

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJE-BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie Civil

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

MALEK Ali

LAMRI Khaled

En vue de l'obtention du diplôme de **Master 02** en :

Filière : Génie Civil

Option : Matériaux en Génie Civil

Thème :

Propriétés des bétons fibrés avec l'ajout de la boue de dragage.

Devant le jury composé de :

**ARIBL.C
LAOUCHEDI. D
ROUAM. K
HAML.B**

**MCA
MCB
MAA
MCB**

**UAMOB
UAMOB
UAMOB
UAMOB**

**Président
Promotrice
Co-Promotrice
Examineur**

Année Universitaire 2021/2022

Dédicace :

Nous dédions ce modeste travail :

*À nos chers parents nos mères et nos pères pour leur
patience, leur amour, leur soutien et leurs encouragements.*

À nos frères et nous sœurs.

À nous ami(e)s et collègues.

*Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du
moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.*

*À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce
travail soit possible.*

Merci !

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions le Dieu, le Tout-Puissant, de nous avoir donné la volonté et le courage afin d'arriver à la finalisé de ce modeste travail.

Ensuite, nous remercions nos parents qui nous ont soutenu beaucoup pendant toute la vie et qui continuerons à nous aider dans tous les projets de l'avenir. Ainsi que tous les membres de nos familles qui ont participé de près ou de loin à nous encourager et nous aider dans notre projet.

Nous remercions très sincèrement notre Promotrice, madame: **LAOUCHEDI. D.** Et Co-promotrice madame: **ROUAM. K** Pour tout le savoir qu'elles nous ont apporté, et pour ~~ms~~savoir encadré et diriger au cours de notre projet de fin d'études.

Nous remercions les membres de jury, pour avoir accepté d'examiner ce mémoire et juger notre travail, a leurs exprimé toute notre gratitude pour l'intérêt qu'ils ont accordé à ce travail. Notre reconnaissance va aussi à l'ensemble du personnel des laboratoires LCTP de BOUIRA , qui ont permis par leur soutien et les moyens mises à notre disposition pour la réalisation de cette recherche, avec une attention particulière pour leur présence et leur précieuse assistancetechnique et les nombreuses explications qu'elles nous ont patiemment données. Enfin, nous tenons à exprimer toute notre gratitude à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

À tous ces intervenants, Nous présentons nos remerciements, notre respect et notre gratitude.

Résumé

Cette recherche vise à étudier l'influence des déchets naturels et industriels (la boue de dragage et les copeaux d'usinage) sur les propriétés physiques, mécaniques des bétons.

Cette étude est divisée en deux grandes parties. La première partie consacrée à la formulation et la caractérisation de mortier avec l'ajout de deux types de la boue calcinée (la boue calcinée refroidit à l'air et la boue calcinée refroidit à l'eau) à différents dosages 10% ,15%, 20%.

Le second volet de l'étude basée sur la formulation des bétons avec le meilleur dosage de la boue et les fibres récupérées des déchets d'usinage (copeaux métalliques) à différents dosages 01%, 1.5%, 02%.

L'ajout de ces déchets est dans le but d'envisager l'influence de la structure, le dosage sur les propriétés physiques et mécaniques du béton.

D'après les résultats obtenus on peut conclure que l'addition de 10% de la boue donne le meilleur résultat par rapport aux autres dosages (15%, 20%) et l'ajout de 10% de la boue calcinée refroidit à l'eau donne des meilleurs résultats par rapport à la boue refroidit à l'air, ainsi les bétons brés avec la boue calcinée présentent des résistances élevées par rapport au béton témoin et le béton formulé avec 1,5% de fibres donne de meilleurs résultats par rapport aux autres bétons.

Les résultats obtenus nous ont prouvés que ces déchets confèrent au béton des propriétés qu'il ne possède pas seul, d'une part, et d'autre part à réduire le prix de revient des bétons.

Mots clés : la boue de dragage, la boue calcinée à l'air et la boue calcinée à l'eau, copeaux d'usinage, les bétons fibrés, propriétés mécaniques, propriétés physiques.

ملخص

يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير المخلفات الطبيعية والصناعية (طين التجريف والرقائق الآلية) على الخواص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة.

تنقسم هذه الدراسة إلى جزئين رئيسيين. الجزء الأول مخصص لتكوين وتوصيف الملاط مع إضافة نوعين من الطين المكلس (الطين المكلس المبرد في الهواء والطين المكلس المبرد في الماء) بجرعات مختلفة 10% ، 15% ، 20%.

الجزء الثاني من الدراسة يعتمد على صياغة الخرسانة بأفضل جرعة من الحمأة والألياف المسترجعة من نفايات المعالجة (نشارة معدنية) بجرعات مختلفة 1% ، 1.5% ، 2%. تتم إضافة هذه النفايات من أجل النظر في تأثير الهيكل والجرعة على الخواص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة.

من النتائج التي تم الحصول عليها يمكن الاستنتاج أن إضافة 10% من الحمأة تعطي أفضل نتيجة مقارنة بالجرعات الأخرى (15% ، 20%) وإضافة 10% من الحمأة المكلسة تبرد إلى لتر ماء يعطي أفضل نتائج مقارنة بالطين المبرد بالهواء ، وبالتالي فإن الألياف الخرسانية مع الطين المكلس تقدم مقاومة عالية مقارنة بخرسانة التحكم والخرسانة المصنعة بنسبة 1.5% من الألياف تعطي نتائج أفضل مقارنة بالخرسانة الأخرى.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن هذه المخلفات تعطي خصائص خرسانية لا تمتلكها بمفردها ، من ناحية ، ومن ناحية أخرى لتقليل سعر تكلفة الخرسانة.

الكلمات المفتاحية: الطين المكلس ، الطين المكلس بالهواء ، الطين المكلس بالماء ، الرقائق الآليات ، الخرسانة المسلحة بالألياف ، الخواص الميكانيكية ، الخواص الفيزيائية.

Abstrac

This research aims to study the influence of natural and industrial waste (dredging mud and machining chips) on the physical and mechanical properties of concrete.

This study is divided into two main parts. The first part devoted to the formulation and characterization of mortar with the addition of two types of calcined mud (calcined mud cooled in air and calcined mud cooled in water) at different dosages 10%, 15% .20%.

The second part of the study based on the formulation of concrete with the best dosage of sludge and fibers recovered from machining waste (metal shavings) at different dosages 1%, 1.5%, 2%.

The addition of these wastes is in order to consider the influence of the structure, the dosage on the physical and mechanical properties of the concrete.

From the results obtained it can be concluded that the addition of 10% of the sludge gives the best result compared to the other dosages (15%, 20%). And the addition of 10% of the calcined sludge cools to l water gives better results compared to air-cooled mud, thus the fiber concretes with the calcined mud present high resistances compared to the control concrete and the concrete formulated with 1.5% of fibers gives better results by compared to other concretes.

The results obtained have shown us that this waste gives concrete properties that it does not have on its own, on the one hand, and on the other hand to reduce the cost price of concrete.

Keywords: dredging mud, air calcined mud and water calcined mud, machining chips, fiber concrete, mechanical properties, physical properties.

Sommaire

Résumé	i
ملخص	i-ii
Abstract.....	ii
Remerciements.....	iii
Liste des figures.....	iv
Liste des tableaux.....	v

INTRODUCTION GENERALE

I.1 Introduction.....	01
-----------------------	----

CHAPITRE. I: LES CONSTITUANTS DU BETONS.

I. Généralité sur le béton.....	03
II. Introduction	03
III. Les composants d'un béton.....	03
III.1. Ciment.....	04
III.1.1. Définition.....	04
III.1.2. Les caractéristiques de ciment	04
III.1.3. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques	05
III.1.3.1 Composition chimique élémentaire	05
III.1.4. Les caractéristiques physiques.....	07
III.1.4.1. Finesse de mouture.....	07
III.1.4.2. La masse volumique.....	08
III.1.4.3. Prise et durcissement des ciments (NF EN 196-3)	08
III.1.4.4. L'expansion (NF EN 196-3).....	09
III.1.4.5. Le retrait (NF P 15 433).....	09
III.1.4.6. Eau de consistance normale (NF EN 196-1)	09
III.1.4.7. Caractéristiques mécaniques.....	09
III.2. Classification des ciments	10
IV. Eau de gâchage (NF EN 1008).....	12
V. Additions minérales	12
VI. Les granulats	13
VI.1. Définition La position de la norme NFEN206-1	13
VI.2. Différents types des granulats	13

VI.3. Caractéristique principale des granulats	16
VI.4. Caractéristiques géométriques.....	16
VI.4.1. Classe granulaire.....	16
VI.4.2. Granulométrie.....	17
VI.5. Caractéristiques physiques	21
VI.5.1 La masse volumique apparente (en vrac)	21
VI.5.2 La masse volumique absolu	22
VI.5.3. Propriété des granulats	22
VI.6. Caractéristique mécanique (résistance à l'usure et à au chocs)	25
VI.6.1. Essai de Micro Deval	26
VI.6.2. Essai de Los Angeles	26
VI.6. Caractéristique mécanique (résistance à l'usure et à au chocs).....	25

CHAPITRE II : LES AJOUTS CIMENTAIRES

I. Généralité	28
II. Définition des ajouts	28
III. Origine et classification des ajouts cimentaire	29
III.1. Classification des ajouts	29
III.1.1. Les ajouts inerte type 1.....	30
III.1.2. Les ajouts inertes type 2	30
IV. Les différents type d'ajouts	31
IV.1. Notation conventionnelle des ajouts minéraux	31
IV.2. Les cendres volante.....	31
IV.2.1. Généralités.....	31
IV.2.2. Classification des cendres volantes et l'aspect normatif	32
IV.2.2.1. La norme P18 -505	32
IV.2.2.2. Cendre volante (F et C).....	32
IV.2.2.3. Les cendres volantes de classe F	32
IV.2.2.4. Les cendres volantes de classe C	33
IV.2.2.5. Les cendres volantes (V et W).....	33
IV.3. Le fumé de silice D.....	34
IV.3.1. Généralité	34
IV.3.2. Le fumé de silice.....	34

IV.4. Pouzzolane	35
IV.4.1. Généralité	35
IV.4.2. Différent types de pouzzolane et l'aspect normatif.....	36
IV.4.2.1. Pouzzolane naturelle	36
IV.4.2.2. Pouzzolane industriel ou artificielle (Q)	37
IV.4.2.3. Types de pouzzolane naturelle (THOMAS ,2013) [55].....	38
IV.5. La boue de dragage.....	38
IV.5.1. Définition et origine	38
IV.5.2. Constituant des sédiments	39
IV.5.3. La calcination	39
IV.5.4. La vase calcinée.....	40
IV.6. Les laitiers de haut fourneau(S).....	42
IV.6.1. Généralité	42
IV.6.2. Les différents types laitiers.....	43
IV.7. Calcaire (L).....	43
V. L'intérêt de l'utilisation les ajouts minéraux dans le génie civil.....	44
V.1. L'intérêt du point de vue technique	44
V.2. L'intérêt du point de vue économique	44
V.3. L'intérêt du point de vue environnement	44
V.4. Les inconvénients l'utilisation des ajouts minéraux	44
VI. Effet des ajouts sur les propriétés des bétons.....	45
VI.1. Amélioration de l'ouvrabilité	45
VI.2. Chaleur d'hydratation	45
VI.3. Durabilité.....	45
VI.4. Développement des résistances	45
VI.5. Développement des béton haut résistance	46
VII. L'utilisation des ajouts en Algérie.....	46

CHAPITRE III : LES FIBRES

I. Généralité sur les fibres	48
II. Définition sur les fibres	48
III. Les types des fibres et leur propriété	48

III.1. Diffèrent types des fibres	48
IV. Les caractéristiques et les propriétés des fibres.....	50
IV.1. La notion des fibres structurales	50
IV.2. Facteur d'élanement	51
IV.3. La performance.....	51
V. La valeur de résistance résiduelle	51
VI. La distribution des contraintes mécaniques.....	51
VII. Les propriétés mécaniques des fibres	52
VIII. Rôle des fibres dans le béton	53
IX. Conclusion	55

CHAPITRE IV : LES PROPRIETES DES BETONS

I. Propriétés essentiel d'un béton.....	57
I.1. Propriété du béton frais.....	57
I.1.1. Essai d'affaissement au cône d'abrams.....	57
I.1.2. La masse volumique du béton frais	58
I.2. Propriété du béton durci.....	59
I.2.1. Essais de résistance à la compression	60
I.2.2. Essai de résistance à la traction	61
I.2.3. La masse volumique de béton durci	63
II. Propriété des bétons fibrés	64
II.1. Introduction.....	64
II.2. Définition des béton fibrés.....	64
II.3. Propriété mécaniques du béton renforce par fibrés métalliques.....	65
II.3.1. Introduction.....	65
II.3.2. Résistance à la compression.....	65
II.3.3. Résistance à la traction directe	67
II.3.4. Résistance à la flexion	68
Conclusion	69

CHAPITRE V : PARTIE PRATIQUE

I. Méthodologie et objectif du travail pratique.....	70
--	----

PREMIER PARTIE

II. Caractérisation des matériaux utilisés.....	71
1. Ciment	71
2. Sable et gravier	71
2.1.Sable de oued souf	73
2.2 sable de chalghoum laid	74
3.Gravier	76
3.1.Gravier 3/8	76
3.2.Gravier 8/15.....	78
4. La boue	80
4.1.Caractéristique physique et chimique.....	81
5. Les fibres métalliques	82
6.L'eau de gâchage.....	82

DEUXIEME PARTIE

I. Formulation	83
1. Essai de compression.....	84
2. Essai de flexion	86

TROISIEME PARTIE

I. Formulation des bétons	88
1. Données des problèmes	89
2. Le béton frais	90
2.1. La masse volumique (NF EN 12350-6).....	91
3. Le béton durci.....	92
3.1.La masse volumique.....	92
4. Essai de résistance à la compression.....	93
5. Essai de traction par flexion.....	100

Liste des figures

Figure I.01 :	Des granulats alluvionnaires naturels	14
Figure I.02 :	Exemple des granulats de carrière	15
Figure I.03 :	Série des tamis pour la granulométrie	18
Figure I.04 :	L'analyse granulométrique par tamisage	18
Figure I.05 :	Exemple de courbe granulaire des granulats pour béton	19
Figure I.06 :	Détermination de la masse volumique apparente	22
Figure I.07 :	Les fibres métalliques	22
Figure I.08 :	L'essai au piston d'équivalent de sable	24
Figure I.09 :	Appareil pour détermine la valeur de bleu méthylène	25
Figure I.10 :	Machine D'essai Micro Deval	26
Figure I.11 :	Machine D'essai Los Angeles	27
Figure II.01:	Principe de production de la fumée de silice (Aïtcin,2004)	34
Figure.II.02	Classification des pouzzolanes (Tokyay,2016)	36
Figure.II.03:	Température du four en fonction du temps	40
Figure.II.04:	Les étapes de la préparation de la vase	41
Figure. III.01:	Détermination de la masse volumique absolue	49
Figure. III.02 :	Les fibres de verre	49
Figure III.03 :	Les fibres de polypropylènes	50
Figure III.04 :	Les caractéristiques et les propriétés des fibres	52
Figure.III.05 :	Rôle de fibre dans le béton	53
Figure.III.06 :	Rôle de fibre dans le béton	54
Figure IV.01 :	Mesure d'affaissement au cône d'Abrams	58
Figure IV.02:	Mesure de la masse volumique à l'état frais	59
Figure IV.03:	Machine d'essai de compression	60
Figure IV.04:	éprouvettes cylindriques de diamètre 16 cm et de hauteur 32cm	60
Figure IV.05:	Machine d'essai de Traction par fendage	61
Figure IV.06:	Machine d'essai de Traction par flexion	62
Figure IV.07:	Mesure de la masse volumique du béton durci	63
Figure IV.08:	Illustre les différents facteurs influant sur le comportement d'un béton	63
Figure IV.09 :	Illustre les différents facteurs influant sur le comportement d'un béton renforcé de fibres	66
Figure IV.10:	Contribution des fibres dans le comportement à la traction	67
Figure IV.11 :	Variation de la résistance à la flexion en fonction du% en masse des fibres	68
Figure IV.12:	Influence du % des fibres sur la résistance à la flexion	68
Figure V.01 :	la courbe granulométrique	80
Figure V.02:	BA	80
Figure V..03:	BE	80
Figure V.04:	Procédure de la préparation de va calcinée	81
Figure V.05 :	Déchet d'acier	82

Figure V.06 :	essai de compression	84
Figure V.07:	histogramme de MA compression 10%, 15%, 20%.	85
Figure V.08:	histogramme ME compression 10%, 15%, 20%	85
Figure V.09 :	essai de traction	86
Figure V.10	courbes comparatives de compression du MA, ME, MT	87
Figure V.11:	histogramme de MA de flexion 10%, 15%, 20%	87
Figure V.12 :	histogramme de ME de flexion 10%, 15%, 20%	88
Figure V.13 :	essai d'affaissement	90
Figure V.14:	essai de compression	90
Figure V.15:	la variation de la masse volumique BFA ,BFE à l'état frais	91
Figure V.16 :	la variation de la masse volumique BFA à l'état durci	92
Figure V.17:	la variation de la masse volumique BFE à l'état durci	93
Figure V.18 :	histogramme d'affaissement	94
Figure V.19 :	Courbe de la contrainte en fonction du temps de béton témoin	94
Figure V.20 :	courbe de la contrainte en fonction du temps de BFA 01%	95
Figure V.21 :	courbe de la contrainte en fonction du temps de BFA 1.5%	95
Figure V.22 :	courbe de la contrainte en fonction du temps de BFA 02%	96
Figure V.23 :	histogramme de BFA compression 7,14j,28j	96
Figure V.24 :	courbe de la contrainte en fonction du temps de BFE 01%	97
Figure V.25 :	courbe de la contrainte en fonction du temps de BFE 1.5%	97
Figure V.26:	courbe de la contrainte en fonction du temps de BFE 02%	98
Figure V.27 :	histogramme de BFE compression 7,14j,28j	98
Figure V.28:	Histogramme comparative de BT,BFA ,BFE compression 7,14j,28j	99
Figure V.29 :	histogramme comparative de BT,BFA ,BFE flexion 7,14j,28j	99
Figure V.30 :	essai de flexion	100
Figure V.31:	histogramme de BFA flexion 7,14j,28j	101
Figure V.32:	histogramme de BFE flexion 7,14j,28j	101
Figure V.33:	L'évolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge du béton	102

Liste des tableaux

Tableau II.01:	Constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire.	03
Tableau II.02:	Résistance à la compression des ciments.	11
Tableau II.03:	Séries des tamis employés pour la détermination du module de finesse d'usable	20
Tableau II.04:	Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par G.DREUX.	24
Tableau III.1.	30Classification des ajouts selon leur réactivité.	30
Tableau III.2	Réactivité pouzzolanique hydrauliques des différents ajouts cimentaires(Thomas,2013)	31
Tableau III.3.	Classes de cendres volantes selon la norme ASTM C618	33
Tableau III.4	Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes.	46
Tableau IV-1	Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres].	52
Tableau V.1	Classe de consistance (Slump test).	58
Tableau V.01	Caractéristiques physiques.	71
Tableau V.02	Caractéristiques mécaniques.	71
Tableau V.03	Composition chimique du ciment.	72
Tableau V.04	Composition minéralogique du ciment.	72
Tableau V.05	Caractéristiques du sable de oued souf.	73
Tableau V.06	:Analyse granulométrique du sable de oued souf.	74
Tableau V.07	Caractéristiques de gravier 3/8.	74
Tableau V.08	Analyse granulométrique du sable de chalghoum laid.	75
Tableau V.09	Caractéristiques du sable corrigé.	75
Tableau V.10	Analyse granulométrique du sable corrigé.	76
Tableau V.11	:Caractéristiques du sable chelghoum laid.	76
Tableau V.12	Analyse granulométrique du gravier 3/8.	77
Tableau V.13	coefficient d'aplatissement des graviers 3/8.	77
Tableau V.14	Caractéristiques de gravier 3/8.	78
Tableau V.15	Composition chimique.	78
Tableau V.16	coefficient d'aplatissement de gravier 8/15.	79
Tableau V.17	Caractéristiques physiques.	81
Tableau V.18	Analyse granulométrique du gravier 8/15.	82
Tableau V.19	Les dosages des différents constituants de mortier.	83
Tableau V.20	Caractéristiques mécaniques.	84
Tableau .V21	Caractéristiques mécaniques.	86
Tableau V.22	Compositions des bétons.	89
Tableau V.23	Variation de l'affaissement de différents bétons.	90
Tableau V.24	Variation de la masse volumique à l'état frais de différents Bétons.	91
Tableau V.25	La masse volumique des différents bétons.	92
Tableau V.26	La résistance à la compression des différents bétons.	93
Tableau V.27	La résistance à la traction par flexion des différents.	100

INTRODUCTION GENERALE :

Les constructions en béton, subissent des dégradations multiples qui sont causées soit par la corrosion des armatures, soit par la fissuration, ou par sollicitations accidentelles...etc. Pour cela elles nécessitent une réparation adéquate (combinaison entre résistance et le coût), cette maintenance peut se faire par plusieurs méthodes on peut citer :

D'abord l'addition des fibres métalliques (déchet de copeaux d'usinage), les fibres sont ajoutées dans la matrice, non pour améliorer la résistance à la traction par flexion du béton seulement, mais surtout dans le but de contrôler la fissuration, d'empêcher la coalescence des fissures et de changer le comportement du matériau renforcé de fibres en cousant les fissures. Cependant, le béton renforcé de fibres métalliques (BFM), tel que les fibres présentent des caractéristiques, tant géométriques que mécaniques, différentes selon leur nature. Chaque type de fibre a une influence particulière sur les lois de comportement mécanique du béton, ce qui se traduit par des applications adaptées et spécifiques (dalles, dallages industriels, voussoirs, pieux, etc.) [1].

Ensuite donner une valeur ajoutée aux ajouts minéraux (la boue de dragage) dans le béton. Car dans le contexte actuel, l'Algérie est confrontée à une double problématique environnementale. D'abord, celle de la fabrication des ciments CEMI, en raison de leur teneur en clinker élevée (95% en masse) engendre un effet néfaste sur l'environnement. En effet, la production d'une tonne de clinker génère le rejet d'une tonne de CO₂ dans l'atmosphère. Pour pallier à cette problématique environnementale, une des solutions pouvant être envisagée est l'emploi d'addition minérale en substitution partielle du ciment (GARTNER, 2004 ; CASSAGNABERE, 2007). La deuxième problématique est celle de la préservation de la ressource en eau. L'Algérie compte actuellement 70 barrages en exploitation pour une capacité de stockage estimée à 7,1 milliards de m³. Mais celle-ci a tendance à diminuer à cause du phénomène d'envasement qui touche l'ensemble des barrages algériens. Des levés bathymétriques ont été réalisés en 2005 et 2006 par l'ANBT (2008) sur 57 grands barrages de cinq bassins hydrographiques et le volume total de vase est estimé à 1,1 milliards de m³, soit un comblement de 15% de la capacité totale.

Des études ponctuelles ont été menées en Algérie dans le cadre de la valorisation des sédiments de dragage dans les matériaux de construction tels que la brique et la pouzzolane artificielle comme ajout au ciment pour la fabrication du ciment composé ainsi qu'en technique routière (la valorisation comme matériau de remblaiement)

Ce travail se focalise sur la valorisation de sédiments de dragage et les fibres métalliques (de copeaux d'usinage) dans des bétons.

Ce travail comporte :

- Une étude bibliographique
- Une étude expérimentale.

Le premier chapitre décrira les constituants du béton.

La contribution de 2^{ème} chapitre consiste principalement en lumière sur les ajouts cimentaires.

Le 3^{ème} chapitre présente une revue bibliographique sur les fibresLe chapitre quatre est consacré aux propriétés des bétons

Et en dernier lieu le chapitre cinquième présente la partie pratique :

Essais, résultats et interprétation

Et on termine avec une conclusion générale

I. GENERALITE SUR LE BETON :

II. INTRODUCTION :

Le béton est un matériau hétérogène multiphasique poreux dont les constituants présentent des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques différentes. Il est constitué d'un mélange de granulats et d'une pâte (ciment, d'eau et éventuellement d'ajouts).

Les granulats sont des matériaux inertes qui, agglomérés par un liant, constituent le squelette du béton, lui confèrent sa compacité, participent à sa résistance mécanique et atténuent les variations volumiques lors du durcissement.

La pâte de ciment est le siège des réactions d'hydratation des constituants qui conduisent aux processus de prise et de durcissement et la transforment en matrice liante.

Les adjuvants fournissent aux formulations de béton une gamme étendue, variée et nuancée de possibilités pour faciliter la mise en œuvre des bétons, adapter leur fabrication au temps froid ou au temps chaud, réduire les coûts de mise en œuvre, améliorer les propriétés du béton durci, voire même lui conférer des propriétés nouvelles [2].

III. LES COMPOSANTS D'UN BETON :

Le béton est un mélange de plusieurs composants : ciment, eau, sable, gravier et, le plus souvent, adjuvants (figure III.1) qui constituent un ensemble homogène. Les composants sont très différents : leurs masses volumiques vont, dans les bétons courants, de 1 (eau) à 3 (ciment) t/m³ ; les dimensions de leurs grains s'échelonnent de 0.5 µm (grains les plus fins du ciment) à 25 mm (gravillons). Mais cette liste s'allonge très vite dès que des propriétés particulières sont visées, on utilise alors des fines complémentaires ou additions minérales [2].

Tableau I.1: *Constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un Béton ordinaire [3].*

<i>constituants</i>	<i>Volume (%)</i>	<i>Poids (%)</i>
<i>granulats</i>	60 - 78	65 - 85
<i>ciment</i>	7 - 14	9 - 18
<i>eau</i>	14 - 22	5 - 9
<i>air</i>	1 - 6	/

La confection d'un béton approprié à sa destination consiste, à déterminer et à optimiser la composition granulaire et le dosage des divers constituants.

Dans les bétons les plus simples, le squelette granulaire est composé de deux coupures seulement, un sable et un gravier. Le ciment et l'eau de gâchage, dont les proportions relatives en masse sont fixées par le rapport E/C, vont former, avec les adjuvants éventuels, la pâte de ciment qui constituera le liant du béton. Ce rapport E/C joue un rôle primordial durant les étapes de vie du béton, l'eau en excès le rend plus fluide à l'état frais mais diminue les résistances du béton durci. Des additions minérales (cendres volantes, fumées de silice, laitiers, fillers,...) peuvent être rajoutées dans le but de modifier les propriétés du béton. L'utilisation de ces éléments fins est toujours combinée à l'emploi de superplastifiants pouvant réduire ainsi la quantité d'eau nécessaire à l'atteinte d'une fluidité suffisante. Le béton est donc un matériau hétérogène dont les constituants présentent des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques différentes et dans lequel chacun de ces composants joue un rôle bien précis dans le mélange [3].

III .1. CIMENT :

III .1.1. Définition :

C'est un liant minéral obtenu par décarbonatation d'un calcaire et décomposition d'une argile à une température avoisinant, les 1450 °C .Broyés sous forme d'une poudre fine souvent d'une couleur grise, en contact avec l'eau forment des minéraux hydratés très stables.

Les travaux effectués [4] ont montré que les principaux composés du ciment portland sont :

- Le Silicate Tricalcique (Alite) : $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C₃S).
- Le Silicate Bicalcique (Belite) : $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (C₂S).
- L'Aluminate Tricalcique : $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ (C₃A).
- L'Alumino-Ferrite Tétracalcique : $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C₄AF).

III .1.2. LES CARACTERISTIQUES DU CIMENT :

Le ciment se caractérise par un certain nombre de critères mesurés de façon conventionnelle, soit sur la poudre, soit sur pâte, soit sur « mortier normal » (mélange normalisé de ciment, sable et eau défini par la norme NF EN 196-1). Ces critères constituent les caractéristiques du ciment. Elles sont d'ordre chimique, minéralogique, physique et mécanique. [5]

III .1.3..caracteristiques chimiques et mineralogiques :

III .1.3.1.Composition chimique élémentaire Elle se caractérise sur le teneur suivant :

- les oxydes : Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 et CaO ;
- les éléments secondaires : Na_2O , K_2O , Cl , MgO , SO_3 ... ;
- l'indice d'hydraulicité ou indice de Vicat est caractérisé par :

$$i = \frac{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}{CaO + MgO}$$

❖ la perte aux feux PF

a) Chaux de saturation :

C'est une grandeur qui est déduite des teneurs en silice, en alumine et en oxyde de fer du ciment ou du clinker. C'est la quantité maximale de chaux susceptible d'être fixée par les constituants acides (SiO_2 , Al_2O_3 et Fe_2O_3) contenus dans le mélange.

Deux cas peuvent se présenter :

Si le mélange est riche en alumine (mélange normal), on utilisera la formule :

$$CaO_{sat} = 2,8 SiO_2 + 1,65 Al_2O_3 + 0,35 Fe_2O_3$$

Si le mélange est riche en fer, on utilisera la formule :

$$CaO_{sat} = 2,8 SiO_2 + 1,1 Al_2O_3 + 0,7 Fe_2O_3$$

Tout ciment et tout clinker ou encore leur farine crue sont caractérisés par trois grandeurs :

- le module de chaux MC,
- le module de silice MS,
- le module d'alumine MA

Ces modules sont des valeurs requises en rapport avec la composition minéralogique et les performances mécaniques attendues du ciment.

❖ Module de chaux MC :

C'est le rapport exprimé en pourcentage, de la teneur en chaux du mélange et de la chaux de saturation :

$$Mc = \frac{CaO}{CaO_{sat}} \times 100$$

❖ **Module de silice MS :**

Il renseigne sur le rapport entre la quantité de silicate (provenant de SiO₂) et celle d'aluminate (provenant d'Al₂O₃ et de Fe₂O₃) contenus dans le ciment ou le clinker.

$$Ms = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

❖ **Module d'alumine MA :**

C'est le rapport entre la quantité d'alumine et l'oxyde de fer, il concerne particulièrement le mélange cru qu'on va cuire, il renseigne sur l'aptitude du mélange à la cuisson car l'oxyde de fer est un fondant, donc plus le mélange est riche en fer, plus il sera facile à cuire mais il sera moins résistant.

$$MA = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

En termes de cimentier :

Si MA < 0,638; le mélange est riche en fer

Si MA > 0,638; le mélange est dit normal

MA varie en général de 1,2 à 2,5 et de 1,5 à 2 pour les ciments Portland courants.

1.2 Composition minéralogique (formule de BOGUE) :

Les principaux constituants minéralogiques du clinker et/ou du ciment sont par ordre d'apparition C₄AF, C₃A ou C₂F, C₂S et C₃S. En plus comme la cuisson n'est jamais parfaite, le ciment ou le clinker contient toujours de la chaux libre. Les systèmes d'équations établies par BOGUE permettent d'établir la composition minéralogique du ciment ou du clinker. L'ensemble de ces équations appelé formule de Bogue vérifie le principe de combinaison de la chaux avec les constituants acides. L'application de la formule de BOGUE considère quatre cas possibles de mélange :

a) Quantité insuffisante de chaux : MC ≤ 90

$$C_4AF = 3,04 Fe_2O_3$$

$$C_5A_3 = 4,88 SiO_2 + 4,31 Al_2O_3 + 0,92 Fe_2O_3 - 2,61 CaO$$

$$C_3A = 3,61 CaO - 6,74 SiO_2 - 3,81 Al_2O_3 - 2,96 Fe_2O_3$$

$$C_2S = 2,87 SiO_2$$

❖ *Théoriquement, il n'y a pas de chaux libre C₂S ne peut se transformer en C₃S*

b) *Cas d'un mélange normal* : $90 < MC < 100$, $MA > 0.638$

$$C_4AF = 3,04 Fe_2O_3$$

$$C_3A = 2,65 Al_2O_3 - 1,69 Fe_2O_3$$

$$C_3S = 4,07CaO - 7,61 SiO_2 - 6,72 Al_2O_3 - 1,43Fe_2O_3$$

$$C_2S = 2,87 SiO_2 - 0,75 C_3S$$

❖ *Théoriquement, il n'y a pas de chaux libre :*

c) *Cas d'un mélange sursaturé en chaux* : $MC > 100$ et $MA > 0.638$

Il existe de chaux libre

$$C_4AF = 3,04 Fe_2O_3$$

$$C_3A = 2,65 Al_2O_3 - 1,69 Fe_2O_3$$

$$C_3S = 3,80 SiO_2$$

$$CaOl = CaO - CaOsat$$

d) *Cas d'un mélange riche en fer*: $MC \leq 100$ et $MA \leq 0.638$

$$C_4AF = 4,77 Al_2O_3$$

$$C_2F = 1,70 Fe_2O_3 - 2,67 Al_2O_3$$

$$C_3S = 4,07 CaO - 7,61 SiO_2 - 4,48 Al_2O_3 - 2,86 Fe_2O_3$$

$$C_2S = 2,87 SiO_2 - 0,75 C_3S$$

Théoriquement, il n'y a pas de chaux libre

III .1.4..CARACTERISTIQUES PHYSIQUES :

III.1.4..1. Finesse de mouture :

Elle est caractérisée par la surface spécifique ou surface développée totale de tous les grains dans un gramme de matériau sous forme de poudre. La notion la plus utilisée est la surface spécifique de BLAINE notée SSB. Elle s'exprime en cm^2/g . Suivant le type de ciment, cette grandeur est généralement comprise entre 2800 et 5000 cm^2/g .

III .1.4.2. Masses volumiques :

a) Masse volumique apparente :

Elle représente la masse de la poudre de ciment par unité de volume, les vides entre les grains inclus. Elle est de l'ordre de 1 Kg / L en moyenne pour un ciment.

b) Masse volumique absolue (poids spécifique) :

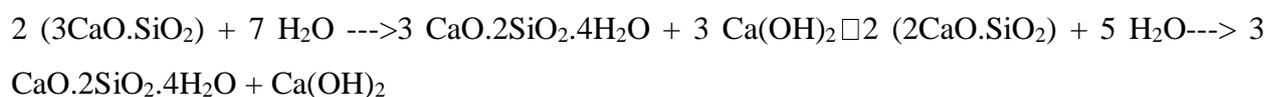
Elle représente la masse de tous les grains solides contenus dans une unité de volume, les vides entre les grains exclus. Elle varie de 2,9 à 3,15 Kg / L suivant le type de ciment. Un ciment de faible poids spécifique ($d < 2,9$) indique une forte concentration en produits d'addition ou une mauvaise cuisson pour son clinker.

III.1.4.3. Prise et durcissement des ciments (norme NF EN 196-

3)a) Hydratation :

En présence d'eau, les sels minéraux amorphes, anhydres et instables s'hydratent ; il se produit alors une cristallisation qui aboutit à un nouveau système de constituants hydratés stables ; la formation de cristaux en aiguilles plus ou moins enchevêtrées produit la « prise ».

Voici l'équation d'hydratation de C3S et C2S:



b) Prise :

Le début de prise correspond au moment où l'on constate une augmentation relativement brusque de la viscosité de la pâte avec échauffement ; on le détermine à l'aide de « l'aiguille de Vicat ».

La fin de prise correspond au moment où la pâte est devenue un bloc rigide ; elle ne peut se définir avec précision.

Le temps de début de prise varie avec le type du ciment, mais pour la plupart des ciments courants, le début de prise à 20°C se situe entre 2 et 5 heures.

c) Durcissement :

Après la prise, le phénomène d'hydratation se poursuit ; c'est la période de durcissement. Elle est beaucoup plus longue ; pour les ciments à durcissements rapide on obtient après quelques jours

la presque totalité de la résistance, mais pour d'autres ciments le durcissement se poursuit pendant des mois.

d) Fausse prise :

Dans la composition des ciments rentre en général un peu de gypse. Si les clinkers sont trop chauds ou s'échauffent trop au cours du broyage, il se forme alors du plâtre dont la prise très rapide donne l'impression d'un début de prise du ciment, c'est « la fausse prise ». Dans ce cas, il ne faut pas ajouter d'eau mais augmenter la durée de malaxage.

III.1.4.4.L'expansion (NF EN 196-3)

C'est un phénomène qui se passe au cours de la prise et le durcissement du ciment par une augmentation de volume due à un excès de sulfates, de chaux libre ou de magnésie. Il permet de s'assurer la stabilité du ciment. L'expansion ne doit pas dépasser 10mm sur pâte pure pour tous les ciments (EN 197 – 1).

III.1.4.5.Le retrait (NF P 15 433)

C'est un phénomène inverse de l'expansion c'est-à-dire la diminution de volume durant la prise et le durcissement. La mesure du retrait est effectuée sur prisme ou éprouvette prismatique de mortier normal $4 \times 4 \times 16$ cm. Suivant le type de ciment, le retrait est limité à 0,8mm/m ou à 1mm/m.

III.1.4.6.Eau de consistance normale (NF EN 196 – 1)

Elle caractérise la quantité d'eau utile pour obtenir une consistance normale pour un mortier normal.

III.1.4.7.CARACTERISTIQUES MECANIKES

Elles sont définies par la capacité d'un matériau à résister à toute sollicitation extérieure impliquant une force. La plus importante, pour les ciments, est la résistance à la compression simple. Quelque fois, il y a lieu de déterminer la résistance à la traction par flexion et la résistance à l'usure. Conformément à la norme NF EN 196 – 1, la classe de résistance d'un ciment est définie par la valeur minimale de la résistance mécanique à la compression simple du

mortier normal à 28 jours d'âge et exprimée en MPa. et d'autres éléments tels que les sulfates, les alcalins ... etc.

La pâte du ciment est le constituant à l'origine de la cohésion du béton, elle représente 20% à 50% du volume total, se caractérise par sa capacité à s'hydrater et à former une matrice solide qui lie les granulats entre eux.

La pâte du ciment se constitue du ciment anhydre, d'eau et d'éventuels adjuvants additifs [6]. Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium. Dans les ciments, les aluminates peuvent également intervenir dans le processus de durcissement. La somme des proportions de l'oxyde de calcium (CaO) et du dioxyde de silicium (SiO₂) réactifs doit être d'au moins 50 % en masse.

III.2. CLASSIFICATION DES CIMENTS :

➤ Classification suivant la composition :

La norme européenne [7] donne 27 ciments courants, qui sont regroupés en cinq principaux types à savoir :

- CEM I : Ciment Portland Artificiel.
- CEM II : Ciment Portland Composé.
- CEM III : Ciment de Haut Fourneau.
- CEM IV : Ciment Pouzzolanique.
- CEM V : Ciment aux Laitiers et aux Cendres.

Ces ciments sont différents par le type d'ajout, on trouve :

► **Laitier Granulé De Haut Fourneau** : Obtenu par refroidissement rapide du laitier fondu provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau ; il contient au moins deux tiers en masse de laitier vitreuse et présente des propriétés hydrauliques, après avoir subi une activation convenable.

► **Matériaux Pouzzolaniques** : Sont des substances naturelles ou artificielles siliceuses ou silico-alumineuses, ou une combinaison de celles – ci contenant de l'oxyde de fer (Fe₂O₃) et d'autres oxydes mais la teneur en (SiO₂) réactif doit être au moins égale à 25 % en masse.

► **Cendres Volantes** : produits pulvérulents de grande finesse proviennent du dépoussiérage des gaz des chaudières des centrales thermiques. On distingue deux familles [8] :

- ✓ **Cendres Volantes Siliceuses** : Sont principalement des particules sphériques ayant des propriétés pouzzolaniques, constituées essentiellement de silice (SiO_2) et d'alumine (Al_2O_3)
- ✓ **Cendres Volantes Calcique** : Présentent des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolanique, contenant une teneur en oxyde de calcium (**CaO**) réactif >10% en masse, le reste était de la silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3), d'oxyde de fer (Fe_2O_3).

► **Filler Calcaire** : est un matériau très finement broyé, il a pour rôle de remplir les vides entre les sables et les graviers, tout en présentant une certaine activité physico- chimique en favorisant l'hydratation des silicates tricalciques [9].

► **Fumée De Silice** : provient de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours. Elle est formée de particules sphériques contenant au moins 85 % en masse en silice amorphe [10].

- **Classification suivant les résistances à la compression**

La norme européenne [11] classes les ciments courant d'après leur résistance à la compression voir (Tableau I.2)

Tableau I.2: Résistance à la compression des ciments [11].

Classe de résistance	Résistance à la compression (MPa)			
	Résistance à court terme		Résistance courante	
	2 jours	7 jours	28 jours	
23.5N	-	≥ 16.0	≥ 32.5	≤ 52.5
32.5R	≥ 10.0	—	≥ 42.5	≤ 62.5
42.5 N	≥ 10.0	—	≥ 52.5	—
42.5 R	≥ 20.0	—		
52.5 N	≥ 20.0	—		
52.5 R	≥ 30.0	—		

IV.L'EAU DE GACHAGE (NF EN 1008):

L'eau est un des ingrédients essentiels du béton, elle intervient à toutes les étapes de la vie du matériau par ses propriétés physico-chimiques et mécaniques. L'eau introduite dans le béton lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère au béton frais des propriétés rhéologiques permettant son écoulement et son moulage et une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation. L'aspect fondamental du dosage en eau reste celui de la recherche d'un optimum sur un objectif contradictoire : une meilleure résistance obtenue en réduisant la quantité d'eau et une amélioration de l'ouvrabilité en augmentant la teneur en eau. C'est lors de la recherche de cet optimum que les adjuvants peuvent jouer un rôle [3].

Le rapport E/C est un critère important des études de béton ; c'est un paramètre essentiel de l'ouvrabilité du béton et de ces performances : résistance à la compression, durabilité.

Toutes les eaux ne peuvent pas être utilisées pour gâcher le béton. Certes, l'eau potable distribuée par le réseau du service public est toujours utilisable mais, de plus en plus souvent, nous sommes placés devant la nécessité d'utiliser une eau non potable. La norme [12], a permis de préciser à quelles conditions une eau est utilisable.

V.ADDITIONS MINERALES :

Différentes additions peuvent être mélangées au ciment pour modifier les propriétés du béton frais et durci [13]. Les principales sont les fillers calcaires, la fumée de silice, la pouzzolane naturelle le laitier de haut fourneau et les cendres volantes. Ces additions minérales confèrent aux bétons frais de meilleures qualités de maniabilité, augmenter la cohésion et entraînent une diminution du ressuage et de la ségrégation du béton [14]. D'un autre côté, les additions minérales améliorent aussi l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques [15].

VI. LES GRANULATS :

VI. 1. Définition

La plupart des définitions relatives aux granulats sont empruntées du texte de la norme [16]. Un granulat est un ensemble de grains compris entre 0 et 125 mm, ci des matériaux pierreux de petites dimensions, produits par l'érosion ou le broyage mécanique (concassage) des roches. Ce sont des matériaux inertes entrant dans la composition des bétons et mortiers. Ils constituent le squelette du béton et ils représentent, environ 80 % du poids total du béton. Ils sont constitués de sables (Gros et Fin) et de gravier. Cependant, les granulats doivent satisfaire à certaines exigences de qualité pour qu'ils soient utilisés dans le béton. Il y a deux Intérêts d'utiliser des granulats dans le béton :

Le 1^{er} économique : Diminution de la quantité de liant (ciment et addition) ; Le 2^{eme} technique : Limitent les variations dimensionnelles dans le béton (les granulats sont plus rigides que la pâte de ciment) [17].

VI.2. Différents types de granulats

Les granulats utilisés pour le béton sont d'origine naturelle, artificielle :

- Naturels : lorsqu'ils sont issus de roches meubles ou massives et qu'ils subissent aucun traitement autre que mécanique (réduction de dimensions) ;
- Artificiels : lorsqu'ils proviennent de la transformation à la fois thermique et mécanique de roches ou de minerais.

A. *Granulats naturels courants*

Ils n'ont subi que des opérations de transformation de type mécanique: concassage, criblage, lavage... On les distingue selon leur origine :

❖ *Origine minéralogique*

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

❖ Origine « d'extraction »

Indépendamment de leur origine minéralogique, on classe les granulats en deux catégories:

❖ Les granulats alluvionnaires, 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 cribléton 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 [17].

Trois catégories de granulats roulés existent dans la nature :

- ✓ Les granulats de rivière (d'oued).
- ✓ Les granulats de mer.
- ✓ Les granulats de dunes.



Figure I.1 : Exemple des granulats alluvionnaires naturels [17].

❖ Les granulats concassés (de carrière) : sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donnent 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. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres: origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage [18].



Figure I.2 : Exemple des granulats de carrière [18].

Ce type de granulats prouve une très bonne liaison avec la pâte de ciment à cause de leur texture de surface et leur rugosité. D'autre part ils nécessitent plus d'eau pour une maniabilité donnée et ceci est due à leurs angularités et donc à leurs surfaces spécifiques étendues [19].

B. Les granulats artificiels

On distingue :

❖ Sous-produits industriels, concassés ou non

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

La masse volumique apparente est supérieure à 1250 kg/m^3 pour le laitier cristallisé concassé, 800 kg/m^3 pour le granulé [20].

❖ Granulats à hautes caractéristiques élaborés industriellement

Il s'agit de granulats élaborés spécialement pour répondre à certains emplois, notamment granulats très durs pour renforcer la résistance à l'usure de dallages industriels, ou granulats réfractaires [21].

❖ Granulats allégés par expansion ou frittage

Ces granulats [20], très utilisés dans de nombreux pays comme l'URSS ou les Etats- Unis, n'ont pas eu en France le même développement, bien qu'ils aient des caractéristiques de résistance,

d'isolation et de poids très intéressants. Les plus usuels sont l'argile ou le schiste expansé et le laitier expansé. D'une masse volumique variable entre 400 et 800 kg/m³ selon le type et la granularité, ils permettent de réaliser aussi bien des bétons de structure que des bétons présentant une bonne isolation thermique. Les grains de poids intéressants puisque les bétons réalisés ont une masse volumique comprise entre 1200 et 2000 kg/m³.

❖ *Les granulats très légers :*

Ils sont d'origine aussi bien végétale et organique que minérale (bois, polystyrène expansé). Très légers (20 à 100 kg/m³), ils permettent de réaliser des bétons de masse volumique comprise entre 300 et 600 kg/m³. On voit donc leur intérêt pour les bétons d'isolation, mais également pour la réalisation d'éléments légers : blocs coffrants, blocs de remplissage, dalles, ou rechargements sur planchers peu résistants [21].

VI.3. CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DES GRANULATS :

Les granulats utilisés dans la construction doivent répondre à des impératifs de qualité et à des caractéristiques propres à chaque usage. Les propriétés des granulats sont liées aux caractéristiques intrinsèques des roches originales et aux caractéristiques de fabrication.

Le prélèvement d'un échantillon pour les caractérisations des granulats doit se faire conformément aux normes [22,23] relatives au prélèvement par "échantillonneur" ou par "quartage".

VI.4. Caractéristiques géométriques

VI.4.1. Classe granulaire

Les granulats sont classés en fonction de leurs grosseurs déterminées par criblage sur les tamis à mailles dont la dimension intérieure est exprimée en millimètres (mm) [24].

Le terme granulat d/D est réservé aux granulats dont les dimensions s'étalent de d pour les petits éléments à D pour les gros éléments. La norme expérimentale [25] précise les appellations des différentes classes granulaires avec leurs caractéristiques dimensionnelles.

La norme [25] distingue quatre familles de granulats: les fillers, les sablons, les sables et les gravillons, et également quatre catégories pour les granulats naturels A, B, C et D [24].

- **Filler 0/D** pour $D < 2$ mm et ayant au moins 70 % de grains passant au tamis de 0,63 mm ;
- **Sablon 0/D** pour $D < 1$ mm et ayant au moins 70 % de grains passant au tamis de 0,63 mm ;
- **Sable 0/D** lorsque D est tel que : $1 \text{ mm} < D \leq 6,33 \text{ mm}$;
- **Graves 0/D** lorsque $D > 6,3$ mm

- **Gravillons d/D** lorsque $d \geq 1$ mm et $D \leq 125$ mm ;
- **Ballast d/D** lorsque $d \geq 25$ mm et $D \leq 50$ mm.

la classe des granulats est définie par tamisage au travers d'une série de tamis dont les mailles ont les dimensions suivantes en (mm) : [24]

0.063 ; 0.08 ; 0.100 ; 0.125 ; 0.160 ; 0.200 ; 0.250 ; 0.315 ; 0.40 ; 0.50 ; 0.63 ; 0.80 ; 1.00 ;
1.25 ; 1.60 ; 2.00 ; 2.50 ; 3.15 ; 4.00 ; 5.00 ; 6.30 ; 8.00 ; 10.00 ; 12.50 ; 16.00 ; 20.00 ; 25.00 ;
31.50 ; 40.00 ; 50.00 ; 63.00 ; 80.00 ; 100.00 ; 125.00.

VI.4.2. Granulométrie :

L'analyse granulométrique est régie par les normes [26,27]. Les granulats sont désignés par d et D , ou d et D représentent la plus petite et la plus grande des dimensions demandées [28].

L'analyse granulométrique consiste à fractionner le matériau en différentes coupures au moyen de tamis [29]. Les masses des différents refus sont rapportées à la masse initiale sèche du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe granulométrique) [28]. Une bonne continuité de la courbe granulométrique est nécessaire pour obtenir un béton maniable [24].

Les tamis sont définis par la norme [27]. Les ouvertures de mailles permettent un classement granulaire. Les dimensions successives des mailles suivent des progressions géométriques [28] :

De $10\sqrt{10} \approx 1.25$ pour l'ancienne série française

De $10^{1/20} \approx 1.25$ pour la nouvelle série européenne

- Le module d'un tamis dans le cas de l'ancienne série française, est le produit par 10 du logarithme décimal de l'ouverture exprimée en micron augmentée d'une unité.
- Le tamisage est l'opération qui consiste à séparer un matériau en différentes fractions au moyen d'une série de tamis de caractéristique connues [28].



Figure I.3 : série des tamis pour la granulométrie [28].

- En appelle tamisât la partie des granulats qui est passée à travers le tamis et refus la partie qui est restée sur le tamis [28].



Figure I.4: L'analyse granulométrique par tamisage [28].

➤ La courbe granulométrique donne les pourcentages cumulés en masse, de grains passant dans les tamis successifs.

On trace la courbe granulométrique sur un graphique comptant en ordonnée le pourcentage des tamis sous les tamis dont les mailles D sont une progression géométrique de raison [24].

La figure suivante montre des exemples de fuseaux granulaires à l'intérieur desquels doivent se trouver les fuseaux de fabrication de granulats.

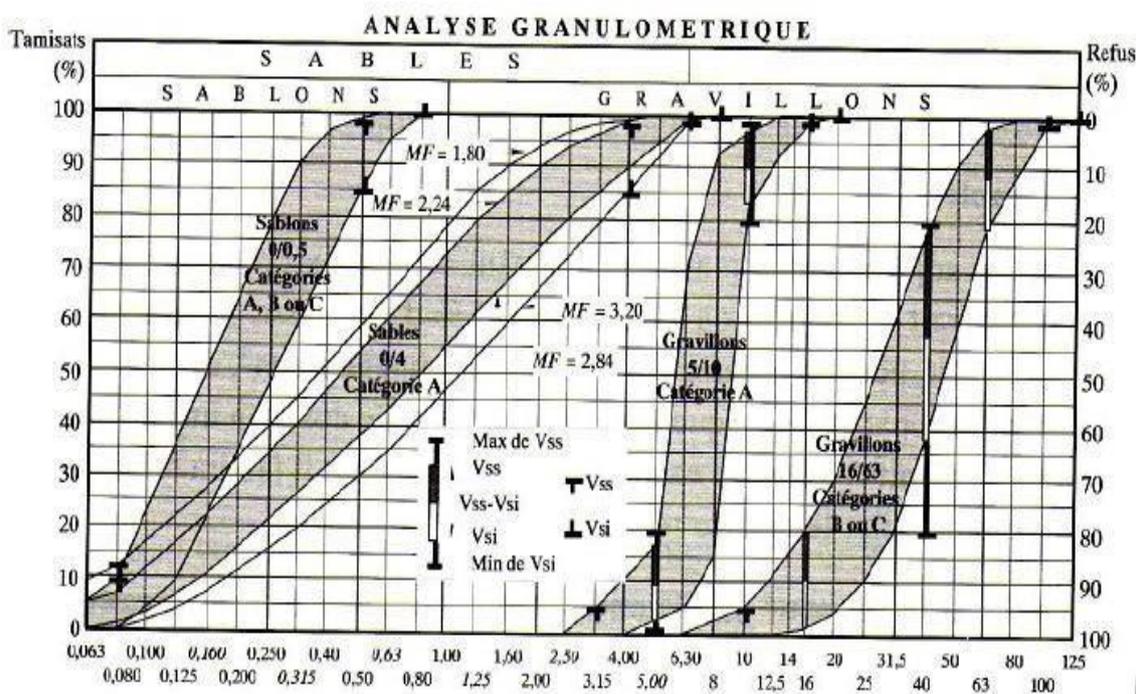


Figure I.5 : Exemple de courbe granulaire des granulats pour béton [24].

❖ **Module de finesse d'un sable (Mf):**

Le module de finesse est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments des fins dans un granulat. Le module de finesse est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis [30]. Le Tableau I.2 présente la série des tamis employés pour la caractérisation du module de finesse selon la norme prise en compte [24, 28].

Le Module de finesse d'un sable donne par la formule suivant :

$$MF = \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis}$$

Tableau I.3 : Séries de tamis employés pour la détermination du module de finesse du sable.

01 Tamis	0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 et 5 mm	[28]
02 Tamis	0,125 - 0,25 - 0,5 - 1 - 2 et 4 mm	[29]

Des recherches sur l'influence de la finesse des sables sur les diverses qualités du béton ont conduit à délimiter certains fuseaux de granularités admissibles.

- La partie centrale A ($2.2 < MF < 2.8$) convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limité [24].
- La partie central B ($1.8 < MF < 2.2$) est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance [24].
- La partie central C ($2.8 < MF < 3.2$) correspond à des sables à utiliser pour la recherche de résistance élevées, mais on aura, en général, une moins bonne ouvrabilité et des risques de ségrégation [24].

Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse d'environ 2.2 à 2.8 ; au-dessus, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessous, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité [24].

❖ *La Correction d'un sable*

Il n'est pas rare d'avoir un sable disponible présentant un "Mf" non satisfaisant. Une façon de le rendre convenable consiste à le mélanger à un autre sable de telle sorte que la combinaison des deux "Mf" permette l'obtention du "Mf" escompté. On utilise pour cela la méthode d'ABRAMS. C'est une règle de mélange de granulats basée sur l'obtention d'un module de finesse global à partir de la connaissance des modules de finesse des granulats à mélanger.

On dispose de deux sables "S1" et "S2" de module de finesse respective "MF₁" et "MF₂". On désire obtenir un mélange granulaire "S" de module de finesse "Mf".

Les pourcentages de "S1" et "S2" nécessaires pour obtenir le mélange S sont tels

$$S1 = \frac{MF1 - MF}{MF1 - MF2} \times 100 \qquad S2 = \frac{MF - MF2}{MF1 - MF2} \times 100$$

❖ *Le coefficient d'aplatissement (A)*

Le coefficient d'aplatissement caractérise donc la forme des granulats à partir de leur plus grande dimension et de leur épaisseur est par définition le pourcentage d'éléments tels que $G/E > 1.58$, [25]. (G représentant en fait la dimension de la maille carrée minimale au travers de laquelle passe l'élément). Le coefficient A est déterminé selon la norme [31] par un double tamisage. Puis par un second tamisage des refus retenus sur les différents tamis sur une série de grilles à fentes parallèles, le rapport entre les dimensions des tamis et des grilles étant de

1.58. L'ancienne norme [P 18 541] spécifiait que la valeur du coefficient d'aplatissement doit être $A \leq 30 \%$ [24].

- ❖ **La forme des granulats influence:** La facilité de mise en œuvre et le compactage du béton et La compacité du mélange, donc le volume des vides à remplir par la pâte de ciment.
- ❖ **L'état de surface des grains influence:** La compacité du mélange et l'adhérence du granulat à la pâte de ciment et La forme est d'autant meilleure qu'elle est proche d'une sphère ou d'un cube.

VI.5. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

VI.5.1. *La masse volumique apparente (en vrac)*

La masse volumique en vrac doit être déclarée et déterminée conformément à la norme européenne [32]. La masse sèche des granulats remplissant un conteneur spécifié est déterminée par pesage et la masse volumique en vrac correspondante est calculée. Le pourcentage de porosité inter granulaire se calcule à partir de la masse volumique en vrac et de la masse volumique réelle.

La Masse Volumique Apparente donne par la formule suivant :

$$MV_{app} = \frac{M2 - M1}{V}$$

L'essai de La Masse Volumique Apparente doit être réalisé selon la norme [32].



Figure I.6 : détermination de la masse volumique apparente[32].

VI.5.2. La Masse Volumique Absolue :

La masse volumique Absolue doit être déclarée et déterminée conformément à la norme européenne [32]. La Masse Volumique Absolue donne par la formule suivant :

$$MV_{abs} = \frac{M}{V2 - V1}$$

L'essai de La Masse Volumique Absolue doit être réalisé selon la norme [33].



Figure I.7 : détermination de la masse volumique absolue[32].

VI.5.3. PROPRETE DES GRANULATS :

La qualité des granulats utilisés dans les bétons est un facteur très important. Trois grandes catégories d'impuretés peuvent être rencontrées dans les granulats: matières organiques, les argiles et les matériaux fins (issues du concassage ou du broyage des roches). Leur présence à la surface des granulats interférant avec le processus d'hydratation du ciment et empêche la bonne adhérence granulats-liants, entraînant ainsi une chute des résistances mécaniques et des variations de propriétés rhéologiques des mélanges. De telles impuretés semblent être plus courantes dans les sables que dans les gros granulats, plus facilement lavés [19].

Pour les cailloux et gravillons : c'est le pourcentage de passant au tamis de 0,5mm ; le seuil est fixé à 2 % et 5 % pour des granulats concassés [17].

Pour un sable : la propreté est définie par l'essai d'équivalent de sable et l'essai au bleu de méthylène [17].

- **Equivalent de sable (ES)**

L'équivalent de sable est un rapport conventionnel volumétrique multiplié par 100 entre les éléments dits sableux et les éléments plus fins. Il existe deux types de mesures en fonction du degré d'argilosité du matériau : l'essai visuel et l'essai au piston [28, 29]

Actuellement, trois textes réglementaires décrivent cet essai :

- Équivalent de sable [34] ;
- Équivalent de sable à 10% de fines [35] ;
- Évaluation des fines - équivalent de sable [36].

L'équivalent de sable est un rapport conventionnel volumique entre les grains fins et les autres. Il permet donc de caractériser l'importance des fines par une valeur numérique [28].

Cet essai rend compte globalement de la quantité des éléments les plus fins contenus dans les granulats, en exprimant un rapport conventionnel volumique entre les éléments dits sableux et les éléments plus fins (ex argile). Les éléments sableux, éléments grenus et non flocculables qui sédimentent dans le fond de l'éprouvette. Les éléments fins, éléments formant le flocculat, qui restent en suspension dans la solution [28].

Plus l'équivalent de sable est élevé, moins le matériau contient d'éléments fins nuisibles. Il s'applique assez bien aux sols faiblement plastiques et peut s'appliquer à tous les matériaux grenus. Il s'effectue sur les fractions inférieures à 5 mm [24].

L'équivalent de sable donne par la formule suivant :

$$ES = \frac{H2}{H1} \quad \text{Essai au piston} \qquad ES = \frac{H'2}{H1} \quad \text{Essai viseul}$$

L'essai de L'équivalent de sable doit être réalisé selon la norme [34].



Figure I.8 : L'essai au piston de l'équivalent de sable [34].

Tableau I.4 : Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par G. DREUX [24].

PS	Nature et qualité du sable
≤ 60	Sable argileux risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité.
$60 \leq PS \leq 70$	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement de retrait.
$70 \leq PS \leq 80$	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
$PS > 80$	Sable très propre l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

- **Essai au bleu de méthylène**

Cet essai permet contrairement à l'ES de faire la distinction entre les différents types d'argile contenus dans un sable. Le bleu de méthylène étant absorbé préférentiellement par les argiles du type Montmorillonites (argiles gonflantes et les matières organiques. Les autres argiles (kaolinites) sont peu sensibles au bleu [28].

L'essai au bleu de méthylène est pratiqué selon la norme [37] sur la fraction granulaire (0/2 mm) des sables courants (V_B) ou sur les fillers (0/0,125 mm) contenus dans une sable filerie, un gravillon ou un tout venant (V_{BF}) [29]. La valeur limite selon les spécifications pour les bétons hydraulique est égale à 01 [24].

L'essai de bleu de méthylène doit être réalisé selon la norme [37].



Figure I.9 : Appareil pour détermine la valeur de bleu méthylène [37].

VI.6. Caractéristiques mécaniques (résistance à l'usure et aux chocs)

Ce sont des essais importants pour les granulats routiers. En effet, le passage répété de véhicules conduit à émousser, à polir progressivement les granulats et ainsi à diminuer l'adhérence des pneumatiques sur la chaussée. Ces caractéristiques permettent également d'estimer la qualité des granulats utilisés dans la confection de bétons.

VI.6.1. ESSAI MICRO DEVAL

Cet essai permet de mesurer la résistance à l'usure par frottements entre les granulats et une charge abrasive. Il consiste à mesurer la quantité d'élément inférieur à 1.6 mm produite dans un broyeur, dans des conditions bien définies, à sec ou en présence d'eau. Plus le coefficient micro-Deval est élevé, meilleur est le matériau [28]. Selon les normes [38,39], doit être 35% pour les granulats naturels. Le coefficient micro-Deval (M_{DE}) donne par la formule :

$$MDE = \frac{m}{M} \times 100$$

L'essai Micro Deval doit être réalisé selon la norme [39].



Figure I.10 : Machine D'essai Micro Deval [39].

VI.6.2. ESSAI LOS ANGELES

Cet essai permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat. Il consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produite en soumettant le matériau à une série de chocs et de frottement dans la machine Los Angeles (LA). À un coefficient Los Angeles faible correspond un excellent matériau [28]. Selon les normes [40,41] Le coefficient Los Angeles doit être ≤ 40 pour les granulats naturels type B.

Le coefficient Los Angeles (**LA**) donne par la formule :

$$LA = \frac{m}{M} \times 100$$

L'essai Essai Los Angeles doit être réalisé selon la norme [41].



Figure I.11 : Machine D'essai Los Angeles [41].

CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons identifié tous les matériaux entrant dans cette composition c'est une étape nécessaire avant d'entamer l'étude expérimentale de ce béton .

I. GENERALITES :

Par combinaison avec la chaux libérée par l'hydratation de C2S et de C3S et en présence d'eau, la plupart des ajouts minéraux peut donner des composés hydratés stables. Selon la réaction pouzzolanique : silicate de calcium hydraté ou CSH → Pouzzolane + chaux + eau Remarquons que, plus la pouzzolane est fine et vitreuse, plus sa réaction avec la chaux est rapide. L'hydratation du ciment Portland libère une grande quantité de chaux, appelée Portlandite, par suite à la réaction d'hydratation du C2S et du C3S (30% de la masse anhydre du ciment). La chaux qui ne réagit pas diminue la résistance de la pâte. Dans un béton, le seul aspect positif de la présence de chaux est qu'elle maintient un pH élevé qui favorise la stabilité de la couche de l'oxyde de fer que l'on retrouve sur les armatures d'acier. Quand on fabrique des bétons, si on utilise 20 à 30% de pouzzolane, théoriquement, on pourrait faire réagir toute la chaux produite par l'hydratation du ciment Portland pour la transformée en CSH. Cependant, les conditions dans lesquelles on utilise le béton sont très différentes de cette situation idéale et la réaction pouzzolanique n'est jamais complète. 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 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 [42].

II. DEFINITION DES AJOUTS :

Les ajouts cimentaires sont des matériaux qui, combinés au ciment portland, contribuent aux propriétés du béton durci par action hydraulique ou pouzzolanique ou les deux à la fois. Les pouzzolanes naturelles, les cendres volantes, le laitier de haut fourneau granulé broyé et les fumées de silice sont des exemples courants une pouzzolane est un matériau siliceux ou alumine siliceux qui, finement divisé et en présence d'humidité, réagit chimiquement avec l'hydroxyde de calcium libéré par l'hydratation du ciment portland pour former des composés possédant des propriétés liantes

III. ORIGINE ET CLASSIFICATION DES AJOUTS CIMENTAIRES

III.1. CLASSIFICATION DES AJOUTS

Les ajouts peuvent être naturels ou artificiels, inertes ou actifs. Les ajouts peuvent réagir en tant que matériau hydraulique, hydraulique latent ou pouzzolanique, ou encore sous forme de fillers.

Une classification normalisée dans un contexte de leur utilisation dans l'industrie cimentaire qui prime l'aspect fonctionnel des ajouts, selon la norme NF EN 206-1, il existe deux types d'additions, par ailleurs, le cadre normatif français propose six matériaux répondant à la définition « additions pour béton hydraulique » à savoir :

- ❖ les additions quasiment inertes (type I) selon la norme EN 206-1
- ❖ Les additions calcaires (NF P 18-508)
- ❖ Les additions siliceuses (NF P 18-509)
- ❖ Les fillers (NF P 18-501)
- ❖ les pouzzolanes ou les additions à caractère hydraulique latent (typeII)
- ❖ La fumée de silice (NF P 18-502)
- ❖ Les cendres volantes (NF P 18-505)
- ❖ Le laitier vitrifié moulé de haut fourneau (NF P 18-506)

Tableau II.1 .Classification des ajouts selon leur réactivité. [43]

TYPE	REACTIVITE	MATERIAUX
Hydraulique	Fortement réactif	Ciments spéciaux-chaux hydraulique
Hydraulique Latent		Laitier granule-cendres volantes riches en calcium (calciques)
Pouzzolanique	Fortement réactif	Fumée de silice
	Moyenne montré actif	Cendres volantes pauvres en calcium, pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcaniques, trass phonolithe, terres a diatomées
	Faiblement réactif	Scories cristallines
Inerte	Non réactif	Fillers (farine calcaire...)

III.1.2. Les ajouts inertes de type I :

Ce sont les ajouts inertes par exemple les fillers calcaires. Leur principale fonction est un rôle de remplissage. Une partie du clinker peut être remplacée sans grand impact sur les propriétés finales par un matériau inerte comme le carbonate de calcium qui a une bonne affinité pour les hydrates de ciment. Ces matériaux ne sont pas totalement inertes puisque, ils peuvent réagir partiellement avec les phases aluminates pour former des carboaluminates de calcium qui sont les AFm les plus stables. Enfin, l'effet filler conduit à une augmentation des cinétiques d'hydratation due à l'effet physique de nucléation [44].

III.2.2. Les ajouts actifs de type II :

les ajouts de type II, sont classés en deux familles en fonction de la nature de leur activité que ça soit pouzzolanique ou hydraulique [44].

➤ **La première famille**

est composée d'ajout de types pouzzolaniques comme par exemple les cendres volantes, les fumées de silice, la pouzzolane ou le méta kaolin.

➤ **La deuxième famille**

regroupe les ajouts potentiellement hydrauliques. On distingue généralement dans les ajouts cimentaires les laitiers granulés issus de hauts-fourneaux .

Ils sont constitués de différents oxydes : CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO. [46]. présente un classement des additions minérales selon leurs réactivités pouzzolanique et hydrauliques en même temps, suivant le Tableau II.2.

Tableau II.2. Réactivité pouzzolanique e hydrauliques des différents ajouts cimentaires [45].

Ajouts minéraux	Pouzzolanité	Hydraulicité	Teneur en Calcium
Fumé de silice	XXXXX		Faible (<1 %)
Meta kaolin	XXXXX		
Cendre.V. teneur en faible	XXXX		
Cendre.V teneur en CaO faible élevée	XXX	XX	
Laitier. H.F	X	XXXX	Élevée (>30 %)

VI. LES DIFFÉRENTS TYPES D'AJOUTS

VI.1. Notation conventionnelle des ajouts minéraux.

Généralement, on utilise dans les ciments et les bétons les ajouts minéraux suivants : les cendres volantes, les fumées de silice. La pouzzolane, les laitiers de haut fourneau et les fillers calcaires.

VI.2. LES CENDRES VOLANTES :

VI.2.1. Généralités :

Lors de sa combustion dans les centrales thermiques, le charbon pulvérisé passe à travers une zone de très haute température dans le four. Les composants volatiles et le carbone sont

brûlés, tandis que les impuretés minérales telles que l'argile, le quartz et les feldspaths passent en fusion, les produits en fusion sont rapidement entraînés vers la zone froide où ils se solidifient en de petites sphères de verre. La majorité de ces sphères sont emportées par le courant gazeux vers l'extérieur. Ces cendres sont récupérées dans un précipitateur électrostatique.

Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et physiques dépendant des impuretés contenues dans le charbon utilisé.

Les particules de cendres volantes se présentent sous forme de petites sphères de diamètre allant de 1 μm à 200 μm (50 % < 30 μm). Leur surface spécifique Blaine varie entre 250 et 400 m^2/kg (domaine analogue à celui des ciments). La forme et la granulométrie des cendres volantes ont un effet important sur l'ouvrabilité et la demande en eau des bétons frais [46]

VI.2.2. Classifications des cendres volantes et l'aspect normatif

VI.2.2.1. La Norme P 18-505

Ce sont des poudres fines constituées principalement de particules vitreuses, de formes sphériques, dérivées de combustibles pulvérisés, ayant des propriétés pouzzolaniques et composées essentiellement de SiO_2 et Al_2O_3 dont la réactive est moins de 25 % (en masse). Le coefficient de prise en compte de ces additions est compris entre 0,4 et 0,6 selon l'indice d'activité à 28 jours et 90 jours des cendres volantes, déterminé selon la norme NF EN 450.

VI.2.2.2. Cendres volantes (F et C)

La norme ASTM C 618 : Spécification standard pour les cendres volantes de charbon et la pouzzolane naturelle brute ou calcinée à utiliser dans le béton. Cette spécification divise les cendres volantes en deux classes F et C en fonction de leur source et de leur composition, comme indiquée dans le tableau 2.5, qui diffèrent l'une de l'autre par leur teneur en CaO [45].

VI.2.2.3. Les cendres volantes de classe F

Les cendres volantes de classe F, contenant moins de 10 % de CaO produit de la combustion de l'antracite et du charbon bitumineux [47]

VI.2.2.4. LES CENDRES VOLANTES DE CLASSE C

Les cendres volantes de classe C, contenant entre 15 % et 35 % de CaO produit de la combustion de la lignite [47]

La majorité des cendres volantes (classes F et C) contiennent approximativement 60 % à 85 % de verre, 10 % à 30 % de phases cristallines et 10 % de carbone non calci

Tableau II.3. Classes de cendres volantes selon la norme ASTM C618 [45].

Spécification	Classe	Description	Exigences chimiques
ASTMC 618	F	Cendres volantes normalement produites à partir de charbon anthracite ou bitumineux brûlant. Les cendres volantes ont des propriétés pouzzolaniques.	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70\%$
	C	Cendres volantes normalement produites à partir de lignite ou de charbon subbitumineux possède des propriétés cimentières en plus des propriétés pouzzolaniques. Certaines cendres volantes de classe C peuvent contenir plus de 10 % de calcaire.	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 50\%$
SAA 3001	FCL CH	Cendres volantes pauvres en CaO Cendres volantes à teneur modérée CaO Cendres volantes riches en CaO	CaO < 15 % 15 % < CaO < 20 % CaO > 20 %

VI.2.2.5. Cendres volantes (V et W)

La norme européenne sur le ciment, EN 197-1 (2012) [48], considère deux groupes standard des cendres volantes ; silice (V) et calcaire (W).

Les cendres volantes siliceuses de type V : Elles présentent des propriétés pouzzolaniques et sont constituées de silice réactive entre 40 et 55 % proportion qui ne doit jamais inférieure à 25 % (en masse) et d'alumine entre 20 et 53 % et la proportion de CaO réactive doit être inférieure à 5 % de CaO réactive d'après Dreux et Festa (Dreux and Festa, 2007) et au plus 10 % CaO réactive d'après Tokyay (Tokyay, 2016) [49].

Les cendres volantes calciques de type W : Outre les propriétés pouzzolaniques, elles peuvent présenter des propriétés hydrauliques. Sont souvent moins utilisées, la teneur en silice réactive ne doit pas être inférieure à 25 % et doivent contenir plus de 10 % de CaO (Tokyay, 2016) [50] et d'après Dreux et Festa (Dreux and Festa, 2007) [50] plus de 5 % de CaO réactives.

Par définition, la silice réactive est la silice de la cendre volante traitée avec de l'acide chlorhydrique soluble dans le liquide bouillant.

La solution d'hydroxyde de potassium (KOH) et la chaux réactive correspondent à la teneur totale en chaux moins la chaux de CaCO₃ et CaSO₄ présentes dans les cendres volantes (Tokyay, 2016) [49] .

VI.3. La fumée de silice (D)

VI.3.1. Généralités

Les fumées de silice sont un sous-produit de la fabrication du silicium ou de différents alliages de ferrosilicium. Les fumées de silice sont produites lors de la réduction d'un quartz très pur par du charbon dans un four à arc, à la température de 2000 °C (Norman, 2005) [47] .

Cependant, la chimie impliquée dans le four est plus complexe. SiO vapeur et carbure de silicium (SiC) forment des produits intermédiaires. SiO vapeur qui s'échappe des contacts du four avec l'air pour former Les fumées de silice ($\text{SiO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$) (Tokyay, 2016) [49].

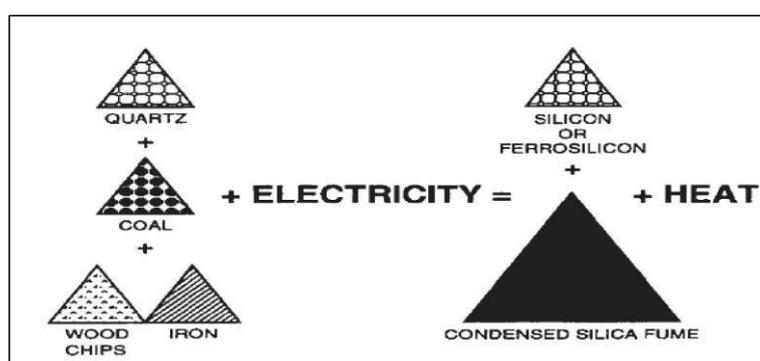


Figure II.1. Principe de production de la fumée de silice [51] .

VI.3.1. Les fumées de silice

Se présentent sous forme de fines particules sphériques d'un diamètre moyen d'environ 0,1 µm. Leur surface spécifique est de 20 m²/g à 25 m²/g. La finesse et la forme vitreuse

des fumées de silice font d'elles un produit très réactif. Leur teneur en silice vitreuse varie de 75 % à 95 %. Les fumées de silice agissent de trois façons dans les matériaux cimentaires : action physique, physicochimique et pouzzolanique [46] .

La fumée de silice est disponible dans le commerce dans les quatre types suivants. L'utilisation finale détermine sous quelle forme SF doit être fourni [52].

- ❖ Fumée de silice non densifiée (masse volumique apparente, jusqu'à 350 kg/m^3) :
il s'agit d'un « tel que produit »
- ❖ Fumée de silice densifiée ($480\text{--}720 \text{ kg/m}^3$) :
La densification de SF est effectuée dans les silos de stockage installés à la fonderie.
- ❖ Fumée de silice granulée (environ 1000 kg/m^3) : les pellets de 10-25 mm de diamètre sont formés en ajoutant de l'eau à la SF sur un granulateur à disque
- ❖ Boue de fumée de silice (masse volumique apparente : $1300\text{--}1400 \text{ kg/m}^3$, la boue contient de 50 % à 52 % de fumée de silice (masse)

VI.4. LA POUZZOLANE

VI.4.1. Généralités

Les pouzzolanes sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes [53] .

ENV 197-1 stipule que

Les matières pouzzolaniques sont des substances naturelles ou des pouzzolanes industrielles, siliceuses ou silico-alumineuses, ou une combinaison de celles-ci. Bien que les cendres volantes et les fumées de silice aient des propriétés pouzzolaniques, elles sont spécifiées dans des clauses distinctes. Les matières pouzzolaniques ne durcissent pas lorsqu'elles sont mélangées à de l'eau, mais, lorsqu'elles sont finement broyées et en présence d'eau, elles réagissent à température ambiante normale avec l'hydroxyde dissous ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) pour former des composés de silicate de calcium et d'aluminate de calcium participant au développement des résistances. Ces composés sont similaires à ceux qui se forment lors du durcissement des ciments hydrauliques [54] .

$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2$ (réactive) --- $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. (CSH stable dans l'eau). [55]

VI.4.2. Différents types de pouzzolane et l'aspect normatif

Une classification précise des pouzzolanes est presque impossible, car la définition au sens large inclut une multitude de matériaux différents. Cependant, les matériaux pouzzolaniques peuvent être divisés en deux groupes principaux : les pouzzolanes naturelles et les pouzzolanes artificielles.

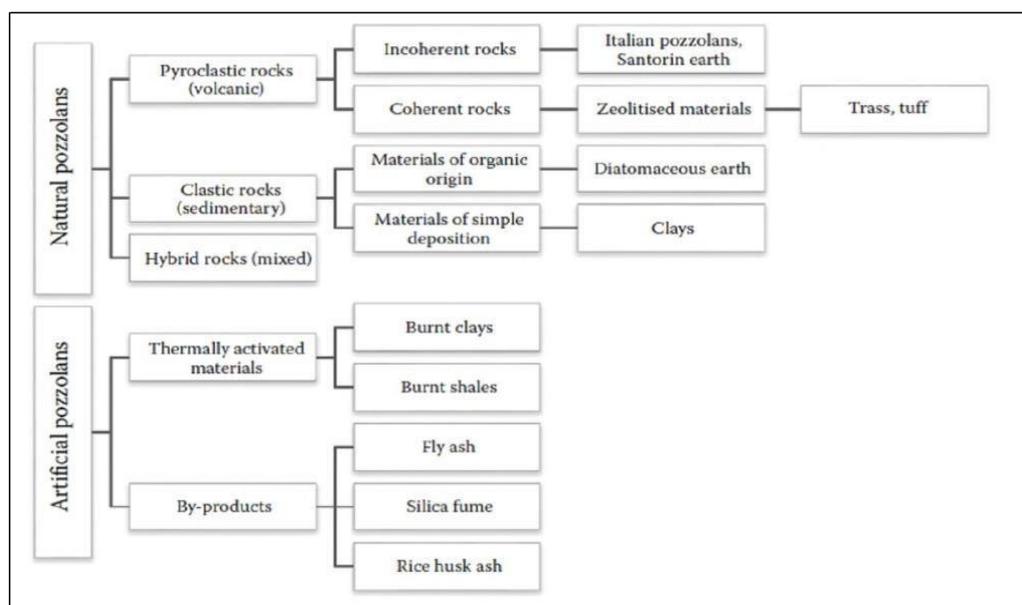


Figure II.2. Classification des pouzzolanes [49]

La différence fondamentale entre les deux groupes est que les premiers ne nécessitent aucun traitement, sauf le broyage, tandis que ces derniers sont soit obtenus par traitement thermique de matériaux sans ou très peu de pouzzolanité, soit en tant que sous-produits industriels soumis à des températures élevées, puis à un refroidissement brutal au cours des processus industriels à partir desquels ils sont obtenus [49]

VI.4.2. 1. POUZZOLANE NATURELLE (Z)

Selon l'ENV 197-1, les pouzzolanes naturelles sont généralement des substances d'origine volcanique (pyroclastique) ou des roches sédimentaires (clastiques). De composition chimique et minéralogique appropriée.

❖ La première catégorie comprend les matériaux formés par la trempe du magma en fusion lorsqu'il est projeté dans l'atmosphère lors d'éruptions volcaniques explosives. L'éruption

❖ explosive a deux conséquences :

- ①) les gaz, initialement dissous dans le magma, sont libérés par la diminution soudaine de la pression. Cela provoque une structure microporeuse dans le matériau résultant.
- ② Le refroidissement rapide des particules de magma en fusion lorsqu'il est mis en contact avec l'atmosphère entraîne une trempe, responsable de l'état vitreux du matériau solidifié [49].

Les matériaux pouzzolaniques d'origine volcanique peuvent se trouver dans la nature sous des formes lâches (incohérentes) ou compactées (cohérentes). Les dernières résultent des processus post-dépôt tels que l'altération, le compactage, la cimentation et le durcissement du matériau initialement lâche. Ces processus peuvent transformer la structure d'origine en caractère argileux ou zéolitique. La transformation en structure argileuse réduit la pouzzolanité alors que la zéolitisation l'améliore [56]

❖ La deuxième catégorie de pouzzolanes naturelles comprend les argiles et la terre de diatomées. Les argiles ont une réactivité pouzzolanique très limitée, sauf si elles sont traitées thermiquement. La terre de diatomées, qui est une roche sédimentaire, est constituée essentiellement des restes fossilisés de diatomées (un type d'algue). Il a une structure siliceuse amorphe, mais peut contenir des phases cristallines allant jusqu'à 30 % en masse

VI.4.2.2. Pouzzolane industrielle ou artificielle (Q)

L'ENV 197-1 stipule que :

Les pouzzolanes industrielles sont des argiles et schistes traités thermiquement et activés, des scories refroidies par air à partir de plomb, de cuivre, de zinc et d'autres produits de l'industrie des ferro-alliages. Les pouzzolanes industrielles ne doivent pas augmenter sensiblement la demande en eau du ciment, nuire de manière significative à la résistance du béton ou du mortier, ni réduire la protection du ferrailage contre la corrosion [57].

Les pouzzolanes artificielles sont toute matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Elles sont des déchets des efférentes industries. On distingue. Soit des résidus de fabrication industrielle tel que. le Mach fers, cendre de bois ou de houille, soit des débris de brique et de tuile

Fabriquées avec des argiles pures des températures modérées. On distingue aussi le schiste cuit, et les déchets de l'industrie à base de méta kaolinite [47].

VI.4.2.3. Types de pouzzolanes naturelles [46]

- ❖ Pozzolanes volcaniques vitreuses
- ❖ Tuf volcanique
- ❖ Argile et schistes calcinés
- ❖ Terre de diatomées et silice opaline
- ❖ La boue de dragage (vase)

VI.5. LA BOUE DE DRAGAGE (VASE) :

VI.5.1. Définition et origine :

Les sédiments, plus communément appelés vases, sont définis comme « un ensemble constitué par la réunion de particules plus ou moins grosses ou de matières précipitées ayant, séparément, subi un certain transport ». La sédimentation désigne l'ensemble des processus par lesquels ces particules organiques ou minérales en suspension et en transit cessent de se déplacer [58].

On distingue 2 origines aux sédiments:

A. Origine endogène :

les particules proviennent de la production autochtone du milieu. Il s'agit de débris de macrophytes comme les plantes aquatiques, les cadavres de microphytes et d'animaux [59].

B. Origine exogène :

il s'agit des particules qui sont issues du ruissellement des eaux ou bien transportées par les vents. D'origines naturelles ou anthropiques, elles proviennent de l'érosion des sols, de la décomposition de matière végétale, de l'apport de matière en suspension, matières organiques, de nutriments ou de micropolluants en raison des rejets agricoles, industriels et domestiques [60].

VI.5.2. CONSTITUTION DES SEDIMENTS :

Les vases sont constituées de 4 éléments principaux [61]

1. La matrice minérale (quartz, feldspaths ou carbonates) ;
2. La fraction argileuse (kaolinite, illite ou montmorillonites) ;
3. La fraction organique (débris végétaux, micro-organismes, acides fulviques et humiques);
4. Une certaine quantité d'eau, présente sous différentes formes.

VI.5.3. LA CALCINATION:

La calcination est une technique de préparation d'échantillon utilisée en chimie analytique qui permet de prendre en compte ce phénomène. Elle consiste à chauffer l'échantillon sous air à haute température (typiquement 500 à 1000°C) pour provoquer des réactions physiques et chimiques et mettre ainsi l'échantillon dans un état de référence. (la Page 43 dés hydroxylation).La structure amorphe rend l'argile plus réactive que celle du départ à la chaux.

Ce qui explique la forte diminution de la concentration en CaO de la solution. En présence de l'eau, la chaux réagit avec l'argile pour former des silicates, aluminates et aluminosilicates de calcium hydraté qui dépendent de la minéralogie des pouzzolanes et la solubilité des phases cristallines et non- cristallines. [62]

a) La calcination flash :

La calcination flash, est une calcination très rapide d'un solide, généralement sous forme fine en suspension dans un gaz. La représentation de l'évolution de la température en fonction du temps permet d'obtenir l'historique thermique des particules. Bien que la plupart des transformations chimiques et physiques aient une cinétique rapide à haute température, le temps très court de résidence dans le four mène à des transformations qui peuvent partiellement ne pas être terminées. Les changements sont cinétiquement bloqués et les produits incomplètement déshydroxylés si le temps d'exposition est trop court. Les propriétés des solides préparés sous ces procédés de chauffage flash, sont différentes de celles des matériaux traités dans des conditions de calcination où l'équilibre chimique et physique a pu être atteint. [63]

b) La calcination lente :

Dans la calcination lente industrielle, la dés hydroxylation est complète après avoir mené lentement l'échantillon à une température suffisamment haute (entre 600°C et 1100°C) pendant un degré suffisamment long (une voir plusieurs heures), comme le montre la figure II.3.[63]

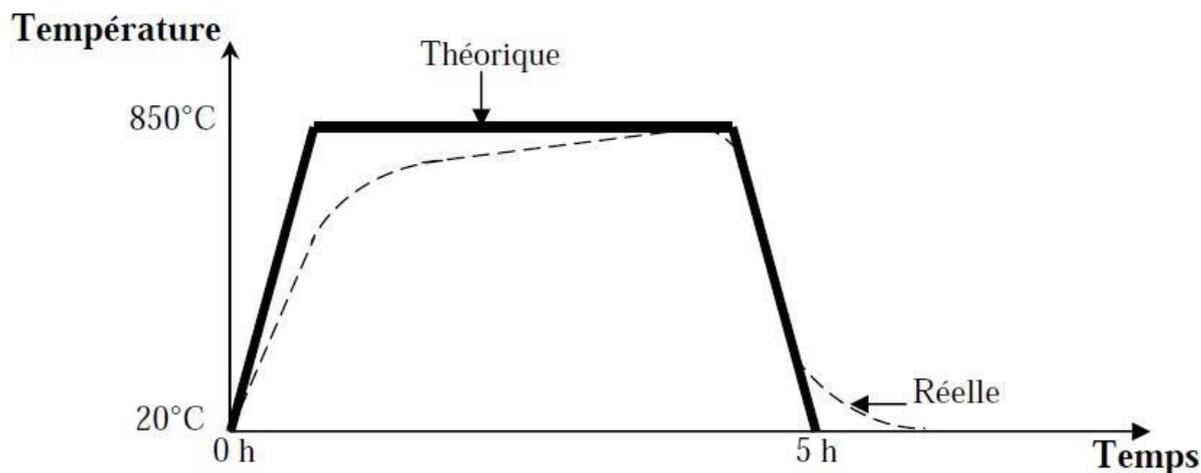


Figure II.3. Température du four en fonction du temps [63]

VI.5.4. LA VASE CALCINÉE

Les vases étudiées sont prélevées en aval du barrage de Chorfa dans la zone de rejet après dragage. Les essais de caractérisation physiques, chimiques et minéralogiques ont été effectués sur des échantillons prélevés par soins.

La composition chimique de la vase permet d'envisager la transformation des structures argileuses stables en structures amorphes, cette transformation nous assure la réactivité pouzzolanique recherchée pour la substitution envisagée.

Nous avons donc concrétisé le processus de préparation et de transformation par traitement thermique de l'échantillon de vase, ce qui nous a permis par la suite de procéder à l'évaluation des caractéristiques physiques et des performances mécaniques de cette vase.

La vase draguée passe par les étapes suivantes (Figure II.4) : [64].

1. Séchage : L'échantillon de vase est d'abord séché par passage à l'étuve (105 ° c) afin d'éliminer toute éventuelle humidité et faciliter son broyage ainsi que son tamisage.
2. Concassage : La vase étuvée est concassée pour faciliter son broyage.
3. Broyage : La vase concassée est totalement broyée.

4. Tamisage : La vase broyée est tamisée par voie sèche à travers un tamis de 80 µm où seul le passant est considéré par la suite.

5. Calcination : C'est un traitement thermique effectué sur la vase préparée préalablement par cuisson à 750 °c [65], [66].

La vitesse de cuisson doit être réglée à 5 o c/min afin d'éviter les chocs thermiques, ensuite, la température de cuisson qui est de (750 o c ±5) est maintenue constante pendant 05 heures pour obtenir à la fin le produit final qui est la vase calcinée et qui doit être conservé à l'abri de l'air et de l'humidité dans des sacs hermétiques.

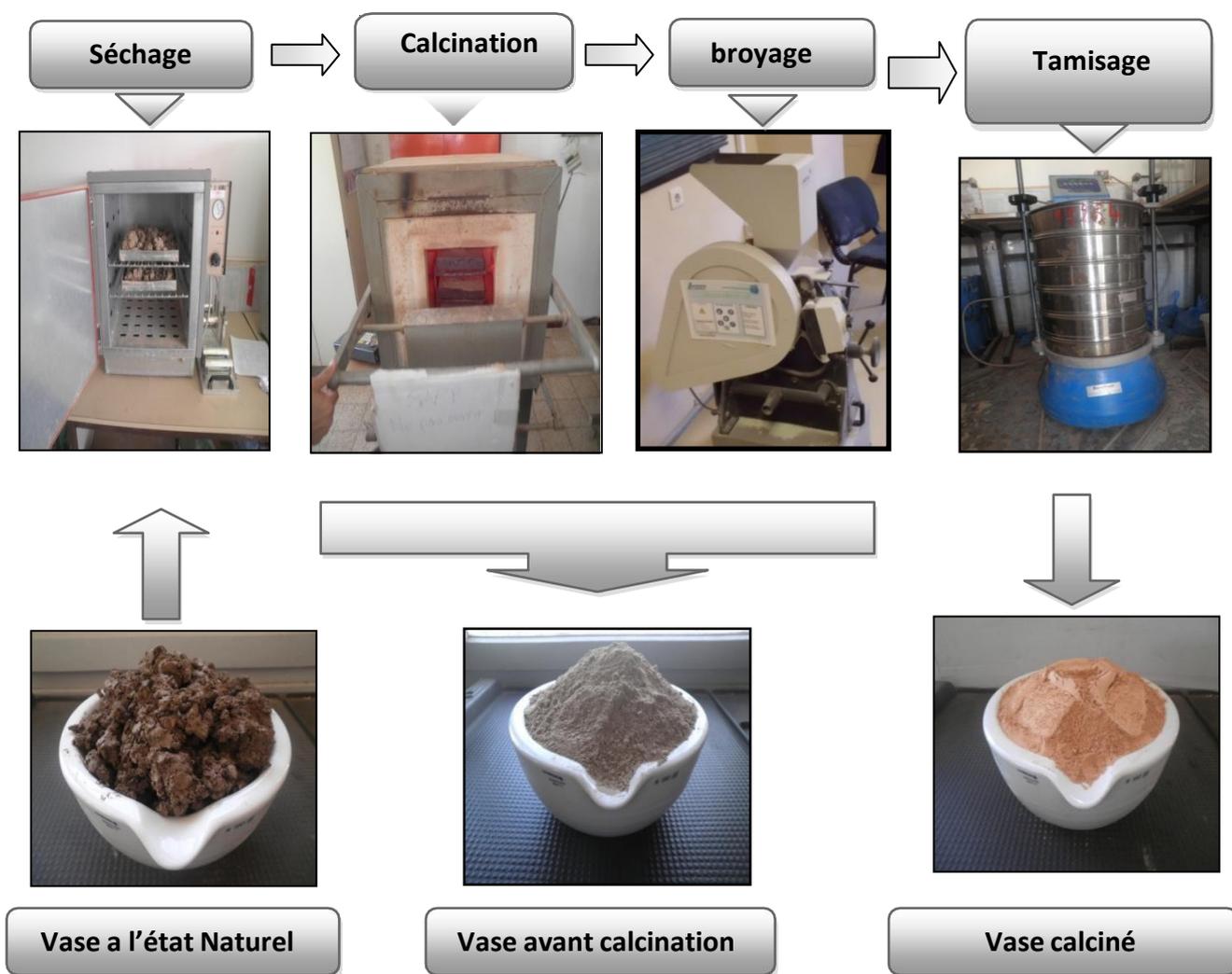


Figure II.4 : Les étapes de la préparation de la vase [64].

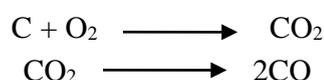
VI.6. Les laitiers de haut fourneau (S) :

VI.6.1. Généralités :

Le terme laitier signifie généralement laitier de haut fourneau (BFS), qui est un sous-produit de la production de fonte brute. En réalité, au sens général du terme, les laitiers sont des sous-produits de procédés pyrométallurgiques dans les industries des métaux et des alliages. Le laitier de haut fourneau se présente sous forme liquide à 1350-1550 °C dans la fabrication du fer; le calcaire réagit avec les matériaux riches en SiO₂ et en Al₂O₃ associés aux minerais présents dans les cendres du coke. Si on laisse refroidir lentement. Il se cristallise pour donner un matériau n'ayant pratiquement aucune propriété de cimentation. S'il est refroidi suffisamment rapidement en dessous de 80 °C, il forme un verre qui est un ciment hydraulique latente [67]

Les principales réactions dans le haut fourneau peuvent être présentées de manière simplifiée comme suit [49] .

1. L'air chaud soufflé dans le four réagit avec le carbone sous forme de coke pour produire du monoxyde de carbone et de la chaleur :



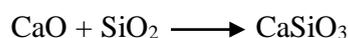
2. Le monoxyde de carbone réagit alors avec l'oxyde de fer du minerai pour produire du fer :



3. Lors de l'obtention de la fonte brute, le calcaire se décompose en chaux et en dioxyde de carbone dans les zones centrales du four :



4. La chaux formée réagit avec les impuretés (notamment les impuretés siliceuses) dans le minerai de fer, ce qui donne un laitier en fusion qui est essentiellement du silicate de calcium :



VI.6.2. Différents Types de laitier :

La forme finale du BFS dépend de la méthode de refroidissement et peut être produite sous les formes suivantes [52].

➤ Refroidi à l'air : Le laitier en fusion s'est solidifié dans des conditions ambiantes dans des fosses à proximité du four. C'est de nature cristalline. Il a des propriétés cimentières très limitées et est utilisé comme agrégat pour tous les types de construction.

➤ Mousse ou expansé : le laitier en fusion est traité avec une quantité limitée d'eau pour augmenter la vésiculité et réduire le poids unitaire. Les processus et les vitesses de refroidissement varient considérablement. Le produit peut être hautement cristallin ou extrêmement vitreux. IL est principalement utilisé comme agrégat léger.

❖ Pelletisé : les scories fondues sont refroidies et solidifiées avec de l'eau et de l'air refroidit dans un tambour pour former des granulés. Le processus de refroidissement est contrôlé pour obtenir un produit cristallin ou amorphe (vitreux), qui pourrait être utilisé comme agrégat ou broyé pour des applications cimentaires, respectivement.

VI.7. LE CALCAIRE (L) :

VI.7.1. Généralités :

Le calcaire est une roche sédimentaire composée principalement de calcite (CaCO_3). Par définition, une roche contenant au moins 50 % (en masse) de calcite est appelée calcaire. La dolomite, le quartz, le feldspath, les minéraux argileux, la pyrite, la sidérite et d'autres minéraux peuvent être présents en petites quantités. Il existe plusieurs variétés de calcaire formées par différents procédés [50]

La Norme NF P 18-508 « Additions calcaires »

Les additions calcaires sont des produits secs finement divisés, obtenus par broyage et/ou sélection, provenant de gisement de roches calcaires pouvant être dolomitiques, massives ou meubles, dont les caractéristiques sont définies par la norme. Deux de ces caractéristiques sont particulièrement significatives pour compléter cette définition :

- ❖ Une teneur minimale en carbonates totaux (calcaire + dolomie), ainsi qu'une teneur minimale en carbonate de calcium.
- ❖ Une valeur minimale de l'indice d'activité.

V. L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil:

L'utilisation d'ajouts minéraux dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques.

V.1. L'intérêt du point de vue technique:

L'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée (sauf pour les matériaux de très grande surface active, comme les fumées de silice). Les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance mécanique, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques.

Enfin, parce qu'ils permettent une faible chaleur d'hydratation des ciments composés, les ajouts minéraux améliorent la résistance à la fissuration [68].

V.2. Intérêt du point de vue économique:

Le ciment Portland est le composant le plus onéreux au cours de la production du béton, puis qu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plupart des ajouts susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou le béton sont des sous-produits, et à ce titre, nécessitent relativement moins d'énergie, si non aucune, et sont moins coûteux que le ciment Portland [68].

V.3. Intérêt du point de vue environnemental:

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO₂). En effet, la substitution d'une fraction de clinker permet d'obtenir des ciments aux propriétés mécaniques exploitables, ce qui permet une diminution de rejets de CO₂. Le taux de substitution de clinker est du même ordre que la diminution de rejet de CO₂ [68].

V.4 . LES INCONVENIENTS D'UTILISATION DES AJOUTS MINÉRAUX :

- Retard de prise.
- Résistance à la compression à jeune âge plus faible.
- Mûrissement plus long.
- Résistance à l'écaillage controversée.
- Le broyage et le transport plus cher.

VI. Effets des ajouts sur les propriétés des bétons :

VI.1. Amélioration de l'ouvrabilité:

Si nous ajoutons une quantité d'une fine poudre à un béton, nous diminuons le ressuage et la ségrégation dans ce béton, en diminuant le volume des vides. L'utilisation des cendres volantes ou du laitier diminue le besoin en eau d'un béton pour obtenir une certaine consistance.

Pour cette même consistance l'utilisation de poudres ayant une très grande surface spécifique, comme les fumées de silice, tend à augmenter la quantité d'eau nécessaire. La demande en eau et la maniabilité d'un béton contenant des ajouts minéraux dépend de leur forme et de la granulométrie des particules. La norme ASTM C 618 limite la quantité des particules $> 45 \mu\text{m}$ à un maximum de 34 % [69].

VI. 2. CHALEUR D'HYDRATATION:

Le remplacement du ciment par une pouzzolane diminue de façon significative la chaleur d'hydratation du ciment, et par conséquent la fissuration d'origine thermique du béton. La chaleur d'hydratation des ajouts pouzzolaniques est égale à environ la moitié de celle du ciment Portland.

VI. 3. Durabilité:

Par rapport au ciment Portland, les ciments aux ajouts pouzzolaniques ont une meilleure résistance aux acides et aux sulfates. Cela est dû à l'effet combiné d'une meilleure imperméabilité pour un même rapport E/L, et à une diminution de la quantité de CH. Les sulfates peuvent détruire le béton en se combinant avec les aluminates du ciment pour former de l'ettringite expansive.

Les conditions pour que cette réaction se passe sont. La perméabilité du béton, la quantité de CH et la quantité d'aluminate dans le mélange à cause de leur bonne imperméabilité et surtout d'une faible quantité de CH, des bétons faits à partir de ciment au laitier résistent très bien à l'attaque des sulfates, malgré une quantité importante de C3A dans le ciment.

Les ajouts pouzzolaniques tels que le laitier, diminuent l'expansion des bétons qui se produit par réactions entre les alcalis du ciment et les granulats réactifs. Les alcalis sont piégés dans le C-S-H formé par l'ajout.

VI.4. Développement des résistances:

Bien que le développement des résistances soit lent, les résistances à long terme dépassent quelques fois celles du ciment Portland sans ajouts, à condition d'optimiser la quantité d'ajout.

Cette Augmentation des résistances est due à l'affinage des pores et des grains ainsi qu'à l'augmentation de la quantité de C-S-H. [69].

VI.5. DEVELOPPEMENT DES BETONS A HAUTE RESISTANCE :

L'utilisation des ajouts, pour des raisons d'ordre économique ainsi que pour améliorer la durabilité des bétons, en remplacement d'une partie du ciment, tend à diminuer les résistances initiales et à augmenter les résistances finales. Les pouzzolanes très réactives, comme les fumées de silice, sont capables de donner des bétons à haute résistance, tant à jeune âge d'eau. Tous les ajouts utilisés qu'à long terme, surtout si la quantité d'eau est diminuée par l'addition d'un agent réducteur en remplacement partiel des granulats fins augmentent les résistances à tous les âges. Les résistances à jeune âge se développent à cause de l'accélération de l'hydratation du ciment, tandis que celles à long terme se développent grâce à la réaction pouzzolanique qui cause l'affinage des pores et le remplacement du CH par du C-S-H

VII. L'UTILISATION DES AJOUTS EN ALGERIE :

L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour l'Algérie comme tous pays en voie de développement. Cependant, parmi les moyens efficaces qui existent pour augmenter la production du ciment est celui d'utiliser des ajouts qui sont très peu coûteux et disponibles en grandes quantités en Algérie, comme le laitier d'El – Hadjar, le calcaire et la pouzzolane naturelle de Beni –Saf. Le tableau (III.4)

(donne une idée sur les ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes) [70].

Tableau II.4 : Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes.

Entreprise	Cimenterie	Ajouts Utilisés
ERCE	Ain Touta	Pouzzolane
	Ain El Kebira	
	Hamma Bouziane	
	H'djar Essaoud	Laitier
	Tebessa	
ERCC	Meftah	Tuf / Calcaire
	Raïss Hamidou	Poussière
	Sour EL Ghozlane	Calcaire/Tuf
ECDE	Chlef	Calcaire
ERCO	Beni Saf	Pouzzolane
	Zahan	
	Saida	

CONCLUSION :

De nos jours, il est impossible de confectionner un béton spécial (BHP, BAP, BAN) sans l'introduction de produits additifs conduisant à améliorer certaines de ses propriétés. Les additions organiques et minérales disponibles doivent être caractérisées et sélectionnées pour apporter leurs contributions sur l'amélioration des propriétés rhéologiques, mécaniques ou de durabilité. Certaines additions minérales sont utilisées par certaines cimenteries en Algérie et certains super plastifiants sont déjà commercialisés, ce qui conduit à lancer une étude expérimentale pour déterminer les effets de ces produits sur les paramètres rhéologiques des matériaux cimentaires.

I. GENERALITE SUR LES FIBRES :

Les fibres sont caractérisées par une longueur au moins trois fois supérieure à leur diamètre. On peut dire que sous l'appellation " fibres" se cache une grande famille de matériau qui a été introduite dans le commerce comme de nouvelles applications. Elles sont classées selon leur origine (naturelles, synthétiques et artificielles), leur forme (droite, ondulée, aiguille, ...etc), leur dimension (macro ou micro-fibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques. Cependant, pour faire un choix de fibres à utiliser pour une application donnée, il faut tenir compte de la compatibilité de la fibre avec la matrice, et le mode de performance du composite.

II- Définition des fibres :

Le terme fibre se rapporte à un corps solide flexible. La fibre est un composant filiforme (rapport longueur /diamètres est très élevé : 25-1500) de faible longueur (5- 60mm) et dont l'épaisseur est comprise entre 0,005 à 0,75mm. Les fibres sont disponibles sous différentes formes (rondes, plates, gaufrées) d'origine minérale, organique ou métallique, les fibres sont courtes et dispersées dans toute la masse de béton. L'utilisation des fibres dans la construction remonte à plusieurs siècles. Depuis les trente dernières années, l'intérêt de leur utilisation ne cesse de croître pour la fabrication de béton prêt l'emploi du béton préfabriqué et du béton projeté fabriqué à partir soit d'acier, soit de plastique, de verre, de matériaux naturels. Elles sont ajoutées au béton lors du malaxage [71].

III. LES TYPES DES FIBRES ET LEUR PROPRIETE :

III.1. Différents types de fibres:

Les fibres sont ajoutées aux matériaux cimentaires afin d'améliorer leurs caractéristiques à l'état durci. Les fibres sont classées selon leur origine (naturelle, synthétique ou artificielle, leur forme (droite, ondulée, aiguille, etc.), leur dimension (macro ou micro- fibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques. Les principales fibres utilisées **sont** [72]:

a- Les fibres métalliques :

Les fibres métalliques caractérisées par un module d'élasticité élevé, offrent au béton, une meilleure résistance à la traction, au choc et améliore sa ductilité en augmentant son pouvoir de résister aux déformations dues à la rupture, de même donne une ténacité appréciable, leur forme et leur dimension améliorent leur ancrage et leur adhérence (fibres, copeaux, fibres tréfilées, ondulées, déformées aux extrémités) [73].



Figure III.1 : Les fibres métalliques [73].

b- Les fibres de fonte amorphe :

Ces types de fibres sont obtenus par refroidissement brusque d'un alliage métallique à base de fer, sont constituées de petits rubans de 3mm de largeur, et contribuent à la limitation des fissures sous chocs [73].

c -Les fibres de verre :

Sous leur forme habituelle, elles sont caractérisées par une très grande fragilité aux chocs attribuée à une sensibilité élevée à la fissuration, sous la forme de fibre de faible diamètres, le verre perd ce caractère acquière de bonnes caractéristique mécanique et sont utilisées pour fabriquer des éléments de faible épaisseurs, avec des matrices de pâte ou mortier ou de micro béton [73].



Figure III.2 : les fibres de verre[73].

d-Les fibres de polypropylènes :

Sont des produits d'origine pétrolière, découverts en 1954, ces matériaux de synthèse ont connu une extension dans l'industrie textile ou ils apportent les avantages suivants :

Disponibilité à prix relativement faible

Résistance aux attaques en milieux alcalins et corrosifs.

Augmentation notable de la résistance aux chocs.

Limite l'ouverture des fissures. Ces fibres sont fréquemment utilisées dans les bâtiments, en particulier dans réalisation des panneaux décoratifs, revêtement de façade de tuyaux et pieux [73].



Figure III.3 : Les fibres de polypropylènes[73].

IV. LES CARACTERISTIQUES ET LES PROPRIETES DES FIBRES :**IV.1. La notion de fibres structurales**

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

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

IV.2. Le facteur d'élanement :

Le facteur d'élanement est défini par un ratio géométrique. Le facteur d'élanement est donc le ratio qui représente le rapport de la longueur sur le diamètre équivalent de la fibre

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

IV.3. La performance :

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

V. La valeur de résistance résiduelle :

Les fibres dans le béton apportent une meilleure résistance aux déformations en flexion des ouvrages de béton soumis à des charges. C'est lorsque apparaît la première fissure que les fibres sont sollicitées et qu'il est possible de déterminer une valeur de résistance résiduelle. Effectivement, les fibres apportent une meilleure cohésion et résistance intrinsèque de la matrice et augmentent ainsi la résistance à la propagation et à l'augmentation de la fissuration. Les fibres permettent une reprise de charge en post-fissuration. Il existe trois méthodes d'essais de référence qui donnent des valeurs différentes pour la détermination de la résistance résiduelle :

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

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

VI. La distribution des contraintes mécaniques

Un des principaux avantages de l'ajout des fibres est le meilleur contrôle de la post fissuration du béton. Les fibres ont la particularité d'absorber l'énergie de fissuration et de redistribuer les contraintes mécaniques dans la matrice du béton. La répartition des fibres dans la masse du béton permet de différer la rupture fragile du béton en s'opposant à la propagation des microfissures (figure III.4). Selon les fibres utilisées et les ouvrages auxquels elles sont incorporées, ce rôle se traduit par des améliorations en post fissuration relatives à :

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

Caractéristiques et propriétés spécifiques de chaque famille de fibres					
	Masse volumique (en g/cm³)	Diamètre moyen (en μm)	Résistance à la traction (en N/mm²)	Module d'élasticité (en GPa)	Allongement à la rupture (en %)
Fibres métalliques	7,85	50 - 1000	1000 - 2500	150 - 200	3 - 4
Fibres de verre	2,6	9 - 15	2000 - 3000	80	2 - 3,5
Fibres polypropylène	0,9	> 4	500 - 750	5 - 10	10 - 20

Figure III.4: Les caractéristiques et les propriétés des fibres

VII. Les propriétés mécaniques des fibres :

Tableau III.1 - : Propriétés physiques et mécaniques de certaines fibres

Fibre	Diamètre[μm]	Densité	Allongement de rupture en [%]	Module d'élasticité [GPa]	Résistance en traction [GPa]
Acier	5-500	7,8	3-4	200	1-3
Verre	9-15	2,6	2-3,5	80	2-3
Polypropylène	7,5	0,9	20	5	0,5
Particules de mica	0,01-200	2,9	-	170	0,25
Amiante	0,02-20	2,5-3,4	2,3	200	3
Carbone	7,5	1,7-2	0,5-1,0	300-400	2-3

Si le module d'élasticité de la fibre est élevé par rapport au module d'élasticité du béton, les fibres reprennent une part des charges, augmentant ainsi la résistance à la traction du matériau. L'augmentation du rapport longueur/diamètre des fibres accroît habituellement la résistance à la flexion et la ténacité du béton. Les valeurs de ce rapport sont généralement comprises entre 100 et 200, car des fibres de trop grande longueur ont tendance à former des boules dans le mélange, créant ainsi des problèmes d'ouvrabilité. En général, les fibres réduisent le fluage, c'est-à-dire la

Déformation du béton avec le temps sous une contrainte constante. Par exemple, le fluage en traction d'un béton renforcé de fibres d'acier peut représenter seulement 50 à 60% de celui d'un béton ordinaire et le fluage en compression, 10 à 20%. Le retrait du béton, qui est provoqué par la perte de l'eau pendant le séchage, est en partie empêché par les fibres. Le retrait du béton peut être diminué de 35% ou moins si l'on ajoute 1,5% de fibres par volume. D'autres propriétés du béton comme la résistance en compression et le module d'élasticité ne figurent pas dans les tableaux car elles sont nettement moins touchées par la présence des fibres.

VIII. Rôles des fibres dans le béton :

Au début, les chercheurs ont essayé par l'addition de fibres dans le béton, d'augmenter ses caractéristiques mécaniques comme la résistance à la compression ou la résistance à la flexion, mais le résultat obtenu était limité. Ils n'ont constaté que le rôle principal des fibres dans un matériau cimentaire peut-être apprécié sous deux volets [74] :

- 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.5).

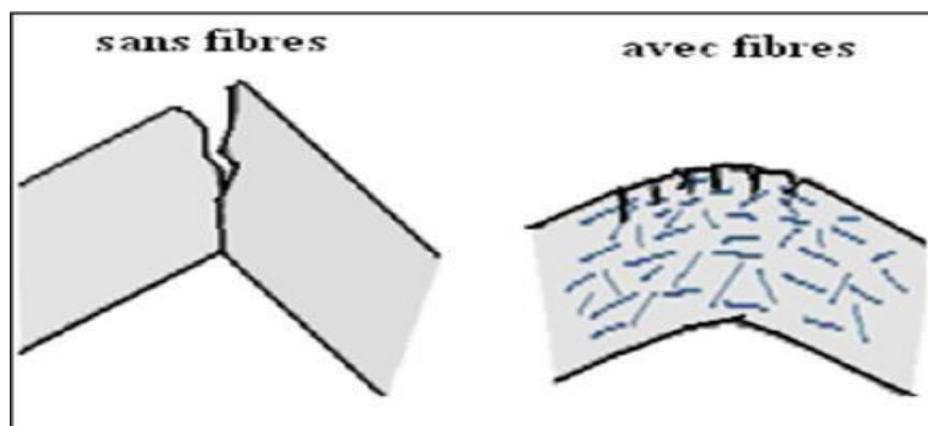


Figure III.5. Rôle de fibre dans le béton [74].

- La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes.

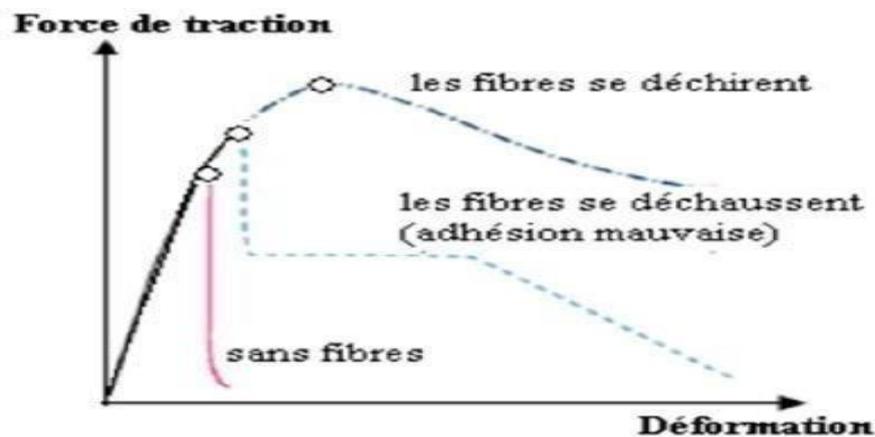


Figure III.6. Rôle de fibre dans le béton 2[74] .:

Les fibres peuvent également, dans certaines applications, remplacer les armatures passives. Elles 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.
- ❖ L'amélioration de la résistance mécanique au jeune âge

Mécanismes de fonctionnement des fibres

Rossi a décrit le comportement vis-à-vis de la fissuration du béton renforcé de fibres et des structures en béton fibré en fonction de la sollicitation imposée. Dans le cas des efforts de traction, des microfissures apparaissent, suivies de leur connexion et de la formation de macro fissures, jusqu'à la rupture de la structure. Les fibres peuvent couvrir les microfissures, et retarder la formation des macro fissures, conférant ainsi une capacité portante résiduelle et une ductilité à l'échelle de la structure [75].

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

Dans le cas des fissures provoquées par des efforts de compression, il y a des mouvements tangentiels par rapport aux lèvres des fissures, les fibres sont donc fléchies et travaillent dans des conditions moins favorables (faible rigidité en cisaillement). C'est pourquoi les effets d'un renfort de fibres sont peu visibles en compression pour les bétons de compacité courante. Les propriétés du béton renforcé de fibres sont le résultat de plusieurs facteurs, comme les propriétés de la matrice, la distribution des fibres et les conditions d'interface entre les fibres et le béton. Le mécanisme de résistance est le transfert des efforts de la pâte aux fibres par des cisaillements qui augmentent linéairement jusqu'au stade de fissuration. Après cet événement, si l'effort de cisaillement demandé est plus grand que la résistance au cisaillement fibre-matrice, le mécanisme de résistance principal devient le frottement, au cours du déchaussement de la fibre [76].

CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons résumé:

On trouve une gamme très variée de fibres susceptibles d'être utilisées comme renfort des matrices cimentaires. Qui se différencient par leur nature, leur forme, leur diamètre, leur longueur. Elles possèdent des caractéristiques physiques et mécaniques différentes les unes des autres.

Les fibres limitent les phénomènes de propagation rapide et instable de la rupture du béton. Elles modifient les chemins de fissure dans le matériau.

Le dosage et l'orientation des fibres de façon aléatoire au sein de la matrice cimentaire, peut conduire à un phénomène de chevauchement des fibres qui conduisent :

- Chute de la maniabilité ;
- La mauvaise compacité ;
- Une baisse de la résistance.

L'utilisation du béton armé de fibres permet d'exploiter la plus grande résistance à la traction et à la fatigue du matériau. Une orientation adéquate des fibres dans la matrice béton lui confère des propriétés isotropiques qui ne peuvent être obtenues en aucun cas pour le béton ordinaire.

La durabilité de béton de fibres dépend essentiellement de la corrosion des fibres.

le béton de fibres permet de renforcer certaine zone fragiles d'une ossature, telles que les connexions poteaux-poutres particulièrement sensibles aux séismes, les sections fortement cisillées, ou les points susceptibles de subir un chargement dynamique.

I. PROPRIETES ESSENTIELLES D'UN BETON

Le béton doit être considéré sous deux aspects :

➤ **Le béton frais :**

mélange de matériaux solides en suspension dans l'eau, se trouve en état foisonné à la sortie des appareils de malaxage et en état compacté après sa mise en œuvre dans son coffrage ;

➤ **Le béton durci :**

Solide dont les propriétés de résistance mécanique et de durabilités s'acquièrent au cours du déroulement de réactions physico-chimiques

I.1. PROPRIETES DU BETON FRAIS

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité qui est la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage complet du ferrailage [77]. L'ouvrabilité doit être telle que le béton soit maniable et qu'il conserve son homogénéité. Elle est caractérisée par une grandeur représentative de la consistance du béton frais. Dans le cas de béton ordinaire elle est principalement influencée par :

- La nature et le dosage du liant.
- La forme des granulats.
- La granularité et la granulométrie.
- Le dosage en eau. [78].

L'ouvrabilité peut s'apprécier de diverses façons et en particulier par des mesures de plasticité. Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité. Nous n'en citerons que quelques-uns, les plus couramment utilisés dans la pratique. [79], [80].

I.1.1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est très simple à mettre en œuvre au laboratoire et au niveau des chantiers [81]. Il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40 mm. Il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son poids propre. Selon la norme NF P 18 -451 l'essai consiste à remplir de béton un moule en tôle tronconique ($D = 20$ cm, $d = 10$ cm, $h = 30$ cm), le remplissage s'effectue en trois couches tassées avec une tige en acier de 16mm de diamètre et dont l'extrémité est arrondie, à raison de 25 coups par couche

(figure IV.1). On soulève ensuite le moule avec précaution et on mesure l'affaissement.



Figure IV.1 : Mesure d'affaissement au cône d'Abrams[81].

Tableau IV.1 : classe de consistance (Slump test) [31].

Classe des consistances	Affaissement (cm)	Tolérance (cm)
Ferme	0 à 4	1
Plastique	5 à 9	2
Très plastique	10 à 15	3
Fluide	> 16	

1.1.2. La masse volumique du béton frais

On mesure la masse volumique du béton frais à l'aide d'un récipient étanche à l'eau et suffisamment rigide. Le béton est mis en place dans le récipient et vibré à l'aide d'une aiguille vibrante, une table vibrante ou un serrage manuel en utilisant une barre ou tige de piquage, après un arasement approprié. Le récipient et son contenu doivent être pesés afin de déterminer la masse volumique qui sera calculée en utilisant la formule suivante :

$$D = \frac{M_2 - M_1}{V}$$

Où

D : la masse volumique du béton frais, en (kg/m^3) ;

M1 : la masse du récipient, en (kg) ;

M2 : la masse du récipient plus la masse de béton contenu dans le récipient, en (kg) ;

V : le volume du récipient, e en kilogrammes (kg) ;

Calcul de la masse volumique doit être réalisé selon la norme [82].



Figure IV.2 : Mesure de la masse volumique à l'état frais [82].

1.2. 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, voire des années.

- 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.
- Les phénomènes de retrait sont une caractéristique prévisible dans l'évolution du béton.
- Les caractéristiques de déformations sous charge du béton sont connues et peuvent être mesurées.

1.2.1. Essai de résistance à la compression

La caractéristique essentielle d'un béton à l'état durci est la résistance mécanique en compression à l'âge de 28 jours. Le béton est un matériau qui travaille bien en compression. La connaissance de ses propriétés mécanique est donc indispensable pour le dimensionnement et le calcul des ouvrages.

La résistance à la compression du béton est mesurée par la charge conduisant à l'écrasement par compression axiale d'une éprouvette cylindrique de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur [83] (voir figure IV.3). Les éprouvettes sont chargées jusqu'à rupture dans une machine pour essai de compression, La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression calculée.

L'essai d'écrasement doit être réalisé selon les normes [84.85].



Figure IV.3: Machine d'essai de compression [83]



Figure IV.4: éprouvettes cylindriques de diamètre 16 cm et de hauteur 32cm [83].

1.2.2. Essai de résistance à la traction

La résistance à la traction est également mesurée sur des éprouvettes 16x32 cm par l'essai de fendage conformément à la norme [86]. La résistance à la traction peut être déterminée par différents essais [24] :

➤ **Traction par fendage** : (essai brésilien).

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton placé suivant deux génératrices opposées entre les deux plateaux de la presse. La résistance en traction par fendage est donnée par l'équation suivante :

$$F_{ct} = \frac{2F}{\pi D L}$$

Où :

F_{ct} : est la résistance en traction par fendage, en (MPa) ou en (N/m²) ;

F : est la charge maximale, (N) ;

L : est la longueur de la ligne de contact de l'éprouvette, en (mm) ;

D : est le diamètre nominal de l'éprouvette, en (mm).

L'essai d'écrasement doit être réalisé selon la norme [82].



Figure IV.5: Machine d'essai de Traction par fendage[86].

➤ **Traction par flexion**

L'essai consiste à rompre une éprouvette prismatique de dimensions 7 x 7 x 28 (cm) sont soumises à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs. La charge maximale enregistrée au cours de l'essai est notée et la résistance à la flexion est calculée. La résistance en traction par fendage est donnée par l'équation suivante :

$$F_t = \frac{3FL}{2Bh^2}$$

Où :

F_t : est la résistance en traction par fendage, en (MPa) ou en (N/mm²) ;

F : est la charge maximale, (N) ;

L : écartement entre les appuis, en (mm) ;

b : épaisseur de l'éprouvette, en (mm).

L'essai d'écrasement doit être réalisé selon la norme [87]



Figure IV.6: Machine d'essai de Traction par flexion[87].

I.2.3. Masse volumique du béton durci

Calculer la masse volumique de l'échantillon au moyen des valeurs de masse et de volume précédemment déterminées, à l'aide de la formule suivant :

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

Où :

D : est la masse volumique, en (kg /m³), pour un état de l'échantillon et une méthode de détermination du volume donnees ;

M : est la masse de l'échantillon, en (kg), pour un état de l'échantillon donné ;

V : est le volume de l'échantillon, en (m³), déterminé selon la méthode choisie.

L'essai de la masse volumique doit être réalisé selon la norme [88].



Figure IV.7: Mesure de la masse volumique du béton durci [88].

II. LES PROPRIETES DES BETONS FIBRES

1. Introduction

Le béton de fibres est un matériau qui a connu ces derniers temps un grand développement et nombreuses sont les études qui ont été effectuées durant les trois dernières décennies. On peut améliorer la résistance mécanique (post-fissuration) du béton en y incorporant des fibres (dosages traditionnels de l'ordre de 600 à 1200 g/m³). L'incorporation de celles-ci dans le béton rend ce dernier davantage ductile (moins fragile), multi fissurant, capables de limiter la propagation de l'endommagement tout en assurant une durabilité accrue. Différents types de fibres peuvent être utilisés avec des propriétés spécifiques.

Les propriétés du béton de fibres dépendent de la qualité de la matrice et des caractéristiques de fibres. La matrice considérée est identique à la matrice d'un béton courant avec des granulats plus petits. Pour le renforcement, les fibres sont de types variés. Elles sont de formes et de dimensions différentes liées aux technologies d'élaboration. Chacune de ces catégories de fibres donne au béton des propriétés spécifiques lesquelles dépendent de la nature, la forme géométrique, l'élancement (le rapport de la longueur de la fibre sur le diamètre équivalent à la fibre), et la teneur en volume de fibre.

La fabrication d'un béton de fibre ne consiste pas à mélanger une certaine quantité de fibres à un béton déjà existant. C'est à dire qu'il convient d'ajuster la formulation en fonction des objectifs de mise en œuvre et de résistance. On ajoute directement des fibres dans le mélange du béton. L'effet de cette addition est la maniabilité décroissante. Pour l'amélioration, il convient d'utiliser une quantité de fine

(sable et ciment) plus haute que pour un béton ordinaire. En ce qui concerne les fibres, on utilise une faible longueur et un élancement moyen car il y a risque de former des pelotes qui rendent difficile la mise en œuvre et nuisent au comportement mécanique. On peut utiliser aussi des plastifiants pour obtenir une maniabilité acceptable tout en gardant le rapport eau/ciment raisonnable.

2. Définition des bétons fibrés

Un béton fibré est un béton dans lequel sont incorporé des fibres, Une technique récente, consiste à ajouter au béton, des fibres afin d'améliorer ses propriétés mécaniques (compression, fissuration, flexion). A la déference des armatures, les fibres sont réparties dans la masse du béton ; elles permettent de constituer un matériau qui présente un comportement homogène. Les fibres les plus

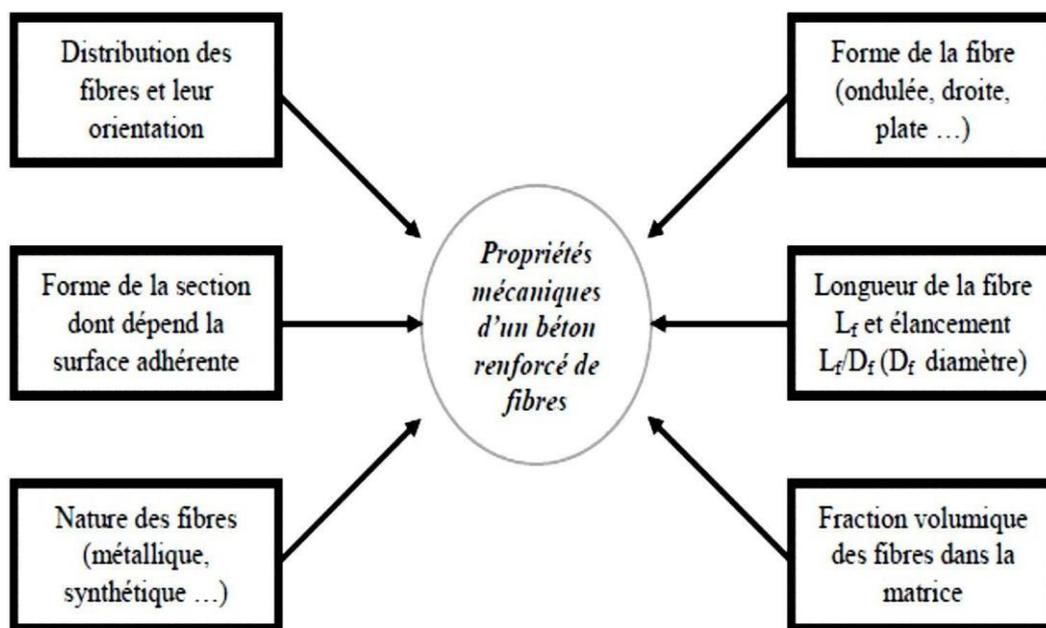
Couramment utilisées sont les fibres métalliques, les fibres organiques, et les fibres synthétiques

3. Propriétés mécaniques du béton renforcés par fibres métalliques

3.1. Introduction

Le comportement du béton de fibres diffère de celui du béton témoin. La nature et la géométrie et le volume des fibres utilisées jouent un rôle déterminant sur la propagation des fissures dans la matrice et améliorent la ductilité du béton.

Donc, on peut conclure que la résistance des bétons faits de matrices contenant des fibres courtes ou longues discontinues est contrôlée essentiellement par la liaison inter- faciale et par la qualité de la fibre renforçant en général aux différents paramètres.



La figure IV-8, illustre les différents facteurs influant sur le comportement d'un béton renforcé de fibres. [89].

3.2. Résistance à la compression

Les résultats mis en évidence par différents chercheurs sur l'effet des fibres sur la résistance à la compression du béton renforcé de fibres montrent quelques divergences.

Cependant ils sont d'accord pour dire que les fibres n'apportent pas d'amélioration appréciable en compression. Dans certain cas, on a une légère augmentation de la contrainte ultime, dans d'autres une légère diminution.

Cette diminution peut être causée par une

Mauvaise compacité due à un excès de fibres, ou à une mauvaise composition. [90], a trouvé que l'incorporation de fibres de fil d'attache dans la matrice béton apporte une amélioration de résistance à la compression lorsque le pourcentage de fibres est $V_f=3\%$, et une diminution pour de forts pourcentages figure IV-11.

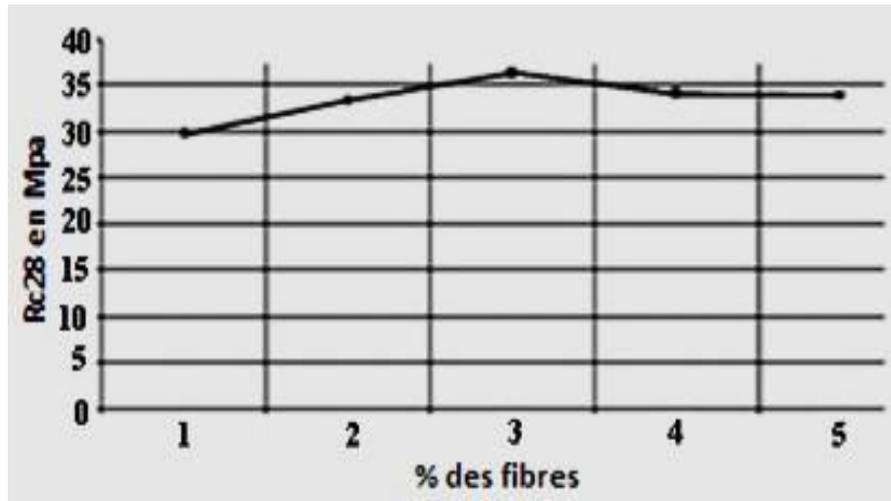


Figure IV-09.: Influence du % des fibres sur la résistance à la compression du béton de fibres [90].

[91], a montré cependant que la résistance peut être diminuée par l'addition de fibres dans le béton figure I-12. Il a conclu, dans son étude qu'à partir de $V_f = 0,5 \%$, pour les fibres de polypropylène, la résistance à la compression diminue et les fibres les plus longues présentent la plus faible efficacité. Suivant l'auteur cette diminution peut s'expliquer par une mauvaise homogénéité du béton et par une valeur E/C élevée, ou une mauvaise compacité due à un excès de fibres.

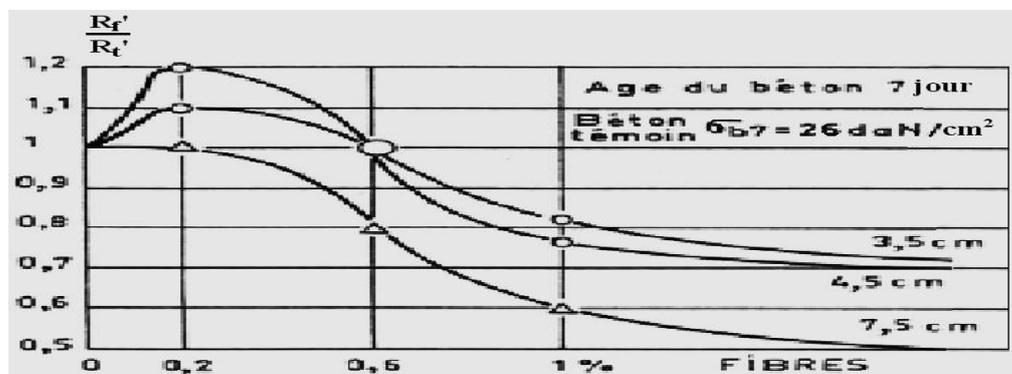


Figure IV-10. : Influence de la longueur et le pourcentage de fibres sur la résistance la compression du béton de fibres [91].

Rossi a conclu dans son ouvrage publié récemment [28], que les bétons de fibres métalliques, constitués de fibres longues, ont toujours des résistances en compression inférieure à celles du béton non fibré fabriqué avec les mêmes constituants et à maniabilité équivalente. Tandis que, pour les fibres courtes, ROSSI a rapporté cette conclusion :

« Bien que l'augmentation des résistances en traction et en compression avec le pourcentage des fibres courtes soit le résultat le plus fréquemment attendu, et obtenu, on peut aboutir à une stagnation, voire une diminution de ces résistances pour certains pourcentages, notamment dans le cas de la compression ».

3.3. Résistance à la traction directe

Peu d'essais ont été réalisés en traction directe, car l'essai est délicat et coûteux. Les augmentations de résistance en traction dues aux fibres sont variables. D'une manière générale, on peut dire que les améliorations constatées dépendent essentiellement de la forme des éprouvettes, du type d'essais, de paramètres liés à la géométrie et au pourcentage volumique des fibres utilisées, et bien sûr au béton témoin retenu [93].

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). 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 IV-13. Montre le comportement global d'une éprouvette en béton fibré soumise à la traction directe [94].

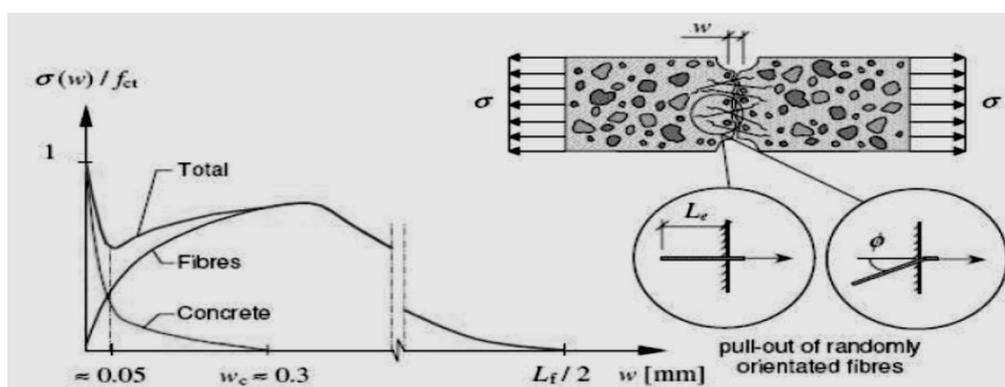


Figure IV-11.: Contribution des fibres dans le comportement à la traction [94].

3.4. Résistance à la flexion

Le comportement en flexion est l'aspect le plus important pour un béton de fibres car ce matériau composite subit le plus souvent ce type de changement dans ses applications. On ajoute les fibres dans la matrice pour améliorer la ductilité et fournir un contrôle du mécanisme de fissuration.

[95] montre que l'augmentation du pourcentage en masse des fibres végétales de palmier dattier de longueur $L=4$ cm, améliore notablement la résistance à la flexion figure IV-14

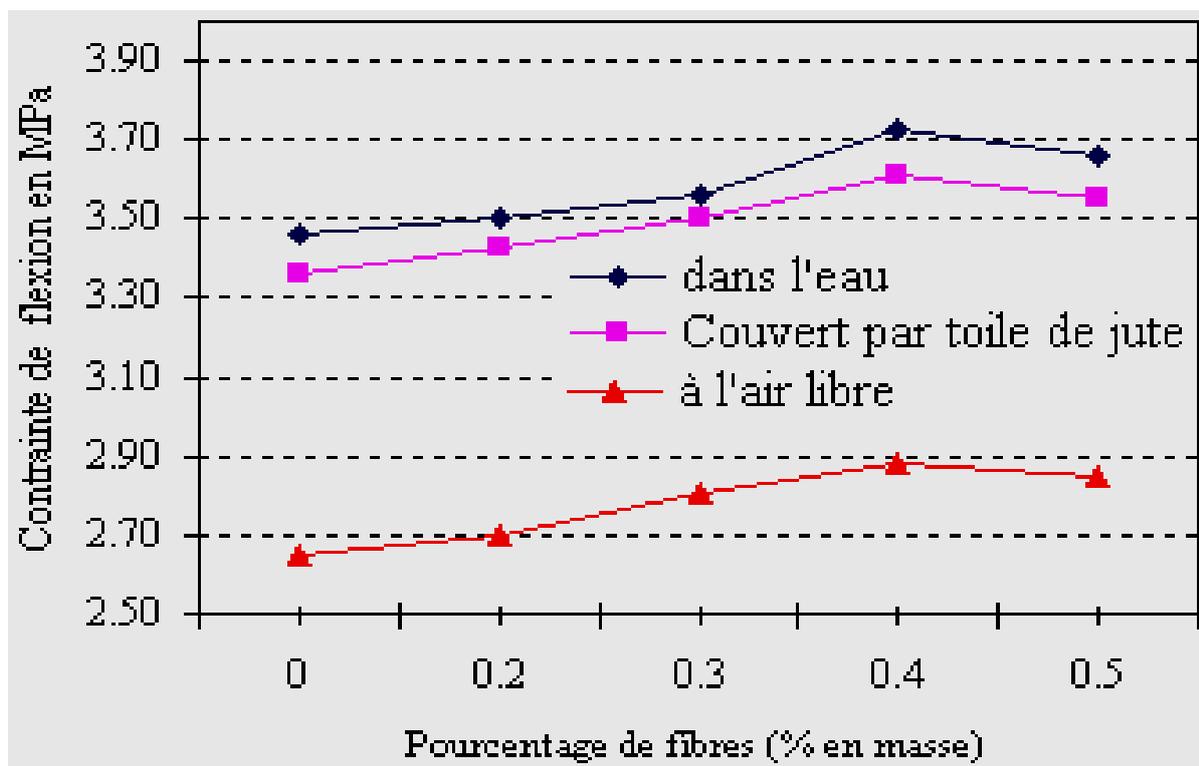


Figure IV-12 : Variation de la résistance à la flexion en fonction du % en masse des fibres [95].

Dans un rapport publié par A.C.I COMMITTEE 544 [96], les auteurs confirment que les fibres métalliques, introduites jusqu'à 4% par volume, ont été trouvées qu'ils augmentent la résistance de la première fissure deux fois et demi plus de celle de béton non renforcé de fibres. [90], a trouvé que l'incorporation de fibres de fil d'attache dans la matrice béton apporte une amélioration de résistance à la flexion lorsque le pourcentage de fibres est $V_f=3\%$, et une diminution pour de forts pourcentages figure IV-15.

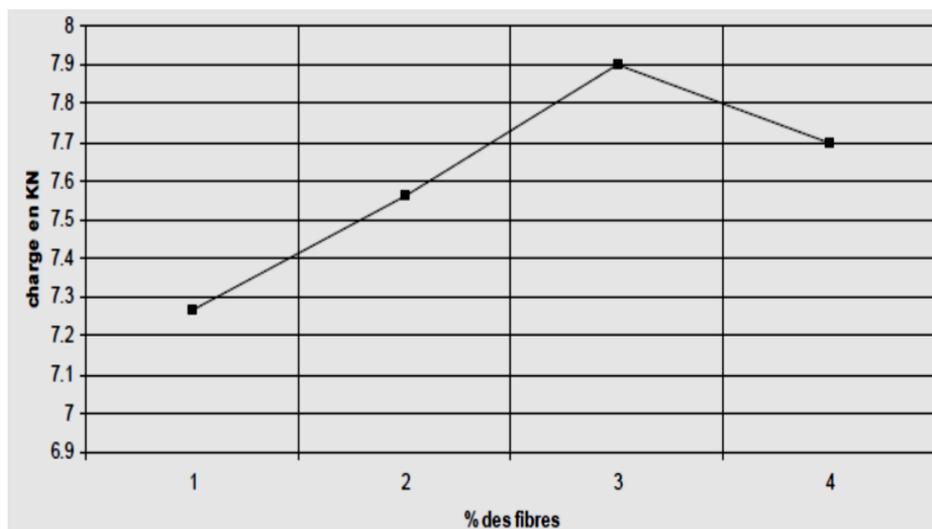


Figure IV-13.: Influence du % de fibres sur la résistance à la flexion [90].

CONCLUSION :

Le béton est un matériaux minéral obtenu en mélangeant du ciment, de l'eau et des granulats. Il a un comportement évolutif, il est d'abord fluide ce qui lui permet de prendre toutes les formes possibles, puis progressivement il devient dur et très résistant.

I.METHODOLOGIE ET OBJECTIF DU TRAVAIL PRATIQUE :

Notre étude a pour objet de valoriser les déchets naturels et artificiels dans la formulation des bétons, afin de connaître l'influence de ces derniers sur le béton soit à l'état frais ou à l'état durci (caractéristiques physico-mécaniques).

En premier lieu, on a procédé à la caractérisation de tous les matériaux utilisés à savoir :

- Le sable de chelghom laid
- Les graviers de la carrière de chelghom laid;
- Le ciment CPJ 42,5 (ciment de sour el ghouzelan type CEM II/A);
- La boue de dragage de barrage de beni amrane avant et après calcination à 750°C pendant 5h, on a travaillé avec deux types de boue : la boue refroidit à l'air et la boue refroidit à l'eau à différent dosage.

En second lieu, la formulation et la caractérisation mécanique du mortier avec différents dosages 10%,15, 20% de la boue refroidis à l'air et 10%,15%, 20% de la boue refroidis à l'eau.

En troisième lieu, on a procédé à la formulation de différents types de béton ; en utilisant la méthode de DREUX GORISSE :

- Béton témoin : 0% des fibres avec 0% de la boue (**BT**).
- Béton fibré BA I : 1% des fibres avec 10% de la boue (**BFA-1%**).
- Béton fibré BA II : 1,5 % des fibres avec 10% de la boue (**BFA-1.5%**).
- Béton fibré BAIII : 2% des fibres avec 10% de la boue (**BFE-2%**).
- Béton fibré BE I : 1% des fibres avec 10% de la boue (**BFE-1%**).
- Béton de laitier BE II : 1,5% des fibres avec 10% de la boue (**BFE-1.5%**).
- Béton de laitier BE IV : 2% des fibres avec 10% de la boue (**BFE-2%**).

En quatrième lieu, on fait l'écrasement des éprouvettes après leurs conservations dans l'eau à différents âges (7j, 14j, 28j), finalement l'interprétation des résultats des essais mécaniques résistance à la compression et à la flexion).

PREMIERE PARTIE :**II. Caractérisation des matériaux utilisés :****1. Ciment :**

Le ciment utilisé est un CEM I. 42.5 N. c'est un ciment portland sans ajouts provenance de la cimenterie de Sour el ghozlane, Bouira. Les analyses physiques et mécaniques du ciment sont faites dans le laboratoire de la cimenterie de Sour el ghozlane, Bouira, sont représentées sur les tableaux suivants :

Tableau V.01: Caractéristiques physiques

Caractéristiques		résultats	Unités
Consistance normale		25	%
Début de prise		150	Min
Fin de prise		310	Min
Masse spécifique		3.15	g/cm ³
Surface spécifique (SSB)		3380	Cm ² /g
Essai de Stabilité	Froid	33	mm
	chaud	34	mm
Essai de gonflement	01 jours	30	mm

Tableau V.02 : Caractéristiques mécaniques

Résistance (MPa)	Age (jours)	
	7j	28j
Compression	39.783	50.09
Flexion	8.478	13.03

Tableau V.03 : Composition chimique du ciment

Eléments	%
SiO₂	21.37
Al₂O₃	4.79
Fe₂O₃	3.58
CaO	62.28
MgO	2.74
K₂O	0.79
Na₂O	0.17
SO₃	2.40
P₂O₅	0.15
TiO₂	0.22
Insolubles	0.88
PF	1.08

Tableau V.04 : Composition minéralogique du ciment

Phase	Constituants minéraux du clinker	Teneur rapportée au clinker (%)
Clinker	C₃S	47.83
	C₂S	22.67
	C₃A	6.64
	C₄AF	10.88
	CaO	62.28

2. SABLES ET GRAVIER :

2.1 LE SABLE DE OUED SOUF:

Le sable qui a été utilisé dans le cadre de cette étude c'est le sable de oued souf .

➤ Les caractéristiques du sable :

Tableau V.05 : Caractéristiques du sable de oued souf

Caractéristiques	Résultats
Masse volumique (g/cm ³)	2.656
Masse spécifique (g/cm ³)	2.654
Teneur en eau (%)	1.14
ESP (%)	73.07
ESV (%)	76.49
Le bleu de méthylène (ml/g)	0.75
Absorption (%)	1.022
Porosité (%)	4.49

D'après l'analyse faite au laboratoire **LTCP**, de bouira on a obtenu les résultats suivants :

Les résultats obtenus sur le tableau (**V.05**) montrent que :

Les essais nous ont donné, un équivalent de sable de **ESP** = 73.07 %. Et **ESV** = 76.49 %

Le sable d'Oued-Souf est un sable très propre, l'absence presque totale de fines argileuses.

Qui répond aux exigences de la norme française [XP P 18-598].

➤ Analyse granulométrique du sable (NF EN 933 – 1)

Tableau V.06 : Analyse granulométrique du sable de oued souf

Ouverture des tamis	Masses (g)	Teneurs (%)		Mf
	Refus cumulés	Refus cumulés	Tamisats cumulés	
8	0	0	100	2.002
6.3	0	0	100	
4	6	0.57	99	
2	17	1.62	98	
1	78	7.44	93	
0.500	263	25.09	75	
0.250	724	69.08	31	
0.125	1011	96.46	4	
0,063	1043	99.52	0.5	
Fond tamis	2	99.52	/	

D'après cette analyse, on distingue que le sable de Oued souf est un sable fin qui nécessite une correction avec l'ajout d'un sable grossier. Pour cela on a choisi le sable de Chalghoum laid, un sable grossier.

2.2. LE SABLE DE CHELGHOU M LAID :

➤ Les caractéristiques du sable :

Tableau V.07 : Caractéristiques du sable chelghoum laid

Caractéristiques	Résultats
Masse volumique (g/m ³)	2.65
Masse spécifique (g/cm ³)	1.61
Teneur en eau (%)	4.43
ESP (%)	73.33
ESV (%)	77.80
Le bleu de méthylène (ml/g)	0.25
Absorption	3
Porosité %	4.31

Tableau V.08 : Analyse granulométrique du sable de chalghoum laid

Ouverture des tamis	Masses (g)	Teneurs (%)		Mf
	Refus cumulés	Refus cumulés	Tamisas cumulés	
8	0	0	100	3.49
6.3	0	0	100	
4	38	4.30	96	
2	271	30.72	69	
1	504	57.14	43	
0.500	662	75.05	25	
0.250	773	87.64	12	
0.125	838	95.01	5	
0,063	878	99.54	0.5	
Fond tamis	3	/	/	

On remarque que le sable de Chelghoum laid est un sable grossier.

La correction du sable de oued souf par le sable de chalghoum laid été nécessaire, selon la méthode D'Abrams, on a trouvé les fractions suivantes :

- Sable de oued souf = 66.44 %.
- Sable de chalghoum laid = 33.56 %.

La vérification et l'analyse granulométrique par tamisage de sable corrigé :

Tableau V.09 : Caractéristiques du sable corrigé

Caractéristiques	Sable corrigé
Masse volumique (g/m ³)	2.656
Masse spécifique (g/cm ³)	2.650
Humidité	2

Tableau V.10 : Analyse granulométrique du sable corrigé

Ouverture des tamis	Masses (g)	Teneurs (%)		Mf
	Refus cumulés	Refus cumulés	Tamisats cumulés	
8	0	0	100	2.50
6.3	0	0	100	
4	20	1.66	98	
2	123	10.25	90	
1	296	23.83	76	
0.500	511	42.58	57	
0.250	914	76.16	14	
0.125	1152	96	4	
0,063	1198	99.83	0.20	
Fond tamis	2	/	/	

3. GRAVIER ;

3.1. Gravier 3/8 :

➤ Les caractéristiques de gravier 3/8 :

Tableau V.11 : Caractéristiques de gravier 3/8

Caractéristique	Gravier 3/8
Masse volumique (Kg/m ³)	2.652
Masse spécifique (g/cm ³)	1.355
Teneur en eau (%)	1.4
Los Angles (%)	23
Micro de vale (%)	18
Porosité (%)	4.92
Absorption (%)	2.3
Humidité (%)	4

➤ Analyse granulométrique de gravier 3/8 :

Tableau V.12 : Analyse granulométrique du gravier 3/8

Ouverture des tamis (mm)	Masses (g)	Teneurs (%)	
	Refus cumulés	Refus cumulés	Tamisât cumulés
10	0	0	100
8	9.1	0.5	99
6.3	295.7	16.25	84
5	1237.6	68	32
4	1633.45	99.18	10
2	1810.9	99.5	0.5
1	1810.9	99.5	0.5
0.5	1810.9	99.5	0.5
0.250	1810.9	99.5	0.5
0.125	1810.9	99.5	0.5
0.063	1812.7	99.6	0.4
Fond tamis	/	/	/

➤ Coefficient d'aplatissement pour le gravier 3/8

Tableau V.13 : coefficient d'aplatissement des graviers 3/8

Masse de la prise d'essai M ₀ =1462 g		Somme des masses éliminées=113g	
Tamisage sur tamis d'essai		Tamisage sur grilles à fentes	
Granulat élémentaire di/Di (mm)	Masse (R _i) du granulat élémentaire di/Di (g)	Ecartement nominal des fentes (mm)	Passant sur une grille à fente (m _i) (g)
10	32	6.3	01
8	82	5	10
6.3	472	4	72
5	542	3.15	74
4	231	2.5	113
M _i =∑ R _i	1359	/	270
C.A 3/8 = 19.86%			

3.2. Gravier 8/15 :

➤ Les caractéristiques de gravier 8/15 :

Tableau V.14 : Caractéristiques de gravier 3/8

Caractéristique	Gravier 8/15
Masse volumique (Kg/m ³)	2.666
Masse spécifique (g/cm ³)	1.356
Teneur en eau (%)	0.9
Absorption (%)	0.9
Porosité (%)	4.79
Los Angeles	28.44
Micro de Vale	21
Humidité (%)	4

➤ Analyse granulométrique de gravier 8/15:

Tableau V.15 : Analyse granulométrique du gravier 8/15

Ouverture des tamis (mm)	Masses (g)	Teneurs (%)	
	Refus cumulés	Refus cumulés	Tamisâts cumulés
20	0	0	100
16	70	2.33	98
14	350	11.66	88
12.5	717	23.9	76
10	1756	58.53	41
8	2676	89.2	11
6.3	2938	97.93	02
4	2965	98.83	01
2	2967	98.83	01
0.063	2968	98.90	01
Fond tamis	/	/	/

➤ Coefficient d'aplatissement pour le gravier 8/15 :

Tableau V.16: coefficient d'aplatissement de gravier 8/15

Masse de la prise d'essai $M_0=2976g$		Somme des masses éliminées=5g	
Tamisage sur tamis d'essai		Tamisage sur grilles à fentes	
Granulat élémentaire d_i/D_i (mm)	Masse (R_i) granulat élémentaire d_i/D_i (g)	Ecartement nominal des fentes (mm)	Passant sur une grille à fentes (m_i) (g)
20	00	12.5	00
16	119	10	22
12.5	878	8	71
10	1074	6.3	108
8	852	5	99
6.3	246	4	17
5	16	3.16	00
4	02	2.5	00
$M_1=\sum R_i$	3187	/	317
C.A8/15 =9.94			

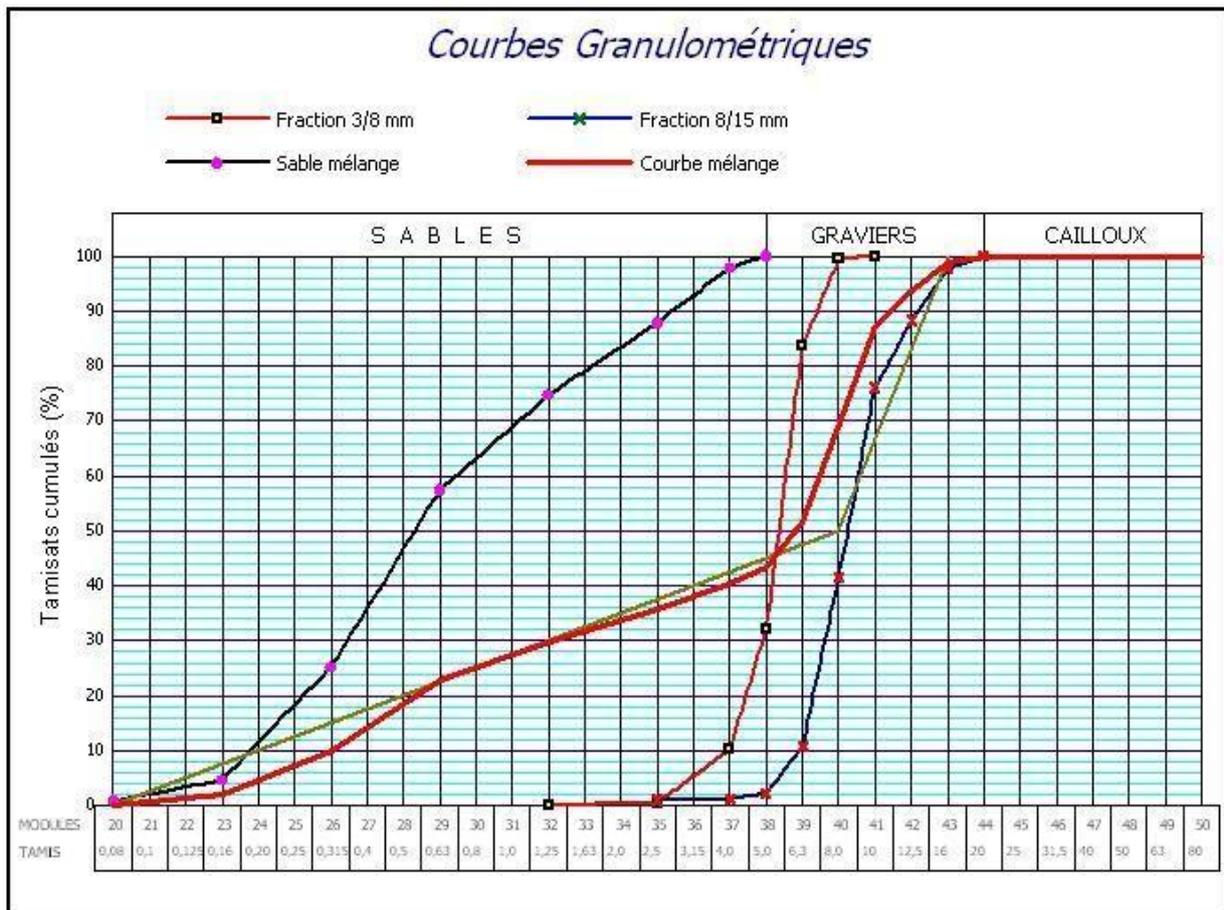


Figure. V.01 : la courbe granulométrique

4 – LA BOUE

On a choisi la boue de dragage du barrage de Beni Amrane. Cette boue a été séchée, Concassé et broyée, tamisée sur le tamis de 80µm avant calcination à 750°C pendant 5h. La boue calcinée a subi deux types de refroidissement :

- Un refroidissement à l’air libre notée (Ba),
- Un refroidissement à l’eau notée (Be)



Figure V-02: BA



Figure V-03: BE

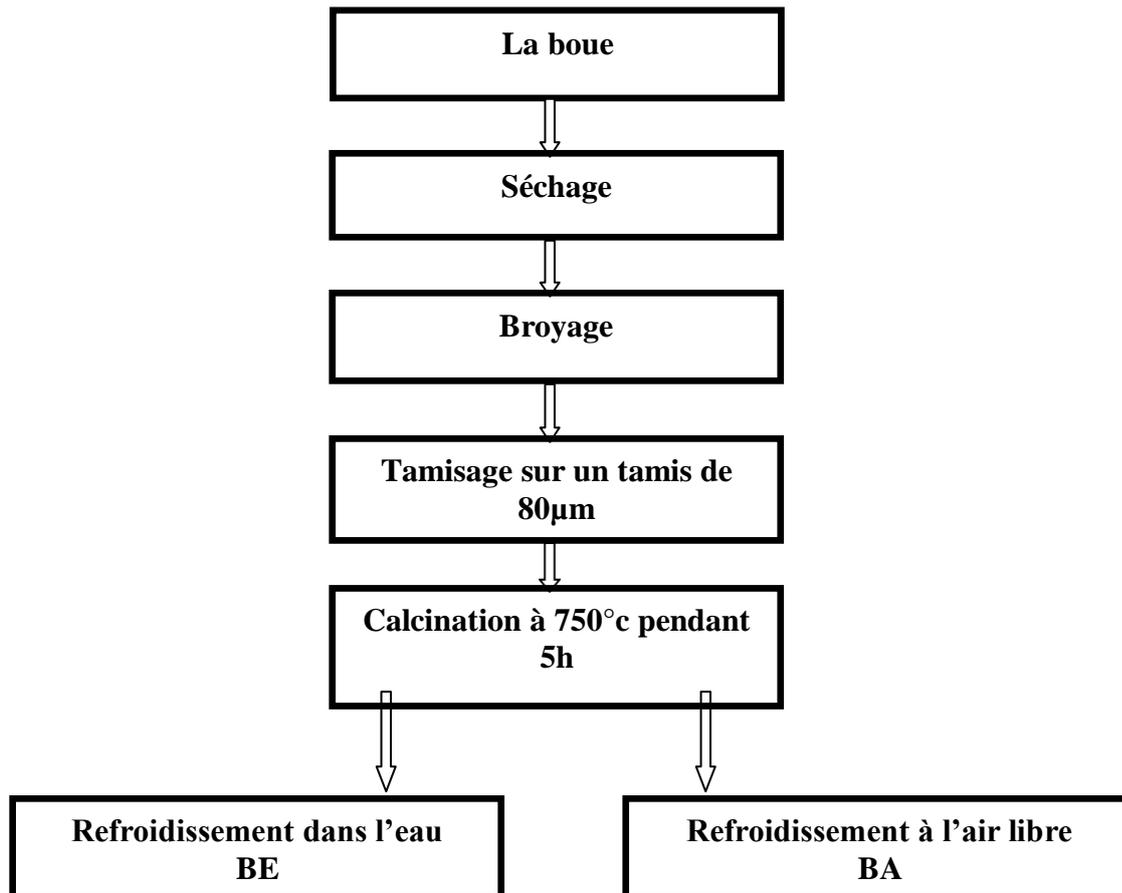


Figure .V.04 : Procédure de la préparation de vase calcinée

4.1 Caractéristiques physico-chimique :

Tableau V.17 : Caractéristiques physiques

Caractéristiques	Ba	Be
Consistance normale (%)	25.8	26.6
Début de prise (min)	160	140
Fin de prise (min)	310	310
Masse spécifique (g/cm ³)	2.65	2.65
Surface spécifique (SSB) (Cm ² /g)	8000	8000

Tableau V.18 : Composition chimique.

Eléments (%)	Ba	Be
SiO ₂	57.60	58.13
Al ₂ O ₃	16.25	17.39
Fe ₂ O ₃	6.45	6.67
CaO	8.75	9.79
MgO	1.58	1.61
K ₂ O	2.10	0.26
Na ₂ O	0.76	0.85
SO ₃	0.70	0.21
P ₂ O ₅	0.20	0.20
TiO ₂	0.82	0.84
PF	2.48	2.55

5- LES FIBRES METALLIQUES :

La géométrie des fibres est choisie en tenant compte de la taille des granulats utilisés. Les Fibres métalliques agissent dès les plus faibles ouvertures de fissures en attribuant au matériau des résistances en traction et en flexion améliorées.

On a utilisé dans notre travail comme fibre métallique les copeaux d'usinage (déchet d'acier) de longueur ≤ 3 cm. Avec une densité égale à 5 g/cm³.



Figure V.05 : Déchet d'acier

6- L'EAU DE GACHAGE : l'eau utilisée est l'eau potable

DEUXIEME PARTIE

Cette partie est consacrée à la formulation de différents types de mortier, un mortier témoin MT sans ajout et des mortiers avec l'ajout de deux types de la boue (la boue refroidis à l'air et la boue refroidi à l'eau) par substitution du ciment avec différents dosages (10%, 15%, 20%). On les note MA-10%, MA-15%, MA-20% pour mortiers avec boue refroidit à l'air et ME-10%, ME-15% et ME-20% pour mortiers avec boue refroidit dans l'eau.

I. Formulation :

Les mortiers ont été réalisé selon la norme (NF P 15 – 403). Le sable utilisé est un sable normalisé conforme à la norme EN 196-1. Il est commercialisé en sacs plastique de 1350g ± 5g. La granulométrie de ce sable est comprise entre 0.08 et 2 mm, Sa masse volumique est de 2700 kg/m³.

Les éprouvettes de mortier utilisées sont de forme prismatique (4×4×16 cm³). Elles sont élaborées de la même façon afin d'assurer une reproductibilité dans les manipulations. Après démoulage, les éprouvettes sont conservées dans un bassin rempli d'eau à température de 20°C. La composition des différents mortiers est donnée dans le tableau suivant :

Tableau V.19 : Les dosages des différents constituants de mortier

Type du béton	Ciment (g)	eau (g)	Sable normalisé (g)	Boue calcinée (g)	E/C
M Témoin	450	225	1350	/	0,5
M à l'air 10%	405	225	1350	45	0,5
M à l'air 15%	382.5	225	1350	67.5	0,5
M à l'air 20%	360	225	1350	90	0,5
M à l'eau 10%	400	225	1350	45	0,5
M à l'eau 15%	382.5	225	1350	67.5	0,5
M à l'eau 20%	360	225	1350	90	0,5

1- Essai de compression

On a utilisé la même appareil à l'écrasement MATEST TREVILOLO, à la compression et flexion juste en change le disposition avec une vitesse 0.5 MPA/S.

Tableau V.20 : Caractéristiques mécaniques des mortier

Type du mortier	La résistance par compression en (MPa)	
	7j	28j
MT	39.783	50.900
MA-10%	34.558	44.680
MA-15%	33.934	43.584
MA-20%	32.026	44.860
ME-10%	35.721	46.517
ME-15%	34.386	45.505
ME-20%	30.597	42.899



Figure V.06 :Essai de compression

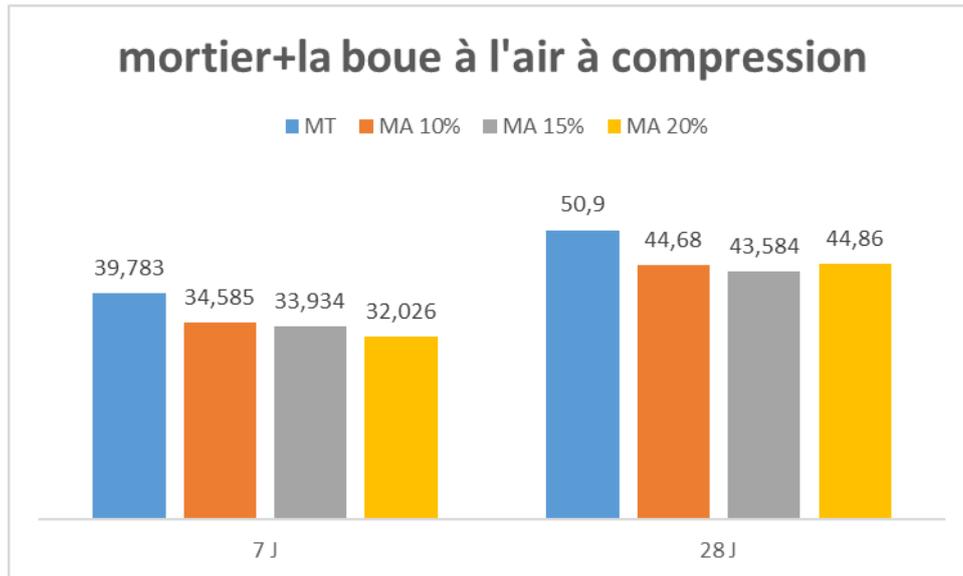


Figure V.07: histogramme de MA compression 10%, 15%, 20%.

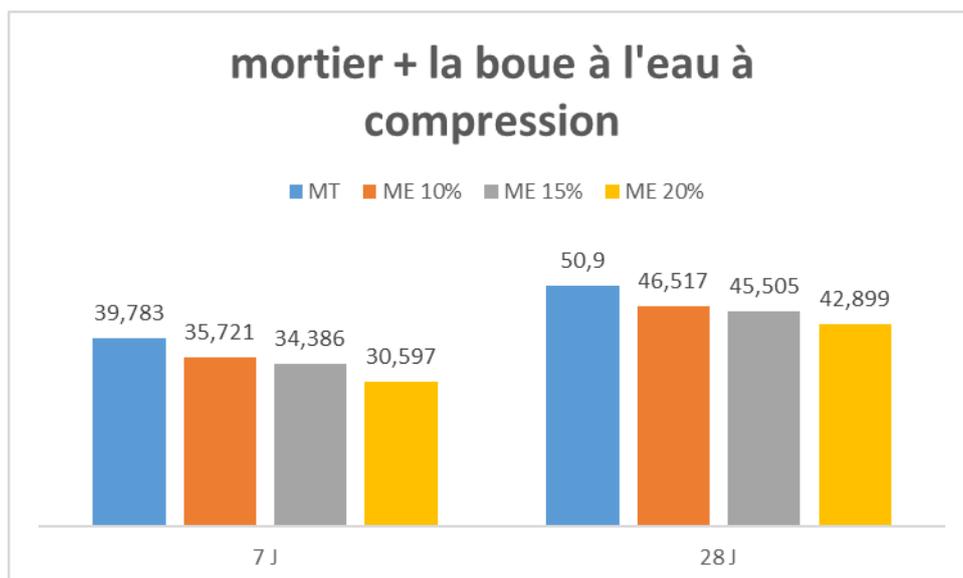


Figure V.08: histogramme ME compression 10%, 15%, 20%.

D'après ces résultats, on note que les mortiers MA 10%, ME 10% donnent des meilleurs résultats par rapport aux autres mortiers. L'augmentation de dosage de la boue influe sur l'évolution de la contrainte des mortiers en fonction du temps.

La contrainte du mortier substitué de la boue refroidit à l'eau avec un dosage 10% (ME 10%) donne un meilleur résultat à celle du mortier MA 10% et cela revient à la différence de la composition chimique de la boue refroidit dans l'eau. Par rapport à celle refroidit à l'air libre.

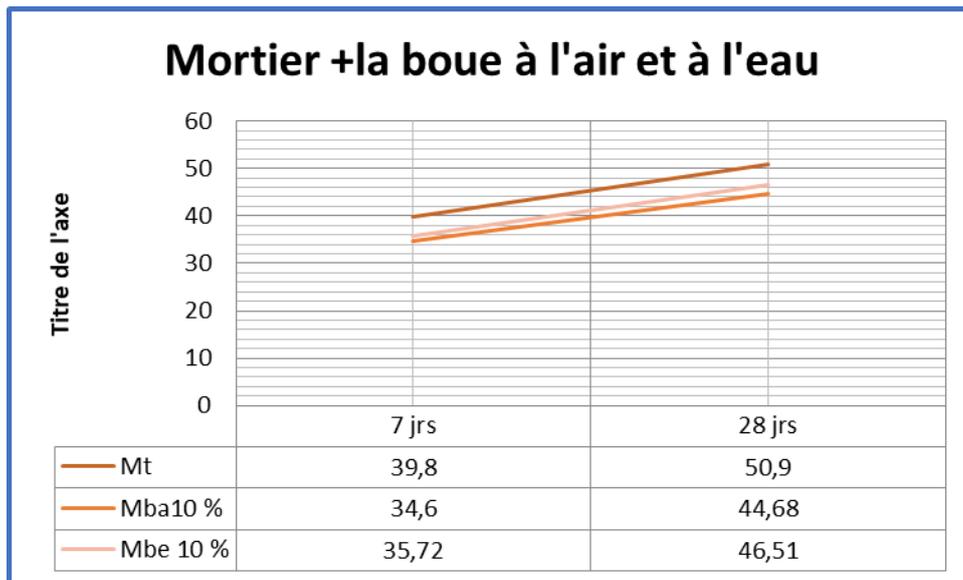


Figure V.09 : courbes comparatives de compression du MA, ME, MT

On remarque que le mortier témoin représente un meilleur résultat mais avec une petite différence entre lui MT (50,9 MPa) et le MA 10% (46,51MPa) et MB 10% (44,68 MPa). Cette différence est due à la réaction à long terme des boues calcinées. Par conséquent, nous pouvons dire que ces résultats sont encourageants et prometteurs.

2. Essai de Flexion :

Tableau V.21 : Caractéristiques mécaniques

Type du mortier	La résistance par flexion en (MPa)	
	7j	28j
MT	8.478	13.030
MA-10%	9.013	14.726
MA-15%	7.564	8.208
MA-20%	7.659	8.913
ME-10%	9.372	14.253
ME-15%	7.772	8.265
ME-20%	7.280	8.918



Figure V.10 : essai de traction

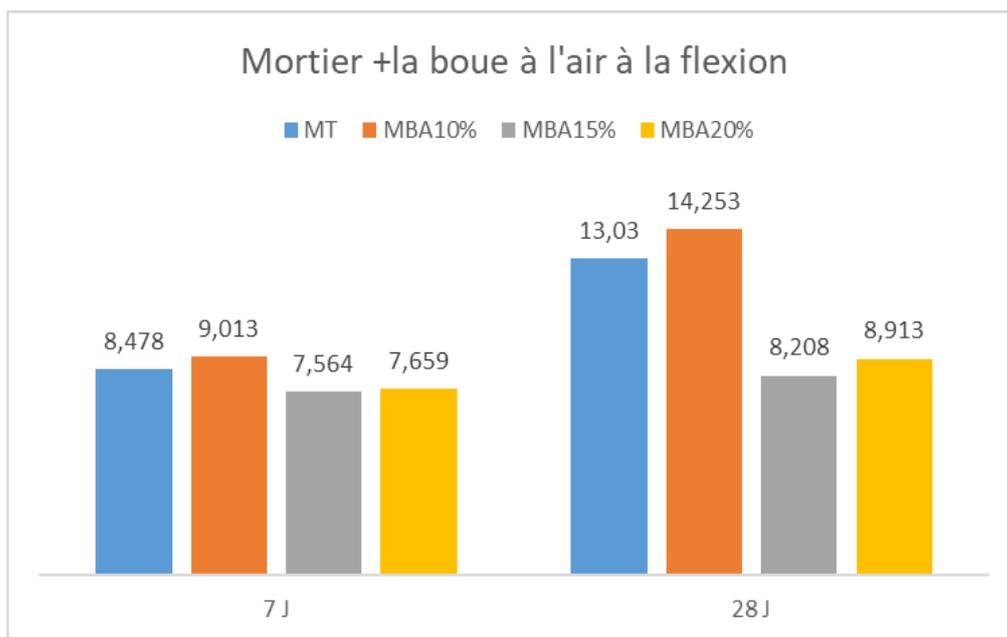


Figure V.11: histogramme de MA de flexion 10%, 15%, 20%.

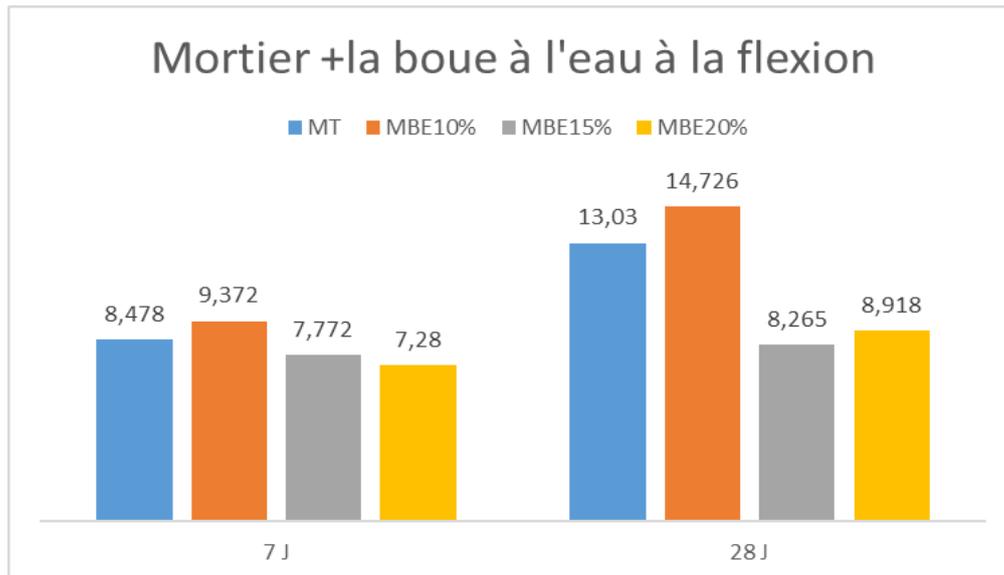


Figure V.12 : histogramme de flexion ME 10%, 15%, 20%.

On distingue que MBE 10% représente une meilleure contrainte avec une convergence de résultats,

TROISIEME PARTIE :

Cette partie est consacrée à la formulation, du béton témoin et béton fibré avec différents pourcentages des fibres plus les deux types de sédiment en substitution de 10% de ciment.

I. FORMULATION DES BETONS :

La méthode utilisée pour la formulation des bétons est celle de DREUX. Pour cette partie, nous avons formé de huit types de béton qui sont :

- Béton témoin : 0% des fibres avec 0% de la boue (**BT**).
- Béton fibré BA I : 1% des fibres avec 10% de la boue à l'air (**BFA-1%**).
- Béton fibré BA II : 1,5 % des fibres avec 10% de la boue à l'air (**BFA-1.5%**).
- Béton fibré BAIII : 2% des fibres avec 10% de la boue à l'air (**BFE-2%**).
- Béton fibré BEI : 1% des fibres avec 10% de la boue refroidie à l'eau (**BFE-1%**).
- Béton de laitier BE II : 1,5% des fibres avec 10% de la boue à l'eau (**BFE-1.5%**).
- Béton de laitier BE III : 2% des fibres avec 10% de la boue à l'eau (**BFE-2%**).

1.DONNEES DU PROBLEME :

- Types des bétons : plastiques (affaissement 9cm)
 - Résistance visée pour différent types des bétons à 28 jours : $F_{c28} = 30 \text{ MPa}$
- Les compositions des bétons à l'état sec sont données au tableau ci-dessous.

Tableau V.22 : Compositions des bétons étudiés

Type du béton	Ciment (Kg/m ³)	eau (l/m ³)	Sable de Oude souf (kg/m ³)	Sable de chalghoume (kg/m ³)	Gravier 3/8 (kg/m ³)	Gravier 8/15 (kg/m ³)	Boue calcinée (10%) (kg/m ³)	Fibres (kg/m ³)	E/C
BT	416	201	177.01	95.313	47.657	360.83	/	/	0,5
BFA 1%	370.24	201	177.01	95.313	47.657	360.83	41.6	4.16	0,5
BFA-1.5%	368.16	201	177.01	95.313	47.657	360.83	41.6	6.24	0,5
BFA-2%	366.08	201	177.01	95.313	47.657	360.83	41.6	8.32	0,5
BFE 1%	370.24	201	177.01	95.313	47.657	360.83	41.6	41.6	0,5
BFE-1.5%	368.16	201	177.01	95.313	47.657	360.83	41.6	6.24	0,5
BFE-2%	366.08	201	177.01	95.313	47.657	360.83	41.6	8.32	0,5

2.LE BETON FRAIS :

➤ **Essai d’ouvrabilité du béton :**

L’ouvrabilité est évaluée par l’essai d’affaissement à l’aide du cône d’Abrams conformément à la norme NF EN 12350 – 2 les résultats sont inscrits dans le tableau N°32.



Figure V.13: essai d’affaissement

Tableau V.23 : Variation de l’affaissement de différents bétons

Type du béton	BT	BFA-1%	BFA-1.5%	BFA-2%	BFE-1%	BFE-1.5%	BFE-2%
Affaissement (cm)	10,3	10	9,7	9,4	9,8	9,5	9,1

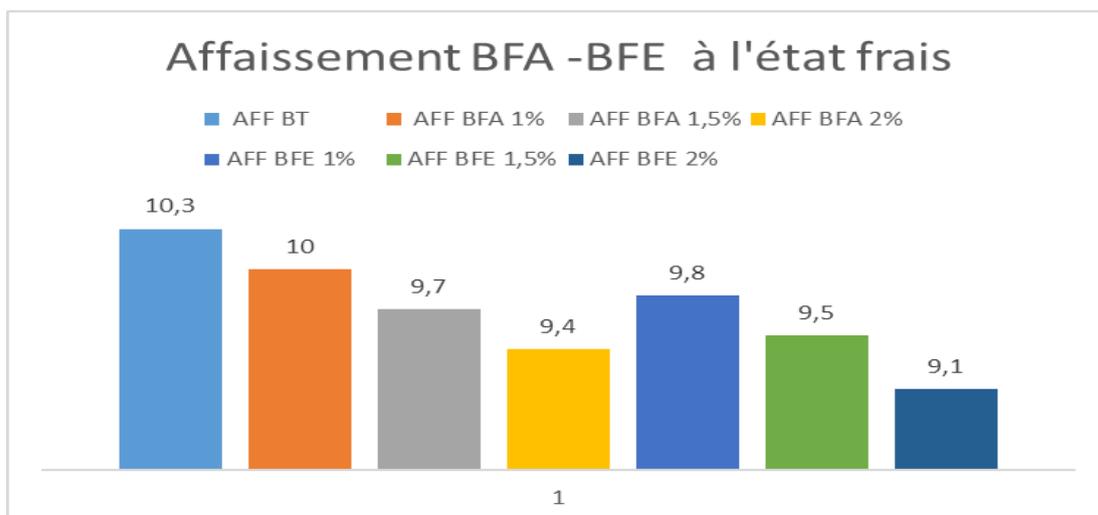


Figure V.14: histogramme d’affaissement

On remarque une diminution de l'affaissement avec l'augmentation de pourcentage de fibre par rapport au béton témoin, c'est une conséquence des frottements dit "solides" qui favorise la résistance de l'écoulement et l'amélioration de la cohésion de béton frais comme déjà montré par [97]. Ainsi, la finesse élevée de la boue calcinée qui nécessite une quantité d'eau supplémentaire

2.1. La masse volumique (NF EN 12350 – 6) :

La masse volumique des bétons frais a été déterminée par la formule suivante :

$$\rho = \frac{M}{V} \text{ (M est la masse de l'éprouvette et V son volume), les résultats sont inscrits dans le}$$

Tableau ci-dessous

Tableau V.24: Variation de la masse volumique à l'état frais de différents bétons

Type du béton	BT	BFA-1%	BFA-1.5%	BFA-2%	BFE-1%	BFE-1.5%	BFE-2%
MV du béton frais (Kg/m ³)	2616,26	2618,3	2622,42	2625,1	2620,15	2623,6	2626,3

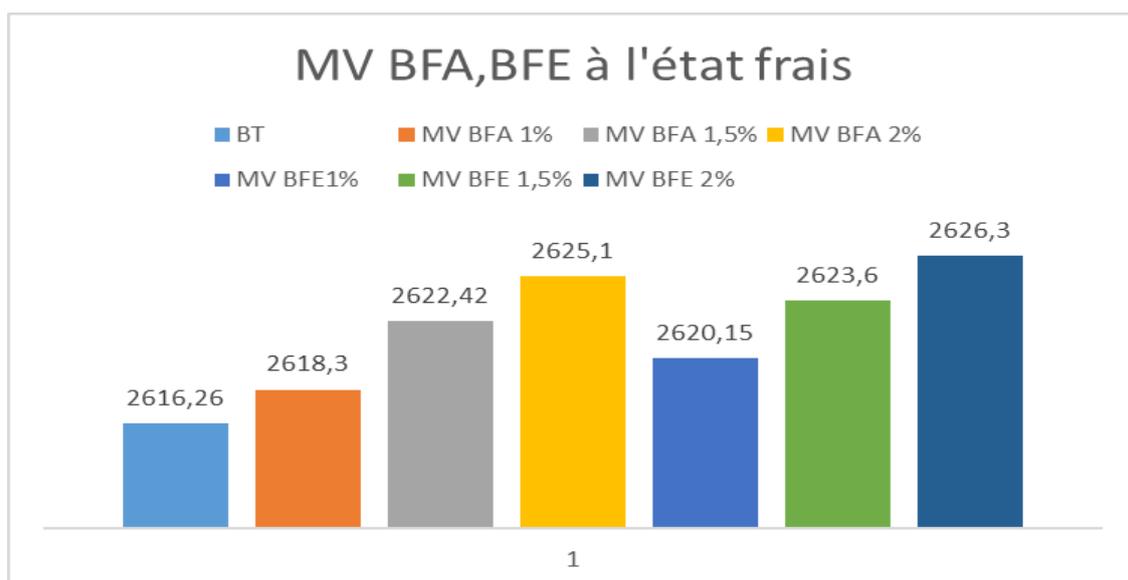


Figure V.15: la variation de la masse volumique BFA ,BFE à l'état frais

On constate une augmentation de la valeur de la masse volumique à l'état frais avec l'augmentation le dosage des fibres métalliques et l'incorporation de boue calcinée.

3. LE BETON DURCI :

3.1. La masse volumique :

La masse volumique du béton durci est la masse de l'éprouvette 11x22 cm² par son volume. Les masses volumiques sont mesurées à 7,14 et 28 jours, les résultats sont comme suit :

Tableau V.25 : La masse volumique des différents bétons

Type du béton	la masse volumique (Kg/m ³)		
	7j	14j	28j
BT	5.314	5.330	5.390
BFA1%	5.308	5.340	5.365
BFA-1.5%	5.280	5.320	5.360
BFA-2%	5.280	5.310	5.340
BFE-1%	5.399	5.310	5.360
BFE-1.5%	5.330	5.350	5.480
BFE-2%	5.300	5.340	5.360

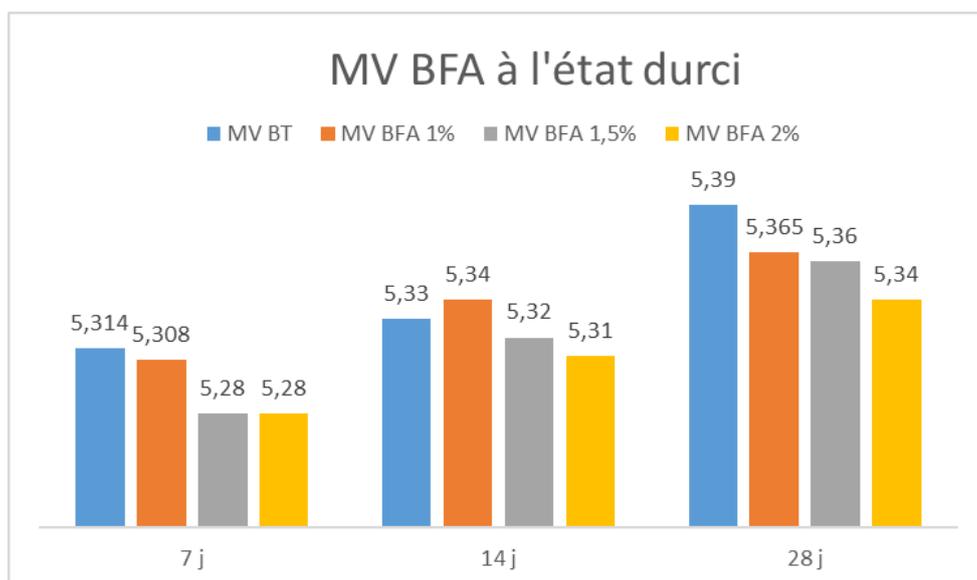


Figure V.16 : la variation de la masse volumique BFA à l'état durci

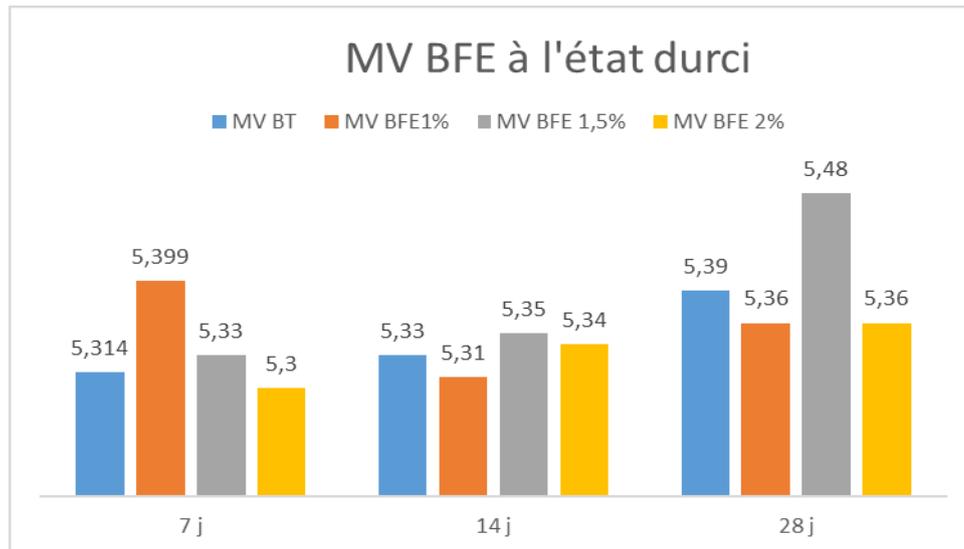


Figure V.17: la variation de la masse volumique BFE à l'état durci

D'après ces résultats, on remarque une évolution de la valeur de la masse volumique dans le temps. La masse volumique de béton avec la boue calcinée est supérieure à celle de béton témoin cela revient à la finesse de cette boue qui joue un rôle physique en densifiant la matrice du béton.

On note aussi, plus que le dosage des fibres augmente la valeur de la masse volumique augmente et cela revient à la masse volumique des fibres.

4.ESSAI DE RESISTANCE A LA COMPRESSION :

Des éprouvettes 11x 22 cm² ont été confectionnés puis démoulées après 24 heures, ensuite conservées dans l'eau à une température de 20 à 23 °C jusqu'à le temps désiré.

Les éprouvettes ont été écrasées aux différents âges (7, 14, 28j), à l'aide d'une presse de charge maximum 2000 KN.

Tableau V.26 : La résistance à la compression des différents bétons

Type du béton	La résistance à la compression (MPa)		
	7j	14j	28j
BT	26.00	28.77	29.50
BFA-1%	26.40	27.00	32.30
BFA-1.5%	27.02	32.10	35.00
BFA-2%	27.80	31.00	33.80
BFE-1%	32.50	36.30	37.80
BFE-1.5%	32.40	34.20	39.60
BFE-2%	29.40	31.50	36.30



Figure V.18 : Essai de compression

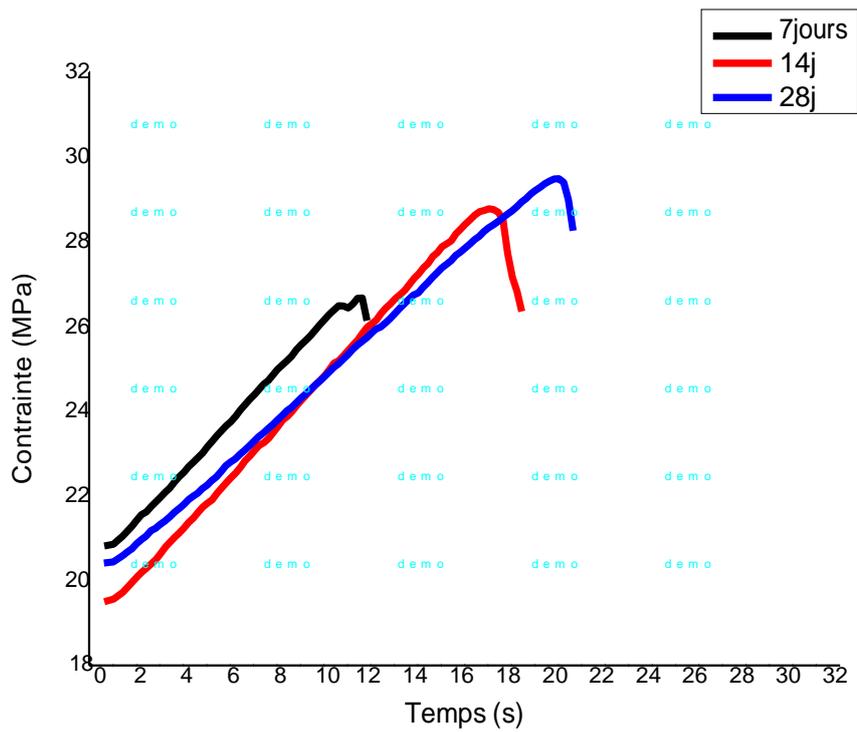


Figure V.19: Courbe de la contrainte en fonction du temps de béton témoin.

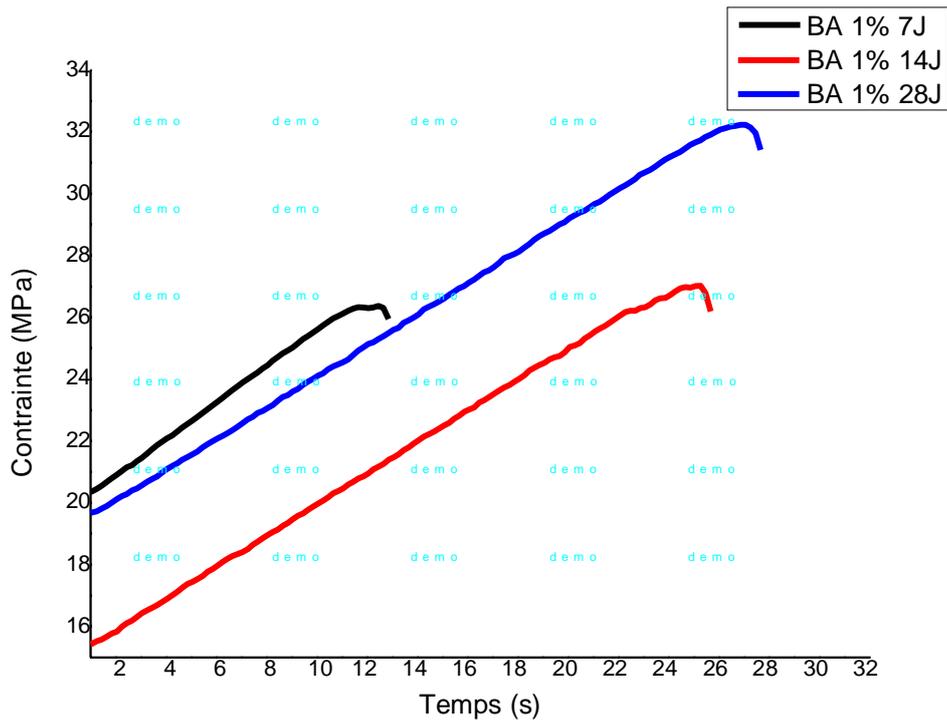


Figure V.20 : Courbe de la contrainte en fonction du temps de BFA 01%

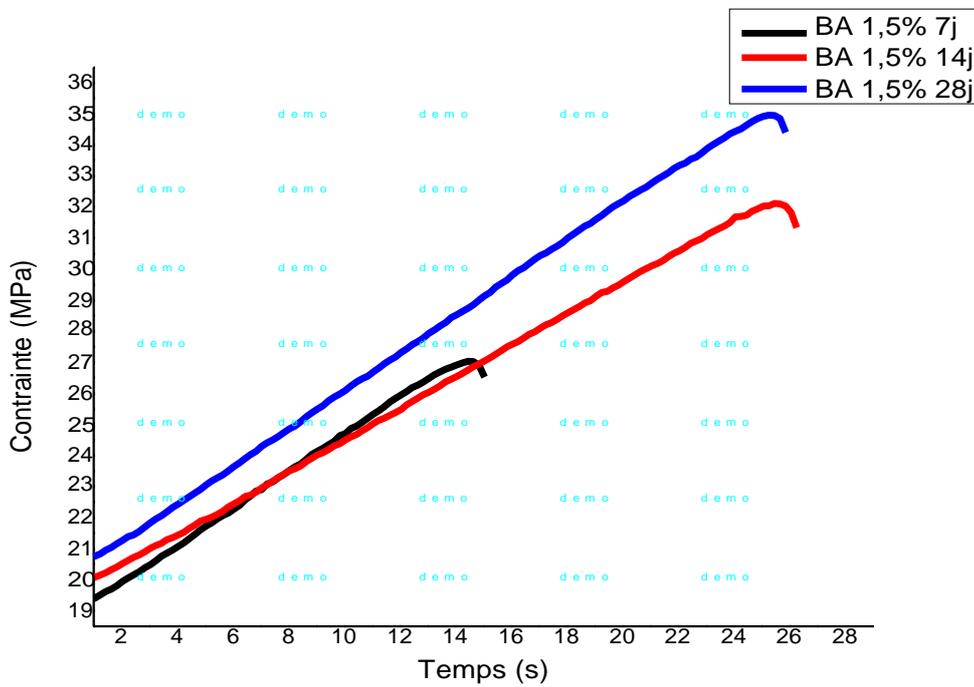


Figure V.21 : Courbe de la contrainte en fonction du temps de BFA 1.5%

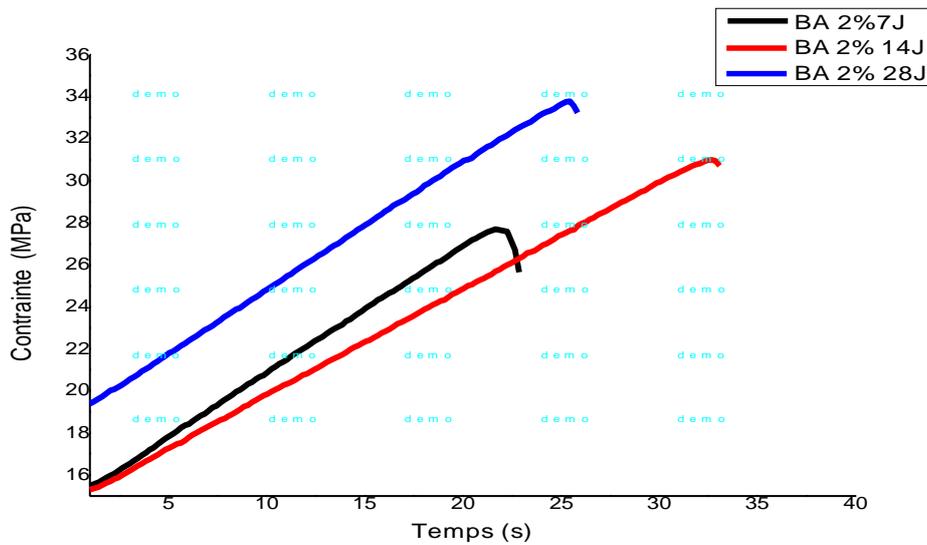


Figure V.22 : Courbe de la contrainte en fonction du temps de BFA 02%

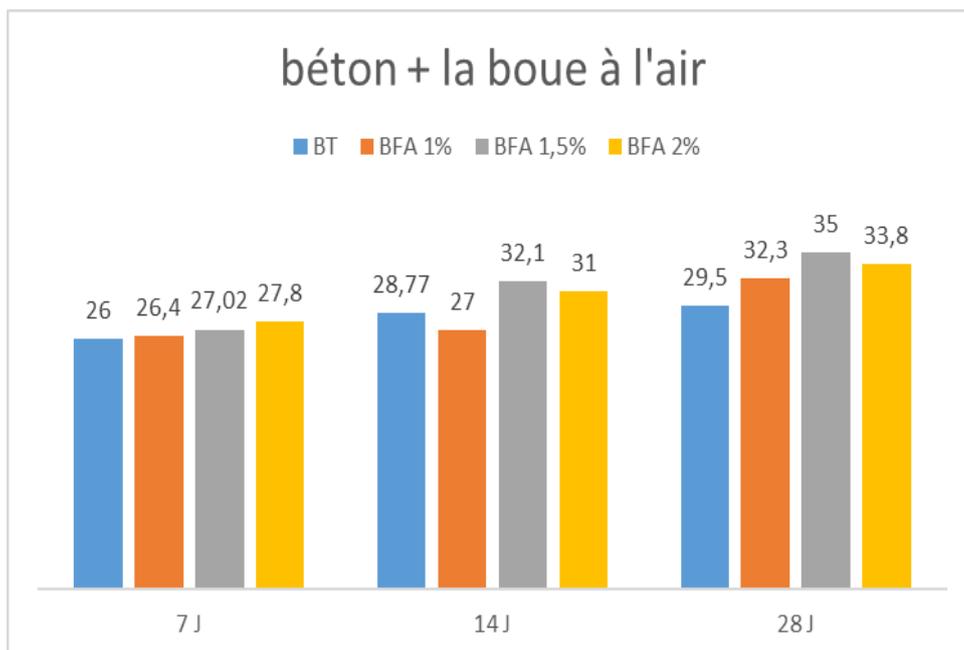


Figure V.23 : histogramme de BFA compression 7,14j,28j

On remarque l'augmentation de la résistance à la compression en fonction d'âge, et le béton avec 1.5% de fibre donne de meilleur résultat par rapport aux autres dosages.

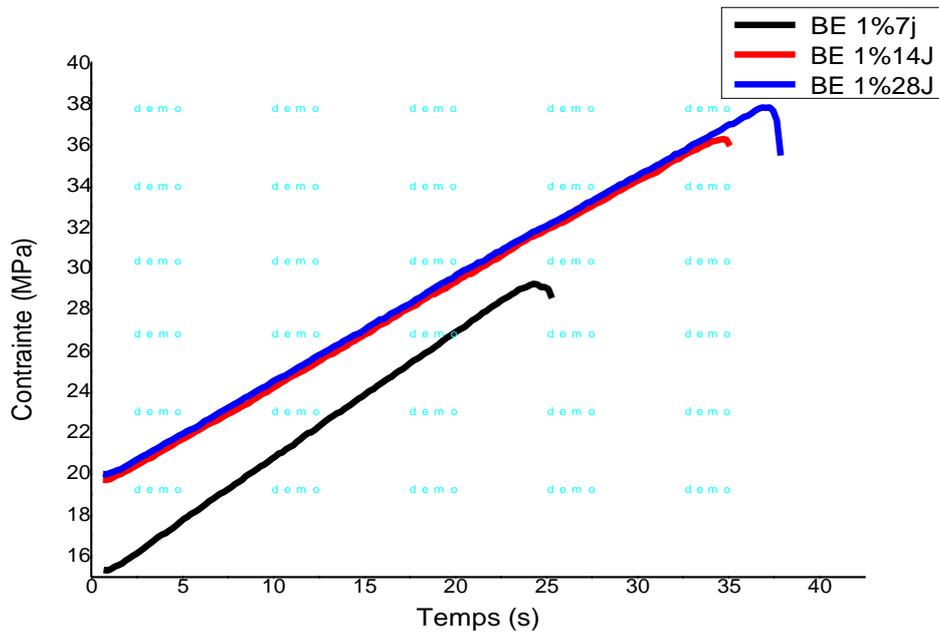


Figure V.24 : Courbe de la contrainte en fonction du temps de BFE 01%

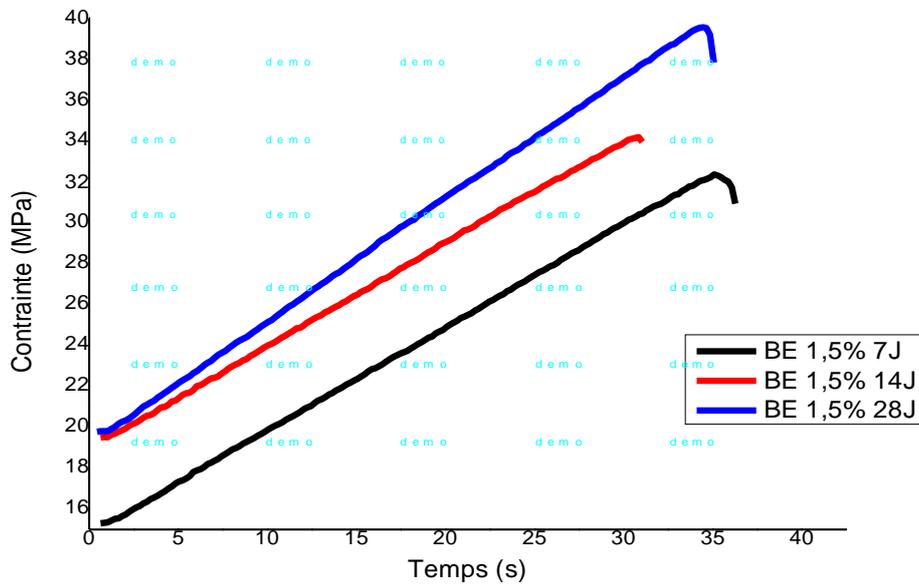


Figure V.25 : Courbe de la contrainte en fonction du temps de BFE 1.5%

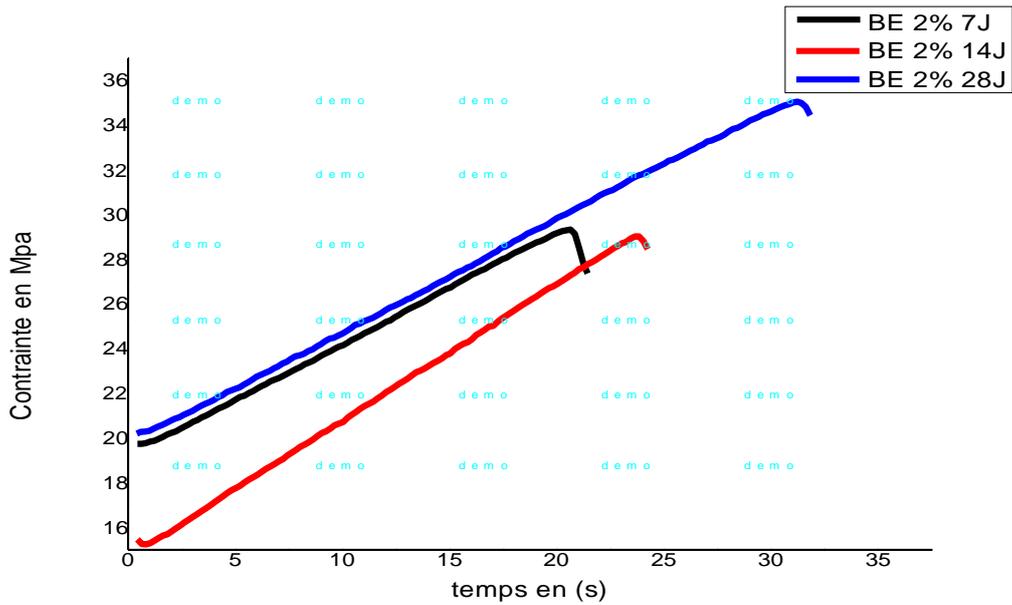


Figure V. 26: Courbe de la contrainte en fonction du temps de BFE 02%

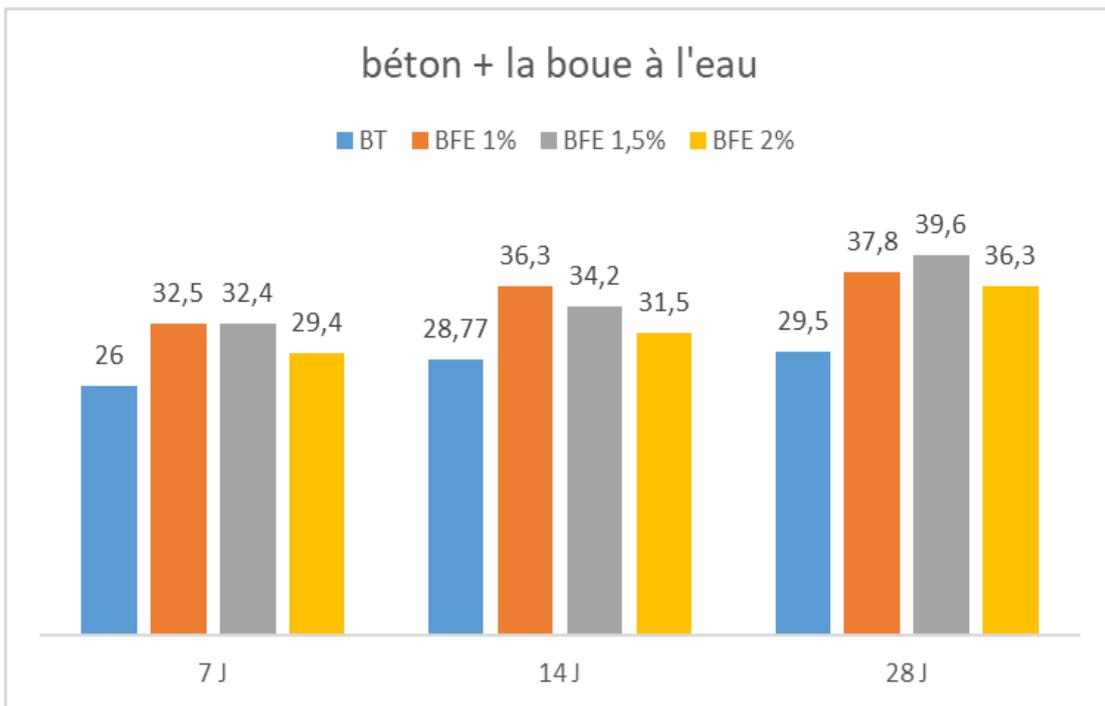


Figure V.27 : Histogramme de BFE compression 7,14j,28j

D'après ces résultats on remarque que le dosage de 1.5 % donne une meilleur valeur par rapport ou autre dosage (Bfe1%, Bfe 20%)

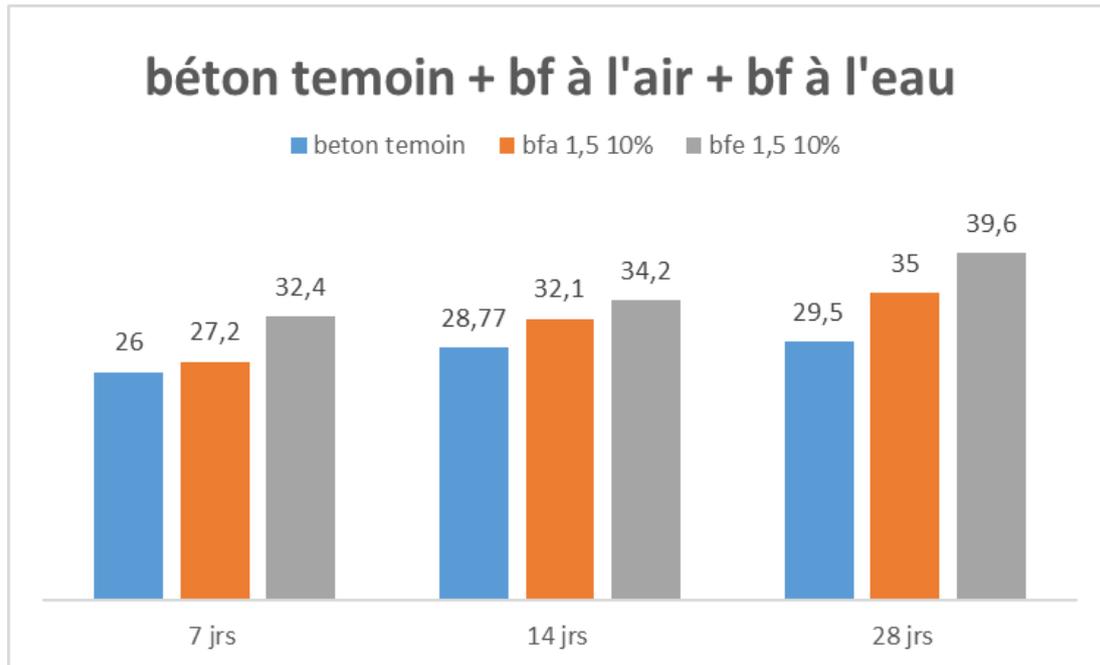


Figure V.28: Histogramme comparative de BT, BFA, BFE compression 7,14j,28j

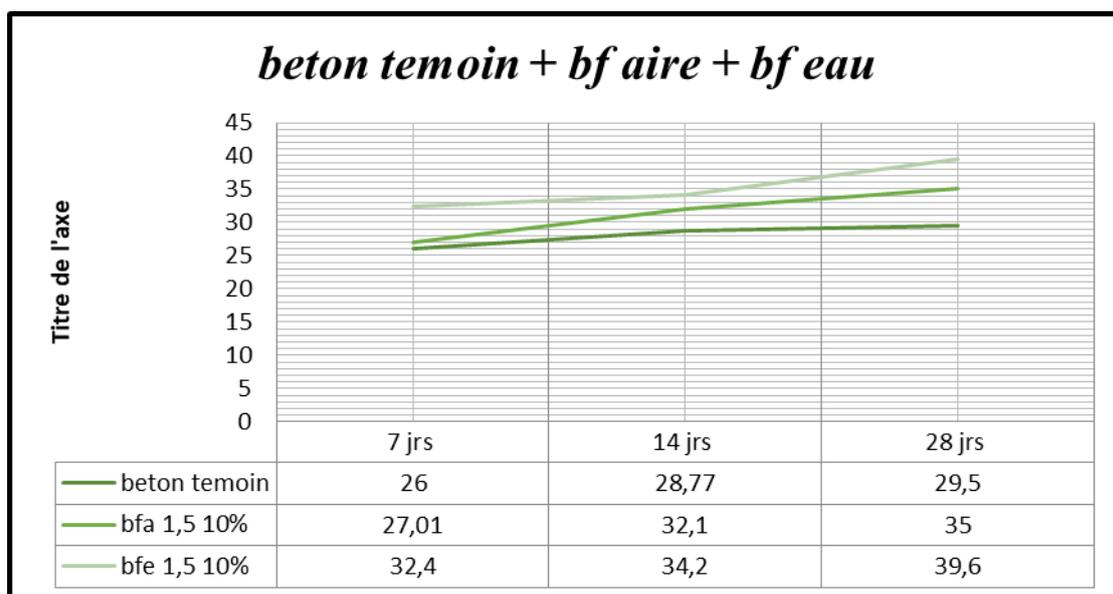


Figure V.29 : L'évolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge du béton

Ces résultats montrent une augmentation nette de la résistance à la compression des bétons fibrés avec la boue refroidit à l'eau par rapport au béton témoin et béton fibré avec la boue refroidit à l'air, cela fait par l'activité pouzzolannique de cet ajout minéral actif qui consiste à fixer la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libérée lors de l'hydratation de ciment pour former

Des hydrates (stables) qui contribuent à la résistance à la compression. Les fibres ne contribuent qu'après la rupture de la matrice, ce qui veut dire qu'ils ont un faible effet sur la résistance de béton à la compression car l'effet de la matrice est relativement forte à la compression comme déjà montrer par [98].

5. ESSAI DE TRACTION PAR FLEXION :

L'essai de traction par flexion est effectué sur des prismes $07 \times 07 \times 28 \text{cm}^3$ selon la norme NF P18-407, à (7, 14 ,28) jours nous avons inscrit les résultats suivants :



Figure V.30: Essai de flexion

Tableau VI.27 : La résistance à la traction par flexion des différents bétons

Type du béton	La résistance par flexion en (MPa)		
	7j	14j	28j
BT	5.70	5.80	6.80
BFA-1%	5.00	5.80	6.50
BFA-1.5%	6.20	6.40	8.10
BFA-2%	5.20	5.90	7.80
BFE-1%	4.60	5.50	6.00
BFE-1.5%	6.40	7.00	7.60
BFE-2%	5.20	6.60	7.20

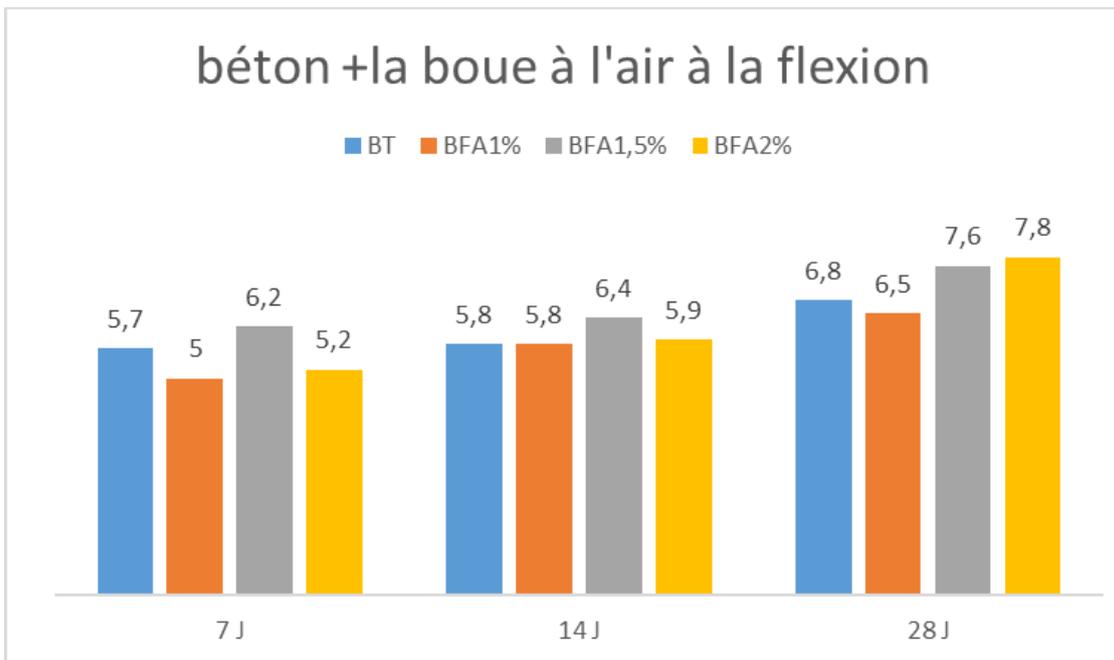


Figure V.31: Histogramme de BFA flexion 7,14j,28j

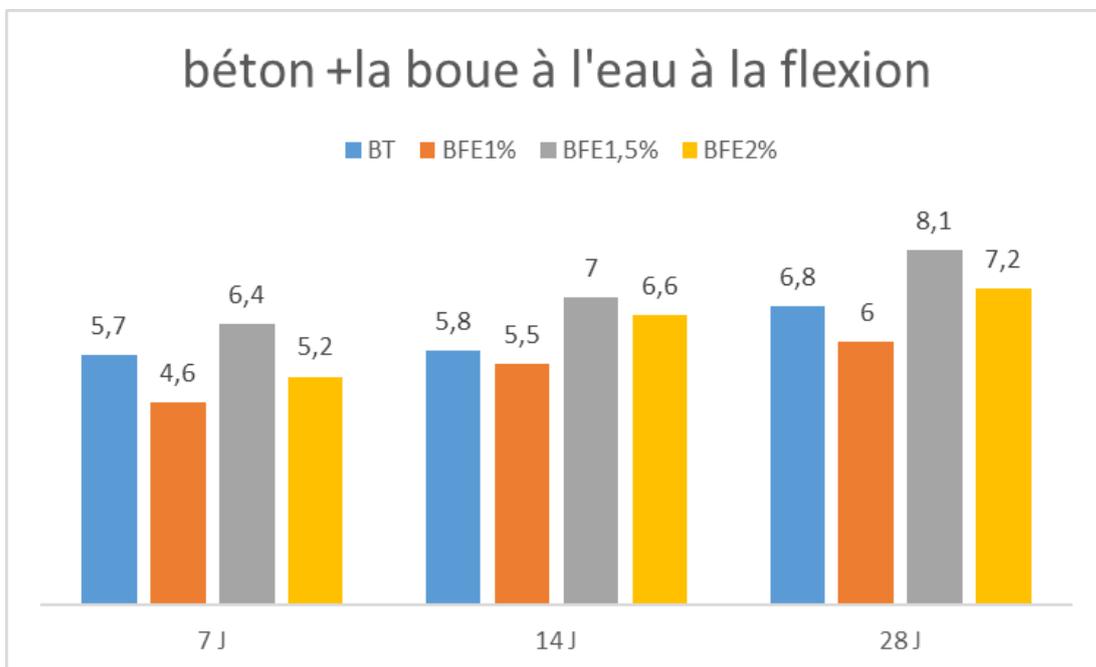


Figure V.32: Histogramme de BFE flexion 7,14j,28j

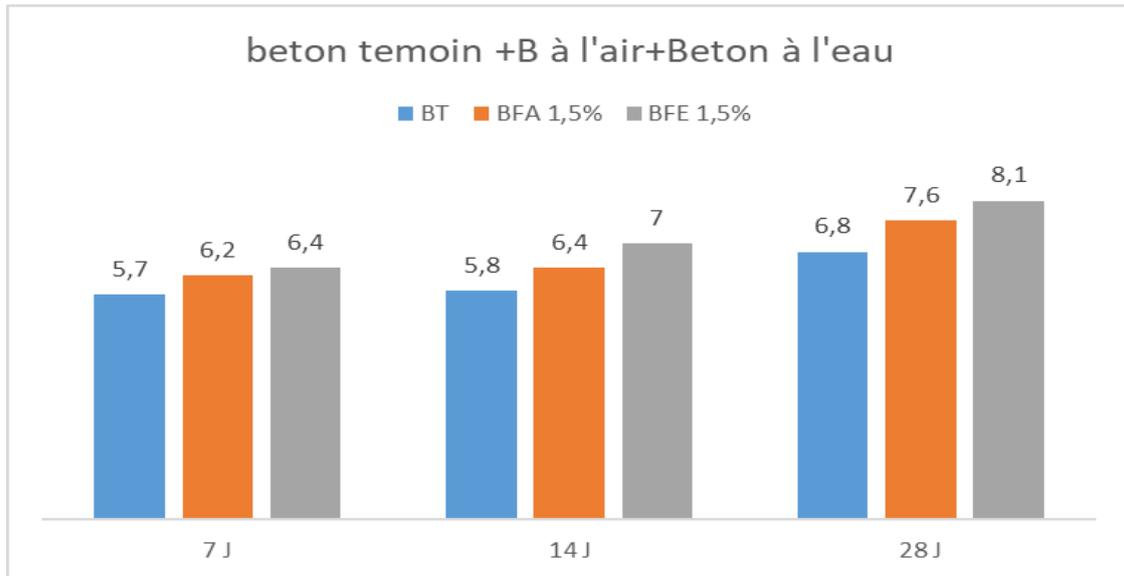


Figure V.33 : Histogramme comparative de BT, BFA ,BFE flexion 7,14j,28j

D'après ces résultats, on constate :

- 3.2.L'évolution de la contrainte de traction par flexion dans le temps
- 3.3. Les bétons fibrés avec la boue calcinée (refroidit à l'air ou la boue refroidit à l'eau) présentent des résistances élevées par rapport au béton témoin ; ce qui veut dire que les fibres ont apporté un soutien au zones faibles, elles ont pour effet d'homogénéiser la répartition des efforts internes ; elles contribuent à la réduction de la largeur des fissures dans la matrice de béton (limitation de l'ouverture des fissures et répartition de la microfissuration). De plus, la finesse de la boue calcinée augmente l'adhérence pâte-granulats et la compacité de béton-ce l'effet de la formation de nouveaux hydrates qui freinent la propagation des microfissures ce qui contribue la résistance à la traction par flexion.
- 3.4. Le béton avec 1,5% de fibre avec la boue refroidit dans l'eau donne des meilleurs résultats par rapport aux autres types de béton et cela revient la composition chimique de la boue refroidit dans l'eau et sa finesse

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail de recherche rentre dans le cadre de la valorisation des boues de dragage et les fibres récupérées des déchets d'usinage (copeaux métalliques) dans les bétons. Dans ce contexte, il est aisé d'entrevoir l'intérêt tant économique qu'écologique que pourrait présenter l'utilisation des ces déchets.

D'après les résultats obtenus on peut conclure que :

1- Pour les mortiers avec la boue calcinée

➤ L'étude de la résistance mécanique des mortiers avec différents pourcentages a pour but de choisir le meilleur dosage parmi les dosages utilisés (10%,15%,20%) des deux boues calcinées (la boue calcinée refroidit à l'air et la boue calcinée refroidit à l'eau) cette étude nous permet de tirer les conclusions suivantes :

- L'addition de 10% de la boue donne le meilleur résultat par rapport aux autres dosages (15%, 20%).
- L'ajout de 10% de la boue calcinée refroidit à l'eau donne des meilleurs résultats par rapport à la boue refroidit à l'air, on a pu constater que la formulation à 10% de boue à l'eau présente une bonne résistance à la compression à 28 jours (très proche de celle du témoin) par conséquent ce dosage (10%) a été choisi pour la formulation du béton.

2- Pour les bétons fibrés avec 10% de la boue calcinée

Nous avons également apporté les déchets d'acier et après l'avoir coupé en morceaux ne trois dosage de fibre sont choisis (1%,1.5%, 2%) afin de déduire le dosage optimal

- La masse volumique des différents bétons avec ajout de la boue calcinée est sensiblement élevée par rapport au béton témoin suite à la densification de la matrice.
 - L'ouvrabilité des bétons fibrés avec la boue calcinée diminue par l'augmentation de dose de fibres incorporées.
 - En ce qui concerne les résistances mécaniques, les bétons fibrés avec la boue calcinée présentent des résistances élevées par rapport au béton témoin et le béton formulé avec 1,5% de fibres donne de meilleurs résultats par rapport aux autres bétons.
-

Références bibliographiques

- [1] Youssef fritih, apport d'un renfort de fibres sur le comportement d'éléments en béton autoplaçant armé « doctorat de l'université de Toulouse » 2009.
- [2] : Chanvillard et d'Aloia : « Préviation de la résistance en compression au jeune âge du béton, Application de la méthode du temps équivalent, Bull. Liaison Lab. Ponts et Ch. »,1994.
- [3] : BOUKLI HACENE Sidi Mohammed El Amine: « CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA RESISTANCE CARACTERISTIQUE DES BETONS DE LA REGION DE TLEMCCEN », Thèse de Doctorat à L'université aboubekr belkaid, tlemcen, 2009.
- [4] : ANDRIAMANANSTILAVO.N: «Comportement des matériaux cimentaires dans un coffrage expérimentation, modélisation et simulation de la poussée et du processus de maturation ». Thèse de doctorat à l'Université de boumerdes, 2003.
- [5] : Walther .R et Miehlbradt.M : « Dimensionnement des structures en béton », traité de Génie Civil de l'école polytechnique fédérale de Lausanne, 1990.
- [6] : NF EN 197-1 : Ciment - Composition, spécification et critères de conformité des ciment courants indice de classement P 15-101-1.
- [7] : NF EN 450 : Cendres volantes pour béton - Définitions, exigences et contrôle de qualité: indice de classement P 18-050.
- [8] : NF P 18 -508 : Additions pour béton hydraulique – Additions calcaires-Spécification et critères de qualité : indice de classement P 18-508.
- [9] : NF P 18-502 : Additions pour béton hydraulique – Fumée de silice : indice de classement P 18-509.
- [10] : NF EN 196 -1 : Méthodes d'essais des ciments – Détermination des résistances Mécaniques : indice de classement P 15 – 471.
- [11] : NF EN 1008 : Eau de gâchage pour béton s –Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton indice de classement P 18-211.
- [12] : NGUYEN T.L.H : « Outils pour la modélisation de la mise en œuvre des bétons », Thèse de doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées, 139 p, 2007.

[13] : EL BARRAK. M : « Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais », Thèse de doctorat à l'université Toulouse III – Paul Sabatier, Juillet. 229 p, 2005.

[14] : LAPOINTE R : « Contribution à l'étude des méthodes d'injections des fissures dans le béton », Mémoire des études graduées, Université McGill, Montréal, Canada, 1997.

[15] : Norme Française XP P 18-540 : Granulats - Définitions, conformité, spécifications, indice de classement: P 15-540, 1997.

[16] : COURS DE MDC : « LES GRANULAT », Université De Setif, (www.univ-setif.dz).

[17] : BERREDJEM Layachi : « le recyclage des bétons de démolition, solution pour le développement durable. Formulation et comportements physiques et mécaniques des bétons à base de ces recyclé ». Mémoire de magister, Annaba, p 7,2009.

[18] : A. M. NEVILLE : « Propriétés des bétons », traduit par le CRIB, Edition Eyrolles, 2000.

[19] : Rappel sur les granulats : « Cours Géomatériaux », (alonet.yolasite.com).

[20] : EN 13055-1 : Granulats légers — Partie 1 : Granulats légers pour bétons et mortiers, 2002.

[21] : Norme Française XP P 18-553 : Granulats -Préparation d'un échantillon pour essai, AFNOR 1990.

[22] : Norme Française EN 932-1: Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats – Partie 1: Méthodes d'échantillonnage, AFNOR 1990.

[23] : G. DREUX & J. FESTA : « Nouveau guide du béton et ses constituants », Edition Eyrolles, 8eme édition, 1998.

[24] : Norme Française XP P 18-540 : Granulats - Définitions, conformité, spécifications, indice de classement: P 15-540, 1997.

[25] : NF EN 933-1 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : Détermination de la granularité — Analyse granulométrique par tamisage Indice de classement : P 18-622-1, 1997.

[26] : NF EN 933-2 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 2 : Détermination de la granularité — Tamis, dimensions nominales des ouvertures, 1996 Indice de classement : P 18-622-2, 1996.

[27] : F. GABRYSIK : « Matériaux - Les Granulats - Chapitre 2 », Académie de NancyMetz, http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/Batiment_Pro/. P 7.

[28] : R. DUPAIN, R. LANCHAN & J.-C. SAINT-ARROMAN : « Granulats, Sols, Ciments et Bétons », Editions Casteilla, 2ème édition conforme aux normes européennes, 2000.

[29] : Norme Française XP P 18-540 : Granulats - Définitions, conformité, spécifications, indice de classement : P 15-540, 1997.

- [30] : Norme Française EN 933-3 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 3 : Détermination de la forme des granulats – Coefficient d'aplatissement", indice de classement P18-622, AFNOR 1996.
- [31] : EN 1097-3 : granulat, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 3 : Méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité inter granulaire, indice de classement : P 18-650-3, version française, p 6, 1998.
- [32] : EN 1097-6 : granulat Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 , indice de classement : P 18-650-6, 1998.
- [33] : Norme Française XP P 18-598 : Granulats- Equivalent de sable, AFNOR, 1991.
- [34] : Norme Française XP P 18-597 : Granulats- Détermination de la propreté des sables : équivalent de sable à 10 % de fines, AFNOR, 1990.
- [35] : Norme Française EN 933-9 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 9 Evaluation des fines. Equivalent de sable, AFNOR, 1996.
- [36] : Norme Française EN 933-9 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 9 Evaluation des fines. Essai au bleu de méthylène, AFNOR, 1996.
- [37] : Norme Française P 18-577 : Granulats - Essai Micro-Deval, AFNOR, 1990.
- [38] : Norme Française EN 1097-1 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 1: Détermination de la résistance à l'usure (Micro-Deval), indice de classement P 18-650.1, AFNOR, 1996.
- [39] : Norme Française XP P 18-573 : Granulats - Essai Los-Angeles, AFNOR, 1990.
- [40] : NF EN 1097-2 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 2 : Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation, indice de classement : P 18-650-2, AFNOR, 1998.
- [41] : Bouglada. M.S (2008) Caractérisation physico-chimique et microstructurale des ajouts minéraux Thèse de doctorat d'Université Batna 2 p 65 2019
- [42] :. Bouglada. M.S (2008) Effet de l'activation du ciment avec ajout minéral par la chaux fine sur le comportement mécanique du mortier. Thèse de magister.Univeristé de M'sila.
- [43] : Saillio, M. (2013) Interactions physiques et chimiques ions-matrice dans les bétons sains et carbonatés. Influence sur le transport ionique . Université Paris-Est-Marne-La-Vallee.
- [44] : Thomas, M. (2013) Supplementary cementing materials in concrete, Supplementary Cementing Materials in Concrete. CRC Press is an imprint of theTaylor & Francis Group. doi: 10.1201/b14493.

- [45] : Amouri, C. (2009) Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité). Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine, pp. 158.
- [46] : Norman, F. (2005) L'emploi d'ajouts cimentaires dans les revêtements de chaussée en béton exposés aux cycles de gel-dégel et aux produits chimiques de déglacage, Cement Association Of Canada.
- [47] : Norme Européenne NF EN 197-1 (2001) Ciment-partie 1 Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants".
- [48] : Tokyay, M. (2016) Cement And Concrete Mineral Admixtures. Taylor & Francis Group.
- [49] : Dreux, G. and Festa, J. (2007) 'Nouveau guide du béton et de ses constituants'. Huitième édition, troisième tirage Eyrolles, p. 418.
- [50] : Aïtcin, P. C. (2004) High-Performance concrete. Taylor & Francis e-Library.
- [51] : Jayant, D. (2013) Mineral Admixtures in Cement and Concrete. CRC Press is an imprint of the Taylor & Francis Group.
- [52] : Miller, E. W. (1993) 'Blended cements-Applications and implications', Cement and Concrete Composites. Elsevier, 15(4), pp. 237-245.
- [53] : Hewlett, P. (2004) Lea's Chemistry of Cement and Concrete. Publisher: Elsevier Science & Technology Books.
- [54] : Gabrysiak, F. (2013) 'Matériaux-Les Bétons'. Académie de Nancy-Metz, p. 28.
- [55] : Massazza, F. (1998) 'Pozzolana and pozzolanic cements', Lea's chemistry of cement and concrete, Elsevier, London, 4, pp. 471-631.
- [56] : Hewlett, P. (2004) Lea's Chemistry of Cement and Concrete. Publisher: Elsevier Science & Technology Books.
- [57] FOUCAULT A., RAOULT J.F. « Dictionnaire de géologie ». Editions Masson, Paris, ISBN 2-25-654661-1, 1980.
- [58] SHNEIDER G. «Le curage des sédiments des cours d'eau ». Le courrier de l'environnement de l'INRA, vol. 43, pp. 146-147, 2001.
- [59] BERTREAU I., MARTIN S., VASSILIADIS A. « Le curage des cours d'eau lorsque les sédiments contiennent des éléments-traces toxiques ». Le courrier de l'environnement de l'INRA, vol. 20, pp. 27-35, 1993
- [60] AGENCE DE L'EAU (1). « Méthode de gestion et de réutilisation des sédiments pollués » - Inventaire détaillé des techniques de curage, transport, traitement et usage des sédiments, 2002, <http://www.eau-artoispicardie.fr/>.

- [61] C.TASDÉMIR « Combined effect of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete» Cement and concrete research.
- [62] CHIKOUCHE MOHAMED AZIZ: « Effet des ajouts à base d'argile gréseuse et vaseuse sur les propriétés des matériaux cimentaire »
- [63] El Ouardi E.M., «Etude de la calcination du phosphate clair de Youssoufia, Maroc». Afrique Science. 04 (2008) 199.
- [64] Semcha A., «Valorisation des sédiments de dragage: Applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug». Thèse de doctorat a l'Université de Reims ChampagneArdenne . Génie Civil. Décembre 2006.
- [65] Belas N., Besseghier N., Mebrouki A., Bouhamou N., «Vers une protection de l'environnement en valorisant la vase draguée du barrage comme composant du béton». Mater. Tech. 97 (2009) 231–240.
- [66] Taylor, H. F. W. (1990) Cement chemistry. Academic Press London.
- [67] Djobo Y., 2007 : « effets de l'incorporation d'adjuvants minéraux sur les propriétés de ciments gépolyinères a base scories volcanique».
- [68] Bouglada M., 2008 : « Effet de l'activation du ciment avec ajout minéral par la chaux fine sur le comportement mécanique du mortier », Thèse de Magister, UNIVERSITE DE M'SILA 2007/2008.
- [69] Hanafi I., 2012 : « étude de l'influence des ajouts cimentaires sur l'activite pouzzolanique des mortiers » .
- [70] P. Rossi, N. Harrouche et A. Belloc (1989), « Méthode de Composition des bétons de fibres métalliques », Annales de l'ITBTP, n° 475, pp. 38-43.
- [71] CHANVILLARD G, (1993), « analyse expérimentale et modélisation micromécanique du comportement des fibres d'acier tréfilées ancrées dans une matrice cimentaire », études et recherche des LPC, série ouvrages d'art.
- [72] : BOULEKBACHE B. HAMRAT M. CHEMROUK M. and AMZIANE S, 2009, «Influence of the rhéologie of steel fibers' Reinforced Concretes on their Mechanical Properties». European Journal of Environmentalkj and Civil Engineering.
- [73] P. Casanova (1995), « Béton renforcé de fibres métalliques du matériau à la structure ». Thèse Doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées Paris (France).
- [74] Taylor M., Lydon F.D. et Barr B.I.G. «Toughness measurements on steel fiber reinforced high strength concrete », Cement and Concrete Composites, 1997.

[75] Johnston C.D. (1996), « Proportioning, mixing and placement of fiber-reinforced cements and concretes », Production Methods and Workability of Concrete Proceedings of the International RILEM Conference, edited by Bartos, Marrs and Cleland, London

[76] : DREUX. G : « Nouveau guide du béton. », Edition Eyrolles, 2eme édition, 1979.

[77] : R. DUPAIN, R. LANCHAN & J.-C. SAINT-ARROMAN : « Granulats, Sols, Ciments et Bétons », Editions Casteilla, 2ème édition conforme aux normes européennes, 2000.

[78] : Mr BOUFEDAH BADISSI Ahmed : « influence de la granularité classe granulaire 4/22. Sur les caractéristiques des granulats et sur les propriétés des bétons ordinaire », Mémoire de Magister, université Mentouri Constantine, 2011.

[79] : VENANT.M : « Ciment et bétons. » 2ème édition, 1973.

[80] : Groupe Eyrolles : « Cône d'Abrams. » Edition Eyrolles.2010

[81] : EN 12350-6 : Essai pour béton – Partie 6 : Masse Volumique : indice de classement P 18-431, 1999.

[82] : Norme Française 12390-1 : Essai pour béton durci – Partie 1 : Dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules : indice de classement P 18-438).

[83] : Norme Française 12390-3 : Essai pour béton durci – Partie 3: Résistance à la compression des éprouvettes : indice de classement P 18-433) .

[84] : Norme Française 12390-4. Essai pour béton durci – Partie 4: Résistance en compression d'essai caractéristiques des machines : indice de classement P 18-441.

[85] : Norme Française 12390-6. Essai pour béton durci – Partie 6: Résistance en traction par fendage des éprouvettes : indice de classement P 18-434.

[86] : Norme Française 12390-5. Essai pour béton durci – Partie 6 : Résistance en traction par flexion des éprouvettes.

[87] : Norme Française 12390-7. Essai pour béton durci – Partie 7: Masse volumique du béton : indice de classement P 18-435.

[88] : BEN YAHIA Abdeslam., (2001), l'Influence des fibres métalliques sur le comportement mécanique du béton, Mémoire de magister, université de M'sila, Algérie.

[89] : DARDARE, J. " Contribution à l'étude du comportement mécanique des bétons renforcés avec des fibres de polypropylène "; RILEM Neville (A), 120, communication

[90] : ZIAD Bayasi, JACK Zeng., (1993), Properties of polypropylene fiber reinforced concrete, ACI Materials Journal, Volume 90, N°6, pp605-612.

[91] :ROSSI P., (1998), Les bétons de fibres métalliques, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, France.

[92] :BENTALHA M, (2007), Influence de l'introduction de fibres métalliques sur le comportement différé d'une matrice cimentaire, Caractérisation - comportement monotone - microstructure, Thèse de doctorat, université de Constantine, Algérie.

[93] :FRITIH Youcef., (2009), Apport d'un renfort de fibres sur le comportement d'éléments en béton autoplaçant armé, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France.

[94] :LÖFGREN I., (2005), Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction - a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis, PhD-thesis, Department of Civil and Environmental Engineering Structural Engineering, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Göteborg, Sweden.

[95] :ABBANI Saïd., (2003), Caractérisation et durabilité des bétons renforcés de fibres végétales de palmier dattier, Mémoire de magister, université de Ouargla, Algérie.

[96] :ACI 544., (1973), State of the-art: report on fiber reinforced concrete, journal American Concrete Institute. U.S.A, Proc. Vol. 70, n° 11 pp. 729-744.

[97] : Rossi P. 1994, 'Steel fiber reinforced concretes (SFRC): An example of french research', ACI Materials Journal, vol. 91, n° 3, pp. 273-279.

[98] : Paillere A.M. 1993, 'Le béton de fibres métalliques, Etats actuels des connaissances', Annales de l'ITBTP, série béton, vol. 302, n° 515, pp. 39-68.