes (crochets ondulation dentelles). [96]

I-4-11-Formulation du béton de fibres

Une étude approfondie de la formulation des bétons de fibres a été entreprise au LCPC par Ser. L'étude propose une relation empirique entre le module de finesse du béton sans fibres (M_{i0}) et le module de finesse (M_{ip}) du béton ayant un pourcentage en fibres $P_i(\%)$:

$$M_{ip} = \frac{(M_{i0} - P_i) \cdot (M_i - 5,16)}{1,8} \dots \dots \dots (I-1)$$

Cette relation est traduite sur la **figure I. 49**, et elle montre que plus le module de finesse du béton traditionnel est élevé, plus l'ajout de fibre entraîne une diminution importante du module de finesse du béton correspondant, c'est-à-dire une importante réduction des gros granulats. Par contre dans le cas de modifier pratiquement pas ce module. [2]

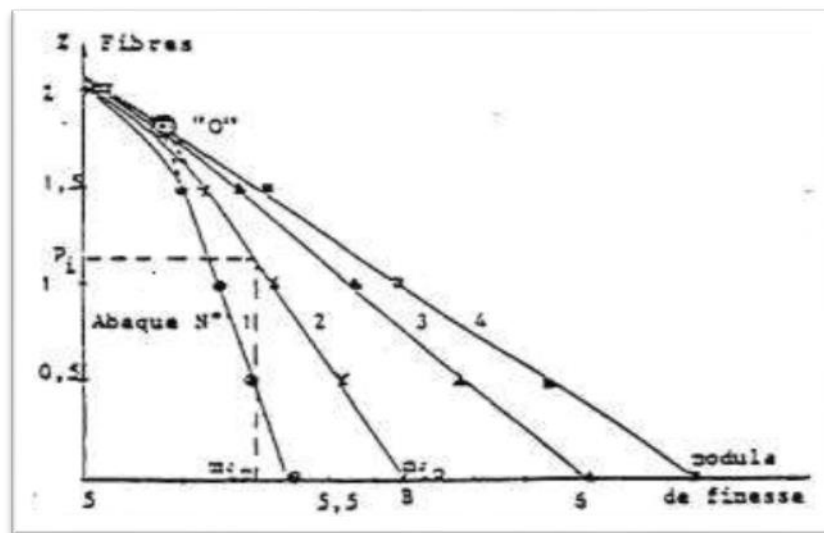


Figure I-49: Abaques reliant la composition granulaire optimale du béton au pourcentage en fibres. [2]

Toutefois devant la diversité des fibres selon leurs propriétés mécanique et rhéologique mais surtout leurs propres problèmes de mise en œuvre, une étude systématique de la formulation pour chaque type de fibre semble impérative. [2]

L'utilisation de la méthode de Baron-Lesage nous semble la plus indiquée pour la formulation de des bétons. La maniabilité qui se trouve fortement réduite par la présence de fibres doit être évalué avec soin et surtout éviter le recours au cône d'abram's qui ne peut illustrer le comportement rhéologique réel des bétons de fibres. Enfin lors de l'opération de malaxage, il faut assurer d'une part qu'il n'y a pas eu lieu de formation de pelotes de fibres (un enchevêtrement de fibres ayant la forme d'un oursin) et d'autre part veillez (à réduire le

volume du béton introduit dans le malaxeur: les bétons de fibres sont plus difficiles à malaxer et nécessite d'avantages d'énergie. [2]

I-4-12-Mise en œuvre du béton de fibres

Problèmes liés à la mise en œuvre du béton de fibres : L'introduction des fibres courtes distribuées uniformément dans les matériaux à base de ciment cause des problèmes d'ouvrabilité, on assiste à une diminution de la maniabilité et puis des fois à la formation de pelote de fibres ou oursin résultant de l'enchevêtrement des fibres. [2]

I-4-13-Composition du béton de fibres

Pour déterminer la composition du béton de fibres il faut rechercher la formulation la plus maniable dont la mise en place nécessite le moins d'énergie, et qui sera la plus compacte après mise en place, donc assurer un moulage et un serrage correct du matériau avant prise de liant. On n'ajoute pas n'importe quelle fibre à un mortier ou un béton classique, il convient d'étudier au préalable une composition adaptée, parce que la plus grande efficacité des fibres ne sera obtenue qu'après une optimisation de la composition pour déterminer la composition optimale du béton renforcé de fibres métalliques, le LPC de Paris à fait varier le rapport sable/gravier. [2]

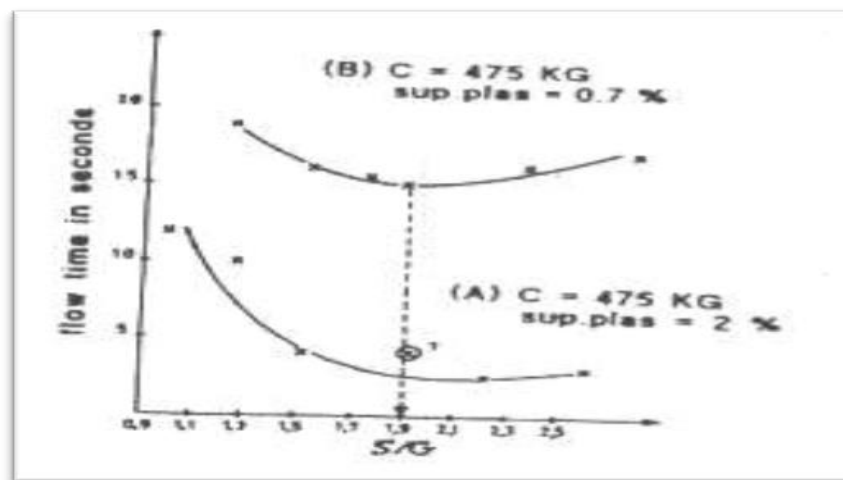


Figure I-50: compacité optimale d'un BFM obtenus par la méthode de Baron-Lesage. [2]

I-4-14-Appareils recommandés pour l'étude de la mise en œuvre du béton de fibres

Plusieurs études ont montrées que les essais statiques (flow test essai de compactage...) sont inadaptés pour l'étude de la mise en œuvre du béton en fibres, et qu'il faut recourir aux essais dynamiques qui sont des essais faisant intervenir la vibration.[2]

Parmi ces essais on trouve l'essai V.B (**Figure I-51**), l'essai du cône inverse (**Figure I-52**) et puis le maniabilité LCPC (**Figure I-53**)

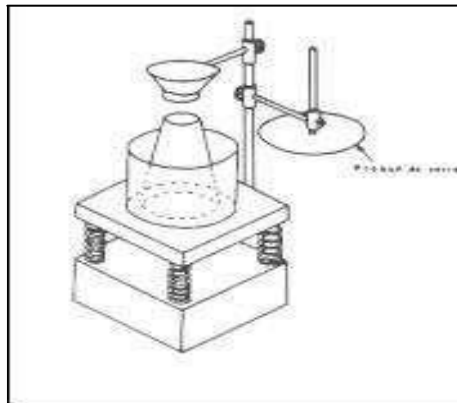


Figure I-51: Essai V.B. [2]

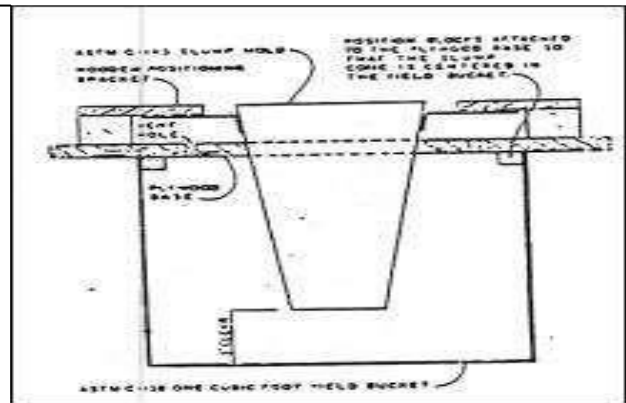


Figure I-52: Essai du cône inverse [2]

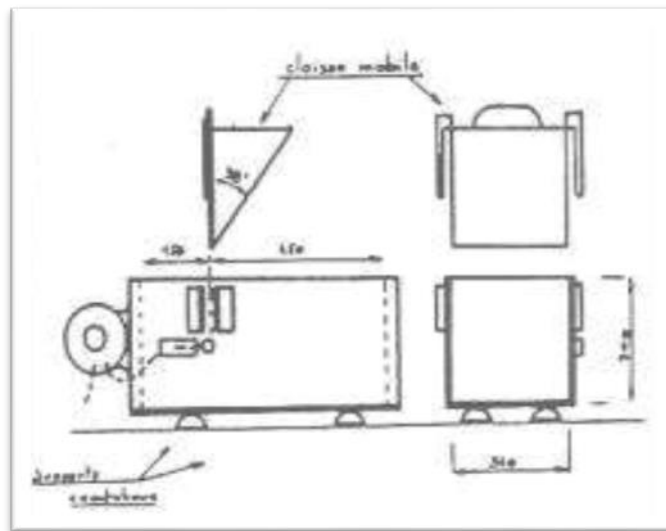


Figure I-53: Le Maniabilimètre LCPC. [2]

I-4-15-Fabrication du béton de fibres

Avant de mélanger le béton, la longueur des fibres, leur quantité et la composition du mélange sont choisies pour éviter la formation de boules de fibres. Dans les mélanges renforcés, le mortier occupe d'habitude environ 70 p. 100 du volume, contre 50 p. 100 pour les mélanges de béton courants, non renforcés de fibres. [2]

Le malaxage du béton de fibres est important. En effet, il faut veiller à obtenir une bonne dispersion des fibres dans le mélange et éviter la formation de boules de fibres. Le Comité 544 de l'ACI recommande plusieurs méthodes suivant la nature des fibres utilisées, les matériaux recherchés :

- a/ Mélanger les fibres et les granulats avant l'introduction dans le malaxeur (par exemple ajouter les fibres sur le tapis roulant d'alimentation des granulats)
- b/ Mélanger d'abord les gravillons et le sable, ajouter les fibres, puis le ciment et l'eau.

Cette méthode est recommandée pour les fibres de polypropylène, de façon à les défibriller.

c/ Ajouter les fibres en fin de malaxage et adopter un temps de malaxage minimum pour obtenir la répartition homogène.

Des adjuvants chimiques sont ajoutés au mélange de béton renforcé de fibres, notamment pour augmenter son ouvrabilité. En Amérique du Nord, les entraîneurs d'air et les réducteurs d'eau sont ordinairement additionnés aux mélanges qui contiennent une proportion de 50 % ou plus de granulats très fins.

Les super plastifiants incorporés à des bétons renforcés de fibres peuvent abaisser le rapport eau/ciment et améliorer la résistance, la stabilité volumétrique et l'ouvrabilité des mélanges frais.

Pour les fibres métalliques, le Comité 544 de l'ACI conseille d'ajouter les fibres sous forme de pluie, en les faisant passer à travers un tamis munis d'un vibreur. Pour éviter ces complications la Société BEKAERT propose des fibres collées ensemble par paquets à l'aide d'un produit qui se dissout dans l'eau de gâchage, on peut ainsi ajouter les fibres au mélange sans précautions particulières.

Le transport du béton de fibres peut se faire en général avec des malaxeurs classiques, en prenant la précaution de charger le camion à une capacité inférieure au maximum, car il faut plus d'énergie pour malaxer un béton de fibres que pour malaxer un béton classique. Les panneaux en ciment renforcé de fibres ne contiennent pas de granulats grossiers.

Ces produits sont généralement réalisés en projetant simultanément le mortier et les fibres hachées. Un mortier ayant un rapport eau/ciment élevé facilite la projection. Il existe d'autres méthodes de fabrication, dont le coulage, moins universel que la projection, et le moulage sous pression, où le rapport eau/ciment moins élevé permet d'obtenir un produit plus résistant.[2]

I-4-16-Mécanismes de fonctionnement des fibres dans le béton

Rossi a décrit le comportement vis-à-vis de la fissuration du béton renforcé de fibres et des structures en béton fibré en fonction de la sollicitation imposée. Dans le cas des efforts de traction, des microfissures apparaissent, suivies de leur connexion et de la formation de macro fissures, jusqu'à la rupture de la structure. Les fibres peuvent coudre les microfissures, et retarder la formation des macro fissures, conférant ainsi une capacité portante résiduelle et une ductilité à l'échelle de la structure. [98].

De plus, l'action des fibres est fortement influencée par leur orientation et le mode d'application des efforts. Dans le cas de fissures provoquées par les efforts en traction, les fissures s'ouvrent selon la direction normale à leur lèvre et les fibres travaillent en traction.

Dans le cas des fissures provoquées par des efforts de compression, il y a des mouvements tangentiels par rapport aux lèvres des fissures, les fibres sont donc fléchies et travaillent dans des conditions moins favorables (faible rigidité en cisaillement). C'est pourquoi les effets d'un renfort de fibres sont peu visibles en compression pour les bétons de compacité courante. Les propriétés du béton renforcé de fibres sont le résultat de plusieurs facteurs, comme les propriétés de la matrice, la distribution des fibres et les conditions d'interface entre les fibres et le béton. Le mécanisme de résistance est le transfert des efforts de la pâte aux fibres par des cisaillements qui augmentent linéairement jusqu'au stade de fissuration. Après cet événement, si l'effort de cisaillement demandé est plus grand que la résistance au cisaillement fibre-matrice, le mécanisme de résistance principal devient le frottement, au cours du déchaussement de la fibre [99].

Durant un essai sur du béton renforcé de fibres, lors du chargement jusqu'au pic, les fibres n'interviennent pas. Durant cette phase, les fibres se déforment comme le béton. A l'approche du pic de résistance, des microfissures se développent jusqu'à la localisation d'une macro fissure. Les fibres entrent en jeu, une fois l'ouverture de cette macro fissure est suffisante.

Elles pontent à ce moment la fissure en transmettant les efforts au béton dans lequel elles sont ancrées. Les efforts résiduels repris diminuent ensuite au fur et à mesure que les fibres se cassent ou se déchaussent en fonction de leur nature et de celle de la matrice qui les enveloppe.

Il est donc nécessaire d'avoir une ouverture de fissure suffisante afin que les fibres soient sollicitées. C'est pour cela que les fibres interviennent peu durant la phase de chargement et de développement des microfissures. De plus, les fibres doivent avoir des dimensions compatibles avec le type de fissures, le niveau de résistance du béton et la taille des granulats. Pour les microfissures, il est conseillé d'utiliser des fibres courtes en grande quantité, et pour les macros fissures, des fibres longues quantité moindre afin d'assurer une bonne ouvrabilité. Dans le cas où la rupture peut arriver à l'interface matrice-granulats, il est recommandé d'utiliser des fibres d'une longueur correspondant 2 à 3 fois le diamètre maximal des granulats de manière à assurer un ancrage suffisant dans la matrice cimentaire. [100]

L'effet des fibres est donc surtout perceptible en traction. Un béton sans renfort, une fois fissuré, n'est capable de supporter que de faibles efforts par endommagement et ponts de matière. Ceci se traduit par une chute brutale de contraintes reprises, comme le montre la

courbe de comportement en traction directe correspondant à une teneur en fibre de 0% sur la **figure I-35**. Avec un renfort de fibres, les contraintes dans la fissure sont transmises au béton. Les fibres, en cousant la fissure, assurent une continuité structurale et permettent au béton d'avoir un comportement ductile en lui confère une capacité portante post-fissuration. [97]

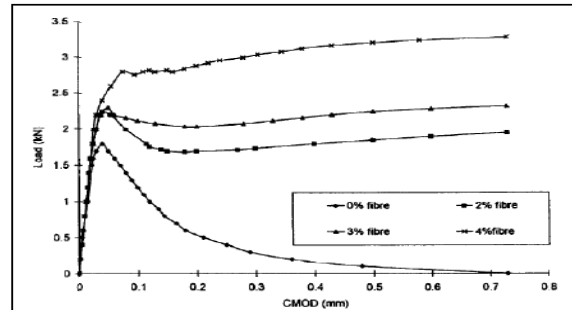


Figure I-54: Comportement en traction directe en fonction du pourcentage en fibres métalliques.

L'étude du comportement en traction par flexion permet de mieux mettre en évidence l'effet d'un renfort de fibres via le gradient de déformation. L'addition de fibres entraîne une augmentation de résistances et une augmentation de la ductilité (**Figure I-54**). Le comportement post-fissuration est significativement amélioré.

L'augmentation de la résistance résiduelle est due aux ponts et liaisons créés par les fibres placés stratégiquement et qui cousent les fissures. Lorsque les résistances résiduelles sont supérieures à la résistance au pic, on dit que le béton a un comportement ductile durcissant. Le processus de rupture se développe lors de la perte de ces liaisons et du déchaussement des fibres ou de la rupture de ces dernières. Ce phénomène est fonction de la forme, de la taille des fibres et de leur adhérence à la matrice cimentaire.

Le comportement en compression n'est que peu influencé par la présence des fibres. Les fissures créées ne permettent pas aux fibres d'être sollicitées suffisamment pour améliorer significativement le comportement du béton.

Néanmoins, le comportement des bétons renforcés de fibres, quel que soit le type de sollicitation, dépend fortement du type de fibres choisi, de leur géométrie, de leur distribution et de leur orientation, ainsi que de la compacité du béton qui les contient.

I-4-17-Durabilité des bétons de fibres

Quand on parle de durabilité des bétons de fibres, il faut se placer à deux niveaux (deux échelles) : celui du matériau et celui de la structure.

- a) Le premier aspect à évoquer concerne bien sûr le problème de la corrosion des fibres (échelle matériau). Pour ce qui concerne les fibres synthétiques, à

l'exception de certaines fibres d'aramide, il n'y a pas de problème de durabilité de la fibre dans le béton. Pour ce qui concerne les fibres métalliques, la corrosion des fibres peut bien évidemment survenir.

Le retour d'expérience et la recherche concluent sur deux points : la corrosion superficielle des fibres peut provoquer des salissures à la surface des structures exposées et ne génère aucune pathologie, ni perturbation dans le fonctionnement mécanique des structures les utilisant. Cette corrosion potentielle des fibres métalliques peut être minimisée dans la pratique en :

- en optimisant la formulation du béton fibré;
 - en utilisant des coffrages non métalliques ou munis d'une "peau interne" (tissu synthétique, par exemple);
 - en utilisant des fibres galvanisées.
- b) Le second aspect relatif à la durabilité des bétons fibrés concerne la tenue au feu des structures. Les fibres métalliques n'apportent pas plus de déterminant dans la tenue au feu des structures. Ce que l'on peut simplement souligner est qu'une structure en béton de fibres métalliques se comporte plutôt mieux vis-à-vis du feu qu'une structure en béton armé classique (moins d'éclatements). Au contraire, certaines fibres synthétiques, notamment les microfibres de polypropylène, ont un effet positif très significatif vis-à-vis de cette problématique. Cette efficacité constatée est liée à un phénomène très simple : lors d'un feu, les fibres de polypropylène disparaissent (elles ont atteint leur point de fusion) pour laisser la place à un réseau important de fines "canalisations" (capillaires) réparties dans tout le volume de la structure. Ces canalisations servent de vases d'expansion pour la vapeur d'eau sous pression générée par le feu (évaporation de l'eau présente dans le béton).
- c) Pour ce qui concerne la durabilité des structures en béton fibré, un dernier point important concerne le maintien dans le temps d'une fonction demandée à une structure donnée à l'exemple d'un revêtement quelconque en béton fibré à qui on demande d'assurer une fonction d'étanchéité (vis-à-vis des infiltrations d'eau, par exemple). Du fait du fluage des fibres synthétiques, évoqué précédemment, cette fonction assurée par une structure en béton de fibres synthétiques, peut ne plus l'être quelque temps plus tard. Il s'agit d'un problème pour lequel les bétons de fibres métalliques ne sont pas concernés.

Enfin, dans le cas d'éléments préfabriqués manu portables, ou dans celui des structures susceptibles d'être en contact direct avec les usagers, des problèmes de sécurité peuvent se poser, s'agissant de bétons de fibres métalliques. Ce phénomène concerne surtout les bétons de fibres dont les fibres sont de petits diamètres, c'est-à-dire inférieures ou égales à 0,25 mm. En effet, on ne peut jamais garantir à 100 % qu'aucune fibre métallique n'affleurera à la surface de la structure, ce qui peut occasionner des blessures. Des solutions techniques existent pour pallier cet inconvénient, solutions dont il ne faut pas faire l'impasse. Ces problèmes de blessure occasionnés par des fibres n'existent pas avec les fibres synthétiques.[101]

I-4-18-Avantages du béton fibré

Les avantages de l'utilisation des fibres dans le béton sont présentés selon l'aspect technique et économique [92].

✓ Aspect technique

L'utilisation d'un béton fibré est avantageuse principalement au niveau du contrôle de la fissuration ainsi que du support de charge, tout dépendamment du type de fibres et du dosage utilisé. Les principaux avantages techniques sont :

- un renforcement tridimensionnel uniformément distribué à travers le béton;
- une augmentation de la ténacité grâce au comportement en postfissuration (Résistance résiduelle);
- une énergie d'absorption élevée;
- une résistance aux impacts élevée;
- une résistance à la fatigue élevée;
- une augmentation de la résistance en cisaillement.

✓ Aspect économique

Les principaux avantages économiques des bétons fibrés sont :

- une réduction des intervenants sur le chantier, ce qui implique une réduction du coût de mise en place et du temps de construction;
- une optimisation du dimensionnement.

I-4-19- Domaines d'utilisation du béton de fibré

La recherche et le développement ont permis d'appliquer un concept de renforcement structural à différents types d'ouvrages en béton. De par leurs propriétés, les fibres trouvent un vaste domaine d'applications où il faut réduire les risques de fissuration, augmenter la résistance aux impacts et tirer parti de l'amélioration de la performance du béton pour optimiser le dimensionnement des ouvrages.

Le béton fibré est utilisable dans tous les domaines du génie civil, aussi bien dans les constructions industrielles, commerciales et institutionnelles que résidentielles.

Tableau I-16 : Domaines d'application privilégiés par type de fibres [95].

<i>Domaines d'application privilégiés par type de fibres</i>			
<i>Type de fibres</i>	<i>Dosage courant</i>	<i>Domaine d'application privilégié</i>	<i>Exemples d'application</i>
Fibres métalliques	0,5 à 2 % en volume 40 à 160 kg/m ³	Renfort pour bétons structuraux et armature structurelle	- Dallages, sols industriels, planchers, dalles de compression - Éléments préfabriqués – voussoirs de tunnels, poutres, conteneurs, tuyaux - Bétons projetés en travaux souterrains, stabilisation de pente et ouvrages d'assainissement - Pieux de fondation, semelles filantes
Fibres polypropylène	0,5 à 2 % en volume 0,5 à 2 kg/m ³	Limitation de la fissuration liée au retrait Amélioration de la tenue au feu des bétons	- Dallage - Voussoirs de tunnels - Revêtement d'ouvrages souterrains - Mortiers projetés - Parements esthétiques
Fibres de verre	1 à 2 %	Réalisation d'éléments préfabriqués très minces	- Parements architectoniques - Panneaux de façade - Éléments décoratifs

Tableau I-17: Intérêt apporté par domaines d'application [102].

APPLICATIONS	INTERET APPORTE PAR L'ADJONCTION DES FIBRES DANS LE BETON
Canalisation et coque minces faiblement sollicitées.	- Amélioration de la tenue des pièces aux jeunes âges. - Modification des variations dimensionnelles, lutte contre les fissurations.
Dallage, chaussées en béton, dallages manufacturés, et tous éléments structurés et tous éléments structuraux soumis à la flexion.	- diminution de 40% de l'ouverture de fissures, - augmentation de la rigidité après fissuration, - augmentation de la résistance au cisaillement, - augmentation de la résistance à l'usure.
Eléments structuraux soumis à la compression (poteaux, pieux, fondations...etc.).	- amélioration de la charge ultime, - pas de rupture catastrophique.
Structures soumises à des sollicitations pulsionnelles exp: piste d'aéroport.	- l'énergie absorbée est plus importante, - la durée de choc est augmentée, - la loi de comportement du matériau est fortement modifiée.
Réparation des revêtements routiers, tablier de ponts.	- amélioration de la résistance aux chocs, - amélioration de la déformation.
Parties exposées aux fortes variations de température et même aux hautes températures.	- remplacement avec succès du revêtement réfractaire, - diminution le coût de réparation des éléments réfractaires
Stabilisation des parois rocheuse, les talus, les tunnels, les galeries souterrains.	- évite le travail de fixation du grillage ordinairement employé, - diminution du coût de réparation de stabilisation des parois rocheuses et les talus.
Fabrication des pieux, revêtement ignifuges isolants (construction navale). Panneaux de revêtement de façade....etc.	- augmentation de la résistance aux chocs, - augmentation de la résistance à l'usure, - augmentation de la durabilité de revêtement.

I-5-Conclusion :

En résumé, nous abordons, à travers la bibliographie, d'abord des problèmes liés aux choix du matériau utilisés et aux méthodes d'allégement du béton. Nous précisons que:

- 1- Sous l'appellation "Béton léger" il existe une grande famille de matériaux très différents.
- 2- D'un point de vue générale et simple, le béton léger est réalisé on diminue la masse volumique par le remplacement d'une quantité de matériaux par de l'air. Ces vides d'air peuvent être incorporés à trois endroits:

*Dans les granulats;

*Dans la pâte de ciment;

*Entre les gros granulats par élimination de granulats fins.

* Les caractéristiques des granulats et de la matrice jouent un rôle important sur la réponse mécanique du matériau.

* On remarque que le béton léger est très utile et son application est très large.

* L'étude bibliographique nous a permis de distinguer plusieurs types de fibres ainsi que leurs utilisations, propriétés et leurs comportements.

L'étude des caractéristiques et les propriétés des bétons légers ainsi que l'analyse des résultats de la recherche bibliographique, nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

*Les bétons légers sont des bétons à haute porosité et dont la masse volumique se situe dans les limites de 500 à 1800 kg/m³

* les bétons légers sont plus légers qu'un béton classique, le béton léger a une densité de 0,4 à 1,8 en comparaison de 2,2 à 2,5 pour un béton classique.

* L'objectif global de ce travail est l'élaboration d'un béton léger à base de granulats de liège incorporés dans une matrice cimentaire constituée d'une combinaison de sable alluvionnaire et de sable calcaire et renforcé par des fibres métalliques.

*L'allégement a pour but de procurer un matériau de masse volumique et plus faible et aussi de résistance mécanique suffisante et bien.

*Parmi les ressources prélevées en masse, on connaît moins l'épuisement des gisements de sable, qui devient difficile à trouver pour faire du béton. Ce qui amène de plus en plus à la prescription de bétons comprenant de sable résultant des opérations de concassage.

*Dans un intérêt économique et environnemental, on essaye de valoriser les sous-produits de transformation du liège, fortement produit en Algérie, car il est le troisième producteur mondial.

Chapitre II

Matériaux et méthodes expérimentales

II-1- Introduction

La caractérisation des matériaux utilisés dans la composition d'un béton joue un rôle très important sur ses propriétés et ses performances ultérieures. En effet, les propriétés essentielles du béton sont largement influencées par les caractéristiques de ses constituants. De ce fait, la normalisation des modes d'essais et d'identification des composants d'un béton, selon les normes en vigueur, devient une condition nécessaire pour l'obtention d'un béton avec des résultats expérimentaux comparables avec ceux donnés dans la littérature.

II-2 –Matériaux

Sable calcaire :

Le sable calcaire est issu des résidus de la station de concassage des roches calcaires dite Station d'Ouezzane située au nord de la commune de Laghouat près du pont d'Oued M'Zi. En effet, dans cette station, la fraction des granulats dont le diamètre est supérieur à 3 mm est commercialisée, le reste est rejeté dans la nature. (**Figure II - 1**)

Sable alluvionnaire :

Le sable alluvionnaire est issu des résidus de la station du pont d'Oued M'Zi. La sable alluvionnaire granulométrie de 0/3, La provenance des matériaux est illustrée sur la **figure II -1** ci-dessous :



Figure II -1: Provenance de sable calcaire et alluvionnaire d'Oued M'Zi

Le ciment utilisé dans ce travail est un ciment composé de type CEM II/B 42.5N de classe de résistance 42.5, produit par la cimenterie de LAFARGE.



Figure(a) : sable calcaire 0/3



Figure(b) : ciment



Figure(c) : sable alluvionnaire 0/3

Figure II-2 : Echantillons de sable calcaire 0/3 et de sable alluvionnaire 0/3 et de ciment CPJ45

➤ Les granulats

Les granulats légers utilisés pour l'élaboration des bétons légers sont les granulats de liège expansé provenant des déchets de fabrication de liège aggloméré noir expansé pur et bandes d'étanchéité de l'usine de Jijel (Jijel liège étanchéité).

Pour étudier l'influence de la nature des granulats sur les caractéristiques physico-mécaniques des bétons, deux types de liège sont employées dans l'élaboration des bétons légers granulats: Le liège expansé et le liège naturel, tous deux de granulométrie 0/3.



Figure II-3: Echantillon de granulats de liège expansé 0/3 et granulats de liège naturel 0/3.

➤ **Fibre de cuivre :**

Il s'agit Recyclage des déchets des câbles électriques issus déchets des travaux d'électricité des bâtiments



Figure II-4: Fibre de cuivre.

➤ **L'eau de gâchage**

L'eau utilisée est une eau potable du robinet. Elle convient pour la confection du béton à condition qu'elle remplit toutes les prescriptions des normes **NF P 18-303** et **EN 1008** concernant les concentrations des matières en suspension et les sels dissous. Une eau de mauvaise qualité peut avoir des effets néfastes sur le béton tels que la carbonatation, la corrosion des armatures, la diminution de la résistance mécanique, l'accélération ou le ralentissement du temps de prise et l'apparition des taches nuisibles sur la surface du béton.

II-2-1 -Sable

➤ **Masse volumique**

• **Masse volumique absolue**

C'est la masse de l'unité de volume d'un matériau (vides non compris) selon la norme **NFP18-555**, elle est déterminée :

Par la méthode de l'éprouvette graduée

$$\rho_s = \frac{M}{V_s} \dots\dots\dots \text{(II-1)}$$

M : masse de l'échantillon

Vs : volume de grains $V_s = (V_2 - V_1)$.

V1 : Volume de l'eau.

V2 : Volume total (eau + grains solides).



Figure II-5 : Essai masse volumique absolue par la méthode de l'éprouvette graduée.

○ **Par la méthode de pycnomètre.**

La masse volumique des grains solides est déterminée en effectuant trois pesées M_1 , M_2 , M_3 de sorte que :

$$M_3 = M_1 + M_2 - \frac{M_2}{\rho_s} \times \rho_w \dots\dots\dots (II-2).$$

D'où l'on tire ρ_s .

M_1 : la masse du pycnomètre remplie d'eau.

M_2 : la masse de l'échantillon de matériau sec.

M_3 : la masse totale du pycnomètre avec échantillon.

ρ_s : la masse volumique des grains solides.

ρ_w : la masse volumique de l'eau ($=1\text{g/cm}^3$).

Cette méthode est plus précise que la première.

- **Masse volumique apparente**

C'est la masse de l'unité de volume (y compris les vides), elle est notée ρ_a et donnée par :

$$\rho_a = \frac{M}{V} \dots\dots\dots (II-3).$$

Où M : masse du matériau et V : volume total de l'échantillon.

Il s'agit de remplir un volume de 1 dm³ et on détermine la masse totale M_T, la masse de l'échantillon sera : M=M_T-M_R. (M_R est la masse du récipient).



Figure II-6 : Essai masse volumique apparente par la méthode de récipient.

➤ **Absorption**

Essai d'absorption :

Il permet de déterminer le taux d'absorption des grains Caractérisé par le coefficient d'absorption (Abs). Il correspond au rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après immersion dans l'eau pendant 24 h à 20°C à la masse de l'échantillon sec. Cet essai est régit par la Norme **NFP 18-555**.

$$Abs = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \dots\dots\dots (II-4).$$

M_s : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105°C.

M_h : masse de l'échantillon imbibé (surface essuyée).



Figure II-7 : Essai d'absorption.

➤ **Equivalent de sable**

L'équivalent de sable permet d'évaluer la propreté du sable entrant dans la composition du béton. Cet essai est réalisé selon la norme **NFP 18-598**, une solution lavant sépare les éléments fins de la fraction 0/3 en provoquant leur fluctuation dans une éprouvette normalisée.

Après 20 mn de repos on mesure :

H_1 : hauteur du niveau supérieur par rapport au fond de l'éprouvette

H_2 : hauteur du niveau de la partie sédimentée

L'équivalent de sable est donné par la relation :

$$E_s = \frac{H_2}{H_1} \times 100(\%) \dots\dots\dots \textbf{(II-5)}.$$



Figure II-8 : Essai équivalent de sable

➤ Analyse granulométrique

La granulométrie est la distribution par dimension des grains d'un granulat. L'analyse granulométrique est l'un des essais les plus indispensables effectués dans la composition du béton. C'est un essai qui réalise selon **NFP 18-560** et qui consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis.



Figure II-9 : Appareil de tamisage

➤ la finesse du sable

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF). Selon la norme **NF P 18- 560**: il est définie comme étant la somme des refus cumulés exprimés en pourcentage sur les tamis de la série 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 3.5 et 5mm. A noter que plus le module de finesse est élevé plus le sable est grossier.

$$M_f = \frac{\left[\sum \text{des refus (en \%)} \text{ des tamis } 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5, 5 \right]}{100} \dots \text{(II -6)}$$

Le coefficient d'uniformité noté C_u et défini comme suit:

$$C_u = D_{60} / D_{10} \dots \dots \dots \text{(II-7)}.$$

Le coefficient de courbure, notée C_c et défini comme suite :

$$C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60}) \dots \dots \dots \text{(II-8)}.$$

d60 : le tamis correspondant à 60% du passant cumulé sur la courbe granulométrique.

d10 : le tamis correspondant à 10% du passant cumulé sur la courbe granulométrique.

d30 : le tamis correspondant à 30% du passant cumulé sur la courbe granulométrique.

II-2-2- Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une pâte faisant prise qui durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide, il représente 25 à 40 % du volume total du béton.

➤ Masse volumique

Masse volumique absolue : NF P18-555

Elle est mesurée par la méthode de déplacement de liquide (benzène), en utilisant le densimètre Le Chatelier.

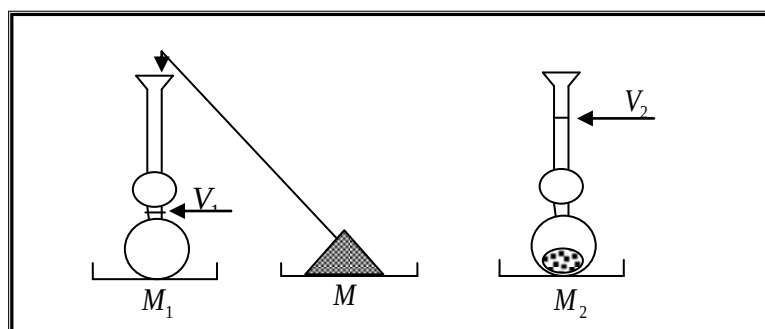


Figure II-10 : Dispositif expérimental de l'appareil Le Chatelier

La masse volumique absolue est déterminée par la relation :

$$\rho_{abs} = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1} \dots \dots \dots \text{(II-9)}.$$

Où M_1 : Masse de (cellule + benzène),

M_2 : Masse de (cellule + benzène + ciment),

V_1 : Le volume du benzène initial,

V_2 : Le volume du benzène final (après introduction du ciment).

➤ Finesse du ciment

Cette caractéristique est exprimée par la surface spécifique, celle-ci est mesurée à l'aide du perméabilimètre Blaine, selon la norme **EN 196-6**.

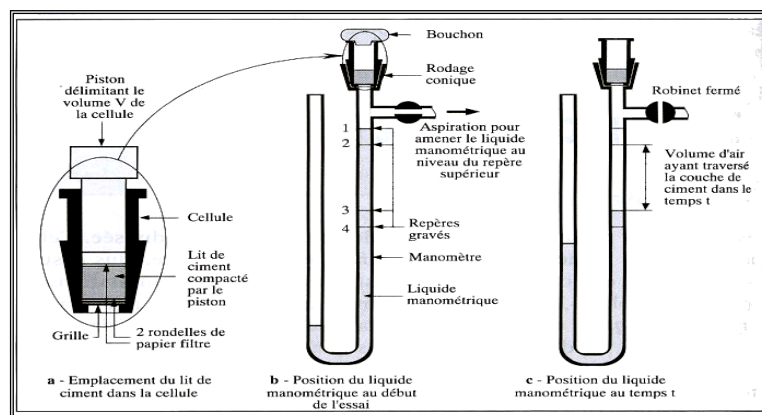


Figure II-11: Dispositif expérimental du perméabilimètre *Blaine*

Le principe de l'essai est de faire passer un volume d'air connu à travers une poudre de ciment et de mesurer le temps de passage de l'air, plus la surface spécifique d'un ciment est grande plus le temps mis par l'air pour traverser la poudre est long. La surface spécifique notée S_p (cm^2/g) est déterminée par la relation suivante :

$$S_p = \frac{k \sqrt{e^3} \sqrt{t}}{\rho_c (1-e) \sqrt{\eta}} \dots\dots\dots \text{(II-10)}.$$

k : étant la constant de l'appareil. ($k=43$)

e : l'indice de vide de la couche tassée.

t : temps mesuré par seconde.

ρ_c : masse volumique absolue du ciment (g/cm^3).

η : Viscosité de l'air à la température de l'essai (poises).

➤ Essai de prise

Cet essai est prescrit par la norme **EN 196-3**, il constitue une indication indispensable pour la mise en œuvre des mortiers et des bétons. La prise d'un ciment est fonction de sa nature (à prise lente ou rapide), de sa finesse et de la température. A une température de 20 °C le début de prise des ciments est à environ 2h à 2h30 et la fin de prise est aux environs de 3h45 à 6h [3]. Cet essai est réalisé à l'aide de l'appareil de Vicat, l'essai consiste à mesurer l'enfoncement d'une aiguille standard dans une pâte de consistance normale, le début de prise est définie comme étant le temps écoulé à partir de la fabrication de la pâte jusqu'à ce que l'aiguille cesse de s'enfoncer et s'arrête à une distance $d \geq 2.5$ cm du fond du moule. La fin de prise correspond au temps écoulé à partir de la fabrication de la pâte jusqu'à ce que l'aiguille ne s'enfonce plus dans la pâte de ciment.

➤ Classe vraie

La classe du ciment est une caractéristique indisponible pour l'estimation des résistances des bétons et des mortiers. Elle est déterminée par des essais de compression à 28 jours réalisés sur des éprouvettes 4x4x16 cm de mortier de consistance normale. Le dosage en ciment du mortier est tel que $\frac{C}{S} = \frac{1}{3}$. Après démoulage effectué après 24 heures, les éprouvettes sont immergées dans l'eau jusqu'au jour de l'écrasement en flexion trois points, puis en compression (norme **EN-196-1**).

➤ Analyses chimiques :

C'est le composé de base des ciments portland composés, il est constitué d'au moins deux tiers en masse de silicates de calcium ($3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ et $2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$). Son apport est de 80 à 94% pour les ciments types CEM II/ A et de 65 à 79% pour les types CEM II/ B, le pourcentage restant est constitué de l'un des trois ajouts énumérés précédemment, ou bien de deux de ces trois ajouts, ou bien des trois ajouts en plus des 5% de gypse. Les compositions chimiques et minéralogiques sont données par **les tableaux II-1 et II-2. [106]**

Tableau II-1 : Caractéristiques chimiques du ciment

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Perte au feu	Insolubles	Total
19.54	65.04	4.42	2.88	1.30	2.79	2.80	0.50	99.47

Tableau II-2 : Composition minéralogique du ciment

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaO libre
70.84	2.61	6.84	8.76	0.90

Le ciment courant est fabriqué par mélange et co-broyage de clinker et d'autres constituants minéraux, avec une certaine quantité de sulfate de calcium, nécessaire pour réguler la prise.

II-2-3-Le liège

➤ Masse volumique

La masse volumique d'un granulat léger est une caractéristique fondamentale influençant notablement les caractéristiques mécaniques des granulats légers et par conséquent les performances du béton. Différentes masses volumiques peuvent être définies pour les granulats selon le mode opératoire utilisé. On parlera, conformément à la norme **EN 1097**, de masses volumiques en vrac, réelle et absolue.

➤ Masse volumique apparente

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté.

L'essai est répété 3 fois pour un volume de 1 litre et la moyenne de ces essais donne la valeur de la masse volumique apparente.

$$\rho_v = \frac{M_s}{V} \dots \dots \dots \text{(II-11)}.$$

Où **M_s** est la masse des granulats mis en place sans tassement dans le récipient, et **V** le volume du récipient.

➤ Masse volumique absolue

La procédure de détermination de la masse volumique absolue pour le granulat de liège est pratiquement la même qu'avec celui utilisé pour le sable.



Figure II-12 : Essai masse volumique absolue par la méthode de pycnomètre.

➤ **Mesure du coefficient d'absorption (NF P 18-555)**

La connaissance du coefficient d'absorption d'eau d'un granulat permet d'ajuster la teneur en eau de gâchage entrant dans la composition du béton. De plus, l'étude du comportement des granulats légers dans l'eau permet de compléter les données sur la porosité issue des mesures de masse volumique [105].

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. Le coefficient d'absorption W_a est ainsi défini par :

$$W_a = \frac{M_e}{M_s} * 100 \dots\dots\dots (II-12).$$

Ou M_e désigne la masse de l'eau absorbée et M_s la masse de l'échantillon après à l'étuve à 105° C.

➤ **Cinétique d'absorption des grains de liégé**

Le but de cette partie consiste à déterminer la capacité d'absorption des granulats utilisés dans ce travail, ainsi que la cinétique d'absorption. Pour cela, ils ont été séchés au préalable dans l'étuve à $T = 105^\circ\text{C}$.

Le choix de cette température est lié au séchage conventionnel (température entre 50 °C et 100° C).

Dans le procédé de saturation, l'eau est absorbée sous l'effet de saturation pendant différentes durées. Les échantillons sont posés dans un

réipient qui se compose d'un papier filtré superposé sur un tamis de 0.04mm d'ouverture, ces derniers sont posés dans un réipient d'eau.

Le suivi de la masse est effectué par pesée à chaque instant jusqu'à la saturation. L'eau absorbée représente le poids d'eau qu'un échantillon peut absorber jusqu'à sa saturation. Donc l'absorption est définie comme une quantité d'eau absorbée à l'instant (t) par rapport à la masse sèche de l'échantillon [103].

$$\text{Taux d'absorption (\%)} = \frac{m(t) - m_s}{m_s} * 100 \dots\dots\dots (\text{II-13}).$$

D'où - t- instant où s'effectue la pesée (minutes ou heures)

m(t) : La masse de l'échantillon après l'absorption (en gramme), à l'instant t.

m_s : La masse sèche en gramme

➤ Cinétique de séchage des grains de liège

L'objectif du procédé de séchage est de diminuer le plus rapidement possible la teneur en eau existante dans le liège, Les échantillons sont posés dans un réipient qui se compose d'un papier filtré superposé sur un tamis de 0.04mm d'ouverture, ces derniers sont posés dans un réipient d'eau. Le liège est immergé dans l'eau pendant 24 heures ; après quoi il est retiré. Nous mesurons le changement du poids de l'échantillon (selon le temps réglé) à l'aide d'une balance intégrée de précision (0.001gramme) durant tout le procédé de séchage.

Après un procédé de séchage, l'analyseur d'humidité peut déterminer la substance sèche qui reste de la substance totale préalablement pesée (solide) et calcule l'humidité (perte de poids).

La cinétique de séchage est étudiée à travers deux courbes, représentant :

- la teneur en eau massique H(%) en fonction du temps
- le pourcentage de pertes massiques en fonction du temps

$$H (\%) = \frac{m^*(t) - m_s}{m_s} * 100 \dots\dots\dots (\text{II-14}).$$

m_s : La masse anhydre de l'échantillon (ou H(%)=0).

m^{*}(t) : La masse de l'échantillon après le séchage, à l'instant t.

Ainsi que, le pourcentage massique de perte d'eau est calculé par la formule:

(II-15).

La teneur en eau massique (taux d'humidité) est égale à la masse d'eau comprise dans ce liège pendant le séchage par rapport à la masse anhydre (la masse sèche) [104]:

$$\text{Perte (\%)} = \frac{m_0 - m_s(t)}{m_0} * 100 \dots\dots\dots \text{(II-15)}.$$

m_0 : La masse initiale de l'échantillon (avant le séchage).

➤ Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est réalisée suivant la norme **NF EN 933-1**. Les tamis utilisés sont conformes à la norme **NF EN 933-2**. Avant de commencer les mesures, les granulats sont lavés dans un tamis de 63 mm puis séchés dans une étuve à 105°C jusqu'à masse constante. L'état de masse constante est supposé quand la masse de l'échantillon ne varie pas de plus de 0,1% après 1h de séchage. La colonne de tamis remplie des granulats est ensuite agitée sur l'appareil de tamisage.

II-2-4- L'eau

L'eau utilisée est une eau potable du robinet. Elle convient pour la confection du béton à condition qu'elle remplit toutes les prescriptions des normes **NF P 18-303** et **EN 1008**. concernant les concentrations des matières en suspension et les sels dissous. Une eau de mauvaise qualité peut avoir des effets néfastes sur le béton tels que la carbonatation, la corrosion des armatures, la diminution de la résistance mécanique, l'accélération ou le ralentissement du temps de prise et l'apparition des taches nuisibles sur la surface du béton.

II-3-Essais mécaniques

➤ Résistance à la compression

Les deux parties de les éprouvettes sont écrasées par l'essai de flexion sont soumises l'une après l'autre à l'essai de compression conformément à la norme **NF EN 12390-3**. (Figure II.10), La valeur de la résistance à la compression est donnée par :

$$R_c = \frac{F_c}{A} \text{ En (MPa) (II-13).}$$

F_c : force de compression en (N).

A : surface transversale de l'éprouvette en mm^2 (4900 mm^2).

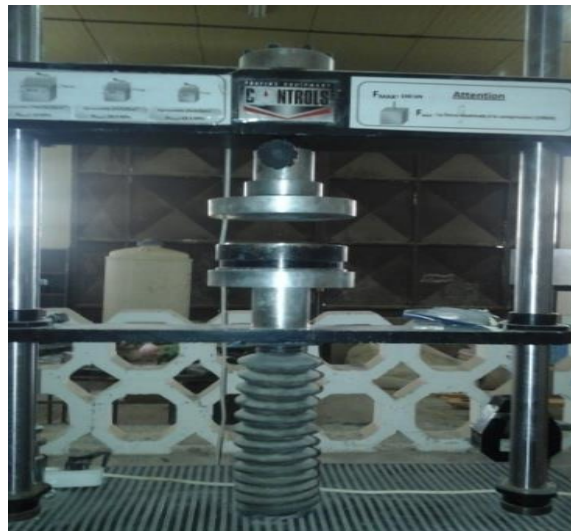


Figure II-13 : Appareil de mesure de la compression.

Chapitre III

Résultats expérimentaux et discussion

III-1-Introduction

Dans ce chapitre, on présente les différents matériaux utilisés dans la confection des bétons à étudier ainsi que les résultats des essais expérimentaux obtenus. Des analyses et des discussions des résultats ont été exposées dans cette partie.

III-2-Matériaux utilisés

III-2-1-Caractérisation des matières premières

1- Le sable

Caractéristiques physiques

A- Masse volumique apparente ρ_{app} et absolue ρ_{abs} :

Les masses volumiques apparente et absolue moyennes des sables sont présentées dans le **tableau III-1**.

B- Compacité et porosité:

La compacité (C_p) est le rapport du volume de la matière pleine au volume total.

L'essai est réalisé selon la norme **NFP18-555**

$$C_p = \frac{V - V_v}{V} = 1 - \frac{V_v}{V} = 1 - P \dots\dots\dots (II-1).$$

$$C_p = \frac{V_{abs}}{V} = \frac{\rho_{abs}}{\rho_{app}} \dots\dots\dots (II-2).$$

$$p = 1 - C_p \dots\dots\dots (II-3).$$

Où V_v est le volume des vides et V , le volume total apparente, étant la Porosité.

Les résultats de mesure de la porosité sont représentés dans le **tableau III-1**.

C- Coefficient d'absorption d'eau :

Les valeurs des coefficients d'absorption sont représentées dans le **tableau III-1**.

L'absorption du sable calcaire est largement supérieure à celle du sable alluvionnaire elle est neuf fois la valeur du sable alluvionnaire elle est due à la présence de quantité énorme de fines calcaires ce qui nécessite la prise en compte de la quantité d'eau absorbée par le sable calcaire lors du malaxage des mortiers à base de sable calcaire.

D- Equivalent de sable:

Les résultats de l'essai d'équivalent de sable sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau III-1 : Caractéristiques physiques des sables

Type de sable	Masse volumique apparente (kg/m ³)	Masse volumique absolue (kg/m ³)	Equivalent de sable (%)		Absorption d'eau (%)	Module de finesse	Porosité
Sable calcaire	1450	2655	ES.V	84	5.38	2.78	0.45
			ES.P	75			
Sable alluvionnaire	1540	2640	ES.V	95	0.58	1.84	0,42
			ES.P	89			

Equivalent de sable alluvionnaire : On remarque que le sable est très propre, il contient un pourcentage des éléments fins très faible.

Equivalent de sable calcaire : On remarque que le Sable est propre à faible pourcentage de fines plutôt fines.

E-Analyse granulométrique :

Les résultats de l'analyse granulométrique mélange du sable calcaire et du sable alluvionnaire (100% sable alluvionnaire et 100% sable calcaire et 75% sable alluvionnaire +25% sable calcaire et 25% sable alluvionnaire +75% sable calcaire et 50% sable alluvionnaire +50% sable calcaire) est représentée sur les tableaux III-2 et III-3 et III-4 et III-5 et III-6

Tableau III-2: Résultats de l'analyse granulométrique du sable calcaire 100%

Masse du sable 1100 g				
Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé(g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
4	5.5	5.5	0.5	99.5
3.15	14	19.5	1.77	98.23
2.5	142.5	162	14.73	85.27
2	126	288	26.18	73.82
1.6	121.5	409.5	37.23	62.77
1.25	91	500.5	45.50	54.50
1	86.5	587.00	53.36	46.64
0.63	130	717	65.18	34.82
0.5	24.5	741.5	67.41	32.59
0.315	61.5	803	73	27
0.25	32	835	75.91	24.09
0.16	41.5	876.5	79.68	20.32
0.125	16.5	893	81.18	18.82
0.1	9.5	902.5	82.05	17.95
0.08	143.5	1046	95.09	4.91
<0.08	41.5	1087.5	98.86	1.14

Tableau III-3 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable alluvionnaire 100%

Masse du sable 1100 g				
Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé(g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
4	0	0	0	100
3.15	0.5	0.5	0.05	99.95
2.5	8	8.5	0.77	99.23
2	8	16.5	1.5	98.5
1.6	9	25.5	2.32	97.68
1.25	10.5	36	3.27	96.73
1	17	53	4.82	95.18
0.63	132.5	185.5	16.86	83.14
0.5	88.5	274	24.91	75.09
0.315	464	738	67.09	32.91

0.25	215.5	953.5	86.68	13.32
0.16	106.5	1060	96.36	3.64
0.125	13	1073	97.55	2.45
0.1	5	1078	98	2
0.08	4.5	1082.5	98.41	1.59
<0.08	4	1086.5	98.77	1.23

Tableau III-4 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable alluvionnaire 50% et 50% sable calcaire

Masse du sable 1100 g				
Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé(g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
4	1.5	1.5	0.14	99.86
3.15	10.5	12	1.09	98.91
2.5	73.5	85.5	7.77	92.23
2	66	151.5	13.77	86.23
1.6	68	219.5	19.95	80.05
1.25	60.5	280	25.45	74.55
1	53.5	333.5	30.32	69.68
0.63	155	488.5	44.41	55.59
0.5	57.5	546	49.64	50.36
0.315	247	793	72.09	27.91
0.25	110	903	82.09	17.91
0.16	69.5	972.5	88.41	11.59
0.125	11.5	984	89.45	10.55
0.1	7.5	991.5	90.14	9.86
0.08	81.5	1073	97.55	2.45
<0.08	13	1086	98.73	1.27

Tableau III-5: Résultats de l'analyse granulométrique du sable alluvionnaire 75% et 25% sable calcaire

Masse du sable 1100 g				
Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé(g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
4	1.5	1.5	0.14	99.86
3.15	5	6.5	0.59	99.41
2.5	41	47.5	4.32	95.68
2	36.5	84	7.64	92.36
1.6	39	123	11.18	88.82
1.25	32	155	14.09	85.91
1	41	196	17.82	82.18
0.63	156.5	352.5	32.05	67.95
0.5	78	430.5	39.14	60.86
0.315	340.5	771.5	70.14	29.86
0.25	155	926	84.18	15.82
0.16	83.5	1009.5	91.77	8.23
0.125	11.5	1021	92.82	7.18

0.1	6.5	1027.5	93.41	6.59
0.08	30	1057.5	96.14	3.86
<0.08	13.5	1071	97.36	2.64

Tableau III-6 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable alluvionnaire 25% et 75% sable calcaire

Masse du sable 1100 g				
Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé(g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
4	3.5	3.5	0.32	99.68
3.15	18	51.5	4.68	95.32
2.5	91	112.5	10.23	89.77
2	91.5	204	18.55	81.45
1.6	91	295	26.82	73.18
1.25	77	372	33.82	66.18
1	77.5	449.5	40.86	59.14
0.63	161	610.5	55.5	44.50
0.5	44	654.5	59.50	40.5
0.315	151.5	806	73.27	26.73
0.25	65	871	79.18	20.82
0.16	57	928	84.36	15.64
0.125	13	941	85.55	14.45
0.1	10.5	951.5	86.50	13.50
0.08	103	1054.5	95.86	4.14
<0.08	39.5	1094	99.45	0.55

Les résultats des essais de l'analyse granulométrique effectuée sur les différents échantillons des combinaisons des deux sables sont représentés sur les **figures III-1 à III-5** avec les fuseaux granulaires du sable pour une éventuelle comparaison afin de déterminer la combinaison qui se rapproche du sable préférentielle (fuseau A)

Le tableau suivant présente différentes possibilités dans le cas d'un sable :

Sable admissibles		Fuseaux	Module des finesses
	Préférentiel	A	2.20 à 2.80
	Un peu trop fin	B	1.80 à 2.20
	Un peu trop grossier	C	2.80 à 3.20

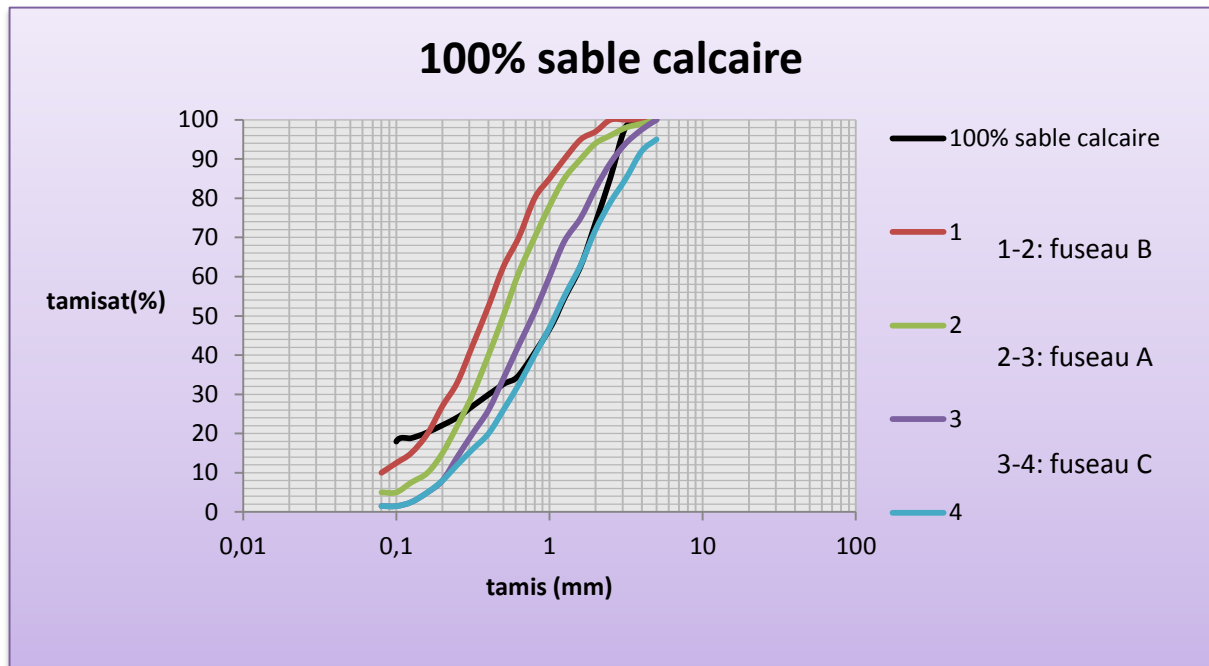


Figure III-1: Courbe granulométrique du 100% sable calcaire.

La combinaison Sc100Sa0 figure III-1 est riche en éléments fin ($D < 0.1\text{mm}$) presque 18%.ajouté à cela la majorité de la courbe se trouve dans le fuseau comprenant 70% d'élément grossier de diamètre compris entre 1et 3mm.

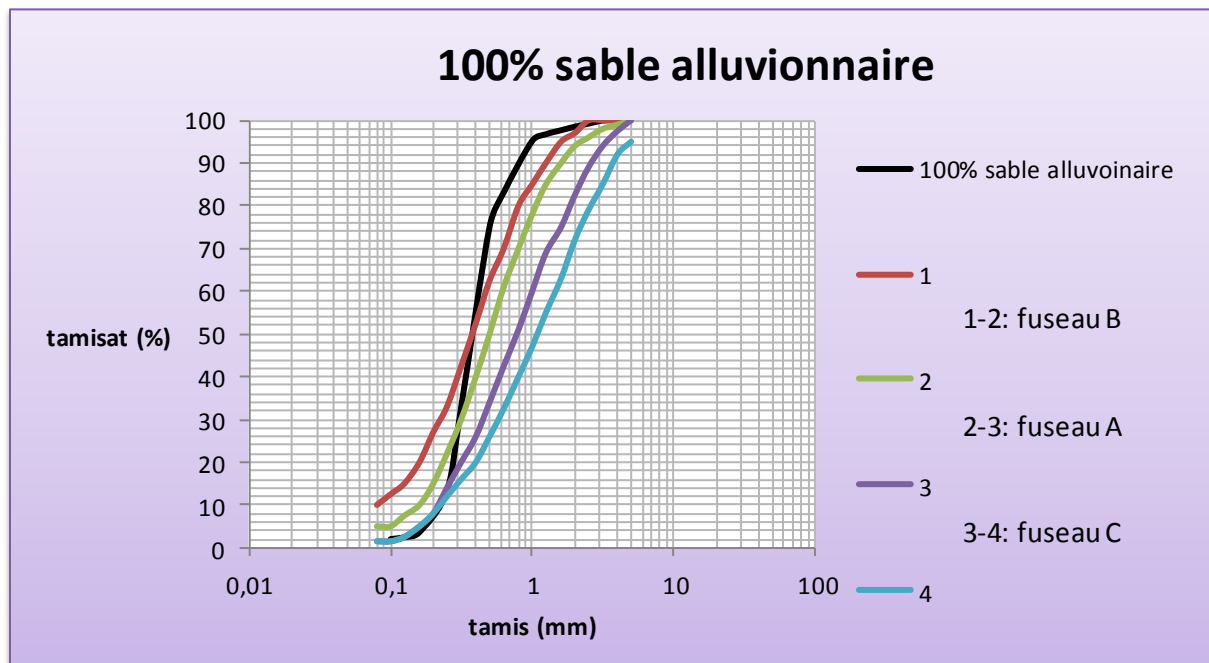


Figure III-2 : Courbe granulométrique du 100% sable alluvionnaire.

La combinaison SA100SC0 figure III-2 est pauvre en éléments fin inférieur à 3%. La majorité de la courbe se trouve au-dessus du fuseau B relatif au sable fin.

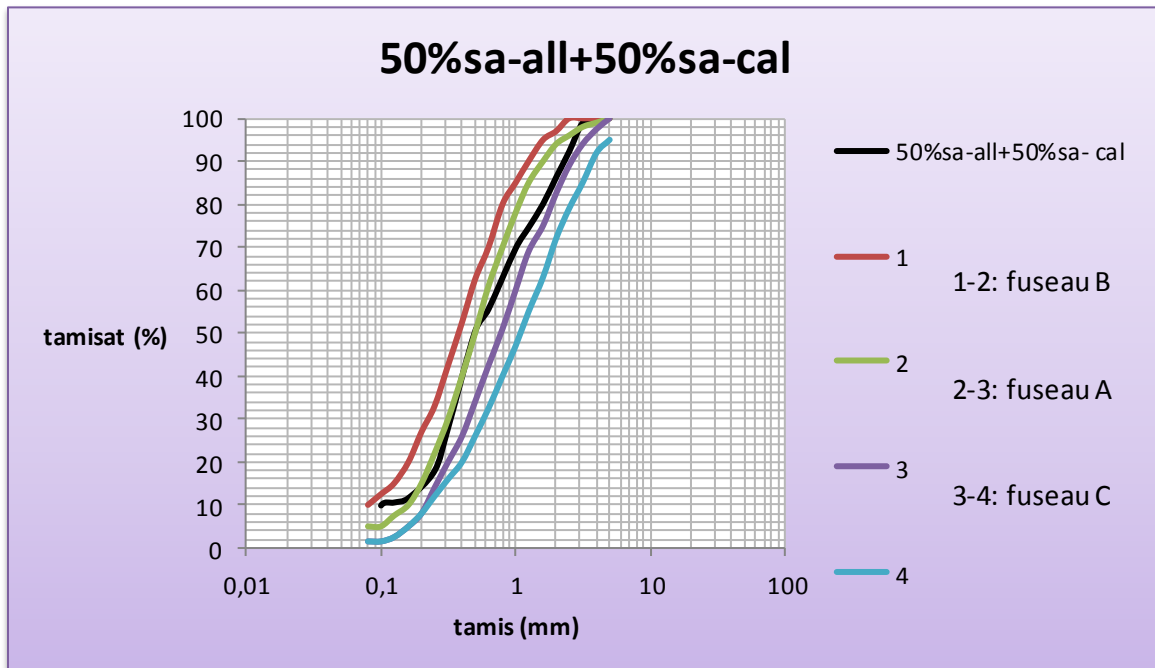


Figure III-3 : Courbe granulométrique du sable mixte (50% sable alluvionnaire +50% sable calcaire).

La combinaison SA50SC50 présente une courbe étalée sur l'intervalle 0-3.15mm. On peut voir sur la figure III-3 que la courbe granulométrique se trouve à l'intérieur du fuseau A relatif à un sable préférentiel.

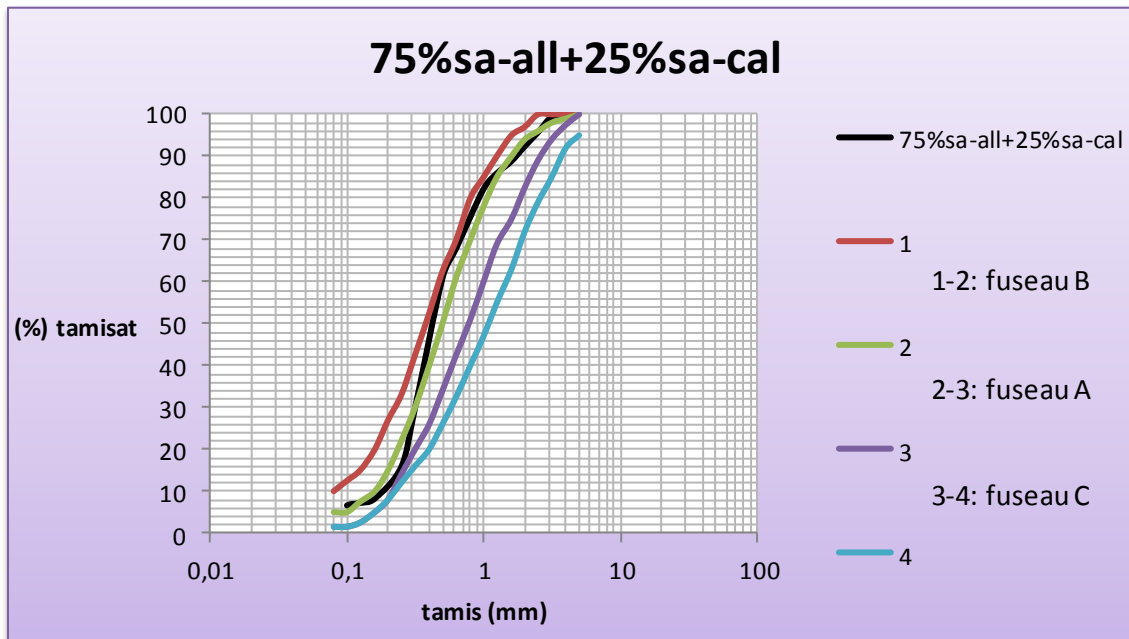


Figure III-4 : Courbe granulométrique du sable mixte (75% sable alluvionnaire +25% sable calcaire).

La combinaison SA75SC25 Figure III-4 a une granulométrie dont la courbe se trouve dans le fuseau B relatif à une granulométrie fine. Elle contient 05% d'élément fin.

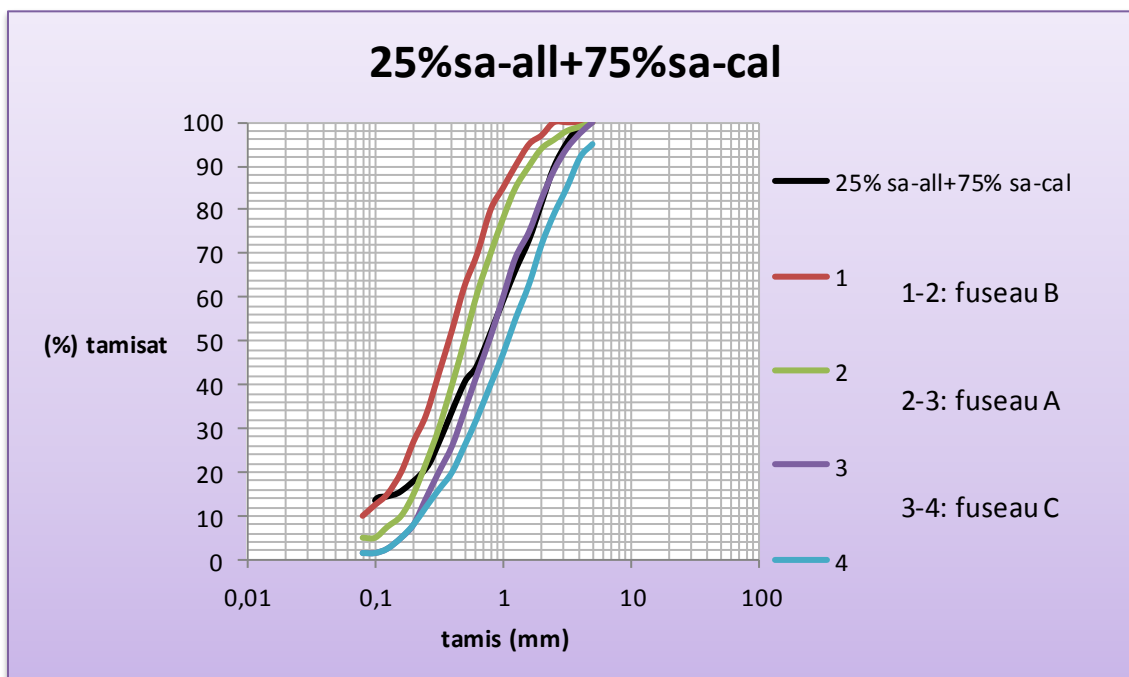


Figure III-5: Courbe granulométrique du sable mixte (25% sable alluvionnaire +75% sable calcaire).

La combinaison SA25SC75 a une courbe qui se trouve à la limite entre le fuseau A et le fuseau C. C'est une combinaison qui est contient 15% d'élément fin.

A partir des courbes granulométriques on peut calculer les coefficients d'uniformité C_u et coefficients courbure C_c .

Tableau III-7: Les résultats coefficients d'uniformité C_u et coefficients courbure C_c

	100% sable alluvionnaire	100% Sable calcaire	75% sable alluvionnaire + 25% Sable calcaire	50% sable alluvionnaire + 50% Sable calcaire	25% sable alluvionnaire + 75% Sable calcaire
C_u	2.73	18.75	2.78	7.2	2.857
C_c	1.56	0.96	1.10	1.47	1.36

Nous pouvons aussi calculer le module de finesse pour les sable qui est définie par :

$$M_f = \frac{\left[\sum \text{des refus (en \%)} \text{ des tamis } 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5, 5 \right]}{100} \dots\dots\dots \text{(II-4)}.$$

Tableau III-8 : Les résultats module de finesse.

	100% sable alluvionnaire	100% Sable calcaire	75% sable alluvionnaire + 25% Sable calcaire	50% sable alluvionnaire + 50% Sable calcaire	25% sable alluvionnaire + 75% Sable calcaire
M_f	1.84	2.78	2.12	2.38	2.57

Ce module de finesse est une caractéristique importante surtout en ce qui concerne les sables. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse M_f compris entre 2.2 et 2.8 ; au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité. Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables à bétons.

En se référant aux fuseaux A-B-C du sable on voit que la combinaison 50% sable alluvionnaire et 50% calcaire est la meilleure combinaison avec un module de finesse de 2.38 qui correspond à un sable référentiel.

2- Le ciment

Le type de ciment utilisé est un ciment portland CPJ45. Fabriqué l'usine de El gozlane

➤ Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques du ciment CPJ45 utilisé sont résumées dans le **tableau III-9**.

Tableau III-9 : Caractéristiques physiques du ciment.

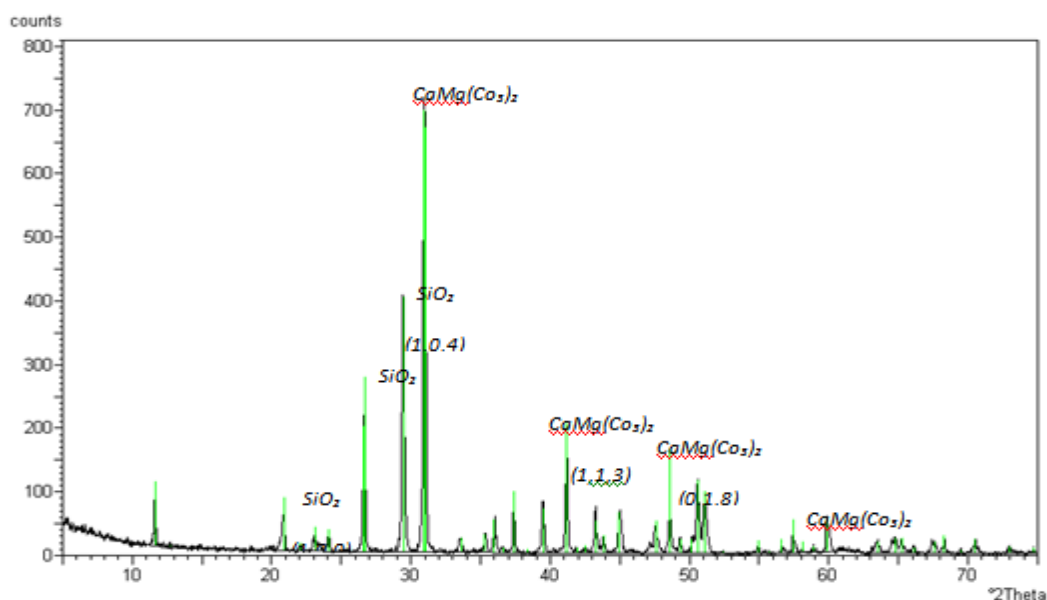
Masse volumique apparente (kg/m ³)	Masse volumique absolue (kg/m ³)	Surface spécifique (cm ² /g)	Prise à froid	Prise à chaud	Expansion (mm)	Classe vraie	
						Rc (MP)	Rt (MPa)
1410	3010	3640	2h25 5h10	30mn 1h10	10	43.2	4.3

➤ Composition chimiques et minéralogiques du ciment

La composition chimique du ciment CPJ a été obtenue à travers la fiche technique donnée par l'usine de Sour El Ghozlane. Cette composition est résumée dans le **tableau III-10** :

Tableau III-10 : Composition chimique du ciment CPJ45 de Sour El Gozlane

Elément	SiO ₂	AL ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Perte au feu	total
Quantité %	20.66	4.77	2.88	63.31	1.17	2.32	1.06	96.17

**Figure III-6 :** Diffractogramme du ciment CPJ 45

D'après le diffractogramme du ciment on peut confirmer l'existence des silicates tricalciques C_3S ; des silicates bicalciques C_2S ; des Ferro-aluminates tétra calciques C_4AF qui sont généralement les composants de base des ciments CPJ. L'analyse a aussi révélé l'existence des aluminates tricalcique C_3A et des ferrites tricalcique C_2F . Les résultats de l'analyse minéralogique du ciment sont représentés dans le **tableau III-11**.

Les résultats de caractérisation physico mécanique et chimiques du ciment utilisé confirment bien la classe avec laquelle le ciment est identifié et commercialisé. Sa finesse et son pourcentage élevé en CaO peuvent conférer aux bétons élaborés des performances requises.

Tableau III-11 : Analyse minéralogique du ciment

Phase	Constituants minéraux du Clinker	Teneur rapportée au clinker + gypse (%)
Clinker	C_3S	58
	C_2S	18
	C_3A	5
	C_4AF	13
	CaO_L	1
Régulateur du prise	Gypse	5
Ajout	Calcaire	5
	Pouzzolane naturelle	7

3- Les granulats de liège

➤ Analyse granulométrique

Les résultats de l'analyse granulométrique des granulats de liège expansé et des granulats de liège naturel sont représentés dans les **tableaux III-12, III-13**. Et ses courbes granulométriques sont représentées sur la **figure III-7**.

Tableau III-12 : Résultats de l'analyse granulométrique des granulats de liège expansé 0/3

Masse des granulats de liège expansé 200 g				
Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé(g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
4	0	0	0	100
3.15	0.22	0.22	0.11	99.89
2.5	30.5	30.72	15.36	84.64
2	33.5	64.22	32.11	67.89
1.6	28	92.22	46.11	53.89
1.25	22.5	114.72	57.36	42.64

1	18	132.72	66.36	33.64
0.63	33	165.72	82.86	17.14
0.5	6	171.72	85.86	14.14
0.315	11.5	183.22	91.61	8.39
0.25	5.5	188.72	94.36	5.64
0.16	4.5	193.22	96.61	3.39
0.125	1.5	194.72	97.36	2.64
0.1	1.5	196.22	98.11	1.89
0.08	2	198.22	99.11	0.89
<0.08	1.5	199.72	99.86	0.14

Tableau III-13 : Résultats de l'analyse granulométrique des granulats de liège naturel 0/3.

Masse des granulats de liège naturel 200 g				
Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé(g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
4	0	0	0	100
3.15	0	0	0	100
2.5	17	17	8.5	91.5
2	26.5	43.5	21.75	78.25
1.6	22.5	66	33	67
1.25	19	85	42.5	57.5
1	17.5	102.5	51.25	48.5
0.63	37.5	140	70	30
0.5	7.5	147.5	73.75	26.25
0.315	17.5	165	82.5	17.5
0.25	8	173	86.5	13.5
0.16	10	183	91.5	8.5
0.125	4	187	93.5	6.5
0.1	2.5	189.5	94.75	5.25
0.08	4.5	194	97	3
<0.08	3.5	197.5	98.75	1.25

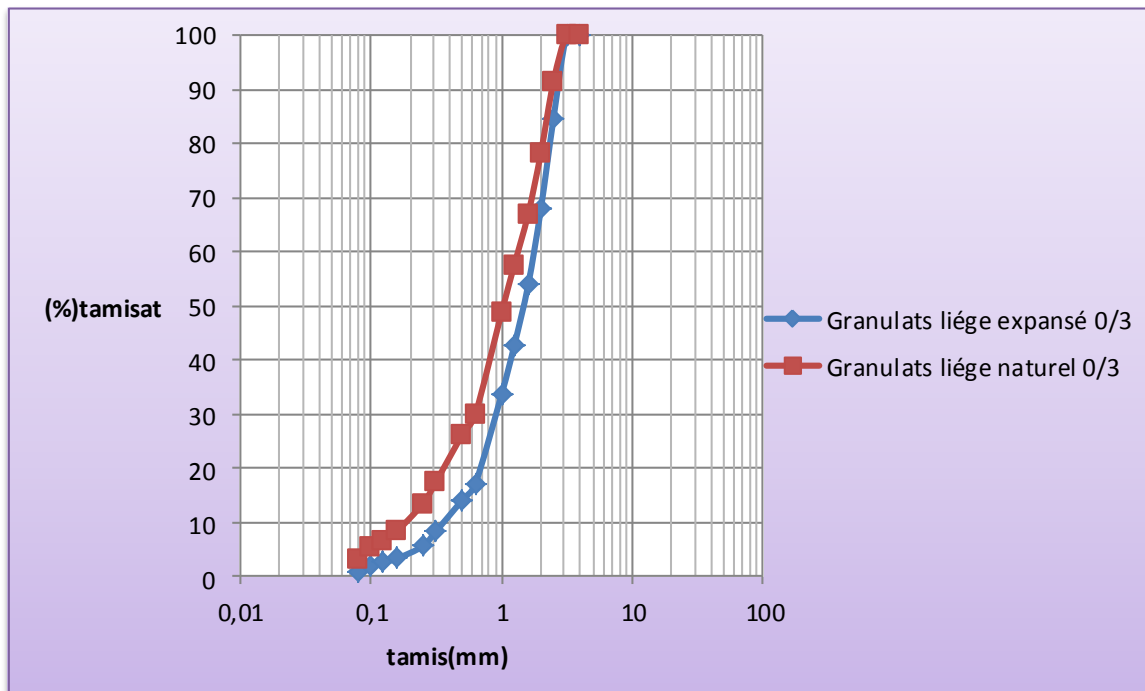


Figure III-7 : Courbes granulométriques des granulates de liège expansé 0/3 et granulates de liège naturel 0/3

Les courbes granulométriques des granulates de liège expansé 0/3 et de liège naturel 0/3 présentent une granulométrie continue et étalée sur la plage de granulométrie 0/3.

➤ Caractéristiques physiques

A- La masse volumique apparente

Pour détermination la masse volumique apparente des différents types de liège on utilise la méthode de récipient. Les résultats de mesure de la masse volumique apparente des différents granulates suivants :

A- Masse volumique apparente ρ_{app} :

Les masses volumiques apparentes moyennes des lièges sont présenté dans le **tableau III-14**.

B - La masse volumique absolue

Pour détermination la masse volumique absolue des différents types de liège on utilise la méthode de pycnomètre. Les résultats de mesure de la masse volumique absolue des différents granulates suivants :

B- Masse volumique absolue ρ_{abs} :

Les masses volumiques absolues moyennes des lièges sont présenté dans le **tableau III-14**.

Les valeurs obtenues des masses volumiques montrent que le matériau du liège est assez léger relativement à d'autres matériaux comme le bois. La légèreté du liège nous permettra certainement d'avoir des bétons assez légers. Les granulats expansés 0/3 ont la plus faible masse volumique par rapport à la granulométrie liège naturel 0/3.

c- Absorption :

Le procédé de détermination de l'absorption pour les granulats de liège est pratiquement le même qu'avec celui utilisé pour le sable.

Les résultats de l'essai des coefficients d'absorption sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau III-14 : Caractéristiques physiques des lièges

Type de sable	Masse volumique apparente (kg/m ³)	Masse volumique absolue (kg/m ³)	Absorption d'eau (%)	Porosité
Granulats de liège expansé 0/3	88.76	160	3	0.45
Granulats de liège naturel 0/3	129.60	210	3.2	0,38

D-Degré d'absorption d'eau

Afin de contrôler la quantité d'eau dans le mélange à cause de leur effet très important sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques du béton (maniabilité et la résistance). Nous avons effectué des mesures de l'absorption des granulats de liège par immersion. Après l'immersion d'une masse des granulats secs dans l'eau. On mesure la masse d'eau absorbée en différentes minutes jusqu'à la stabilisation de celle dernière où on assure que l'eau trouve dans les pores intérieurs des granulats soit saturé. Les valeurs de mesure de l'absorption et désorption sont représentées sur le **tableau III-16** et **III-17**.

Tableau III-15 : Essai d'absorption et désorption des granulats de Liège expansé 0/3 et liège naturel 0/3.

granulat	Masse d'échantillon (g)	Masse du récipient vide (g)	Masse du récipient plein (g)
Liège expansé 0/3	40	564.3	639.40
liège naturel 0/3	40	598.6	628.20

Tableau III-16 : Absorption d'eau des granulats de Liège expansé 0/3 et liège naturel 0/3.

	temps					
granulats	5mn	10mn	15mn	30mn	1h	2h
liège expansé 0/3 (g)	657.5	698.4	745.6	760.6	775.4	808.7
liège naturel 0/3 (g)	644.4	652.7	655.5	718.2	728.5	768.9

Tableau III-17 : Désorption d'eau des granulats de liège expansé 0/3 et liège naturel 0/3.

	temps					
granulats	5mn	10mn	15mn	30mn	1h	2h
liège expansé 0/3(g)	821	816.6	812.2	806.9	795.6	773.5
liège naturel 0/3 (g)	791	788.9	785.5	785.1	773.3	749.2

Les courbes représentant les taux d'absorption et désorption des granulats en fonction du temps sont représenté sur les **figures III-8** et **III-9**

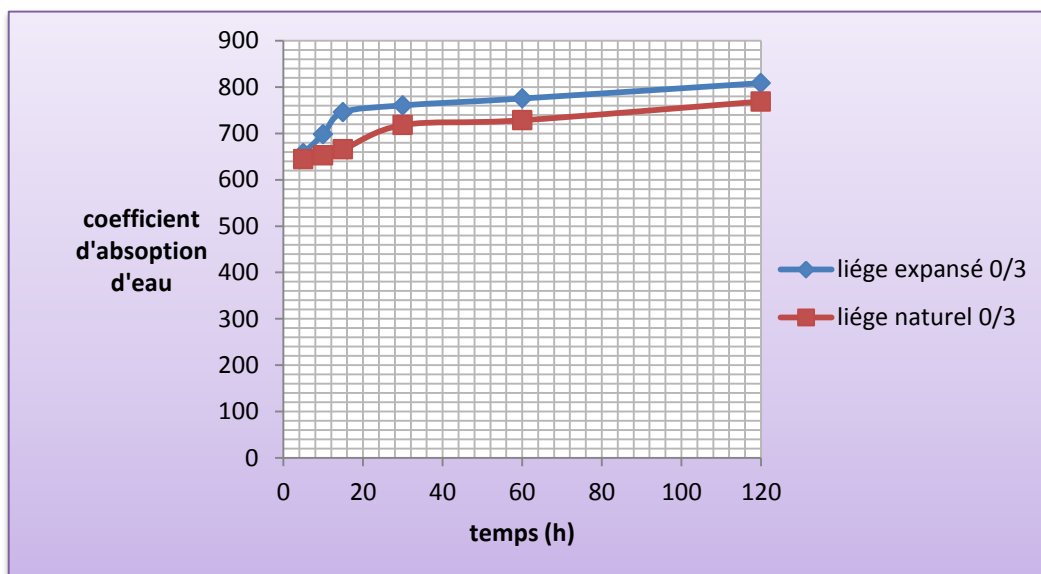


Figure III-8 : Cinétique d'absorption des granules légers pendant 2 heures

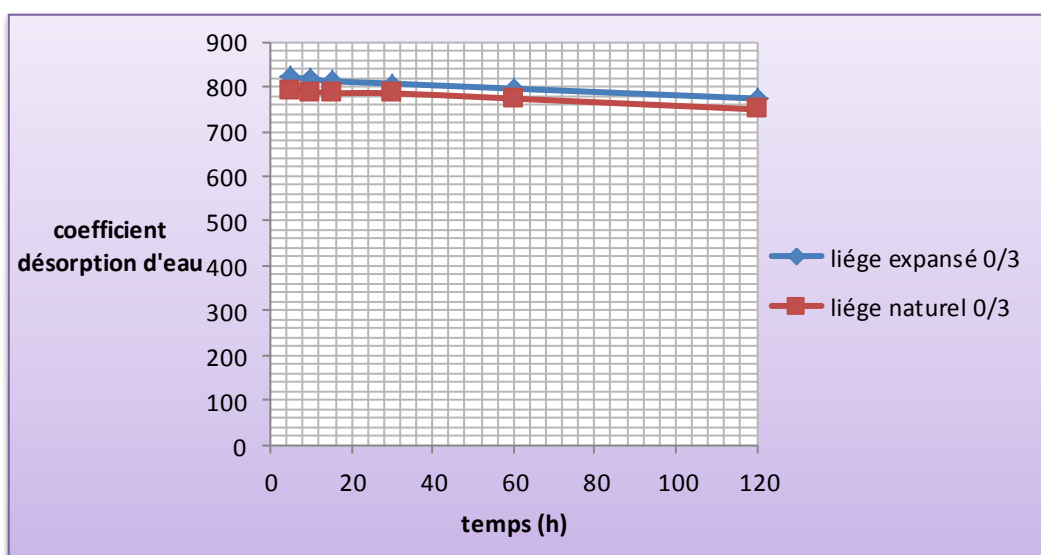


Figure III-9 : Cinétique désorption des granules légers pendant 2 heures

D'après les tableaux ci-dessous on voit que les granules liège expansé 0/3 ont un taux d'absorption de 22%. Les granules liège naturel 0/3 ont un taux d'absorption de 26 %. D'après l'allure des courbes le gain de masse d'eau est important pour les granules liège expansé 0/3 que pour les granules liège naturel 0/3.

Au cours de désorption la fuite de l'eau est plus rapide pour les granules liège naturel 0/3 que pour celle des granules liège expansé 0/3.

4-L'analyse chimique de l'eau de gâchage

L'analyse chimique de cette eau est effectuée au laboratoire de l'EPDEMI et elle indique que c'est une eau de potabilité chimique passable à bonne avec un pourcentage élevé de sulfates. Les résultats de l'analyse chimique de l'eau de gâchage sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau III-18 : L'analyse chimique de l'eau de gâchage

Nature du point d'eau	Concentration en cations et en anions				
Ca ⁺² en mg/L	104	Balance Cations m.éq/L 18.73			5.2
Mg ⁺² en mg/L	97				8
Na ⁺ en mg/L	102.3				4.45
K ⁺ en mg/L	6.46				0.16
Cl ⁻ en mg/L	148	Balance Anions m.éq/L 16.24			4.17
SO ₄ ⁻² en mg/L	520				10.82
HCO ₃ ⁻ en mg/L	94				1.55
NO ₃ ⁻ en mg/L	12.4				0.2
Résidu sec à 105°C 1576 mg/l	PH (laboratoire) 7.7	Conductivité en 1/10 mm à 25° 16.80			Dureté total 43.25
Test chlore (ml d'eau de javel à 15° /m ³ 0.96 ml/l	T.H 66°F	T.A.C 7.75°F	S.A.F 95°F	I.S 62°F	
Minéralisation 1067 mg/l	Oxygène dissous O ₂ 12.05		SiO ₂ 0.0 mg/l	Somme des ions 1101.55	
Cations	Ca ⁺² =15%	Mg ⁺² =23%		Na ⁺ =13%	K ⁺ =0.5%
Anions	SO ₄ ⁻² =31.3%	Cl ⁻ =12%		HCO ₃ ⁻ =4.5%	NO ₃ =30.60%

III-3-Formulation du mortier témoin

Mortier est un béton dépourvu de granulats de liège, il est composé essentiellement de ciment, de sable et éventuellement de l'eau.

➤ **Dosage en ciment :**

Comme il a été cité auparavant pour l'élaboration d'un mortier normalisé, nous avons choisi un rapport C/S=1/3, ce dosage sera fixé pour tous les échantillons élaborés.

➤ **Elaboration des différentes formulations**

Après l'analyse et la caractérisation de tous les constituants, nous présentons les principaux essais faits dans le laboratoire de génie civil de l'université de Laghouat sur les propriétés des mortiers à base de deux types de sable (sable de calcaire et sable alluvionnaire).

➤ **Les compositions des bétons témoin**

Tableau-19 : compositions des différences constituantes des mortiers préparés.

		E/C	C/S
Mortier01	Mortier a base de 100% sable alluvionnaire.	0.5	1/3
Mortier02	Mortier a base de 100% sable de calcaire.	0.5	1/3
Mortier03	Mortier a base de 50% sable alluvionnaire+50% sable calcaire.	0.5	1/3
Mortier04	Mortier a base de 75% sable alluvionnaire+25% sable calcaire.	0.5	1/3
Mortier05	Mortier a base de 25% sable alluvionnaire+75% sable calcaire.	0.5	1/3

Tableau-20 : Dosage de béton témoin par 1m³

matrice	Ciment (kg)	Sable alluvionnaire (kg)	Sable calcaire (kg)	Eau utile (kg)	Eau totale (kg)
100% sa-0% sca	390	1170	0	195	201.78
75% sa -25% sca	390	878	293	195	215.86
50% sa -50% sca	391	586	586	195	229.93
25% sa -75% sca	391	293	879	195	243.99
0% sa -100% sca	391	0	1174	196	259.16

➤ Malaxage du mortier

Ces opérations de malaxage sont récapitulées dans le tableau ci-dessous :

Tableau-21 : opération de malaxage

Opérations	Introduction Eau	Introduction ciment		Introduction de sable		Reclage de la cuve		
Durées des opérations			30 S	30S	30S	15S	1 min15s	60S
Etat de malaxage	Arrêté		Vitesse lent		Vitesse Rapide	Arrêté	Arrêté	Vitesse Rapide

➤ Préparation des éprouvettes

- On utilise des moules prismatiques de dimension $4 \times 4 \times 16$ cm.
- On doit nettoyer les éprouvettes à l'aide d'une brosse métallique puis on les étale avec l'huile pour faciliter le démoulage.
- On verse le mortier dans les moules prismatiques.
- On remplit les éprouvettes puis on les vibre pour éliminer les bulles d'air.

Les mortiers sont conservés en un milieu :

- Conservation dans l'eau ($20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$; 100% HR)



Figure III-10: Les éprouvettes immergées dans l'eau.

➤ Résistance à la compression du béton témoin

Des éprouvettes préparées pour les différentes combinaisons sont écrasées en compression à 3j et à 7j. Les résultats obtenus sont montrés sur l'histogramme de la **figure III-11**.

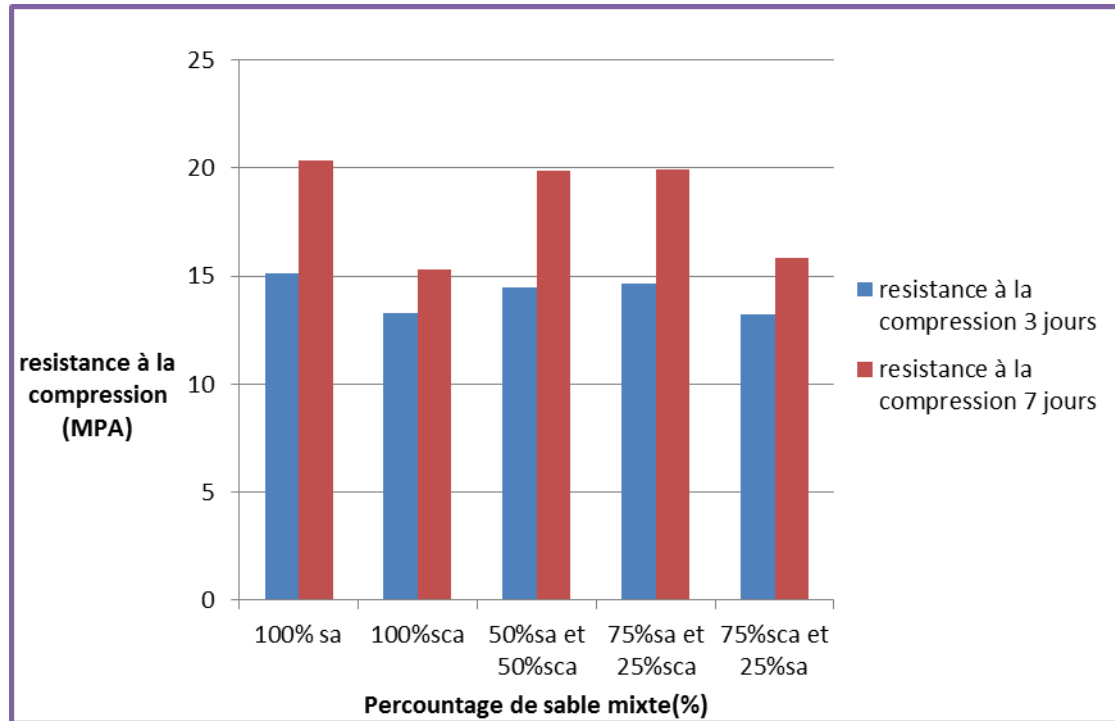


Figure III-11 : Résistance à la compression en fonction pourcentage de sable mixte

On voit que le sable mixte 100%sable alluvionnaire et 0%sable calcaire présente les meilleurs résistances ensuite la combinaison 75Sa 25Sc. En troisième position vient la combinaison 50SA50Sc. D'après la littérature les bétons comprenant plus de sable calcaire auront des résistances meilleures à long terme.

En synthèse des résultats obtenus on peut dire que la combinaison 50%Sa 50Sc est la meilleur combinaison qui nous fournira les meilleurs performances.

La deuxième étape de ce travail consiste en l'allégement de la matrice par les granulats de liège de même granulométrie que le sable 0/3, en substituant une partie de volume de sable par la même partie de volume en granulat de liège. Malheureusement et à cause de situation sanitaire du corona virus et la fermeture du laboratoire nous n'avons pas pu entamer la deuxième partie et par la suite la troisième partie relative au confortement des bétons de liège par les fibres de cuivre.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail avait comme objectifs la valorisation de déchets de carrières par leurs transformations en matériaux de construction, la valorisation du déchet de liège issu de la fabrication des panneaux d'isolation par leur transformation en granulats légers pour l'élaboration d'un béton léger, la valorisation des déchets des câbles électriques en vue de les utiliser sous forme de fibres pour le renforcement des bétons de granulats légers.

La méthodologie qui a été adoptée consiste en premier lieu à optimiser la matrice cimentaire en déterminant la combinaison optimale en sable alluvionnaire et en sable calcaire. En deuxième lieu il s'agit d'alléger la matrice par substitution d'une partie de sable par une même partie de granulats de liège 0/3. En dernier lieu on renforce le béton léger par des fibres de cuivre. Malheureusement, à cause de la situation sanitaire du Corona qu'a connu l'Algérie et le monde entier, les deux dernières étapes n'ont pas été réalisées.

L'étude bibliographique nous a permis en premier lieu de situer l'utilisation des bétons de granulats légers dans le domaine de construction et la mise en œuvre du recours à la valorisation des déchets naturels et des déchets industriels pour l'élaboration des bétons ou de mortiers légers isolant thermiquement en particulier ceux utilisant les granulats celluloseux tels que le bois et le liège. un résumé sur les travaux antérieurs réalisés sur les bétons de liège nous a permis de cerner les différents avantages de l'allégement des bétons par le liège en particulier les avantages liés à l'isolation. Dans un deuxième volet la revue bibliographique nous a permis d'avoir un aperçu sur les différents types de fibres utilisées pour le renforcement des bétons en générale et les bétons légers.

Les résultats obtenus ont révélé l'intérêt remarquable de la combinaison du sable alluvionnaire et du sable calcaire dans l'objectif d'obtenir une matrice compacte et résistante.

Les essais de granulométrie par tamisage ont montré que la combinaison 50% Sable alluvionnaire et 50% sable calcaire est la combinaison qui nous a donné un sable référentiel avec un bon module de finesse. Les essais d'écrasement de cinq séries d'échantillon relatifs à cinq combinaisons sable ont montré qu'à court terme (3j et 7j) les combinaisons 100%Sa et 75%Sa 25% présentent les meilleures résistances, cependant et se référant à la bibliographie et particulièrement aux travaux réalisés sur les combinaisons du sable calcaire et le sable alluvionnaire, la meilleure combinaison est le 50%Sa 50Sc.

En recommandation il est souhaitable que ce travail sera poursuivi afin d'arriver à concrétiser ces objectifs

Références bibliographiques

- [1] Zambon, A. (2018). « Formulation et caractérisation physique d'un béton léger de mousse et à base d'argile: valorisation des sédiments fins de dragage ». (Doctoral dissertation, Bordeaux).
- [2] Adel ,A . Keddou , A .(2015). « Etude de la durabilité d'un béton léger renforcé par des fibres ». mémoire de master , Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent.
- [3] Neville, A. N. (2000). « Propriétés des bétons ». Eyrolles.
- [4] Contant, M. (2000). « Confection de bétons légers de fabrication d'éléments architecturaux ». Ecole de Technologie supérieure l'Université du Québec, Québec. Montréal 14 Avril 2000.
- [5] Mohellebi, S. (2015). « Caractérisation et modélisation des paramètres physico-hygro-mécaniques d'un béton léger à base granulats composites ». (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [6] Shink, M. (2003). « Compatibilité élastique, comportement mécanique et optimisation des bétons de granulats légers ». Université Laval Québec Avril 2003.
- [7] Livre : Roy, J. P., & Blin-Lacroix, J. L. (1998). « Le dictionnaire professionnel du BTP ».
- [8] Jean-Pierre lott; « Le béton, matériau de structure d'expression architecturale ».
- [9] Bello, L. (2014). « Méthodologie de formulation des Bétons Auto-Plaçant Légers ».
- [10] Dreux, G., & Festa, J. (1998). « Nouveau guide du béton et de ses constituants ». Eyrolles.
- [11] Bederina, M. (2007). « Caractérisation mécanique et physique des bétons de sables à base de Déchets de bois ». Thèse De Doctorat En Génie Civil, De L'université De Laghouat, 25 Avril 2007.
- [12] www.infociments.fr/béton/types/autres-bétons/béton-leger.
- [13] Document technique réglementaire, 1997
- [14] Kedjour, N. E. (1991). « Propriétés et pathologie du béton ». Office des publications universitaires.
- [15] Alrim. K , Cheikh –Kassem. N AL , Queneudec. M, EDecamps. E .A. , « construire en matériaux locaux : tradition et modernité de l'habitat, approches culturelles, réalités économique, colloque franco-maghrebin, Marseille Oct 91.
- [16] « Rapport technique / domaine du bâtiment - génie-civil » hauteur : Laura Vonlanthen , Janvier 2014.
- [17] Teo, D. C. L., Mannan, M. A., Kurian, V. J., & Ganapathy, C. (2007). « Lightweight concrete made from oil palm shell (OPS): Structural bond and durability properties ». Building and environment, 42(7), 2614-2621.
- [18] Ünal, O., Uygunoğlu, T., & Yildiz, A. (2007). « Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation ». Building and Environment, 42(2), 584-590.
- [19] Demirdag, S., & Gunduz, L. (2008). « Strength properties of volcanic slag aggregate lightweight concrete for high performance masonry units ». Construction and building materials, 22(3), 135-142.

- [20] Wang, H. Y., & Tsai, K. C. (2006). « Engineering properties of lightweight aggregate concrete made from dredged silt». *Cement and Concrete Composites*, 28(5), 481-485.
- [21] De Gennaro, R., Cappelletti, P., Cerri, G., De'Gennaro, M., Dondi, M., & Langella, A. (2005). « Neapolitan Yellow Tuff as raw material for lightweight aggregates in lightweight structural concrete production». *Applied Clay Science*, 28(1-4), 309-319.
- [22] Laukaitis, A., Žurauskas, R., & Kerien, J. (2005). « The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties». *Cement and Concrete Composites*, 27(1), 41-47.
- [23] Babu, D. S., Babu, K. G., & Wee, T. H. (2005). «Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash». *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1218-1223.
- [24] Miled, K., Le Roy, R., Sab, K., & Boulay, C. (2004). «Compressive behavior of an idealized EPS lightweight concrete: size effects and failure mode». *Mechanics of materials*, 36(11), 1031-1046.
- [25] Jo, B. W., Park, S. K., & Park, J. B. (2007). «Properties of concrete made with alkali-activated fly ash lightweight aggregate (AFLA) ». *Cement and Concrete composites*, 29(2), 128-135.
- [26] Gesoğlu, M., Özturan, T., & Güneyisi, E. (2007). «Effects of fly ash properties on characteristics of cold-bonded fly ash lightweight aggregates». *Construction and Building Materials*, 21(9), 1869-1878.
- [27] Virlogeux, M., & Arnold, M. (1986). «Granulats et betons légers ». Bilan de dix ans de recherches. Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris
- [28] Ledhem, A. (1997). «Contribution à l'étude d'un béton de bois: mise au point d'un procédé de minimisation des variations dimensionnelles d'un composite argile-ciment-bois». (Doctoral dissertation, Lyon, INSA).
- [29] Cormon, P. (1972). «BETONS LEGERS D'AUJOURD'HUI». EYROLLES., Paris.
- [30] Zhang, M. H., & Gjvovrv, O. E. (1991). « Mechanical properties of high-strength lightweight concrete». *Materials Journal*, 88(3), 240-247.
- [31] Wasserman, R., & Bentur, A. (1996). « Interfacial interactions in lightweight aggregate concretes and their influence on the concrete strength». *Cement and Concrete Composites*, 18(1), 67-76.
- [32] Yamasaki, J., Nimura, S., Nakajima, I., & Ohsugi, K. (1994). « Development of special lightweight concrete. *Zairyo*».43(491), 990-996.
- [33] Steiger, R. W., & Hurd, M. K. (1978). « Lightweight insulating concrete for floors and roof decks». *Concrete Construction*, 23(7), 411-422.
- [34] Rilem ,Commission des bétons légers, Terminologie et définition». *Matériaux et construction*, N°13, 1970.
- [35] Gil, L. (2009). « Cork composites: a review ». *Materials*, 2(3), 776-789.
- [36] Gil, L., & Cortiça, P. (1998). « Tecnologia e Aplicação».

- [37] Costa, A., Pereira, H., & Oliveira, A. (2003). «Variability of radial growth in cork oak adult trees under cork production». *Forest ecology and management*, 175(1-3), 239-246.
- [38] Barberis, A., Dettori, S., & Filigheddu, M. R. (2003). « Management problems in Mediterranean cork oak forests: post-fire recovery». *Journal of arid Environments*, 54(3), 565-569.
- [39] Pereira, H. (1984). « Produção e utilização da cortiça: situação actual e perspectiva de desenvolvimento». *Cortiça*, 545, 99-112.
- [40] Gil L., Moiteiro C., « Cork », In Ullmann's Encyclopedia of Chemical Technology, 6th ed.; Wiley- VCH: Verlag, Germany, (2003).
- [41] Benamirouche S., Chouial M., « Cartographie et description des peuplements portegraines de chêne liège (*Quercus suber* L.) dans les wilayas de Jijel, Mila et Bejaia(Nord- est algérien) », Station régionale de recherche forestière de Jijel Oued kissir El Aouana- Jijel – Algérie Tél/fax (213) 34 51 32 76.
- [42] Gibson, L. J., Easterling, K. E., & Ashby, M. F. (1981). « The structure and mechanics of cork». *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 377(1769), 99-117.
- [43] Pimienta, P., Chandellier, J., Rubaud, M., Dutruel, F., & Nicole, H. (1994). « Étude de faisabilité des procédés de construction à base de béton de bois». *Cahiers du Centre scientifique et technique du bâtiment*, 346(2703).
- [44] Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1999). « Cellular solids: structure and properties». Cambridge university press.
- [45] Lequin, S. (2010). « Etude de l'adsorption et de la diffusion en phase gazeuse, de petites molécules actives du vin dans le liège». (Doctoral dissertation).
- [46] Natividade, J. V. (1956). « Subériculture, édition française de l'ouvrage portugais. Subericultura». Ecole Nationale des Eaux et Forêts, Nancy, France.
- [47] Karoune, S. (2008). « Effets des boues résiduairees sur le développement des semis du chêne liège (*Quercus suber* L.) ». Mémoire En vue de l'obtention du diplôme de magistère En Écologies Végétale. Université Mentouri Constantine. 198p.
- [48] Carvalho, A. P. O. (1995). « Acoustical behavior of a new lightweight partition made with gypsum board and cork». *The Journal of the Acoustical Society of America*, 98(5), 2879.
- [49] Karade, S. R., Irle, M., Maher, K., & Caldiera, F. (2002, September). « Cork granules as lightweight aggregate». In *Sustainable concrete construction: proceedings of the international conference*, University of Dundee, Scotland, UK (pp. 253-262).
- [50] Simon AMBOISE, Aurélie PEYRICHOU, « Concours génération développement durable. Comment économiser l'énergie à la maison ? Technique d'isolation par liège et tapisserie. » Mars 2007.
- [51] <http://www.institutduliege.com>
- [52] Gil, L. (2007). « Cork as a building material. Technical manual». Santa Maria de Lamas: APCOR.–Portuguese Cork Association. www.realcork.org
- [53] Eires, R., Camões, A., & Jalali, S. (2007). « Eco-friendly construction materials using gypsum and industrial wastes». Rotterdam, Netherlands.

- [54] Branco, F. G., Tadeu, A., & de Lurdes Belgas CReis, M. (2007). « Can cork be used as a concrete aggregate? ». *International Journal for Housing Science and Its Applications*, 31(1), 1.
- [55] Le Chêne liège par Josiane Ubaud, (S.H.H.N.H.) La Société d'Horticulture et d'Histoire Naturelle de l'Hérault on (<http://www.shhnh.com>).
- [56] Documents de l'usine de la fabrication de Liège Aggloméré Noir Expansé Pur et Bandes d'étanchéité, Jijel.
- [57] Gibson, L. J., Easterling, K. E., & Ashby, M. F. (1981). « The structure and mechanics of cork». *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 377(1769), 99-117.
- [58] Rosa, M. E., & Fortes, M. A. (1991). « Deformation and fracture of cork in tension». *Journal of materials science*, 26(2), 341-348.
- [59] Borges M., Cunha C., «Boletim da Junta Nacional de Cortiça», 565, 678-679, (1985).
- [60] Rosa M.E., Fortes M.A., Nunez R.V., Proc. (2002). 1st International Materials Symposium, Advanced Materials Forum I, April 2001, Coimbra, Portugal, Key Engineering Materials, 230-232, 295-299,
- [61] Pereira, H., & Ferreira, E. (1989). « Scanning electron microscopy observations of insulation cork agglomerates». *Materials Science and Engineering: A*, 111, 217-225.
- [62] Baptista, A. P. M., & do Carmo Vaz, M. (1993). « Comparative wear testing of flooring materials». *Wear*, 162, 990-995.
- [63] Rosa, M. E., Pereira, H., & Fortes, M. A. (2007). « Effects of hot water treatment on the structure and properties of cork». *Wood and Fiber Science*, 22(2), 149-164.
- [64] Pereira, H. (1992). « The thermochemical degradation of cork». *Wood Science and Technology*, 26(4), 259-269.
- [65] Rosa, M. E., & Fortes, M. A. (1988). « Rate effects on the compression and recovery of dimensions of cork». *Journal of materials science*, 23(3), 879-885.
- [66] Amen-Chen, C., Pakdel, H., & Roy, C. (2001). « Production of monomeric phenols by thermochemical conversion of biomass: a review». *Bioresource technology*, 79(3), 277-299.
- [67] Diaz-Parralejo, A., Diaz-Diez, M. A., Macias-Garcia, A., de la Rosa-Blanco, P., & Serrano, V. G. (2003). « Bending strength of black and composite agglomerates of cork». *Materials Letters*, 57(24-25), 4004-4008.
- [68] Ferreira, E. P., & Pereira, H. (1986). « Algumas alterações anatómicas e químicas da cortiça no fabrico de aglomerados negros». *Cortiça*, 576, 274-279.
- [69] Pinto, R., & Melo, B. (1988). Cork: « properties, capabilities and applications». *Boletim da Junta Nacional de Cortic*, 602, 322-328.
- [70] Tadeu, A., & Santos, P. (2003). « Assessing the effect of a barrier between two rooms subjected to low frequency sound using the boundary element method». *Applied Acoustics*, 64(3), 287-310.
- [71] Gil, L. (1998, September). « New cork based materials for building applications». In *World Renewable Energy Congress V*, Florence, USA (pp. 1297-

1299).

[72] Molinas, M. L., & Verdaguer, D. (1993). « Lignotuber ontogeny in the cork-oak (*Quercus suber*; Fagaceae) II». Germination and young seedling. *American Journal of Botany*, 80(2), 182-191.

[73] Denisselle, A., & Doubrovsky, G. (1992). « Material in the form of a plate capable of forming a heat-insulating barrier, fire-protection wall including this material, and casing including such a wall». FR2672961, Institut National de la Propriete Industrielle, Paris.

[74] Christian B., 'Shoe sole', EP1314370, European Patent Office, Munich, (2003).

[75] Takayuki, M., Nobuhiro, T., Akio, K., & Minoru, S. (1997). «Water pressure resisting sound insulator». JP9198050, Japan Patent Office, Tokyo.

[76] Akita, H. (1997). U.S. Patent No. 5,615,897. Washington, DC: U.S. «Patent and Trademark Office».

[77] Fortes, M. A., & Nogueira, M. T. (1989). « The poison effect in cork». *Materials Science and Engineering: A*, 122(2), 227-232.

[78] Duchemin, P. E., & Touche, R. A. L. L. (1989). « Cork-based improved thermal insulating material and process for obtaining it». FR2626519, Institut National de la Propriete Industrielle, Paris.

[79] Amorim., (2009). « Comportement à la compression et à la traction de liège, Etude numérique, Nature et Technologie - La solution idéale», Université d'Aveiro en 2010 Luís Filipe Ribeiro All Good.

[80] Aziz, M. A., Murphy, C. K., & Ramaswamy, S. D. (1979). « Lightweight concrete using cork granules». *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 1(1), 29-33.

[81] Hernández-Olivares, F., Bollati, M. R., Del Rio, M., & Parga-Landa, B. (1999). « Development of cork-gypsum composites for building applications ». *Construction and Building Materials*, 13(4), 179-186.

[82] Branco, F. G., Tadeu, A., Belgas, M. D. L., & Reis, C. (2008). « Experimental evaluation of the durability of cork concrete». *International Journal for Housing Science and Its Applications*, 32(2), 149.

[83] Merabti ,S.(2005) . « Matériaux composites isolants à base des déchets de liège». Mémoire de Magister, université de Blida.

[84] El Bakkouri, A., Ezbakhe, H., Ajzoul, T., & El Bouardi, A. (2005). « Etude thermomecanique du beton allège avec du liege et du beton allège avec des grignons d'olive». 12èmes Journées Internationales de Thermique, 307-310.Tanger, Maroc .

[85] Boulekbache B. Hamrat M. Chemrouk M. And Amziane S, 2009, «Influence of the rhéologie of steel fibers' Reinforced Concretes on their Mechanical Properties». *European Journal of Environmentalkj and Civil Engineering*.

[86] Benkechkache, G., & Houari, H. (2007). « Etude du comportement différés des bétons autoplaçants: influence des paramètres de composition et de chargement». Mémoire de magister, Université Mentouri Constantine.

- [87] Camps, G. (2008). « Etude des interactions chemo-mécaniques pour la simulation du cycle de vie d'un élément de stockage en béton». (Doctoral dissertation, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier).
- [88] Rossi .P (1998). «Les bétons de fibres métalliques ponts et chaussées», Paris
- [89] Lafarge ; Le béton et la démarche HQE.
- [90] : Ameer, A. (1998). « Contribution à l'étude expérimentale des bétons renforcés de fibres d'acier locales». Mémoire de magister, U Tiaret.
- [91]: Bouzroua, M. « Etude du comportement du béton armé de fibres ondulées et bi-ondulées: proposition d'une relation simplifiée contrainte-déformation». (Doctoral dissertation, Université de Béjaia-Abderrahmane Mira).
- [92] Bledzki, A. K., & Gassan, J. (1999). « Composites reinforced with cellulose based fibres». *Progress in polymer science*, 24(2), 221-274.
- [93] Debicki, G. (1992). « Contribution a l'étude du rôle de fibres dispersées anisotropiquement dans le mortier de ciment sur les lois de comportement, les criteres de résistance et la fissuration du matériau». Thèse de doctorat, INSA de Lyon, France.
- [94] ASB. Association du béton Québec. Guide de bonnes pratiques pour l'utilisation des fibres dans le béton, Bibliothèque nationale du Québec, Québec, 2005.
- [95] Cotterell B. (1996). « Fracture mechanics of cementations materials», blackie academic et professional, London/Chapman and hall.
- [96] Mohamed Bouteben Yasmine. (2015). « Effet de l'incorporation et du dosage des fibres métalliques sur les caractéristiques du BHP à base de Poudre de verre». mémoire de master, Université 20 Août 1955-Skikda.
- [97] Chanvillard, G. (1993). « Analyse expérimentale et modélisation micromécanique du comportement des fibres d'acier tréfilées, ancrées dans une matrice cimentaire». Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées-serie ouvrages d'art, (OA12).
- [98] Cotterell, B., & Mai, Y. W. (1995). « Fracture mechanics of cementitious materials. CRC Press.blackie academic et professional, London/Chapman and hall.
- [99] : Bentur, A., & Mindess, S. (1990). «Fiber Reinforced Cementitious Composites, Elsevier Applied Science». London and New York.
- [100] Johnston C.D. (1996) «Proportioning, mixing and placement of fibre-reinforced cements and concretes, Production Methods and Workability of Concrete Proceedings of the International RILEM Conference, edited by Bartos, Marrs and Cleland, London.

[101] P .Rossi, « Fibres métalliques ou fibres synthétiques ».Tunnels et espace souterrain - n°218, Mars/Avril 2010.

[102] Makhoulouf, N. (2010). « Caractérisation en statique du comportement en traction directe du béton armé de fibres en copeaux». (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).

[103] Bello, L. (2014). «Mise au point d'une méthodologie pour formuler de nouveaux bétons auto-plaçants légers et durables». (Doctoral dissertation).

[104] Benmansour, N. (2015). « Développement et caractérisation de composites naturels locaux adaptés à l'isolation thermique dans l'habitat ». (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat, Université Hadj Lakhdar Batna, Soutenu le 18/05).

[105] Ke, Y. (2008). « Caractérisation du comportement mécanique des bétons de granulats légers: expérience et modélisation ». (Doctoral dissertation, Cergy-Pontoise).

[106] Benachour, A. 2002. « Etude des caractéristiques physico- mécaniques des bétons à granulats pouzzolaniques » Mémoire de magister, Université d'Oran, Algérie

[107] Djelouahi, H. (2016). « Influence des fibres végétales sur les propriétés physico-mécaniques d'un béton ». mémoire de master, Université M'Hamed Bougara-boumerdes.

- NORMES AFNOR

*NF P 18-555 (décembre 1990) : mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau

* NF P 18 -598, (Oct. 1991) : Granulats – Equivalent de sable.

* NF P 18- 560, (Sept. 1990) : Granulats - Analyse granulométrique par tamisage

* EN 196-6 , Méthodes d'essais des ciments-partie 6 détermination de la finesse.

* EN 196-3, Méthodes d'essais des ciments-partie 3 prise du ciment.

* EN 196-1, Méthodes d'essais des ciments-partie 1, détermination des résistances mécaniques

* NF EN 12390-3 Février 2003. Essai pour béton durci, Partie 3: Résistance à la compression des éprouvettes

*EN 1008 : Norme européenne de l'eau de gâchage pour bétons Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton.

* NF P 18 -303 Norme française de l'eau de gâchage pour béton.

* NF EN 13055-1 ; Granulats légers, Partie 1: Granulats légers pour bétons et mortiers, 2002.

* NF EN 933-2.(Mai 1996). Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats-Partie, 2, 18-622.

*NF EN 933-1., 2006. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats-Partie, 1.

-Américaines (American Society for Testing and Materials, ASTM) :

ASTMC418 : Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete by Sandblasting;

ASTMC779 : Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces;

ASTM C995 : Test Method for Time of Flow of Fiber-Reinforced Concrete Through Inverted Slump Cone;

ASTMC1018 : Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading);

ASTMC1399 : Test Method for Obtaining Average Residual-Strength of Fiber-Reinforced Concrete;

Japonaises:

JCI-SF4 : Standards for Test Methods of Fiber Reinforced Concrete.
Japan Concrete Institute, Tokyo, 1984.

عنوان المذكرة: تأثير دمج الألياف المعدنية المعاد تدويرها على الخصائص الفيزيائية - الميكانيكية لركام الخرسانة خفيفة الوزن.

الاسم واللقب: بن عليّة سعد، بوشاقور هدى

المؤطر: الأستاذ زيرق أحمد

ملخص : الحاجة الماسة لإيجاد مصادر المواد و كذا متطلبات الحفاظ على البيئة في رؤية التنمية المستدامة ، فقد أصبح من الضروري دراسة جميع احتمالات استعمال و تثمين النفايات و بقايا المنتجات الصناعية واستغلال المواد المحلية خاصة في مجال الهندسة المدنية. يهدف هذا البحث الى دراسة إمكانية استرجاع الكابلات الكهربائية المهذورة بغرض استخدامها في شكل ألياف لتعزيز خرسانة الخرسانة خفيفة الوزن المخصصة لتصنيع عناصر الكسوة المسبقة الصنع. المنهجية المستخدمة لتطوير هذا العمل تتكون أولاً وقبل كل شيء من تحسين مصفوفة الإسمنت على أساس الرمل الجيري والغريني. ثم دمج فلين خفيف يتجمع بنسب مختلفة. أخيراً، إدخال ألياف النحاس بنسب متفاوتة وبأطوال مختلفة من أجل رؤية تأثير هذه الألياف على الخصائص الفيزيائية الميكانيكية، وخاصة الانكماش و قوة الشد. وبالنظر إلى الظروف الحالية ل COVID-19 وعدم إمكانية وصولنا إلى المختبر، فإن عملنا لم ينته تمامًا.

كلمات المفتاح : تثمين، النفايات، الفلين، الخرسانة الخفيفة، مصفوفة الإسمنت، الرمل، ألياف النحاس.

Memory title : Impact of the incorporation of recycled metal fibers on the physico-mechanical characteristics of a lightweight concrete

First and last Name: Benalia Saad, Bouchakour Houda

Directed by: Mr. Ziregue Ahmed

ABSTRACT: In light of the urgent need to find sources of materials and the requirements of environmental protection in a vision of sustainable development, it became necessary to study all the possibilities of reuse and recycling of industrial wastes and by-product especially in the field of civil engineering. This research aims to study the possibility of recovering wasted electrical cables for use in the form of fibers to reinforce lightweight concrete intended for the manufacture of prefabricated cladding elements. The methodology for developing this work is primarily to improve cement matrix based on limestone and silty sand. Then incorporate a light cork that collects in different proportions. Finally, copper fibers were introduced in varying proportions and with different lengths in order to see the effect of these fibers on the physico-mechanical properties, especially shrinkage and tensile strength. And given the current circumstances of COVID-19 and the non-possibility of our access to the laboratory, our work is not completely finished.

KEY-WORDS: Valorization, wastes, cork, lightweight concrete, cement matrix, sand, copper fiber.