



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



Université Amar Téliidji- Laghouat

FACULTÉ : GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE

DÉPARTEMENT : GENIE CIVIL

MÉMOIRE DE MASTER

Présenté par :

CHELLALI MESSAOUD & BOUAICHA HADJ ALI

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNIQUES

FILIERE : GENIE CIVIL

OPTION : MATERIAUX EN GENIE CIVIL

Thème

**Influence de la nature et de la dimension des fibres
métalliques sur caractéristiques physico-mécanique d'un
béton de granulats légers**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	qualité
KHENFER Mohamed Mouldi	Pr	Président
Mr.Goual Idriss	Pr	Examinateur
Ziregue Ahmed	MCA	Encadreur

Promotion : Juillet - 2021

Remerciement

Toute notre parfaite gratitude et remerciement à Allah qui nous a donné la force, le courage et la volonté pour élaborer ce travail, et nos parents pour leurs soutien et leurs sacrifices.

C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que nous remercions notre encadreur

Dr.ziregue Ahmed

Pour son soutien, ses conseils judicieux et ses grandes bienveillances durant l'élaboration de ce projet.

Ainsi nous exprimons notre reconnaissance à tous les membres de jury d'avoir accepté de lire ce mémoire et d'apporter les critiques nécessaires à la mise en forme de cet ouvrage.

Nous remercions aussi l'ensemble des enseignants de département de génie civil qui ont contribué à notre formation.

Que tous ceux au celles qui nous ont apporté leur soutien et qui nous ont aidé de loin ou de près pour l'achèvement de ce projet trouvent ici l'expression de notre vive et sincère reconnaissance,

en particulier nos familles et nos amis surtout belkacem.Z et slimane.M et kaouthar.T,khelfaoui / N.M

Dédicace

Je dédie ce travail à :

Mes chers parents, qui m'ont toujours encouragé et soutenu dans mes études jusqu'à atteindre ce stade de formation ; Mes frère et mes sœurs ; Toute ma famille et mes amis ; à tous les camarades et Tous les enseignants qui nous ont dirigés vers la porte de la réussite.

Chellali Messaoud

Dédicace

Je dédie ce travail à :

*Mes chers parents, qui m'ont
toujours encouragé et soutenu dans
mes études jusqu'à atteindre ce stade
de formation ; Mes frère et ma sœurs
Toute ma famille et mes amis ; à tous
les camarades et Tous les
enseignants qui nous ont dirigés vers
la porte de la réussite.*

Bouaicha Hadj Ali

ملخص

تعتبر الخرسانة التقليدية بامتياز المادة الأكثر استخدامًا في مجال الهندسة المدنية ، نظرًا لصفاتها العديدة ، فهي تتمتع بقوة ضغط ممتازة وقابليتها للصلابة العالية وموصلية حرارية وكهربائية منخفضة ، لكن قوة شدها المنخفضة وهشاشتها ومدى قابليتها للتشققات الدقيقة يحد من إستخداماتها ، يجب تعزيزها في غالبية تطبيقاتها. أهمية تدعيم الخرسانة بالألياف تتمثل في تحسين السلوك فيما يتعلق بالجر للحد من الانكماش وتطوير الشقوق الدقيقة

الهدف من هذه الدراسة هو تقديم حوصلة نظرية حول استخدام الألياف في الخرسانة وتأثير طبيعتها ونسبها وأبعادها على الخصائص الفيزيائية الميكانيكية لخرسانة من الركام الخفيف. على أساس المراجعة البيبليوغرافية للأعمال المنفذة على الخرسانة التي تتضمن أليافاً من طبائع مختلفة ، يكشف تجميع النتائج التي حصل عليها مؤلفون مختلفون عن الأثر المفيد لإدراج الألياف في الخرسانة ، ولا سيما الخرسانة خفيفة الوزن. في الواقع ، تم تحسين الخواص الفيزيائية الميكانيكية في الحالة المتصلبة بشكل كبير ، ولا سيما مقاومة الشد. من ناحية أخرى ، تقلل الألياف من الانكماش وتمنع تكون التشققات الدقيقة. من ناحية أخرى ، تتأثر قابلية عمل الخرسانة في الحالة الطازجة سلبيًا بطبيعة وجرعة الألياف. من ناحية أخرى ، مكنتنا هذا التوليف من تحديد عدد كبير من الأعمال باستخدام الألياف المعدنية والألياف الاصطناعية في معظم الأوقات بسبب مساهمتها المفيدة للغاية من حيث قوة الشد. سمحت لنا دراسة مقارنة أجريت على هذين النوعين من الألياف بتفضيل الألياف المعدنية على الألياف الاصطناعية ، على الرغم من أن بعض المؤلفين استخدموا في عملهم مزيجًا من هذين النوعين من الألياف.

تظهر النتائج التي تم الحصول عليها من قبل العديد من الباحثين أن جرعة الألياف المعدنية لها تأثير سلبي إلى حد ما على قابلية التشغيل. من ناحية أخرى ، تعمل على تحسين مقاومة الانضغاط وكذلك مقاومة الانحناء والجر. تتراوح مكاسب القوة من 5 إلى 25% في الضغط و 28 إلى 55% في الجر عن طريق الانحناء. أظهرت بعض الأبحاث أن إضافة الألياف إلى الخرسانة يحد من تطور الشقوق مما يشير إلى أن تقليل جزء من التسليح ممكن خاصة في منطقة الخرسانة المضغوطة.

يعد تأثير توجيه الألياف أحد أهم العوامل في السلوك. أظهر العمل الذي تم إجراؤه أن توجيه الألياف في الاتجاه الأفقي يعطي أفضل سلوك شد.

الكلمات المفتاحية

الخرسانة الخفيفة، الألياف المعدنية، المقاومة ضد الشد، التشققات

Summary

Traditional concrete is par excellence the material most used in the field of Civil engineering, by its numerous qualities it introduces a very good resistance to compression, a big inflexibility, a weak thermal and electrical conductivity, but its weak resistance in traction, its fragility and its aptitude for limit microcracking its use because of this or that he must be reinforced in the majority of these applications. The interest of concrete strengthening by grains is to ameliorate behaviour opposite in traction and on the other hand for restricted the collection as well as development of fissures.

The objective of this study is to make a bibliographic synthesis on the use of grains in concretes and the influence of their nature, proportion and of their dimensions on the physico-mechanical characteristics of a concrete of light granulates. On the basis of a bibliographic magazine of jobs accomplished on concretes incorporating grains of different natures, a synthesis of results acquired by the different authors, reveals the advantageous effect of the enlistment of grains in concretes particularly in light concretes. In effect the physico-mechanical ownership in the hardened state is considerably ameliorated, particularly the resistance to traction. By other one quoted grains diminish the collection and prevents the development of fissures. On the other hand, the workability of concretes in the cool state is negatively influenced by nature and proportion in grains. On the other hand this synthesis allowed us to take a census of a big working number using in most part of time the metallic grains and the synthetic grains with reasons of their very advantageous provision in resistance to traction. A comparative study accomplished on these two types of grains allowed us to favour the metallic grains in comparison with the synthetic grains, although some authors used jobs in them a combination of both types of grains.

Results acquired by the different authors show that the metallic proportion of grains have a more or less negative effect on the ouvrabilité. On the other hand they ameliorate the resistance to compression as well as that in inflection and in traction. Winnings of resistance are in the order of 5 - 25 % in compression and from 28 to 55 % in traction by inflection. Certain researches showed that the addition of grains in limit concrete the development of fissures what lets think that a discount of one party of steel framework is possible especially in the case of the shells of compression.

The effect of the orientation of grains is one of the the most important mailmen in behaviour. Led jobs showed that the orientation of grains in sense horizontal gives the best behaviour in traction.

Key words

Light concretes, the metallic grains, resistance to traction, collection, fissure.

Résumé

Le béton traditionnel est par excellence le matériau le plus employé dans le domaine de Génie civil, par ses nombreuses qualités il présente une excellente résistance à la compression, une grande rigidité, une faible conductivité thermique et électrique, mais sa faible résistance en traction, sa fragilité et son aptitude à la microfissuration limite son utilisation. De ce fait, il doit être renforcé dans la majorité de ces applications. L'intérêt de renforcement de béton par des fibres est d'améliorer le comportement vis à vis à la traction pour limiter le retrait ainsi que le développement des microfissures.

L'objectif de cette étude est de faire une synthèse bibliographique sur l'utilisation des fibres dans les bétons et l'influence de leurs natures, leur dosage et de leurs dimensions sur les caractéristiques physico-mécaniques d'un béton de granulats légers. Sur la base d'une revue bibliographique des travaux réalisés sur les bétons incorporant des fibres de différentes natures, une synthèse des résultats obtenus par des différents auteurs, révèle l'effet bénéfique de l'incorporation des fibres dans les bétons en particulier les bétons légers. En effet les propriétés physico-mécaniques à l'état durci sont considérablement améliorées, en particulier la résistance à la traction. D'un autre côté les fibres diminuent le retrait et empêchent le développement des microfissures. En revanche, la maniabilité des bétons à l'état frais est négativement influencée par la nature et le dosage en fibres. D'autre part cette synthèse nous a permis de recenser un grand nombre de travaux utilisant dans la plus part du temps les fibres métalliques et les fibres synthétiques à cause de leur apport très bénéfique en matière de résistance à la traction. Une étude comparative réalisée sur ces deux types de fibres nous a permis de favoriser les fibres métalliques par rapport aux fibres synthétiques, bien que quelques auteurs ont utilisé dans leur travaux une combinaison des deux types de fibres.

Les résultats obtenus par différents chercheurs montrent que le dosage des fibres métalliques ont un effet plus ou moins négatif sur l'ouvrabilité. En revanche ils améliorent la résistance à la compression ainsi que celle en flexion et en traction. Les gains de résistances sont de l'ordre de 5 à 25% en compression et de 28 à 55 % en traction par flexion. Certaines recherches ont montré que l'ajout des fibres au béton limite le développement des fissures ce qui laisse croire qu'une réduction d'une partie de ferrailage est possible surtout dans la zone de béton comprimée.

L'effet de l'orientation des fibres est l'un des facteurs les plus importants dans le comportement. Les travaux menés ont montré que l'orientation des fibres dans le sens horizontal donne le meilleur comportement à la traction.

Mots clés

Bétons légers, les fibres métalliques, résistance à la traction, retrait, fissure.

SOMMAIRE

CHAPITRE 1

I	INTRODUCTION :	5
II	HISTORIQUE :	6
III	DEFINITION DU BETON ORDINAIRE (BO) :	7
IV	LA COMPOSITION DU BETON ORDINAIRE :	7
IV.1	LE CIMENT:	7
IV.1.1	COMPOSITION ET CARACTERISTIQUES DU CIMENT :	8
IV.1.2	CLASSEMENT DE CIMENT :	9
IV.1.3	HYDRATATION DU CIMENT :	10
IV.2	LES GRANULATS:	13
IV.2.1	DEFINITION DES GRANULATS:	13
IV.2.2	CARACTERISTIQUES DES GRANULATS:	13
IV.2.3	DIFFERENTS TYPES DE GRANULATS:	14
IV.2.4	RAPPORT CIMENT-EAU E/C :	18
IV.2.5	RAPPORT GRANULAT-SABLE :	18
IV.2.6	LES ADJUVANTS DU BETON :	18
IV.2.7	ADDITION MINERALE :	19
V	PROPRIETES DES BETONS:	21
V.1	PROPRIETES DU BETON FRAIS :	21
V.2	PROPRIETES DU BETON DURCI :	23
VI	METHODES DE COMPOSITION DES BETONS ORDINAIRES :	27
VI.1	METHODE DE BOLOMEY :	28
VI.2	METHODE DE FAURY :	29
VI.3	METHODE D'ABRAMS :	29
VI.4	METHODE DE VALLETTE :	30
VI.5	METHODE DE JOISEL :	30

CHAPITRE 2

I	INTRODUCTION :	32
II	DÉFINITION DES BÉTONS LÉGERS:	33
III	LES GRANULATS LEGERS :	34
III.1	LES GRANULATS LEGERS NATURELS:	34
III.1.1	FRITTAGE :	37
III.1.2	COMPOSITION :	37
III.1.3	LE CHOIX DES GRANULATS :	37
III.2	LES GRANULATS LEGERS DE MATERIAUX ARTIFICIELS :	38
III.2.1	LE LIEGE :	38
III.2.2	LE BOIS:	41
III.2.3	LE POLYSTYRENE:	43
IV	LES TYPES DE BETON LEGERS :	44
IV.1	LES BETONS DE GRANULATS LEGERS:	44
IV.1.1	LES CARACTERISTIQUES ET LES PROPRIETES DES BETONS DE GRANULATS LEGERS :	48
IV.1.2	UTILISATIONS DES BETONS DE GRANULATS LEGERS :	49

SOMMAIRE

IV.2	BETON CELLULAIRE :	49
IV.2.1	DEFINITION BETON CELLULAIRE :	49
IV.2.2	COMPOSITION DU BETON CELLULAIRE:	50
IV.2.3	FABRICATION DU BETON CELLULAIRE:	50
IV.2.4	LES AVANTAGES DU BETON CELLULAIRE:	51
IV.2.5	LES INCONVENIENTS DU BETON CELLULAIRE:	52
IV.2.6	RECYCLAGE DE BETON CELLULAIRE:	52
IV.3	LE BETON CAVERNEUX :	53
IV.3.1	DEFINITION BETON CAVERNEUX:	53
IV.3.2	UTILISATION DU BETON CAVERNEUX :	53
IV.3.3	COMPOSITION DU BETON CAVERNEUX:	54
IV.3.4	LES AVANTAGES DU BETON CAVERNEUX:	54
IV.3.5	LES INCONVENIENTS DU BETON CAVERNEUX:	55

CHAPITRE 3

I.	INTRODUCTION:	56
II.	DEFINITION DU BETON DE FIBRES:	57
III.	HISTORIQUE DU BETON DE FIBRES:	57
IV.	LES FIBRES :	58
V.	TYPE DES FIBRES :	59
V.1	LES FIBRES ARTIFICIELLES :	59
V.1.1	FIBRE DE VERRE :	59
V.1.2	FIBRES METALLIQUES :	59
V.1.3	FIBRES DE POLYPROPYLENE :	60
V.2	FIBRES NATURELLES :	61
V.2.1	FIBRES VEGETALES :	61
V.2.2	FIBRES MINERALES :	63
VI.	DOMAINE D'APPLICATION DE BETON FIBRE:	64
VII.	FORME D'APPLICATION DU BETON DE FIBRE:	65
VIII.	AVANTAGES DU BETON DE FIBRE :	66
VIII.1	ASPECT TECHNIQUE :	66
VIII.2	ASPECT ECONOMIQUE :	67
IX.	ROLE DES FIBRES:	67
X.	INFLUENCE LES PROPRIETES ET DES CARACTERISTIQUES PHYSICO-MECANQUES DES FIBRES SUR LES BETONS LEGERS :	68
X.1	RESISTANCE A LA COMPRESSION :	69
X.2	RESISTANCE A LA FLEXION :	69
X.3	RESISTANCE A LA TRACTION :	70
XI.	MODULE DE YOUNG :	72
XII.	EFFET DE LA NATURE DES FIBRES :	73
XIII.	DISTRIBUTION DES FIBRES ET LEUR ORIENTATION :	73
XIV.	EFFET DE LA FORME ET LA LONGUEUR DES FIBRES :	74
XV.	DOSAGE EN FIBRE :	75

SOMMAIRE

CHAPITRE 4

I. INTRODUCTION :	77
II. DEFINITION :	77
II.1 FIBRE DE CUIVRE :	77
II.2 LES FIBRES EN FER :	78
III. EFFET DE L'ADDITION DES FIBRES SUR LE COMPORTEMENT DES BETONS A L'ETAT FRAIS :	79
III.1 .EFFET DE L'ADDITION DES FIBRES SUR LA MANIABILITE :	79
III.2 . EFFET DE L'ADDITION DES FIBRES SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION :	80
III.3 . EFFET DE L'ADDITION DES FIBRES SUR LA RESISTANCE A LA FLEXION :	81
IV. CRITERES DE CHOIX DES FIBRES :	82
V. ETUDE COMPARATIVE DE CARACTERISTIQUE DES FIBRES DE CUIVRE ET LES FIBRES EN FER :	82
VI. INTERPRETATION :	86

CHAPITER I

Figure I.1. Villa témoin en béton armé de François Hennebique à Bourg la Reine construite entre 1894 et 1904.....	5
Figure I.2. Clinker de ciment Portland	7
Figure I.3. Processus de fabrication du ciment.....	8
Figure I.4. Matrice cimentaire (MEB)	9
Figure I.5. Hydratation d'une pâte de ciment Portland ordinaire à température ambiante: consommation des phases du clinker.....	10
Figure I.6. Hydratation d'une pâte de ciment Portland ordinaire à température ambiante: formation des hydrates	10
Figure I.7. Granulats naturels.....	13
Figure I.8. Granulats artificiels de Laitiers ou Scories.....	13
Figure I. 9. Granulats et composantes légères (produits élaborés).	14
Figure I. 10. Granulats recyclés.	15
Figure I. 11. Granulat recyclé.....	15
Figure I.12. Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.....	20
Figure. I.13. Mesure de la consistance (Essai véné)	20
Figure I.14. Les moules cylindriques, cubiques et les éprouvettes pour mesurer la résistance en compression.....	21
Figure I.15. Essai traction par flexion.	22
Figure I.16. Essai traction par fondage.....	23
Figure I.17. Essai traction directe.....	23

CHAPITER II

Figure II.1. Classifications des bétons légers.....	29
Figure II.2. Les argiles expansées.....	30
Figure II.3 .schistes expansés.....	30
Figure II.4. Laitier expansé.....	30
Figure II.5 .Pierre ponce.....	31
Figure II.6. Pouzzolane.....	31
Figure II.7. Perlite.....	31
Figure II.8. Vermiculite.....	32
Figure II.9. Répartition Mondiale des subéraies.....	34
Figure II.10. Structure et composition du liège.....	34
Figure II.11. Structure Microscopies du Liège.....	35
Figure II.12. Formation du Liège.....	35
Figure II .13 . Les copeaux de bois.....	37
Figure II .14. Sciure de bois.	37
Figure II.15 .Granulats de bois.....	38
Figure II.16. Le bois déchiqueté.	38
Figure II.17. Structure chimique du polystyrène.....	39
Figure II.18. Structure alvéolaire du polystyrène.....	39
Figure II.19. Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de la fraction L/B	40
Figure II.20. Béton de liège.....	41

Figure II.21. Evolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des billes de polystyrène	41
Figure II.22. Evolution de la résistance en flexion en fonction du pourcentage des billes de polystyrène	42
Figure II.23. Béton de polystyrène.....	42
Figure II. 24. Résultats de modules élastiques de bétons légers à 28 j d’après plusieurs auteurs.....	44
Figure II.25. Béton cellulaire.....	46
Figure II.26. Blocs de béton cellulaire.....	46
Figure II.27. Recyclage de béton cellulaire.....	48
Figure II.28. Béton caverneux.....	49
Figure II.29. Utilisation du béton caverneux.....	49

CHAPTER III

Figure III.1 .Formes des fibres métalliques.	59
Figure III.2. Fibres polypropylène.	60
Figure III.3. Classification des fibres végétales selon l’origine	61
Figure III.4. Quelque type des fibres.....	63
Figure III.5. Organigramme des différents types de fibres naturelles	63
Figure III.6. Illustration de l’apport du renfort par des fibres	67
Figure III.7. Principe de couturassions d’une fissure	68
Figure III.8. Courbe d’évolution de la contrainte à la compression en fonction de la déformation avec différent pourcentage des fibres	69
Figure III.9. Résultats effort-flèche en flexion 3 points de béton (sans précautions particulières).....	69
Figure III.10. Résultats effort-flèche en flexion 3 points de béton	70
Figure III.11. Exemples de comportement en traction uni axiale, sur éprouvette entaillée.....	70

Figure III.12. Contribution des fibres dans le comportement à la traction	71
Figure III.13. Exemple de diagramme contrainte - déformation en compression (E0 module de Young)	72
Figure III.14. Influence de la direction des fibres sur le comportement en traction d'un béton fibré.....	73

CHAPITER IV

Figure IV.1. Déchets électriques fibres de fil de cuivre.....	78
Figure IV.2. Déchets de fibres en fer.....	78
Figure IV.3. Effet des fibres sur la maniabilité de béton.....	79
Figure IV.4. Corrélations exponentielles entre le temps Ve-Be et la teneur en fibres des bétons avec différents rapports d'aspect des fibres.	80
Figure IV.5. Évolution du gain de résistance compression du béton renforcé de fibres.....	81
Figure IV.6. Résistance à la flexion du béton renforcé de fibres en fonction du temps.....	82
Figure IV.7. essai de la masse volumique des fibres de cuivre.....	83
Figure IV.8 Mesure de l'épaisseur de la fibre de cuivre à l'aide de pied à colis.....	83
Figure IV.9. Mesure de la longueur de la fibre.....	84
Figure IV.10. Essai de la masse volumique des fibres de fer.....	85
Figure IV.11. Mesure de l'épaisseur de la fibre de fer à l'aide de pied à colis.....	85

CHAPITER I

Tableau I.1. Composants du clinker.....	7
Tableau I.2. Principales catégories de ciment	8
Tableau I.3. Dimensions et caractéristiques des familles de granulats.....	11
Tableau I.4. Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au Cône.....	20
Tableau I.5. Causes de retrait et remèdes.	24
Tableau I.6. Valeurs optimales d'après ABRAMS du module de finesse des compositions granulaire des bétons courants.	27

CHAPITER III

Tableau III.1. Domaine d'application de béton fibré.	64
--	----

CHAPITER IV

Tableau IV.1. Caractéristiques des fibres en cuivre.....	85
Tableau IV.2. Caractéristiques des fibres de fer.....	86

Introduction générale

Le béton est un matériau essentiel dans la construction. Il est constitué de ciment, d'eau, de granulats et parfois d'adjuvant. On peut adapter son dosage et ses constituants en fonction des performances et des usages recherchés. On note différents types de bétons parmi lesquels on a les bétons légers, plus particulièrement les bétons à granulats légers qui constituent l'objet de notre étude.

Le béton léger est connu par sa faible masse volumique, Il existe plusieurs méthodes pour l'allègement du béton, soit par introduction de bulle d'air, soit par utilisation des granulats légers. sa faible conductivité thermique et sa bonne isolation thermique par rapport aux bétons ordinaires. Par conséquent, ils peuvent apporter une solution technique très intéressante au problème d'isolation thermique et acoustique dans les bâtiments, mais ces dernières années plusieurs recherches se focalisent sur l'utilisation des bétons légers comme des éléments structurels.

La fabrication de granulats légers comme l'argile ou le schiste expansés mais le processus de fabrication nécessite un coût assez élevé et donc le coût du béton sera plus cher, de ce fait l'utilisation des granulats légers naturels nous permet d'économiser l'énergie de fabrication et de sauvegarder l'environnement.

Bien que le béton à granulats légers présente plusieurs avantages dans le domaine de la construction, celui-ci résiste mal à la traction et à la fissuration. Le renforcement des ces bétons par des fibres peut offrir des solutions techniques pour l'amélioration des performances mécaniques.

Des applications sont développées grâce à la capacité prouvée par l'expérience de ces composites, servant à limiter et à contrôler la fissuration sous sollicitations mécaniques et à améliorer la résistance à la flexion et à la fissuration et au choc, tout en assurant une durabilité accrue.

Plusieurs types de fibres sont utilisés dans le renforcement des bétons et des mortiers, dont les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques diffèrent selon leur nature ou leur géométrie, notamment: les fibres métalliques, de polymère, de carbone et végétales qui auront une influence sur les performances finales du béton fibré.

Selon leur utilisation, ces différents types de fibres présentent des avantages et 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). Ce thème a été donc choisi dans le but d'obtenir un

INTRODUCTION GENERALE

béton de granulats légers, plus particulièrement un béton de liège avec de bonnes caractéristiques thermiques, et qui en même temps possède des performances physiques et mécaniques assez satisfaisantes et cela en incorporant des fibres métalliques (fibre de fer et fibre de cuivre) adéquates.

La méthodologie suivie consiste à rassembler tous les travaux réalisés dans cet axe et de faire une synthèse bibliographique sur les bétons légers en générale et les bétons de liège en particulier et sur l'effet des fibres métalliques sur les caractéristiques physico-mécaniques des bétons fibrés. Une analyse comparative entre les fibres en acier et les fibres de cuivre sera entreprise en fin de ce travail.

Afin de parvenir à ces objectifs, nous avons organisé le présent manuscrit en quatre chapitres:

-Le premier chapitre, expose un aperçu sur le béton ordinaire, sa composition ainsi que ses différentes méthodes de formulation sans oublier leur historique.

-Le deuxième chapitre est consacré au béton léger ainsi que leur type, et leurs classifications suivant l'origine. Nous nous intéressons aussi dans ce chapitre aux différentes caractéristiques et propriétés des bétons de granulats légers.

- Le troisième chapitre concerne les différents types de fibres, leurs avantages, l'influence de leurs propriétés physico-mécaniques, ainsi que leur nature et forme et leur distribution dans les bétons légers.

-Le quatrième chapitre, met en point la différence entre les caractéristiques des fibres métalliques et celles des fibres de cuivre et l'utilisation de ces dernières comme renforcement des bétons légers afin de compenser la chute de résistance mécanique due à l'utilisation des granulats légers.

-En fin nous complétons notre travail par une conclusion générale qui résume

Les points essentiels que nous avons atteints, on conclue finalement par des perspectives

.

I Introduction

Le béton est un produit solide dont les caractéristiques physiques et mécaniques peuvent être très supérieures à celles des roches les plus résistantes, donc il rend plus durable. Il permet de construire des ouvrages de toute nature et, notamment, des bâtiments, des immeubles d'habitation, des ponts, des routes, des tunnels, des barrages ainsi que des centrales thermiques et nucléaires. Le béton est obtenu en solidarissant un mélange intime de ciment, de granulats, de fines et d'ultrafines, d'adjuvants et d'eau. Ces constituants sont dosés, en fonction de leurs propriétés propres, de manière à obtenir un béton, après réaction physico-chimique entre eux. Les agrégats occupent généralement 70-80% du volume de béton, sa sélection et le dosage doivent recevoir une attention particulière afin de contrôler la qualité de la structure en béton.

II Historique

Les Romains sont les premiers découvreurs du béton et ces constituants et sont les plus anciens utilisateurs de ce type de matériaux de construction, ils en confectionnaient à partir de la chaux, de céramique écrasée et de sable volcanique. Ils lui donnent le nom de chaux aérienne (car elle durcit à l'air).

Avec le temps le béton est devenu le matériau le plus utilisé dans les domaines de construction et dans tous les ouvrages.

Vu aux ses caractéristiques importantes, la résistance élevée, matériaux moulables, et vu aux besoins de l'humanité dans le monde (besoin architecture, économique, militaire etc...), les matériaux et les ouvrages en béton devenus des sujets de recherche pour améliorer ses caractéristiques mécaniques et surtout à la traction.

Au début du XIX^{ème} siècle le domaine des ouvrages et la construction connaitre le mariage de deux matériaux de construction très utiles, l'acier et le béton, est la naissance du béton armé. En 1848 LAMBOT a imaginé l'association des barres d'acier et du béton de ciment pour la réalisation d'une barque (exposition universelle de 1855) [2,3].

Quelques années plus tard, J MNIER, un jardinier de Versailles a utilisé un procédé analogique pour fabriquer des caisses pour fleur. On lui attribue l'invention du BA qui a ensuite été exploité par les Allemande par l'entreprise MONIER BETON BRAU (brevet déposé en 1868) [2,3].

Ensuite HENNEBIQUE a mis au point les bases de calcul pour son utilisation rationnelle mais il faudra attendre 1897 pour que RABUT professe le premier cours de BA à l'ENPC[2].

[3] Auparavant, en 1891, COIGNET utilisa des poutres BA préfabriquées pour la construction d'un immeuble. [2,3].

Auparavant, en 1891, COIGNET utilisa des poutres BA préfabriquées pour la construction d'un immeuble. [2,3].



Fig I.1. Villa témoin en béton armé de François Hennebique à Bourg la Reine construite entre 1894 et 1904 [4]

En 1906 paraît la première réglementation s'appuyant sur une méthode de calcul dite aux contraintes admissibles. La circulaire de 1906 sera remplacée par les règles **BA45** puis **BA60**, **BA68**, **BAEL80**, **BAEL83**, **BAEL90** et enfin **BAEL91**. Actuellement les règles EUROCODES.

III Définition du béton ordinaire (Bo)

Le béton est un ensemble homogène obtenu par le mélange du ciment, de l'eau, des granulats et quelque fois d'adjuvants. Sa masse volumique se situe aux alentours de 2 500 Kg/m³, Les bétons peuvent être armés ou non, ou même précontraints. Ses performances

(durabilité, résistance au feu, acte.) varient selon ses composants. C'est un matériau dont le moulage est assez facile et il est adapté à tous les types de formes d'ouvrage [5].

IV La composition du béton ordinaire

IV.1 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.

IV.1.1 Composition et caractéristiques du ciment

Le ciment est caractérisé par sa composition chimique et par ses caractéristiques physiques (la forme et la finesse des grains). Les grains de ciment sont hétérogènes et polyphasés. Au contact de l'eau ils donnent naissance à des produits dont la composition chimique est variable. Il est principalement composé de clinker, de sulfate de calcium, et d'ajouts éventuels.

➤ Le clinker :

C'est le constituant principal des ciments, il est obtenu d'un mélange de calcaire et d'argile (figure I-1), ces matières sont broyées, finement moulues et mélangées dans des proportions bien définies, ensuite ils sont placés dans un four et chauffés à environ 1450 °C. Au cours de la calcination les matières premières vont réagir, pour former à la fin de la cuisson, un produit de composition complexe appelé clinker.

Il est usuel d'abrégé les formules des oxydes communs à une simple lettre, tel que C pour CaO ou S pour SiO₂. Le silicate tricalcique devient alors C₃S. Le tableau I.1 regroupe les composants de clinker avec leurs proportions.

Tableau I.1. Composants du clinker

Nom du composant	Composition	Abréviation	Pourcentage
Silicate tricalcique	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C3S	45 à 65 %
Silicate bicalcique	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C2S	15 à 35 %
L'aluminatetricalcique	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C3A	4 à 14 %
L'alumino-ferrite tétracalcique	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{F}_2\text{O}_3$	C4AF	10 à 18 %

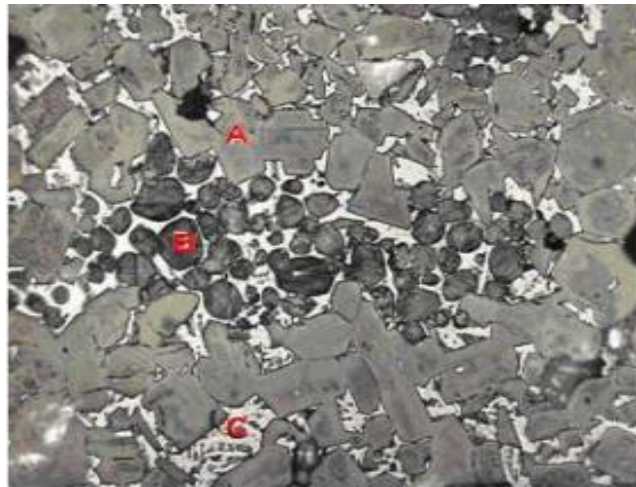


Fig. I.2. Clinker de ciment Portland [6].

➤ **Le sulfate de calcium**

Il est ajouté au ciment pour réguler la prise.

➤ **Les ajouts minéraux**

Ces ajouts jouent le rôle suivant: d'après leur composition ils se présentent principalement par de la silice amorphe qui réagit activement avec l'hydroxyde de chaux qui se forme lors de l'hydratation des minéraux faisant partie du clinker. Le rapport entre le clinker et l'adjuvant hydraulique (ajout minéral) est établi en fonction de l'activité de l'adjuvant et de la composition minéralogique du clinker.

(Laitiers, cendres volantes, pouzzolanes ou fillers et les fumées de silice) [7] on les ajoute au ciment pour des raisons économiques et/ou pour leurs propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques.

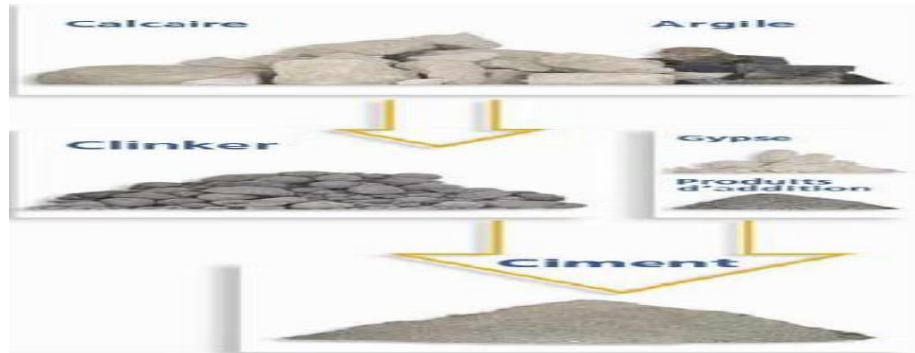


Fig. I.3.Processus de fabrication du ciment

IV.1.2 Classement de ciment

Pour un béton ordinaire, nous pouvons utiliser des ciments de type CEM I, CEM II, CEM III, CEM III/C ou CEM V. Le choix et le dosage déterminent la résistance du béton ainsi que ces différentes propriétés. **la norme Européenne EN 197- 1[7]**

Tableau I.2. Principales catégories de ciment

Désignations	notation	clinker	Autres constituents	Constituents secondaires
Ciment Portland	CPA-CEM I	95-100	----	0-5
Ciment Portland composé	CPJ-CEM II/A	80-94	6-20	---
	CPJ-CEM II/B	65-79	21-35	---
Ciment de haut fourneau	CHF-CEM III/A	35-64	36-65	0-5
	CHF-CEM III/B	20-34	66-80	0-5
	CHF-CEM III/C	5-19	81-95	0-5
Cimentpouzzolanique	CPZ-CEM IV/A	65-90	10-35	0-5
	CEM-CPZ IV/B	45-64	36-55	0-5
Ciment compose (ciment au laitier et aux cendres)	CLC-CEM V/A	45-64	18-30	0-5
	CLC-CEM V/B	20-39	31-50	0-5

IV.1.3 Hydratation du ciment

L'hydratation du ciment met en jeu un nombre important de réactions chimiques complexes. Toutes ces réactions conduisent à la formation de silicates ou d'aluminates calciques hydratés qui font prise et qui donnent les propriétés mécaniques des pâtes de

ciment (ciment + eau), des mortiers (ciment + eau + sable) et des bétons (ciment + eau + fins et gros granulats). L'hydratation regroupe l'ensemble des réactions chimiques qui se produisent entre le ciment et l'eau. Ces réactions d'hydratation sont très complexes et débutent dès la mise en contact de ces deux phases. Les réactions d'hydratation des constituants anhydres du ciment mettent en jeu dès le contact avec l'eau, des réactions chimiques complexes qui se poursuivent dans le temps à des vitesses différentes en donnant naissance à des silicates et des aluminates de calcium hydratés qui sont insolubles dans l'eau et de la chaux hydratée (portlandite), d'où le phénomène de prise conduisant à de bonnes résistances mécaniques du ciment. L'emploi du gypse joue le rôle de retardateur de prise pour les aluminates, en donnant naissance à une couche protectrice sur les grains, ce qui retarde l'hydratation. La figure I.4 montre des hydrates formés dans une pâte de ciment une semaine après gâchage avec un rapport eau/ciment = 0,5 (micrographie au microscope électronique à balayage, MEB sur fracture fraîche) [8].



Fig. I.4 .Matrice cimentaire (MEB) [8].

1 : portlandite, 2 : C-S-H, 3 : aluminates de Ca hydratés 4 : ettringite

L'emploi du gypse joue le rôle de retardateur de prise pour les aluminates, en donnant naissance à une couche protectrice sur les grains, ce qui retarde l'hydratation. Les 4 principaux constituants ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ - $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ - $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ - $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) anhydres donnent en présence d'eau, naissance à des silicates et aluminates de calcium hydratés pratiquement insolubles dans l'eau.

Les figures I-5 et I-6 représentent respectivement le taux d'hydratation des différentes phases de clinker et le taux de formation des différents produits au cours de l'hydratation d'un ciment portland typique.

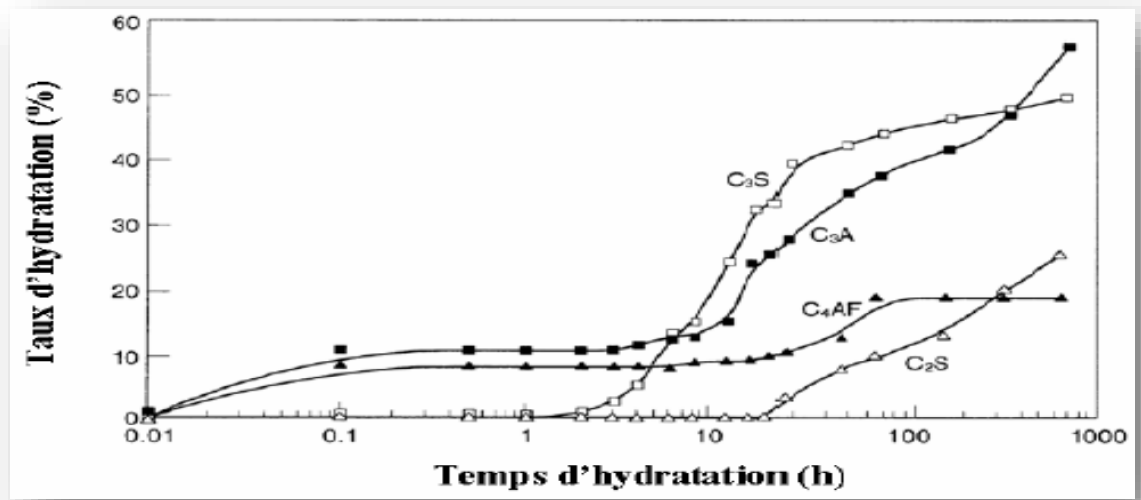


Fig. I.5. Hydratation d'une pâte de ciment Portland ordinaire à température ambiante: consommation des phases du clinker [9]

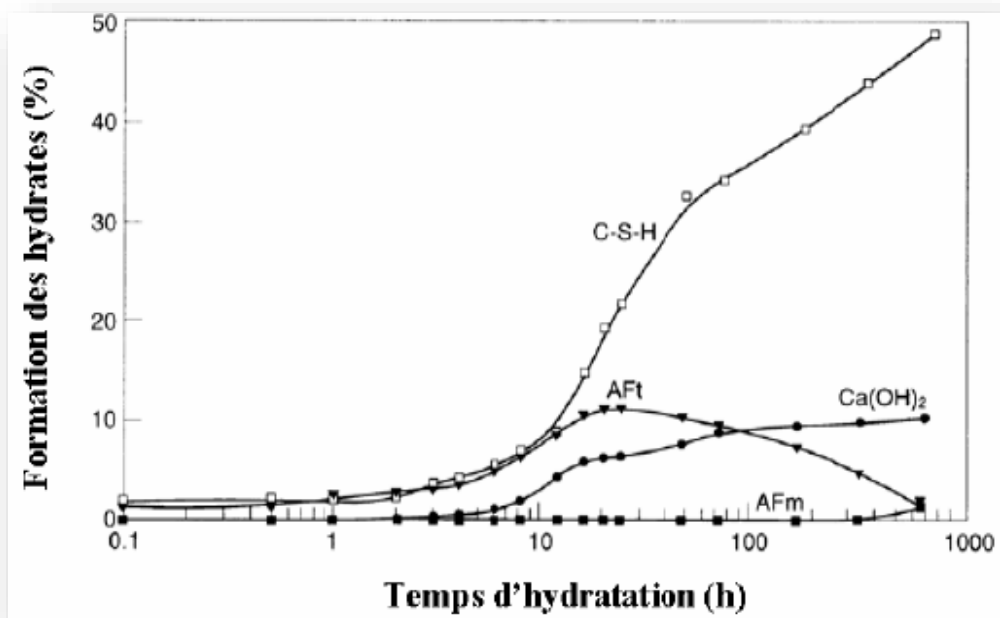


Fig. I.6. Hydratation d'une pâte de ciment Portland ordinaire à température ambiante: formation des hydrates [9]

IV.2 Les granulats

IV.2.1 Définition des granulats

Le granulat est un ensemble de grains minéraux appelés fillers, sablons, sables, graves, et gravillons suivants leurs dimensions comprises entre 0 et 125 mm Ils sont obtenus en exploitant des gisements de sables et de graviers d'origines alluvionnaire terrestres ou marines, en concassant des roches massives (calcaires ou éruptives) ou encore par recyclage de produits tel que les matériaux de démolition. Selon leur origine, on distingue les granulats roulés, extraits de ballastières naturelles ou de dragués en rivières ou en mer, et concassés obtenus à partir de roches exploitées en carrière.

Les granulats sont désignés par leur classe granulaire d/D où d et D représentent respectivement la plus petite et la plus grande des dimensions du produit.

Plus de 70 % en poids du béton est constitué de granulats. Ce sont les composants majeurs de l'ouvrage puisqu'ils conditionnent sa résistance mécanique et son aspect visuel, et peuvent être primordial pour l'esthétisme de l'ouvrage. Les performances mécaniques, esthétiques et de durabilité recherchées sont déterminantes dans le choix des granulats.

Tableau I.3. Dimensions et caractéristiques des familles de granulats

Familles de granulats		
Familles	Dimensions	Caractéristiques
Fillers	0/D	D < 2 mm avec au moins 70% de passant à 0.063 mm
Sablons	0/D	D ≤ 1 mm 2 mm avec au moins 70% de passant à 0.63 mm
Sables	0/D	1 mm < D ≤ 6.3 mm
Graves	0/D	D > 6.3 mm
Gravions	d/D	d ≥ 1 mm et D ≤ 125mm
Ballasts	d/D	D ≥ 25 mm et D ≤ 50 mm

IV.2.2 Caractéristiques des granulats

IV.2.2.1 Des caractéristiques intrinsèques, liées à la nature minéralogique de la roche et à la qualité de gisement, telles que, par exemple

- La masse volumique réelle.
- L'absorption d'eau et la porosité.
- La sensibilité au gel.
- La résistance à la fragmentation et au polissage.

IV.2.2.2 Des caractéristiques de fabrication, liées aux procédés d'exploitation et de production des granulats telles que, en particulier

- La granularité
- La forme (aplatissement)
- La propriété des sables.

Les caractéristiques des granulats sont fonction de leurs familles (gravillons, sables, fillers) et font l'objet de méthode de détermination adaptée.

IV.2.3 Différents types de granulats

Les granulats, en fonction de sa nature et de son origine, peuvent-être :

IV.2.3.1 Granulats naturels

Les granulats naturels sont issus de roches meubles ou massives. Les roches meubles (matériaux alluvionnaires) sont exploitées le long de fleuves et des rivières. Les roches massives calcaires constituent les bassins sédimentaires et les chaînes récentes ; les roches massives éruptives constituent les massifs anciens. Figure I-7

➤ Origine minéralogique

Parmi les granulats naturels, les plus utilisés pour le béton proviennent de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, des roches métamorphiques telles que les quartzs et quartzites ou de roches éruptives tels que les ballastes, les granites, les porphyres.

➤ Granulats roulés et granulats de carrières

Indépendamment de leur origine minéralogique [10], on classe les granulats en deux catégories.

- **Les granulats de roche meuble**

Dits roulés, dont la forme a été acquise par l'érosion. Ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses, nuisibles à la résistance du béton et criblés pour obtenir différentes

classes de dimension. Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, les granulats utilisés pour le béton sont le plus souvent siliceux, calcaires ou silico-calcaires. Ils sont exploités à proximité des cours d'eau, dans la nappe ou au-dessus de la nappe ou sur des fonds marins peu profonds. L'extraction est donc réalisée en fonction du gisement à sec ou dans l'eau.

- **Les granulats de roche massive**

Sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. Une phase de pré criblage est indispensable à l'obtention de granulats propres. Différentes phases de concassage aboutissent à l'obtention des classes granulaires souhaitées. La figure ci-dessous présente l'aspect général des granulats naturels.



Pierre calcaire



Roches dures ou massives



Granulats alluvionnaires

Fig. I.7. Granulats naturels

IV.2.3.2 Granulats artificiels

Des granulats artificiels peuvent être employés pour réaliser des bétons à usages spécifiques. (Figure I. 8)

- **Sous- produit industriels, concassés ou non**

Les plus employés sont le laitier cristallisé concassé et le laitier granulé de haut fourneau obtenu par refroidissement à l'eau.

- **Granulats à hautes caractéristiques**

il s'agit de granulats élaborés industriellement pour répondre à certains emplois, notamment granulats très durs pour renforcer la résistance à l'usure de dallages industriels (granulats ferreux) ou granulats réfractaires.

Quelques types de pierres sont présentés dans la figure ci-dessous.



Fig. I.8. Granulats artificiels de Laitiers ou Scories

IV.2.3.3 Granulats et composants légers

IV.2.3.3.1 Les granulats légers

Usuels sont l'argile expansée, le schiste expansé ou le laitier expansé. D'une masse volumique variable entre 400 et 800 kg/m³ selon le type et la granulométrie, ils permettent de réaliser aussi bien des bétons de structure que des bétons présentant une bonne isolation thermique. Les gains de poids sont intéressants puisque les bétons réalisés ont une masse volumique comprise entre 1200 et 2000 kg/m³. (Figure I. 9)

IV.2.3.3.2 Les composants légers

Sont d'origine aussi végétale et organique que minérale. Le polystyrène expansé et le liège, d'origine non minérale, le bois, ainsi que la vermiculite sont également utilisés pour réaliser des bétons très légers en isolation ou pour des chapes. Très légers – de 20 à 100 kg/m³ – ils permettent de réaliser des bétons de masse volumique comprise entre 300 et 600 kg/m³. Ils sont donc particulièrement adaptés pour les bétons d'isolation, mais également pour la réalisation d'éléments légers : blocs coffrant, blocs de remplissage, dalles ou rechargements sur planchers peu résistants.



Billes d'argiles expansées



Schistes expansées

Fig. I. 9 .Granulats et composants légères (produits élaborés).

IV.2.3.4 Granulats recyclés

Obtenue par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que des bétons de démolition de bâtiments (recyclage de béton de démolition). (Figure I. 10)



Granulats de débris de béton



Granulats de débris de mixtes

Fig. I. 10 .Granulats recyclés.

Les granulats recyclés sont des granulats provenant du recyclage de débris de démolition. Ces granulats sont considérés comme un système composé de deux phases distinctes, le mortier et le granulat d'origine [11]. La teneur en mortier en résiduel attaché au granulat d'origine a un grand impact sur les propriétés du granulat recyclé [12] parce qu'il permet d'évaluer leurs qualités. Une des conséquences de la présence du mortier résiduel est la formation d'une zone de transition entre le granulat origine et le mortier résiduel. Cette zone de transition se forme entre le granulat recyclé et la nouvelle pâte de ciment. La configuration du granulat recyclé est illustrée sur la figure I. 11

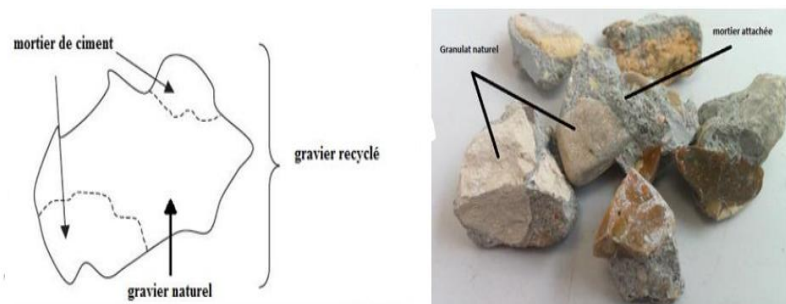


Fig. I. 11.Granulat recyclé [13].

IV.2.4 Rapport eau-ciment E/C

L'eau doit être propre dans le but d'éviter au maximum les impuretés telles que les matières organiques ou les alcalis pouvant entraîner la corrosion du béton armé en cas d'utilisation d'armatures. La quantité d'eau est en général comprise entre 140 et 200 litres/m³. On estime

que 50% de l'eau de gâchage servira à l'hydratation du ciment et les 50% restant contribuera à la plasticité du béton, nécessaire pour sa mise en œuvre.

La résistance du béton augmente avec le dosage en ciment. Par contre, la résistance ainsi que la durabilité diminuent en fonction du dosage en eau. C'est la raison pour laquelle on privilégie le rapport ciment-eau dans la composition du ciment. Plus ce rapport sera grand, plus le béton sera sec, ce qui influera grandement son ouvrabilité et sa plasticité.

Pour donner un exemple, si le rapport ciment-eau est de 1,5, la résistance serait aux alentours de 25 MPA. Plus ce rapport augmentera, plus la résistance du béton sera accrue.

Le rapport ciment-eau couramment utilisé est de 1,82 ou entre 1,66 et 2,22 mais il est possible de sortir de cette fourchette de valeur dans le cas où des adjuvants sont utilisés. [5].

IV.2.5 Rapport granulats-sable

Le rapport granulats-sable doit être inférieur à 2. En effet, si le rapport est supérieur à 2,2, la résistance en compression ainsi que la densité augmenteront considérablement. Par contre, cela rendra l'ouvrabilité ou la maniabilité du béton moindre [5].

IV.2.6 Les adjuvants du béton

Les adjuvants sont des produits chimiques de plus en plus courants lors de la fabrication du béton. Ajoutés à faible dose lors de la préparation du béton (les adjuvants représentent moins de 5% de la masse du béton), ces produits améliorent certaines caractéristiques de ce matériau (l'étanchéité ou le temps de prise par exemple). Les différents types d'adjuvants qui existent vous permettront d'obtenir un béton avec les caractéristiques spécifiques que vous souhaitez lui donner. Les 3 grandes catégories d'adjuvants **EN934-2** (dont la publication est prévue en 1995):

➤ **Les adjuvants qui modifient l'ouvrabilité du béton**

- Plastifiants réducteurs d'eau.
- Superplastifiants hauts réducteurs d'eau.

➤ **Les adjuvants qui modifient la prise et le durcissement**

- accélérateurs de prise ;
- accélérateurs de durcissement ;

- Retardateurs de prise.
- **Les adjuvants qui modifient certaines propriétés du béton**
- Entraîneurs d'air .
- hydrofuges de masse .
- Rétenteurs d'eau.

IV.2.7 Addition minérale

IV.2.7.1 Définitions des additions

Une addition minérale est définie par **la norme européenne EN 206-1** comme étant : Un Matériau minéral finement divisé utilisé dans le béton afin d'améliorer certaines propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières.

IV.2.7.2 Type des additions

La norme européenne EN 206-1 considère types d'additions :

- **Additions calcaires**

Les additions calcaires sont des produits secs finement divisés, obtenus par broyage et/ou sélection, provenant de gisements de roches calcaires pouvant être dolomitiques, massives ou meubles. Les additions calcaires conformes à **la norme NF P18-508** sont du type I selon **la norme EN 206-1** et sont substituable au ciment au sens et sous les conditions de cette norme.

- **Additions siliceuses**

Les additions siliceuses sont des produits finement divisés, constitués à plus de 96 % (valeur spécifiée inférieure) et à plus de 93.5 % (valeur limite absolue inférieure), par de la silice exprimé en SiO₂ mesurée sur produit sec et obtenus par broyage et/ou sélection de quartzes ou de cristobalites synthétiques.

Les additions siliceuses conformes à **la norme NF P18-509** sont du type I selon **la norme EN 206-1** et sont substituables au ciment au sens et sous les conditions de cette norme

- **Fumée de silice**

La fumée de silice est une poudre amorphe finement divisée résultant de la production d'alliages de silicium ou contenant du silicium. Elle est entraînée depuis la zone de combustion des fours par les gaz, vers le système de captage. [NF P 18-502]

La norme distingue deux classes A et B ; les fumées de silice de classe A étant les plus riches en silice et sont plus fines. Une fumée de silice de classe A ou B, conforme à la norme est une addition du type II au sens de **la norme EN 206-1** et est substituable au ciment au sens et aux conditions de cette norme.

Toutefois, compte tenu de la très grande finesse de ces additions et de leur très grande réactivité avec la portlandite libérée par l'hydratation du ciment, leur proportion est limitée à 10 % et leur emploi réservé aux bétons contenant un superplastifiant.

- **Cendres volantes pour béton**

Les cendres volantes sont une poudre fine constituée principalement de particules vitreuses de forme sphérique, issues de la combustion du charbon pulvérisé en présence ou non de Co-combustibles, ayant des propriétés pouzzolaniques et composées essentiellement de SiO₂ et de Al₂O₃ ; la proportion de SiO₂ réactive constituant au moins 25 % de la masse. Les cendres volantes conformes à **la norme NF EN 450-1** sont des additions de type II au sens de **la norme EN 206-1**, et sont substituables au ciment au sens et selon les conditions de cette norme.

- **Laitier vitrifié moulu de haut fourneau**

Le laitier vitrifié moulu provient du broyage du laitier vitrifié granulé ou bouleté, coproduit de la fabrication de la fonte et obtenu par trempe du laitier de haut fourneau en fusion.

Sont exclues de la norme : les laitiers de fonte non trempés cristallisés et donc non vitrifié utilisés comme ballast ou comme granulats et également les laitiers d'aciéries et tous les laitiers de métaux non ferreux qui peuvent contenir des éléments nuisibles aux bétons tels que les sels métalliques.

La norme distingue deux classes de laitier A et B ; la dernière est la plus réactive, sa finesse étant plus élevée. Les laitiers conformes à **la norme NF P 18-506** sont des additions de type II au sens de **la norme EN 206-1**, mais seuls les laitiers de classe B sont substituables au ciment au sens et selon les conditions de cette norme.

V Propriétés des bétons

V.1 Propriétés du béton frais

La principale propriété du béton à cet état est son ouvrabilité. En effet, le béton offre une facilité de remplissage du coffrage et du ferrailage lors de la mise en œuvre. Pour remplir toutes ses qualités, les constituants du béton doivent être soigneusement mélangés.

Cette ouvrabilité est influencée par le dosage et la qualité des composants, la forme, la granulométrie et le type de granulats, le volume d'air mais surtout par la quantité d'eau insérée dans le béton.

➤ L'ouvrabilité du béton

Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines Caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité. On n'en citera que quelques-uns qui sont les plus couramment utilisés dans la pratique.

- **Affaissement au cône d'Abrams**

Cet essai (slump-test) est incontestablement un des plus simples et des plus fréquemment Utilisés, car il est très facile à mettre en œuvre. Il ne nécessite qu'un matériel peu coûteux et peut être effectué directement sur chantier par un personnel non hautement qualifié mais ayant reçu simplement les instructions nécessaires au cours de quelques séances de démonstration. L'appareillage est complètement décrit dans **la norme NF P 18-451** et est schématisé sur la figure I.12. Il se compose de 4 éléments: un moule tronconique sans fond de 30 cm de haut, de 20 cm de diamètre en sa partie inférieure et de 10 cm de diamètre en sa Partie supérieure; une plaque d'appui; une tige de piquage; un portique de mesure.

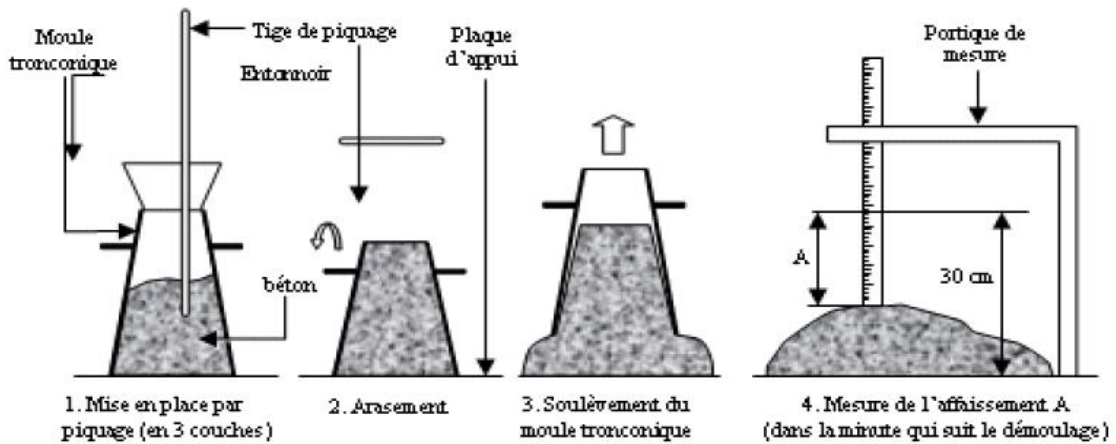


Fig. I.12. Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams

Les mesures sont évidemment quelques peu dispersées et il ne faut pas accorder à cet essai un caractère trop rigoureux, mais on peut admettre qu'il caractérise bien la consistance d'un Béton et permet le classement approximatif indiqué au tableau I.4

Tableau I.4 .Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au Cône

Class de consistance	Affaissement (cm)	Tolérance (cm)
Ferme F	0 à 4	± 1 cm
Plastique P	5 à 9	± 2 cm
Trés plastique TP	10 à 15	± 3 cm
Fluide FI	≥16	

Malheureusement, cet essai ne convient pas pour tester les bétons qui seraient encore plus fermes, plus secs qu'un béton donnant un affaissement presque nul. Dans ce cas-là, il convient de déterminer la consistance du béton frais par une autre méthode, qui s'appelle l'essai vébé, schématisé sur la figure I.13

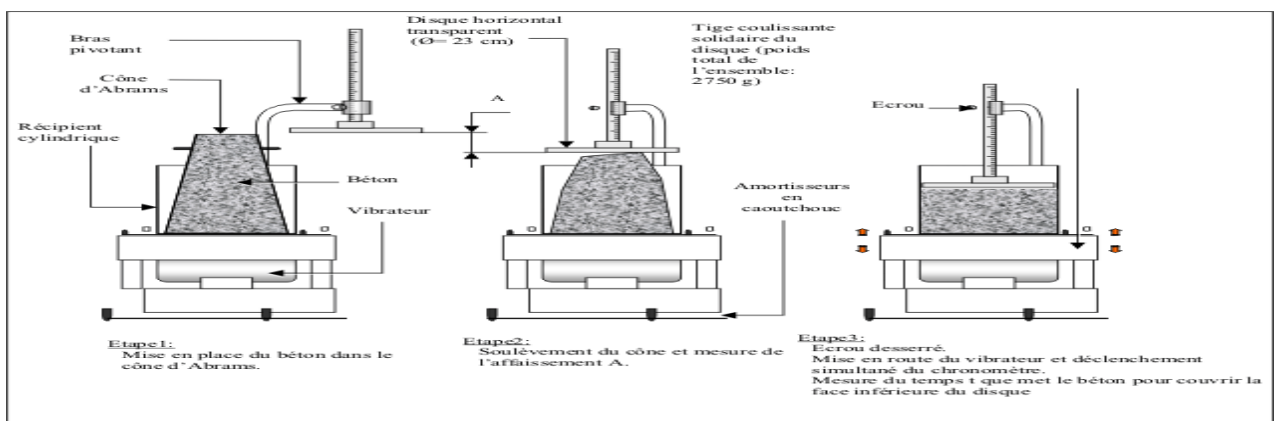


Fig. I.13. Mesure de la consistance (Essai véré)

V.2 Propriétés du béton durci

Lorsque le béton a durci, sa forme ne peut plus être modifiée mais ses caractéristiques continuent d'évoluer pendant de nombreux mois.

La compacité d'un béton (ou sa faible porosité) est un avantage déterminant pour sa durabilité.

Une bonne résistance à la compression est la performance souvent recherchée pour le béton durci.

➤ Résistance à la compression

La résistance en compression à 28 jours est désignée par f_{c28} . Elle se mesure par compression axiale de cylindres droits de révolution et d'une hauteur double de leur diamètre.

Le cylindre le plus couramment employé est le cylindre de 16 ($d = 15,96$ cm) dont la section est de 200 cm². La normalisation européenne indique comme dimension des cylindres $d = 15$ cm de $H = 30$ cm.

Elle varie suivant la taille des éprouvettes essayées. Plus celles-ci sont petites et plus les résistances sont élevées. La résistance sur cylindre d'élanement 2 (par exemple diamètre de 16 cm, hauteur de 32 cm) est plus faible de l'ordre de 20% que la résistance sur cubes de 20 cm (Figure I.14).

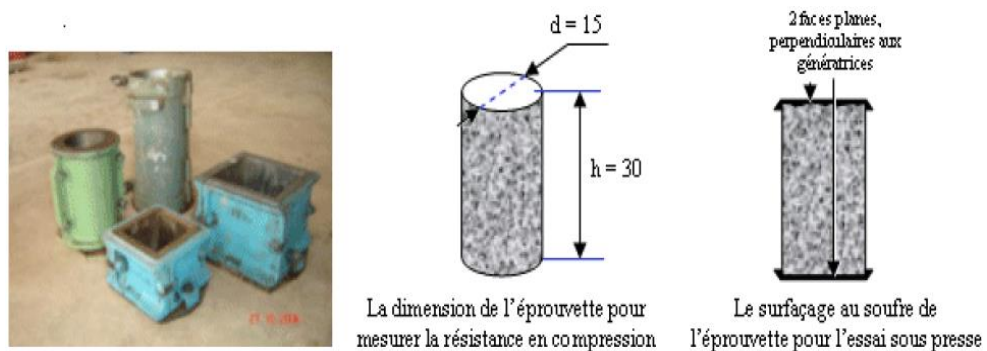


Fig. I.14 . Les moules cylindriques, cubiques et les éprouvettes pour mesurer la résistance en compression

➤ La résistance en traction

Généralement le béton est un matériau travaillant bien en compression, mais on a parfois besoin de connaître la résistance en traction, en flexion, au cisaillement. La résistance en traction à 28 jours est désignée par f_{t28} .

➤ **La résistance en traction – flexion**

Les essais les plus courants sont des essais de traction par flexion. Ils s'effectuent en général sur des éprouvettes prismatiques d'élanement 4, reposant sur deux appuis :

- soit sous charge concentrée unique appliquée au milieu de l'éprouvette (moment maximal au centre).
- soit sous deux charges concentrées, symétriques, égales, appliquées au tiers de la portée

(Moment maximal constant entre les deux charges (Figure.I.15).

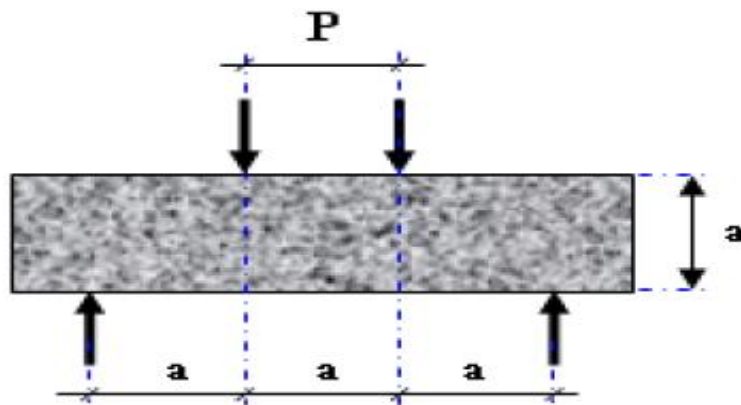


Fig. I.15.Essai traction par flexion.

➤ **La résistance en traction par fendage**

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse. Cet essai est souvent appelé "Essai Brésilien". Si P est la charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre par mise en traction du diamètre vertical, la résistance en traction sera :

$$f_{tj} = 2 \frac{P}{\pi DL} \dots \dots \dots (I.1)$$

Avec : j = âge du béton (en jours) au moment de l'essai D et L = diamètre et longueur du cylindre de béton.

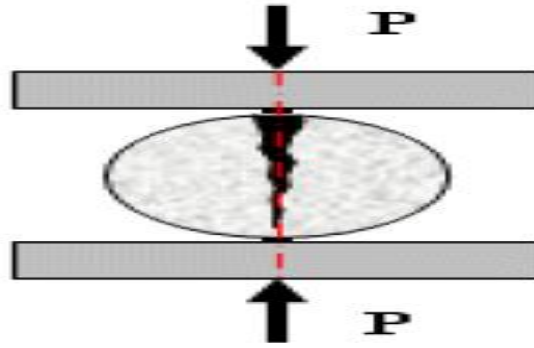


Fig. I.16. Essai traction par fondage

➤ **La résistance en traction directe**

La mesure se fait par mise en traction de cylindres identiques à celle de la résistance en traction par fendage, mais l'essai est assez délicat à réaliser car il nécessite, après sciage des extrémités, le collage de têtes de traction parfaitement centrées, l'opération devant avoir lieu sans aucun effort de flexion parasite.

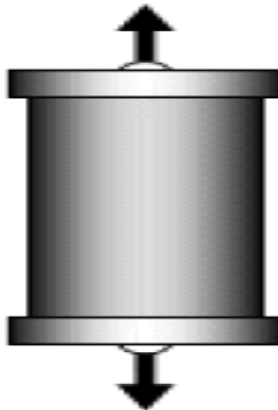


Fig. I.17 .Essai traction directe

➤ **Module d'élasticité**

Sous l'action de charges instantanées, le béton a un comportement élastique. Plus la résistance du béton est élevée, plus le module d'élasticité est grand. Le module d'élasticité instantané est compris entre 30 000 et 35 000 MPA [5].

$$E = \frac{\textit{contrainte unitaire}}{\textit{déformation relative}} \dots\dots\dots (I.2)$$

➤ **Le fluage**

C'est un phénomène de déformation différée causé par l'effet d'une charge fixe indéfiniment appliquée. On estime qu'au bout d'un mois, 40 % de la déformation de fluage sont effectifs et au bout de six mois, ce sont les 80%. Cette Déformation est généralement entre 4 à 5 ‰ de la longueur de l'ouvrage en question. Il est trois fois plus grand que la déformation due aux charges instantanées vu précédemment. [5].

➤ **Le retrait**

C'est la diminution de longueur d'un élément de béton. On l'assimile à l'effet d'un abaissement de la température qui entraîne un raccourcissement.

Tableau I.5. Causes de retrait et remèdes

Causes et constatation	Remèdes
Le retrait avant- prise est causé par l'évaporation d'une partie de l'eau que contient le béton. Des fissures peuvent s'ensuivre car le béton se trouve étiré dans sa masse.	Ils s'agit de s'opposer au départ brutal de l'eau par : - la protection contre la dessiccation. - l'utilisation d' adjuvants ou de produits de cure.
Après la prise , il se produit : - Le retrait thermique dû au retour du béton à la température ambiante après dissipation de la chaleur de prise du ciment. On constate une légère diminution de longueur.	Il faut éviter de surdoser en ciment. Les ciments de classe 45 accusent moins de retrait que ceux de classe 55 de durcissement plus rapide.
- Le retrait hydraulique est dû à une diminution de volume résultant de l'hydratation et du durcissement de la pâte de ciment. Le retrait croit avec la finesse de ciment et le dosage.	Le béton aura d'autant moins de retrait qu'il sera plus compact ; ce qui dépend de la répartition granulaire, car un excès d'éléments fins favorise le retrait ainsi que les impuretés (argiles, limons).

➤ **La perméabilité du béton**

Plus un béton est imperméable, plus il a une grande durabilité dans la mesure où les agents agressifs ne peuvent pas agir. Elle est donc liée à la porosité. L'imperméabilité du béton ordinaire est bonne. Sa valeur est de 1×10^{-10} cm/s [5].

➤ **La porosité**

La porosité est une caractéristique extrêmement importante pour un béton. La réduction des vides est essentielle, notamment dans le but de faire face aux agents agressifs extérieurs et de lutter contre les risques de corrosion des armatures dans le cas d'un béton armé.

Le choix du type de ciment à mettre en œuvre et l'augmentation du dosage permettent la réduction des vides et contribuent donc fortement à la durabilité de l'ouvrage [5].

VI Méthodes de composition des bétons ordinaires

L'étude de la composition d'un béton, consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage ou de partie d'ouvrage en cause. Les méthodes de composition se subdivisent en deux types :

- Les méthodes à « granularité continue », si la courbe sur le graphique granulométrique s'élevant d'une façon continue ; autrement dit du plus petit grain de ciment de dimension

$DC \approx 6.3.m$ au plus gros grain D des graviers. Toutes les grosseurs intermédiaires sont représentées.

Exemple : béton constitué d'un sable 0/5 mm et deux graviers 5/20 mm et 20/50 mm

- Les méthodes à « granularité discontinue », lorsque la courbe granulométrique correspondante présente un palier qui équivaut à un manque d'élément intermédiaire

Ex : béton constitué d'un sable 0/5 mm et d'un gravier 20/50.

La granularité continue permet d'obtenir des bétons plus plastiques et de bonne ouvrabilité ;

Par contre la granularité discontinue conduit à des bétons présentant en général, des résistances en compression un peu supérieures mais au détriment de l'ouvrabilité ; il semble toutefois que la plus part des bétons actuellement utilisés sont à granularité continue.

VI.1 Méthode de Bolomey

Par une formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et d'où S'efforce de réaliser avec des granulats dont on dispose une composition granulaire totale (Ciment compris), dont la courbe soit aussi proche que possible de la courbe de référence Théorique. La formule de base est la suivante.

$$P = A + (100 - A)\sqrt{d/D} \dots\dots\dots (I.3)$$

P : est le pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre

D : est le diamètre des plus gros grains.

A : la valeur de A dépendra de

- la consistance souhaitée de béton
- la provenance des granulats.

Elle varie de 6 à 16, étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort.

Cette méthode aboutit théoriquement tout au moins à une granularité continue.

VI.2 Méthode de Faury

La particularité de cette méthode est qu'elle est :

- Applicable à tous les granulats, qu'elle que soit la masse volumique Faury à distingué des grains fins et moyens des celles gros et la pente de la droite n'est pas la même pour chacune de ces deux courbes, il adopta aussi une échelle des abscisses graduée en $5\sqrt{d}$ L'abscisse du point de rencontre de ces deux droites est fixée D/2 et son ordonnée par la formule :

$$Y = A + 17\sqrt[5]{D} \frac{B}{\frac{R}{D} - 0.75} \dots\dots\dots (I.4)$$

Où:

A : constante, traduisant la maniabilité du béton.

B : constant traduisant l'importance du serrage du béton.

D : plus grande dimension de tamis.

R : rayon moyen démoule.

VI.3 Méthode d'Abrams

C'est une règle de mélange basée sur l'obtention d'un certain module de finesse global pour le mélange de granulats à partir de la connaissance des modules de finesse des granulats à employer.

Le module de finesse du mélange est choisi de manière que les vides dans ce mélange soient en principe, réduits au minimum ; les modules optimaux pour béton de granulat roulés,

déterminés expérimentalement par Abrams, sont indiqués dans le tableau (I.6). En fonction du dosage en ciment et de la dimension D du granulat le plus gros.

Tableau I.6. Valeurs optimales d'après ABRAMS du module de finesse des compositions granulaire des bétons courants.

Dosage en ciment Kg/m ³	Dimension maximale D des granulats						
	10	15	20	25	30	40	60
275	4.05	4.45	4.85	5.25	5.60	5.80	6.00
300	4.20	4.60	5.00	5.40	5.65	5.85	6.20
350	4.30	4.70	5.10	5.50	5.73	5.88	6.30
400	4.40	4.80	5.20	5.60	5.80	5.90	6.40

La règle de mélange d'ABRAMS, permet de calculer les pourcentages relatifs des granulats de module de finesse Mf_1 et Mf_2 , choisi pour obtenir un module de finesse MF choisi pour le mélange.

VI.4 Méthode de Valette

Valette a mis au point une méthode essentiellement expérimentale. Mais qui nécessite cependant un certain nombre de calcul préparatoire dans les cas les plus courants, on partira en général de deux granulats (béton binaire) : un sable 0/5mm et un gravier présentant le plus souvent une certaine discontinuité avec le sable. On calcul d'abord le dosage de sable et ciment devant donner en principe le mortier plein à minimum de ciment, ce dosage s'obtient en mesurant les vides du sable mouillé et ou calculant le dosage en ciment permettant de remplir le volume des vides du sable par un volume égale de pâte pure de ciment. On ajoute ensuite le maximum de gravier mouillé compatible avec une ouvrabilité permettant un moulage correct et une mise en œuvre facile dans les conditions du chantier. On obtient alors le béton plein à minimum de sable et le moins dosé (en ciment). Les dosages en ciment auxquels inabouti ainsi sont presque toujours très nettement au-dessous des dosages nécessaires pour obtenir les résistances souhaitées et la plasticité nécessaire l'étanchéité ou autres qualités pour déterminer la composition du béton de dosage en ciment suffisant pour la résistance à obtenir ou fixe à priori dans certains cas ou on évalue par un calcul approprié, le volume de pâte pure compensatrice à substituer à un égal volume plein mouillé de sable.

VI.5 Méthode de Joisel

S'inspirant comme Faury de la théorie de caquot mais en la généralisant, A. Joisel propose de considérer que la loi de granulation conduisant à la compacité maximale est fonction de $m\sqrt{d}$, m dépendant de la compacité avec laquelle se serre un granulat de dimension uniforme selon les moyens de serrage, m peut alors varier de 3 à 10. Comme dans la théorie de Faury, on aboutit donc en principe à une granularité continue sauf, bien entendu, si les granulats dont on dispose en pratique présentent une discontinuité.

Comme pour les méthodes de Faury et Valette, le dosage en ciment déterminé par cette méthode est le dosage minimal correspondant théoriquement sur le plan granulométrique, à la compacité maximale, ce dosage est en général nettement inférieur (150 à 200Kg/m³) au dosage nécessaire ou exigé (250 à 400Kg/m³ dans la plus part des cas). Une correction doit être apportée dans ce sens.

Conclusion

Dans ce chapitre nous sommes revenus sur les généralités des bétons et ses constituants. Nous avons discuté les différents types de granulats ainsi que, l'influence de leurs performances mécaniques sur la résistance mécanique du béton. Nous avons aussi expliqué la procédure de fabrication du ciment et l'effet d'utilisation des adjuvants dans les bétons.

I	INTRODUCTION.....	4
II	HISTORIQUE.....	4
III	DEFINITION DU BETON ORDINAIRE (BO).....	5
IV	LA COMPOSITION DU BETON ORDINAIRE.....	6
IV.1	LE CIMENT.....	6
IV.1.1	COMPOSITION ET CARACTERISTIQUES DU CIMENT.....	6
IV.1.2	CLASSEMENT DE CIMENT.....	8
IV.1.3	HYDRATATION DU CIMENT.....	8
IV.2	LES GRANULATS.....	11
IV.2.1	DEFINITION DES GRANULATS.....	11
IV.2.2	CARACTERISTIQUES DES GRANULATS.....	12
IV.2.3	DIFFERENTS TYPES DE GRANULATS.....	12
IV.2.4	RAPPORT CIMENT-EAU E/C.....	15
IV.2.5	RAPPORT GRANULAT-SABLE.....	16
IV.2.6	LES ADJUVANTS DU BETON.....	16
IV.2.7	ADDITION MINERALE.....	17
V	PROPRIETES DES BETONS.....	19
V.1	PROPRIETES DU BETON FRAIS.....	19
V.2	PROPRIETES DU BETON DURCI.....	21
VI	METHODES DE COMPOSITION DES BETONS ORDINAIRES.....	25
VI.1	METHODE DE BOLOMEY.....	25
VI.2	METHODE DE FAURY.....	26
VI.3	METHODE D'ABRAMS.....	26
VI.4	METHODE DE VALETTE.....	27
VI.5	METHODE DE JOISEL.....	28

I Introduction

La limitation de la consommation énergétique dans le secteur du bâtiment est basée en premier lieu sur le choix des matériaux utilisés pour la construction de l'enveloppe.

De nouveaux matériaux sont alors apparus, connus sous l'appellation de bétons légers. Ils ont une masse volumique plus faible que celle des bétons ordinaires et visent principalement une meilleure isolation thermique [14]. Ces matériaux peuvent être obtenus grâce à la substitution des granulats traditionnels par des granulats plus légers [15], souvent artificiels tels que l'argile expansée, le schiste, la perlite, la vermiculite, le laitier expansé, etc. Ces bétons, qui sont aujourd'hui bien maîtrisés au niveau de leur formulation et de leur mise en œuvre [16], présentent des densités se situant en général dans la fourchette [16, 17].

Cependant, on peut atteindre des densités plus faibles encore, en utilisant des granulats extrêmement légers tels que des agglomérés de liège, et des billes de polystyrène expansé qui font l'objet de notre étude.

Ce chapitre à caractère bibliographique, débute par une description approfondie du béton et des matériaux utilisés pour l'allègement (liège et polystyrène). Les compositions chimiques, les propriétés physiques, et les différentes procédures de fabrication de ces matériaux sont présentées. Les résultats concernant le comportement mécanique des bétons étudiés seront également exposés.

II Définition des bétons légers

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. Suivant le mode de création de la porosité artificielle les bétons légers se subdivisent selon les groupes suivants : bétons légers à agrégats légers et poreux ; bétons à gros pores (sans sable), préparés avec un gros agrégat compact ou poreux d'une seule fraction sans sable ; bétons cellulaires dont la structure est représentée par des cellules créées artificiellement et remplaçant les grains des agrégats. La classification des bétons légers proposée par Lafarge « bétons-granulats légers » est représentée par la figure (II-1) :

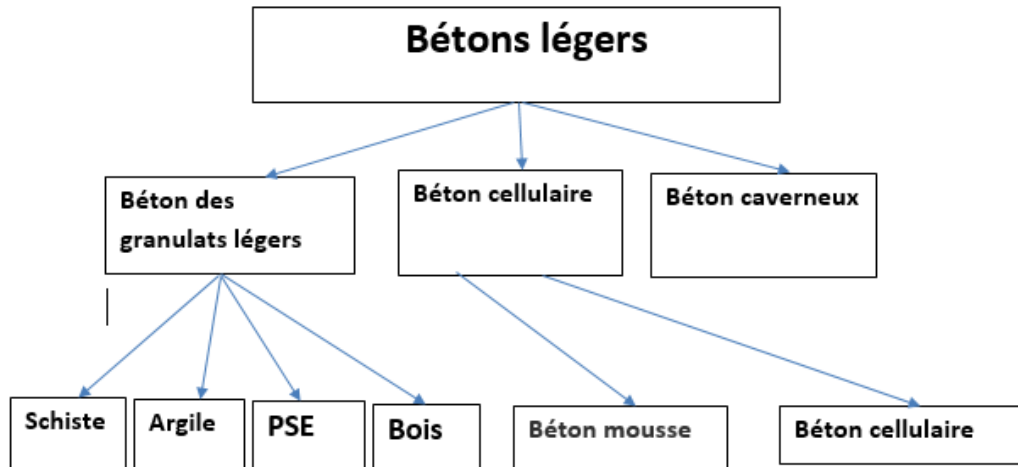


Fig. II.1. Classifications des bétons légers

III Les granulats légers

Les bétons de granulats légers sont généralement classés suivant l'origine du granulat utilisé, ainsi on distingue 04 types des granulats:

III.1 Les granulats légers naturels

➤ Les argiles expansées

Ce sont des granulats qui disposent d'une faible densité et qui sont prêts à l'emploi. Ils ne nécessitent aucun broyage ou concassage.

Son élément constitutif est une argile grasse. Elle est introduite humide dans un four et en ressort après séchage sous forme de nodule (une grosseur anormale de forme généralement arrondie) dont la surface est lisse et légèrement vitrifiée.

Les argiles expansées sont rarement utilisées dans la confection du béton du fait de leur coût de production exorbitant



Fig. II.2. Les argiles expansées

➤ **Schistes expansés**

C'est une variante d'argile expansée que l'on obtient par cuisson de schistes appropriés.



Fig. II.3 .schistes expansés

➤ **Laitier expansé**

Il est obtenu par l'insufflation d'air dans le laitier en fusion. Après cette étape, le Concassage offre des granulats de diverses dimensions. Ils sont assez rares sur le Marché.



Fig. II.4.Laitier expansé

➤ **Pierre ponce**

C'est une lave volcanique alvéolée de couleur grise. On obtient des granulats après

Concassage de cette dernière.



Fig. II.5 .Pierre ponce

➤ **Pouzzolane**

C'est une roche naturelle constituée par les projections volcaniques. Elle est assez Abondante.



Fig. II.6. Pouzzolane

➤ **Perlite**

Sous forme de petits grains arrondis et creux, on les obtient par le traitement chimique D'une lave volcanique.



Fig. II.7.Perlite

➤ **Vermiculite**

Sous forme de petits parallélépipèdes, elles sont obtenues par la cuisson suivie d'un refroidissement brusque des silicates.



Fig. II.8. Vermiculite

III.1.1 Frittage

Dans cette opération, l'argile, le schiste et les cendres volantes ou ardoise sont mélangés à l'état brut en présence d'un combustible pulvérisé puis brûlés et enfin gonflés.

D'une manière générale, plus ils sont légers, plus la résistance de ces bétons est faible. La résistance en compression peut aller de 2 à 5 MPA pour les bétons de vermiculite mais peut avoisiner les 40 MPA pour les bétons d'argile ou de schiste expansé. . [5]

III.1.2 Le choix des granulats

Le choix dépend surtout de la résistance souhaitée en compression ainsi que de la densité recherchée. Toutefois, en raison de leur capacité à absorber l'eau, un pré-mouillage avant le malaxage est recommandé. Les granulats légers étant plus fragiles comparés aux granulats courants, il convient alors de ne pas trop prolonger le temps de malaxage au-delà de ce qui est nécessaire.

On obtient le rapport ciment-eau ainsi que le rapport granulat-sable par l'utilisation de la formule de Bolomey.

Comme ce sont des calculs fastidieux, on va uniquement se limiter aux valeurs pour la confection des bétons traditionnels. [5]

III.2 Les granulats légers de matériaux artificiels

III.2.1 Le liège

➤ Historique

Le liège est un matériau vivant et naturel, provenant d'une variété de chêne-liège qui reconstitue son écorce dès quelle est prélevée chaque année. L'arbre produit une épaisseur de liège variant de 1 à 10 mm selon l'âge déjà acquis par l'écorce elle-même. Chaque accroissement annuel est séparé du précédent par une ligne brune bien déterminée. Du point de vue thermique et acoustique le liège est un très mauvais conducteur. Sa première Utilisation en tant qu'isotherme remonte très tôt dans l'Antiquité dans la fabrication de ruchers. En ce qui concerne sa place dans la construction, on retrouve quelques traces des Premiers emplois comme isolant thermique, parmi les populations primitives d'Afrique du Nord qui l'utilisaient en plaque et mélangé avec de l'argile pour la construction des murs de leurs habitations. L'habitat naturel du chêne- liège est le pourtour du bassin méditerranéen occidental (présent depuis plus de 60 millions d'années). L'aire naturelle de la subéraie mondiale est d'environ 2687000 hectares repartis principalement sur sept pays (figure II.9).

Les principales subéraies algériennes sont situées essentiellement en zone sub- humide au nord, et entre l'Algérois et la frontière Tunisienne, ou elles s'étendent de la mer jusqu'à 1200 m d'altitude.

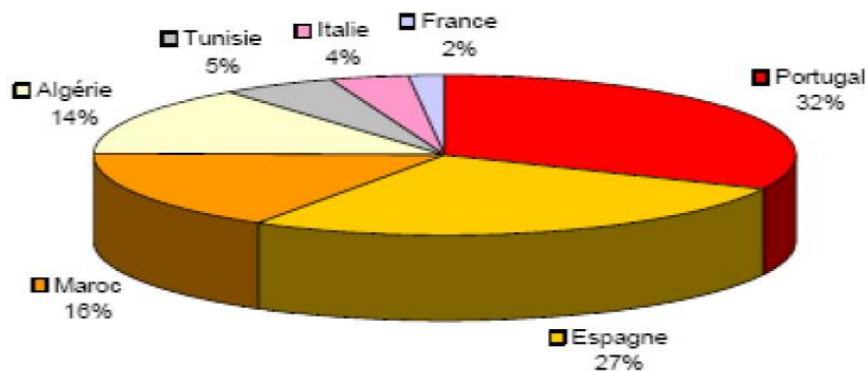


Fig. II.9. Répartition Mondiale des subéraies

➤ Structure alvéolaire du liège

L'assise génératrice cambiale du chêne liège donne naissance vers l'intérieur à un bois très dur, riche en larges rayons ligneux, pauvre en zone poreuse et en vaisseaux, et vers l'extérieur, à un liber mince et riche en tanin. Entre liber et liège fonctionne une seconde assise génératrice externe,

Chapitre II : Les Béton légers

subéro-phellodermique, donnant vers l'extérieur, un tissu élastique mort, assurant le rôle de protection : le liège [18].

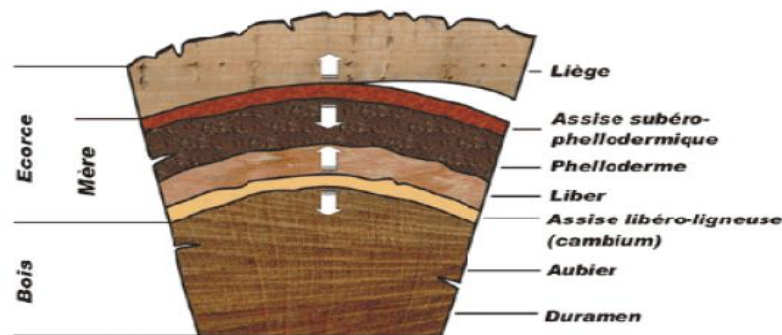


Fig. II.10. Structure et composition du liège

Le liège est un tissu végétal composé de micro cellules, ayant en général une forme poly hydrique. Si on l'examine au microscope, nous avons l'impression de regarder un gâteau de miel (figureII.11).

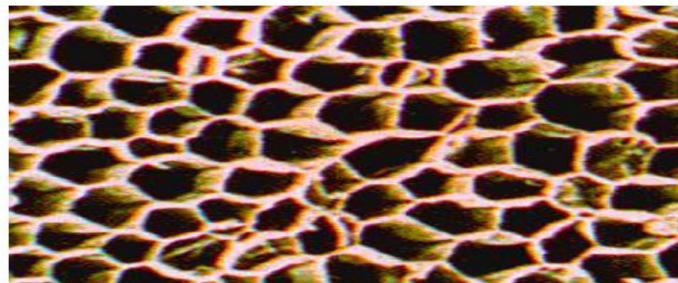


Fig. II.11. Structure Microscopies du Liège

On estime que 1 cm³ de liège comporte entre 15 et 40 millions de cellules qui sont disposées en rangées régulières. En coupe transversale elles présentent un contour polygonal. Les parois séparant les cellules sont minces (figure II.12), légèrement aplatis dont les dimensions sont de l'ordre de 20 à 30 mm, elles semblent composées de cinq feuillets, deux internes de nature cellulosique, une intermédiaire lignifiée, et deux externes subérifiés. Le tissu subéreux est traversé radialement par des lenticelles qui sont des pores remplis de cellules riches en tannins et à forte lignification. Les lenticelles sont perméables aux gaz et aux liquides et elles sont souvent envahies de micro-organismes saprophytes. Ces parois ayant une épaisseur de 1 à 2 millièmes de mm, sont remplies de gaz d'une composition proche de l'air mais plus faible en CO₂. Ce gaz comprimé hermétiquement par des parois souples explique les qualités mécaniques et physiques du liège.

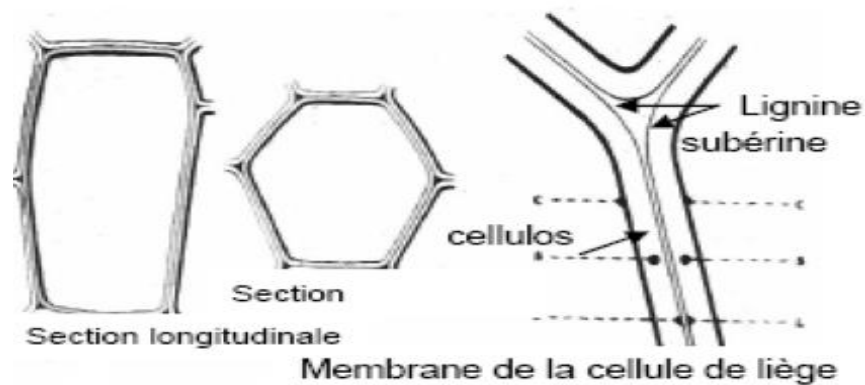


Fig. II.12. Formation du Liège

➤ Propriétés du liège

La composition et la structure du liège lui confèrent de nombreuses propriétés:

- Elasticité- Compressibilité– Souplesse. Il est comprimé rapidement dans sa limite élastique, et prend presque instantanément 85 % de son volume initial,
- Légèreté, sa faible densité est variable avec la qualité du liège. Elle est due à l'air contenu dans ses cellules,
- Adhérence, elle est permise par la force d'expansion d'une matière élastique et par la présence de micro ventouses (cellules coupées lors du cycle de fabrication) au contact des parois.
- Imperméabilité qui est due non seulement à la contre- pression exercée par le gaz des cellules, mais aussi à la présence dans les membranes du liège d'une forte proportion de substances grasses (subérine, cérine, ...). Le liège absorbe moins de 18 à 20 % d'eau si son volume augmente (au bouillage), résultant essentiellement de la dilatation des gaz contenus dans ces cellules.
- Durabilité. Du fait de sa faible perméabilité il résiste aux agents extérieurs.
- Mauvaise combustibilité car il lui faut beaucoup d'oxygène pour brûler. De plus il carbonise en surface et cette couche empêche la propagation du feu.

➤ Avantage

- souple
- absorbant

- bonne tenue à l'eau
- 100% naturel
- aucun liant donc aucun impact sanitaire identifié
- isolant thermique, il empêche la propagation du feu.
- abrasif, il sert à polir le cristal

➤ **Inconvénients**

- le coût
- matière première peu abondante les usages du liège résultent de ses nombreuses propriétés physiques et chimiques :
- de faible densité, il a une excellente flottabilité,
- compressible et élastique, il remplit sans faille le goulot des bouteilles,

III.2.2 Le bois

➤ **Les copeaux de bois**

Les copeaux de bois des plaquettes minces avec une masse volumique de 100kg/m



Fig. II .13 . Les copeaux de bois

➤ **Sciure de bois**

(Forme de poudre) désigne l'ensemble des résidus et des copeaux produits par le sciage de bois la masse volumique est égale 350kg/m³



Fig. II .14. Sciure de bois.

➤ **Granulats de bois**

Est un cylindre de sciure de bois compressée sans aucun agent de liaison avec un Diamètre entre 6 à 8 mm et un Longueur environ 3 cm et une masse volumique : $> 650 \text{ kg au m}^3$.



Fig. II.15 .Granulats de bois

➤ **Le bois déchiqueté ou plaquette forestière**

Est fabriqué grâce au déchiquetage ou au broyage des résidus de l'entretien et de l'exploitation des forêts, haies et espaces non forestiers. Un temps de séchage est nécessaire, séchage qui est généralement effectué pendant une durée de 6 mois à 1 an. - Taille : 3cm x 1 cm x 0,5 cm - Masse volumique : environ 250 kg / m^3



Fig. II.16. Le bois déchiqueté.

III.2.3 Le polystyrène

Le polystyrène est un matériau alvéolaire rigide, peu dense, dont les principales utilisations sont l'isolation thermique des bâtiments et l'emballage des produits industriels ou alimentaires.

➤ Composition chimique

Le polystyrène est un polymère thermoplastique linéaire à squelette aliphatique obtenu par polymérisation du motif homopolymère de styrène (figure II.17). Structurellement, c'est une longue chaîne d'hydrocarbures, avec un groupe phényle attaché sur certains atomes de carbone [18].

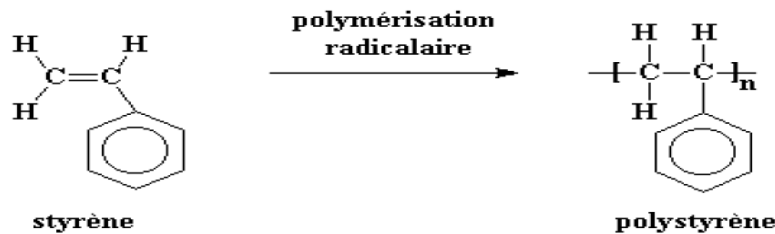


Fig. II.17. Structure chimique du polystyrène

Le produit de base servant à la fabrication du polystyrène expansé est obtenu sous forme de petites perles blanches, chimiquement très stable, et doué de propriétés thermoplastiques. Suivant les applications, on distingue trois types différents par leur granulométrie et leurs propriétés :

- Ceux destinés aux fabrications courantes, les perles sphériques reformant un « porogène » (ou agent gonflant) : le pentane,
- Ceux destinés à la fabrication de produit « difficilement inflammable » ou auto-extinguibles », cette propriété n'étant acquise qu'après un certain temps de stockage en raison de la teneur en pentane,
- Ceux destinés à la fabrication de produits expansés résistant aux essences et huiles minérales exemptes d'hydrocarbures aromatiques.

La structure du polystyrène expansé (PES) comporte des soudures interpelles, la taille des cellules se situe habituellement entre 60 et 200 μm (figure II.18)

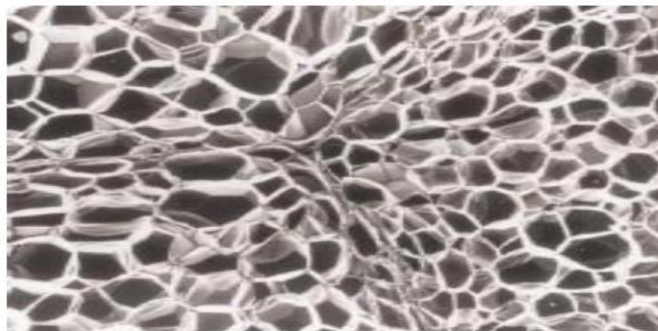


Fig. II.18. Structure alvéolaire du polystyrène

➤ Propriétés du polystyrène

Les propriétés remarquables du polystyrène sont notamment :

- Sa faible masse volumique située généralement, suivant les applications, entre 10 et 30 kg/m³.
- Son pouvoir isolant thermique.
- Ses excellentes propriétés mécaniques (résistance en compression, capacité d'amortissement des chocs).
- Son insensibilité de mise en forme (moulage, découpage, ...).

➤ Billes de polystyrène

Les billes de polystyrène sont obtenues par expansion de billes pleines. L'expansion est arrêtée lorsque la granulométrie souhaitée est atteinte. Elles sont parfaitement sphériques, La coupe d'une bille révèle une structure alvéolaire et une enveloppe constituée de deux membranes. Ceci explique d'une part son extrême légèreté et d'autre part sa totale imperméabilité à l'eau. En effet, des essais réalisés par Yamura et Yamauchi [20] ont montré que des billes de polystyrène immergées dans l'eau pendant un mois n'ont pas absorbé d'eau. Enfin, ces billes sont hydrophobes et présentent des charges électrostatiques en surface.

IV Les types de Béton légers

IV.1 Les bétons de granulats légers

➤ Béton de liège

Concernant la caractérisation mécanique du béton de liège, l'étude expérimentale sur le béton de liège, réalisée par Elbakkouri [21] porté sur l'évolution de la résistance mécanique de ce matériau en fonction de sa masse volumique et de la quantité de liège introduite au matériau initial. Les résultats présentés sur la figure II.19 montrent que la résistance à la compression de ce matériau est fortement influencée par l'incorporation du liège dans le béton.

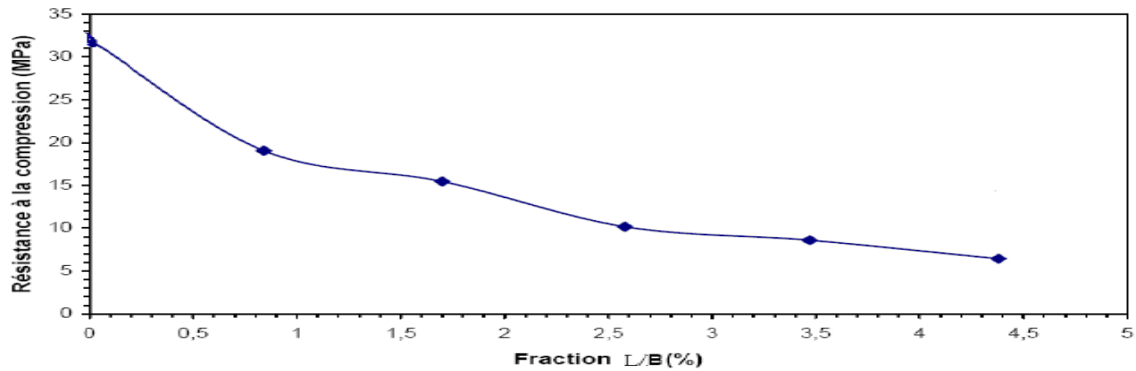


Fig. II.19. Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de la fraction L/B [21]

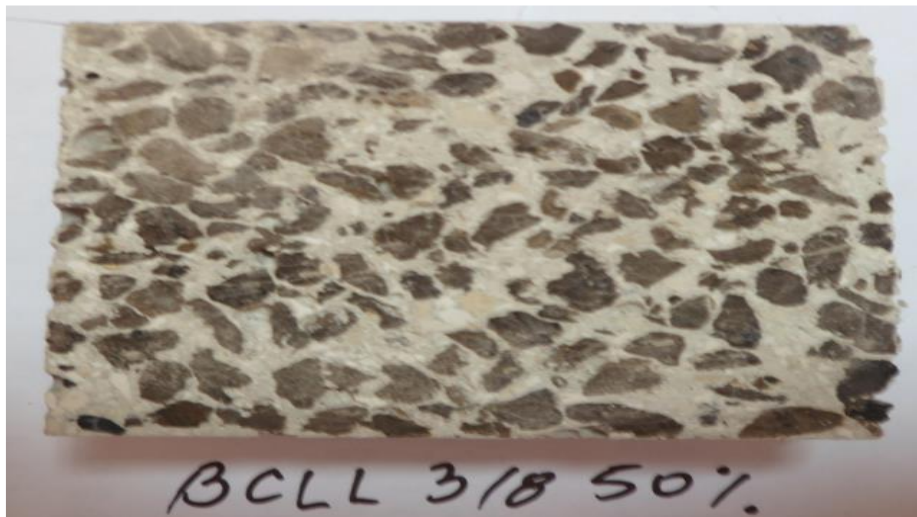


Fig. II.20. Béton de liège

➤ Béton de polystyrène

Bien qu'ils soient technologiquement très prometteurs, les bétons de polystyrène posent encore de nombreux problèmes au niveau de la compréhension de leurs propriétés mécaniques. [22] a travaillé sur le béton de fibre de polystyrène expansé de densité comprise entre 1.1 et 2.2. Ses résultats ont montré que la résistance à la compression de ce type de béton diminue sensiblement lorsqu'on augmente le taux de fibre. A titre d'exemple, un béton de densité 0.1 résiste à environ 1/10 du béton de densité 0.2 (figure II.21).

Chapitre II : Les Béton légers

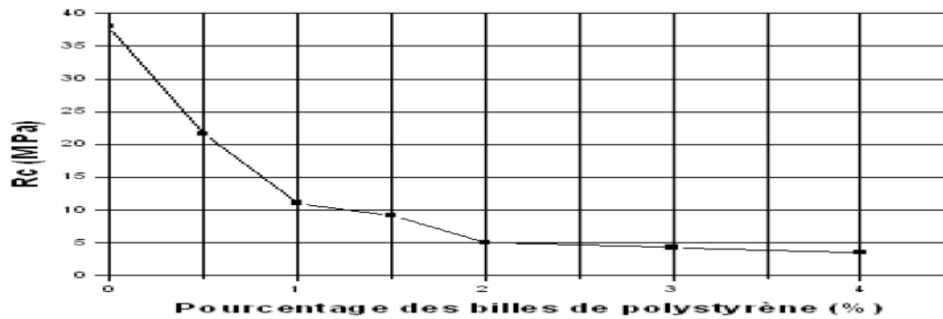


Fig. II.21. Evolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des billes de polystyrène [22]

Par ailleurs, un comportement aux sollicitations de compression et de flexion très différent est observé. En effet, lorsqu'un béton de densité 1.3 ne possède qu'une résistance à la compression de 1/10 de celle d'un béton de densité 2.2, il a une résistance à la flexion de 4/10 (figure II.22) c'est-à-dire quatre fois plus. On constate que l'ajout du polystyrène au béton a une influence sur la résistance à la flexion moindre que sur la résistance à la compression.

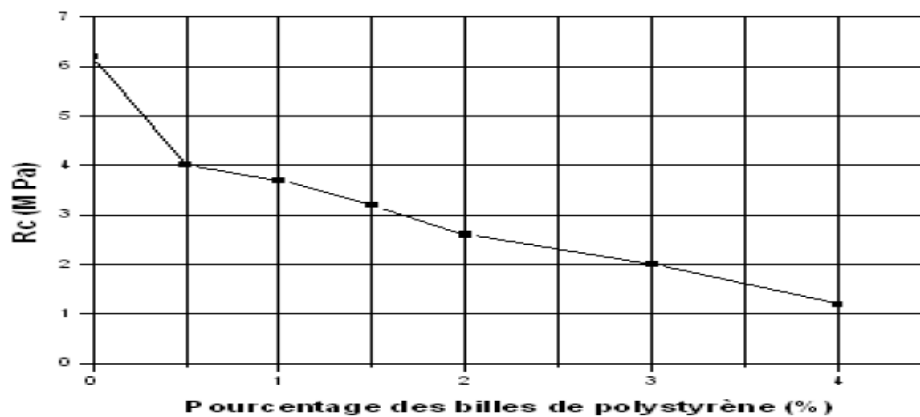


Fig. II.22. Evolution de la résistance en flexion en fonction du pourcentage des billes de polystyrène [22]

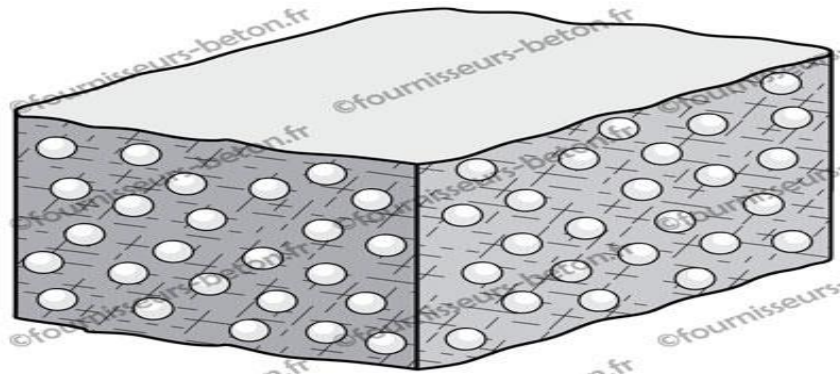


Fig. II.23. Béton de polystyrène

➤ Béton de bois

• Définition

Les bétons de bois sont des bétons végétaux, ce sont des composites généralement constitués d'une matrice (ciment ou chaux), de granulats naturels (sable et gravillons) ainsi que d'une charge végétale provenant d'une essence de bois et couramment appelée inclusion végétale. Il existe une multitude d'inclusions végétales pouvant servir à la fabrication de composites cimentaires à base végétale. Ces inclusions végétales sont retrouvées sous différentes dimensions (tailles) et formes. Dans la littérature les copeaux de bois provenant de noix de coco, de sisal, d'eucalyptus, balles de riz, mauve, chanvre, sous-produit bois, bagasse et de lin sont souvent employées sous forme de fibres courtes ou longues pour la confection de composites cimentaires. Les inclusions végétales sont également retrouvées sous forme de cendre, des copeaux et de sciure.

• Domaine d'utilisation des déchets de bois dans le béton

❖ Béton léger à base de fibres de bois (déchets industriels)

Cette étude a été réalisée par [23]. L'objet de leur étude est le béton léger à base de granulats de fibres de bois non traitées, ces fibres représentent des granulats à faible densité. Ces fibres proviennent des déchets industriels, l'incorporation des fibres de bois dans le béton leur a permis de créer un matériau composite Béton de Bois Léger (BBL) qui a de nombreuses propriétés de légèreté, d'isolation thermique et d'absorption acoustique. L'amélioration des caractéristiques des matériaux et le recyclage ce sont deux combinaisons qui représentent un défi pour les nations industrielles, c'est pour cette raison que les auteurs ont procédé à la confection d'un béton de bois léger (BBL) avec une résistance considérable à la compression.

IV.1.1 Les caractéristiques et les propriétés des bétons de granulats légers

➤ Résistances

La résistance des bétons de granulats légers en compression est inférieure à celle des bétons classiques réalisés avec des granulats denses. Cette résistance décroît proportionnellement avec la densité du béton. Cependant, avec de bons granulats et du sable naturel ainsi qu'une augmentation du dosage du ciment, des résistances de même catégorie que ceux des bétons peuvent être atteints. La résistance en traction est également plus faible. [5]

➤ Ouvrabilité

L'ouvrabilité est également difficile, toujours à cause des granulats qui absorbent l'eau. Pour y remédier, on peut avoir recours à certains adjuvants comme les entraîneurs d'air ou les plastifiants. [5]

➤ Fluage

Lorsque l'on applique une charge permanente à une structure en béton elle subit :

- une déformation instantanée au moment du chargement
- une déformation différée (qui se prolonge au cours du temps).

➤ Retrait

Leur retrait est plus important mais est également plus tardif du fait de la déshydratation des mortiers qui est retardée par les granulats absorbant l'eau. [5]

➤ Conductivité thermique

C'est l'atout majeur des bétons de granulats légers. En effet, par la présence des bulles d'air intercalées dans l'épaisseur du béton, le béton de granulats légers est un excellent isolant thermique mais également un bon isolant acoustique [5]

➤ Module élastique

Pour un rapport E/L équivalent, le module élastique d'un béton léger est inférieur à celui d'un béton normal. La cause principale réside dans le module élastique des granulats légers (10 à 20 GPA) qui est très inférieur à celui des granulats de masse volumique usuelle (granite, 10 à 70 GPA, calcaire, 10 à 55 GPA). La figure II.24 présente quelques résultats de précédentes

études sur des bétons légers. On constate notamment que le module élastique semble proportionnel à la masse volumique.

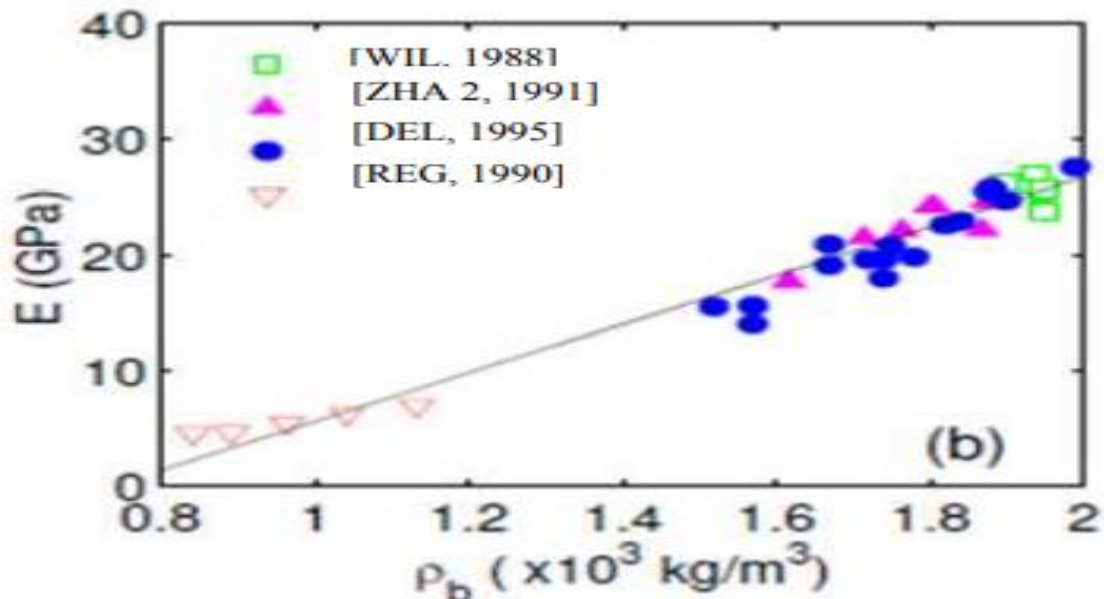


Fig. II. 24. Résultats de modules élastiques de bétons légers à 28 j d'après plusieurs auteurs [24]

IV.1.2 Utilisations des bétons de granulats légers

Du fait de leur faible résistance en compression, ils sont généralement utilisés pour la fabrication des agglomérés, des bétons isolants (toiture, planché, etc.), des bétons banchés non porteurs ou des bétons dont les charges ne sont pas considérables.

Néanmoins, la principale utilisation de ce type de béton est sans conteste la Préfabrication dans la mesure où il offre un gain conséquent en termes de Poids.

Pour des bétons de vermiculite qui ont de meilleures résistances, la construction des poteaux, des poutres et des dalles mais également de tous les ouvrages où le béton est essentiel peut être envisagée.

IV.2 Béton cellulaire

IV.2.1 Définition Béton cellulaire

Le béton cellulaire est un matériau de construction qui a été inventé en 1880. Avec l'expansion des mortiers, cependant, E. Hoffman inventa un deuxième béton cellulaire en 1889.

Chapitre II : Les Béton légers

Toutefois, il a fallu attendre 1924 pour que la première production en masse ainsi que la commercialisation se fassent et ce, par le suédois Axel Eriksson. Depuis, on compte une moyenne de 500 000 maisons individuelles fabriquées en béton cellulaire chaque année en Europe.

IV.2.2 Composition du béton cellulaire

Comme mentionné plus haut, le béton cellulaire est fabriqué exclusivement avec des matières premières exclusivement naturelles à savoir : du sable, de la chaux, du ciment et de la poudre d'aluminium qui sert à lever la pâte. C'est grâce à ce système, justement, que les cellules d'air se forment, faisant alors du béton cellulaire un matériau de construction bien isolant.

Pour info, voici les taux des composants utilisés dans la fabrication du béton cellulaire :

65% de sable de quartz siliceux, 20% de ciment, 15% de chaux, 0,05% de pâte ou de poudre d'aluminium, 1% de gypse et de l'eau. Avec ces proportions on obtient alors 5m³ de produit fini avec 1m³ de matière première. Sur le marché, le béton cellulaire est présenté sous forme de blocs ou de panneaux. C'est pour cette raison qu'on s'en sert pour la construction à la fois d'un mur porteur et d'un isolant. Il est aussi employé pour la construction de cloison ou de plancher.

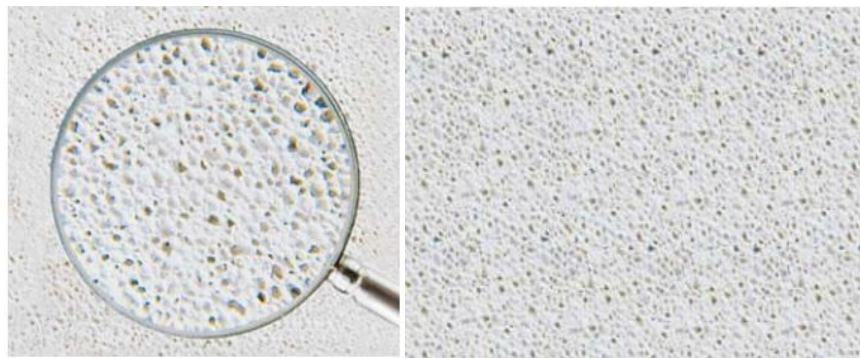


Fig. II.25. Béton cellulaire

IV.2.3 Fabrication du béton cellulaire

Le béton cellulaire est fabriqué en plusieurs étapes à commencer par le malaxage des matières premières. Mais avant, il faut d'abord commencer par préparer et bien doser sable, chaux, ciment et autre composant du béton cellulaire. Par la suite, il faut préparer les moules pour permettre la coulée du mélange obtenu précédemment. Puis, la pâte est coulée et un temps de pause sera observé pour permettre la levée (grâce à la poudre d'aluminium).

Ensuite, les produits seront découpés et profilés. Un passage en autoclave, pour avoir un état naturel et pour créer un minéral ayant une structure moléculaire similaire à la tobermorite est nécessaire. Pour ce faire, les produits seront soumis à une pression à 10 bars et à une température de 180° C, pendant 10 à 12 heures. Il ne reste plus par la suite qu'à faire une palettisation ainsi qu'un housage en plastique.

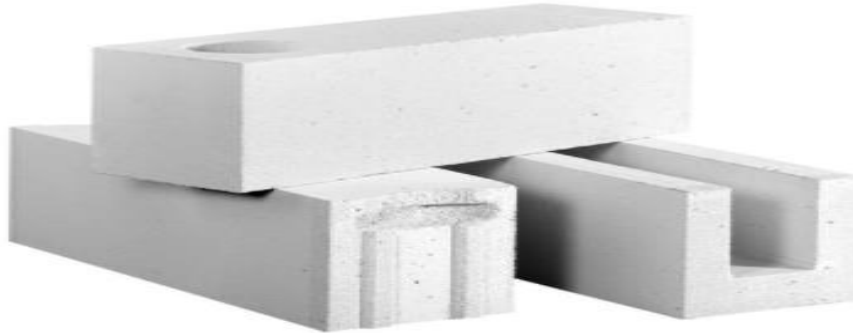


Fig. II.26. Blocs de béton cellulaire

IV.2.4 Les avantages du béton cellulaire

- Le béton cellulaire est avant tout un matériau de construction léger. Cela est pratique autant pendant le processus de fabrication que pour le transport et la mise en 'œuvre. En effet, le béton cellulaire procure une manipulation facile.
- La pose du béton cellulaire est aussi facile et rapide. Ainsi il est possible de travailler 3m² par heure pour un mur de 20 cm d'épaisseur en procédant à un assemblage à base de mortier-colle.
- Le béton cellulaire n'attire pas les rongeurs et les insectes.
- Le béton cellulaire est par ailleurs un matériau de construction incombustible.

IV.2.5 Les inconvénients du béton cellulaire

- Le béton cellulaire est plus exposé aux fissures. Ce qui le désavantage par rapport aux parpaings et aux briques qui peuvent être également utilisés pour construire des murs extérieurs d'une maison.

Chapitre II : Les Béton légers

- Le béton cellulaire est aussi très friable. De ce fait, il nécessite l'emploi de cheville de fixation ainsi que de scellement renforcé. En plus, les systèmes de fixation doivent être uniquement des produits spécial béton cellulaire.

IV.2.6 Recyclage de béton cellulaire

En cours de fabrication, les chutes liées au découpage des produits aux dimensions voulues, sont intégralement réintégrées au circuit. Après l'autoclavage, quelques surplus, limités à quelques pourcentages, sont broyés et récupérés pour d'autres usages. La poudre d'aluminium, utilisée en très faible quantité (0,05%), est elle-même un produit de recyclage. Sur les chantiers des surplus de produits en béton cellulaire peuvent être récupérés dans des Big Bags spéciaux. Les sacs énormes pleins peuvent être ramenés à l'usine du béton cellulaire par l'intermédiaire d'un négociant. Le fabricant réintègre les morceaux récupérés dans le processus de fabrication pour en refaire des produits neufs.



Fig. II.27. Recyclage de béton cellulaire

IV.3 Le béton caverneux

IV.3.1 Définition béton caverneux

Le béton caverneux est un béton formulé pour obtenir une forte porosité afin de permettre l'absorption et le drainage de l'eau. Il est hautement perméable puisqu'il possède jusqu'à 35 % de

Chapitre II : Les Béton légers

porosité. Il permet à l'eau de s'écouler directement dans le sol contrairement aux chaussées traditionnelles comme l'asphalte, le béton régulier et les pavés.

Il est donc très intéressant dans le domaine de la gestion des eaux pluviales et en terme de préoccupation environnementale. [5]



Fig. II.28. Béton caverneux

IV.3.2 Utilisation du béton caverneux

Grâce à sa très haute perméabilité et à sa capacité de drainage, le béton caverneux absorbe les eaux de pluie et facilite leur écoulement naturel dans le sol. Il est alors particulièrement destiné à des usages en milieu urbain et est adapté pour des chaussées à trafic léger (pistes cyclables, parkings, allées et trottoirs) et des terrains de sport et il peut aussi être utilisé en sous-couche. Il est aussi idéal pour les piscines car le béton caverneux ne dispose pas d'une surface glissante même sous l'action de l'humidité. De plus, il ne chauffe pas car il est ventilé, il ne peut pas y avoir de flaque et il ne colle pas aux pieds. Des fois, il est même utilisé comme béton de remplissage ou pour s'opposer aux remontées capillaires.

Chez vous, le béton caverneux peut être aménagé sur les allées de votre jardin, le contour de la maison ainsi que les terrasses. [5]



Béton caverneux utilisé pour une allée de jardin

Béton caverneux utilisé en milieu urbain

Fig. II.29. Utilisation du béton caverneux

IV.3.3 Composition du béton caverneux

Comme tout autre béton, le béton caverneux est fabriqué à base de ciment, de granulats et de fibres polypropylènes spécialement conçues. On y ajoute un adjuvant, de l'eau et éventuellement un colorant avec du vernis protecteur pour la finition. [5]

IV.3.4 Les avantages du béton caverneux

- Le béton caverneux réduit l'impact des installations urbaines sur le cycle de l'eau. Comme il est perméable, l'eau peut s'infiltrer dans le sol et non se diriger dans les caniveaux et les égouts.
- Il évite ainsi la saturation du réseau de traitement des eaux pluviales, réduisant les risques d'inondation.
- Le béton caverneux est hautement résistant. Il est prévu pour durer plusieurs dizaines d'années, contrairement à L'enrobé qui est prévu pour durer seulement une dizaine d'années.
- Il est antidérapant, vous empêchant de glisser par temps humide.
- Il ne chauffe pas : sa température baisse grâce à sa ventilation naturelle.
- Sa granulométrie fine permet un certain confort lorsque vous êtes pieds nus (autour des piscines). Il ne suinte pas et ne colle pas aux pieds ou aux pneus de voiture.
- Il est sans odeur

IV.3.5 Les inconvénients du béton caverneux

- Le phénomène de colmatage.
- Un risque de pollution accidentelle de la nappe.
- La nécessité d'un nettoyage quotidien, surtout le désherbage.

Conclusion

L'utilisation de granulats légers pour fabriquer des bétons à masse volumique réduite a donc déjà été largement étudiée et exploitée dans plusieurs régions du monde. L'avantage inhérent au béton léger réside dans la réduction de la masse des structures fabriquées. Cet avantage est d'autant plus marqué si ce sont les gros granulats qui sont remplacés. Cependant, si l'on veut favoriser l'action d'une cure interne, l'utilisation de sable léger permet de toucher une plus grande quantité de pâte. De nombreuses études ont en effet montré que l'utilisation de granulats légers pouvait réduire le retrait endogène, diminuant ainsi le risque de fissuration. Au niveau de la durabilité, avec une cure appropriée à la nature des granulats et à leur teneur en eau, les bétons légers ne montrent pas une résistance plus faible que les bétons ordinaires.

Au contraire, dans certains cas, les résistances au gel-dégel et aux sels fondants sont améliorées.

Chapitre II : Les Béton légers

I	Introduction	30
II	Definition des bétons légers	30
III	Les granulats légers	31
III.1	Les granulats légers naturels	31
III.1.1	Frittage	34
III.1.2	Composition	Error! Bookmark not defined.
III.1.3	Le choix des granulats	34
III.2	Les granulats légers de matériaux artificiels	35
III.2.1	Le liège	35
III.2.2	Le bois	38
III.2.3	Le polystyrène	39
IV	Les types de Béton légers	41
IV.1	Les bétons de granulats légers	41
IV.1.1	Les caractéristiques et les propriétés des bétons de granulats légers	45
IV.1.2	Utilisations des bétons de granulats légers	46
IV.2	Béton cellulaire	46
IV.2.1	Définition Béton cellulaire	46
IV.2.2	Composition du béton cellulaire	47
IV.2.3	Fabrication du béton cellulaire	47
IV.2.4	Les avantages du béton cellulaire	48
IV.2.5	Les inconvénients du béton cellulaire	48
IV.2.6	Recyclage de béton cellulaire	49
IV.3	Le béton caverneux	49
IV.3.1	Définition béton caverneux	49
IV.3.2	Utilisation du béton caverneux	50
IV.3.3	Composition du béton caverneux	51
IV.3.4	Les avantages du béton caverneux	51
IV.3.5	Les inconvénients du béton caverneux	52

I. Introduction

L'objectif de rendre le béton plus résistant en flexion et en traction suscite encore l'attention de nombreuses recherches. Une des voies explorées dans les années 1980/90 a été de travailler sur l'accroissement de la résistance à la compression du béton. [25] La piste la plus évoquée dans la littérature pour pallier cette faiblesse de comportement en traction consiste en l'ajout de fibres métalliques dans la formulation du béton. Ces dernières jouent un rôle de renforcement qui compense la fragilité du béton par couture de la microfissuration et la macro fissuration. Les fibres ont la capacité ainsi de contrôler l'ouverture des fissures, jouant le rôle d'absorbants d'énergie [26]. Elles ont de plus, la capacité de transférer les charges, par leur résistance en traction, dès lors qu'une bonne adhérence fibre/matrice est assurée. Pour autant, l'efficacité de la fibre passe par une maîtrise de son orientation. La connaissance précise de l'orientation des fibres serait un facteur qui assurerait le bon dimensionnement des structures, permettant ainsi l'optimisation de la quantité de fibre à prévoir dans la formulation. Sur ce point, le dimensionnement des bétons renforcés de fibres se fonde sur l'hypothèse d'une répartition des fibres aléatoire en orientation et homogène dans la masse [26].

II. Définition du béton de fibres

Un béton de fibres est un matériau composite constitué d'une matrice - le béton - et d'un renfort - la fibre -. Dans un béton fibré, les fibres n'ont d'autre rôle que de reprendre des efforts au travers des fissures créées dans la matrice. En d'autres termes, les fibres ne sont utiles que s'il y a des fissures potentielles dans le matériau. Pas de fissures, pas de fibres ! [27].

L'une des caractéristiques mécaniques primordiales de la fibre qui permet la maîtrise de la fissuration est le module de Young, qui caractérise la rigidité de la fibre, en effet plus le module de Young de la fibre est important, le contrôle des fissures est meilleur et la longueur de fissures diminue, à condition que le bon ancrage des fibres dans le béton est assuré. Pour la fabrication d'un béton fibré, plusieurs natures de fibres peuvent être utilisées : métalliques, organiques et céramiques. En fonction de leur nature, ces fibres ont des caractéristiques différentes et ne

réagissent pas de la même façon et les caractéristiques du béton varient ainsi selon le choix des fibres à adopter.

III. Historique du béton de fibres

Des analyses profondes de ce concept indiquent que cette idée est très ancienne et date depuis l'Antiquité. En effet les pharaons (les Egyptiens anciens) ont pensé à l'idée des pailles pour renforcer la brique de boue d'après le chercheur Exode comme il est le cas Finlandais utilisant pour la 1^{re} fois, les fibres d'amiante dans le renforcement des poteries en argile, il y'a de cela 5000 années. D'autres chercheurs [27,29] ont indiqué que l'usage de cette technique par le biais de pailles afin de renforcer les briques, tandis que les poils des animaux et les fibres pour renforcer le plâtre et la pâte de ciment.

[28,29] et d'autres chercheurs, ont rapporté que la paille a été rajoutée dans des matériaux de construction tels que le mortier, le plâtre...etc.

Ensuite plusieurs chercheurs ont fait des études à la base des hypothèses sur l'idée de l'incorporation des fibres dans le béton pour le but de développement des théories réglementaires à la base des essais pratiques. [28,29]

À partir des années 1970, il s'est produit une sorte de réveil dans le domaine de la technique des bétons renforcés de fibres d'acier. La confiance acquise dans certaines propriétés spécifiques de béton renforcée de fibres d'acier augmente de façon permanente par l'utilisation de ces bétons dans des applications industrielles.

Le premier article dans ce concept peut être attribué à LANKARD et SHEETS. [28,29]. Ils ont confirmé que l'ajout de 1% à 2% de fibres au béton réfractaires donne une amélioration significative à sa résistance.

IV. Les fibres

Les fibres sont définies comme des éléments discontinus, de nature variable, des formes sensiblement cylindriques, d'un diamètre et longueur variable. Elles sont réparties dans la matrice soit d'une façon aléatoire ou orientation préférentielle. Il existe un grand nombre de fibres qui se

différencient par leur origine (naturelles, artificielles et synthétiques), leur forme (droite, ondulée, bi-ondulée, lisse, crantée, aiguille, à crochet, mince des cônes aux extrémités ...etc.), leur dimension (macro ou micro - fibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques. Cependant, pour faire un choix de fibres à utiliser pour des applications, il est nécessaire de tenir compte de la compatibilité de la fibre avec la matrice, et la mode de performance du composite.

V. Type des fibres

Les principaux types des fibres connues sont :

V.1 Les fibres artificielles

Cette famille de fibre regroupe les fibres d'acier, les fibres de fonte, les fibres de verres, les fibres de carbone, amiante ...etc. Ces fibres sont utilisées dans le domaine industriel et particulièrement dans le domaine de génie civil.

V.1.1 Fibre de verre

Les fibres de verre sont obtenues par fabrication à partir de verre fondu qui passe dans une filière, chauffé par effet de joule. Elles présentent de bonnes caractéristiques mécaniques, elles sont disponibles dans le commerce sous forme de bobines.

Les fibres « E » sont sensibles aux alcalis libères par l'hydratation du ciment. L'emploi de ce type dans le béton nécessite l'incorporation de polymères ou autres ajouts au mélange, au moment du gâchage qui ont pour fonction d'embrober la fibre et de la protéger de l'attaque alcaline.

Les fibres AR (alcali-résistantes) sont obtenues avec un verre riche en zirconium moins sensible aux alcalis.

Les principales propriétés des fibres

- Bonne résistance à l'humidité et à la corrosion.
- Faible conductivité thermique.
- Bonne adhérence avec la matrice.

V.1.2 Fibres métalliques

Leur résistance à la traction doit être supérieure à 1000 MPA selon **la norme NF EN ISO 16120 2 et [30]**. La longueur de la fibre doit être trois fois plus grande que le diamètre du plus gros

granulat. La géométrie de la fibre doit favoriser son ancrage dans la matrice béton (ex : un façonnage symétrique en forme de baïonnette appelée "crochet" optimise l'ancrage de la fibre dans la matrice béton).

Ce type de fibre est le plus utilisés dans le domaine de génie civil et qui ont fait l'objet de plusieurs recherches. [32]

Les fibres métalliques sont de types et de formes variées et présentent une très bonne compatibilité avec le béton. La figure III.1 présente différentes géométries de fibres métalliques. Les fibres sont composées d'acier au carbone, d'acier inoxydable ou d'acier galvanisé contre la corrosion. En général, la longueur des fibres varie de 25 à 60 mm et le diamètre varie de 0,5 à 1,3 mm La fabrication des fibres métalliques s'effectue selon plusieurs méthodes en relation avec leurs formes géométriques multiples. Ces fibres travaillent en tension dans le béton en étant sollicitées soit par frottement soit par ancrage ou les deux.

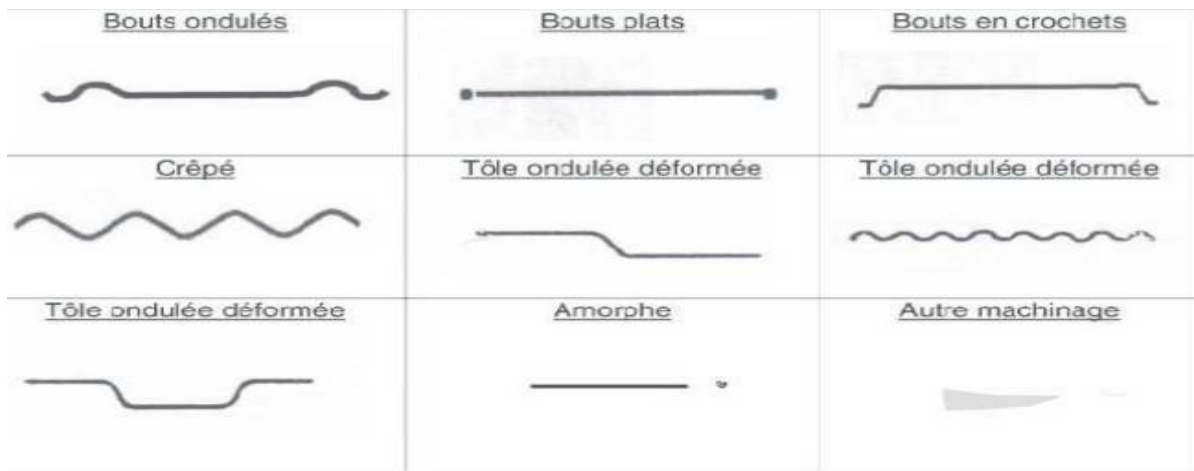


Fig. III.1 .Formes des fibres métalliques.

V.1.3 Fibres de polypropylène

Les fibres de polypropylène sont fabriquées depuis 1954 par l'industrie textile. Le polypropylène est un polymère cristallisable de la famille des polyoléfinés des produits chimiques. Il a connu une extension croissante dans ce domaine où il apporte les avantages suivants : déformabilité élevée, imputrescibilité et bonne résistance en traction qui peut atteindre 800 MPA. Ces fibres sont utilisées dans les bâtiments pour l'élaboration de revêtement de façades dans plusieurs constructions (Londonderry House Hôtel), ainsi que l'élaboration de panneaux décoratifs de 33cm d'épaisseur et

aussi dans la réalisation des canalisations et des pieux. Les fibres de polypropylène sont en général assez longues (30 à 60 mm), légères et ne sont pas attaquées par le ciment. Leur module d'élasticité plus faible que la pâte durcie Il convient de les utiliser de préférence pour les pièces minces devant résister, soit à l'action corrosive de certaines ambiances dans lesquelles l'acier pourrait se corroder rapidement, soit aux chocs mécaniques.

Si leurs caractéristiques mécaniques ont des valeurs plus faibles que celles des fibres métalliques, il faut cependant mentionner leur insensibilité chimique, leur souplesse, qui rend aisée leur incorporation au béton et leur allongement à la rupture (15 à 20 %), qui favorise la « ductilité » du béton.

Comme la plupart des matières plastiques, les fibres de polypropylène sont peu résistantes au feu leur température de fusion est d'environ 160 C mais leur fusion n'affecte pas la résistance du béton



Fig. III.2. Fibres polypropylène.

V.2 Fibres naturelles

Les fibres naturelles sont utilisées depuis 3000 ans dans les composites, par exemple dans L'ancienne Égypte, où la paille et d'argile étaient mélangées pour construire des murs. Au cours de la Dernière décennie, les composites renforcés de fibres naturelles ont reçu une attention croissante, tant auprès du monde universitaire que de diverses industries. Il existe une grande variété de fibres

naturelles qui peuvent être utilisées pour le renforcement ou comme charges Les principales catégories de fibres agricoles sont :

V.2.1 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 [32].

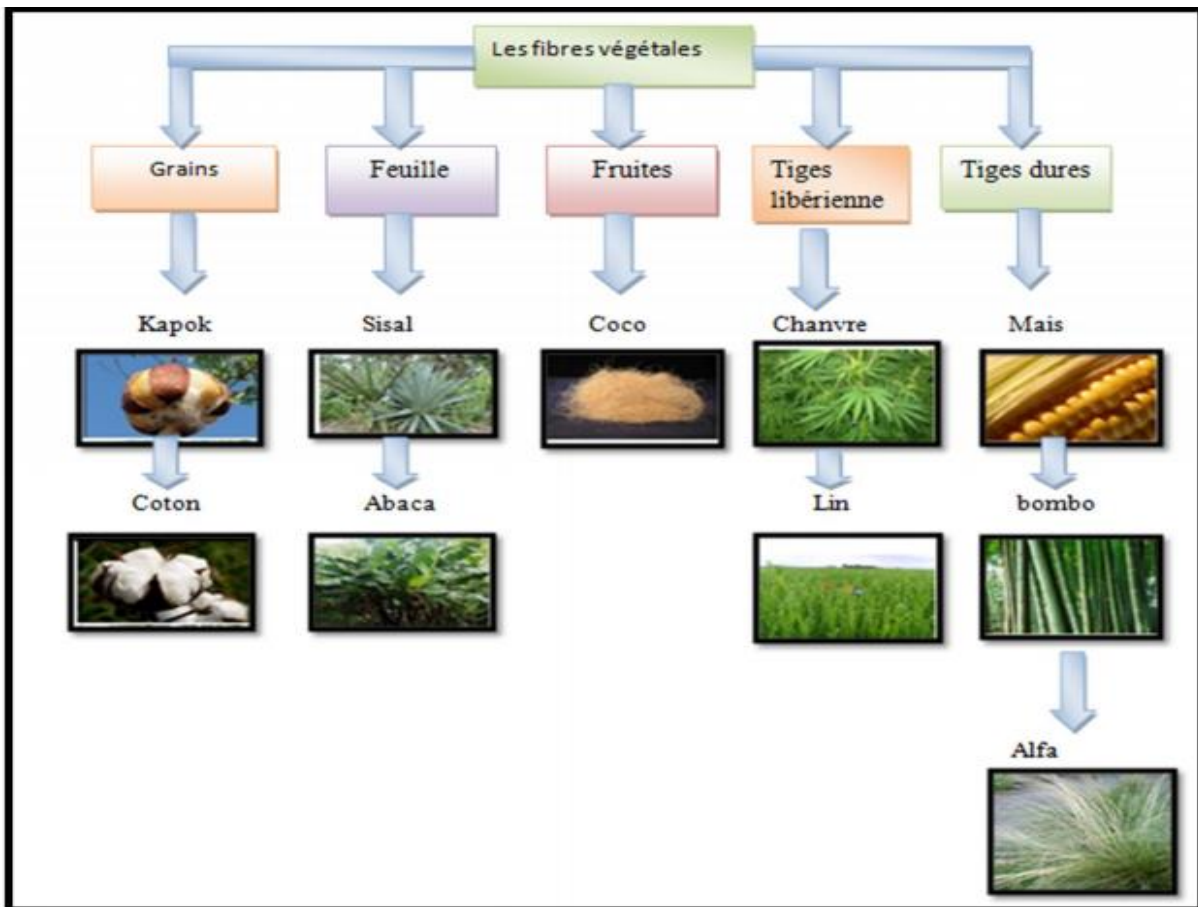


Fig. III.3. Classification des fibres végétales selon l'origine [32]

Les avantages et inconvénients des fibres végétales [33]

➤ **Avantage**

- Faible cout
- Biodégradabilité

- Neutre pour l'émission de CO₂
- Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres
- Pas de résidus après incinération
- Ressource renouvelable
- Ressource renouvelable
- Demande peu d'énergie pour être produite
- Propriétés mécaniques spécifique importantes (résistance et rigidité)
- Propriétés mécaniques spécifique importantes (résistance et rigidité)
- **Inconvénients**
- Absorption d'eau
- Faible stabilité dimensionnelle
- Mauvaise tenue en vieillissement
- Mauvaise tenue en vieillissement
- Faible tenue thermique (200 à 230 °C max)
- Fibres anisotropes
- Variation de qualité en fonction du lieu de croissance de la météo...
- Pour des applications industrielles, demande de la gestion d'un stock
- Renfort discontinu

V.2.2 Fibres minérales

Elles regroupent plusieurs sortes de fibres (amiante, alumine ... etc.), et sont utilisées en grande quantité dans plusieurs applications traditionnelles, les fibres d'amiante autrefois utilisée pour l'isolation, se sont aujourd'hui révélées cancérigènes [34].



Fibres polypropylènes



Fibres métalliques



Fibres des palmiers

Fig. III.4. Quelque type des fibres

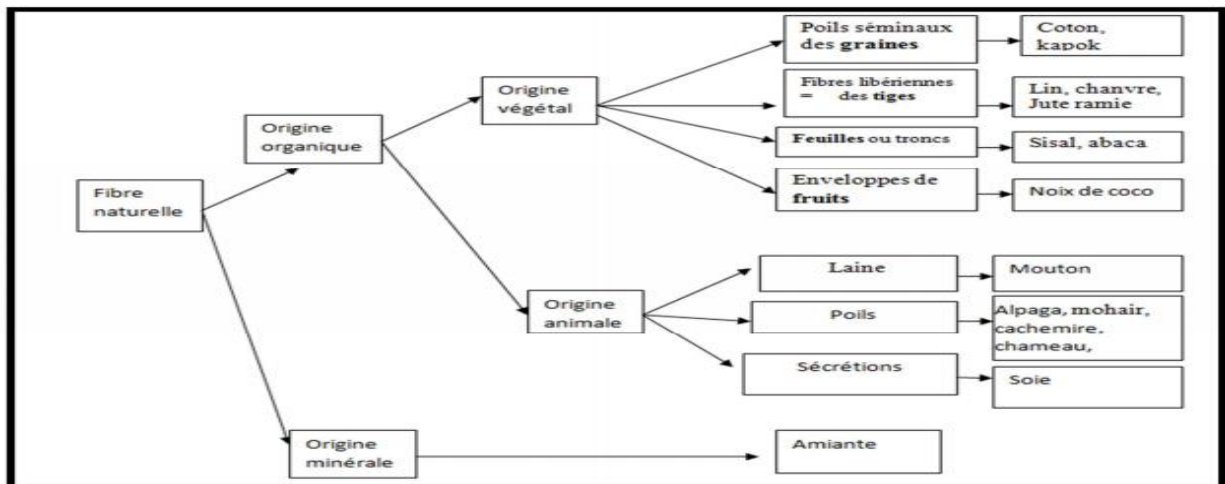


Fig. III.5. Organigramme des différents types de fibres naturelles [35]

VI. Domaine d'application de béton fibre

Les Différentes applications de béton de fibre sont présentées dans le Tableau (III.1)

Tableau III.1. Domaine d'application de béton fibré. [36]

Domain d'application	Intérêt de l'ajout des fibres dans le béton.
Canalisations et coques minces faiblement sollicitées	Amélioration de la tenue des pièces aux jeunes âges - Modification des variations dimensionnelles, lutte contre la fissuration
Dallages, chaussées en béton, dallages manufacturés, et 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
Éléments structuraux soumis à la compression (poteaux, pieux, fondations ...)	Amélioration de la charge ultime - Pas de rupture fragile
Structures soumises à des sollicitations dynamiques (piste d'aéroport)	- Énergie absorbée plus importante - Augmentation de la résistance aux chocs - Loi de comportement du matériau fortement améliorée
Réparation des revêtements routiers, tabliers de ponts	Amélioration de la résistance aux chocs - Amélioration de la déformabilité et de la durabilité
Parties exposées aux fortes variations de température et même aux très hautes températures	Remplacement avec succès de revêtement réfractaire - Diminution du coût de réparation des éléments réfractaires
Stabilisation des parois rocheuses, les talus, tunnels, et galeries Souter rains	Suppressions du travail de fixation du grillage ordinairement employé - Diminution du coût de réparation et/ou de stabilisation des parois rocheuses et des talus
Fabrication de pieux, revêtements ignifuges isolants, panneaux de revêtement de façade	- Augmentation de la résistance aux chocs - Augmentation de la résistance à l'usure - Augmentation de la durabilité de revêtement

VII. Applications du béton de fibre

Le béton fibré peut être appliqué de différentes façons :

- Préfabriqué : voussoirs, poutres.
- projeté : renforcement de murs, construction.
- coulé sur place : fondations, planchers, dalles.
- utilisé comme du mortier : enduit, scellement.

VIII. Avantages du béton de fibre

Selon la nature des fibres employées dans le mélange du béton, elles permettent d'offrir un béton avec des qualités très intéressantes pour le domaine du bâtiment. De façon générale, l'action des fibres se traduit ainsi :

- Facilité de mise en œuvre
- Obtention d'un béton plus léger que le béton ordinaire
- Obtention d'un béton plus durable
- Remplacement total ou partiel des armatures traditionnelles passives (pour le cas des fibres métalliques)
- Diminution du risque de fissuration
- Résistance au feu, à l'abrasion, aux chocs, à la traction et à la flexion

VIII.1 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 post fissuration• (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.

VIII.2 Aspect économique

Les principaux avantages économiques des bétons fibrés sont :

- Une optimisation du dimensionnement.
- diminution du coût de mise en place et du temps de construction.

IX. Rôle des fibres

Au début, les chercheurs ont essayé, par l'addition de fibres, d'augmenter les caractéristiques mécaniques du béton comme la résistance à la compression et la résistance à la flexion, mais le résultat obtenu était limité, il a été constaté que le rôle principal des fibres dans un matériau cimentaire peut-être apprécié sous deux volets : -Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures, comme schématiquement illustré par la (Figure III.6.a). -La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes (Figure III.6.b) [34].

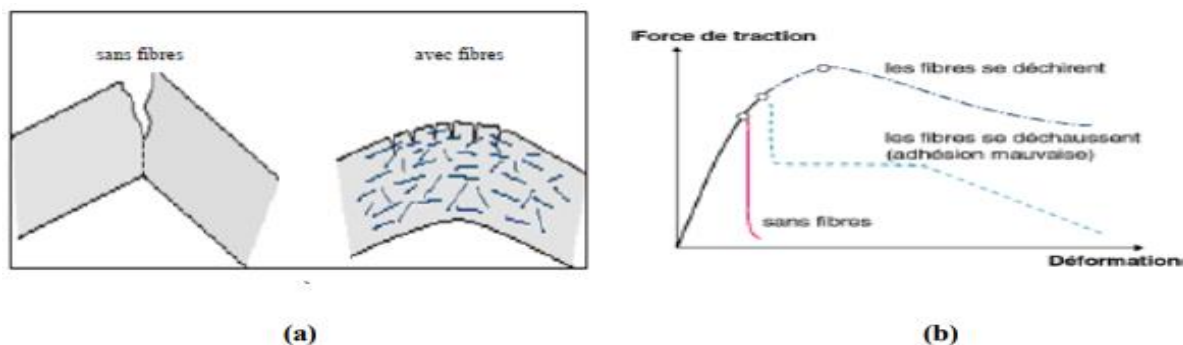


Fig. III.6. Illustration de l'apport du renfort par des fibres [34].

Les fibres ont généralement pour rôle de renforcer la structure en s'opposant au développement des fissures et à leur propagation, selon le type, le dosage et les éléments en béton dans lesquels elles sont insérées, les fibres permettent :

- l'amélioration de la cohésion du béton frais.
- par exemple, les fibres rigides changent la structure du squelette granulaire.
- l'augmentation de la ductilité et le comportement post-fissuration.
- la réduction de la microfissuration due aux variations dimensionnelles notamment au jeune âge.
- la réduction de la fissuration d'origine mécanique (chargement extérieur).
- l'augmentation de la résistance à la traction par flexion.
- l'amélioration de la tenue au feu et de la résistance aux chocs, à la fatigue, à l'usure, et à l'abrasion [34].

Le principe de couturassions des fissures et limitation de leurs ouvertures est comme montré en (Figure III.7), les fibres qui traversent la fissure offrent une résistance résiduelle (résistance au-delà de la fissuration), ces fibres se déforment aux extrémités ancrées qui se redressent graduellement avec l'augmentation du chargement au-delà de la charge de fissuration. [37].

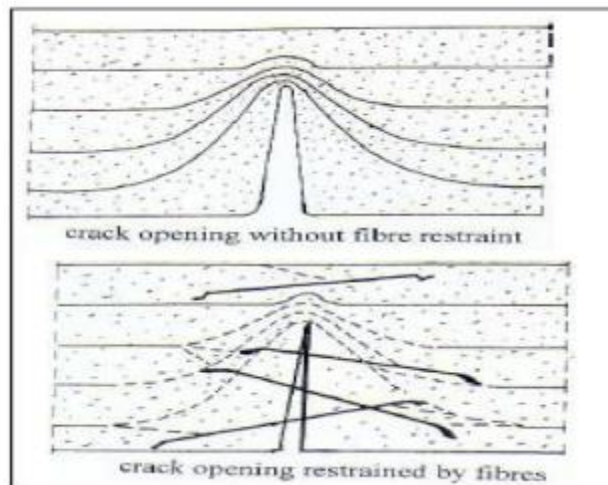


Fig. III.7. Principe de couturassions d'une fissure [37].

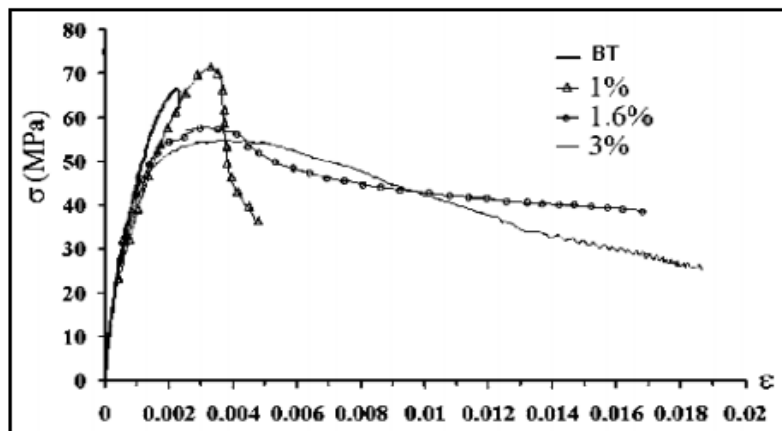
X. Influence les propriétés et des caractéristiques physico-mécaniques des fibres sur les bétons légers

On se propose d'analyser le comportement mécanique des bétons de fibres tel qu'il est rapporté dans la littérature, à la lumière des mécanismes physiques décrits ci-dessus.

Au préalable, il convient de définir ce qu'on entend par un béton témoin lorsqu'on cherche à le comparer à un béton de fibres [37], la démarche généralement adoptée consiste à fabriquer un béton et à le comparer au même béton auquel on a mélangé des fibres, on conçoit donc qu'on ne compare pas, en termes de maniabilité, ni de résistance, des bétons identiques. [38] propose donc de comparer des bétons optimisés en termes de maniabilité (donc de compacité) : on formule, d'une part, un béton témoin et, d'autre part, un béton de fibres, tous deux par la méthode Baron - Lesage en gardant la même valeur du rapport E/C et les mêmes constituants de la matrice (en nature mais pas en quantité), et on compare des bétons ayant la même maniabilité [38].

X.1 Résistance à la compression

Des nombreuses études et recherches montrent que le comportement à la compression des bétons des fibres métallique (BFM) a légèrement changé par rapport au béton témoin. La résistance à la compression des BFM par rapport au béton témoin (BT) varie selon le pourcentage des fibres. Tous les chercheurs ont montré la présence d'une ductilité.



FigIII.8. Courbe d'évolution de la contrainte à la compression en fonction de la Déformation avec différent pourcentage des fibres [38].

X.2 Résistance à la flexion

Les essais de flexion qu'on appelle aussi « traction par flexion » ont l'avantage de retranscrire de manière plus réaliste ce qui se passe dans beaucoup d'éléments structuraux [39].

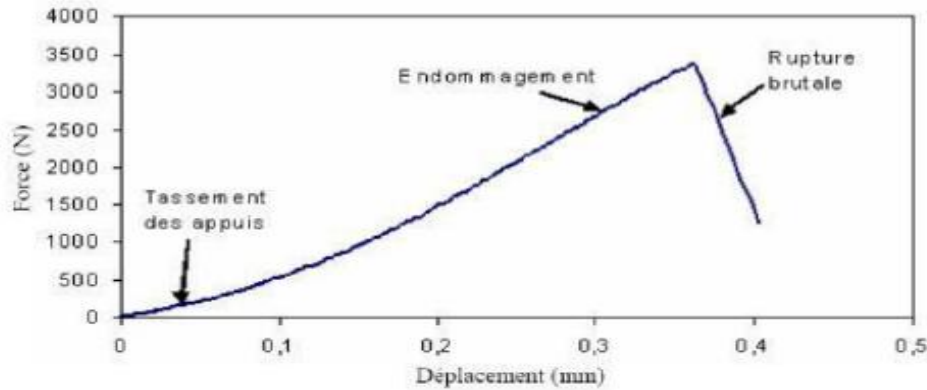


Fig. III.9. Résultats effort déplacement en flexion 3 points de béton (sans précautions particulières) [39].

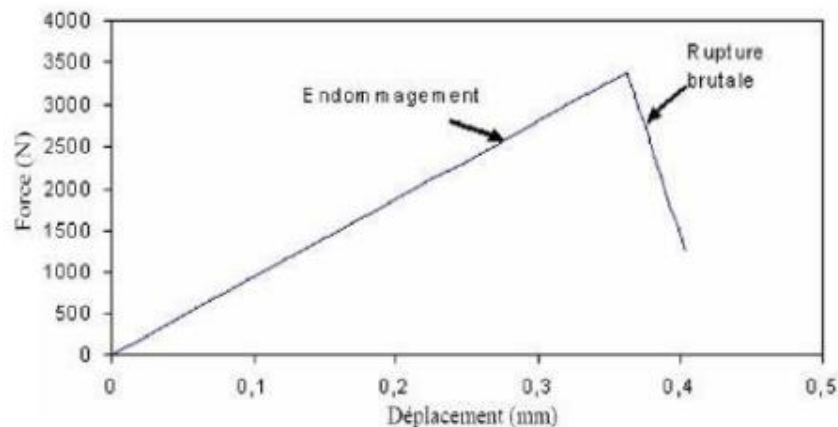


Fig. III.10. Résultats effort déplacement en flexion 3 points de béton [39].

Cette dernière figure représente l'évolution de la charge en fonction du déplacement pour le béton, obtenue à partir d'essais statiques en flexion 3-points, l'évolution de la charge se déroule en deux phases : dans la première phase, la force augmente linéairement avec le déplacement pour atteindre la charge maximale, cette phase entraîne la propagation de microfissures d'interface et la propagation de microfissures dans la matrice ; dans la deuxième phase une diminution brusque de la charge est observée, conduisant à la rupture de l'éprouvette.

X.3 Résistance à la traction

Les fibres sont introduites dans le béton pour compenser la fragilité du matériau en traction par une couture de la macro fissuration.

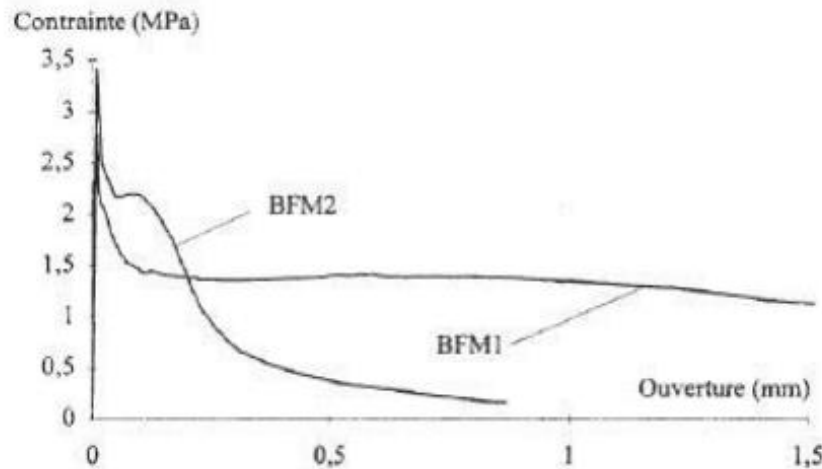


Fig. III.11. Exemples de comportement en traction uniaxiale, sur éprouvette entaillée[39].

Pour une fibre fonctionnant par ancrage de forme (BFM₁ : fibres à crochets en acier tréfilé longueur 60 mm, diamètre 0,8 mm- dosées à 50 kg/m³ ; FC = 27,5MPa) et une autre par adhérence (BFM₂ : fibres rubans en fonte amorphe -longueur 30 mm, largeur 1,7 mm dosées à 30 kg/m³ ; FC = 40 MPA). De nombreux auteurs utilisent des essais de traction "indirecte" : l'essai de fendage ou l'essai dit de "module de rupture" (essai de flexion pour lequel on mesure l'effort maximum atteint). Le problème est qu'on cherche à tirer de ces essais une résistance intrinsèque à la traction, alors qu'ils intègrent un mécanisme de structure, on mesure donc, indirectement, l'effet de couture des fibres à travers une macro fissure, mais cette mesure est soumise à des effets d'échelle importants. Les fibres interviennent essentiellement dans la phase post-fissuration assumant un transfert des contraintes à travers la discontinuité du champ des déplacements, avant fissuration, les fibres n'ont aucune ou peu d'influence sur le comportement mécanique, que ce soit à la compression ou à la traction, une fois la fissure ouverte, les fibres par leur action directe restreignent la propagation de la fissure, la Figure III.12 montre le comportement global d'une éprouvette en béton fibré soumise à la traction directe.

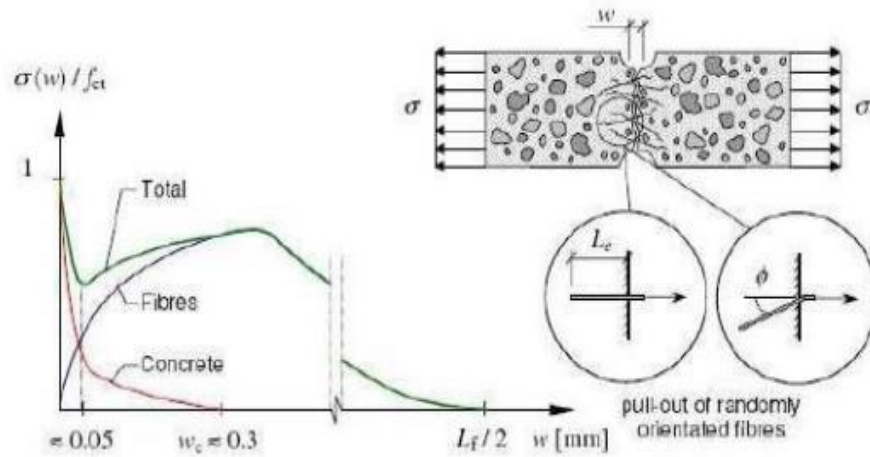


Fig. III.12. Contribution des fibres dans le comportement à la traction [40].

XI. Module de young

Le module de Young est une caractéristique qui conditionne la rigidité de matériaux. Il est défini comme étant la pente de la partie droite de diagramme contrainte déformation. Voir Figure ci-dessous.

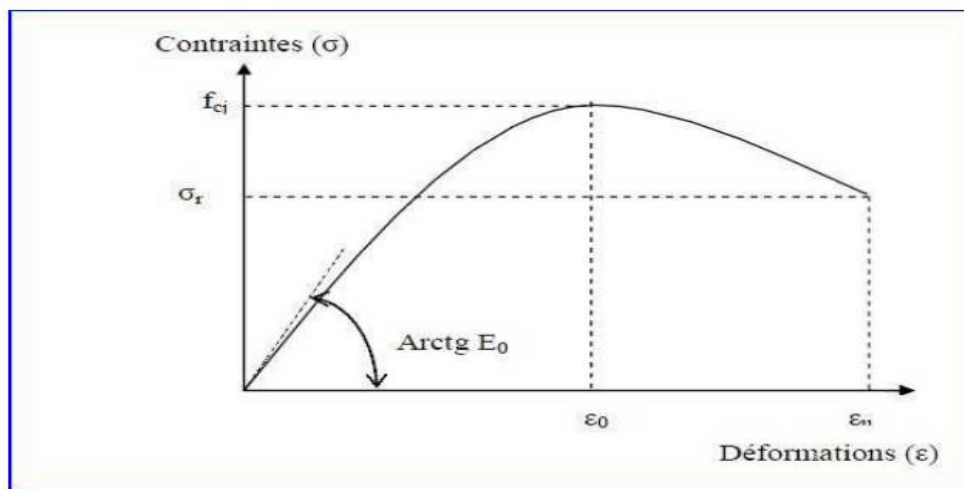


Fig. III.13. Exemple de diagramme contrainte - déformation en compression (E_0 module de Young)

(Ali ELLOUZE, 2005) dans leurs travaux a constaté que le module de Young augmente avec l'ajout des fibres métalliques par rapport au béton sans fibre, cette augmentation peut s'expliquer à l'aide de la loi des mélanges (Swann et al ; 1974)

Selon les travaux (Djebali, 2013) l'ajout des fibres (type spiral et de 30 à 40 mm de longueur) en faible pourcentage apporte une légère augmentation de la rigidité (3% à 4%) en compression, néanmoins avec l'augmentation du volume des fibres le module tend à baisser, cette diminution peut être expliqué par la baisse de compacité du matériau. La teneur optimale en fibre pour un module max est 4% voir Figure III.13.

XII. Effet de la nature des fibres

L'amélioration des propriétés de béton fibrés est fonction de type de fibre incorporé dans le béton. Les travaux menés par [41] ont montré que les fibres métalliques améliorent les propriétés des bétons auto plaçant (BAP) à l'état frais et durci mieux que les fibres de verres.

XIII. Distribution des fibres et leur orientation

La principale cause qui affecte l'orientation préférentielle des fibres est la mise en place du béton lors de coulage, en effet lors de coulage de béton 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. Aussi la vibration peut causer une orientation préférentielle des fibres suivant l'axe de vibration.

Les travaux menés par [42] ont montré une parfaite corrélation entre l'orientation préférentielle des fibres et le comportement mécanique en traction suivant les trois directions. Quand les fibres sont orientées perpendiculairement au plan de la fissure (carottes horizontales), les éprouvettes présentent un bon comportement à la traction.

Dans ce cas, les fibres assurent un transfert optimal des contraintes à travers la fissure. A l'inverse, lorsque les fibres sont orientées préférentiellement parallèlement au plan de la fissure (carottes verticales), ce comportement est semblable à celui d'un béton sans aucun renfort de fibres. Dans le cas intermédiaire (carottes diagonales), le comportement post pic est amélioré, mais de façon limitée en raison de l'orientation des fibres intermédiaire Figure III.14.

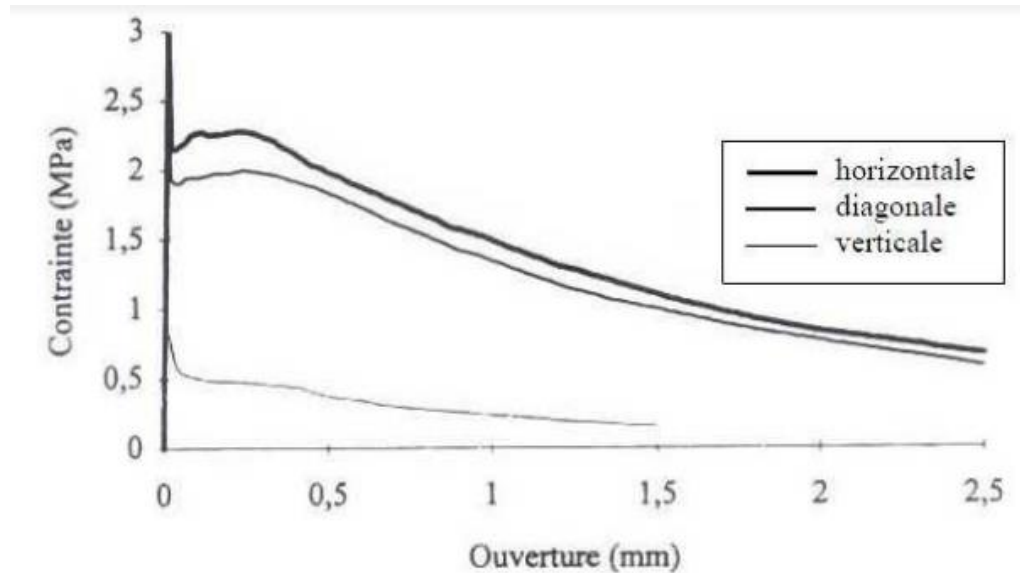


Fig. III.14. Influence de la direction des fibres sur le comportement en traction d'un béton fibré[43].

Ainsi, plusieurs auteurs ont montré que les fibres orientées perpendiculairement à l'axe de la sollicitation reprennent efficacement la fissuration, alors qu'une orientation préférentielle parallèle à l'axe entraîne une baisse de l'effort maximum [43].

XIV. Effet de la forme et la longueur des fibres

L'élancement ou le rapport longueur/diamètre joue un rôle prépondérant dans la maniabilité d'un béton renforcé de fibres (notamment métalliques) [44, 45,46]. Pour un dosage en fibre donné, plus l'élancement est important, plus la maniabilité du béton diminue. explique ceci par deux constatations empiriques [44] :

- 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.

Plus elles seront grandes, plus elles auront tendance à passer à travers le fluide visqueux constitué par la pâte de ciment pour entrer en contact avec les granulats c'est-à-dire à des frottements solides et donc à une diminution de maniabilité.

Concernant la forme géométrique, les fibres à crochets ondulées développent un ancrage et dissipent une énergie de fissuration par plastification de la fibre et par frottement à l'interface avec la matrice.

Aussi elles développent un ancrage supplémentaire en plus de l'adhérence avec la matrice les rendant plus efficaces par rapport aux fibres droites.

XV. Dosage en fibre

Le taux de fibre incorporé a une influence directe sur les propriétés de béton à l'état frais et durci. En effet les travaux menés par [47] ont montré que :

- l'ouvrabilité diminue avec l'augmentation de la teneur en fibres métallique
- La résistance à la compression et à la flexion augmente avec l'augmentation du pourcentage des fibres pour arriver à un maximum correspond à un dosage respectivement de 3,0% et 4,0%, des fractions volumiques de fibres.
- En général, l'amélioration satisfaisante dans différents dosages est observée avec l'inclusion de fibre en acier dans le béton ordinaire. Cependant, le gain maximal de la résistance du béton se trouve à dépendre de la quantité de teneur en fibres.
- La ductilité du béton se trouve à augmenter avec l'inclusion de fibres à teneur élevée en fibres.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons résumé, l'état de connaissance sur l'historique et le comportement mécanique des bétons de fibres, les types, les avantages et désavantages de chaque type de fibres ainsi que l'influence de la présence des fibres dans les bétons légers . Nous avons présentés aussi

quelques recherches sur les bétons légers avec fibres et leurs effets sur la maniabilité et la résistance.

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

Le béton de fibre est un matériau composite formé de béton mélangé avec des fibres métalliques, dont la section est de l'ordre du millimètre et la longueur de quelques centimètres. Les bétons de fibres présentent une très bonne résistance aux chocs et aux températures élevées et un comportement à la rupture supérieur à celui des bétons courants, donc l'incorporation de fibres diverses dans les bétons en vue d'améliorer leurs performances mécaniques.

I.	Introduction	54
II.	Définition du béton de fibres	54
III.	Historique du béton de fibres	55
IV.	Les fibres	55
V.	Type des fibres	56
V.1	Les fibres artificielles	56
V.1.1	Fibre de verre	56
V.1.2	Fibres métalliques	56
V.1.3	Fibres de polypropylène	57
V.2	Fibres naturelles	58
V.2.1	Fibres végétales	59
V.2.2	Fibres minérales	60
VI.	Domaine d'application de béton fibre	61
VII.	Forme d'application du béton de fibre	63
VIII.	Avantages du béton de fibre	63
VIII.1	Aspect technique	63
VIII.2	Aspect économique	64
IX.	Rôle des fibres	64
X.	Influence les propriétés et des caractéristiques physico-mécaniques des fibres sur les bétons légers	66
X.1	Résistance à la compression	66
X.2	Résistance à la flexion	67
X.3	Résistance à la traction	68
XI.	Module de young	69
XII.	Effet de la nature des fibres	70
XIII.	Distribution des fibres et leur orientation	70
XIV.	Effet de la forme et la longueur des fibres	71
XV.	Dosage en fibre	72

I. Introduction

Devant les besoins croissant des ressources en 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 , dans notre cas on a étudié les fibres métalliques qu'elles sont définies comme des éléments discontinus, de nature variable, des formes sensiblement cylindriques, d'un diamètre et longueur variable. Elles sont réparties dans la matrice soit d'une façon aléatoire ou orientation préférentielle. Dans ce chapitre on se limite aux fibres d'acier et de cuivre qui sont sans doute les plus disponibles au tant que déchets dans le domaine du génie civil donc l'objectif principal de ce sujet est l'élaboration d'un béton léger renforcé par des fibres métalliques.

II. Définition

II.1 Fibre de cuivre

Le cuivre est un élément chimique du tableau périodique qui porte le symbole Cu et le numéro atomique 29. Le cuivre est un bon conducteur, il est lisse et doux, avec une surface orange rougeâtre, la fibre de fil de cuivre de déchets électriques est des déchets électroniques se composent de tous les déchets d'appareils électroniques et électriques. Il comprend l'ordinateur et ses accessoires moniteurs, imprimantes, câbles internet, câbles d'alimentation, bobinages de machines électriques, unités centrales de traitement, téléphones portables et chargeurs, télécommandes, disques compacts, écouteurs, batteries, climatiseurs, réfrigérateurs et autres appareils électroménagers. La longueur de la fibre utilisée était de 10 mm (montrée sur la figure IV.1).



Fig. IV.1. Déchets électriques fibres de fil de cuivre

II.2 Les fibres en fer

Le fer est un élément chimique du tableau périodique qui porte le symbole Fe et le numéro atomique 26, Le corps simple est le métal et le matériau ferromagnétique le plus courant dans la vie quotidienne, le plus souvent sous forme d'alliages divers. Le fer pur est un métal de transition ductile, mais l'adjonction de très faibles quantités d'éléments additionnels modifie considérablement ses propriétés mécaniques.

Le fil recuit noir est utilisé pour lier les éléments d'armature en béton et pour fixer les coffrages ou d'autres liaisons. La ductilité du fil recuit noir permet une manipulation efficace du produit et le rend utile plus spécifiquement pour la fixation. La longueur du la fibre utilisée était de 10 mm (montrée sur la figure IV.2).



Fig. IV.2. Déchets de fibres en fer

III. Effet de l'addition des fibres sur le comportement des bétons a l'état frais

III.1 .Effet de l'addition des Fibres sur la maniabilité

L'introduction de fibres entraînant une diminution de l'affaissement estimé entre 50 et 75 mm (Johnston, 2001). Une teneur en fibre forte conduit à une diminution rapide de la maniabilité de béton, cette diminution est du fait que l'ajout des fibres est traduit par une augmentation de la surface spécifique dans le mélange, ce qui entraîne une absorption d'eau conduisant au séchage du mélange qui signifie une perte dans l'ouvrabilité de béton (Figure IV.3) L'ajout d'un super plastifiant est donc fortement conseillé afin de remédier à cette perte d'ouvrabilité (Johnston, 2001).

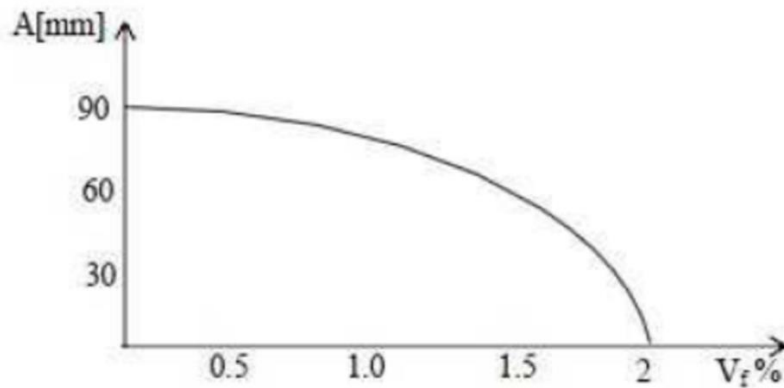
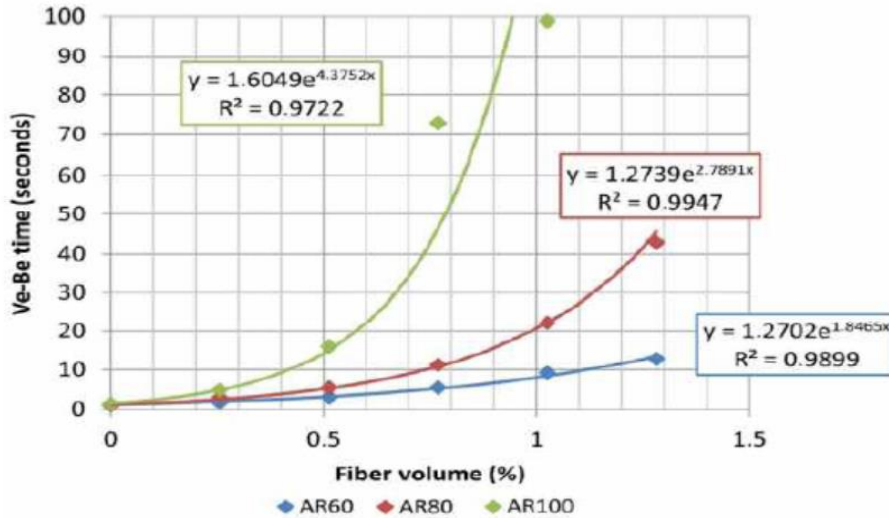


Fig. IV.3 .Effet des fibres sur la maniabilité de béton

Les travaux de (Antonio Domingues de Figueiredo, 2015) sur le l'influence des fibres métallique sur la maniabilité de béton montrent que l'ajout des fibres métallique dans le béton plastique diminue considérablement la mobilité (Figure IV.4) La perte de mobilité se produit principalement par les fibres de blocage du mouvement relatif des agrégats qui est moins intense lorsque l'on réduit le rapport d'aspect de la fibre. Une meilleure solution peut être obtenue en réduisant la taille maximale de l'agrégat ou en augmentant la teneur de mortier à béton. Ainsi, l'utilisation d'une méthode de conception de combinaison appropriée, compte tenu de l'effet des fibres, est nécessaire pour garantir des conditions d'ouvrabilité adéquates pour -fiber reinforced concrete (FRC)-.



AR60 : fibre de longueur 60 mm et $\varnothing = 1$ mm,

AR80 : fibre de longueur 80 mm et $\varnothing = 0.75$ mm.

AR100 : fibre de longueur 100 mm et $\varnothing = 0.6$ mm.

Fig. IV.4. Corrélations exponentielles entre le temps Ve-Be et la teneur en fibres des bétons avec différents rapports d'aspect des fibres [51] .

III.2. Effet de l'addition des Fibres sur la résistance à la compression

(Setti F. 1, Ezziane K. 1, Setti B.) a constaté que l'apport des fibres métallique que ce soit en cuivre ou en fer procure un gain de 29% de la résistance en compression avec un dosage de 1.5 % de fibre voir (Figure IV.5) Cette amélioration peut être attribuée à l'adhérence mécanique des fibres qui permet d'augmenter la capacité à retarder la formation des fissures et arrêter leur propagation. La longueur des fibres utilisées est de 50 mm et 0.75mm d'épaisseur.

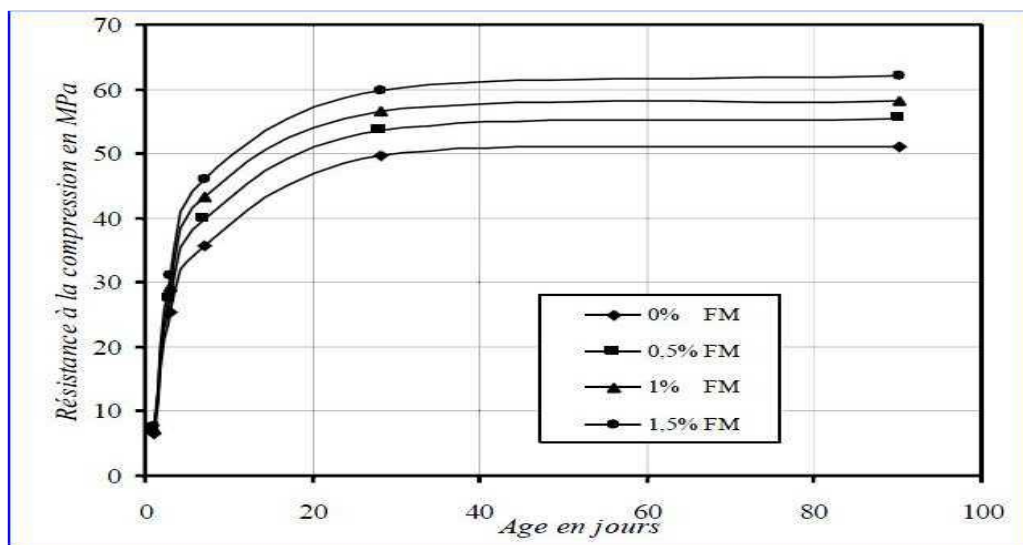


Fig. IV.5. Évolution du gain de résistance compression du béton renforcé de fibres [51]

III.3. Effet de l'addition des Fibres sur la résistance à la flexion

Le renforcement par des fibres métalliques est utilisé pour améliorer la ductilité et fournir un contrôle du mécanisme de fissuration. L'amélioration de la résistance de première fissuration est ordinairement un gain secondaire.

Contrairement au faible effet des fibres sur la résistance en compression de béton. Les fibres ont un effet plus significatif a trait au comportement en flexion (traction), ainsi dans plusieurs applications, les bétons renforcés de fibres sont utilisés dans des endroits où ils sont soumis à de tels efforts.

A constaté que la résistance à la flexion du béton augmente en fonction du temps, et que l'ajout de fibres d'acier engendre une nette augmentation telle qu'on obtient une résistance qui double de valeur en présence de 1.5% de fibres. Voir (Figure IV.6)

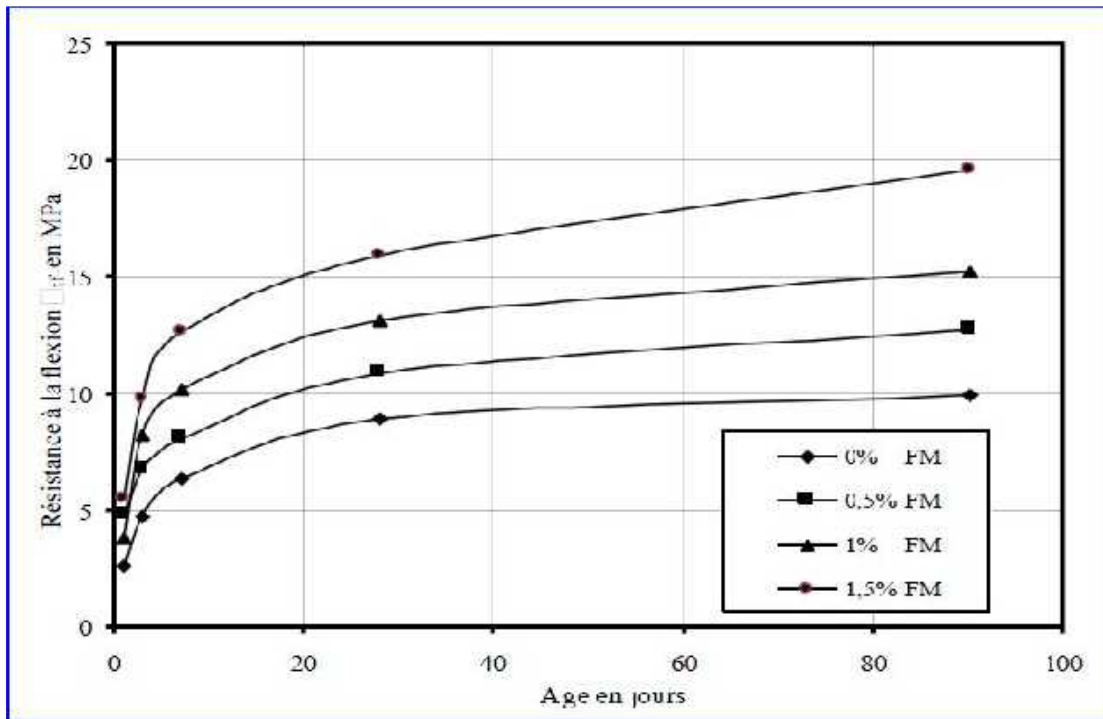


Fig. IV.6. Résistance à la flexion du béton renforcé de fibres en fonction du temps [51] .

IV. Critères de choix des fibres :

Le choix d'une fibre doit être basé sur le fait que la fibre utilisée doit être, avant tout, mécaniquement, physiquement et chimiquement compatible avec les constituants de la matrice. Elle doit conserver ses propriétés dans le temps et être d'un coût bien acceptable, compte tenu des performances qu'elle confère à la matrice. Le choix dépend aussi de l'usage recherché (pièces minces, pièces massives, réparation de structure, projection, renforcement d'une pâte pure...etc.) et des propriétés mécaniques de la fibre (résistance, module d'élasticité, adhérence avec la matrice... etc.).

V. Etude comparative de caractéristique des fibres de cuivre et les fibres en fer

- **Mesure de la masse volumique des fibres de cuivre**

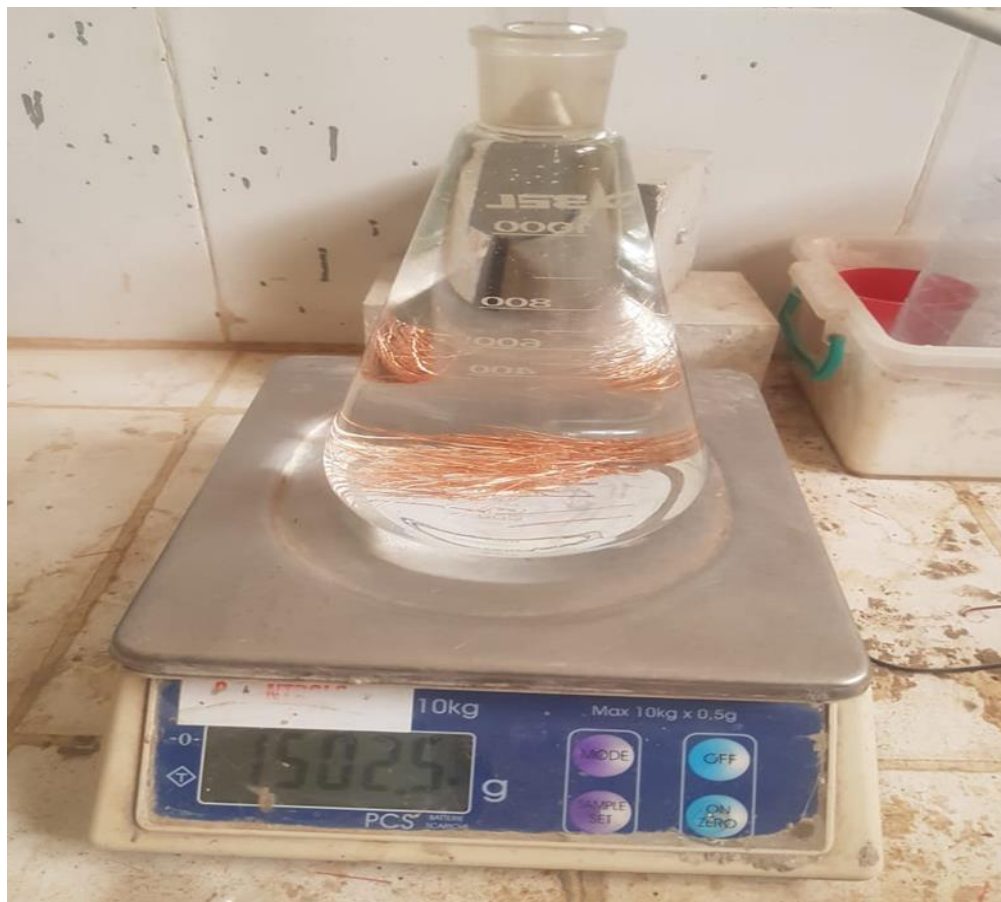


Fig. IV.7.essai de la masse volumique des fibres de cuivre

➤ Mesure de l'épaisseur de cuivre



Fig. IV.8 Mesure de l'épaisseur de la fibre de cuivre à l'aide de pied à colis



Fig. IV.9. Mesure de la longueur de la fibre

Tableau IV.1. Caractéristiques des fibres en cuivre [48]

Fusion (°C)	Longueur (mm)	Epaisseur (mm)	Elancement L/D	La conductivité thermique (w/m.k)	Module d'élasticité (Kg/mm2)	Masse volumique (g/cm3)
1084,62	10	0,6	16,66	401	12,65	9,41

➤ **Mesure de la masse volumique des fibres de fer**

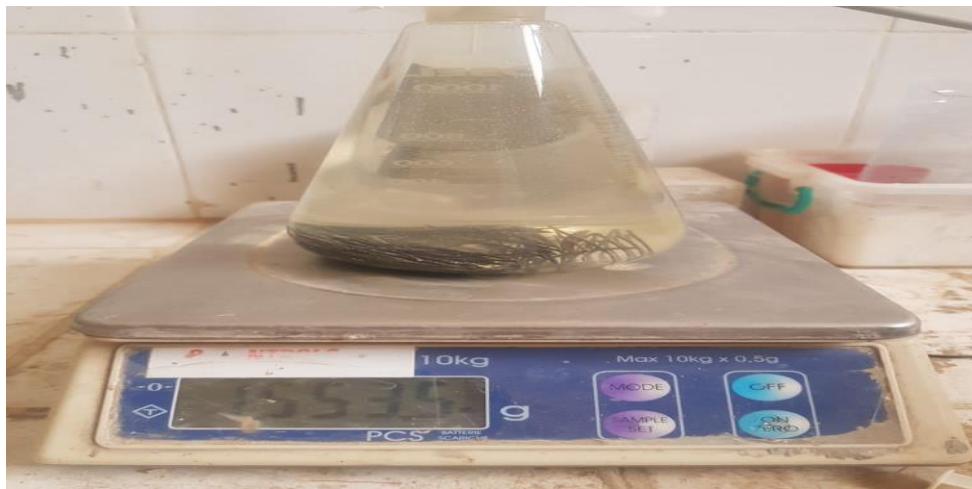


Fig. IV.10. Essai de la masse volumique des fibres de fer

➤ **Mesure de l'élancement de fer**



Fig. IV.11. Mesure de l'épaisseur de la fibre de fer à l'aide de pied à colis

Tableau IV.2. Caractéristiques des fibres de fer [49,50]

Fusion (°C)	Longueur (mm)	Epaisseur (mm)	Elancement L/D	La conductivité thermique (w/m.k)	Module d'élasticité (Kg/mm2)	Masse volumique (g/cm3)
1538	10	1,12	8,93	80,2	19,6	7,27

VI. Interprétation

Vue les caractéristiques physico-mécaniques et thermique du cuivre et de fer on a constaté que l'utilisation de fibre de cuivre touche négativement l'objectif principal de notre étude puis que c'est un très bon conducteur vue que sa conductivité thermique atteint environ 400 k/m.°c malgré que sa masse volumique est faible. De côté durabilité on remarque que le degré de fusion de fer est très important par rapport à celui de cuivre et malgré que c'est un métal qui ne corrode pas et il résiste bien contre les ajouts agressifs en général et les acides en particulier, donc à partir de ces résultats on considère que les utilisation de fibre de cuivre dans le béton léger va nous conduire a une contradiction par contre les utilisation de fibre de fer avec le béton léger est très bénéfique et compatible avec les caractéristiques des granulats légers.

Conclusion

Le travail présenté dans ce mémoire avait pour but d'étudier la possibilité d'utiliser des fibres de cuivre issues d'un déchet des fils électriques et des copeaux de fer issues d'un déchet des files d'attache comme renforcement des bétons légers afin de compenser la chute de résistance mécanique due à l'utilisation des granulats légers, l'objectif d'utilisation des fibres métalliques en général pour l'amélioration de la résistance à la traction par la minimisation de propagation des fissures. A l'heure actuelle, tous efforts de la recherche scientifique qui ont été réalisés dans le domaine du béton de fibre métalliques sont orientés principalement vers l'utilisation des fibres métalliques à base de fer.

CHAPITRE IV: Etude comparative entre les fibres de cuivre et les fibres en fer

I.	Introduction.....	75
II.	Définition.....	75
II.1	Fibre de cuivre.....	75
II.2	Les fibres en fer.....	76
III.	Effet de l'addition des fibres sur le comportement des bétons a l'état frais.....	77
III.1	.Effet de l'addition des Fibres sur la maniabilité.....	77
III.2	. Effet de l'addition des Fibres sur la résistance à la compression.....	78
III.3	. Effet de l'addition des Fibres sur la résistance à la flexion.....	79
IV.	Critères de choix des fibres :.....	80
V.	Etude comparative de caractéristique des fibres de cuivre et les fibres en fer.....	80
VI.	Interprétation.....	83

<https://image.made-in-china.com/2f0j10ayjEcefoYrzb/-12mm-brin-de-fibre-de-verre-r->

sistant-aux-alcalins-.jpg

Conclusion générale

Le béton classique est par excellence le matériau le plus utilisé dans le domaine de construction en raison des performances mécaniques qu'ils offrent. Par ailleurs, utilisé dans la construction des éléments porteurs et de remplissage, le béton traditionnel n'est plus le matériau idéal. En effet, sa résistance élevée dépasse de loin les sollicitations que supportent ces éléments. De plus, leur masse volumique importante comprise entre 2200 et 2600 kg/m³ implique des forces d'inertie importantes lors des secousses sismiques et des charges verticales élevées. C'est pourquoi beaucoup de recherches dans le domaine de génie civil sont orientées vers les bétons de 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.

L'objectif principal de cette étude, est de mettre en exergue l'application des matériaux innovants dans le secteur du bâtiment, en vue d'une efficacité énergétique et particulièrement dans le domaine de l'isolation et de l'étanchéité, l'idée dans ce travail est la valorisation des granulats de liège issus des déchets de l'industrie des panneaux de liège.

Le liège est un granulat léger fabriqué à partir de l'écorce du chêne liège, un tissu végétal formé de cellules mortes. Sa cuisson dans sa propre résine le fait s'agglomérer naturellement et donne du liège expansé pur. Ce matériau est utilisé en tant qu'isolant thermique et phonique dans les constructions : planchers, murs, toits, sa masse volumique 140 – 180 kg/m³ et sa conductivité thermique 0.036 (W/m.K) justifie notre choix.

Il faut bien noter qu'un hectare de chêne-liège fournit de 80 à 120 kg de liège tous les 10 ans.

3 tonnes de liège mâle donnent 1 tonne de liège expansé noir aggloméré ou en granulés.

100 kg de liège femelle brut donnent :

- 50 kg de liège expansé noir,
- 22 kg de granulés de liège blanc agglomérés ou non,
- 10 kg de bouchons,
- 18 kg de chutes.

Donc on le considère comme un déchet surtout lorsque on sait le classement dans notre pays est le 4^{ème} mondialement.

Il faut bien savoir que l'utilisation des granulats de liège diminue la résistance mécanique en fait c'est grâce à sa structure alvéolé et sa masse volumique ce qui nous donnent un matériau malgré sa bonne isolation thermique mais il reste moins résistant donc l'idée c'est l'utilisation des fibres métalliques pour compenser la résistance, donc à partir de notre recherche on peut déduire que l'utilisation des fibres métallique

- augmente la résistance mécanique que ce soit à la compression ou à la traction,
- diminue l'ouvrabilité du béton,
- les fibres en fer plus résistants par rapport de fibres en cuivre,
- le cuivre est un bon conducteur thermique par rapport de fer,
- le cuivre résiste bien contre les agents agressifs,

Le présent thème pourrait être développé expérimentalement et complété en mettant l'accent sur d'autres aspects fondamentaux, En fin nous proposons de :

- Compléter et finaliser le travail en s'appuyant sur notre étude.
- Réaliser les essais concernant l'utilisation des fibres métalliques dans la fabrication des matériaux de construction et participer efficacement à protéger l'environnement en recyclant ces derniers.
- Etudier durabilité vis a vie l'utilisation des fibres de cuivre et de fer dans les différentes constructions.

Références bibliographiques

- [1] Benkechkache, G. (2007). Etude du comportement différé des bétons autoplacants.
- [2] Makhoulf, N. (2010). *Caractérisation en statique du comportement en traction directe du béton armé de fibres en copeaux* (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [3] Djebali, S. (2013). *Caractérisation des éléments de structures en béton de fibres métalliques* (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [4] LAROUCI, B., & BENNACER, L. (2017). *CONTRIBUTION A L'ETUDE DU COMPORTEMENT MECANIQUE DE BETON DES FIBRES METALLIQUES* (Doctoral dissertation, جامعة أحمد دراية-ادرار).
- [5] Caillard, Bruno. Grand guide de la maçonnerie. 2017.
- [6] Ollivier. (2008). L'hydratation des ciments, La Durabilité des Bétons, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Sous la direction de JeanPierre Ollivier et Angélique Vichot.
- [7] Scordia, P. Y. (2008). *Caractérisation et valorisation de sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers* (Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Lille).
- [8] Lerm, . (2008). Au cœur du ciment, Direction Recherche & Innovation, Lerm (Arles) Laboratoire d'études et de recherches sur les matériaux, CBPC (N° 889).
- [9] Odler, I. (1998). Hydration, setting and hardening of Portland cement. *Lea's Chemistry of cement and concrete*.
- [10] Neville M., Brooks J. J., Concrete Technology, 2 nd, 2010, pp. 434.
- [11] Fathifazl, G., Abbas, A., Razaqpur, A. G., Isgor, O. B., Fournier, B., & Foo, S. (2009). New mixture proportioning method for concrete made with coarse recycled concrete aggregate. *Journal of materials in civil engineering*, 21(10), 601-611.
- [12] Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., & Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and concrete research*, 37(5), 735-742.
- [13] Tam, V. W., Gao, X. F., & Tam, C. M. (2005). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and concrete research*, 35(6), 1195-1203.
- [14] Yaşar, E., & Erdoğan, Y. (2008). Strength and thermal conductivity in lightweight building materials. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67(4), 513-519.
- [15] Shink, M. (2003). Compatibilité élastique, comportement mécanique et optimisation des bétons de granulats légers.
- [16] Arnould, M., Virlogeux, M., ALBENQUE, M., COUGNY, G., BERTRANDY, R., GAUDON, P., ... & MERRIEN, P. (1986). *Granulats et bétons légers*.

[17] Ramachandran, V. S., Malhotra, V. M., Jolicoeur, C., & Spiratos, N. (1998). Superplasticizers: properties and applications in concrete.

[18] Cantat, R., & Piazzettar, R. (2005). La levée du liège. *Guide technique et de vulgarisation, Institut Méditerranéen du Liège*.

[19] Erner, A., Henry, J.F., Billon, N. Mechanical dissipation during plug assisted thermoforming of polystyrene as measured by infrared thermography; ESAFORM'2004 Conf. Proc., Trondheim, Norway (2004).

[20] Yamura, K., & Yamauchi, M. (1982). Use of polystyrene pieces for aggregate of concrete. In 29. *Proc. Annual conf. of Chugoku-Shikoku Branch of JSCE, Japan. Annexe A* (p. 295).

[21] Elbakkouri, A. (2004). *Caractérisation hygroscopique, thermophysique et mécanique des matériaux allégés: cas du béton allégés avec du liège ou avec des grignons d'olive* (Doctoral dissertation, thèse de doctorat, Tetouan).

[22] Chafi, N. (2005). Matrice cimentaire renforcée de fibres. Valorisation des sous produits (Polystyrène, copeaux d'acier et copeaux de bois).

[23] Baron, J., & Lesage, R. (1976, December). La composition du béton hydraulique du laboratoire au chantier. LCPC.

[24] Shink, M. (2003). Compatibilité élastique, comportement mécanique et optimisation des bétons de granulats légers.

[25] 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).

[26] Rossi, P. (1998). *Les bétons de fibres métalliques, presses de l'école nationale des Ponts et chaussées*. ISBN2-85978-2923.

[27] Pierre ROSSI (TUNNELS ET ESPACE SOUTERRAIN - n°218 - Mars/Avril 2010)

[28] Makhlof, N. (2010). *Caractérisation en statique du comportement en traction directe du béton armé de fibres en copeaux* (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).

[29] Djebali, S. (2013). *Caractérisation des éléments de structures en béton de fibres métalliques* (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).

[30] Asquapro. (2014).Utilisation des bétons projetés pour la réparation et le renforcement des structures Comité Technique Asquapro Fascicule technique ASQUAPRO page 7 Version

[31] Rossi, P., Arca, A., Parant, E., & Fakhri, P. (2005). Bending and compressive behaviours of a new cement composite. *Cement and Concrete Research*, 35(1), 27-33.

[32] « fibres et renforts végétaux solutions composites », fibres recherche développement (frd), Troyes – France (mars 2012)

[33] Saida Medjahed, agence nationale pour la conservation de la nature b.p. 115, el annasser Alger – Algérie.

[34] Fritih, Y. (2009). *Apport d'un renfort de fibres sur le comportement d'éléments en béton autoplaçant armé* (Doctoral dissertation, Toulouse, INSA).

[35] Magniont, C. (2010). *Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un écomatériau de construction à base d'agroressources* (Doctoral dissertation, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier).

[36] Thèse de doctorat sur Apport d'un renfort de fibres sur le comportement d'éléments en béton auto plaçant armé. [Yousef FRITIH] pp19 Le 08 Juillet 2009

[37] Chemrouk, M .Tahenni, T et Boulekbeche.B. (2009)«Béton renforcé en Fibres : un Matériau aux avantages multiples». 1ère Conférence Internationale sur les Energies, Matériaux et Environnement Cieme'09 Centre Universitaire de Khemis Miliana, 22 et 23 Novembre

[38] ROSSI, P. (1991, March). Formulation et comportement mécanique des bétons de fibres métalliques (BFM). In *Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics* (No. 492 (B279)).

[39] Bernard O., 2000. "Comportement à long terme des éléments de structure formés de bétons d'âges différents." Thèse de Doctorat, EPFL, Lausanne, Suisse

[40] Löfgren I.. (2005). -Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction - à fracture mechanics approach to matériel testing and structural analysis, PhD-thesis, Department of Civil and Environmental Engineering Structural Engineering, Chalmers University of Niversity of Thchnology Göteborg, Sweden,

[41] Tabet, N. (2012). *Contribution à l'étude de l'influence de la nature et des dimensions des fibres sur le comportement physico-mécanique des bétons autoplaçants fibres (bapf)* (Doctoral dissertation, Université de Boumerdès-M'hamed Bougara).

[42] Casanova, P. (1996). Bétons renforcés de fibres métalliques-du matériau à la structure. *ETUDES ET RECHERCHES DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES-SERIE OUVRAGES D'ART*, (OA20).

- [43] Bonzel, J., & Schmidt, M. (1986). Distribution and orientation of steel fibers in concrete and their influence on characteristic of steel fiber concrete. In *FRC-86, Development in Fiber Reinforced Cement and Concrete, RILEM Symposium, Sheffield* (Vol. 1).
- [44] Rossi, P. (1998). *Les bétons de fibres métalliques, presses de l'école nationale des Ponts et chaussées*. ISBN2-85978-2923.
- [45] Snyder, M. J., & Lankard, D. R. (1972, February). Factors affecting the flexural strength of steel fibrous concrete strength of steel fibrous concrete. In *Journal Proceedings* (Vol. 69, No. 2, pp. 96-100).
- [46] Swamy, R. N. (1975). Fibre reinforcement of cement and concrete. *Matériaux et Construction*, 8(3), 235-254.
- [47] Abdul Ghaffar . (2014). Abdul Ghaffar¹, Amit S. Chavhan, Dr.R.S.Tatwawadi³ Steel Fibre Reinforced Concrete, ISSN: 2231-5381 [Http://www.ijettjournal.org](http://www.ijettjournal.org) Page 791 International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Volume 9 Number 15 –
- [48] PONA, M. A. (2017). Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako
- [49] Whan, R. E. (1988). Metals handbook, Vol. 10, Materials characterization. Applied Optics, 27(6), 1002.
- [50] Zaouatine, F., & Bouacida, S. (2015). Caractérisation structurale par diffraction des rayons x des nouveaux composés hybride à base de 4-diméthylaminopyridine.
- [51] Setti F. 1, Ezziane K. 1, Setti B.(2014).