

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

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté Des Sciences de l'Ingénieur

Mémoire de Magister

Présenté par :

ABOUTAIR Amel

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

Filière : Génie Civil

Option : Sol – Structure – Matériaux

THEME

Contribution à l'étude du rôle des fibres métalliques sur les propriétés des bétons avec ajout de poudre de marbre.

Devant le jury composé de :

M ^{me} KHARCHI Fattoum	Professeur	USTHB	Présidente
M ^r CHAID Rabah	Maître de Conférences (A)	UMBB	Directeur de thèse
M ^r BRAHMA Abdelmalek	Professeur	Université de Blida	Examineur
M ^r BELAKROUF Ali	Maître de Conférences (A)	UMBB	Examineur

Année Universitaire 2011/2012



Remerciements

*Je voudrais exprimer ma reconnaissance à mon Directeur de Thèse Docteur **CHAÏD Rabah**, maitre de conférences à UMBB. Je lui adresse mes plus vifs remerciements pour l'aide et l'attention qu'il a porté à ce travail.*

Je remercie vivement les membres de jury pour avoir accepté d'examiner ce travail et de participer au jury.

Je remercie ma famille qui m'a aidée et soutenue durant toutes mes études.

Je tiens aussi à remercier mes amis (es) pour les discussions fructueuses et pour leur soutien moral et amical.

ABOUTAIR AMEL





DÉDICACE

*A mes parents,
à ma famille,
à mes amis (es),
et à tous les enseignants
du département de Génie Civil.*

ملخص

إن الخرسانة عالية الأداء لها خصائص جوهرية وميكانيكية مرضية للغاية. ومع ذلك، لا تزال العديد من الأسئلة التي يجب طرحها على وجه الخصوص حول سلوكها في ظل الظروف القاسية مثل انجراف التربة والزلازل، خاصة في أجزاء من الأنفاق والجسور وكذا المباني التي تمارس فيها أحمال كامنة التوتر وأبحاثنا تهدف إلى زيادة قيمة المخلفات المعدنية كإضافة في مواد البناء و مصفوفة الاسمنت هو ضمن نهج التنمية المستدامة. من خلال الاستفادة من تقنيات تجريبية مختلفة، ويولى اهتمام خاص ممنوح لسلوك مسحوق الرخام المسحوق جيدا المضاف إليها الألياف المعدنية من حيث المقاومة. ولهذا الغرض، سوف يتم تطوير الخرسانة عالية الأداء المدعمة بالألياف المعدنية الممزوج مع إضافات نفايات مسحوق الرخام المسحوق جيدا، كما يتم دراسة الأداء الفيزيائي الميكانيكي.

كلمات مفتاحية:

الخرسانة عالية الأداء، الألياف، الإضافات، الرخام، المجهرية

Résumé

Le béton à hautes performances possède des caractéristiques intrinsèques mécaniques très satisfaisantes. Cependant, plusieurs questions restent encore à poser notamment en ce qui concerne son comportement dans les conditions critiques comme les séismes et les tremblements de terre, en particulier dans les parties des tunnels et des ponts, ainsi que les bâtiments où des sollicitations potentielles en traction sont exercées. Nos travaux de recherche auront pour objectif la valorisation de résidus minéraux comme ajout dans les matériaux de construction à matrice cimentaire et s'inscrit dans une démarche de développement durable. En mettant à profit différentes techniques expérimentales, une attention particulière est accordée au comportement de la poudre de marbre finement broyée associée à l'apport des fibres métalliques en termes de résistance. A cet effet, des bétons de hautes performances fibrés (BHPF) avec ajout de déchet de poudre de marbre finement broyé seront élaborés, leurs performances physico-mécaniques seront étudiées.

Mots clés :

BHP, Fibres, Ajouts, Marbre, Microstructure.

Abstract

This high performance concrete, have intrinsic mechanical characteristics very satisfactory. However, several questions remain to be asked in particular about their behavior in the conditions critical as the earthquakes and the earthquakes, particularly in parts of the tunnels and bridges and buildings where potential loads are in tension exercised. Our research will aim to increase the value of mineral residues as an addition in the building materials and cement matrix is part of a sustainable development approach. By taking advantage of different experimental techniques, special attention is given to the behavior of the finely ground marble dust associated with the contribution of steel fibers in terms of resistance. To this end, high performance concrete bundles (BHPF) with the addition of waste marble powder finely ground will be developed; their physical-mechanical performance will be studied.

Keywords:

HPC, Fiber, Additions, Marble, Microstructure.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

<i>INTRODUCTION GÉNÉRALE</i>	15
I. PLAN DE LA THESE	16
SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	
INTRODUCTION	17
<i>Chapitre I</i>	
<i>LES CONSTITUANTS DU BETON</i>	19
I. LES CONSTITUANTS DE BASE	19
I.1 COMPOSITIONS DU BETON	19
1. Définitions	19
2. Les constituants de base	19
1) Ciment	19
1. <i>Classification de ciment</i>	20
a) Classification suivant la composition	20
1) Laitier granulé de haut fourneau (S)	20
2) Matériaux pouzzolaniques	20
a) Pouzzolane naturelle (P)	21
b) Pouzzolane naturelle calcinée (Q)	21
3) Cendres volantes (V, W)	21
a) Cendre volantes siliceuses (V)	21
b) Cendre volantes calciques (W)	21
4) Schiste calciné (T)	21
5) Filler calcaire (L, LL)	22
6) Fumée de silice (D)	22
b) Classification des ciments suivant les résistances à la compression	22
c) Classification des ciments suivant le type environnement	23
1) Ciment PM	23
2) Ciment ES	23
3) Ciment CP	23
2. <i>Fabrication des ciments</i>	24
2) Les granulats	24
1. Le gravier	25

2. Le sable	25
3) L'eau de gâchage	26
4) Les adjuvants	27
II. LES FIBRES	27
II.1 LES DIFFERENTS TYPES DE FIBRES	27
1) Les fibres métalliques	28
2) Les fibres de fonte amorphe	28
3) Les fibres de verre	28
4) Les fibres de polypropylènes	28
II.2 LE ROLE DES FIBRES	29
II.3 PROPRIETES MECANIQUES DES FIBRES METALLIQUES	30
III. LES AJOUTS CIMENTAIRES	31
III.1 GENERALITES	31
III.2 DÉFINITION	32
III.3 ORIGINE ET CLASSIFICATION	32
1. Les ajouts minéraux inertes	32
2. Les ajouts minéraux actifs	32
➤ Ajouts minéraux actifs naturels	33
➤ Ajouts minéraux actifs artificiels	33
Rôle des ajouts minéraux actifs	33
1) Cendres volantes	36
2) Laitier	38
3) Fumée de silice	39
4) Pouzzolanes naturelles	40
5) Le marbre	42
1. Composition minéralogique	44
2. Quelques unes des propriétés physico-chimiques de la calcite	44
3. Domaines d'utilisation	45
a) Le Tadelack	45
1) Domaines d'Application	45
2) Caractéristiques	45
b) Stuc	45
1) La peinture Acrylique	46

IV. CONCLUSION	46
<i>Chapitre II</i>	
<i>FORMULATION ET METHODES DE COMPOSITION</i>	48
I. INTRODUCTION	48
II. FACTEURS REGISSANT LA FORMULATION DES BETONS	48
1. Résistance mécanique	48
1) Essais et mesure des résistances mécaniques	49
a) Résistance à la compression	49
b) Résistance en traction	49
1. Traction directe	49
2. Traction par fendage (essai brésilien)	49
3. Traction par flexion	49
2) Influence du dosage en ciment et du dosage en eau « (E/C) »	50
3) Influence de la granularité	51
4) Dimension maximale des granulats D	53
2. La durabilité	53
III. QUELQUES METHODES DE FORMULATION DE BETON	54
1. Méthode de BOLOMEY	54
2. Méthode d'ABRAMS	54
3. Méthode de FAURY	55
4. Méthode de VALETTE	56
5. Méthode de JOISEL	56
6. Méthode de BARON et LESAGE	57
7. Méthode DREUX-GORISSE	58
1) Dosage en ciment et en eau	58
2) Tracé de la droite de référence de Dreux	60
3) Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux	61
8. Méthode des volumes absolus	62
IV. PROCESSUS DU CHOIX D'UNE FORMULATION	64
V. CONCLUSION	65
<i>Chapitre III</i>	
<i>LES PROPRIETES DU BETON</i>	66
I. INTRODUCTION	66

II. LES PROPRIETES DU BETON FRAIS	66
1. Caractéristiques à l'état frais	66
1) Ouvrabilité	66
a) <i>Détermination pratique de l'ouvrabilité</i>	67
1. Affaissement au cône d'Abrams	67
2. Maniabilimètre LCPC	67
b) <i>Facteurs influençant sur l'ouvrabilité du béton</i>	68
1. Rôle de l'eau	68
2) Résistance du béton frais	69
2. Autres caractéristiques du béton à l'état frais	70
1) Air occlus	70
2) La densité réelle du béton frais	71
III. LES PROPRIETES DU BETON A L'ETAT DURCI	73
1. Résistance mécanique	73
a. Résistance caractéristique à la compression	73
1) <i>Essai en compression</i>	73
2) <i>Essai en traction</i>	73
a. Essai de traction par flexion	74
b. Essai de traction par fendage	74
2. Module d'élasticité et coefficient de poisson	75
3. Courbe contrainte-déformation	75
IV. MICROSTRUCTURE DES PATES DE CIMENT DURCIES	76
1. Morphologie des principaux hydrates	76
a. Les silicates de calcium hydratés C-S-H	76
1) <i>La portlandite</i>	77
2) <i>L'ettringite</i>	77
V. CONCLUSION	78
PARTIE EXPERIMENTALE	
INTRODUCTION	79
<i>Chapitre I</i>	
ETUDE ET CONTRÔLE DES CONSTITUANTS	81
I. INTRODUCTION	81

II.	CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX DE BASE	81
1.	Ciment	81
1)	Composition chimique et minéralogique du ciment	81
2)	Essais physiques et mécaniques	82
2.	Sable et graviers	83
a.	Le sable	83
1)	<i>Les caractéristiques du sable</i>	83
2)	<i>Analyse granulométrique du sable de Baghlia</i>	84
3)	<i>Analyse granulométrique du sable de Boussaâda</i>	84
a)	<i>Essais de masse volumique réelle, imbibée et du coefficient d'absorption du sable</i>	86
b)	<i>Propreté des sables</i>	86
1.	Equipement pour équivalent de sable	86
2.	Mode opératoire	87
3.	Spécifications	88
b.	Graviers	88
1)	<i>Les caractéristiques des graviers</i>	88
2)	<i>Analyse granulométrique du gravier</i>	89
a)	<i>Essais Los Angeles</i>	89
1.	Principe de l'essai	90
2.	Mode opératoire	90
b)	<i>Essais de masse volumique réelle, imbibée, de porosité et du coefficient d'absorption</i>	91
c)	<i>Résistance à l'usure essai Micro-Deval</i>	92
3.	La poudre de marbre	92
1)	Caractéristiques physico-mécaniques	92
2)	Caractéristiques chimique et minéralogique	93
3)	Caractéristiques granulométriques	94
a.	<i>Analyse granulométrique du marbre avant broyage (marbre concassé)</i>	94
b.	<i>Analyse granulométrique de la poudre de marbre broyée</i>	95
4)	Granulométrie Laser	96

Chapitre II

<i>FORMULATION DES BETONS</i>	99
I. FORMULATION DU BETON	99
1. Calcule des quantités	99
a. Détermination du rapport C/E	99
b. Détermination de C et E	100
2. Quantité des granulats	100
1) Calcul des volumes	100
2) Le dosage pondéral des matériaux	100
➤ Optimisation du dosage en adjuvant	101
➤ Dosage de poudre de marbre	101
➤ Dosage des fibres métalliques	101
II. COMPOSITION DU BETON D'ETUDE	101
1. Adjuvant	102
1) Ses caractéristiques sont	102
2) Propriétés et effets	102
a) <i>Béton frais</i>	102
b) <i>Béton durci</i>	102
2. Fibres métalliques	102
1) Pourcentage des fibres	103
III. CONCLUSION	103
<i>Chapitre III</i>	
<i>CARACTERISTIQUES ET MICROSTRUCTURE DE BETON</i>	104
I. INTRODUCTION	104
II. CARACTERISTIQUES DES BETONS (FRAIS ET DURCIS)	104
1. Le béton frais	104
a. Essais d'ouvrabilité du béton	104
b. Mesure de l'air occlus	105
c. La masse volumique	106
2. Le béton durci	107
a. La masse volumique	107
b. Essais de résistance à la compression	108
c. Essais de traction par fendage	110
d. Essais de traction par flexion	111

e. Essais d'absorption d'eau	112
f. Essais de retrait	114
III. MICROSTRUCTURE INTERNE	115
IV. PEAU DU BETON	118
V. CONCLUSION	120
<i>CONCLUSION GENERALE</i>	121
<i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</i>	123

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 01 : Exigences mécaniques définies en termes de valeur caractéristiques.	23
Tableau 02 : Dosage en ciment.	51
Tableau 03 : Principales propriétés du béton relatives au niveau de G/S.	52
Tableau 04 : Spécification de la norme ACI 318 89, Concernant les bétons exposés à des cycles de gel-dégel.	53
Tableau 05 : Valeurs optimales du Module de finesse d'après ABRAMS.	55
Tableau 06 : Valeurs de A.	56
Tableau 07 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire G.	59
Tableau 08 : K, fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment.	61
Tableau 09 : Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône.	67
Tableau 10 : Les autres essais-comparatifs.	72
Tableau 11 : Analyse chimique du ciment.	81
Tableau 12 : Composition minéralogique du ciment.	82
Tableau 13 : Essais physiques sur ciment.	83
Tableau 14 : Essais mécaniques sur ciment.	83
Tableau 15 : Caractéristiques du sable.	83
Tableau 16 : Analyse granulométrique du sable de Baghlia.	84
Tableau 17 : Analyse granulométrique du sable de Boussaâda.	84

Tableau 18 : Analyse granulométrique du sable corrigé.	85
Tableau 19 : Les résultats des essais physiques.	86
Tableau 20 : Résultats des équivalents de sable Baghlia.	87
Tableau 21 : Résultats des équivalents de sable Boussâada.	87
Tableau 22 : Caractéristiques des graviers.	88
Tableau 23 : Analyse granulométrique du gravier de fraction 3/8.	89
Tableau 24 : Analyse granulométrique du gravier de fraction 8/15.	89
Tableau 25 : Résultats des essais physiques sur graviers de fraction 3/8 et 8/15.	91
Tableau 26 : Les caractéristiques physico-mécaniques de la poudre de marbre.	93
Tableau 27 : Composition chimique de la poudre de marbre.	93
Tableau 28 : Analyse granulométrique du marbre avant broyage.	95
Tableau 29 : Analyse granulométrique de la poudre de marbre broyée.	95
Tableau 30 : Analyse granulométrique de la poudre de marbre avant broyée (Tamisage à la main).	96
Tableau 31 : Dosage en constituants du béton.	101
Tableau 32 : Variation de l'affaissement de différents bétons.	104
Tableau 33 : Variation de l'air occlus de différents bétons.	105
Tableau 34 : Variation de la masse volumique à l'état frais de différents bétons.	106
Tableau 35 : La masse volumique de différents bétons.	107
Tableau 36 : La résistance à la compression de différents bétons.	109

Tableau 37 : La résistance à la traction par fendage de différents bétons.	110
Tableau 38 : La résistance à la traction par flexion de différents bétons.	111
Tableau 39 : Absorption d'eau du béton durci (28 jours).	113
Tableau 40 : Absorption d'eau du béton durci (90 jours).	113
Tableau 41 : Résultat des retraits du béton durci (« 7, 28, 90 » jours).	114

LISTE DES FIGURES

Figure 01 : Différents types de fibres métalliques.	28
Figure 02 : Illustration de l'apport du renfort par des fibres.	29
Figure 03 : Différentes formes géométriques de fibres métalliques.	31
Figure 04 : Ajout cimentaires. De gauche à droite : cendres volantes (classe C), métakaolin (argile calcinée), fumée de silice, cendres volantes (classes F), laitier et schiste calciné.	34
Figure 05 : Observation au MEB cendre volante.	35
Figure 06 : Cendre volantes : une poudre ressemblant au ciment utilisé dans le béton.	36
Figure 07 : Micrographie de cendres volantes au microscope électronique à balayage.	36
Figure 08 : Particules sphériques creuses.	37
Figure 09 : Laitier de haut fourneau granulé broyé.	38
Figure 10 : Laitier granulé de haut fourneau vu au microscope.	38
Figure 11 : Poudre de fumée de silice.	40
Figure 12 : Micrographie de particules de fumée de silice au microscope électronique.	40
Figure 13 : Pouzzolane volcanique vu au microscope.	42
Figure 14 : Gisement de marbre.	43
Figure 15 : Poudre de marbre.	43
Figure 16 : Cristal de calcite.	44
Figure 17 : Relation entre (C/E) et la résistance à la compression « f_c » d'après la	50

formule de BOLOMEY $\{f_C = G \times C_E (C/E - 0.5)\}$. G : coefficient, de granularité égale à 0.5. C_E : classe vraie du ciment, égale à 50 MPa.

- Figure 18** : Variation de la résistance en compression à 28 jours en fonction du rapport G/S. 52
- Figure 19** : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée. 59
- Figure 20** : Facteurs de base à prendre en compte lors du choix de la formulation. 64
- Figure 21** : Essai d'Affaissement. 66
- Figure 22** : Cône d'Abrams. 66
- Figure 23** : Mesure de l'Affaissement au cône d'Abrams. 67
- Figure 24** : Principe de fonctionnement du Maniabilimètre LCPC. 68
- Figure 25** : Résistance à la compression R_c du béton en fonction du rapport eau/ciment (E/C). 69
- Figure 26** : Résistance du béton frais. 70
- Figure 27** : L'aéromètre. 70
- Figure 28** : Essai de compression axiale. 73
- Figure 29** : Essais de traction par flexion. 74
- Figure 30** : Essais de traction par fendage. 75
- Figure 31** : Courbe contrainte-déformation. 76
- Figure 32** : Observation en microscopie électronique à balayage (a) d'une plaquette 77

hexagonale de portlandite et (b) d'ettringite aciculaire (sous forme d'aiguilles).

Figure 33 : Analyse granulométrique laser du ciment.	82
Figure 34 : Diffractogramme de rayons X du ciment.	82
Figure 35 : Microanalyse chimique au MEB.	94
Figure 36 : Poudre du marbre sous MEB.	94
Figure 37 : Diffractogramme X de la poudre de marbre (λ_{Cu}).	94
Figure 38 : L'analyse granulométrique de la poudre du marbre.	96
Figure 39 : Distribution granulométrique de la poudre de marbre.	97
Figure 40 : Courbe d'analyse granulométrique de la poudre de marbre.	97
Figure 41 : Fibre métallique à crochet.	103
Figure 42 : Evolution de l'affaissement pour les différents bétons.	105
Figure 43 : Variation de l'air occlus pour les différents bétons.	106
Figure 44 : Variation de la masse volumique à l'état frais de différents bétons.	107
Figure 45 : Variation de la masse volumique à l'état durci de différents bétons.	108
Figure 46 : Essai de compression.	109
Figure 47 : Eprouvettes 11x22 cm.	109
Figure 48 : Résistance en compression de différents bétons.	109
Figure 49 : Béton + 1.5% de fibres.	110
Figure 50 : Béton sans fibres.	110
Figure 51 : Résistance en traction par fendage.	110

Figure 52 : Résistance en traction par flexion.	112
Figure 53 : Eprouvettes (10x10x40) cm.	112
Figure 54 : Absorption d'eau de différents bétons durcis.	113
Figure 55 : Essai de retrait de béton durci.	114
Figure 56 : Retrait des bétons à différentes échéances.	115
Figure 57 : Observation au MEB et EDS des CSH.	115
Figure 58 : Observation au MEB et EDS de la portlandite.	116
Figure 59 : Observation au MEB et EDS de l'ettringite.	116
Figure 60 : Radiogramme des pâtes durcies du CEM II 42.5.	117
Figure 61 : Radiogramme des pâtes durcies du CEM II 42.5 avec ajout de poudre de Marbre.	117
Figure 62 : Béton avec ajout de marbre sous MEB.	118
Figure 63 : Microanalyse chimique au MEB « béton avec ajout ».	119
Figure 64 : Béton sans ajout de marbre sous MEB.	119
Figure 65 : Microanalyse chimique au MEB « béton sans ajout ».	119

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les bétons renforcés de fibres métalliques ont fait l'objet de beaucoup d'efforts de recherche ces trente dernières années. L'étude de la propagation des fissures dans une matrice renforcée a été à l'origine du développement du béton de fibres. L'idée d'ajouter des fibres dans le béton afin de le rendre plus homogène est cependant bien plus ancienne. Déjà, en 1910 en France, H. Alfsen proposa d'ajouter des fibres longues à base de bois et d'autres matériaux afin d'améliorer les propriétés en traction du béton.

Durant les années 80, les bétons renforcés de longues fibres métalliques se sont développés. Les chercheurs ont examiné les propriétés de la microstructure de ce nouveau matériau en espérant pouvoir l'utiliser en remplacement du béton armé.

Les bétons de fibres font encore à l'heure actuelle l'objet d'importantes recherches. Notons que l'utilisation de fibres est peu à peu diversifiée (utilisation de fibres de formes et de composition variées). A partir de 1995-1997 les chercheurs se sont aperçus que l'amélioration des propriétés mécaniques des BFM ne pouvait se faire qu'en considérant une analyse complète des besoins de l'ouvrage et de la capacité du béton (distribution du squelette granulaire, type de ciment et dosage, maniabilité). Ainsi, il est envisagé d'utiliser les bétons de fibres pour des ouvrages de structure et les éléments porteurs.

Le béton est l'un des matériaux le plus utilisé dans le domaine de la construction. Ces performances ne cessent de s'améliorer, en l'occurrence les résistances mécaniques et la durabilité. Hier c'était le béton aujourd'hui ce sont les bétons, grâce au développement technologique et à la recherche scientifique des nouveaux types de bétons ont été créés et employés à savoir le béton compacté au rouleau (BCR), les bétons de hautes et de très hautes performances (BHP et BTHP), les bétons de fibres métalliques et synthétiques, les bétons autoplaçants (BAP) la liste est encore très longue. Ces différents types de bétons seront sans aucun doute le matériau de demain. Du côté des résistances à la compression les bétons aux poudres réactives dépassent les résistances des aciers, pour la durabilité le béton ne brûle pas comme le bois, il ne se corrode pas aussi rapidement que les aciers.

Depuis plus de trois décennies, des fibres tant métalliques que plastiques ou autres ont été incorporées dans les bétons. L'utilisation de ces bétons renforcés de fibres a connu diverses applications. On peut citer les dallages industriels, la réparation des canalisations d'assainissement, la projection sous voûte dans les tunnels, la réalisation de chaussées

entièrement faites en béton de fibres, des chaussées d'autoroutes ou chaussées de parkings aéronautiques.

Le but de notre travail de recherche concerne la formulation et la caractérisation de béton à hautes performances de fibres métalliques avec ajout de poudre de marbre.

I. PLAN DE LA THESE

1. Partie Théorique :

Le premier chapitre est une présentation générale du béton comme matériau et ces constituants de base (ciment, graviers, sable et eau) ainsi que les ajouts cimentaires, les superplastifiants hauts réducteurs d'eau et les divers types de fibres utilisées.

Le deuxième chapitre est une présentation des différentes méthodes formulations et de composition des BHPF (bétons à hautes performances fibrés).

Le troisième chapitre est consacré aux propriétés des BHPF à l'état frais et durci (en particulier ceux avec ajout de poudre de marbre), ainsi que leur microstructure.

2. Partie Expérimentale :

Le premier chapitre est consacré à l'analyse et le contrôle des matériaux utilisés (ciment, graviers, sable).

Le deuxième chapitre est une présentation des formulations des BHPF (bétons à hautes performances fibrés).

Le troisième chapitre est consacré à l'étude des caractéristiques physico-mécaniques des BHPF à l'état frais et durci (en particulier ceux avec ajout de poudre de marbre), ainsi que leur microstructure.

Synthèse Bibliographique

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

- **Introduction.**
- **Chapitre 1.**
- **Chapitre 2.**
- **Chapitre 3.**

INTRODUCTION

Le béton est un le matériau le plus utilisé dans les constructions à travers le monde. En effet, sa rapidité de fabrication, sa mise en place, son faible coût et ses performances mécaniques ainsi que sa durabilité améliorée et une résistance accrue. Ils peuvent supporter des charges supérieures ou permettre des constructions plus élancées. Ils peuvent également présenter des formes plus complexes et permettent de réaliser de plus grandes portées.

Les bétons de hautes performances « BHP » sont des bétons qui développent des résistances mécaniques aux compressions très élevées (50 à 80 MPa) ; du fait de la diminution de la porosité par les superplastifiants réducteurs d'eau, qui assurent aussi une maniabilité suffisante. De plus, le spectre du mélange granulaire est élargi par l'ajout d'éléments ultrafins qui confèrent à l'ensemble une forte compacité et une haute durabilité vis-à-vis des agents agressifs chimiques extérieurs. L'utilisation des bétons à hautes performances « BHP » est Il existe différentes classes de béton, correspondant chacune à des propriétés et des compositions différentes, ce qui permet d'employer le béton approprié, avec la consistance adaptée, selon l'utilisation prévue.

Nous savons depuis toujours que le BHP présente une bonne résistance à la compression, l'inconvénient d'avoir un mode de rupture fragile en traction et explosif en compression. Ce comportement peut être amélioré par l'adjonction de fibres métalliques à la composition du béton. L'incorporation des fibres de diverses natures dans le béton, sont utilisées pour améliorer certaines propriétés du béton, qui permettent de limiter certains défauts de celui-ci.

L'utilisation des Bétons à Hautes Performance « BHP » est actuellement en plein développement dans le domaine du génie civil, notamment dans la construction des ouvrages d'art. Ils sont obtenus par l'emploi conjugué des superplastifiants et des ultra-fins tels que les ajouts minéraux, ce qui permet d'augmenter la résistance à la compression (> 60 MPa) tout en améliorant l'ouvrabilité et la durabilité.

Le béton à haute performance avec des résistances élevées offre à la construction une durabilité meilleure à long terme et permet des économies de matériaux allant jusqu'à 60 MPa.

Le béton renforcé de fibres métalliques est un matériau composite à matrice fragile. Il est constitué d'un renfort (fibre) plongé dans une matrice (pâte de ciment). Nous étudierons ici le cas de fibres métalliques incorporées dans une matrice cimentaire lors de la fabrication. Ce concept d'utilisation de béton renforcé avec des fibres métalliques est concrétisé vers le début

des la fin des années soixante. L'idée majeure proposée par les chercheurs était de réduire la fissuration et d'augmenter la résistance globale à la traction. Ce nouveau matériau présente en effet des propriétés intéressantes, comme la bonne résistance à la traction, à la fatigue, aux chocs, l'amélioration de la durabilité face aux cycles de gel dégel. On peut en effet attendre de ce matériau une répartition de la fissuration plus homogène du fait de sa constitution. Un pourcentage plus ou moins grand de fibres métalliques de dimensions et de formes variables apporte comme nous le verrons une amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité.

Les bétons à base de fibres métalliques (BFM) sont actuellement utilisés sur le marché dans la restauration des ouvrages d'art, la réalisation de bétons projetés dans les tunnels ou les canalisations, la fabrication d'éléments minces et très résistants comme les dallages industriels. Les chercheurs ont mis au point des formulations adaptées à chaque type de situation et des méthodes de dimensionnements font actuellement l'objet de beaucoup de travaux de recherche. Ces travaux sont basés sur l'analyse du comportement du matériau, à l'échelle microscopique, comme à l'échelle de la structure.

Afin de comprendre l'utilisation et le comportement de ce matériau une recherche sur la microstructure du matériau a été nécessaire. Dans un premier temps, nous présenterons rapidement les principales caractéristiques et problématiques liées à ce matériau. Puis, une analyse du comportement des fibres métalliques, notamment au niveau de l'interface fibre-matrice au sein de la matrice cimentaire sera développée.

CHAPITRE I

LES CONSTITUANTS DU BETON

LES CONSTITUANTS DU BETON

I. LES CONSTITUANTS DE BASE

I.1 COMPOSITIONS DU BETON

1. Définitions

Le béton est constitué par un mélange intime de matériaux inertes, appelés « granulats » (sables, graviers etc....) avec du ciment et de l'eau, grâce à l'action du ciment le mélange ainsi obtenu, appelé « béton frais » commence à durcir après quelques heures et acquiert progressivement ses caractères de résistance.

Les trois composants de base d'un béton sont l'eau, le ciment et les granulats. Des additifs peuvent y être rajoutés dans le but de modifier les propriétés telles que la maniabilité et la résistance. Le béton est donc un matériau hétérogène dont les caractéristiques physicochimiques et mécaniques des divers constituants sont différentes. Chacun de ses composants joue un rôle bien précis dans le mélange.

2. Les constituants de base

1) Ciment :

C'est un liant minéral obtenu par décarbonatation d'un calcaire et décomposition d'une argile à une température avoisinant les 1450°C. Broyé sous forme d'une poudre fine souvent d'une couleur grise. En contact avec l'eau il s'hydrate et forme des minéraux hydratés très stables. Les principaux composés du portland sont :

- | | | |
|---------------------------------------|---|---------------------|
| a) Les silicates tricalciques (alite) | : $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ | [C ₃ S] |
| b) Les silicates bicalciques (belite) | : $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ | [C ₂ S] |
| c) Les aluminates tricalciques | : $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ | [C ₃ A] |
| d) Les aluminoferrites tétracalciques | : $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ | [C ₄ AF] |

Autres : (sulfates, alcalins, impuretés,...).

Les silicates de calcium C₃S et C₂S représentent à peu près 75% de la masse du ciment. Les caractéristiques granulaires du ciment sont exprimées par granulométrie et sa finesse de mouture. Cette finesse de mouture appelée aussi Surface Spécifique de Blaine peut atteindre 40000 cm²/g et plus pour les ciments à forte résistance au jeune âge.

1. Classification de ciment :a) **Classification suivant la composition** :

Selon la teneur des constituants autre que le gypse ajouté ou le clinker, la norme européenne NF EN 197-1 [1] donne 27 ciments courants, qui sont regroupés en cinq types principaux à savoir :

1. CME I Ciment Portland artificiel ;
2. CME II Ciment Portland composé ;
3. CME III Ciment de haut fourneau ;
4. CME IV Ciment pouzzolanique ;
5. CME V Ciment aux laitiers et aux cendres.

Ces ciments différents par le type d'ajout et sa teneur, incorporé dans le but de modifier certaines de leurs propriétés en raison des conditions d'environnement ou de performances mécaniques auquel ces ciments sont destinés. Les différents types d'ajouts normalisés sont :

1) **Laitier granulé de haut fourneau (S) NF P 18-506** [2]

Les laitiers vitrifiés de hauts fourneaux résultent de la fusion des stériles présents dans le minerai de fer. Il s'agit d'un liant hydraulique latent qui renferme de la silice, de la chaux, de l'alumine et du magnésium. C'est la trempe du laitier en fusion à la sortie du fourneau qui donne un produit vitrifié (la teneur en phase cristalline est d'environ 10 %). Le matériau est donc instable thermodynamiquement et forme des silicates et des aluminates de calcium en présence d'eau (composé hydraulique latent). Son hydratation est plus lente que celle du clinker nécessitant une conservation en ambiance humide plus longue.

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 vitreux et présente des propriétés hydrauliques après avoir subi une activation convenable. Le rapport massique $\frac{C a O + M g O}{S i O_2}$ doit être supérieur à 1.0 d'après la norme NF P 18-506 [2].

2) **Matériaux pouzzolaniques**

Sont des substances naturelles ou artificielles siliceuses ou silico-alumineuses, ou une combinaison de celles-ci contenant de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'autres oxydes mais la teneur en SiO_2 réactif doit être au moins égales à 25% en masse. Lorsqu'ils sont finement broyés, ils réagissent à température ambiante, en présence d'eau, avec l'hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$ dissous. NF EN 197-1 [1]. On distingue :

a) Pouzzolane naturelle (P) :

Matériaux d'origine volcanique ou bien des roches sédimentaires.

b) Pouzzolane naturelle calcinée (Q) :

Matériaux d'origine volcanique, des argiles, des schistes ou des roches sédimentaires, activés thermiquement.

3) **Cendres volantes (V, W) NF EN 450 [3]**

Produits pulvérulents de grande finesse, proviennent du dépoussiérage des gaz des chaudières des centrales thermiques on distingue deux familles de cendre volantes :

a) Cendre volantes siliceuses (V) :

Les cendres volantes sont des poudres minérales fines obtenues par dépoussiérage des fumées émises par des chaudières brûlant du charbon. Leur composition est variable puisqu'elles dépendent de l'origine des charbons et du mode de combustion.

Les cendres entraînent un accroissement de la porosité et de la taille des pores aux premiers âges à cause d'un ralentissement des réactions d'hydratation. A plus long terme, les effets de l'hydratation du clinker sont renforcés et entraînent une porosité totale du même ordre de grandeur, mais aussi une diminution de la taille des plus gros pores. Le développement de ces réactions nécessite la présence d'eau d'où l'importance de la conservation du matériau dans une ambiance humide durant la phase d'hydratation.

Sont principalement des particules sphériques ayant des propriétés pouzzolaniques, constituées essentiellement de silice (SiO_2) réactive et d'alumine (Al_2O_3) ainsi que d'oxyde de fer (Fe_2O_3) et autres composants. La teneur en oxyde de calcium (CaO) $< 10\%$ en masse, la teneur en silice (SiO_2) réactive $> 25\%$ en masse.

b) Cendre volantes calciques (W) :

Présente des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolaniques, contenant une teneur en oxyde de calcium (CaO) réactif $> 10\%$ en masse, le reste étant de la silice (SiO_2) réactive, d'alumine (Al_2O_3), d'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'autres composants.

4) **Schiste calciné (T)**

Il est produit dans un four spécial à une température avoisinant les 800°C composé de silicate bicalcique et d'aluminate monocalcique, ainsi que de petites quantités de chaux libre et de sulfate de calcium, le schiste calciné finement broyé présente, outre des propriétés pouzzolaniques, des propriétés fortement hydrauliques.

5) Filler calcaire (L, LL) NF P 18-508 [4]

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 [4] :

- la teneur en calcaire (CaCO_3) $\leq 75\%$ en masse ;
- la teneur en argile ≤ 1.20 g/100 g ;
- la teneur totale en carbone organique (TOC) $< 0.20\%$ en masse pour (LL) et $< 0.50\%$ en masse pour (L).

6) Fumée de silice (D) NF P 18-502 [5]

Les fumées de silice sont des poudres minérales très fines obtenues par condensation et dépoussiérage des fumées de fours utilisés pour la constitution de silicium ou d'alliages tel que le ferro-silicium. Leur emploi avec un fluidifiant permet de réduire la quantité d'eau pour une consistance donnée, la porosité ainsi formée est donc réduite.

Provient de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique, elle est formée de particules sphériques contenant au moins 85% en masse en silice amorphe. Poudre d'une extrême finesse de 15000 à 25000 m^2/kg ce qui lui donne la capacité de se placer dans les interstices des grains de ciments en diminuant la demande en eau du mélange (effet filler). Mais son dosage est limité à 10% de la masse du ciment pour protéger les armatures dans le béton (problème de PH) [6, 7].

b) Classification des ciments suivant les résistances à la compression :

La norme européenne NF EN 197-1 [1] classe les ciments courant d'après leur résistance à la compression (résistance normale) déterminée conformément à la norme NF EN 196-1[6], mesurée à 28 jours en six classes de résistance Tableau 01.

Tableau 01 : Exigences mécaniques définies en termes de valeur caractéristiques.

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

c) **Classification des ciments suivant le type environnement** :

Certains ciments ont des propriétés supplémentaires leur permettant de s'adapter à des environnements spéciaux de type :

1) **Ciment PM : NF P 15-317 [8]**

Résistant à l'eau de mer est un ciment courant possédant des caractéristiques physiques et chimiques complémentaires (teneur limitée en aluminat tricalcique) qui lui donne une résistance accrue à l'agression des ions sulfate en présence d'ions chlorure, au cours de la prise et ultérieurement.

2) **Ciment ES : XP P 15-319 [9]**

Résistant aux eaux sulfatées est un ciment courant présentant des teneurs limitées en aluminat tricalcique (C_3A) afin d'avoir une résistance accrue à l'agression des ions sulfate au cours de la prise et ultérieurement.

3) **Ciment CP : NF P 15-318 [10]**

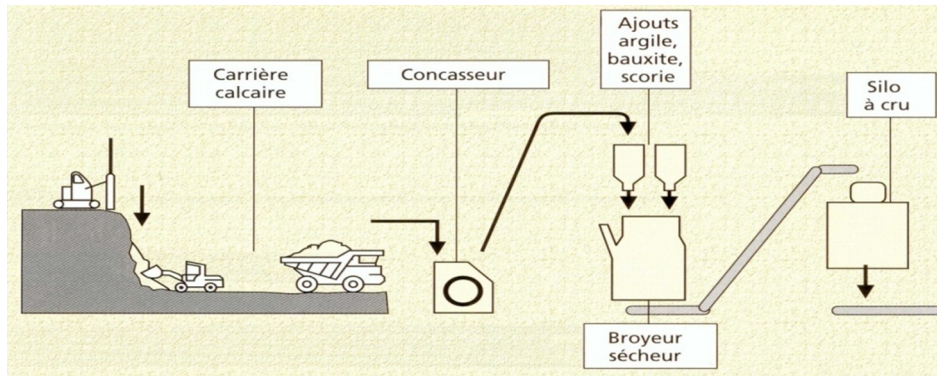
Pour béton précontraint, on distingue deux types de ciments qui diffèrent par leur teneur en ions sulfure SO_4^{2-} :

- Ciment de la classe CP2 contenant moins de 0.2 % des ions sulfure recommandé pour la précontrainte par pré-tension.

- Ciment de la classe CP1 contenant moins de 0.7 % des ions sulfure recommandé pour la précontrainte par post-tension.

Il existe par ailleurs des ciments spéciaux répondant à des conditions spécifiques (durcissement très rapide, résistance aux fortes chaleurs ou aux agressions chimiques). C'est le cas du ciment alumineux fondu, très résistant aux milieux acides.

2. Fabrication des ciments :



Le schéma de la fabrication du ciment est le suivant : concassage, broyage et mélange d'une matière argileuse et d'une matière calcaire. Le mélange dont la composition doit être tenue rigoureusement constante est envoyé dans un four où l'on chauffe progressivement jusqu'au point de clinkérisation (combinaison et agglomération sous forme de granulés).

Le clinker tombe, à la sortie du four, dans un refroidisseur puis il est mélangé à une proportion de gypse soigneusement dosée et enfin broyé sous forme d'une poudre fine qui est ensachée.

La fabrication de ciment portland respecte toujours ce schéma simplifié néanmoins elles peuvent différer sur certains points et en particulier sur le mode de préparation du mélange d'argile et du calcaire qui peut se faire par voie sèche ou par voie humide.

2) Les granulats : XP P 18-540 [11]

Les granulats proviennent dans la plupart des cas des roches naturelles. Leur utilisation pour la confection d'un béton est motivée par le faible coût volumique, par une meilleure durabilité et stabilité volumétrique par rapport au mélange ciment-eau [17]. La forme, la texture de la surface et la concentration en granulats influent d'une manière considérable sur le comportement du béton à l'état frais.

Ces l'ensemble des grains de dimensions comprises entre 0 et 125 mm, peuvent être d'origine naturelle (sables et graviers de mer et de rivières), artificiels (argile expansée) ou

issue du recyclage de déchets de l'industrie (laitier à haut fourneaux). Il constitue l'ossature de béton et occupent 70 à 80 % environ du volume d'un béton, ils sont inertes en principe mais peuvent favoriser certaines réactions hydratation de certains minéraux du clinker c'est l'exemple des silicates tricalciques C_3S en présence de filler d'origine calcaire. En effet, la nature, la qualité, la forme, la granulométrie, la propreté, l'état de surface et le type de granulats sont des facteurs ayant une influence sur les caractéristiques du béton, aussi bien à l'état durci qu'à l'état frais. Les principales divisions granulométriques des granulats données par la norme XP P 18-540 [11] sont les suivants :

- fillers 0/D ou $D < 2$ mm avec au moins 70 % de passant à 0.063 mm ;
- sablons 0/D ou $D \leq 1$ mm avec au moins 70 % de passant à 0.063 mm ;
- sable 0/D ou $1 < D \leq 6.3$ mm ;
- graviers 0/D ou $D > 6.3$ mm ;
- gravillons d/D ou $d \geq 1$ mm et $D \leq 125$ mm ;
- ballasts d/D ou $d \geq 25$ mm et $D \leq 50$ mm.

D'après la norme XP P 18-540 [11] les caractéristiques essentielles des granulats destinés aux bétons hydrauliques sont les suivantes pour :

1. Le gravier

Grains de dimensions allant de 1 à 125mm, d'après la norme NF P 18-591 [12] l'essai de propreté des graviers consiste à déterminer le pourcentage d'éléments < 0.5 mm, le pourcentage de vase et argiles, éliminées lors de l'essai doit être ≤ 1.5 % pour gravillons n'ayant pas subi de concassage, et ≤ 3 % pour ce qui ont subi le concassage. La granularité du gravier est fixée par le D prescrit ou admissible pour le béton à préparer, l'absorption d'eau la norme NF P 18-591[12] fixe à 5 % la valeur maximale pour les bétons hydrauliques.

2. Le sable

C'est un produit provenant de la désagrégation naturelle de la pierre siliceuse (quartz) et/ou du silex (silicium), Il se compose de grains meubles n'ayant aucune cohésion.

La dimension des grains peut varier de 0.15 à 4.76 mm ; si le grain est plus petit que 0.6 mm parle de « sable fin » ; s'il atteint presque 1.2 mm « sable moyen » et s'il atteint enfin presque 4.76 mm, c'est le « gros sable » ; ce dernier ayant des grains de plus de 2 mm ressemble à du gravier fin, appelé alors « sable graveleux ».

Grains de dimensions allant de 0 à D où $1 < D \leq 6.3\text{mm}$, à l'essai dit équivalent de sable « ES » la norme NF P 18-598 [13] sont préférable les sables ayant un « ES » compris entre 75 et 85 % [1], de granularité définie principalement par les paramètres suivant :

- teneur en fines (passant à $0.08\text{mm} \leq 12\%$) ;
- le module de finesse ($M_f = 1.8$ à 3.2) le meilleur compromis résistance-maniabilité-maintien de l'homogénéité se situe à 2.5 ± 0.35 environ ;
- une bonne continuité de la courbe granulométrique est nécessaire pour la maniabilité du béton (norme NF P 18-541 [14]).

D'autant meilleur qu'il est composé de grains de dimension différentes ; les grains moyens bouchent les vides entre les plus gros et les très fins bouchent entre les moyens, on obtient ainsi une bonne consistance, et on prescrit les modules de finesse suivants :

- Sable pour béton pour constructions : entre 1.40 et 3.40
- Sable pour béton maigre pour fondations : entre 0.90 et 3.40
- Sable pour mortier de maçonnerie : entre 0.90 et 1.70
- Sable pour mortier de carrelage : entre 0.90 et 1.70
- Sable pour plafonnage : entre 0.90 et 3.40
- Sable pour couche de fondation pour dallage : entre 0.90 et 2.50

3) L'eau de gâchage : NF EN 1008 [15]

Est un ingrédient essentiel du béton, il joue deux fonctions principales : confère au béton sa maniabilité à l'état frais (ses propriétés rhéologiques) et assure l'hydratation des grains de ciment pour une prise et un durcissement. La quantité d'eau utilisée ou plus précisément le rapport eau/ciment a une forte influence sur la porosité du béton, sa perméabilité, les résistances mécaniques, la durabilité, la microstructure, la cinétique d'hydratation.

L'eau de gâchage peut avoir plusieurs origines, mais seule l'eau potable est présumée conforme aux exigences de la norme NF EN 1008 [15], les autres comme l'eau récupérée de la fabrication de bétons, eaux d'origine souterraine, eaux naturelle de surface et eaux de rejet industriel, eau de mer et eaux saumâtres, doivent être soumises à des essais de contrôle préliminaire ainsi que les essais chimiques et mécaniques.

4) Les adjuvants : NF EN 934-2 [16]

Ce sont des produits chimiques organiques ou inorganiques, incorporés en faible quantité moins de 5 % de la masse du ciment sous forme de poudre ou de solution, avant ou pendant le malaxage, dans le but de modifier certaines propriétés du béton, qu'il soit à l'état frais, pendant la prise et le durcissement ou à l'état durci. Les adjuvants sont classés par la norme NF EN 934-2 [16] suivant leurs actions principales, même s'ils ont plusieurs actions secondaires en :

- Plastifiant réducteur d'eau ;
- Superplastifiant haut réducteur d'eau ;
- Réteneur d'eau ;
- Entraîneur d'air ;
- Accélérateur de prise ;
- Accélérateur de durcissement ;
- Retardateur de prise ;
- Hydrofuge de masse ;
- Plastifiant réducteur d'eau/retardateur de prise ;
- Superplastifiant haut réducteur d'eau/retardateur de prise ;
- Plastifiant réducteur d'eau/accélérateur de prise.

Il existe aussi d'autres adjuvants comme : les raidisseurs pour béton projeté, les adjuvants pour coulis d'injection, les adjuvants pour mortiers stabilisé, les colorants, les inhibiteurs de corrosion, les générateurs.

II. **LES FIBRES**

II.1 **LES DIFFERENTS TYPES DE FIBRES**

Les fibres sont ajoutées aux matériaux cimentaires afin d'améliorer leurs caractéristiques à l'état durci. Les fibres utilisées dans la confection des bétons sont classées en quatre grandes familles selon leurs caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques :

- fibres minérales : verre, carbone.
- fibres métalliques : acier, inox, fonte.
- fibres organiques : polypropylène, acrylique.
- fibres naturelles : Hévéa, Sisal ...

Chaque type de fibres présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propres : dimensions (diamètre, longueur...), formes (lisse, rugueuse, plate, ondulée, crantée...),

résistance à la traction et adhérence au béton, qui procurent un comportement mécanique spécifique aux structures renforcées de fibres.

1) Les fibres métalliques :

Les fibres métalliques caractérisées par un module d'élasticité élevé, par conséquent, offre 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, leurs formes et leurs dimensions améliorent leur ancrage et leur adhérence (fibres, copeaux, fibres tréfilées, ondulées, déformées aux extrémités, en tête de clou).



Figure 01 : Différents types de fibres métalliques.

2) 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 1 à 3 mm de largeur, contribuent à la limitation des fissures sous chocs.

3) Les fibres de verre :

Sous leur forme habituelle, sont caractérisées par une très grande fragilité aux chocs, attribuée à une sensibilité élevée à la fissuration. Sous la forme de fibres de faible diamètre, le verre perd ce caractère, acquiert de bonnes caractéristiques mécaniques, et sont utilisées pour fabriquer des éléments de faibles épaisseurs, avec des matrices de pâte ou mortier ou de micro béton.

4) Les fibres de polypropylènes :

Les polypropylènes, sont des produits d'origine pétrolière, découverts en 1954, ce matériau de synthèse a connu une extension croissante dans l'industrie de textile où 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 le bâtiment, en particulier dans réalisation des panneaux décoratifs, revêtement de façades, de tuyaux et pieux.

II.2 LE ROLE DES FIBRES

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

- Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures, comme schématiquement illustré par la « figure 02 (a) ».
- La transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui accroît la sécurité lors des états de chargement ultimes « figure 02 (b) ».

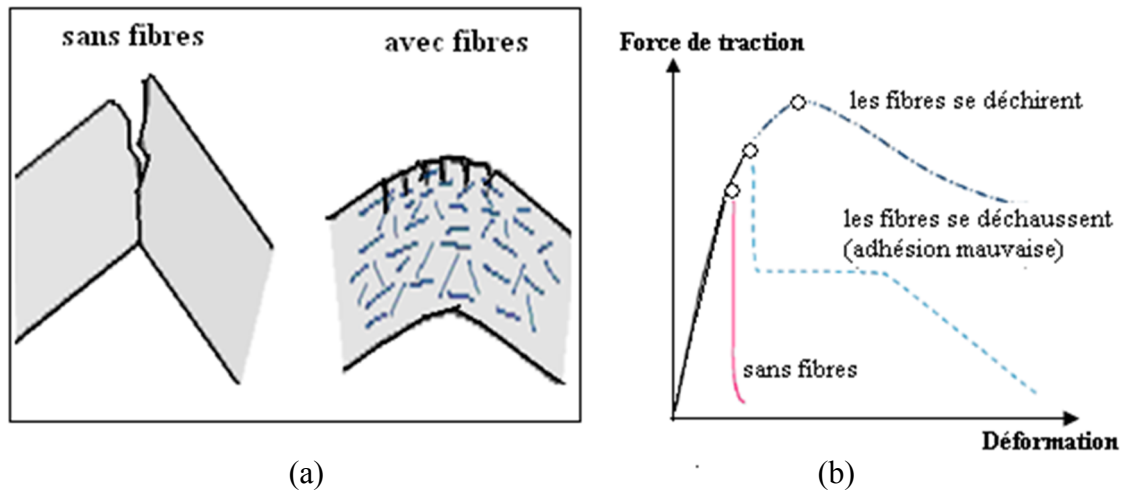


Figure 02 : Illustration de l'apport du renfort par des fibres.

Pour bien comprendre le rôle joué par les fibres, il faut préciser que le terme « fibre » est ici réservé à des matériaux d'une longueur d'environ 60 mm (fibres courtes), par opposition aux armatures du béton armé (barres, rubans, treillis soudés).

Les fibres ont généralement pour rôle de renforcer l'action des armatures traditionnelles en s'opposant à la propagation des microfissures. Selon les caractéristiques

présentées par les fibres, la rupture du béton évolue plus ou moins d'un comportement fragile vers un mode de type ductile.

Selon les fibres utilisées et les ouvrages auxquels elles sont incorporées, ce rôle se traduit par des améliorations relatives à :

- la cohésion du béton frais ;
- la déformabilité avant rupture (rupture ductile) ;
- la résistance aux chocs ;
- la résistance à la fatigue ;
- la résistance à l'usure ;
- la résistance mécanique du béton aux jeunes âges ;
- la réduction des conséquences du retrait par effet de couture des fissures et microfissures.

Grâce à leurs propriétés, les fibres permettent de mieux mobiliser la résistance intrinsèque du béton avec comme conséquence une réduction des sections, de réaliser des pièces minces de grandes dimensions et de donner une plus grande liberté architectural.

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

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

II.3 PROPRIETES MECANIQUES DES FIBRES METALLIQUES

Les fibres ont une influence importante sur le comportement mécanique du béton fibreux, leur incorporation peut augmenter les résistances, en traction, en flexion et particulièrement au cisaillement en résistant aux efforts de traction. Offrent plus de ductilité et de ténacité.

Leur géométrie est très variable « figure 03 ». Les fibres les plus utilisées sont les fibres droites. C'est l'adhérence de ces fibres avec la matrice cimentaire qui diminue la fragilité du béton par amélioration du comportement post fissuration.

Il existe des fibres à crochets. Leurs extrémités recourbées développent un ancrage et dissipent une énergie de fissuration par plastification de la fibre [18] et par frottement à l'interface avec la matrice.

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

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

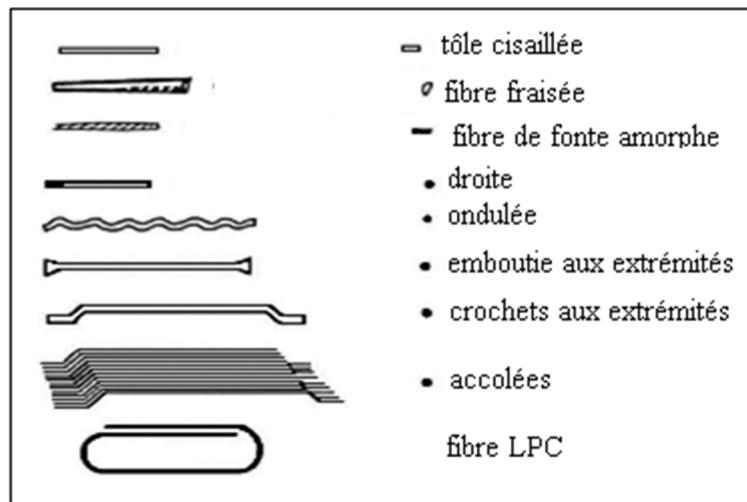


Figure 03 : Différentes formes géométriques de fibres métalliques.

III. LES AJOUTS CIMENTAIRES

III.1 GENERALITES

L'incorporation d'un ajout cimentaire dans les mélanges de béton est une pratique largement répandue et documentée. En plus d'améliorer plusieurs propriétés du béton, le remplacement partiel du ciment par des ajouts cimentaires offre plusieurs avantages économiques et environnementaux. La réduction de la quantité de ciment requise entraîne une

baisse des coûts de production, de la consommation énergétique et des émissions polluantes reliés à la fabrication du ciment Portland.

III.2 **DÉFINITION**

Les ajouts sont des matières premières naturelles, artificielles, sous produits d'une autre industrie, résidus industriels ou déchets industriels polluant, ils sont ajoutés soit au mélange de matières premières avant le broyage, soit à la farine crue, soit au clinker portland avant ou après le broyage, leurs pourcentages dans la masse varient suivant le but de l'addition et le rôle qu'elle peut jouer, ainsi on trouve des ajouts en faibles teneurs, moyennes ou en fortes teneurs. On distingue deux types d'ajouts : inertes et actives.

III.3 **ORIGINE ET CLASSIFICATION**

Il existe deux types d'ajouts selon leurs origines :

- Ajouts minéraux inertes ;
- Ajouts minéraux actifs (naturels ou artificiels).

1. **Les ajouts minéraux inertes**

Les ajouts inertes sont des éléments naturels ou artificiels chimiquement inertes qui ne jouent aucun rôle dans le processus de fabrications, d'hydratation, ou de durcissement du ciment Portland mais peuvent modifier les propriétés finales du produit, ils sont généralement utilisés au niveau du broyage du clinker.

Les roches carbonatées telle que le calcaire, craie, dolomie, sont largement utilisées comme ajouts naturels inertes au ciment.

La priorité est accordée aux roches les plus dures pour éviter un éventuel colmatage de la matière lors du broyage.

Les ajouts inertes sont moins connus dans la pratique de l'industrie cimentière, ils sont habituellement utilisés lorsque la cimenterie ne dispose pas de source d'ajouts minéraux actifs.

2. **Les ajouts minéraux actifs**

Il existe deux types d'ajouts minéraux actifs :

➤ Ajouts minéraux actifs naturels :

Les ajouts minéraux actifs d'origine sédimentaire sont les dolomites, les tripolis et les gaizes, ils se rapprochent par leurs compositions chimiques.

Les ajouts minéraux actifs d'origine volcaniques sont représentés par les pouzzolanes, les cendres, le tuf et la pierre ponce.

➤ Ajouts minéraux actifs artificiels :

Parmi les ajouts actifs artificiels on peut citer :

- Les déchets siliciques actifs ;
- Les argiles cuites (déchets de briques et de tuiles) ;
- Les cendres des combustibles ;
- Les laitiers métalliques.

Les déchets siliciques actifs obtenus à la suite de l'extraction de l'alumine à partir de l'argile renferment souvent l'anhydrite sulfurique a quantité élevée.

Les argiles cuites se présentent sous forme de poudre fine obtenue à la suite de broyage de l'argile à teneur élevé en « kaolinite » ($\text{Al}_2\text{O}_3, 2\text{SiO}_2, 2\text{H}_2\text{O}$) spécialement cuite à une température de 600 à 800°C.

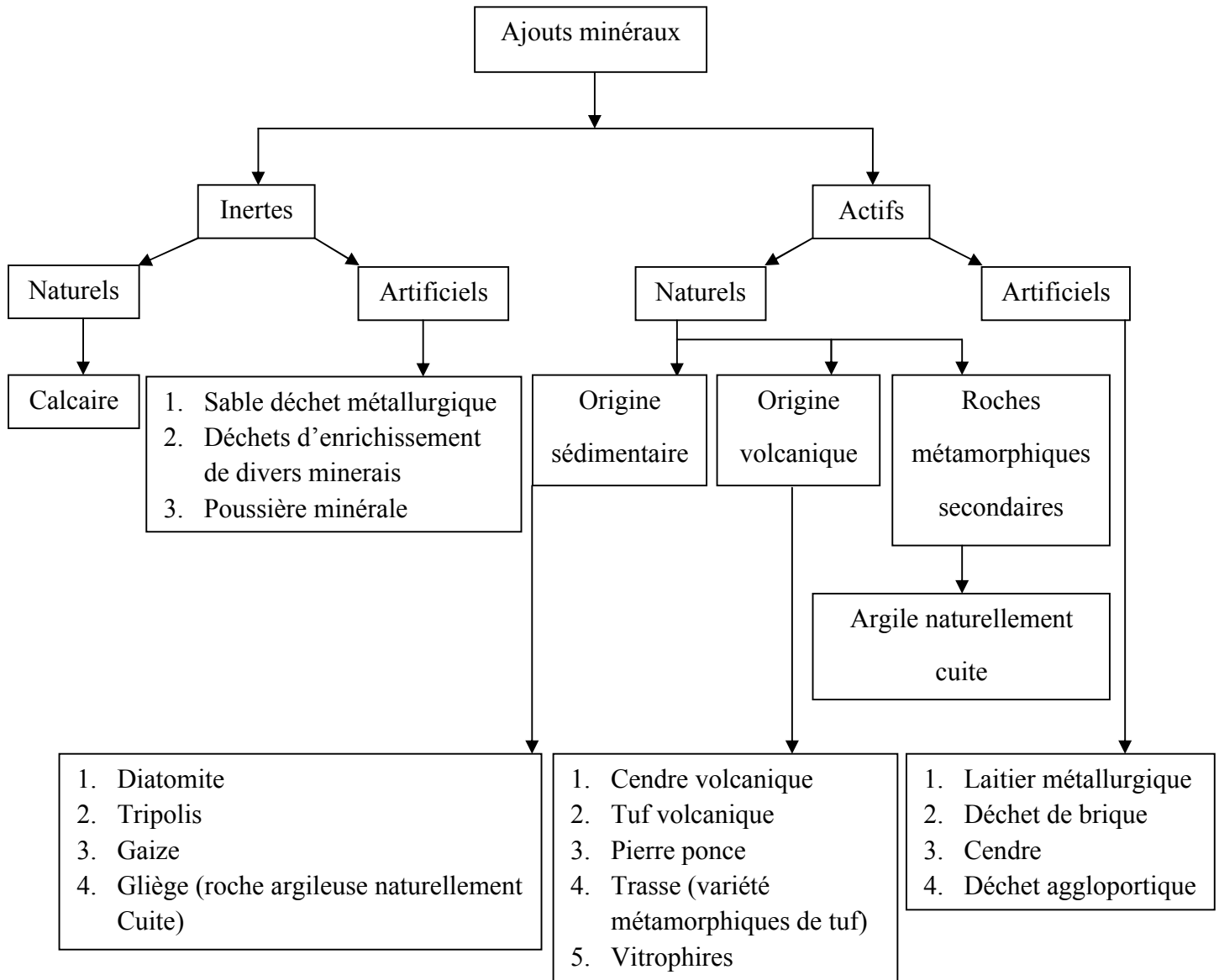
Les laitiers métalliques sont également utilisés dans la production du ciment autant qu'ajouts minéraux actifs. L'activité des laitiers est déterminée à partir de sa composition minéralogique et du rapport des phases cristallines et vitreuses qui dépendent des conditions de refroidissements.

L'utilisation des ajouts minéraux actifs dans l'industrie du ciment est préférée grâce à leurs avantages par rapport aux ajouts inertes.

Rôle des ajouts minéraux actifs :

Le rôle des ajouts minéraux actifs consiste à fixer la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ du ciment qui se dégage lors de l'hydratation de C_3S pour former des compositions difficilement solubles (stables) qui contribuent à la résistance du ciment.

Les ajouts minéraux actifs améliorent la compacité du mortier et du béton, cette compacité donne une meilleure protection du ciment à l'agressivité des eaux douces et des sels.



Les cendres volantes, le laitier de haut fourneau granulé broyé, la fumée de silice et les pouzzolanes naturelles, telles que le schiste calciné, l'argile calcinée ou le métakaolin « figure 04 », 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.



Figure 04 : Ajout cimentaires. De gauche à droite : cendres volantes (classe C), métakaolin (argile calcinée), fumée de silice, cendres volantes (classes F), laitier et schiste calciné.

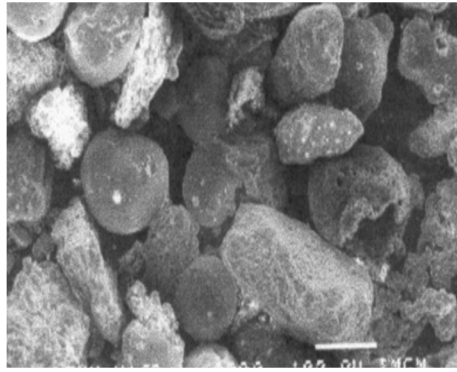


Figure 05 : Observation au MEB cendre volante.

Ces matériaux sont aussi généralement catégorisés comme ajouts cimentaires ou ajouts minéraux. Une pouzzolane est un matériau siliceux ou alumino-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.

En Amérique du Nord, on a eu de plus en plus recours aux ajouts cimentaires depuis les années 70. Ces matériaux se ressemblent en ce que la plupart sont des sous produits d'autres procédés et leur emploi judicieux est souhaitable non seulement du point de vue de la conservation de l'environnement et de l'énergie mais aussi pour les bénéfices techniques qu'ils apportent au béton.

Les ajouts cimentaires ajoutés au béton font parti du système cimentaire complet. Ils peuvent être utilisés en supplément ou comme remplacement partiel du ciment Portland ou du ciment composé dans le béton, selon les propriétés des matériaux et l'effet souhaité sur le béton.

Les ajouts cimentaires sont utilisés pour améliorer une propriété du béton en particulier, comme par exemple pour réduire l'effet néfaste de la réaction alcali-granulat. Le dosage optimum à utiliser doit être établi à l'aide d'essais.

Des essais sont nécessaires afin de déterminer si le matériau améliore réellement la propriété et le dosage à utiliser. Un dosage approprié est important puisqu'un surdosage peut être néfaste alors qu'un dosage trop bas ne produira pas l'effet désiré. De plus, les ajouts cimentaires réagissent de façon différente avec différents ciments.

Autrefois, la cendre volante, le laitier, la fumée de silice et les pouzzolanes naturelles telles que l'argile et le schiste calcinés étaient utilisés dans le béton de façon individuelle.

Aujourd'hui, à cause d'un meilleur accès à ces matériaux, les producteurs de béton peuvent combiner deux matériaux ou plus afin d'optimiser les propriétés du béton.

Des mélanges utilisant trois ajouts cimentaires, connus sous le nom de mélanges ternaires, sont de plus en plus disponibles.

1) Cendres volantes :

Les cendres volantes, les ajouts cimentaires les plus fréquemment utilisés dans le béton, sont des résidus finement divisés (poudre ressemblant au ciment) « figure 06 » résultant de la combustion du charbon pulvérisé et évacué de la chambre de combustion d'un four par les gaz qui s'en échappent. La plupart des cendres volantes sur le marché sont un sous produit des centrales thermiques. Durant la combustion, presque toute la matière volatile et le carbone du charbon sont brûlés.

Les impuretés du charbon (telle l'argile, le feldspath, le quartz et le schiste) entrent en fusion et sont évacuées de la chambre à combustion par les gaz d'échappement. Durant cette étape, le matériau fusionné refroidit et se solidifie en petites particules sphériques vitreuses nommées cendres volantes « figure 07 ». Les cendres volantes sont ensuite extraites des gaz d'échappement à l'aide de dépoussiéreurs électrostatiques ou de sacs filtrants.

La plupart des particules de cendres volantes sont des sphères solides et certaines sont des cénosphères creuses.

Des pléosphères, qui sont des sphères contenant de plus petites sphères, sont aussi présentes.



Figure 06 : Cendre volantes : une poudre ressemblant au ciment utilisé dans le béton.

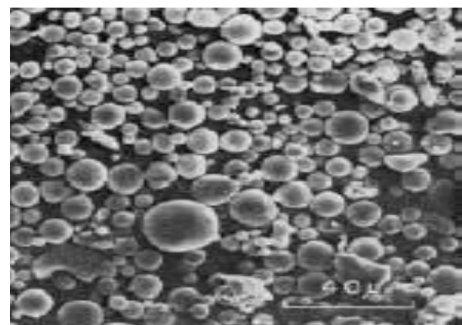


Figure 07 : Micrographie de cendres volantes au microscope électronique à balayage.

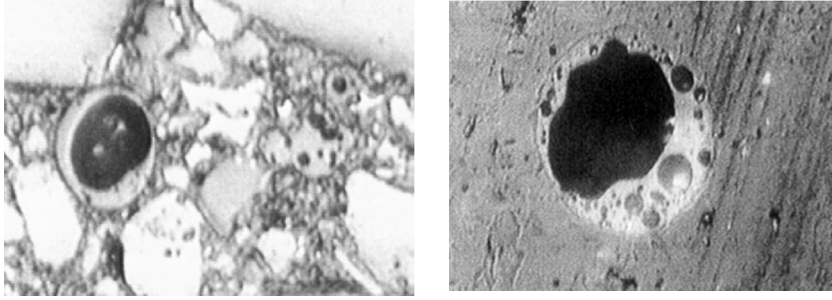


Figure 08 : Particules sphériques creuses.

Les matériaux broyés, tel le ciment Portland, sont constitués de particules angulaires.

La dimension des particules de la cendre volante est comprise entre moins de $1\mu\text{m}$ et plus de $100\mu\text{m}$, avec une dimension caractéristique de moins de $20\mu\text{m}$. Seuls 10% à 30% des particules (en masse) sont plus grosses que $45\mu\text{m}$.

La surface spécifique est généralement comprise entre 300 et $500\text{ m}^2/\text{kg}$, bien que certaines cendres volantes aient des surfaces spécifiques aussi faibles que $200\text{ m}^2/\text{kg}$ et aussi élevées que $700\text{ m}^2/\text{kg}$.

La masse volumique (masse par unité de volume incluant l'air entre les particules) d'une cendre volante mal compactée peut varier de 540 à 860 kg/m^3 alors que celle d'une cendre compactée par vibration ou compactée par l'entreposage est comprise entre 1120 et 1500 kg/m^3 .

La cendre volante est constituée surtout de silicate de verre contenant de la silice, de l'alumine, du fer et du calcium. Les composants mineurs sont le magnésium, le soufre, le sodium, le potassium et le carbone. Des composants cristallins sont présents en petites quantités.

La densité d'une cendre volante varie de 1.9 à 2.8. Elle est généralement de couleur beige ou grise.

Les cendres volantes de type F et de type C, sont généralement utilisées comme ajouts pouzzolaniques dans les bétons d'usage courant. La cendre volante de type F a une faible teneur en calcium (moins de 8% de CaO) et une teneur en carbone de moins de 5%, quoique certaines puissent avoir des teneurs en carbone de près de 10%. La cendre volante de type C a une teneur plus élevée en calcium que celle de type F.

Elle comprend deux catégories :

- Type CI (teneur en calcium intermédiaire) avec une teneur en CaO entre 8% et 20% ;
- Type CH (haute teneur en calcium) avec une teneur en CaO de plus de 20%.

Les cendres volantes de type C ont des teneurs en carbone de moins de 2%. Plusieurs cendres volantes de type C s'hydratent lorsqu'elles sont exposées à l'eau et durcissent en moins de 45 minutes. Certaines cendres volantes satisfont à la fois les exigences des types F et C.

Les cendres volantes de type F sont souvent utilisées à un dosage de 15% à 25% par masse de matériaux cimentaires et la cendre volante de type C est utilisée à un dosage de 15% à 40% par masse de matériaux cimentaires. Toutefois, lorsque le béton doit résister aux sels de déglçage, la quantité de cendre volante ne doit pas dépasser 25% de la masse des matériaux cimentaires, sauf si des essais de durabilité confirment la bonne durabilité du béton avec cendre volante. Le dosage varie selon la réactivité de la cendre et l'effet souhaité dans le béton.

2) Laitier :

Le laitier de haut-fourneau granulé « figure 09 », aussi appelé ciment de laitier, fabriqué à partir du laitier de fonte, c'est un liant hydraulique non métallique qui est composé essentiellement de silicates et d'alumino-silicates de calcium qui se sont développés dans des conditions de fusion de l'acier dans un haut-fourneau.

Le laitier en fusion, à une température d'environ 1500°C, est refroidi rapidement en le trempant dans l'eau pour former un matériau granuleux ressemblant à un sable vitreux.



Figure 09 : Laitier de haut fourneau granulé broyé.

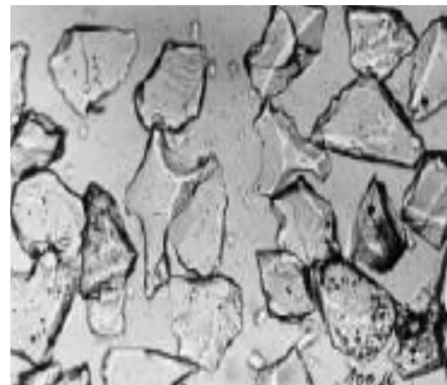


Figure 10 : Laitier granulé de haut fourneau vu au microscope.

Le matériau granulé, broyé à une taille de moins 45 microns, possède une finesse Blaine d'environ 400 à 600 m²/kg. La densité d'un laitier de haut fourneau granulé broyé est comprise entre 2.85 à 2.95. La masse volumique des laitiers varie de 1000 à 1400 kg/m³.

Le laitier broyé, de forme angulaire et rugueuse, s'hydrate en présence de l'eau et d'un activateur, le NaOH ou le Ca(OH)₂, tous deux présents dans le ciment Portland, et durcit de la même manière que le ciment Portland.

Toutefois, le laitier refroidi par air ne possède pas les propriétés hydrauliques du laitier refroidi par eau. Le laitier broyé de haut-fourneau, lorsqu'il est utilisé dans le béton à usage général, constitue normalement entre 30% et 45% des matières cimentaires du mélange.

Certains bétons au laitier sont fabriqués à l'aide de matières cimentaires contenant plus de 70% de laitier. Si le béton doit résister aux sels de déglacage, la teneur maximum en laitier ne doit pas dépasser 50% de la masse des matériaux cimentaires. Dans tous les cas, des essais avec les matériaux qui seront utilisés sont essentiels pour confirmer la bonne durabilité du béton.

3) *Fumée de silice* :

La fumée de silice, aussi appelée microsilice ou fumée de silice condensée, est un coproduit qui est utilisé comme pouzzolane « figure 11 ». Ce coproduit est le résultat de la réduction du carbone et du quartz de très grande pureté dans un four à arc électrique durant la fabrication du silicium ou d'alliages de ferrosilicium. La fumée de silice s'élève sous forme de vapeur oxydée émise les fournaies chauffées à 2000°C. Lorsqu'elle se refroidit, elle condense pour ensuite être captée dans d'énormes poches de tissu. La fumée de silice est ensuite traitée pour enlever les impuretés et pour contrôler la taille des particules.

La fumée de silice condensée est composée essentiellement de bioxyde de silicium (normalement plus de 85%) sous forme non cristalline (amorphe). Puisqu'elle est aérogène comme la cendre volante, elle a une forme sphérique « figure 12 ». Elle est extrêmement fine, avec des particules de moins de 1 µm de diamètre, qui est en moyen est d'environ 0.1 µm, soit environ 100 fois plus petit que la dimension moyenne d'un grain de ciment.



Figure 11 : Poudre de fumée de silice.

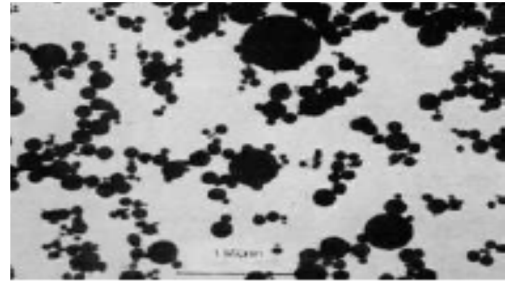


Figure 12 : Micrographie de particules de fumée de silice au microscope électronique.

La fumée de silice condensée à une surface d'environ $20.000 \text{ m}^2/\text{kg}$ (selon la méthode d'adsorption d'azote). Pour fins de comparaison, la surface de la fumée de tabac est d'environ $10.000 \text{ m}^2/\text{kg}$. Les ciments de type 30 ont des surfaces de 300 à $400 \text{ m}^2/\text{kg}$ et de 500 à $600 \text{ m}^2/\text{kg}$ (Blaine). La densité de la fumée de silice est généralement d'environ 2.20 à 2.25 , mais peut être aussi élevée que 2.5 . Le ciment Portland a une densité d'environ 3.15 . La masse volumique de la fumée de silice varie entre 130 et 430 kg/m^3 . La fumée de silice est vendue sous forme de poudre mais la plus souvent disponible sous forme de liquide. La fumée de silice est utilisée entre 5% et 10% de la masse totale des matériaux cimentaires. Elle est utilisée dans des applications où un niveau élevé d'imperméabilité est requis, et dans le béton à haute résistance.

Lorsque le béton doit résister aux sels de déglçage, la quantité maximum de fumée de silice devrait être de 10% de la masse de matériaux cimentaires.

4) Pouzzolanes naturelles :

Les pouzzolanes naturelles débutent avec des projets d'infrastructures publiques du début du 20^{ème} siècle, tels que les barrages, où elles ont été utilisées pour contrôler l'augmentation de la température, les pouzzolanes naturelles ont été utilisées pour améliorer la résistance du béton à l'attaque par les sulfates et elles ont été parmi les premiers matériaux utilisés pour combattre la réaction alcali-silice dans les bétons.

Des nos jour, les pouzzolanes naturelles les plus couramment utilisées sont les matériaux traités thermiquement dans un four broyés en fine poudre.

On y retrouve notamment l'argile calcinée, le schiste calciné et le métakaolin. L'argile calcinée est utilisée dans les constructions en béton conventionnel, tout comme dans le cas des autres pouzzolanes. Elle peut être utilisée en remplacement partiel du ciment, en général entre

15% et 35%, et peut être utilisée pour améliorer la résistance à l'attaque par les sulfates, pour contrôler la réactivité alcali-silice et pour réduire la perméabilité.

Le schiste calciné peut contenir entre 5% et 10% de calcium, ce qui produit un matériau ayant ses propres propriétés cimentaires ou hydrauliques. Le schiste calciné a une perte au feu comprise entre 1 et 5% à cause de la calcite résiduelle n'ayant pas été complètement calcinée et en raison de la présence d'eau liée dans les minéraux argileux. La perte au feu du schiste calciné ne constitue pas une mesure ou une indication de la teneur en carbone comme dans le cas de la cendre volante.

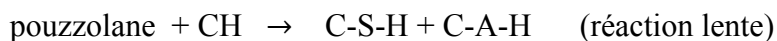
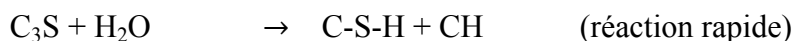
Le métakaolin, un certain type d'argile calcinée, est produit à partir de kaolin de grande pureté calciné à faible température.

Le produit est broyé jusqu'à une taille moyenne d'environ 1 à 2 μm .

Le métakaolin est utilisé dans des applications spéciales où une perméabilité peu élevée et une très haute résistance sont requises.

Dans ces applications, le métakaolin est utilisé comme ajout au béton plutôt qu'en remplace du ciment. Par exemple, un ajout d'environ 10% de la masse de ciment est courant [19].

Les réactions d'hydratation du ciment et des pouzzolanes donnent :



Les réactions qui se déroulent :

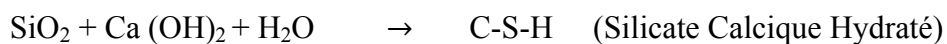




Figure 13 : Pouzzolane volcanique vu au microscope.

5) Le marbre :

Le marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire, existant dans une grande diversité de coloris, pouvant présenter des veines, ou marbrures (veines et coloris sont dus à des inclusions d'oxydes métalliques, le plus souvent).

Certains types de marbres portent des noms particuliers, par exemple le cipolin ou la griotte. Le marbre désigne un carbonate de calcium à tissu compact ou cristallin qui se laisse rayer et réagit aux acides plus ou moins siliceux ou argileux, il se présente en épaisseur homogène ou diversement mélangée à d'autres matières, sa densité est élevée en moyenne de 2.7. La classification des marbres est fondée sur les teintes ou les dessins : outre le blanc ils existent des variétés, beiges, bleues, roses, gris, jaunes, rouges, vertes, violettes ou noires.

Les produits marbrières algérienne sont extraits et transformés conformément aux normes européennes : Italienne et françaises en particuliers. Les procédés utilisés en Algérie pour le travail du marbre sont ceux utilisés dans le monde :

- Sciage des masses au fil hélicoïdal, au fil diamanté et la haveuse pour l'abatage et le tranchage des masses brutes de marbres naturels en carrières ;
- Transformation en produits finis au moyen de lames et disques, débitages secondaires et ponçage avec des pierres ponce.

Le marbre est une roche métamorphique résultant de la transformation d'un calcaire pur « figure 14 », souvent veiné de couleurs variées. Mis en œuvre dans la construction et la décoration, le marbre se révèle être une matière noble et durable très recherchée.

Les roches métamorphiques sont issues de la transformation de roches préexistantes par une chaleur intense ou/et de très fortes pressions.

Le degré de pureté du marbre est responsable de sa couleur et de son aspect : il est blanc si la roche dont il provient était uniquement composée de calcite « figure 15 ».



Figure 14 : Gisement de marbre.



Figure 15 : Poudre de marbre.

Cette pierre est souvent parcourue de veines et veinules de teintes très variés : de la grise pâle au rouge vif qui donne l'aspect marbré. La classification des marbres est fondée sur les teintes ou les dessins : outre le marbre blanc, il existe des variétés beiges, bleues, roses, grises, jaunes, rouges, vertes, violettes ou noires. Selon l'aspect des rayures, on a des produits veinés, zonés, bigarrés, ramagés, etc.

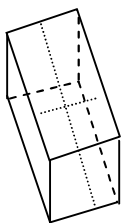
Très souvent, des inclusions variées de minerais métalliques leur donne des couleurs très vives (sels de plomb, de zinc, d'antimoine, de molybdène, de magnésium ou d'étain).

Les géologues distinguent deux formes de métamorphismes :

- Le métamorphisme de contact provoqué par la chaleur d'une remontée magmatique ;
- Le métamorphisme régional qui se produit à l'occasion du plissement des chaînes de montagne.

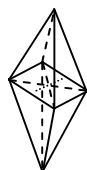
Le marbre est un du carbonate de calcium plus ou moins pur, de densité de 2.7 à 2.9. Selon ses configurations cristallines hexagonales ou orthorhombiques, on observe une transformation de l'ortho vers l'hexagonal autour de +520°C. Le point de fusion est de +1340°C (+/-10°C).

SYSTEME ORTHORHOMBIQUE



Prisme

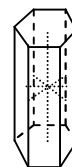
orthorhombique



Bipyramide

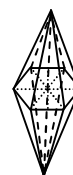
orthorhombique

SYSTEME HEXAGONAL



Prisme

hexagonal



Pyramide

hexagonale

1. Composition minéralogique :

Le marbre contient surtout de la calcite, mais peut contenir plus ou moins de la dolomite. On peut y trouver de la brucite, de l'olivine, de la serpentine, de la trémolite, du phlogopite en cas de transition vers les calcaires à silicates et la skarn. Les marbres sont facilement rayés par le canif, ce qui sert à les distinguer des quartzites blancs qui sont beaucoup plus durs. Le marbre a des cristaux généralement rhomboédriques.

Le marbre blanc est une roche de calcaire très pur « CaCO_3 », aussi c'est une calcite, qu'elle est l'un des minéraux les plus communs avec la dolomite représente 22% des roches sédimentaires soit 273 millions de kilomètres cubes de roches carbonatées. Pendant très longtemps la calcite n'était connue que sous son nom de spath calcaire ou de chaux carbonatée. Peut être est ce Haidinger qui lui a donné le nom de calcite sous lequel elle est maintenant universellement connue.

2. Quelques unes des propriétés physico-chimiques de la calcite :

- Dureté : 3 ;
- Trace : blanche ;
- Couleur : incolore, blanche, jaune, brune, rouge, noire ;
- Transparence : transparente, translucide ;
- Eclat : vitreux, nacré ;
- Densité : 2.6 à 2.8 ;
- Indice de réfraction : de 1.48 à 1.65 ;
- Luminescence : blanche, jaunâtre, bleuâtre, rougeâtre, orange, verdâtre ;
- Composition chimique : 100% CaCO_3 ;
- Propriétés chimiques : éclate dans la flamme et libère CO_2 , le CaO naissant colore la flamme en orange, bouillonne dans HCl [20].



Figure 16 : Cristal de calcite.

3. Domaines d'utilisation :

La poudre de marbre est une matière calcaire d'un blanc pur, au grain légèrement plus gros que la craie. Elle est utilisée comme fond, pour les fresques en raison de son imperméabilité parfaite. La poudre de marbre peut également servir de matière de charge pour apprêts, pâtes de modelage et pigments.

a) **Le Tadelack** :

Le tadelakte, à l'origine enduit à la chaux populaire marocain, revient à la mode. Apprécié pour son aspect décoratif et pratique, le Tadelack a pour propriété de rendre les surfaces étanches. L'originalité de cet enduit méritait bien que l'on lui consacre une rubrique.

1) Domaines d'Application :

Le Tadelack est un enduit à la chaux de surface qui a pour propriété de les rendre étanches. Il prouvera donc son utilité dans toutes les pièces d'eau, murs de salle de bain, sanitaires.

Son côté décoratif appelé aujourd'hui le Tadelack a dévoiler ses appareils sur tous les supports muraux mais aussi sur les objets de décoration, le mobilier...

2) Caractéristiques :

- Le Tadelack fait partie de la famille des enduits fins de chaux ;
- Le polissage de la chaux se fera au galet de rivière ou au couteau inox ;
- L'aspect brillant sera obtenu par incorporation de savon noir et d'œufs sur l'enduit fini.

b) **Stuc** :

Ces techniques d'origine italienne, permettent de retrouver toute la noblesse du marbre, la richesse et la finesse de son nuançage.

Aujourd'hui, tout enduit mince ou peinture lissée, au rendu brillant et à usage décoratif est appelé communément « stuc ». Il existe pourtant traditionnellement plusieurs techniques :

Stucs en plâtre, plâtre et chaux ou simplement avec chaux.

Dans son pays d'origine, l'enduit marmorino ou « Marmorino » est un mélange de poudre de marbre et de chaux, passé en plusieurs couches fines et resserré jusqu'à brillance.

On le trouve aussi bien dans les intérieurs humides romains qu'en extérieur entre de solides modénatures

Le stuc vénitien, très utilisé dans les plus belles maisons vénitiennes, reflète la noblesse du marbre. Sa combinaison de transparences et de reliefs se décline en teintes chaleureuses et authentiques [21].

1) La peinture Acrylique :

La peinture acrylique s'applique sur tous supports, pour créations et applications. S'applique indifféremment sur le métal, PVC, polystyrène, verre, bois, plâtre, pâte à sel, papier, carton.



Pour 10kg de peinture, mélange ensemble : 1 litre d'eau, 1 cuillère à café d'agent mouillant, 200g de rétenteur d'eau préparé et 3 litres de liant acrylique.

Mélange, puis ajouter 3kg de poudre de marbre, 3.2kg de pigments au choix et 400g de talc [22].

IV. CONCLUSION

- Le béton est un matériau de construction composite constitué de granulats agglomérés par un liant ;
- Pour ce qui est des constituants du béton, c'est une gamme des ciments courants, écologiques, durables et économiques sont produits par la réduction de la teneur en clinker et l'incorporation de différents types d'ajout minéraux. Par ailleurs, cette gamme des ciments permet de choisir le ciment en fonction de la résistance caractéristique garantie, et celle nécessaire au décoffrage du béton ainsi que de

l'environnement de l'ouvrage. Pour le gâchage du béton, l'eau potable est préférable, mais si on doit utiliser une autre eau la norme NF EN 1008 précise les facteurs d'aptitude. Les granulats doivent répondre à certaines exigences sur leur nature, leur taille et leur forme. Ils ne doivent pas contenir d'éléments nocifs préjudiciables à la qualité du béton. Des adjuvants peuvent être ajoutés au béton pour améliorer certains de ces propriétés, cependant les accélérateurs de prise à forte teneur en chlorure sont à éviter ;

- Les fibres ont généralement pour rôle de renforcer l'action des armatures traditionnelles en s'opposant à la propagation des microfissures. Selon les caractéristiques présentées par les fibres, la rupture du béton évolue plus ou moins d'un comportement fragile vers un mode de type ductile ; Les fibres ont une influence importante sur le comportement mécanique du béton fibreux, leur incorporation peut augmenter les résistances, en traction, en flexion et particulièrement cisaillement en résistant aux efforts de traction ;
- Les ajouts cimentaires sont utilisés pour améliorer une propriété du béton en particulier, comme par exemple pour réduire l'effet néfaste de la réaction alcali-granat.

Il existe deux types d'ajouts selon leurs origines :

- Ajouts minéraux inertes ;
- Ajouts minéraux actifs (naturels ou artificiels).

CHAPITRE II

FORMULATION ET METHODES DE COMPOSITION

FORMULATION ET METHODES DE COMPOSITION

I. INTRODUCTION

Le problème de la formulation des bétons s'est singulièrement compliqué ces dernières années. Car, de nouveaux constituants tels que les adjuvants organiques, les additions minérales (cendres volantes, fillers etc.) ou les fibres sont venus s'ajouter à la panoplie classique des granulats et des ciments.

Même si la conception des structures en béton n'est généralement pas influencée par sa formulation, elle impose à celle-ci un minimum de critères : résistance ; durabilité dans le temps et maniabilité lors de sa mis-en œuvre.

Le problème de la formulation des bétons comporte de nos jours davantage de variables, et l'espace dans lequel on évolue est beaucoup plus vaste (on peut viser des résistances de 1 à 2 MPa (pour des matériaux ré-excavables destinés au remplissage de tranchée comme des résistances supérieures à 200 MPa pour des bétons à haute résistance). Face à ces réalités, provenant sans doute d'un progrès normal de la technologie, le formulateur est soumis à une pression croissante en termes de délais et de coûts [21].

Nous présentons dans ce chapitre une synthèse non exhaustive sur les différentes méthodes de formulation existantes et les qualités requises pour tout béton de structures ainsi que les différents facteurs qui les régissent.

II. FACTEURS REGISSANT LA FORMULATION DES BETONS

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser le béton qui satisfait les qualités recherchées dont les plus essentielles sont : la résistance, la maniabilité et la durabilité [22].

1. Résistance mécanique

La résistance mécanique a été longtemps considérée comme la caractéristique la plus essentielle pour le béton. Bien qu'elle soit étroitement liée à l'ouvrabilité, elle s'est vue attribuer une grande part en matière de recherche et développement [23].

1) Essais et mesure des résistances mécaniques :a) Résistance à la compression :

Elle est mesurée en compression axiale sur cylindre d'une hauteur double de son diamètre. Le plus couramment employé est le cylindre de 16 (=15.96 cm) dont la section est de 200 cm².

b) Résistance en traction :

La résistance à la traction peut être déterminée par différents essais :

1. Traction directe :

Essai très délicat à réaliser, il consiste en la mise en traction du cylindre en béton après collage des têtes de traction sur les deux faces. Seule difficulté rencontrée, le centrage de ces têtes. L'opération doit être réalisée sans efforts de flexion [23].

2. Traction par fendage (essai brésilien) :

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton couché suivant deux génératrices opposées entre les deux plateaux de la presse [23].

Si « p » est la charge de compression maximale entraînant l'éclatement du cylindre par mise en traction du plan diamétrale verticale, « D » diamètre et « L » longueur du cylindre, la résistance en traction est égale à :

$$f_{tj} = 2 \cdot \frac{p}{\pi DL}$$

3. Traction par flexion :

L'essai consiste à rompre une éprouvette prismatique de longueur « 4 a » et de côté « a » sous une flexion à quatre points et une charge totale « p » [23].

- Le moment étant constant entre les deux points d'application de la charge :

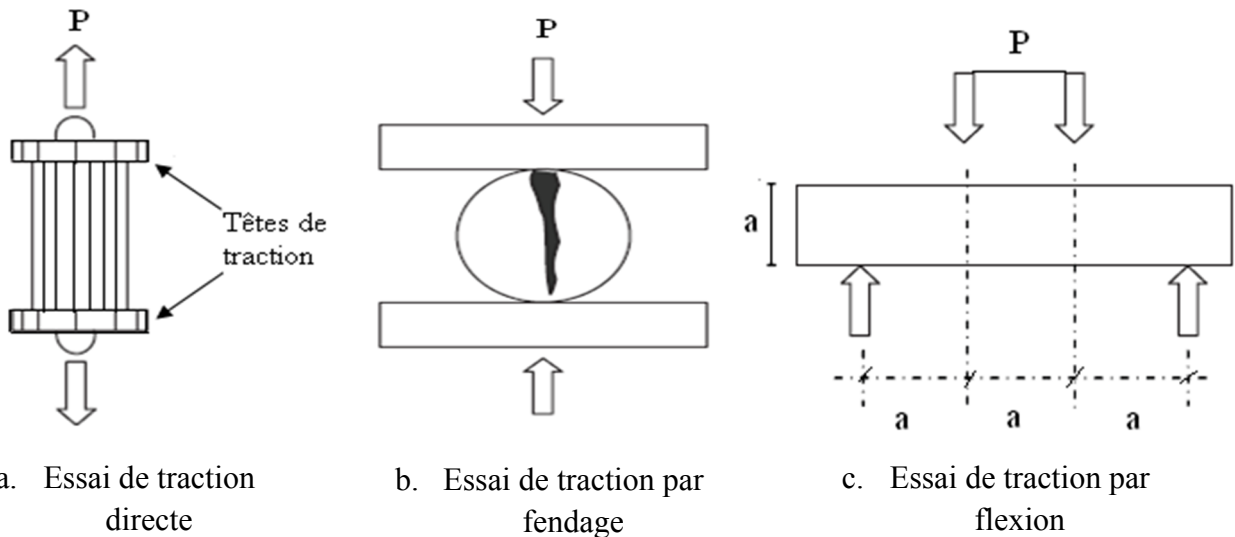
$$M = \frac{Pa}{2}$$

- La résistance à la traction :

$$f_{tj} = \frac{Mv}{I} = \frac{6M}{a^3}$$

$$\frac{I}{v} : \text{module d'inertie} = \frac{a^3}{6}$$

I : moment d'inertie de la section.



2) Influence du dosage en ciment et du dosage en eau « (E/C) » :

Les deux facteurs sont essentiels à la confection du béton. Ils présentent deux effets totalement opposés sur sa résistance. Si l'augmentation du ciment favorise son accroissement, un surplus d'eau entraîne sa diminution.

Ces deux effets sont le plus souvent rencontrés sous forme de rapport (E/C) alors que plusieurs recherches et formulation faites par le passé utilisent (C/E) qui se traduit par une fonction de résistance linéaire et croissante, et une plage de variation usuelle plus annoncée. (De 1.5 à 2.5 contre 0.4 à 0.66 pour E/C). « figure 17 » [23].

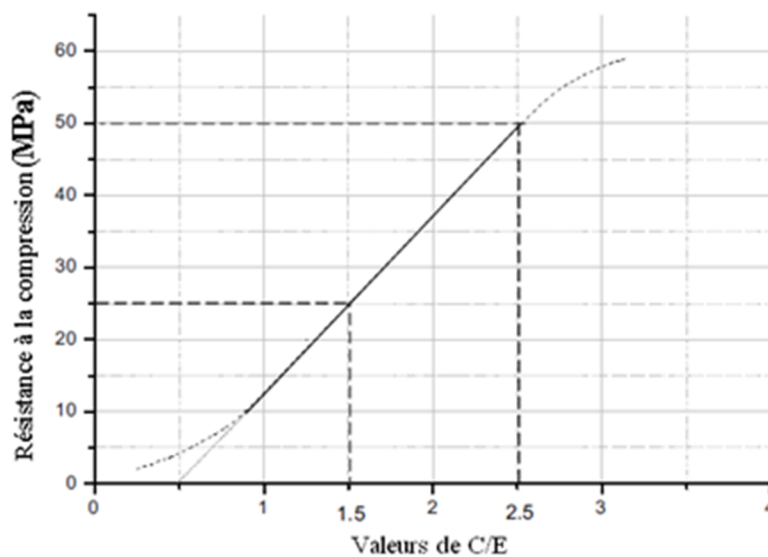


Figure 17 : Relation entre (C/E) et la résistance à la compression « f_c » d'après la formule de BOLOMEY $\{f_c = G \times C_E (C/E - 0.5)\}$. G : coefficient, de granularité égale à 0.5. C_E : classe vraie du ciment, égale à 50 MPa [23].

De nos jours la tendance n'est plus de fixer le dosage en ciment lors de passation de marché ou de contrat. Mais exiger une résistance caractéristique pour le béton une fois durci. Donc il appartient à l'entreprise chargée de la réalisation d'utiliser le dosage en ciment nécessaire. Par ailleurs un dosage minimal peut être exigé par le maître d'œuvre mais seulement afin de garantir l'ouvrabilité et l'étanchéité [23].

Nombreux sont les textes réglementaire qui spécifient des dosages minimaux en ciment tel que :

- La norme P 18 011 sur la classification des environnements agressifs qui spécifie les dosages suivant [23] :

$$C \geq \frac{550}{\sqrt[5]{D}} \quad \text{Pour des environnements à moyenne agressivité ;}$$

$$C \geq \frac{700}{\sqrt[5]{D}} \quad \text{Pour des environnements à forte et très forte agressivité.}$$

D : Dimension maximale des granulats.

- Le BAEL 91 prescrit des dosages minimaux permettant d'obtenir des résistances caractéristiques dans les cas courants (CC) et les cas d'autocontrôle surveillé (AS) [23] :

✚ CC : les fabrications de béton dans des conditions courantes ;

✚ AS : les fabrications de béton avec autocontrôle surveillé.

Tableau 02 : Dosage en ciment [24].

Classe de ciment	32.5 et 32.5 R		42.5 et 42.5 R	
	CC	AS	CC	AS
D_{max} = 16	300 kg/m ³	/	/	/
20	350 kg/m ³	325 kg/m ³	325 kg/m ³	300 kg/m ³
25	à justifier	400 kg/m ³	375 kg/m ³	350 kg/m ³
30	non justifier	à justifier	à justifier	à justifier

3) Influence de la granularité :

Moins influente que le dosage en ciment ou le dosage en eau, la composition granulométrique du mélange n'intervient que d'une manière relativement faible sur la plupart des propriétés du béton [23].

Sauf pour la résistance à la compression où nous pouvons voir « figure 18 » que pour des valeurs de (G/S) supérieures à « 2.2 » la résistance à la compression augmente considérablement, une augmentation certainement positive mais prise sur le compte de

l'ouvrabilité, parce que en pratique on ne dépasse pas les valeurs de 1.5 à 1.6 pour avoir un béton ouvrable [23].

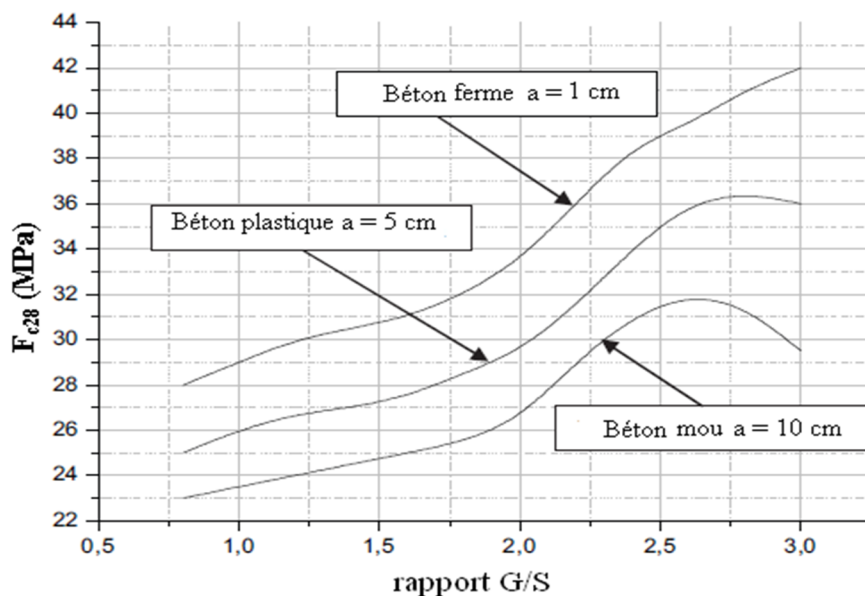


Figure 18 : Variation de la résistance en compression à 28 jours en fonction du rapport G/S [23].

Nous pouvons aussi apprécier l'influence du rapport G/S sur les différentes propriétés du béton récapitulées dans le tableau 03.

Tableau 03 : Principales propriétés du béton relatives au niveau de G/S [23].

Caractéristiques	Appréciations concernant les bétons	
	G/S élevé par rapport à G/S faible	Granularité discontinue par rapport à continue
Ouvrabilité	Moins bonne surtout pour $G/S > 2.2$	Moins bonne surtout si $G/S > 2.2$
Résistance en compression	Meilleure, surtout pour $G/S \geq 2.2$	Très légèrement supérieure
Résistance en traction	Sans corrélation apparente	Très légèrement inférieure
Module d'élasticité	Sans corrélation très nette sauf pour le module statique un peu plus élevé en fonction de G/S	Un peu plus élevé
Vitesse du son	Sans corrélation très nette	légèrement supérieure
Indice sclérométrique	Un peu supérieur	Très légèrement supérieur
Retrait	Sans corrélation très nette	Moins élevé surtout si $G/S > 2.2$
Compacité, densité	Légèrement plus élevées pour $G/S > 2.2$	Un peu plus élevées

4) Dimension maximale des granulats D :

L'utilisation de granulats de dimension maximale contribue de façon très significative à l'augmentation de la résistance du béton. Mais cela reste dans les limites de la faisabilité, parce que le choix de D_{max} reste conditionné par [22] :

- L'ouvrabilité demandée ;
- Les dimensions de l'ouvrage et l'épaisseur des pièces ;
- L'espacement des armatures ;
- L'enrobage des armatures.

2. **La durabilité**

Le choix des proportions d'un béton ne doit pas satisfaire les conditions de maniabilité et de résistance seulement, il doit aussi garantir une durabilité convenable dans le temps. Certes à l'heure actuelle il n'existe aucune approche générale permettant de garantir la durabilité sous n'importe quelles conditions d'exposition à cause de leurs grandes diversités.

En se basant sur des critères de durabilité spécifique nous pouvons tout de même arriver à trouver des solutions convenables et efficaces à des cas d'exposition spécifiques.

Des textes réglementaires existent pour remédier à quelques cas précis d'exposition tel que :

La norme ACI 318 89 (révisée en 1992) [22] qui limite le rapport (E/C) et la résistance en compression minimale.

Tableau 04 : Spécification de la norme ACI 318 89, concernant les bétons exposés à des cycles de gel-dégel [22].

Condition d'exposition	Rapport (E/C)	Résistance en compression minimale (MPa)
Exposé à l'eau lorsqu'une faible perméabilité est nécessaire.	0.5	28
Exposé au gel-dégel en atmosphère humide ou au sel fondants.	0.45	31
Exposé au chlorure provenant des sels fondants où a l'éclaboussement par l'eau de mer ou aux embruns marins avec protection contre la corrosion nécessaire.	0.40	34

Les normes françaises P 18 011 (1992) et P 18 305 (1996) définissent les différents environnements suivant un classement auquel correspond dans chaque cas des limites sur le dosage en liant, le rapport (E/C) et les caractéristiques minimales [22].

III. QUELQUES METHODES DE FORMULATION DE BETON

Entre partisans de la granularité continue et la granularité discontinue les chercheurs formulateurs se sont succédés avec chacun sa théorie et chacun son approche. Chacun essaye de justifier ces raisons, or si pour une granularité continue on favorise des bétons plus plastiques et de bonne ouvrabilité. Une granularité discontinue conduit à des bétons à maximum de gros éléments et à minimum de sable, certes plus résistant mais moins ouvrables. Dilemme éternel auquel est toujours confrontée la formulation du béton [23].

1. Méthode de BOLOMEY

Pour avoir une compacité maximum du mélange sec, BOLOMEY propose une courbe granulométrique de référence, et qui répond à la formule :

$$p = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}}$$

d : Diamètre passoire ;

p : Pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d ;

D : Diamètre du plus gros granulat ;

A : Varie de 8 à 16, sa valeur est d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort.

Le principe est de construire une composition granulaire à partir des classes de granulats disponibles et dont la courbe granulométrique soit la plus proche que possible de la courbe de référence. Cette méthode aboutit généralement à une granularité continue [23].

2. Méthode d'ABRAMS

Le principe de cette méthode est de construire une composition granulaire, ciment compris, basée sur l'obtention d'un module de finesse global, à partir des différents modules de finesse des classes de granulats disponibles.

ABRAMS propose des valeurs optimales du module de finesse globale en fonction du dosage en ciment et qui sont supposées réduire au minimum les vides dans le mélange.

Tableau 05 : Valeurs optimales du Module de finesse d'après ABRAMS [23].

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

3. Méthode de FAURY

La courbe de référence proposée par FAURY favorise une loi de granulation de type continue. Il s'inspira d'une théorie de Caquot relative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen [25].

Loi fonction de $\sqrt[5]{d}$, FAURY adopta une échelle des abscisses graduée en $\sqrt[5]{D}$ pour avoir une courbure linéaire, puis adopta un point de brisure pour distinguer les grains fins et moyens des gros. Ce point aura pour abscisse (D/2) et pour ordonnée la valeur Y qui se calcul par la formule suivante :

$$Y = A + 17\sqrt[5]{D} + B/(R/D - 0.75)$$

B : Varie entre 1 et 2 selon que le béton est ferme ou mou ;

R : Rayon moyen du moule R = surface / périmètre ;

A : valeurs données par le tableau suivant.

Tableau 06 : Valeurs de A [23].

	Sables et graviers roulés usuels	Sables roulés et graviers de broyage usuels	Sables et graviers de broyage usuels
Consistance très fluide, mise en œuvre sans serrage	32 et au – dessus	34 et au – dessus	38 et au – dessus
Consistance fluide pour faible serrage	30 – 32	32 – 34	36 – 38
Consistance molle pour serrage moyen	28 – 30	30 – 32	34 – 36
Consistance ferme pour serrage soigné	26 – 28	28 – 30	32 – 34
Consistance très ferme pour serrage puissant	24 – 26	26 – 28	30 – 32
Consistance de terre humide, serrage très puissant	22 – 24	24 – 26	28 – 30
Serrage exceptionnellement puissant	au-dessous de 22 (à déterminer dans chaque cas)	au-dessous de 24 (à déterminer)	au-dessous de 28 (à déterminer)

4. Méthode de VALETTE

Méthode essentiellement expérimentale, elle nécessite un nombre de calculs préparatoires. Plus connue sous la désignation de « dosage des béton à compacité maximale », « dosage des béton à minimum de sable » ou « dosage des béton à granularité discontinue ».

Son principe est de mesurer le volume de vide d'un sable mouillé, et le comblé par un volume égale de pâte pure de ciment. On ajoute en suite le maximum de gravier mouillé compatible avec l'ouvrabilité désirée [23].

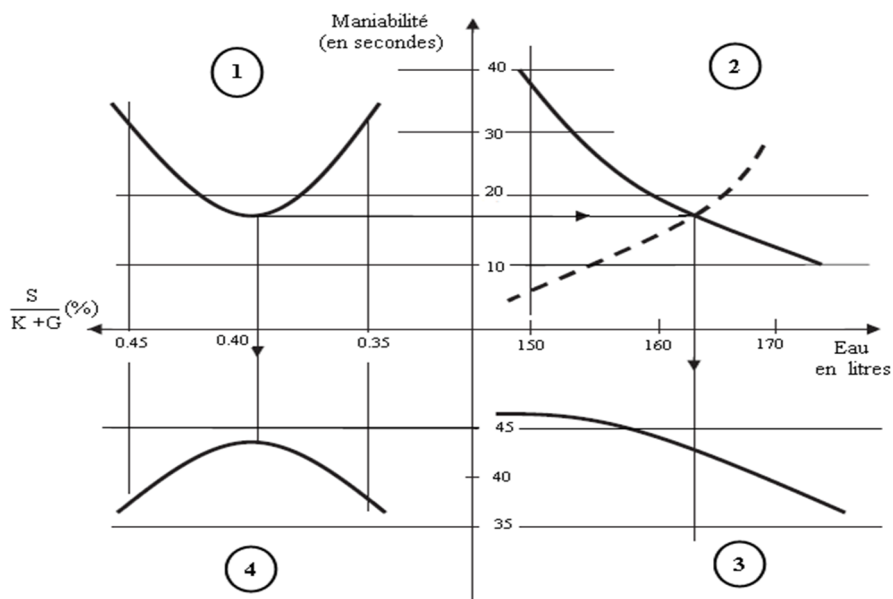
5. Méthode de JOISEL

Inspirée comme celle de FAURY de la théorie de CAQUOT, la méthode JOISEL est plus généralisante. Il considère que la loi de granulation conduisant à la compacité maximale est fonction de $\sqrt[m]{D}$, où « m » dépend de la compacité avec laquelle se serre un granulat de dimensions uniforme suivant les moyens de serrage, « m » peut alors varier de 3 à 10.

En utilisant $\sqrt[m]{D}$ comme graduation des abscisses JOISEL utilisa une courbe de référence de forme linéaire [23].

6. Méthode de BARON et LESAGE

Méthode purement expérimental, fondée sur l'utilisation du maniabilimètre. Son principe est de déterminer en premier lieu par approximations successives l'ensemble des proportions des constituants solide inertes qui correspondent à l'écoulement le plus rapide au maniabilimètre. Puis faire varier le dosage en eau jusqu'à l'obtention de l'écoulement désiré [25], [26].



(E = cte, C = cte, G/K = cte)

①

- Recherche du rapport optimal $\frac{S}{K+G}$;
- Jugement de la sensibilité de la formule aux variations de ce rapport.

②

- Recherche du dosage en eau adapté à un mode de mise en place déterminé ;
- Jugement de la sensibilité de la formule aux variations de ce dosage en eau.

③

- Connaissance du niveau de résistance obtenu et de ses variations quand le dosage en eau varie.

④

- Connaissance éventuelle des variations de résistance dues à des variations du rapport $\frac{S}{K+G}$.

7. Méthode DREUX-GORISSE

Méthode pratique élaborée sur la base d'une synthèse des méthodes existantes. A l'aide de tableaux et d'abaques la détermination des proportions du béton se fait de manière graphique [26].

Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton :

- Détermination du rapport C/E ;
- Détermination de C et E ;
- Détermination du mélange optimal à minimum de vides ;
- Détermination de la compacité du béton ;
- Détermination des masses de granulats.

1) Dosage en ciment et en eau :

Le dosage en eau et ciment dépend de la résistance visée, de la qualité du ciment et des granulats.

Ainsi expérimentalement, on établit une relation entre l'ensemble de ces paramètres.

$$\sigma'_C = G \cdot \sigma' \cdot (C/E - 0.5)$$

Avec:

σ'_C : résistance visée à 28 jours ;

C : dosage du ciment en kg/m^3 de béton ;

E : dosage de l'eau en kg/m^3 de béton ;

σ' : classe vraie du ciment en MPa ;

G : coefficient granulaire. Ce coefficient représente la qualité des granulats (Tableau 07).

Expérimentalement, il est établi que cette qualité dépend du granulat, mais également de son diamètre selon les valeurs suivantes :

Tableau 07 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire G [26].

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	D > 16mm	Moyens 25 < D < 40mm	Gros > 63mm
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonne, courante	0.45	0.50	0.55
Passable	0.35	0.40	0.45

Cette relation permet de déterminer le rapport C/E.

Il est à observer au travers cette relation que le dosage en ciment est d'autant plus important que la résistance visée du béton est forte. Inversement, le dosage en ciment diminue lorsque la résistance du ciment augmente. Pour une résistance visée, Il y a également moins besoin de ciment lorsque la qualité ou la dimension des granulats augmentent.

Le dosage en eau dépend également de l'ouvrabilité désirée. Ainsi en intégrant l'ouvrabilité désirée, expérimentalement, et à partir du rapport C/E, il est possible de déterminer le dosage en ciment par l'abaque « figure 19 » suivant.

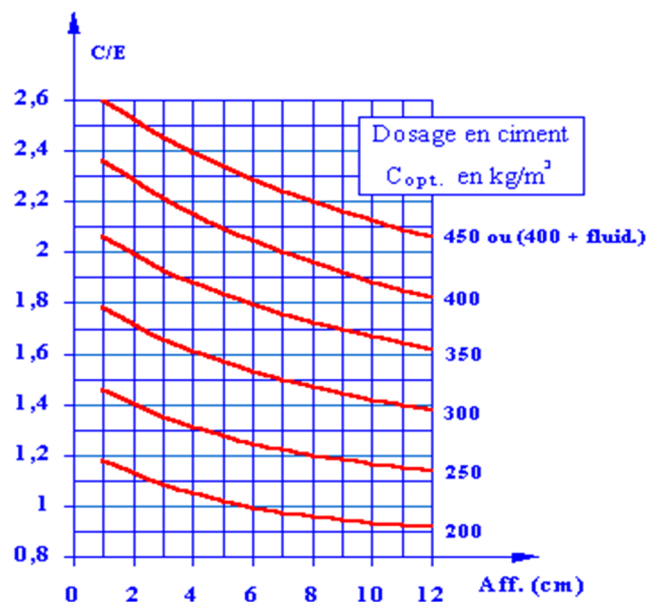


Figure 19 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désiré [26].

La détermination du dosage en ciment s'obtient par cet abaque à double entrée. En abscisse, la valeur de l'affaissement désirée et en ordonnée le rapport C/E. L'intersection des deux entrées, indique la sortie, la courbe donnant le dosage en ciment en kg. Cette intersection des deux entrées peut se faire directement sur une courbe de dosage en ciment, dans le cas contraire la courbe du dosage en ciment est obtenue par extrapolation de celles connues.

De même le dosage en ciment est limité à 400 kg/m^3 de béton en place. Au-delà le ciment et l'eau seraient en trop forte concentration dans le béton. Cela aurait pour effet de produire des fissures de retrait.

Ainsi, pour des rapports C/E et une ouvrabilité à atteindre qui nécessiteraient plus de 400 kg de ciment, le dosage en ciment est limité à 400 kg et l'ouvrabilité désirée est atteinte en ajoutant un fluidifiant au béton.

- La quantité d'eau E nécessaire à la confection du béton se calcule grâce aux valeurs de C/E et de C.

2) Tracé de la droite de référence de Dreux :

La courbe de référence représente la répartition idéale d'un matériau à minimum de vides. C'est une droite brisée dont le point de brisure est défini par son abscisse X et son ordonnée Y:

- En abscisse :

$$\text{Si } D_{\max} \leq 20 \text{ mm} \quad X = D_{\max} / 2$$

$$\text{Si } D_{\max} > 20 \text{ mm} \quad \text{Module (X)} = (\text{Module (} D_{\max} \text{)} + 38) / 2$$

- En ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{D_{\max} \cdot K'} \quad \text{où} \quad K' = K + K_s + K_p$$

Y : est donné en pourcentage de passants cumulés.

K : est un coefficient donné par le tableau 08, K_s et K_p étant des coefficients correctifs définis par :

- K_s (correction supplémentaire fonction de la granularité du sable), $K_s = (6M_f - 15)$ avec M_f le module de finesse du sable ;
- K_p (correction supplémentaire si le béton est pompable), $K_p = +5$ à $+10$ selon le degré de plasticité désiré.

Tableau 08 : K , fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment.

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en Ciment	400 + Fluid	- 2	0	- 4	- 2	- 6	- 4
	400	0	+ 2	- 2	0	- 4	- 2
	350	+ 2	+ 4	0	+ 2	- 2	0
	300	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4	0	+ 2
	250	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4
	200	+ 8	+ 10	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6

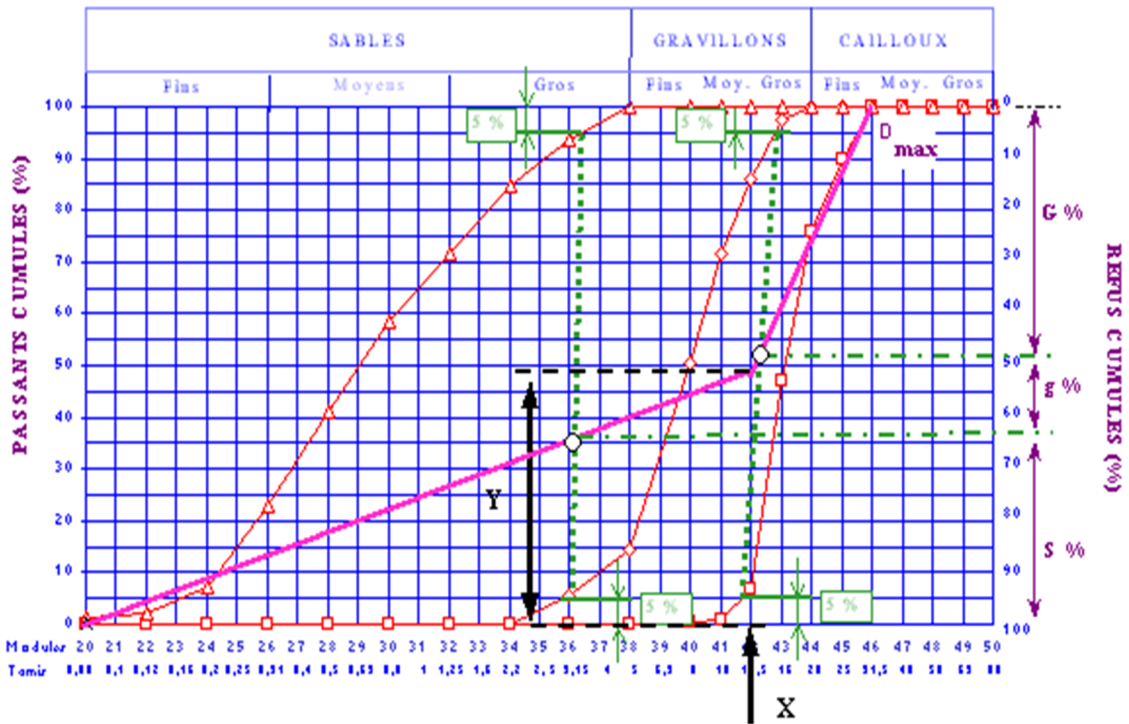
La droite de Dreux a pour origine le point 0 (origine du graphe) et pour extrémité le point D_{max} caractéristique des plus gros granulats.

3) Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux :

Pour déterminer les pourcentages en volumes absolus de granulats permettant la confection d'un mélange à minimum de vide il est nécessaire de tracer comme indiqué sur la figure ci-dessous des droites reliant deux à deux les courbes granulométriques des matériaux du mélange.

Ces droites sont définies par 5 % de refus pour le matériau à faible granularité et par 5 % de passant pour le matériau à forte granularité. L'intersection des droites ainsi tracées avec la droite brisée de Dreux permet, par prolongement sur l'axe des ordonnées, de déterminer les pourcentages en volumes absolus de chaque matériau. Ces pourcentages doivent permettre l'obtention d'un mélange dont la courbe granulométrique est proche de la droite brisée de Dreux. Si la courbe du mélange obtenue est trop éloignée de la courbe de Dreux, un ajustement de ces pourcentages peut s'avérer nécessaire.

ANALYSE GRANULOMETRIQUE



8. Méthode des volumes absolus

La méthode des volumes absolus est une méthode de préformulation adaptée au béton. Elle permet la composition de mélanges dont le volume total est précisé en amont. Ses qualités lui confèrent un caractère à la fois précis et aléatoire, c'est la plus adaptée pour un travail de recherche.

Sachant qu'un mélange de béton est composé habituellement d'eau, ciment, sable et gravier. Cette méthode inclut le volume de l'air emprisonné dans le mélange. Elle permet de varier chaque volume V_x de ces composants sans pour autant changer le volume total V_T .

On a :

$$V_{\text{ciment}} + V_{\text{eau}} + V_{\text{sable}} + V_{\text{gravier}} + V_{\text{vide}} = V_{\text{total}}$$

➤ Si les composants sont exprimés en masse, la relation devient :

$$\frac{M_C}{\rho_C} + \frac{M_E}{\rho_E} + \frac{M_S}{\rho_S} + \frac{M_G}{\rho_G} + V_V = V_T$$

Avec :

$\rho_C, \rho_E, \rho_S, \rho_G$: Masses volumiques absolues.

- L'humidité que peut contenir les granulats peut être prise en compte simplement en la retranchant et la rajouter au volume de l'eau, les masses volumiques absolues des matériaux humides seront remplacées par les masses volumiques absolues sèches.
- Cette opération peut être négligée lorsqu'il s'agit de petites gâchées et dont les composants sont préparés par pesée [22].
- L'ajout d'autres composants supplémentaire est introduit dans l'équation comme c'est le cas des autres composants, le principe est que le volume reste constant.
- Le seul inconvénient que peut altérer la précision de cette méthode réside dans l'évaluation du volume de l'air occlus que va contenir le mélange après compactage. Donc une bonne expérience de l'opérateur et un travail préliminaire sont nécessaires.

IV. PROCESSUS DU CHOIX D'UNE FORMULATION

L'organigramme de la figure 20 nous montre les facteurs de base à prendre en considération lors de tout travail de formulation ainsi que l'ordre de décision relatif à chaque facteur [22].

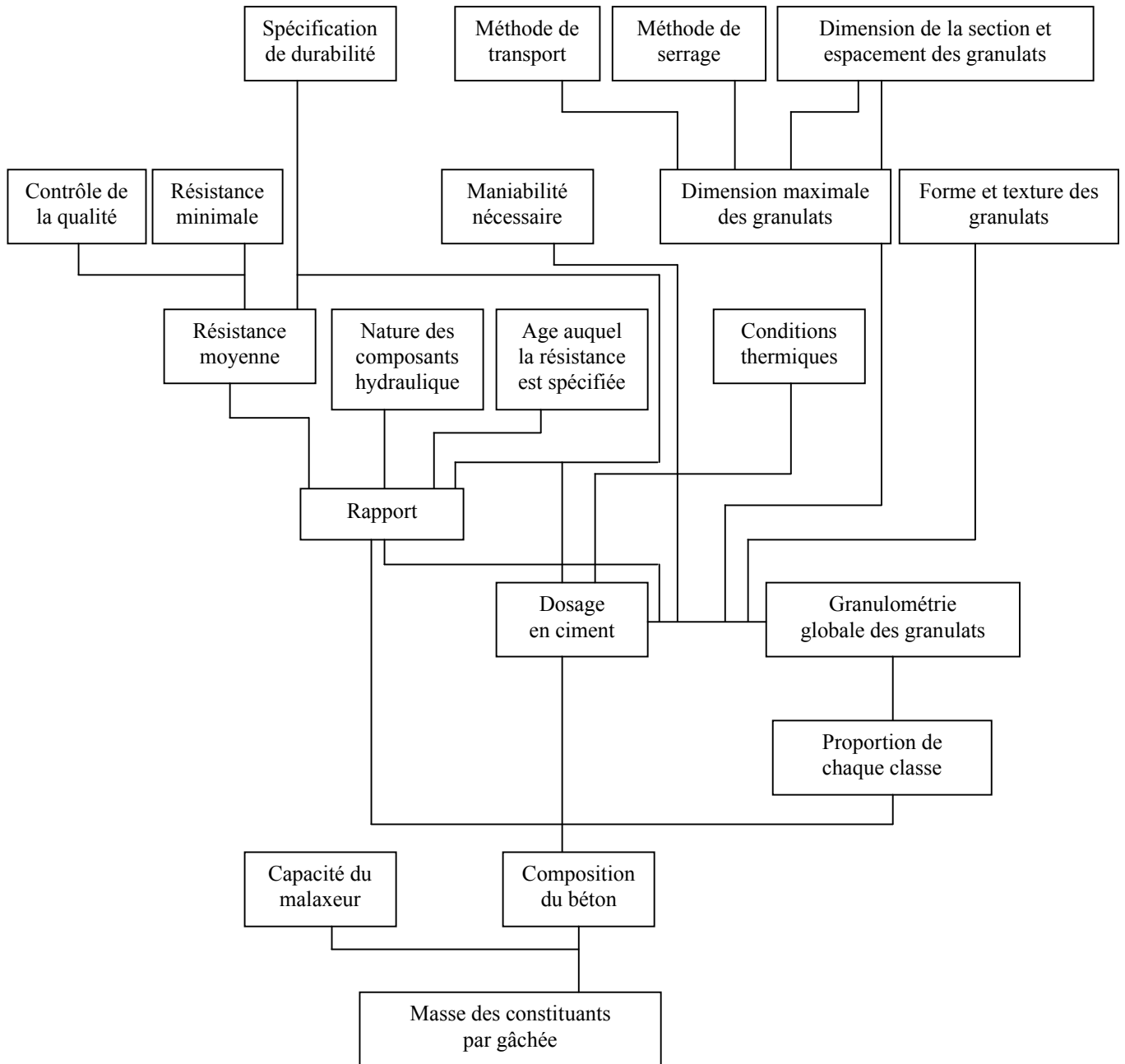


Figure 20 : Facteurs de base à prendre en compte lors du choix de la formulation [22].

V. CONCLUSION

Comme il a été souligné dans la présentation de la recherche, l'objectif de ce travail est de déterminer des modèles prédictifs sur la base de mesures réalisées sur différentes compositions de béton.

Or pour pouvoir circonscrire un domaine d'étude ces compositions de béton doivent présenter un caractère aléatoire vis à vis des caractéristiques ciblées par cette recherche.

La méthode DREUX-GORISSE est la méthode la plus adaptée pour notre travail, elle s'accorde parfaitement avec les objectifs de ce type de recherche.

CHAPITRE III

LES PROPRIETES DU BETON

LES PROPRIETES DU BETON

I. INTRODUCTION

L'augmentation de la résistance à la compression du béton s'accompagne fréquemment de l'amélioration d'autres propriétés, comme la résistance à la traction, la rigidité, la résistance à l'usure, la durabilité, etc. Pour certaines applications, ces propriétés peuvent même être plus essentielles que le niveau de résistance atteint. Dans pareil cas, le choix des composants et de la composition ne doit pas être axé sur l'obtention d'une résistance maximale, mais davantage sur l'obtention d'une prestation optimale des propriétés souhaitées. La résistance supérieure obtenue est – pour ainsi dire – une incidence de second ordre. Dans ce cadre, le contenu de l'expression « béton à haute résistance » s'avère insuffisant. Nous lui préférons dès lors l'appellation « béton à hautes performances », qui est clairement plus générale. Il est parfaitement possible d'obtenir un béton présentant des hautes performances pour une propriété donnée, tout en ne possédant pas une résistance nettement supérieure. Un béton à hautes performances, en raison de son ouvrabilité exceptionnelle et de sa (très probable) amélioration au niveau de la durabilité.

Les principales caractéristiques des bétons sont les propriétés à l'état frais et durci.

II. LES PROPRIETES DU BETON FRAIS

1. Caractéristiques à l'état frais

1) Ouvrabilité :

L'ouvrabilité caractérise l'aptitude d'un béton (frais) à remplir les coffrages, et à enrober convenablement les armatures. Elle représente aussi la consistance du béton frais. Donc le béton doit être maniable et conserver son homogénéité pendant la mise en œuvre.



Figure 21 : Essai d'Affaissement.



Figure 22 : Cône d'Abrams.

a) *Détermination pratique de l'ouvrabilité :*

Il existe de nombreux essais et tests permettant la mesure de l'ouvrabilité. On citera quelques-uns qui sont les plus couramment utilisés dans la pratique.

1. Affaissement au cône d'Abrams :

Cet essai, consiste à mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume tronconique du béton frais. L'essai au cône d'Abrams est simple à réaliser et nécessite un cône et une tige. Le moule tronconique sans fond est de 30 cm de haut, de 20 cm de diamètre en sa partie inférieure et de 10 cm de diamètre en sa partie supérieure ;

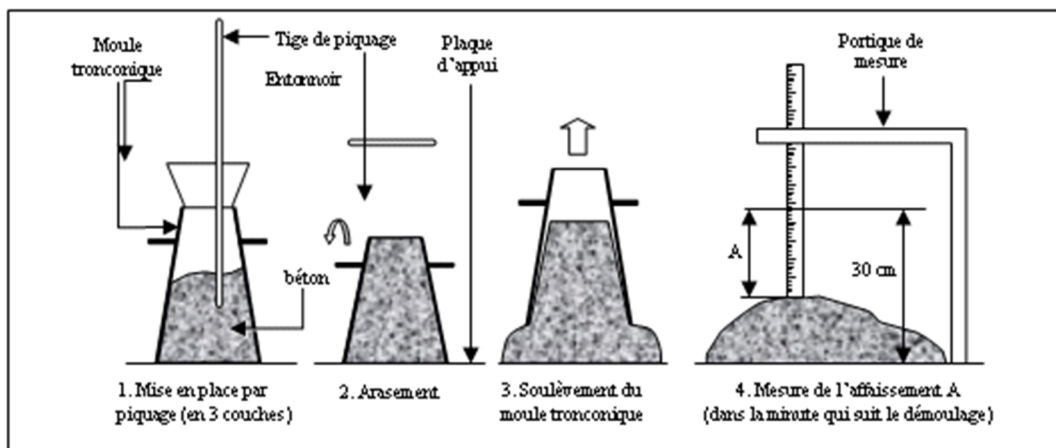


Figure 23 : Mesure de l'Affaissement au cône d'Abrams.

L'essai d'affaissement au cône caractérise bien la consistance d'un béton ce qui permet le classement approximatif indiqué au tableau 09.

Tableau 09 : Appréciation de la consistance en fonction de l'affaissement au cône.

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

2. Maniabilimètre LCPC :

Cet essai a l'avantage de tenir compte de la mise en vibration du béton dans l'appréciation de sa maniabilité. L'appareil comporte une cuve métallique parallélépipédique dont les dimensions inférieures sont : 30 cm de largeur, 30 cm de profondeur et 60 cm de longueur.

Une paroi mobile de section triangulaire sépare la cuve en deux alvéoles distinctes. Après avoir rempli le moule de béton l'alvéole situé du côté du parement incliné de la paroi mobile, cette dernière qui peut coulisser verticalement est soulevée ce qui déclenche simultanément un contact électrique provoquant la mise en marche d'un vibreur (50hertz) fixé sur la paroi avant de l'appareil ; le béton s'écoule dans le second alvéole de la cuve et l'on chronomètre le temps qu'il met pour atteindre un trait repère sur la paroi opposée.

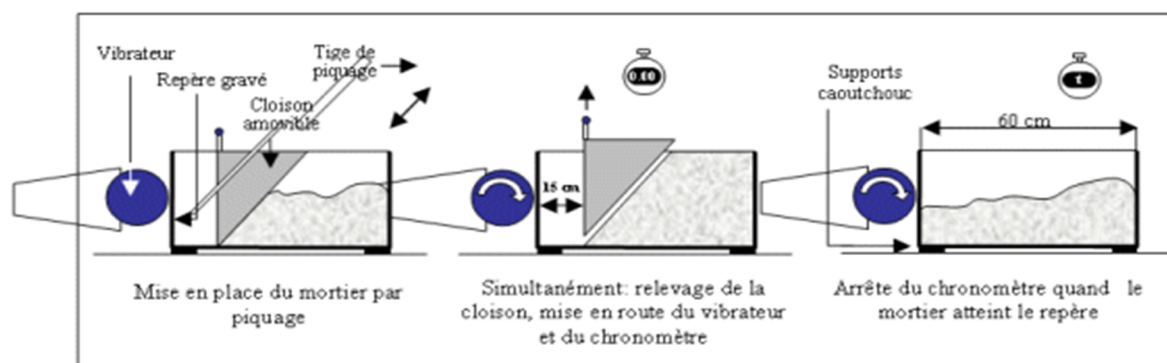


Figure 24 : Principe de fonctionnement du Maniabilimètre LCPC.

Plus le béton est plastique, maniable et de bonne ouvrabilité et plus le temps est court ; on constate en moyenne les valeurs suivantes :

- Pour les bétons mous et très fluides, $t \leq 10$ secondes ;
- Pour les bétons très plastiques, $t \approx 15$ secondes ;
- Pour les bétons de bonne ouvrabilité, $20 \leq t \leq 30$ secondes ;
- Pour les bétons secs, peu maniables et d'ouvrabilité déficiente, $t \geq 40$ secondes.

b) Facteurs influençant sur l'ouvrabilité du béton :

Dans le cas de bétons classiques, l'ouvrabilité est principalement influencée par :

- Le dosage en eau (E/C) ;
- La nature et le dosage du liant (ciment) ;
- La forme des granulats, la granulométrie.

1. Rôle de l'eau (E/C) :

Le rôle de l'eau ou le rapport eau/ciment (E/C), est le facteur le plus prépondérant pour l'ouvrabilité du béton frais et sur les propriétés du béton durci :

- L'eau donne au béton sa maniabilité : Son action lubrifiante sur les différents granulats La cohésion entre granulats par la pâte ;

- L'eau permet l'hydratation du ciment et donc le durcissement du béton ; un ciment portland demande environ 25% des on poids en eau pour s'hydrater complètement.

Donc toute variation du rapport E/C entraîne des modifications des propriétés du béton à l'état frais et durci. Les conséquences d'un excès d'eau sont généralement :

- Risque de ressuage ;
- Augmentation de la porosité risque de ségrégation des constituants du béton ;
- Diminution de la compacité du béton ;
- Diminution des performances mécaniques du béton ;
- Augmentation du retrait.

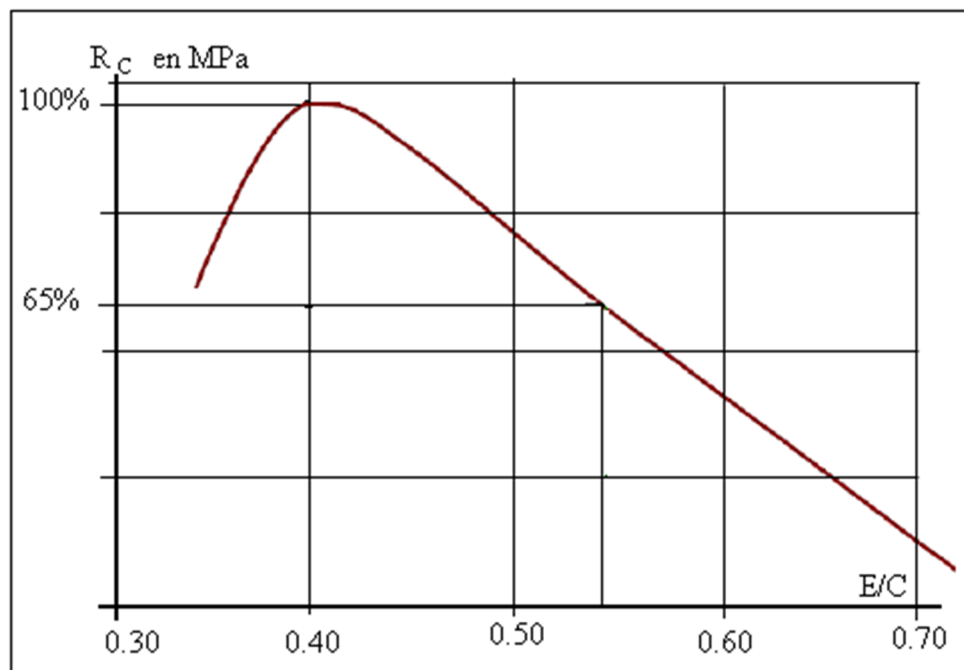


Figure 25 : Résistance à la compression R_c du béton en fonction du rapport eau/ciment (E/C).

2) Résistance du béton frais :

La résistance du béton frais est faible, mais elle intéresse plus particulièrement les fabricants pour le démoulage immédiat (avant prise du ciment) d'éléments de grande série.

- Le rapport optimal E/C est voisin de 0,40 (béton plutôt sec) ;
- Le pourcentage optimal S/G est d'environ 0,38 (soit : $G/S = 2,6$ valeur élevée) ;
- Les granulats concassés donnent des résistances plus élevées que les granulats roulés.

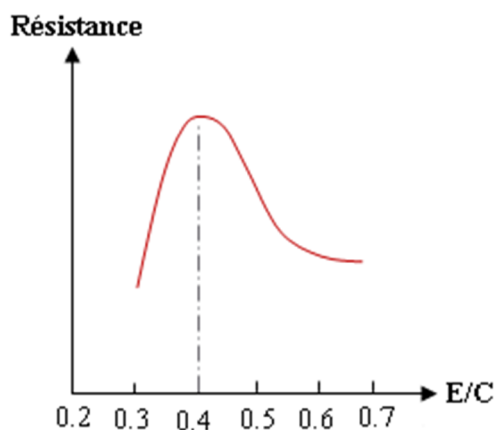


Figure 26 : Résistance du béton frais.

2. Autres caractéristiques du béton à l'état frais

1) Air occlus ; (ne doit pas dépassé les 3%) :

La détermination de la teneur en air occlus du béton se fait à l'aide de l'aéromètre à béton. La teneur en air occlus (bulles d'air) est directement indiquée sur le cardon du nanomètre [27].

On peut aussi mesurer la teneur en air occlus par la méthode gravimétrique. La méthode gravimétrique utilise le même équipement que celui employé pour la détermination de la masse volumique du béton. La masse volumique mesurée est soustraite de la masse volumique théorique telle que déterminée à partir des volumes absolus des ingrédients, si l'on suppose l'absence d'air.

La différence, exprimée en pourcentage de la masse volumique théorique, est la mesure de la teneur en air. Le dosage du mélange et les masses volumiques des ingrédients doivent être connus avec précision sinon les résultats peuvent être erronés [28].



Figure 27 : L'aéromètre.

- Aéromètre à colonne d'eau 5L ;
- Lecture de 0 à 8% d'air occlus ;
- Livré avec pompe manuelle de dimensions : 250 x 700 mm.

2) La densité réelle du béton frais :

L'essai est assez simple et nécessite peu de moyens. Il suffit de remplir un moule de volume connu « V » (dans les mêmes conditions que celle du chantier) et le peser, soit une masse « M » la masse volumique se déduira alors de :

$$M_V = \frac{M}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$M = M_1 - M_0$$






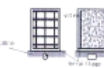


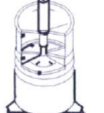
M_1 : est la masse du moule plein de béton (arasé à l'aide d'une règle) ;

M_0 : est la masse du moule vide ;

V : le volume du moule.

La masse volumique du béton courant dépend évidemment de la composition et des constituants, et en général, elle varie dans les limites suivantes « 2200 – 2400 » kg/m³.

Tableau 10 : Les autres essais-comparatifs.

<i>Essais</i>	<i>Principe</i>	<i>Paramètre Mesuré</i>	<i>Schéma</i>	<i>Plages recommandées de mesures</i>	<i>Commentaires</i>
Essai d'affaissement	Moulage d'un tronc de cône de dimensions normalisés et mesure après démoulage de son affaissement.	Affaissement « S »		$20 \leq S \leq 160 \text{ mm}$	<ul style="list-style-type: none"> mal adapté aux bétons fermes ou fluides. $D_{\max} < 40 \text{ mm}$. répétabilité juste Suffisante.
Essai d'étalement	Démoulage d'un cône sur une table à chocs manuels et mesure de l'étalement.	Diamètre d'étalement « F »		$340 \leq F \leq 360 \text{ mm}$	<ul style="list-style-type: none"> mal adapté aux bétons fermes ou très fluides. $D_{\max} < 40 \text{ mm}$. répétabilité juste Suffisante.
Degré de compactabilité	Evaluation du degré de compactabilité exprimé par le rapport entre un volume de béton avant et après compactage.	Taux « C » $C = \frac{h_1}{h_1 - S}$ $h_1 = 400 \text{ mm}$		$C \geq 1.11$	<ul style="list-style-type: none"> mal adapté aux bétons fluides. $D_{\max} < 40 \text{ mm}$.
Essai Vébé	Mesure du temps mis par un cône de béton frais pour se remouler dans un moule cylindrique sous l'action d'une vibration	durée « t »		$5 \text{ s} \leq t \leq 30 \text{ s}$	<ul style="list-style-type: none"> mal adapté aux bétons fluides. $D_{\max} < 40 \text{ mm}$.
Essai d'écoulement (maniabilimètre)	Mesure du temps d'écoulement sous vibration.	durée « t »		$4 \text{ s} \leq t \leq 100 \text{ s}$	<ul style="list-style-type: none"> non adapté aux bétons fluides. $D_{\max} < 40 \text{ mm}$. bonne répétabilité.
Test C.E.S	Remplissage de béton dans un moule muni d'un quadrillage d'armatures distant d'une plaque transparente. Mesure du nombre de chocs nécessaires à recouvrir la vitre.	choc « N »			<ul style="list-style-type: none"> peu utilisé sauf au Centre d'Essais des Structures (CSTB)
Wattmètre	Appréciation de la consistance par enregistrement de la puissance absorbée du malaxeur.	puissance « Watt »			<ul style="list-style-type: none"> sur certaines installations industrielles.
Plasticimètre à rotations	Evaluation de la résistance au cisaillement d'un béton par la mesure d'un couple.	Viscosité			<ul style="list-style-type: none"> peu utilisé car très mauvaise répétabilité.
BT Rhéom	Cisaillement d'un échantillon de béton pour diverses vitesses de rotation, sous l'action d'une vibration ou non. Contrôle de l'essai et exploitation des mesures via une centrale d'acquisition.	seuil de cisaillement et viscosité			<ul style="list-style-type: none"> bien adapté aux bétons fluides $D_{\max} < 25 \text{ mm}$ essai d'avenir ...

III. LES PROPRIETES DU BETON A L'ETAT DURCI

1. Résistance mécanique

La résistance mécanique est une caractéristique principale des bétons, car il est connu que le béton doit avoir des performances mécaniques pour être utilisé en construction des ouvrages. Les propriétés mécaniques permettant de caractériser un béton à l'état durci sont les résistances à la compression, à la traction, et à la flexion. Généralement, la résistance caractéristique des bétons est celle de la compression.

a. Résistance caractéristique à la compression :

La résistance à la compression est déterminée à l'aide de l'essai de compression. (elle est notées ou vent par $f_{c 28}$ ou $R_{c 28}$)

1) Essai en compression :

L'essai de compression est l'essai le plus connu des essais mécaniques. Il s'effectue sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 16cm et de hauteur 32cm. La résistance à la rupture par compression est mesurée par compression axiale des éprouvettes voir « figure 28 ». La résistance à la compression correspond à la contrainte maximale calculée par la formule suivante:

$$f_{c 28} = \frac{P}{S} \text{ en (KN/cm}^2\text{ ou MPa)}$$

Où :

P: La charge appliquée ;

S: La surface de la section de l'éprouvette.

2) Essai en traction :

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



Figure 28 : Essai de compression axiale.

a. Essai de traction par flexion :

Cet essai est réalisé sur des éprouvettes prismatiques (7 x 7 x 28) cm. Voir « figure 29 ». La résistance à la traction (par flexion) correspond à la contrainte maximale calculée par la formule suivante :

$$f_t = 1.8 \left(\frac{P}{a^2} \right) \text{ en (KN/cm}^2 \text{ ou MPa)}$$

Où :

P : La charge appliquée (P = F) ;

a : Le coté de l'éprouvette prismatique (d = a).

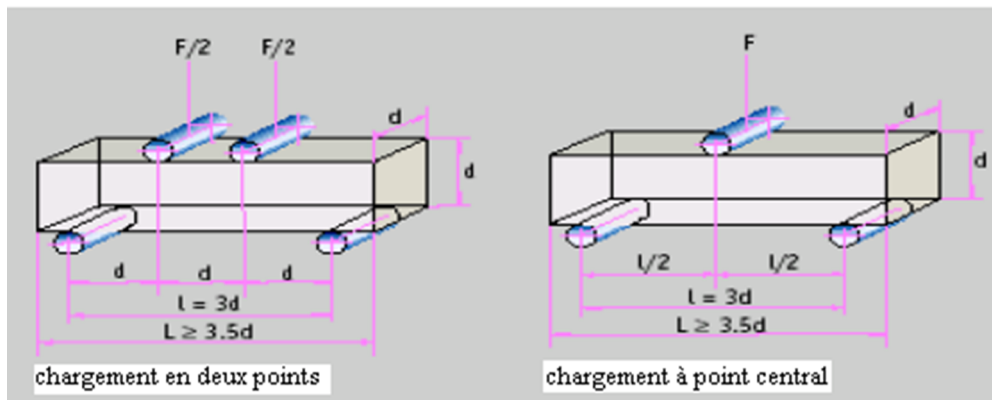


Figure 29 : Essais de traction par flexion.

b. Essai de traction par fendage :

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

$$f_{tj} = 2 \cdot \frac{P}{\pi \cdot D \cdot L} \text{ en (KN/cm}^2 \text{ ou MPa)}$$

Où :

j : âge du béton « en jour » au moment de l'essai ;

D et L : diamètre et longueur du cylindre.

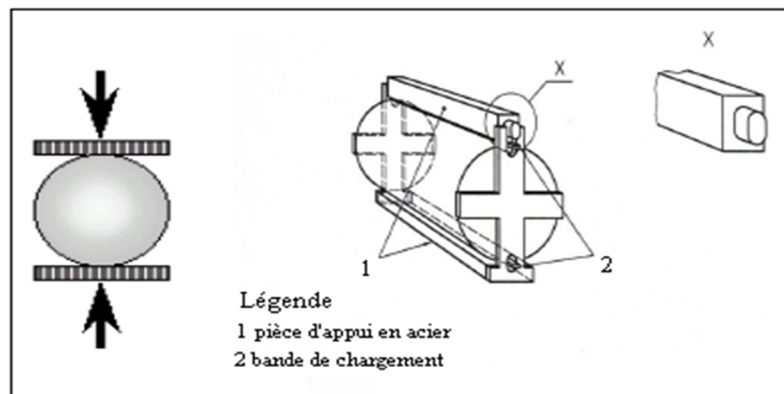


Figure 30 : Essais de traction par fendage.

2. Module d'élasticité et coefficient de poisson

Le module d'élasticité statique en compression est déterminé graphiquement, en exploitant la courbe contrainte-déformation.

Le module d'élasticité statique E « $E_{S T}$ » est la valeur de la pente à l'origine de cette courbe.

Il s'exprime par la relation suivante :

$$E_{S T} = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Où :

σ : La contrainte en MPa ;

ε : La déformation.

Le coefficient de poisson, qui exprime le rapport de la déformation transversale à la déformation longitudinale est donné par l'expression suivante :

$$\nu = \frac{\varepsilon_t \text{ (transversal)}}{\varepsilon_l \text{ (longitudinale)}}$$

3. Courbe contrainte-déformation

Le module d'élasticité statique est déterminé graphiquement, en exploitant la courbe suivante contrainte-déformation. Le module d'élasticité statique noté par E , est la valeur de la pente à l'origine de cette courbe.

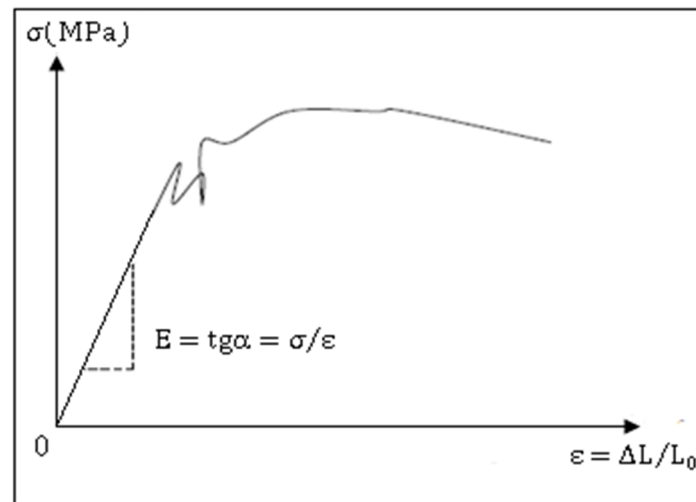


Figure 31 : Courbe contrainte-déformation.

IV. MICROSTRUCTURE DES PÂTES DE CIMENT DURCIES

La connaissance de la structure des matériaux cimentaires est essentielle pour comprendre le comportement et les propriétés physiques ou mécaniques des pâtes de ciment durcies. Nous aborderons ici la structure des hydrates, la répartition de la porosité et les différents états de l'eau dans cette structure.

1. Morphologie des principaux hydrates

La phase solide d'une pâte de ciment durcie (PCD) est constituée de grains de ciment plus ou moins hydratés. La texture du matériau est extrêmement fine et divisée en raison de la nature colloïdale des composés C-S-H, mais comporte également des éléments plus grossiers tels que les cristaux de portlandite ou d'ettringite.

a. Les silicates de calcium hydratés C-S-H :

La phase C-S-H (ou gel de C-S-H) est l'hydrate principal du ciment Portland, responsable de la structuration de la pâte de ciment durcie. Cette dénomination générale regroupe plusieurs variétés de silicates de composition $(\text{CaO})_x(\text{SiO}_2)_y(\text{H}_2\text{O})_z$ où les valeurs de x et y dépendent de la teneur en calcium et en silicium dans la phase aqueuse. La phase C-S-H est caractérisée par le rapport molaire entre la quantité de calcium et de silicium (rapport C/S), qui est généralement compris entre 1.5 et 1.9 dans les pâtes de ciment. Les C-S-H présentent une grande surface spécifique (caractéristique des gels colloïdaux) et une porosité d'environ 28%. La morphologie du gel serait peu influencée par le type de ciment utilisé ou par le rapport E/C.

1) *La portlandite* :

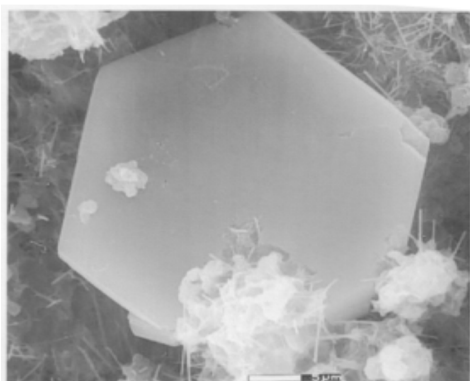
La portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ est la seule phase solide présente sous forme relativement pure dans la pâte de ciment durcie, et ne comporte en général que de petites quantités d'ions étrangers. Elle cristallise sous forme de plaquettes hexagonales qui peuvent être massives « figure 32 (a) », et se retrouve dans l'espace situé entre les grains de ciment partiellement hydratés. En raison de la grande taille de ses cristaux, la portlandite présente une faible surface spécifique.

La portlandite peut également se développer sous une forme amorphe lorsque l'espace entre grains de ciment est trop réduit pour permettre la cristallisation.

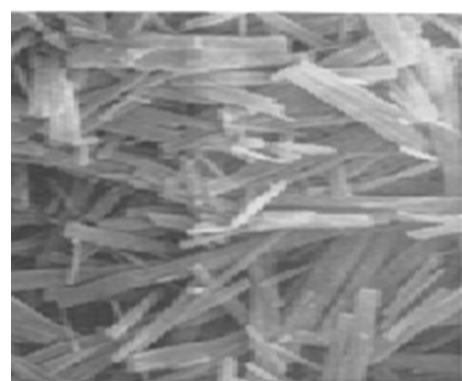
2) *L'ettringite* :

L'ettringite cristallise sous forme d'aiguilles à base hexagonale « figure 32 (b) » rayonnant autour des grains de ciment anhydre. La forme et la taille de l'ettringite dépendent directement de la nature des ions de la phase interstitielle, de la concentration en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et de la température.

Dans certains cas, la formation d'ettringite peut s'accompagner de gonflement. Plusieurs explications peuvent être à l'origine de ce phénomène: expansion par croissance cristalline, gonflement lié à l'absorption d'eau par les particules d'ettringite, gonflement lié à la pression de cristallisation de l'ettringite, expansion par pression osmotique sur une membrane semi-perméable entre la phase interstitielle et la surface des grains anhydres, gonflement par formation de monosulfoaluminate de calcium hydraté.



(a)



(b)

Figure 32 : Observation en microscopie électronique à balayage (a) d'une plaquette hexagonale de portlandite et (b) d'ettringite aciculaire (sous forme d'aiguilles).

V. CONCLUSION

Les facteurs à prendre en compte dans l'étude de composition d'un béton sont nombreux, les méthodes actuellement connues ainsi que celles que nous avons proposées au chapitre précédent, permettent une optimisation approximative. Mais ce n'est qu'en pratique, par des essais d'études en laboratoire, que la formulation d'un béton renforcé de fibres métalliques peut être finalisée. L'ouvrabilité est une qualité essentielle du béton, elle peut se définir comme la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage du ferrailage. Les résistances mécaniques (compression et traction) occupent un espace considérable dans l'étude des propriétés du béton à l'état durci, et à la fin nous avons évoqué la microstructure de la matrice cimentaire durcie.

Partie expérimentale

PARTIE EXPERIMENTALE

- **Introduction.**
- **Chapitre 1.**
- **Chapitre 2.**
- **Chapitre 3.**

INTRODUCTION

Le concept de l'utilisation des fibres pour améliorer le comportement des matériaux de construction est vieux et intuitif (pisé ou torchis pour améliorer la résistance). La nouveauté est dans l'introduction de sous produits industriels comme renfort dans une matrice cimentaire pour améliorer ses caractéristiques mécaniques [29].

Comme pour tous les bétons, la formulation doit être définie avec le plus grand soin et les grandeurs caractéristiques sont classiques et bien connues :

- la granularité ou le fuseau granulaire du squelette ;
- les dosages en sable, gravier, ciment, eau ;
- et la présence d'adjuvants (plastifiant ou fluidifiant et leur dosage).

La caractérisation des bétons renforcés de fibres métalliques (BFM), à l'état durci, nécessite de définir les corps d'épreuve sur lesquels seront mesurées les grandeurs spécifiques du matériau et les techniques d'essai.

Cela soulève, actuellement, certaines questions à propos :

- du type du corps d'épreuve (éprouvettes classiques) ;
- de la géométrie des corps d'épreuve (épaisseur, élancement) ;
- du type de chargement (réparti, ponctuel) et sa vitesse ;
- du mode d'asservissement.

Il faut absolument caractériser les matériaux BFM, quasi indépendamment de la structure :

- d'une part pour effectuer un choix de matériaux et de dosages en renfort proposés même si les grandeurs mesurées sont difficilement exploitables à l'état actuel ;
- d'autre part, pour contrôler les matériaux mis en œuvre. En effet, il faut définir les critères de jugement permettant d'accepter ou de refuser un matériau.

La caractérisation des matériaux s'est faite sur quatre types de béton :

- BT : béton sans fibres et sans poudre de marbre (témoin) ;
- BF : béton renforcé de fibres métalliques à crochets ;
- BM : béton avec poudre de marbre ;
- BMF : béton renforcé de fibres métalliques à crochets avec poudre de marbre.

Cette étude permet la comparaison des résultats obtenus après la réalisation d'essais sur béton frais et sur béton durci. Les différents essais faits sont :

➤ Sur béton frais :

- air occlus ;
- masse volumique ;

- affaissement au cône d'Abrams.
 - Sur béton durci :
- essai de compression sur éprouvettes cylindriques 11x22 cm ;
- essai de traction par flexion sur éprouvettes prismatiques 10x10x40 cm ;
- essai de traction par fendage 11x 22 cm ;
- masse volumique ;
- absorption d'eau totale ;
- essai de retrait.

CHAPITRE I

ETUDE ET CONTROLE DES CONSTITUANTS

ETUDE ET CONTRÔLE DES CONSTITUANTS

I. INTRODUCTION

Le béton est constitué par un mélange intime de matériaux inertes, appelés « granulats » (sables, graviers etc....) avec du ciment et de l'eau, grâce à l'action du ciment le mélange ainsi obtenu, appelé « béton frais » commence à durcir après quelques heures et acquiert progressivement ses caractères de résistance.

Nous avons procédé en premier à des essais de caractérisation en laboratoire de CETIM de Boumerdès et à une collecte d'informations à partir de la documentation disponible en second, et ce, pour pouvoir réunir toutes les données et les classer dans un tableau récapitulatif.

Sachant que les principaux matériaux utilisés dans cette région sont le sable siliceux de la région de Boussaâda et sable de Baghliâ, les graviers des classes (3/8, 8/15) de la carrière de concassage de Béni-Mansoeur de la wilaya de Sétif, et les ciments de Chlef.

II. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX DE BASE

1. Ciment

Le type de ciment utilisé dans notre travail de recherche, suivant la norme NF EN 197-1 [1] est un ciment CEM II 42.5 de la cimenterie de Chlef, contenant deux ajouts (05% de calcaire et 07% de pouzzolane). Les essais physiques, mécaniques, et chimiques ont été réalisés au niveau de Centre d'Etudes Techniques Intégrés en Matériaux de construction « CETIM », les résultats de ces essais sont donnés dans les tableaux 11, 12, 13 et 14.

1) Composition chimique et minéralogique du ciment :

Tableau 11 : Analyse chimique du ciment.

Composition chimique	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	CaO _L	SO ₃	chlorures	P.F
Teneur %	60.1	21	4.32	3.76	2.11	0.56	0.34	2.27	2.1	0.022	3.42

des essais de résistances mécaniques norme NF EN 196-1 [6], ont été réalisés, les résultats de ces différents essais sont portés sur le tableau 13 et 14.

Tableau 13 : Essais physiques sur ciment NF EN 196-3 [31], NF EN 196-6 [30].

Consistance normalisée H ₂ O	Temps de prise		Masse volumique absolue	Surface spécifique de Blaine
	Début	fin		
26.2%	2h55mn	4h15mn	3.11g/cm ³	3803cm ² /g

Tableau 14 : Essais mécaniques sur ciment NF EN 196-1 [6].

Echéances en jours	Résistances à la Compression en (MPa)
02 jours	20.27
07 jours	38.69
28 jours	49.78

2. Sable et graviers

a. Le sable :

Deux sables ont été utilisés, à savoir, le sable de Boussaâda et celui de Baghlia.

1) Les caractéristiques du sable :

Tableau 15 : Caractéristiques du sable.

CARACTERISTIQUES	Sable de Baghlia	Sable de Boussaâda
Masse volumique (kg/m ³)	1580	1440
Masse spécifique (g/cm ³)	2.650	2.649
A _b (%)	0.660	0.430
ESV (%)	78.08	67.14
ESP (%)	71.63	61.49

2) Analyse granulométrique du sable de Baghlia : prise d'essai 1200g

Tableau 16 : Analyse granulométrique du sable de Baghlia NF P18-560 [32].

OUVERTURE DES TAMIS (mm)	Masse des Refus cumulés	Pourcentage Refus cumulés (%)	Pourcentage Tamisât cumulés (%)	M _f
5	4.67	0.4	99.6	3.40
3.15	87.6	7.5	92.5	
2.5	116.8	10	90	
1.25	548.96	47	53	
0.63	992.8	85	15	
0.315	1146	98.1	1.9	
0.16	1161	99.4	1.0	
0.08	1166	99.8	0.2	
Fond de tamis	1168	100	0.0	

Observation :

On remarque que le sable de Baghlia a un module de finesse élevé « 3.40 », donc, une correction est nécessaire.

3) Analyse granulométrique du sable de Boussaâda : prise d'essai 1200g

Tableau 17 : Analyse granulométrique du sable de Boussaâda « NF P18-560 ».

OUVERTURE DES TAMIS (mm)	Masse des Refus cumulés	Pourcentage Refus cumulés (%)	Pourcentage Tamisât cumulés (%)	M _f
5	0.0	0.0	100	0.76
2.5	0.0	0.0	100	
1.25	2.0	0.17	99.83	
0.63	7.0	0.60	99.4	
0.315	110	9.50	90.5	
0.16	756.2	65.3	34.7	
0.08	1143	98.7	1.3	
Fond de tamis	1158	100	0.0	

Soit

$M_{f1} = 3.40$, module de finesse du sable de Baghlia ;

$M_{f2} = 0.76$, module de finesse du sable de Boussaâda ;

$M_f = 2.53$, le module de finesse souhaité du mélange selon la méthode d'Abrams.

On trouve les fractions suivantes :

$$S_1 = \frac{M_f - M_{f2}}{M_{f1} - M_{f2}} \quad S_2 = \frac{M_{f1} - M_f}{M_{f1} - M_{f2}}$$

- Sable de Baghlia = 67% ;
- Sable de Boussaâda = 33%.

La vérification et l'analyse granulométrique par tamisage de sable corrigé (sable de Baghlia + sable de Boussaâda) :

Tableau 18 : Analyse granulométrique du sable corrigé : prise d'essai 1200g.

OUVERTURE DES TAMIS (mm)	Masse des Refus cumulés	Pourcentage Refus cumulés (%)	Pourcentage Tamisât cumulés (%)	M_f
5	3.99	0.37	99.63	2.53
2.5	54.65	5.07	94.93	
1.25	85.16	7.9	92.1	
0.63	679.14	63	37	
0.315	909.51	84.37	15.63	
0.16	994.9	92.29	7.71	
0.08	1025.82	95.16	4.84	
Fond de tamis	1078	100	0.0	

NB :

D'après les résultats obtenus sur le sable, on peut dire qu'il répond aux exigences de la norme pour qu'il soit utilisé dans les bétons.

a) **Essais de masse volumique réelle, imbibée et du coefficient d'absorption du sable NF P18-555 [34]**

Conformément à la norme NF P18-555 [34] des essais physiques, de masse volumique réelle et imbibée ainsi que du coefficient d'absorption, ont été effectués sur un échantillon de masse M comprise entre 500 et 1000g. L'échantillon séché à l'étuve à $105\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ jusqu'à une masse M_s , est immergé dans l'eau pendant 24 heures en suite il est séché jusqu'à l'état imbibé surface sèche, soit M_a sa masse. Immédiatement après la pesée, l'échantillon imbibé est introduit dans le pycnomètre, qui est ensuite rempli d'eau et pesé soit M'_1 la masse de l'ensemble, M'_2 la masse du pycnomètre rempli d'eau. La masse dans l'eau de l'échantillon imbibé est : $M'_a = M'_1 - M'_2$.

- Masse volumique réelle $\rho_r = M_s / (M_a - M'_a)$ [t/m^3];
- Masse volumique imbibée $\rho_{ri} = M_a / (M_a - M'_a)$ [t/m^3];
- Coefficient d'absorption $A_b = 100 (M_a - M_s) / M_s$ [%].

Les résultats des essais physiques sont portés sur le tableau 19.

Tableau 19 : Les résultats des essais physiques.

Echantillon	Masse volumique réelle ρ_r (t/m^3)	Masse volumique imbibée ρ_{ri} (t/m^3)	Coefficient d'absorption A_b (%)
Sable de Boussaâda	2.56	2.57	0.43
Sable de Baghlia	2.58	2.60	0.66

b) **Propreté des sables**

L'essai qui permet de déterminer la propreté des sables, porte le nom d'équivalent de sable (ES).

1. **Equipement pour équivalent de sable**

- Eprouvettes en plastiques portant deux repères (un repère inférieur et un repère supérieur);
- Récipients pour mesure de l'échantillon à tester;
- Tamis de 2 mm ($0 < W < 2\%$) où tamis de 4 mm ($2\% < W < 8\%$) d'ouverture;
- Récipient de 10 litres pour contenir la solution lavante, muni d'un tuyau et pipettes de lavage;
- Bouchon en caoutchouc;
- Règle métallique graduée;
- Petit maillet en matière plastique souple pour éliminer les bulles d'air;
- Entonnoir;

- Agitateur électrique ;
- Piston muni d'un contre poids.

2. Mode opératoire

- On remplit l'éprouvette de solution lavante jusqu'au trait inférieur ;
- A l'aide du récipient de mesure, on introduit le prélèvement dans l'éprouvette par l'intermédiaire de l'entonnoir, on laisse pendant dix minutes, la solution lavante agir ;
- Ensuite on agite l'éprouvette à l'aide de l'agitateur électrique à raison de 90 cycles, après avoir fermé avec le bouchon en caoutchouc ;
- Laver le sable et le bouchon avec précaution jusqu'à atteindre le trait supérieur ;
- Laisser reposer pendant 20 mn ;
- Mesure à vue la hauteur h_1 (sable + flocculat), h_2 (hauteur du sable propre).

Cadence des essais : au nombre de 3.

- h_1 hauteur totale y compris le flocculat ;
- h_2' du niveau supérieur de la partie sédimentée par rapport au fond de l'éprouvette ;
- h_2 hauteur du dépôt de sable visible.

✚ Au piston $ES = 100 h_2'/h_1$

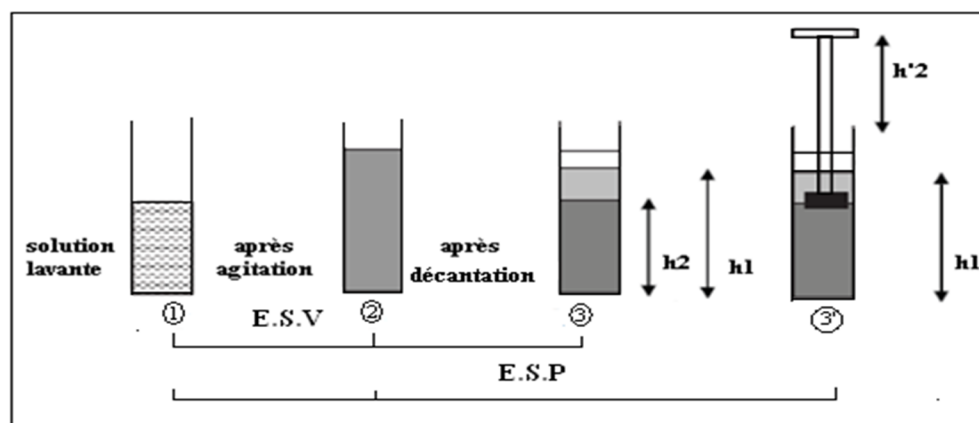
✚ Visuel $ES = 100 h_2/h_1$

Tableau 20 : Résultats des équivalents de sable Baghlia.

ES à vue			ES piston		
h_1 en cm	h_2 en cm	ES %	h_1 en cm	h_2' en cm	ES %
11.70	9.00	76.92	11.70	8.60	73.50
12.00	9.50	79.17	12.00	8.90	74.17
11.90	9.30	78.15	11.90	8.00	67.23
ES moyen à vue		78.08%	ES moyen piston		71.63%

Tableau 21 : Résultats des équivalents de sable Boussâada.

ES à vue			ES piston		
h_1 en cm	h_2 en cm	ES %	h_1 en cm	h_2' en cm	ES %
11.00	7.50	68.18	11.00	6.50	59.09
12.50	8.00	64.00	12.50	7.50	60.00
13.00	9.00	69.23	13.00	8.50	65.38
ES moyen à vue		67.14%	ES moyen piston		61.49%



3. Spécifications

- Equivalent de sable Baghlia :

* à vue ES = 78.08 %.

* au piston ES = 71.63 %. (Sable propre convenant bien pour des bétons de qualité).

- Equivalent de sable Boussâada :

* à vue ES = 67.14 %.

* au piston ES = 61.49%. (Sable propre convenant bien pour des bétons de qualité)

b. Graviers :

Pour la confection de nos éprouvettes en béton deux fractions de graviers de la carrière de concassage de Béni-Mansoeur de la wilaya de Sétif ont été choisies les fractions 3/8 et la fraction 8/15.

1) Les caractéristiques des graviers :

Tableau 22 : Caractéristiques des graviers.

CARACTERISTIQUES	Graviers 3/8	Graviers 8/15
Masse volumique (kg/m ³)	1360	1360
Masse spécifique (g/cm ³)	2.700	2.700
Absorption (%)	1.310	0.180
Porosité (%)	3.46	0.48

2) Analyse granulométrique du gravier :

Conformément à la norme NF P18-560 [32] une analyse granulométrique était effectuée. Les résultats des essais sont portés sur les tableaux 23 et 24.

Tableau 23 : Analyse granulométrique du gravier de fraction 3/8 NF P18-560 [32].

OUVERTURE DES TAMIS (mm)	Masse des refus cumulés	Pourcentage Refus cumulés (%)	Pourcentage Tamisât cumulés (%)
12.50	0	0	100
10.00	9	0.45	99.55
8.000	24	1.21	98.79
6.300	164	8.27	91.73
5.000	1211	61.04	38.96
4.000	1297	65.35	34.63
3.150	1619	81.6	18.40
2.500	1736	87.5	12.50
Fond de tamis	1907	96.12	3.88

Prise d'essai : 2000g

Tableau 24 : Analyse granulométrique du gravier de fraction 8/15 suivant la norme NF P18-560 [32].

OUVERTURE DES TAMIS (mm)	Masse des refus cumulés	Pourcentage Refus cumulés (%)	Pourcentage Tamisât cumulés (%)
16.00	0	0	100
12.50	936	31.26	68.74
10	1856	61.99	38.01
8	2540	84.84	15.16
6.3	2805	93.69	6.310
Fond de tamis	2983	99.63	0.370

Prise d'essai : 3000g

a) *Essais Los Angeles : NF P 18 - 573*

Le but de cet essai est de mesurer la résistance à la fragmentation d'un échantillon de granulat.

1. Principe de l'essai :

Mesure de la résistance à la fragmentation du gravier.

L'essai est réalisé sur un échantillon de « $M_1 = 5000 \pm 2g$ » et d'une granulométrie comprise entre 4 mm et 25 mm.

Après lavage et passage à l'étuve l'échantillon est introduit dans l'appareil Los-Angeles avec les 11 boulets normalisés.

Après 500 rotations, l'échantillon est lavé puis tamiser (tamis 1.6 mm) et peser à nouveau, soit « M_2 ».

$$LA = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100$$

Avec

LA : coefficient Los Angeles.

Cette quantité sans dimension est appelée par définition coefficient Los Angeles du matériau.

2. Mode opératoire

- Tamisage de l'échantillon à sec ;
- Lavage de du matériau et son séchage à l'étuve à $105 \text{ °C} \pm 5\text{°C}$ jusqu'à masse constante ;
- La masse de la prise d'échantillon pour essai est de 5000 g ;
- Introduction avec précaution la charge de boulets au nombre de 11, puis l'échantillon ;
- Faire effectuer à la machine 500 rotations à vitesse régulière (30 tr /mn) ;
- Recueillir le granulat ;
- Tamiser le matériau sur le tamis de 1.6 mm ;
- Laver le refus au tamis de 1.6 mm égoutter et sécher à l'étuve à 105°c jusqu'à masse constante, soit, m'le résultat de la pesée.

Pour le matériau utilisé, le coefficient Los Angeles est de l'ordre de : 22.80 %.

Valeurs recommandées pour les granulats destinés pour les bétons de génie-civil doivent être inférieures à 35 [35].

Résultats :

M_1 (g)	M_2 (g)	LA (%)
5000	3860	22.80

b) *Essais de masse volumique réelle, imbibée, de porosité et du coefficient d'absorption : NF P18-554[33]*

Conformément à la norme NF P18-554 [33] des essais physiques, de masse volumique réelle et imbibée, de porosité ainsi que du coefficient d'absorption, ont été effectués sur l'échantillon de gravier de fraction 3/8 et 8/15.

L'échantillon doit avoir une masse M supérieure à $0.2 D$ (D en mm), soit M'_s masse de l'échantillon sec, M_s masse de l'échantillon lavé sur tamis 4 mm, séché à l'étuve à $105^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, immergé l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à une température 20°C à pression atmosphérique, essuyé avec un chiffon absorbant et pesé, soit M_a sa masse. La masse de l'échantillon imbibé M'_a , la masse de l'échantillon absorbé l'eau pendant une semaine à la pression atmosphérique pesée dans l'air est M_w , pesé dans l'eau est M'_w .

- Masse volumique réelle $\rho_r = M_s / (M_a - M'_a)$ [t/m^3];
- Masse volumique imbibée $\rho_{ri} = M_a / (M_a - M'_a)$ [t/m^3];
- Coefficient d'absorption $A_b = 100 (M_a - M_s) / M_s$ [%];
- Porosité $P = 100 (M_w - M_s) / (M_w - M'_w)$ [%].

Les résultats des essais physiques sont portés sur le tableau 25.

Tableau 25 : Résultats des essais physiques sur graviers de fraction 3/8 et 8/15 suivant la norme NF P18-554 [33].

Echantillon	Masse volumique réelle ρ_r (t/m^3)	Masse volumique imbibée ρ_{ri} (t/m^3)	Coefficient d'absorption A_b (%)	Porosité (%)
Gravier 3/8	2.64	2.68	1.31	3.46
Gravier 8/15	2.67	2.67	0.18	0.48

c) **Résistance à l'usure essai Micro-Deval**

C'est la quantification de l'usure des granulats par frottement mutuel en présence d'eau et d'une charge abrasive.

La même procédure que l'essai Los Angeles sauf que le nombre de rotation est de 12000 tours en deux heures.

$$M_{D E} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100$$

Avec

M_{DE} : coefficient Micro-Deval.

Résultats :

M_1 (g)	M_2 (g)	$M_{D I}$ %
500	430	14.00

3. La poudre de marbre

L'exploitation de la carrière dérivée de Fil-Fila « de la carrière de Fil-Fila qui se trouve à 25 Km à l'est de la ville de Skikda » se fait par abattage à l'exploitation, des moellons de dimension variant de (80-100cm), qui sont concassés, broyés pour obtenir des granulats dont la granulométrie varie de 0-18mm.

1) Caractéristiques physico-mécanique :

Les résultats des essais physico-mécaniques sont portés sur le tableau 26.

Tableau 26 : Les caractéristiques physico-mécaniques de la poudre de marbre.

CARACTERISTIQUES	MARBRE BLANC
Masse volumique (kg/m³)	2736
Masse spécifique (g/cm³)	2.670
Compacité en %	98.03
Porosité en %	1.96
Coefficient d'absorption d'eau en %	0.39
Coefficient de saturation en %	0.87
Résistance à la compression à l'état sec en kg/cm²	961
Résistance à la compression après refroidissement en kg/cm²	966
Résistance à l'usure en g/cm²	1.82
Surface spécifique (cm²/g)	7564
Résistance au choc en kg/cm²	40
Couleur	blanche

2) Caractéristiques chimique et minéralogique :**Tableau 27** : Composition chimique de la poudre de marbre.

ELEMENTS	La teneur massique %	La teneur atomique %
C	17.25	26.87
O	48.89	57.17
Mg	0.290	0.220
Al	0.090	0.060
Si	0.250	0.160
Ca	33.23	15.50
Totaux	100.0	100.0

L'analyse chimique réalisée par fluorescence X donnée en oxydes révèle un taux assez élevé de calcium (près de 40 % en oxyde), associée à de la magnésie et de silice en faibles teneurs. Ceci est en accord avec la diffraction X : Calcite avec des traces de quartz et probablement de la dolomite en quantités trop faible pour être détecté en diffraction.

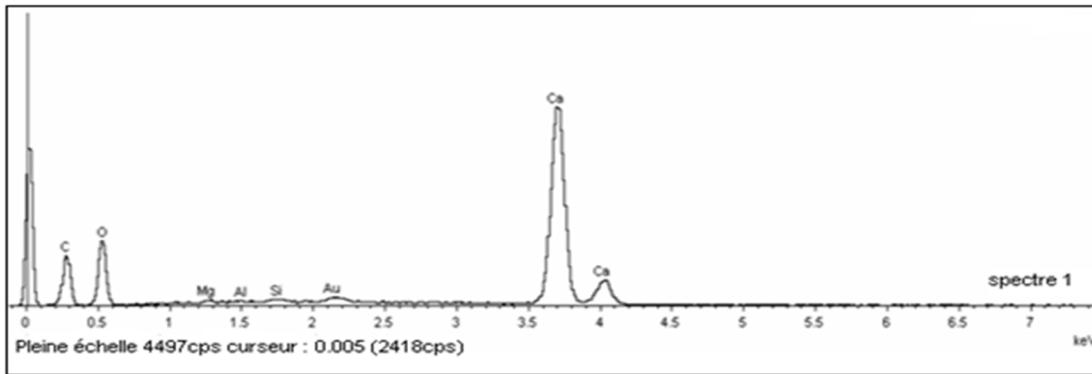


Figure 35 : Microanalyse chimique au MEB [36].

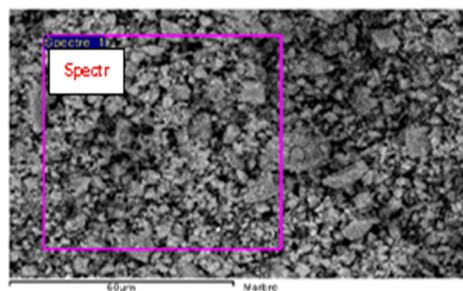


Figure 36 : Poudre du marbre sous MEB [36].

3) Caractéristiques granulométriques :

a. Analyse granulométrique du marbre avant broyage (marbre concassé)

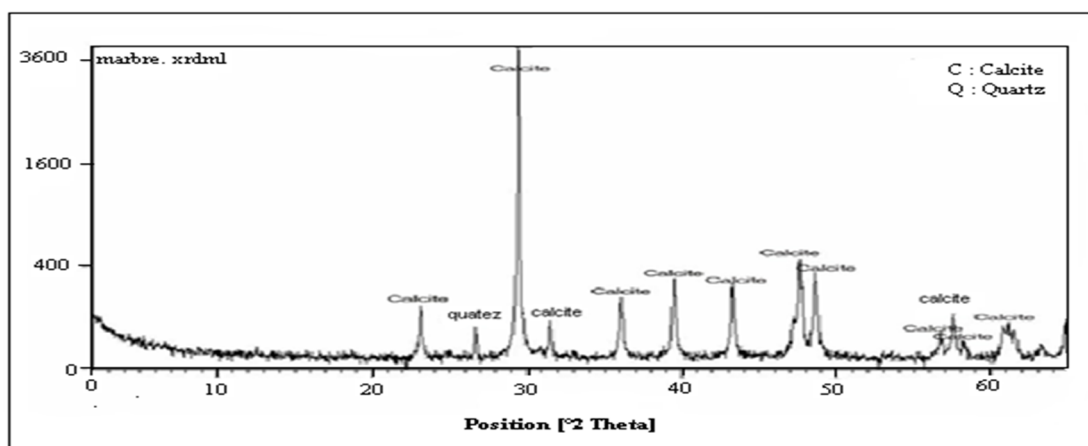


Figure 37 : Diffractogramme X de la poudre de marbre ($\lambda_{K\alpha}$ Cu) [36].

Tableau 28 : Analyse granulométrique du marbre avant broyage.

Ouverture des tamis (μm)	Masses (g)		Pourcentages (%)	
	Refus cumulés	Tamisât cumulés	Tamisât partiels	Tamisât cumulés
1250	0	300	0	100
800	2.84	297.16	5.74	94.26
500	24.97	275.03	17.72	82.28
250	88.55	211.45	38.87	61.13
125	132.45	167.55	67.71	32.29
100	214.85	85.15	76.36	23.64
80	279.72	20.28	93.97	6.03
50	291.24	8.76	98.17	1.83
40	298.84	1.16	99.73	0.27
Fond de tamis	300	/	/	/

NB :

On remarque que le marbre concassé n'est pas grossier, presque 90% des grains ont un diamètre $< 1\text{mm}$.

b. *Analyse granulométrique de la poudre de marbre broyée*

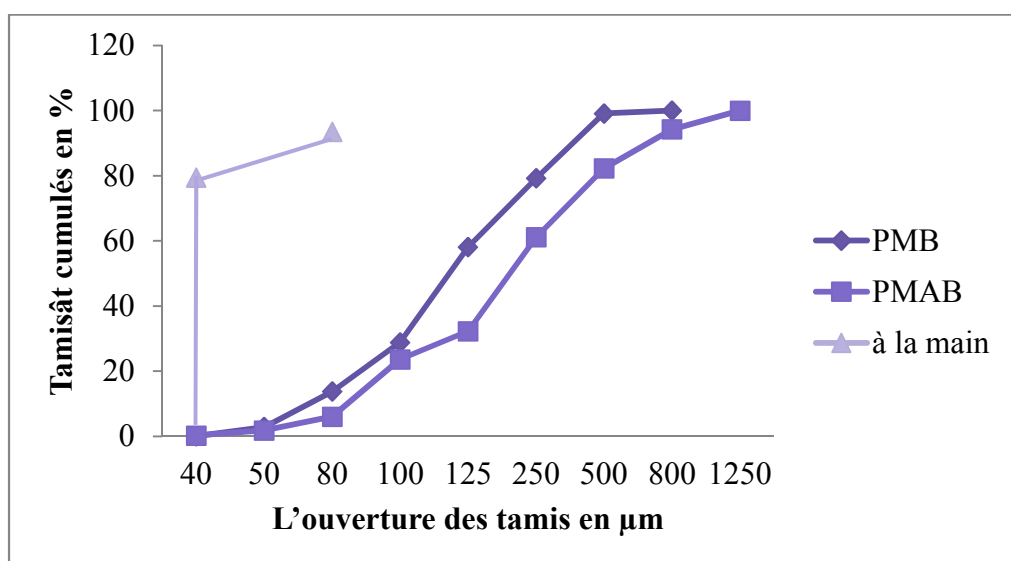
Après un broyage pendant 20min, on a trouvé les résultats suivants :

Tableau 29 : Analyse granulométrique de la poudre de marbre broyée.

Ouverture des tamis (μm)	Masses (g)		Pourcentages (%)	
	Refus cumulés	Tamisât cumulés	Tamisât partiels	Tamisât cumulés
800	0	300	0	100
500	0.03	299.97	0.86	99.14
250	13.86	286.14	20.76	79.24
125	32.77	267.23	41.87	58.13
100	101.81	198.19	71.13	28.87
80	273.88	26.12	86.25	13.75
50	293.54	6.46	97.15	2.85
40	299.68	0.32	99.97	0.03
Fond de tamis	300	/	/	/

Tableau 30 : Analyse granulométrique de la poudre de marbre avant broyée (Tamisage à la main).

Tamis N°	Refus		tamisât	
	(g)	(%)	(g)	(%)
40µm	41	20.5	159	79.5
80µm	13	6.50	187	93.5

**Figure 38** : L'analyse granulométrique de la poudre du marbre.

4) Granulomètre Laser :

Les caractéristiques granulométriques sont mesurées au granulomètre laser CILAS 1 180 et reportées « figure 39 ». La poudre de marbre a une Surface Spécifique Blaine de **12 000** cm²/g. Le point essentiel qui émerge des résultats granulométriques se résume par une grande finesse paramètre (50 % de particules inférieures à 4 µm) 77 % inférieure à 10 µm (95 % < 20 µm). En se basant sur le coefficient d'uniformité (Cu), la granulométrie est très serrée [36].

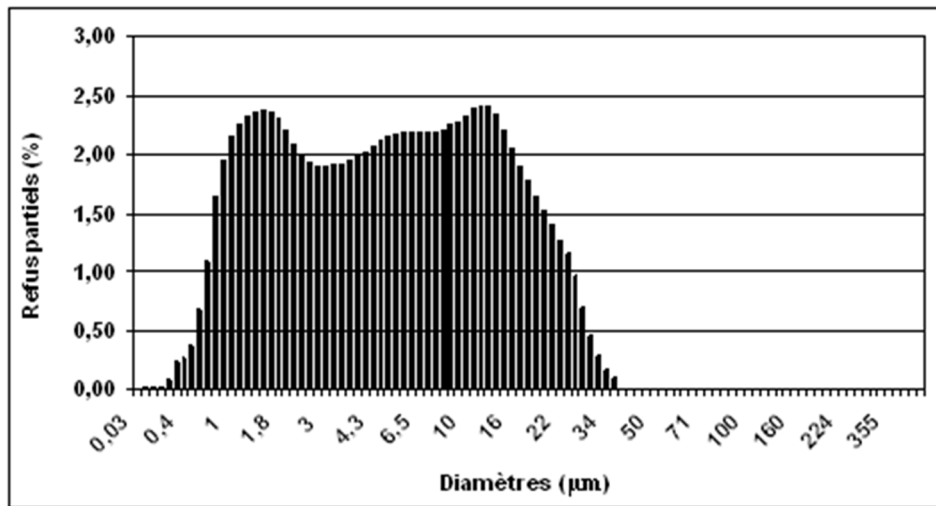


Figure 39 : Distribution granulométrique de la poudre de marbre [36].

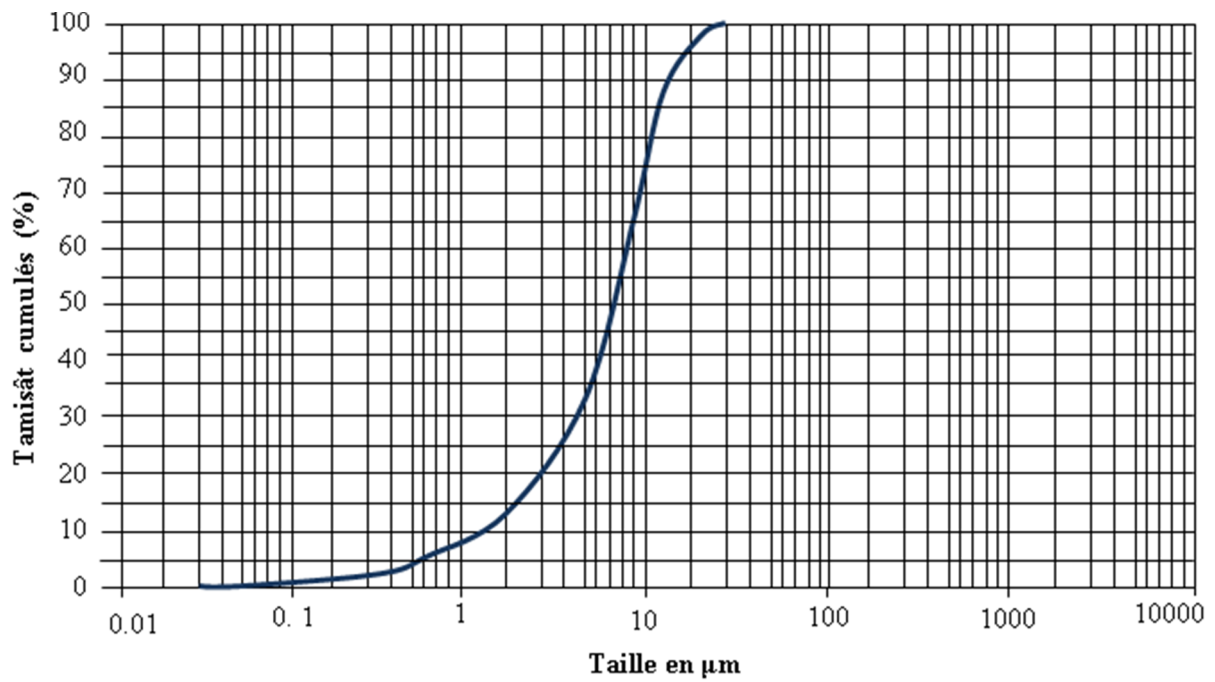
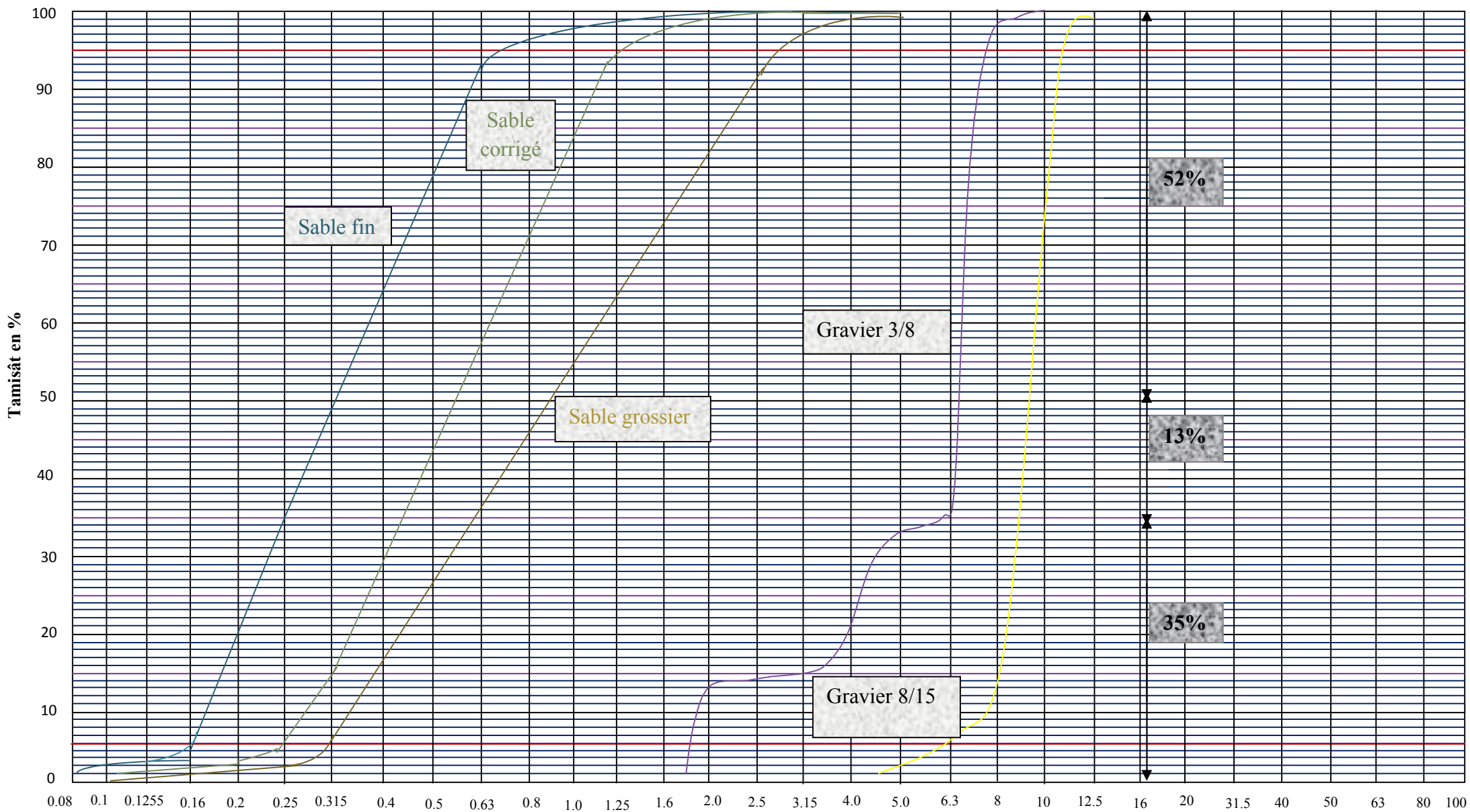


Figure 40 : Courbe d'analyse granulométrique de la poudre de marbre [36].

ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES GRANULATS « NORME NF P 18-304 »



CHAPITRE II

FORMULATION DES BETONS

FORMULATION DES BETONS

I. FORMULATION DU BETON

Deux paramètres essentiels sont recherchés conjointement pour une confection d'un béton, la résistance et l'ouvrabilité. Un autre paramètre est aussi visé ces dernières années qui sont la durabilité (résistance à l'usure, attaques chimiques etc....).

La méthode adoptée pour notre travail est donc, celle de Dreux-Gorisse, basée sur l'analyse granulométrique (du sable et des différentes fractions de gravier).

Les données de départ sont :

- Résistance visée du béton $R_b = 60\text{MPa}$;
- $D_{m \text{ a } \bar{x}} = 16\text{mm}$;
- Affaissement = 18cm ;
- $R_c = \sigma'_c = 55\text{MPa}$ (Classe vraie du ciment à 28 jours en MPa).

La courbe granulaire de référence OAB, est déterminée par trois points : l'origine (0,0), B ($D_{m \text{ a } \bar{x}} = 100\%$ tamisât) et un point de brisure A (X, Y), dont les coordonnées sont :

L'abscisse $X = 16/2 = 8\text{mm}$ si $D_{m \text{ a } \bar{x}} \leq 25\text{mm}$

L'ordonnée $Y = 50 - \sqrt{D_{m \text{ a } \bar{x}} + k}$

$K = K_p + K_s$ ($K_s = 5.4$ et $K_p = -2$) d'où $Y = 49.4\%$

D'après la courbe granulométrique on obtient :

Sable	—————▶	35%
Gravier 3/8	—————▶	13%
Gravier 8/15	—————▶	52%

1. Calcule des quantités

a. Détermination du rapport C/E:

Résistance visée du béton $R_b = f'_c = 60\text{MPa}$ (résistance spécifiée).

$f_{cr} = 600 (1 + 0.15) = 690 \text{ kgf/cm}^2 = 69\text{MPa}$ (résistance désirée).

0.15 : représente le coefficient de variation attendu pour une probabilité de 80%.

$f_{cr} = G \cdot \sigma'_c (C/E - 0.5)$ (Formule de Bolomey)

$G = 0.45$ (coefficient granulaire)

Donc $C/E = [f_{cr} / (G \cdot \sigma'_c)] + 0.5 = 3.28$

b. Détermination de C et E :

Le dosage en ciment (le dosage minimum en ciment est $C_{\min} = 475 \text{ kg/m}^3$) : $C = 500 \text{ kg/m}^3$.

Dosage en eau (d'après le graphe de Dreux) : $E = 152 \text{ l/m}^3$ de béton en œuvre ($E/C = 0.30$).

2. Quantité des granulats

$V_t = V_g + V_c + V_e + V_v = 1000$ litres

Nous supposons, que le volume des vides est négligeable.

$V_g = 1000 - (P_c/\gamma_c + P_e/\gamma_e)$ avec $V_{\text{pâte}} = (P_c/\gamma_c + P_e/\gamma_e)$

D'où $V_g = 686.71 \text{ l}$ (volume absolu des granulats).

Avec :

$\gamma_c = 3.1$ poids spécifique du ciment ;

$\gamma_e = 1$ poids spécifique de l'eau ;

$\gamma_s = 2.65$ poids spécifique de sables ;

$\gamma_g = 2.70$ poids spécifique des graviers.

1) Calcul des volumes :

Sable $686.71 \times 35\% = 240.35 \text{ kg/m}^3$

Gravier 3/8..... $686.71 \times 13\% = 89.27 \text{ kg/m}^3$

Gravier 8/15..... $686.71 \times 52\% = 357.09 \text{ kg/m}^3$

Ciment..... = 500 kg/m^3

Eau..... = 152 l/m^3

2) Le dosage pondéral des matériaux secs pour un m^3 (en kg/m^3) est :

Sable $236.90 \times 2.65 = 636.92 \text{ kg}$

Gravier 3/8..... $88.00 \times 2.7 = 241.04 \text{ kg}$

Gravier 8/15..... $351.97 \times 2.7 = 964.14 \text{ kg}$

Ciment..... = 500 kg

Eau..... = 152 kg

avec :

Sable de Boussâada : $636.92 \times 0.33 = 210.18$ kg

Sable de Baghlia : $636.92 \times 0.67 = 426.74$ kg

$V_{\text{Béton}} = 2494.10$ kg

➤ **Optimisation du dosage en adjuvant**

Nous avons pris un dosage de 1.5% d'adjuvant.

➤ **Dosage de poudre de marbre**

On à utilisé 10% de poudre de marbre, pourcentage optimisé dans des travaux précédents.

➤ **Dosage des fibres métalliques**

On à utilisé 1.5% des fibres métalliques à crochets, pourcentage optimisé dans des travaux précédents.

II. COMPOSITION DU BETON D'ETUDE

La composition du béton frais est déterminée par la méthode de Dreux G. les résultats sont donnés dans le tableau 31.

Tableau 31 : Dosage en constituants du béton.

CONSTITUANTS	DOSAGE EN Kg/m ³
Ciment	500
Sable de Baghlia	426.74
Sable de Boussaâda	210.18
Gravier fraction 3/8	241.04
Gravier fraction 8/15	964.14
Eau de gâchage	152
Rapport eau, ciment E/C	0.30
Affaissement au cône d'Abrams	18cm

1. Adjuvant

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant haut réducteur d'eau commercialisé sous le nom de « MEDAFLOW 30 » produit par la société Granitex d'Oued Smar (Alger).

La plage de dosage est déterminée suivant l'essai d'écoulement au cône de Marsh, qui consiste à mesurer le temps d'écoulement en fonction du dosage et aussi la dose de saturation, on a trouvé un dosage optimum de 1.5 % du poids de ciment.

1) Ses caractéristiques sont :

- Forme.....liquide ;
- Couleur.....jaunâtre ;
- PH.....6-6.5 ;
- Teneur en chlore.....<1g/l ;
- Extrait sec 30% ;
- Densité 1.21.

2) Propriétés et effets :

a) Béton frais :

- L'obtention d'un E/C très faible ;
- L'amélioration considérable de la fluidité ;
- Une très bonne maniabilité ;
- Un long maintien de l'ouvrabilité ;
- D'éviter la ségrégation ;
- De faciliter la mise en œuvre du béton.

b) Béton durci :

- D'augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme ;
- De diminuer la porosité ;
- D'augmenter la durabilité ;
- De diminuer le retrait et le risque de fissuration.

2. Fibres métalliques

Il s'agit de fibres à crochets de type accroché fabriquées par la société Granitex d'Oued Smar (Alger).

Forme	Longueur (mm)	Diamètre (mm)	Elancement (l/d)	Résistance à la traction (MPa)
à crochets	35	0.55	65	1100

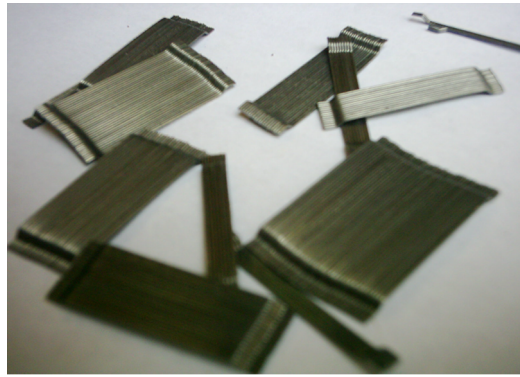


Figure 41: Fibre métallique à crochet.

1) Pourcentage des fibres :

Les pourcentages en volume des fibres utilisés sont fonction de la composition de la matrice, du mode de mise en place utilisé et des performances recherchées. Le pourcentage volumique dans le béton varie généralement de 0.3 à 3%. On le prendra égal à 1.5% pour tous les mélanges, ceci nous permet de ne pas prendre en compte l'orientation des fibres.

Dans cette étude, les caractéristiques de l'interface fibres-matrice ne sont pas prises en compte.

III. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons identifié la quantité de chaque matériau utilisé dans le béton que nous étudions (ciment, granulats, l'eau de gâchage), où nous avons utilisé la méthode de Dreux Gorisse pour la formulation des bétons, le pourcentage d'adjuvant a été optimisé et pour la quantité des fibres métalliques nous avons pris cette obtenue dans des travaux précédents.

CHAPITRE III

CARACTERISTIQUES ET MICROSTRUCTURE DE BETON

CARACTERISTIQUES ET MICROSTRUCTURE DE BETON

I. INTRODUCTION

Dans la présente partie de nos travaux, nous nous intéressons au renforcement du béton par l'utilisation de fibres d'aciers « locales » sont type à crochet, ce sont des produit commercialisés par la société GRANITEX d'Oued Smar (Alger). En premier lieu, des essais sur les bétons frais ont été effectués, mesure de l'ouvrabilité des différents bétons étudiés (BT, BM, BF, BMF) et l'air occlus. En second lieu des essais mécaniques (compression et traction par fendage et traction par flexion) ont été réalisés sur des éprouvettes à 7, 28, 90 jours. Pour finir nous avons analysé la microstructure des bétons.

II. CARACTERISTIQUES DES BETONS (FRAIS ET DURCIS)

1. Le béton frais

a. Essais 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 P 18-451 [37].

Cet essai est effectué conformément aux prescriptions de la norme NF P18-451 [37]. C'est l'essai de mesure de consistance le plus employé et le plus connu universellement. Le moule utilisé pour réaliser cet essai est un cône tronqué de 30cm de hauteur.

Placé sur une surface lisse, la petite ouverture vers le haut, le cône est rempli de béton en trois couches d'égale volume. Chacune des couches est compactée avec 25 coups d'une tige métallique normalisée de 1.6 cm de diamètre, dont l'extrémité est arrondie. Une fois le cône rempli, le dessus de la surface doit être arasé en se servant de la tige et en effectuant des mouvements de va et vient. Durant ces opérations, le cône doit demeurer fixe sur la base lisse; des écrous de serrage, situés à la base du cône, permettent de le maintenir immobile.

Après remplissage, le cône est relevé lentement et le béton s'affaisse, la différence entre la hauteur du béton affaissé et la hauteur du cône est appelée l'affaissement.

La valeur de l'affaissement est exprimée en cm.

Tableau 32 : Variation de l'affaissement de différents bétons.

Type du béton	BT	BM	BF	BMF
Affaissement en (cm)	21	20	19	19.5

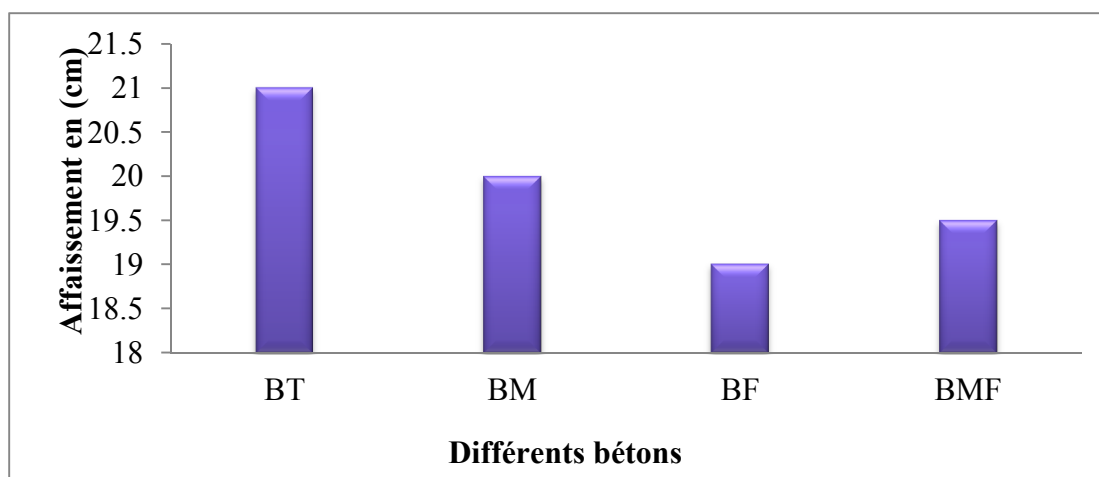


Figure 42 : Evolution de l'affaissement pour les différents bétons.

On constate une diminution rapide de l'ouvrabilité avec l'incorporation des fibres, On s'aperçoit que les fibres métalliques et l'ajout de poudre de marbre diminuent la maniabilité d'un béton et c'est pour cela que l'ajout d'un superplastifiant est nécessaire. L'utilisation du cône d'Abrams nous a permis de mettre en évidence l'influence des fibres sur l'écoulement du béton frais.

b. Mesure de l'air occlus :

Le seul élément compressible dans un béton frais est l'air «NF P18-353 [38]».

Il existe trois méthodes pour mesurer la teneur en air totale du béton frais:

La méthode gravimétrique, volumétrique et préssiométrique. Nous avons utilisé dans nos essais la méthode préssiométrique. Son principe est fondé sur la relation entre le volume d'air et la pression appliquée donnée par la loi de Mariotte. Cet essai a été réalisé avec un aéromètre qui indique directement la teneur en air (%).

La procédure consiste essentiellement à observer la diminution de volume d'un échantillon de béton compacté lorsqu'il est soumis à une pression connue.

Cette méthode est la plus fiable et la plus précise pour déterminer la teneur en air d'un béton.

Tableau 33 : Variation de l'air occlus de différents bétons.

Type du béton	BT	BM	BF	BMF
Air occlus en %	1.25	1.12	1.20	1.15

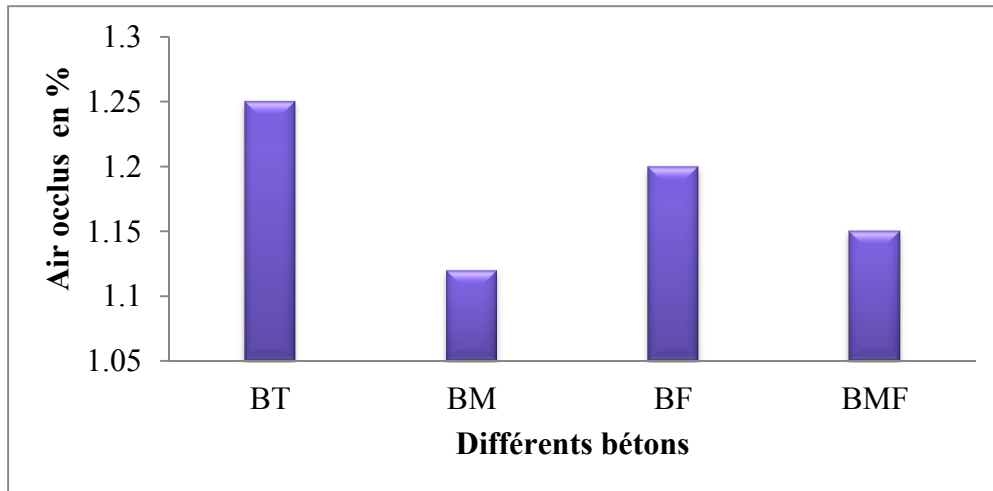


Figure 43 : Variation de l'air occlus pour les différents bétons.

L'ajout de poudre de marbre finement broyée dans le béton fait augmenter la compacité et par conséquent, la teneur en air occlus est diminuée. L'incorporation de fibres métalliques agit dans le sens inverse, c'est pourquoi on note un accroissement du pourcentage d'air occlus.

c. La masse volumique :

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

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

avec :

$$M = M_1 - M_0$$

M_1 : est la masse du récipient plein de béton (arasé à l'aide d'une règle) ;

M_0 : est la masse du récipient vide ;

V : le volume du récipient.

Les résultats sont inscrits dans le tableau 34.

Tableau 34 : Variation de la masse volumique à l'état frais de différents bétons.

Type du béton	BT	BM	BF	BMF
Masse volumique du béton frais (kg/m ³)	2563	2584	2601	2640

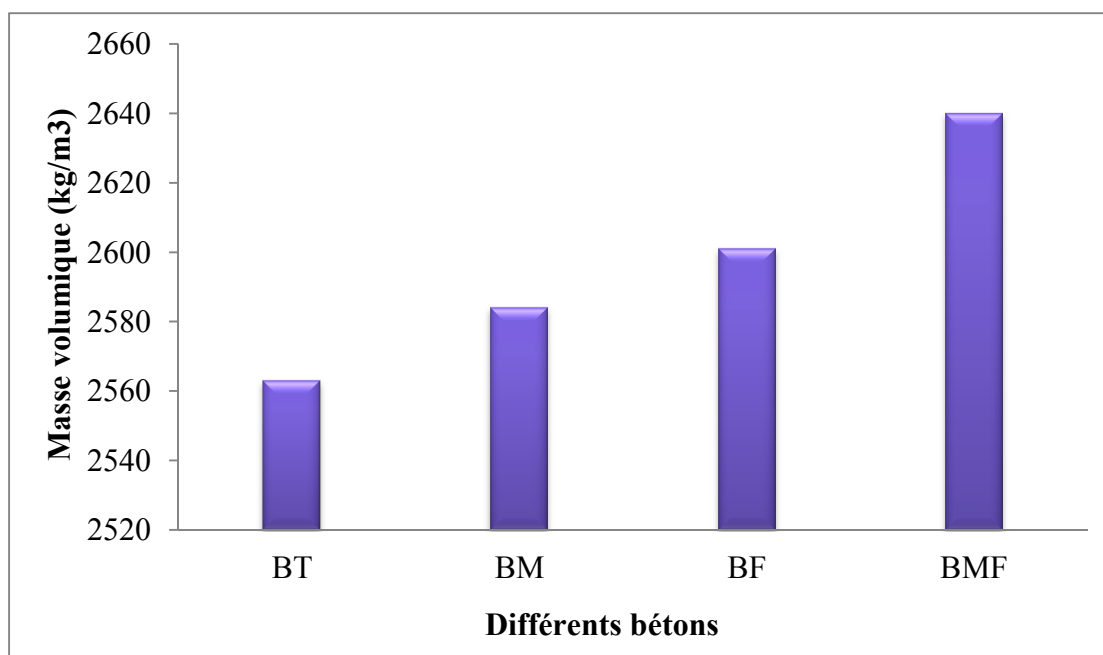


Figure 44 : Variation de la masse volumique à l'état frais de différents bétons.

La masse volumique des bétons augmente progressivement, cette augmentation est due à la finesse de l'ajout de poudre de marbre et des fibres métalliques, les particules de poudre de marbre finement broyée occupent les vides et la compacité est ainsi augmentée, la présence des fibres métalliques par leur densité élevée accentue cette évolution.

2. Le béton durci

a. La masse volumique :

La masse volumique du béton durci est la masse de l'éprouvette (11x22) cm par son volume. Les masses volumiques sont mesurées à 7, 28 à 90 jours, les résultats sont comme suit :

Tableau 35 : La masse volumique de différents bétons.

Type du béton	Masse volumique (kg/m ³)		
	7j	28j	90j
BT	2543.94	2554.31	2634.78
BM	2582.23	2592.75	2657.47
BF	2592.17	2599.70	2663.25
BMF	2632.37	2638.55	2680.12

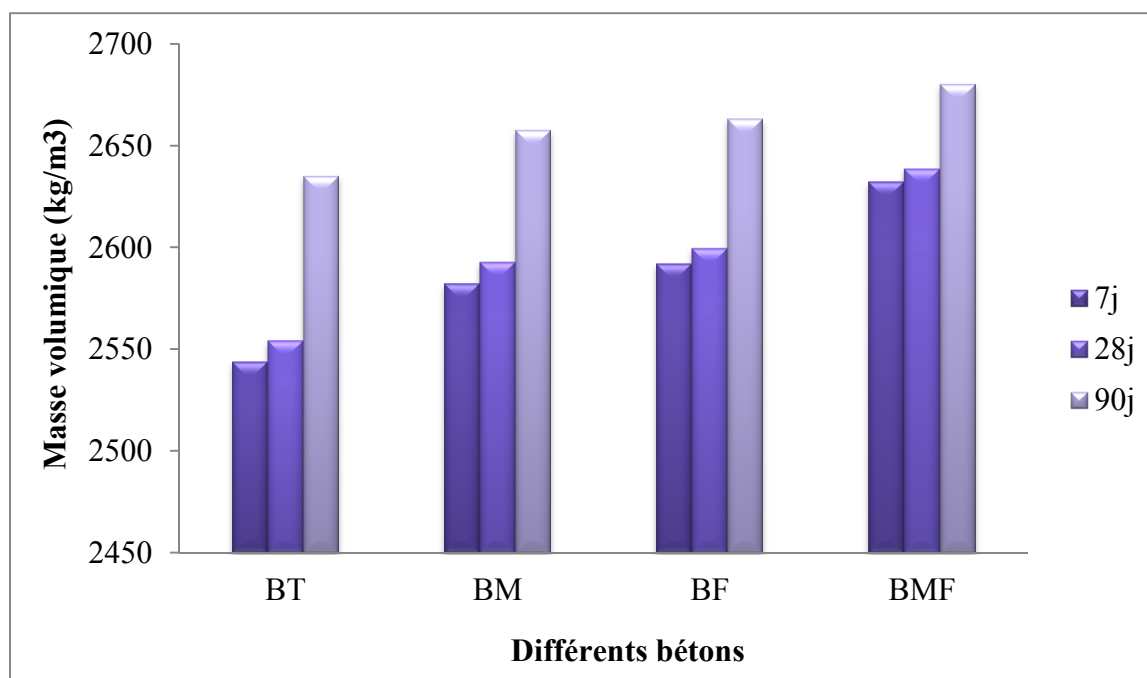


Figure 45 : Variation de la masse volumique à l'état durci de différents bétons.

La masse volumique des bétons durcis évolue comme celle des bétons à l'état frais. La poudre de marbre et les fibres métalliques provoquent les mêmes effets susnommés.

b. Essais de résistance à la compression :

L'essai consiste à rompre entre les plateaux d'une presse hydraulique (MATEST CE 06) de 1500 KN de capacité, à vitesse constante des éprouvettes cylindriques de dimensions (11x22) cm. Celles-ci doivent être bien centrées entre les plateaux afin d'éviter l'apparition des moments dus à l'excentricité de la charge de compression.

La presse nous donne des charges de ruptures, ces charges sont converties en résistance à la compression σ_c qui est calculée par la formule de la résistance des matériaux suivante :

$$\sigma_c = P_r/S$$

Avec :

P_r : L'effort enregistré au moment de la rupture de l'éprouvette ;

S : La section de l'éprouvette.

Des éprouvette (11x22) cm ont été confectionnées puis démoulées après 24 heures, ensuite conservées dans l'eau à une température de 20 à 30°C jusqu'à (7, 28, 90) jours.

Les éprouvettes ont été écrasées aux différents âges (7, 28, 90) jours, à l'aide d'une presse de charge maximum 2000 KN.

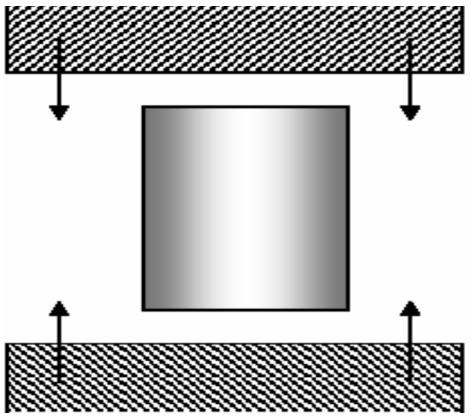


Figure 46 : Essai de compression.



Figure 47 : Eprouvettes 11x22 cm.

Tableau 36 : La résistance à la compression de différents bétons.

Type du béton	La résistance à la compression (MPa)		
	7j	28j	90j
BT	57.31	67.75	81.00
BM	58.13	70.84	84.69
BF	53.85	60.71	72.58
BMF	55.65	66.52	79.52

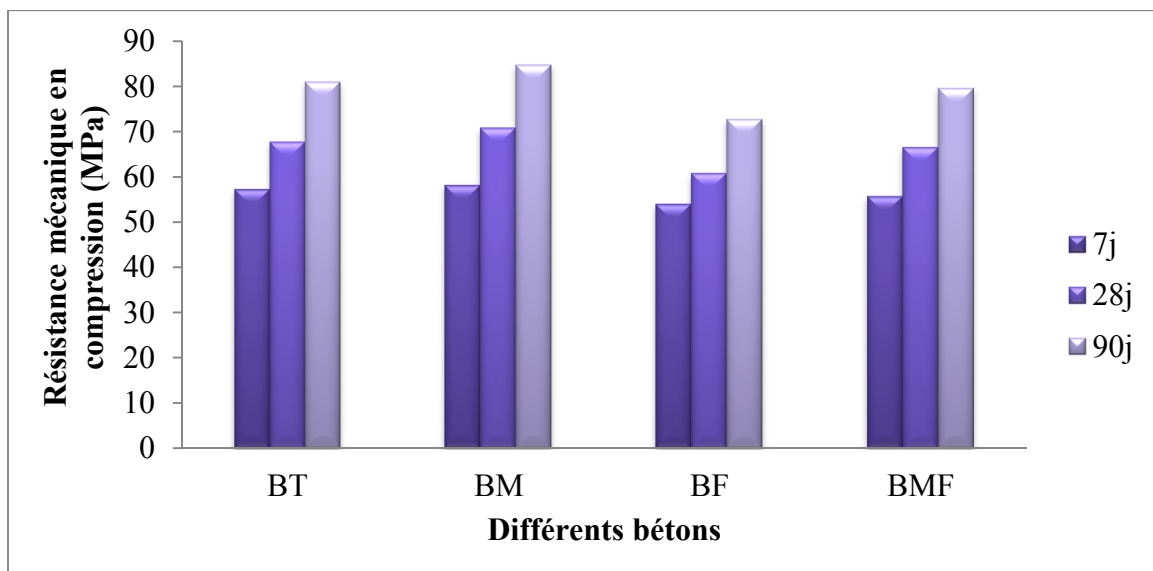


Figure 48 : Résistance mécanique en compression de différents bétons.

Nous pouvons constater que la résistance en compression du béton avec ajout de la poudre de marbre est supérieure à celle du béton de contrôle indiquant que la poudre de marbre contribue à la résistance en compression plus que ce que l'hydratation du ciment considéré seul pouvait apporter.

c. Essais de traction par fendage :

L'essai de traction par fendage est effectué sur des éprouvettes (11x22) cm, l'essai est déroulé selon la norme NF P 18-434. L'écrasement à 28 jours a donné les résultats suivants :

Tableau 37 : La résistance à la traction par fendage de différents bétons.

Type du béton	BT	BM	BF	BMF
Résistance par fendage en MPa	4.73	6.32	6.63	6.85



Figure 49 : Béton + 1.5% de fibres.



Figure 50 : Béton sans fibres.

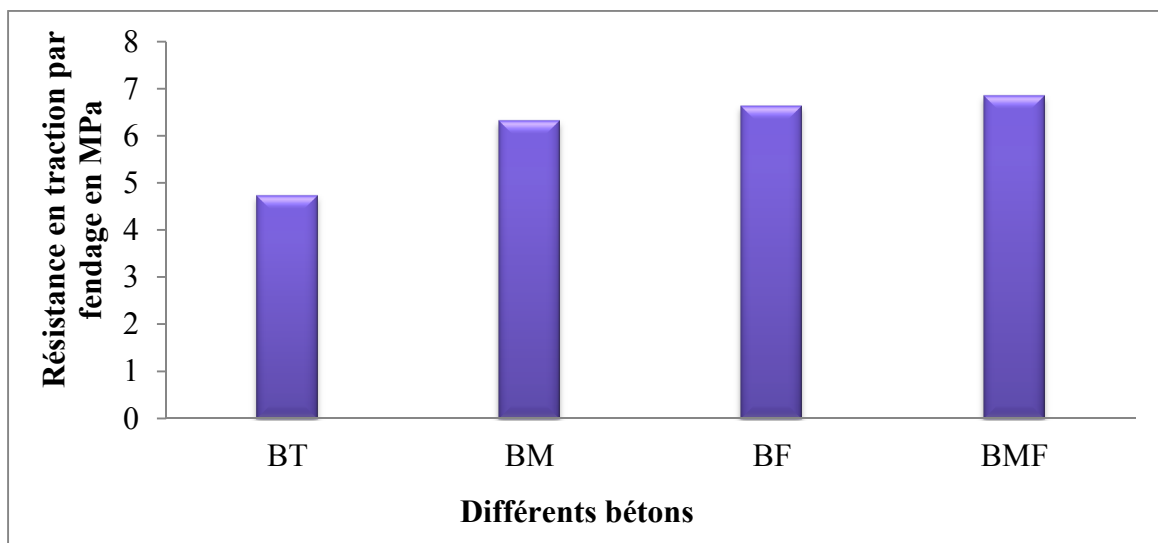


Figure 51 : Résistance en traction par fendage.

On constate que le béton avec des fibres métalliques développe de meilleurs résultats en résistance à la traction par fendage par rapport aux autres bétons (BT, BM). Et cela, malgré la faible compacité éventuelle. L'addition de fibres a permis d'augmenter les caractéristiques mécaniques du béton, ce fait peut-être apprécié par le contrôle de la propagation des fissures dans le matériau en réduisant l'ouverture des fissures.

d. Essais de traction par flexion :

Des éprouvettes prismatiques normalisées, de dimensions (10x10x40) cm « figure 53 » ont été utilisés pour la détermination de la résistance à la traction. Les mesures sont faites sur une presse qui répond à la norme NF P 18-411, munie d'un banc de flexion 3 points. Cet essai est homologué de norme NF P 18-407 et permet de déterminer la résistance à la traction par flexion du béton étudié.

C'est l'essai le plus couramment utilisé. Il consiste à rompre en flexion une éprouvette prismatique de côté a et de longueur $4a$ (10x10x40) cm. Pour une charge totale P , le moment de flexion constant entre les deux points d'application de la charge est donné par :

$$M = Pa / 2, \text{ et la contrainte de traction correspondante sur la fibre inférieure est: } f_{tj} = 3.6M / a^3.$$

L'essai de traction par flexion est effectué sur des prismes (10x10x40) cm selon la norme NF P 18-407, à 28 jours nous avons inscrits les résultats suivants :

Tableau 38 : La résistance à la traction par flexion de différents bétons.

Type du béton	La résistance à la traction par flexion (MPa)	
	7j	28j
BT	6.9	12.57
BM	7.23	15.63
BF	9.75	18.54
BMF	10.23	19.56

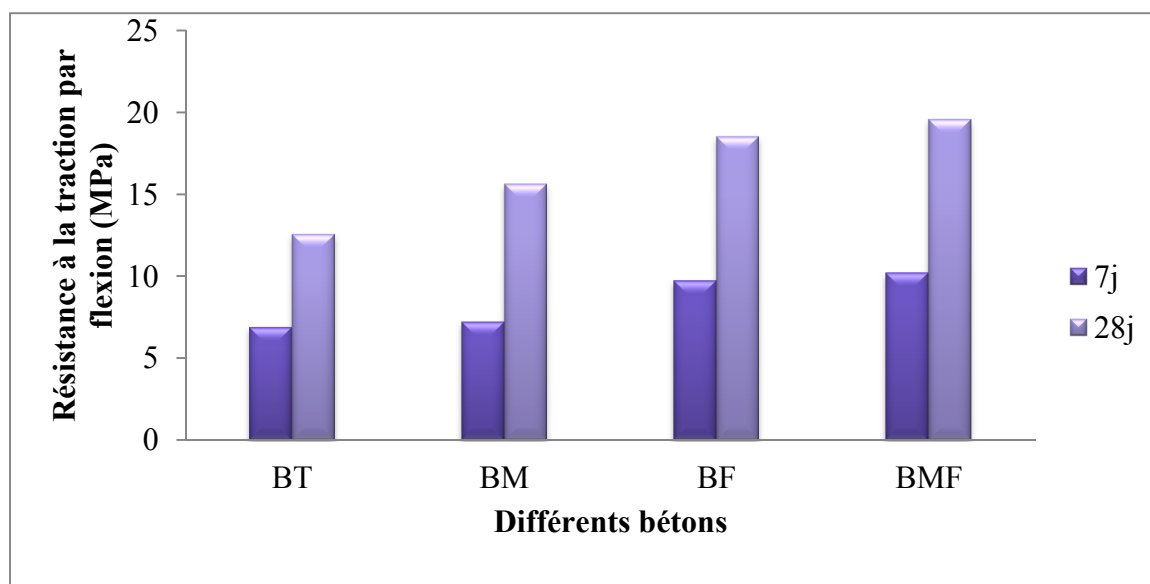


Figure 52 : Résistance en traction par flexion.



Figure 53 : Eprouvettes (10x10x40) cm.

La résistance en traction par flexion de béton de fibre métallique est élevée à celle de béton non fibré (témoin), l'augmentation de la résistance est importante, amélioration apportée par la présence de fibre métallique dans le béton, Elle est due à la déformabilité du matériau. Il y a un déplacement de l'axe neutre durant la flexion.

e. Essais d'absorption d'eau :

L'essai d'absorption d'eau est effectué sur un échantillon de béton avec une masse « M_i », en mettant cet échantillon dans une l'étuve pendant 24 h à une température 105°C. Nous mesurons la masse « M_s » après séchage. Ensuite on le place dans l'eau pendant 24h (la masse est mesurée de nouveau M_h). À 28 jours nous avons eu les résultats suivants :

Tableau 39 : Absorption d'eau du béton durci (28 jours).

Type du béton	Les masses (g)			A _b %
	M _i	M _s	M _h	
BT	940	902	942	4.435
BM	904	874	905	3.547
BF	882	838	883	5.370
BMF	1458	1405	1460	3.915

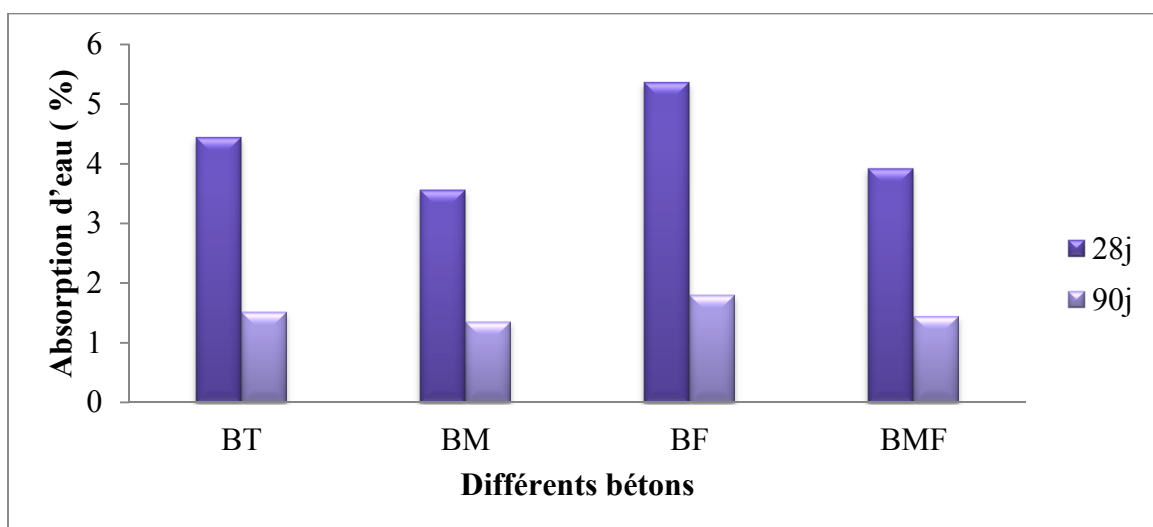
$$A_b = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100\%$$

M_h : masse humide de béton ;

M_s : masse sèche de béton.

Tableau 40 : Absorption d'eau du béton durci (90 jours).

Type du béton	Les masses (g)			A _b %
	M _i	M _s	M _h	
BT	1263	1246	1265	1.52
BM	1580	1560	1581	1.35
BF	1123	1105	1125	1.81
BMF	1399	1380	1400	1.45

**Figure 54** : Absorption d'eau de différents bétons durcis.

On remarque que le coefficient d'absorption d'eau augmente nettement avec la présence des fibres métalliques. Ainsi l'introduction des fibres dans le béton se traduit par une augmentation plus au moins prononcée du volume des vides, associée à une diminution de la compacité du matériau. Alors que l'ajout de la poudre de marbre finement broyé densifie la matrice et par conséquent le degré d'absorption d'eau est diminué.

f. Essais de retrait :

Pour mesurer le retrait, des éprouvettes prismatiques ($7 \times 7 \times 28$) cm sont utilisées. On compare, à différents temps, la variation de longueur des éprouvettes par rapport à leur longueur initiale au temps t_0 pris pour origine.

Les éprouvettes de béton sont placées dans une salle à température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et une humidité relative de $65 \pm 5\%$ et en absence de vent.

Le retrait est mesuré à différents âges (7, 28, 90) jours.



Figure 55 : Essai de retrait du béton durci.

Tableau 41 : Résultat des retraits du béton durci « (7, 28, 90) jours ».

Type du béton	Les retraits ($\mu\text{m/m}$)		
	7j	28j	90j
BT	325	446	530
BM	118	261	350
BF	286	357	432
BMF	121	221	296

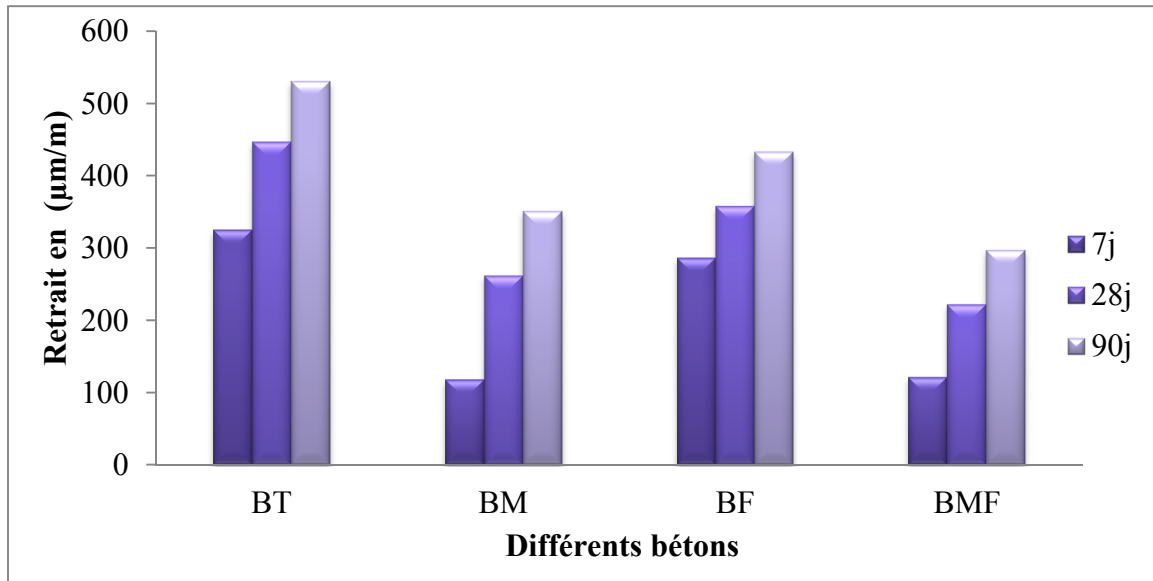


Figure 56 : Retrait des bétons à différentes échéances.

Le béton témoin présente un retrait plus important que les autres bétons et également plus tardif car l'eau absorbée par les granulats se trouve progressivement dégagée, retardant ainsi la déshydratation du béton, cause principale du retrait. Cependant, le béton avec ajout de marbre se comporte mieux. Ce fait, est du en particulier à la grande finesse de cet ajout, qui avantage la densification dès les premières échéances et diminue par conséquent le retrait.

III. MICROSTRUCTURE INTERNE

Les mécanismes d'hydratation de C_3S et C_2S donnent principalement des silicates de calcium hydratés ou C-S-H accompagnés de Portlandite. Les observations effectuées par microscopie électronique à balayage pour les échantillons conservés 6 mois dans l'eau du robinet « figure 57 » présentent une morphologie particulièrement dense.

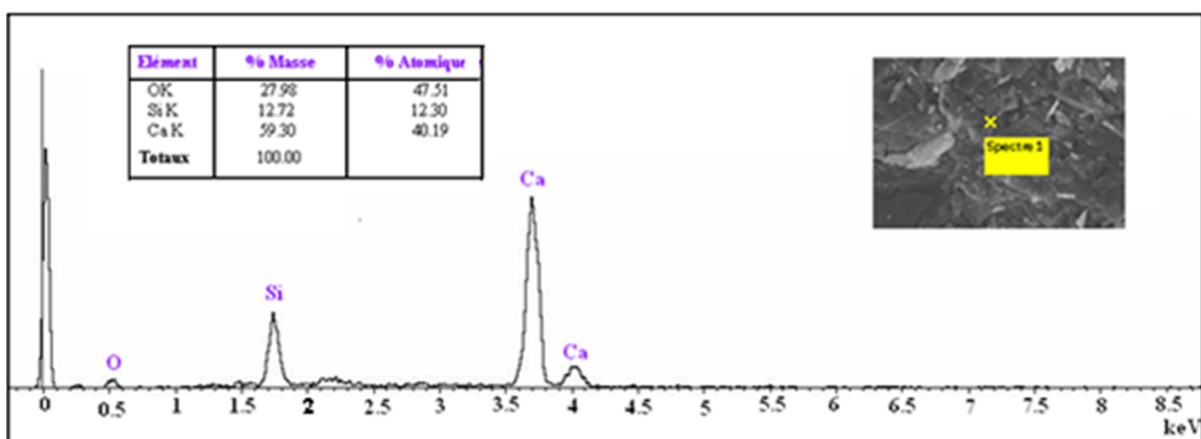


Figure 57 : Observation au MEB et EDS des CSH.

Les hydrates de la pâte de ciment sont issus de la réaction avec l'eau des différentes phases anhydres de ciment. Ces réactions, qui, en général, ne consomment pas la totalité des anhydres, ont des cinétiques différentes en fonction des phases anhydres considérées.

Les principaux hydrates formés sont la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ -CH en notation cimentière), les silicates de calcium hydratés C-S-H de formules chimiques variables, l'ettringite ($\text{C}_3\text{A}.3\bar{\text{S}}.\text{H}_{32}$ où $\bar{\text{S}} = \text{SO}_3$) et le monosulfoaluminate de calcium ($\text{C}_3\text{A.C}\bar{\text{S}}.\text{H}_{12}$).

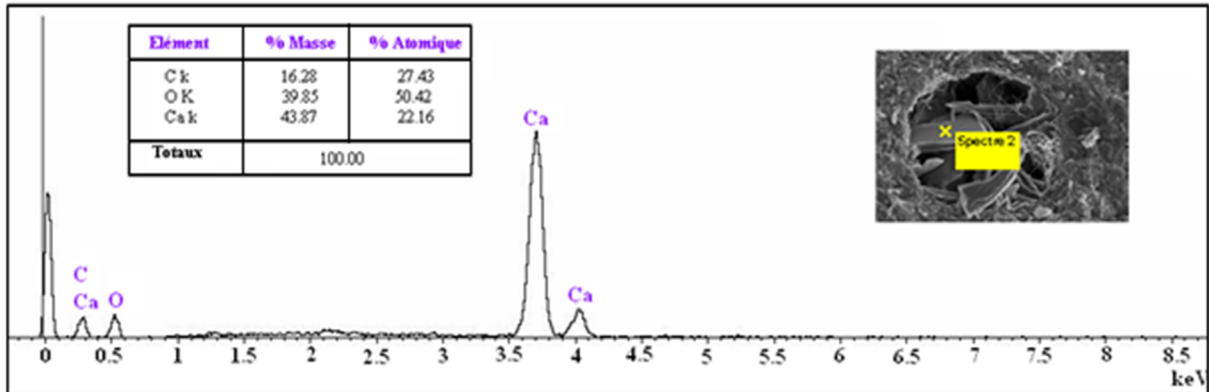


Figure 58 : Observation au MEB et EDS de la portlandite.

D'un point de vue morphologique, le cliché MEB de la figure 57 montre des C-S-H extrêmement compacts et denses sans des particules individuelles. En ce qui concerne les pâtes avec ajout de poudre de marbre, les amas de C-S-H sont très denses ce qui induit une grande compacité.

La portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ libérée par l'hydratation des silicates apparaît en plaquettes hexagonales « figure 58 » qui s'empilent en amas compacts formant des ponts entre les grains partiellement hydratés. On note une teneur de portlandite similaire pour les pâtes de ciment que se soit avec ou en sans poudre de marbre.

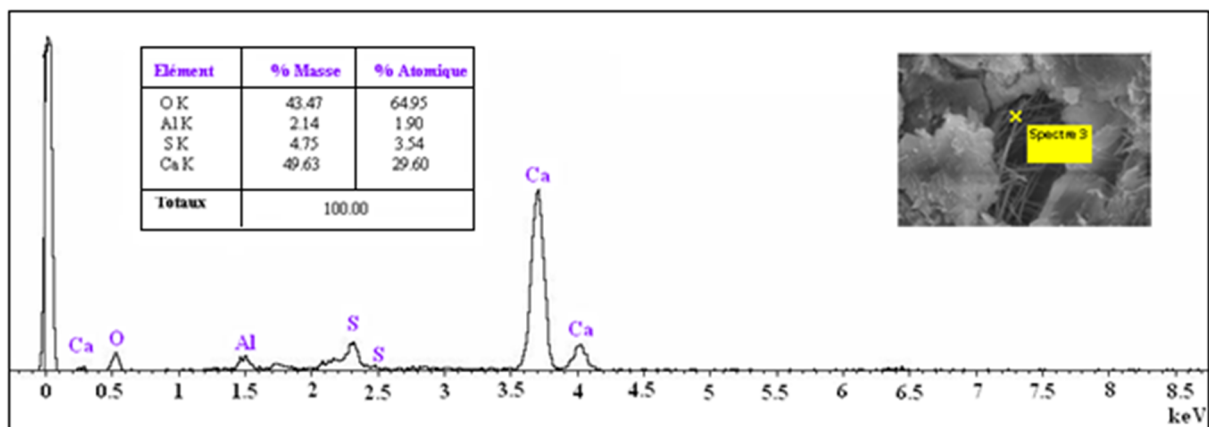


Figure 59 : Observation au MEB et EDS de l'ettringite.

L'ettringite se présente en très fines aiguilles « figure 59 ». L'épaisseur et la longueur des aiguilles d'ettringite dépendent des conditions de cristallisation. La présence de l'ettringite est moindre pour la pâte de ciment contenant de la poudre marbre, cela est certainement dû à la forte compacité de cette dernière comparée à celle de ciment seul.

L'analyse physico-chimique montre que les réactions d'hydratation correspondantes aux différentes pâtes font apparaître différentes phases plus ou moins bien cristallisées sur les diffractomètres de rayon X. Les composés identifiés après une conservation de 3 mois sont représentés sur les figures 60 et 61.

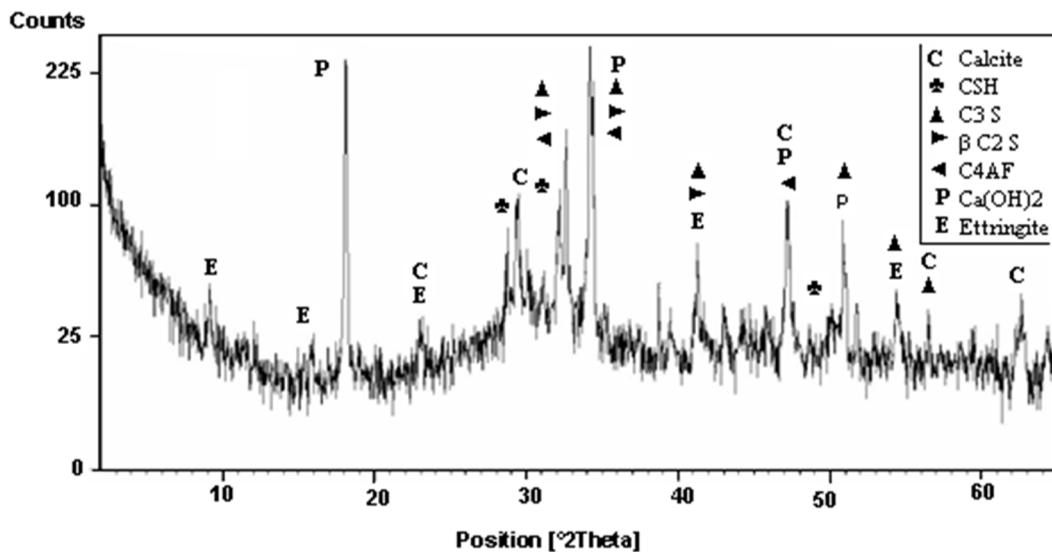


Figure 60 : Radiogramme des pâtes durcies du CEM II 42.5.

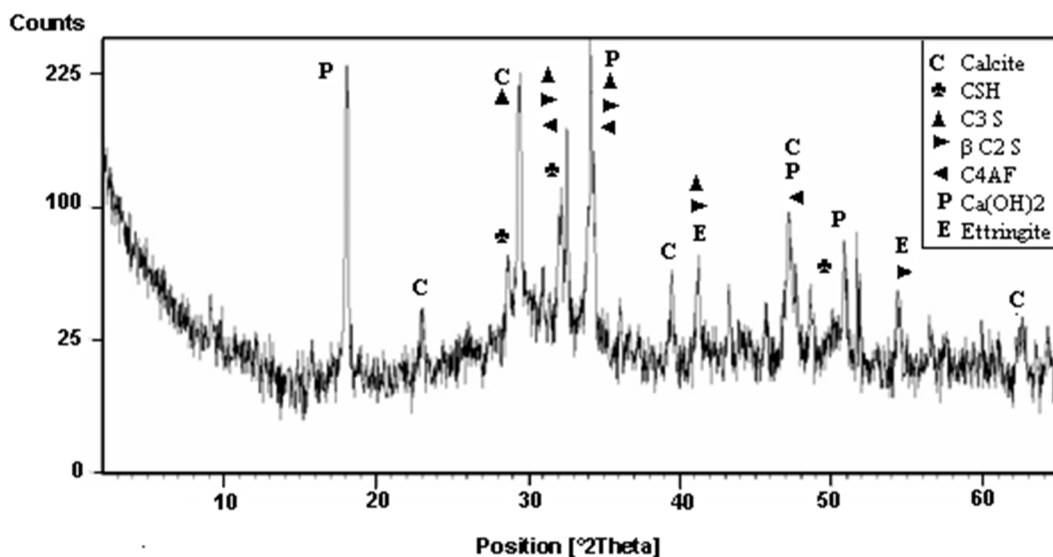


Figure 61 : Radiogramme des pâtes durcies du CEM II 42.5 avec ajout de la poudre de marbre.

L'hydratation des mélanges conduit à la formation de portlandite CH et d'un gel silico-hydraté C-S-H pour toutes les compositions étudiées. Le diffractomètre de l'échantillon de pâte ciment indique que l'ettringite $C_3A.3CaSO_4.31H_2O$ est présente dans la pâte durcie au bout d'une période de trois mois. Ce composant n'apparaît plus de façon significative dans la pâte ciment contenant de la poudre de marbre, ce résultat corrobore les observations aux MEB évoquées précédemment.

Enfin, on peut noter la présence importante et croissante de la calcite provenant de l'ajout minéral calcaire et celui du marbre.

IV. PEAU DU BETON

Les éprouvettes conservées dans l'eau du robinet pendant un six mois, sont ensuite cassées et leur surface au contact du milieu de conservation est observée au MEB. Les formes cristallines observées sont soumises à la micro analyse.

La figure 62 présente les observations des surfaces des éprouvettes de béton avec ajout de marbre conservées dans l'eau du robinet, les cristaux de portlandite sont bien formés avec des tailles qui dépassent les 10 μm , sauf pour le cas de béton sans ajout « figure 64 » où les dimensions des cristaux de calcite sont plus petites. On peut observer quelques figures de dissolution sur quelques uns.

Ciment avec ajout de marbre

Elément	%Masse	%Atomique
C K	11.41	20.89
O K	36.74	50.51
Mg K	0.40	0.36
Ca K	51.45	28.24
Totaux	100.00	

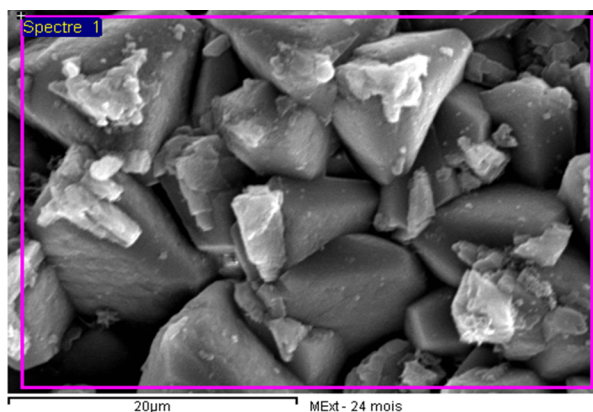


Figure 62 : Béton avec ajout de marbre sous MEB.

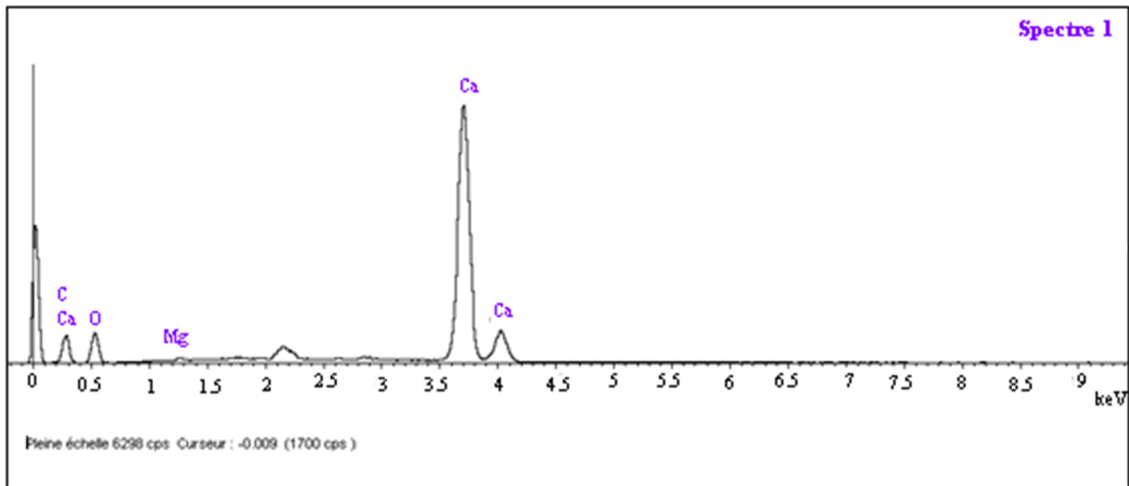


Figure 63 : Microanalyse chimique au MEB « béton avec ajout ».

Ciment sans ajout de marbre

Elément	%Masse	%Atomique
C K	9.56	18.43
O K	32.99	47.72
Mg K	1.28	1.22
Al K	0.23	0.20
Si K	0.57	0.47
Ca K	55.37	31.97
Totaux	100.00	

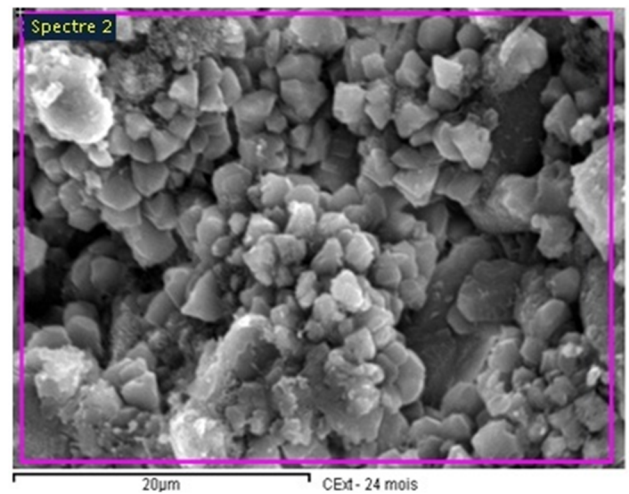


Figure 64 : Béton sans ajout de marbre sous MEB.

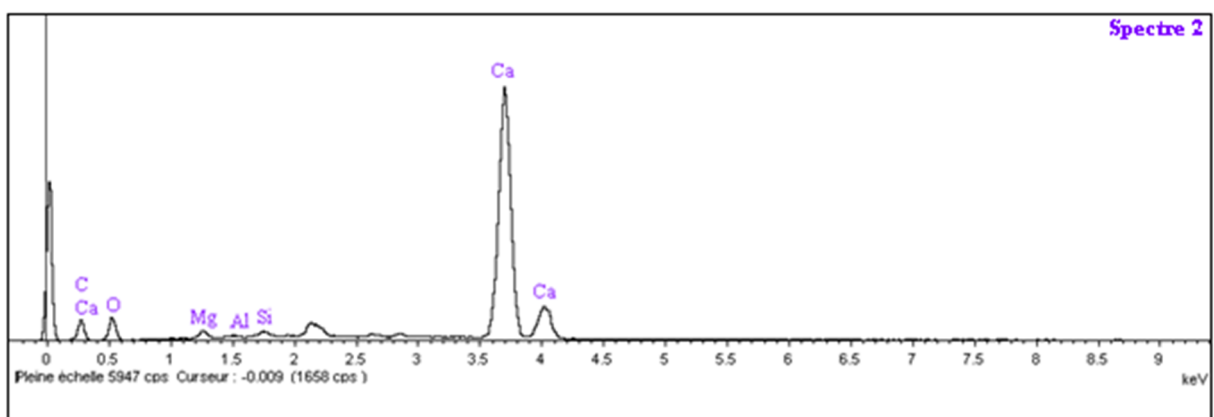


Figure 65 : Microanalyse chimique au MEB « béton sans ajout ».

V. CONCLUSION

Les qualités indéniables du béton de fibres font que ce matériau est employé dans une vaste gamme d'applications. Pour pouvoir répondre à l'attente de l'industrie de la construction, le béton renforcé de fibres métalliques donne de nouveaux matériaux, dont il convient de préciser et de quantifier les comportements mécaniques et la durabilité. Prévoir l'effet de la présence des fibres dans la matrice, s'est vite révélé un problème complexe, les théories classiques des matériaux composites n'apportent que des réponses partielles, car à côté de l'aspect composite typiquement matériau, il y a endommagement et localisation de fissures bien avant la rupture totale. Dans cette étude, une évaluation des performances à moyen et long terme est présentée pour les différents types de mélanges. De fibres à crochet, utilisant une composition de base pour tous les bétons, Donc deux méthodes très différentes de renforcement. On conclut :

- La perte en poids (dessiccation) et le retrait. On ne constate que la perte en poids est plus grande pour les matrices renforcées de fibres que pour les témoins. Les fibres peuvent créer un chemin préférentiel pour le départ de l'eau. On constate que les fibres diminuent un peu le retrait. Après une longue durée, l'action des fibres est plus nette, car les matrices renforcées de fibres se stabilisent plus rapidement que les matrices sans fibres. Leurs quantité semble être le facteur le plus important qui gouverne le retrait ;
- Et on remarque l'augmentation de résistance en compression et également une nette amélioration de résistance en traction.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail était de mieux comprendre les phénomènes physico-mécaniques mis en jeu lors de l'association des fibres métalliques à crochets et la poudre de marbre sur les propriétés des bétons à hautes performances, les résultats expérimentaux obtenus nous permettent de tirer les constatations suivantes :

D'une manière générale l'ajout d'une certaine quantité de fibres à la matrice d'un béton n'introduit pas de nouvelles conditions sur la nature des composants utilisés. On peut optimiser la formulation du béton en gardant le même dosage en ciment, en granulats et également le même adjuvant. Par contre une optimisation de l'efficacité des fibres nécessite une étude minutieuse des caractéristiques de celles-ci. Il existe peu d'informations dans la littérature sur une formulation déterminée du béton de fibres, car il existe un grand nombre de paramètres qui doivent être pris en compte. L'étude de la composition de fibres est complexe car il ne suffit pas d'ajouter un certain pourcentage de fibres à une composition courante d'un béton dit classique. L'addition des renforts modifie les caractéristiques de la matrice. Il s'agit d'un matériau nouveau et il ne peut être abordé comme un béton armé tel qu'on le connaît actuellement. Les fibres n'étant pas considérées comme des armatures classiques. Nous n'allons pas nous étendre sur ces points qui sont quelque peu éloignés de notre étude. Compte tenu de la tendance des utilisateurs de privilégier la sécurité mais également à cause des freins normatifs ou réglementaires, le développement et la vulgarisation de l'incorporation des fibres ne sont pas aussi avancés que ce qu'ils pourraient être. L'étude bibliographique nous a permis d'observer, l'influence des fibres métalliques sur les propriétés du béton par exemple les résistances mécaniques.

L'incorporation dans la composition du béton de fibres métallique à crochet apporte des améliorations notables dans les caractéristiques du béton. Les performances constatées ont été obtenues sans exiger un choix particulier de ciment étant un de ceux couramment employés, ni des granulats naturels, issus de concassage. Les résistances mécaniques élevées du béton avec fibres métallique vont réduire l'ouvrabilité du béton.

Les fibres peuvent créer un chemin préférentiel pour le départ de l'eau. On constate que les fibres diminuent un peu le retrait et on remarque qu'ils augmentent nettement l'absorption d'eau.

L'ajout de 10 % (de la masse du ciment) de poudre de marbre finement broyée dans le béton et conservé dans différents milieux nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Grâce à l'ajout des ultrafines et l'utilisation de superplastifiant, nous avons obtenu des bétons de bonne ouvrabilité ;
- Le taux d'air occlus des bétons frais avec ajout cimentaire, comparé à celui du béton témoin, est plus faible. L'effet de l'introduction d'ajout de poudre de marbre, conjugué à celui du superplastifiant, limite l'air emprisonné dans des pores et le remplissage par les ultrafines est meilleur ;
- La masse volumique de béton avec ajout de poudre de marbre, déterminée aux différents âges, est sensiblement élevée par rapport à celle du béton témoin, suite à la densification de la matrice, obtenue par l'ajout de particules très fines ;
- Le béton avec ajout de poudre de marbre (teneur = 10% et finesse = 7564 cm²/g), a une résistance en compression et en traction plus élevées par rapport à celles du béton témoin.

L'identité de ce comportement vient du fait même de la constitution microstructurale des bétons avec ajout cimentaire, observée au microscope à balayage associé à une microanalyse et confirmée par l'analyse DRX. Elle montre notamment la densité importante des CSH.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **NF EN 197-1 (Fév. 2001)** Ciment-composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants (indice de classement P 15-101-1).
- [2] **NF P 18-506 (Mar. 1992)** Additions pour béton hydraulique-Laitier vitrifié moulu de haut fourneau.
- [3] **NF EN 450 (Oct. 1995)** Cendres volantes pour béton-Définitions, exigences et contrôle de qualité (indice de classement P 18-050).
- [4] **NF P 18-508 (Oct. 1994)** Additions pour béton hydraulique-Additions calcaires-spécifications et critères de qualité.
- [5] **NF P 18-502 (Mai. 1992)** Additions pour béton hydraulique-Fumées de silice.
- [6] **NF EN 196-1 (Août. 1995)** Méthodes d'essais des ciments-Détermination des résistances mécaniques (indice de classement P 15-471).
- [7] **EN 196-1 (Août. 1995)** Méthodes d'essais des ciments-Détermination de la finesse (indice de classement P 15-476).
- [8] **NF P 15-317 (Sept. 1995)** Liants hydraulique-Ciments pour à travaux à la mer.
- [9] **XP P 15-319 (Sept. 1995)** Liants hydraulique-Ciments pour à travaux en eaux à haut teneur en sulfates.
- [10] **NF P 15-318 (Sept. 1995)** Liants hydraulique-Ciments.
- [11] **XP P 18-540 (Oct. 1997)** Granulats-définitions, conformité, spécification (indice de classement P 18-540).
- [12] **NF P 18-591 (Sept. 1990)** Granulats-Détermination de la propreté superficielle.
- [13] **NF P 18-598 (Oct. 1991)** Granulats-Equivalent de sable.
- [14] **NF P 18-541(Août. 1994)** Granulats-Granulats pour bétons hydraulique- Spécification.
- [15] **NF EN 1008 (Juil. 2003)** Eau de gâchage pour bétons-Spécifications de l'échantillonnage, d'essais et 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).
- [16] **NF EN 934-2 (Sept. 2002)** Adjuvants pour béton, mortier et coulis-Adjuvants pour béton-Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage (indice de classement P 18-342).
- [17] **Neville A. M. (1992)** Propriétés des bétons, Ed. Eyrolles.
- [18] **Chanvillard G. (1993)** Analyse expérimentale et modélisation micromécanique du

- comportement des fibres d'acier tréfilées, ancrées dans une matrice cimentaire. Etudes et Recherches des LPC, série Ouvrages d'art, OA12.
- [19] **Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese Normand F. Macleod et Richard J. McGrath (2004)** « Dosage et contrôle des mélanges de béton » 7^{ème} édition canadienne.
- [20] **Hamilton W. R / Woolley A.R, Bishop A.C, Hang-kong (juin 1999)** « le multiguide nature des minéraux roches et fossiles du monde entier en couleur ».
- [21] **De LARRARD/ SEDRAN.** Une nouvelle approche de la formulation des bétons-Annales du BTP-Version.
- [22] **Propriétés des bétons.**
- [23] **DREUX G. et FESTA. J. (mai 1998)** Nouveau guide du béton et de ses constituants. Huitième Edition EYROLLES.
- [24] **KADJOUR NASR-EDDINE.** Propriétés et pathologie du béton. Office des publications universitaires.
- [25] **ROSSI. P. (Mars - Avril 1991),** Formulation et comportement mécanique des bétons de fibres métalliques, Annales de l'ITBTP.
- [26] **DREUX. G.** Composition des bétons. Technique de l'ingénieur. C 2 220.
- [27] **Chanvillard, Gilles (1999),** Connaissances générale sur le matériau béton / Gilles Chanvillard.
- [28] **STEVEN H. KOSMATKA, BEATRIX KERKHOFF, WILLIAM C. PANARESE NORMAND F. MACLEOD et RICHARD J. MCGRATH** « Dosage et contrôle des mélanges de béton » 7^{ème} édition canadienne 2004.
- [29] **BERTHOLLET A. (Octobre 2003)** « Modélisation du mécanisme du fluage tertiaire par observation de l'effet de vitesse sur le comportement du béton. » XXI èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil-Prix « René HOUPERT. ». p. 31-38.
- [30] **NF EN 196-6 (Août 1990)** Méthodes d'essais des ciments-Détermination de la finesse (Indice de classement : P 15-476).
- [31] **NF EN 196-3 (Août 1995)** Méthodes d'essais des ciments-Détermination du temps de prise et de stabilité (Indice de classement : P 15-473).
- [32] **NF P 18-560 (Sep 1990)** Granulats-Analyse granulométrique par tamisage.
- [33] **NF P18-554 (déc.1990)** Granulats-Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et teneur en eau des gravillons et cailloux.

- [34] **NF P18-555 (déc.1990)** Granulats-Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et teneur en eau des sables.
- [35] **Daniel L., Loukili A., (2002)** « Behavior of High-Strength Fiber-Reinforced Concrete Beams under Cyclic Loading », ACI Structural Journal, V. 99, No. 3, pp. 248-256.
- [36] **Chaid R. et al.,** « Effet des déchets de poudre de marbre sur la durabilité des bétons en milieu sulfatique », Conférence « MATERIAUX 2010 », El-Mahdia-Tunisie, 4-7 novembre 2010.
- [37] **NF P 18-451 (déc.1981)** Bétons-Essai d'affaissement.
- [38] **NF P18-353 (1985)** - Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis-Mesure du pourcentage d'air occlus dans un béton frais à l'aéromètre à béton.