

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de recherche scientifique

المركز الجامعي بالحاج بوشعيب لعين تموشنت

Centre universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent

Institut de technologie

Département de Génie Civil



Mémoire pour l'Obtention du diplôme de Master

Filière : GENIE CIVIL

Spécialité : STRUCTURE

Thème

Étude de la durabilité du béton pouzzolanique fibré.

Présenté Par :

- MERABET Ikram
- SAHRAUOI Chahinez

Devant les jurys composés de :

Mlle. BENDOUINA

Mme .DERBAL

Mr. DJELIL

C.U.B.B (Ain Témouchent) Présidente

C.U.B.B (Ain Témouchent) Encadreur

C.U.B.B (Ain Témouchent) Examinateur

*Année universitaire
2019/2020*

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي
خَلَقَ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضَ
وَالَّذِي يُضَوِّبُ الْمَوْتِ
وَالَّذِي يُضَوِّبُ الْمَوْتِ
وَالَّذِي يُضَوِّبُ الْمَوْتِ

Le remerciement

Toute notre gratitude et remerciement vont à « ALLAH » le tout puissant qui nous a donné, la patience, le courage et la force pour élaborer ce travail.

Nous adressons une particulière reconnaissance et un profond remerciement a notre encadrant Mme: DERBAL AHLEM Pour son aide, ses conseils, son orientation et son encouragement.

Nous exprimons nos sincères remerciements au membre de jury qui nous font l'honneur de présider et d'examiner ce modeste travail.

On tient à dire un grand merci aux ingénieurs du laboratoire Matériaux des constructions du C.U.B.B.A.T. Mr KEDDOU Adel et Mme OUMRI Kawter pour leurs aides.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude A Mr MANAA Ghali et A tout le personnel du Laboratoire des Travaux public du ouest LTPO (AINE TEMOUCHENT).

Nous remercions Monsieur SHAHRAOUI ABDELKADER pour son aide au concassage de la pouzzolane.

Merci a tous ceux qui ont participé de près ou de loin a la réalisation de ce travail.

Merci

Je dédie ce modeste travail a :

A mon précieux don du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père ABD ALLAH.

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non a mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse : mon adorable mère HALIMA.

Aux personnes que j'aime tant qui m'ont soutenu tout au long de ce projet : mes chères sœurs et surtout FEIZA, qui était mon modèle dans la vie, A mon frère FODIL.

A mon beau frère MOHAMED et mon adorable neveu RAYENOU.

A tout mes meilleurs amis : BASMA, RAWENE et ma copine depuis l'enfance AMEL.

A mon amie et binôme CHAHINEZE pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

Merci pour leurs amours et leurs encouragements.

MERABET Ikram

Dédicace

A ma très chère mère MERIEM

*Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier
comme il se doit. Ton affection me couve, ta bienveillance me guide et ta
présence à mes cotés a toujours été ma source de force pour affronter les
différents obstacles.*

A mon très cher père ABDEL KADER

*Tu as toujours été à mes cotés pour me soutenir et m'encourager. Que
ce travail traduit ma gratitude et mon affection.*

A mes très chers frère et sœur Yacine et Rania.

*A mes très chères amies et à l'ensemble des étudiants de la promotion
master*

A mon binôme IKRAM et tout sa famille

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

Puisse Dieu vous donne sante, bonheur, courage et surtout réussite

CHAHINEZ SAHRAOUI

Résumé :

La durabilité des bétons dépend de plusieurs paramètres et beaucoup plus de la porosité, cette dernière conditionne le degré des réactions du béton avec les agents agressifs.

Dans cette étude, on s'intéresse à l'élaboration d'un béton léger à base de granulats pouzzolaniques. L'incorporation de la pouzzolane comme des agrégats dans les formulations de BLP étudiées est dans le but d'améliorer la résistance chimique et mécanique des BLP dans les milieux agressive. Pour cela on s'est intéressé à l'étude du comportement des granulats pouzzolanique vis à vis des attaques chimiques.

Dans ce cadre, des séries de bétons légers a base de granulats pouzzolaniques on étés confectionnées en ajoutant trois types de fibres: métalliques, polypropylènes et polyéthylènes. Les éprouvettes prismatiques en bétons de dimensions de $4 \times 4 \times 16 \text{cm}^2$ ont été préparées selon la norme européenne EN 196-1 puis conservées dans l'eau saturée en chaux jusqu'à l'âge de 28 jours, ensuite elles ont été placées dans des solutions d'acide sulfurique (H_2SO_4), de sel (Na Cl) avec une concentration de 5% pour chaque milieu et dans l'eau de mer.

Enfin, l'évolution de la dégradation des bétons légers à base des granulats pouzzolaniques était suivie à l'aide des essais de perte de masse.

Mots clés : durabilité, Béton léger, fibres, Granulats pouzzolanique, attaques chimiques. L'acide sulfurique. L'eau de mer. Le sel.

Abstract:

The durability of concrete depends on several parameters and much more on porosity, the latter conditions the degree of reactions of concrete with aggressive agents.

In this study, we are interested in the development of a lightweight concrete based on pozzolanic aggregates. The incorporation of pozzolan as aggregates in the formulations of BLP studied is in order to improve the chemical and mechanical resistance of BLP in aggressive media. For this we were interested in the study of the behavior of pozzolanic aggregates with respect to chemical attacks.

In this context, series of lightweight concrete based on pozzolanic aggregates have been made by adding three types of fibers: metallic, polypropylenes and polyethylenes. The concrete prism specimens with dimensions of $4 \times 4 \times 16$ cm were prepared according to European standard EN 196-1 and then stored in water saturated with lime until the age of 28 and 60 days, then they were placed in solutions of sulfuric acid (H_2SO_4), salt (Na Cl) with a concentration of 5% for each medium and in sea water.

Finally, the evolution of the degradation of lightweight concretes based on pozzolanic aggregates is observed using mass loss tests.

Keywords: Durability, Lightweight concrete, fibers, Pozzolanic aggregates, Chemical attacks. Sulfuric acid. Seawater. Salt.

ملخص:

تعتمد متانة الخرسانة على العديد من المعلمات وأكثر من ذلك بكثير على المسامية، حيث تحدد الأخيرة درجة تفاعلات الخرسانة مع العوامل العدوانية. في هذه الدراسة، نحن مهتمون بتطوير خرسانة خفيفة الوزن تعتمد على الركام البوزولاني. إن دمج البوزولان كمجموعات في تركيبات BLP المدروسة هو من أجل تحسين المقاومة الكيميائية والميكانيكية لـ BLP في الوسائط العدوانية. لهذا كنا مهتمين بدراسة سلوك المجاميع البوزولانية فيما يتعلق بالهجمات الكيميائية.

في هذا السياق، تم صنع سلسلة من الخرسانة خفيفة الوزن على أساس الركام البوزولاني عن طريق إضافة ثلاثة أنواع من الألياف: المعدنية والبولي بروبيلين والبولي إيثيلين. تم تحضير العينات الخرسانية المنشورية بأبعاد $16 \times 4 \times 4$ سم 2 وفقاً للمواصفة الأوروبية EN 196-1 ثم تخزينها في ماء مشبع بالجير حتى عمر 28 و 60 يوماً ثم وضعها في محاليل حامض الكبريتيك (H_2SO_4) والملح (Na Cl) بتركيز 5% لكل وسط وفي مياه البحر. أخيراً، تمت ملاحظة تطور تحلل الخرسانة خفيفة الوزن بناءً على الركام البوزولاني باستخدام اختبارات فقدان الكتلة.

الكلمات المفتاحية: المتانة، الخرسانة خفيفة الوزن، الألياف، الركام البوزولاني، الهجمات الكيميائية. حامض الكبريتيك. الملح. مياه البحر.

Liste des notations

Es : équivalent de sable

h1 : hauteur de sable propre seulement

h2 : hauteur de sable propre et élément fins

Mf : Module de finesse.

η : la porosité.

d/D : granulométrie

E/C : Rapport massique eau/ciment.

Ab(%) : Le coefficient d'absorption.

PZ : Pouzzolane naturelle.

H₂SO₄ : acide sulfurique.

Na CL : le sel

BLP : béton léger pouzzolanique

BT : béton témoin

BFM : béton avec fibre métallique

BFP : béton avec fibre de polypropylène

BFE : béton avec fibre polyéthylène

PM: Perte de masse

Sommaire

Introduction Général :.....	1
1. Chapitre 01 : Généralités sur les bétons	3
1.1 Introduction :.....	3
1.2 L’histoire du béton.....	3
1.3 Les types de béton :.....	4
1.3.1 Le béton léger :	4
1.3.2 Le béton lourd :.....	4
1.3.3 Le béton armé :	4
1.3.4 Le béton auto plaçant :.....	5
1.3.5 Le béton fibré :	5
1.3.6 Le béton prêt à l’emploi :	5
1.3.7 Le béton précontraint :.....	5
1.3.8 Le béton de ciment alumineux :	6
1.3.9 Le béton haut performance :.....	6
1.3.10 Le béton projeté :	6
1.4 Les composants d’un béton:.....	6
1.4.1 Le ciment :	7
1.4.1.1 Définition :.....	7
1.4.1.2 La fabrication du ciment :.....	7
1.4.2 Les granulats :.....	8
1.4.2.1 Définition:.....	8
1.4.2.2 Le rôle de granulat :.....	8
1.4.2.3 Classification des granulats selon la provenance :	9
1.4.2.4 Classification des granulats selon la grosseur :	10
1.4.2.5 Désignation des granulats :	11
1.4.2.6 Caractéristiques physiques:.....	11
1.4.2.7 Caractéristiques chimiques	12

1.4.3	Gravier :	12
1.4.3.1	Définition :	12
1.4.3.2	Les critères de choix:	13
1.4.4	Le sable :	13
1.4.4.1	Définition :	14
1.4.5	Eau de gâchage :	14
1.4.5.1	Dosage en eau :	15
1.4.6	Les adjuvants :	15
1.4.7	Les ajouts :	16
1.5	Propriétés du béton	17
1.5.1	Béton frais :	17
1.5.2	Béton durci :	18
1.6	Conclusion :	19
2.	Chapitre 02 : durabilité des bétons	19
2.1	Introduction :	19
2.2	Notion sur la durabilité	20
2.3	Les paramètres de la durabilité du mortier :	20
2.3.1	La porosité :	20
2.3.1.1	Définition :	20
2.3.1.2	<i>Effet du rapport Eau/Ciment (E/C) sur la porosité effectif</i> :	21
2.3.1.3	<i>Effet de la porosité effective</i> :	21
2.3.2	La perméabilité :	23
2.3.2.1	Paramètres influençant la perméabilité :	23
2.3.3	La diffusivité :	24
2.3.3.1	Définition :	24
2.3.3.2	Valeurs de diffusivité de quelques matériaux :	24
2.4	L'absorption :	24
2.5	Les attaques chimiques des bétons.....	25
2.5.1	Attaque chimique par différents milieux agressifs :	25

2.5.2	Attaques des acides.....	25
2.5.2.1	Définition :.....	25
2.5.2.2	Les différents types des acides :.....	26
2.5.2.3	Mécanisme d'attaque.....	27
2.5.2.4	Sources des acides.....	28
2.5.3	Attaques du béton par les sulfates	28
2.5.3.1	Définition	28
2.5.3.2	Mécanisme d'attaque.....	29
2.5.3.3	Les sources des sulfates :	29
2.5.3.4	Facteurs contrôlant la résistance aux sulfates du béton.....	30
2.5.3.5	Processus d'attaque par les sulfates internes :	31
2.5.3.6	Processus d'attaque par les sulfates externes :	32
2.5.3.7	Mesures de préventions contre les ions sulfates :.....	33
2.5.4	Action des sels :.....	33
2.5.5	L'ATTAQUE PAR L'EAU DE MER	34
2.5.5.1	Mécanismes d'attaque par les composants agressifs de l'eau de mer :.....	36
2.5.5.2	Les paramètres contrôlant la durabilité du béton en milieu marin :	36
2.6	Conclusion :	37
3.	Chapitre 03 : le béton fibre.	38
3.1	Introduction :.....	38
3.2	Généralités :	38
3.3	Historique du béton de fibres	39
3.4	Les fibres :.....	40
3.4.1	DIFFERENTES NATURE DE FIBRES	41
3.4.1.1	Fibres naturelle :.....	41
3.4.1.2	Fibres minérales :	42
3.4.1.3	Fibres organique :.....	44
3.4.1.4	Fibres Métallique :.....	45
3.5	Le role des fibres dans le béton :.....	46
3.6	Caractéristiques du béton fibré :	47

3.7	TECHNOLOGIE DE FABRICATION DES BÉTONS DE FIBRES	48
3.7.1	Granulométrie :	48
3.7.2	Malaxage :	49
3.7.3	Mise en œuvre :	49
3.7.4	Propriétés mécaniques des bétons fibrés :	50
3.8	Conclusion :	50
4.	Chapitre 04 : Durabilité de béton a base de pouzzolane.....	51
4.1	Introduction :.....	51
4.2	Historique.....	51
4.3	Définition	52
4.4	Types de pouzzolane.....	53
4.4.1	Pouzzolanes artificielles	54
4.4.1.1	Cendres volantes	54
4.4.1.2	Laitier granulé de haut fourneau (LGHF).....	56
4.4.1.3	Argiles calcinées	57
4.4.1.4	Fumée de silice	58
4.5	Effet de La pouzzolane	59
4.5.1	A l'état frais.....	59
4.5.2	A l'état durci.....	59
4.6	Propriété de la pouzzolane	60
4.6.1	Propriétés hydrauliques	60
4.6.2	Propriétés physiques de remplissage	60
4.6.3	L'utilisation des ajouts en Algérie :.....	60
4.7	Evaluation de l'activité pouzzolanique :.....	61
4.8	Domaine d'utilisation de la pouzzolane :.....	62
4.9	Conclusion :	63
5.	Chapitre 05 : Matériaux utilisé et méthodes d'essais	63

5.1	Introduction :	63
5.2	Matériaux utilisés	63
5.2.1	Préparation de l'échantillon de la pouzzolane	63
5.2.2	Ciment	63
5.2.2.1	Composition du ciment :	63
5.2.3	Granulats pouzzolaniques	64
5.2.4	L'adjuvant	65
5.2.5	Eau de Gâchage :	66
5.2.6	Fibres :	67
5.3	Méthodes d'essais	68
5.3.1	Masse volumique apparent des granulats et ciments :	68
5.3.2	Masse volumique absolue :	69
5.3.2.1	Définition :	69
5.3.2.2	But de l'essai :	69
5.3.2.3	Conduite de l'essai :	69
5.3.3	Equivalant de sable :	70
5.3.3.1	But de l'essai :	70
5.3.4	Analyse granulométrique	71
a.	But de l'essai Analyse granulométrique	72
b.	Matériel nécessaire :	72
5.3.4.1	Analyse granulométrique de la pouzzolane (0/5) :	73
5.3.4.2	Analyse granulométrique de la pouzzolane (sable fine) :	74
	Module de finesse(Mf) :	76
5.3.5	Essai de perméabilité de Blain	77
5.3.5.1	But de l'essai :	77
5.3.5.2	Principe :	77
5.3.5.3	Calcul :	77
5.4	Préparation des éprouvettes :	78
5.4.1.1	Codification du différent type de béton :	79

La composition du mortier:	80
5.5 Préparation des solutions chimique :	80
5.5.1 L'acide sulfurique (H ₂ SO ₄) :	80
5.5.2 L'eau de mer :	81
5.5.3 Le sel.....	82
5.6 Conclusion	83
6. Chapitre 06 : Résultats et discussions.....	84
6.1 Introduction :.....	84
6.2 Les Milieux agressifs :	84
6.3 Essai de la perte de masse :.....	84
6.3.1 Masses des éprouvettes émergées dans l'acide sulfurique H ₂ SO ₄ (acide fort)	
85	
6.3.1.1 Examen visuel.....	88
6.3.2 Milieu Acide sulfurique H ₂ SO ₄ :	89
6.3.3 Masses des éprouvettes émergées dans l'eau de mer :	90
6.3.4 Masse des éprouvettes émergées dans le sel :	93
6.4 Interprétation des résultats :	95
6.4.1 Interprétation des résultats 7 jours:.....	96
6.4.2 Interprétation des résultats 28 jours :	97
6.4.3 Interprétation des résultats 60 jours :	98
6.5 Conclusion :	99

Liste des figures

Figure 1.1: Les composant de ciment.....	7
Figure 1.2:Prévu Construction Chemicals de ciment.....	7
Figure 1.3:les granulats.....	8
Figure 1.4:Différent dimension du granulat.....	10
Figure 1.5 : Le gravier.....	13
Figure 1.6: sable.....	13
Figure 1.7: Eau de gâchage.....	14
Figure 1.8: test du cône d'Abrams.....	17
Figure 2.1: la relation entre la porosité et résistance relative [11].....	21
Figure 2.1: Relation entre le volume de vides et la masse volumique.....	22
Figure 0.2:La détérioration des silos-tours en béton due à l'attaque des acides d'ensilage.	26
Figure 0.3:Les attaques des sulfates sur les armatures et le béton.	29
Figure 0.4:L'attaque par les sulfates.	29
Figure 0.5: L'attaque par les sulfates.	30
Figure 0.6: Influence du dosage en ciment et de la teneur en C3A sur la vitesse de dégradation du béton (16 ans dans Na ₂ SO ₄ à10%)......	31
Figure 0.7: L'attaque sulfatique interne.....	32
Figure 0.8: L'attaque sulfatique externe.....	33
Figure 0.9: représentation schématique des différents processus d'attaque du béton par l'eau de mer [22].....	36
Figure 3.1: fibres de bois.....	41
Figure 3.2: vue au microscope fibres d'amiante.....	42
Figure 3.3:fibres de verre.....	43
Figure 3.4: les Fibres de carbone.....	44
Figure 3.5: les fibres polyamide,PVC,PP.....	45

Figure 3.6:Fibres Métallique	46
Figure 3.7: déformation d'un béton armé de fibres, comparée à celle d'un béton non armé d'après Venuat M.1987).....	47
Figure 3.8:Béton avec fibres sollicité en traction.	47
Figure 3.9: Béton sans fibres sollicité en traction	47
Figure 3.10: Effet de L/D_g sur la structure interne d'une matrice	49
Figure 4.1: Pouzzolane Béni-Saf - Ain Temouchent.....	52
Figure 4.2: Les cendres volantes.	55
Figure 4.3: laitier de haut fourneau.	56
Figure 4.4: Fillers calcaires.	57
Figure 4.5: La fumée de silice.	58
Figure 5.1: Le ciment utilisé CEM-II/AP 42.5	64
Figure 5.2: pouzzolane	65
Figure 5.3:L'adjuvant utilisé	66
Figure 5.4:L'eau de gâchage utilisé.....	66
Figure 5.5: Type des fibres utilisées.....	68
Figure 5.6: Entonnoir et récipient de mesure	69
Figure 5.7: Essai de l'équivalent de sable	71
Figure 5.8: Matériel nécessaire de l'essai Analyse granulométrique	72
Figure 5.9: pouzzolane (0/5).....	73
Figure 5.10:La courbe d'analyse granulométrique du pouzzolane (0/5).....	74
Figure 5.11: pouzzolane (sable fine)	74
Figure 5.12:La courbe d'analyse granulométrique de la pouzzolane (sable fin).....	75
Figure 5.13:Essai de Blain.....	77
Figure 5.14:Malaxage	79
Figure 5.15: éprouvette.....	79

Figure 5.16: L'acide sulfurique (H ₂ SO ₄).....	81
Figure 5.17: le sel	82
Figure 6.1: Préparations des éprouvettes des mortiers	85
Figure 6.2: Conservation des éprouvettes dans des solutions chimiques à 5%	85
Figure 6.3: Evaluation de la Perte et du gain de masse des BLP dans l'acide sulfurique (H ₂ SO ₄)	88
Figure 6.4: Résultat visuel dans le milieu acide sulfurique (H ₂ SO ₄) après prélèvement des éprouvettes dans les bacs de conservation	89
Figure 6.5: Evaluation du gain de masse de BLP dans l'eau de mer	92
Figure 6.6: Evaluation le gain de masse de BLP dans le sel (Na Cl).	95
Figure 6.7: Evaluation de la Perte et du gain de masse des BLP.	96
Figure 6.8: Evaluation de la Perte et du gain de masse des BLP	97
Figure 6.9: Evaluation de la Perte et du gain de masse des BLP.	98

Les listes des tableaux

Tableau 1.1: les caractéristiques des granulats les plus utilisées.....	11
Tableau 1.2: Désignation, abréviations et description des adjuvants.....	15
Tableau 1.3: dosage en ciment basé sur les volumes	18
Tableau 1.4: dosage de ciment basé sur les masses pour 1 m ³ de béton.....	18
Tableau 0.1: Composants du béton menacé par la corrosion.	27
Tableau 3.1 : différent type des fibres (venut M.1983).	40
Tableau 4.1: caractéristique physique de la pouzzolane naturelle [33].....	53
Tableau 4.2: caractéristique chimique de la pouzzolane naturelle [35]	53
Tableau 4.3: Composition chimique type de certaines cendres volantes d'après Aitein. ...	55
Tableau 4.4: Composition chimique de laitiers de haut fourneau.	57
Tableau 4.5 : Composition chimique de certaines fumées de silice	59
Tableau 4.6: Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes [41]	61
Tableau 5.1: Composition chimique du ciment CPJ CEMII /A 42.5	63
Tableau 5.2: Analyse chimique de la pouzzolane.	65
Tableau 5.3: Caractéristique de l'adjuvant.	65
Tableau 5.4: Résultats d'analyse chimique de l'eau.....	67
Tableau 5.5: Résultats d'analyse chimique de l'eau.....	67
Tableau 5.6: Masse volumique apparente	68
Tableau 5.7: Résultats de l'essai d'équivalence de sable.	71
Tableau 5.8: Résultat d'analyse granulométrique pouzzolane (0/5)	73
Tableau 5.9: Résultat d'analyse granulométrique pouzzolane (sable fin).....	75
Tableau 5.10: Codification des bétons.	79
Tableau 5.11: Formulations des bétons.	80
Tableau 5.12: Analyse physico-chimique de l'eau de mer.....	81
Tableau 5.13: Analyse physico-chimique de sel.	83

Tableau 6.1: la Perte et le gain de masse des éprouvettes de BLP sans fibres immergées dans (H ₂ SO ₄).	86
Tableau 6.2 : la Perte et le gain de masse des éprouvettes de MLP avec fibres métalliques émergées dans l'acide sulfurique.	86
Tableau 6.33 : la Perte et le gain de masse des éprouvettes de BLP avec fibres polypropylènes émergées dans l'acide sulfurique.	87
Tableau 6.44 : la Perte et le gain de masse des éprouvettes de BLP avec fibres Polyéthylènes émergées dans l'acide sulfurique.	87
Tableau 6.5: la Perte et le gain de masse des éprouvettes de BLP sans fibres immergées dans L'eau de mer.	90
Tableau 6.6: la Perte et le gain de masse des éprouvettes de MLP avec fibres métalliques émergées dans L'eau de mer.	90
Tableau 6.77 : la Perte et le gain de masse des éprouvettes de BL Pavec fibres polypropylènes émergées dans L'eau de mer.....	91
Tableau 6.8: la Perte et le gain de masse des éprouvettes de BLP avec fibres Polyéthylènes émergées dans L'eau de mer.	92
Tableau 6.99 : la Perte et le gain de masse des éprouvettes de BLP sans fibres immergées dans le sel.	93
Tableau 6.10: la Perte et le gain de masse des éprouvettes de MLP avec fibres métalliques émergées dans le sel.	93
Tableau 6.11: la Perte et le gain de masse des éprouvettes de BLP avec fibres polypropylènes émergées dans le sel.	94
Tableau 6.12: la Perte et le gain de masse des éprouvettes de BLP avec fibres Polyéthylènes émergées dans le sel.....	94

Introduction

Général

Introduction Général :

Les domaines d'application du béton a connu une évolution importante et nécessite des matériaux plus performants et mieux adaptés.

La recherche et l'expérience acquises ont permis de déboucher sur de nouvelles générations de béton permettant l'obtention de construction plus durable, plus rapide, plus résistante et surtout plus économique.

Parmi ces bétons, on peut citer :

- ❖ Les bétons de hautes et très hautes performances.
- ❖ Les bétons légers.
- ❖ Les bétons à prise et à durcissement rapide.
- ❖ Les bétons de fibres.

Vu que le béton est le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction, ce dernier résiste très mal à la traction et à la fissuration.

Parmi les solutions techniques envisagées est l'utilisation du béton fibré.

Et pour cela nous allons voir à quel point le renforcement du béton par des fibres est plus ou moins performant et est-il la solution adéquate pour résoudre ce problème.

Cette étude est des composés en deux parties :

La première partie est une étude bibliographique et elle comprend quatre chapitres :

Le première chapitre présente des généralités sur le béton : l'histoire du béton, Les composants d'un béton, ses propriétés à l'état frais et durci et le dosage pour certaines applications du béton

Le deuxième chapitre est une synthèse d'une recherche bibliographique sur la durabilité du béton et tous les indicateurs concernent cette durabilité.

Le troisième chapitre s'intéresse à la durabilité du béton à base de fibre, toute nature, le rôle des fibres, Les caractéristiques et les propriétés des fibres, sa formulation, ainsi que l'utilisation du béton fibré.

Le quatrième chapitre s'intéresse particulièrement à la durabilité du mortier à base de pouzzolane.

La deuxième partie est une étude expérimentales elle comprend deux chapitres

Le cinquième chapitre comprend la présentation des matériaux utilisés dans la formulation des bétons et leurs caractéristiques, les méthodes d'essais et techniques expérimentales.

Le sixième chapitre exécute les résultats des essais et les interprétations et finalement une conclusion générale qui résume ce travail.

Chapitre 1:

Généralités
Sur
Les bétons

1. Chapitre 01 : Généralités sur les bétons

1.1 Introduction :

Le béton est aujourd'hui le matériau le plus utilisé dans le monde, plus que tous les autres matériaux réunis. Sans le béton, on ne pourrait pas réaliser ce qu'on construit aujourd'hui en matière de logement, d'écoles, d'hôpitaux et d'infrastructures. A la fois robuste et universel, l'ampleur et l'étendue de ses performances mécaniques et physiques augmentent sans cesse, et sa formulation, jusqu'aujourd'hui très empirique, est en passe de devenir une démarche rationnelle, avec des outils d'ingénieurs construits sur des bases scientifiques qui font appel à toutes les disciplines qui entrent dans ce qu'on appelle la Science des matériaux.

Le béton est un matériau artificiel obtenu en mélangeant en proportions convenables et de manière homogène, du ciment (liant), un granulats (sable + gravier), de l'eau et éventuellement des adjuvants.

Le liant peut être « hydraulique » (car il fait prise par hydratation ; ce liant est couramment appelé ciment) ; on obtient dans ce cas un béton de ciment. On peut aussi utiliser un liant hydrocarboné (bitume), ce qui conduit à la fabrication du béton bitumineux.

Le coulis est un mélange très fluide de ciment et d'eau. Enfin, lorsque les granulats utilisés avec le liant hydraulique se réduisent à des sables, on parle alors de mortier.

La réaction chimique qui permet au béton de ciment de faire prise est lente : à peine 50% de la résistance mécanique finale au bout de 7 jours. La valeur prise comme référence dans les calculs de résistance est celle obtenue à 28 jours (80% de la résistance finale).

Il est possible de modifier (accélérer ou, au contraire, retarder) la vitesse de prise en incorporant au béton frais des adjuvants (additifs). Il existe d'autres types d'adjuvants qui permettent de modifier certaines propriétés physico-chimiques des bétons.[1]

1.2 L'histoire du béton

A l'époque Romaine, les romains utilisaient déjà ce que l'on appelle aujourd'hui « le béton ». Et de nombreux bâtiments sont encore sur pied à ce jour pour en témoigner.

En France, c'est au XIXe siècle que se développent les premières cimenteries qui assureront plus tard la réussite du béton.

C'est un jardinier (Joseph Monier) ne manquant pas d'imagination qui va inventer le ciment armé (avec du métal) destiné à la conception de jardinières, tuyaux ou encore réservoirs à eau.

François Hennebique à lui aussi été important dans l'histoire du béton. Il est à l'origine du premier immeuble en béton aggloméré à Paris en 1867, de la première dalle en béton de ciment armé de fers ronds en 1880, des poutres creuses en béton armé moulées en 1892 puis du pilote en béton armé à ligatures rapprochées en 1896.

Et c'est à Eugène FREYSSINET que revient le titre d'inventeur du béton précontraint en 1929. Une petite révolution dans le monde de la construction.

Au XXe siècle, le béton se développe de plus en plus et on voit apparaître plusieurs innovations telles que le béton prêt à l'emploi, le béton à poudres réactives, le béton allégé, celui contenant des câbles d'acier en tension... On remarque aussi que les adjuvants sont de plus en plus utilisés dans la composition du béton.

A la fin des années 80, arrivent successivement sur le marché les « Bétons Hautes Performances (BHP) », les « Bétons Autoplaçants (BAP) » et les « Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances (BFUHP) ».

De nos jours, la famille des bétons ne cesse de s'agrandir avec de plus en plus d'innovations comme par exemple le béton à base d'argile. [2]

1.3 Les types de béton :

1.3.1 Le béton léger :

Le béton léger est un béton très malléable et très léger. Il est efficace pour tous les travaux de rénovation. Il résiste aux chocs et remplit très bien sa mission d'isolant thermique. Le béton léger s'emploie particulièrement pour les murs porteurs et les dalles.

1.3.2 Le béton lourd :

Le béton lourd dispose de granulats très lourds, ce qui permet de répondre à des besoins très précis tels que les ouvrages des centrales nucléaires. L'emploi de ce béton permet de ne laisser passer aucune trace de radiation et de répondre à des normes très strictes de sécurité.

1.3.3 Le béton armé :

Le béton armé reprend les codes du béton pour fondation traditionnelle, mais auquel il est rajouté un nouveau matériau : l'acier. En posant des armatures de cette matière, la solidité

d'une fondation en béton est renforcée. En effet, l'acier est un matériau très résistant aussi bien lorsqu'il est tracté ou comprimé.

Le principal objectif de ce béton est de compenser les principales faiblesses d'un béton plus conventionnel, à savoir sa résistance globale, et les risques de fissuration sur le plus long terme.

1.3.4 Le béton auto plaçant :

Le béton auto plaçant est un béton extrêmement fluide, facilitant grandement son utilisation. Avec ce béton, le but est de gagner un temps considérable lors du coulage sur chantier, car la mise en œuvre se fait sans vibration, contrairement aux bétons plus conventionnels.

Pour autant, une fois le béton solidifié, sa qualité reste la même que sur un béton traditionnel.

1.3.5 Le béton fibré :

Le béton fibré a le même objectif que le béton armé : renforcer la solidité générale de la fondation réalisée. La fibre a le même principe actif que l'armature utilisée sur le béton armé : elle limite les risques de fissuration du béton et améliore sa résistance sur le long terme.

L'avantage de la fibre, c'est également sa grande facilité de mise en œuvre sur chantier, assurant un gain de temps certain lors du coulage.

1.3.6 Le béton prêt à l'emploi :

Les bétons prêts à l'emploi sont des bétons directement conçus par les industriels dans leurs centrales à béton. Il est ensuite transporté à l'aide d'un camion toupie et directement transféré sur les chantiers clients. Une fois sur place, le béton prêt à l'emploi est appliqué par le camion toupie, soit par la pompe à béton, soit par la goulotte.

1.3.7 Le béton précontraint :

Le béton précontraint est un béton ayant la particularité de rester dans un état de compression optimal. Cet état de compression permet au béton d'être utilisé dans les meilleures conditions, ce qui favorise une meilleure finition.

Cet état de pression est construit à partir de câbles de précontrainte en acier, intégrés directement dans le béton comme cela est le cas avec les armatures en acier dans le béton armé. Sur un chantier, il est possible d'appliquer la précontrainte au béton avant le coulage du béton (pré-tension), ou bien après le coulage lorsque le béton durcit (post-tension).

Il est important de préciser que la précontrainte par post-tension est généralement plus efficace mais aussi plus difficile à mettre en œuvre que la précontrainte par pré-tension.

1.3.8 Le béton de ciment alumineux :

Le béton de ciment alumineux, se compose comme son nom l'indique de ciment alumineux. Ce type de ciment, à base d'aluminate de calcium, apporte différents avantages au béton : la prise est plus rapide, et la résistance est plus importante sur le long terme et également vis-à-vis des fortes chaleurs.

1.3.9 Le béton haut performance :

Les bétons de haute-performance possèdent des caractéristiques beaucoup plus intéressantes que les bétons conventionnels. Ils sont à la fois plus résistants à la compression, et beaucoup plus fluides. Il s'agit également d'un béton moins poreux, protégeant ainsi plus efficacement les armatures préalablement déposées.

1.3.10 Le béton projeté :

Il s'agit d'un béton qui porte bien son nom, car il est volontairement projeté sur une surface solide par le biais d'un projecteur d'air comprimé. Le but est de limiter l'affaissement et le coulage ultérieur du béton. En termes de composition, le béton projeté dispose de caractéristiques similaires au béton pour les fondations plus traditionnelles.

1.4 Les composants d'un béton:

Le béton est un mélange de plusieurs composants : ciment, eau, sable, gravier et le plus souvent, adjuvants qui constituent un ensemble plus ou moins homogène. Les composants sont très différents : les masses volumiques dans les bétons courants varient de 1 t/m³ (pour l'eau) à 3 t/m³ (pour ciment); les dimensions de leurs grains varient de 0.5 μm (grains du ciment) à 25 mm (gravillons).[3]

1.4.1 Le ciment :

1.4.1.1 Définition :

Le ciment est un liant, une matière pulvérulente, formant avec l'eau ou avec une solution saline une pâte homogène et plastique, capable d'agglomérer en durcissant, des substances variées appelées « agrégat » ou « granulat ». Après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau.

1.4.1.2 La fabrication du ciment :

Pour fabriquer du ciment Portland, on fait cuire à température très élevée (1450°C), dans un four rotatif, un mélange de pierre calcaire broyée et d'argile (ou de matériaux similaires). La pierre calcaire fournit la chaux, et l'argile fournit principalement la silice et l'alumine. Le produit obtenu à la sortie du four s'appelle clinker. Le ciment Portland est ensuite fabriqué en ajoutant au clinker pulvérisé (grosueur des particules varie à peu près entre 1 et 80µm) une faible quantité (5%) de gypse. La description sommaire de la fabrication du ciment est illustrée dans la figure.[4]

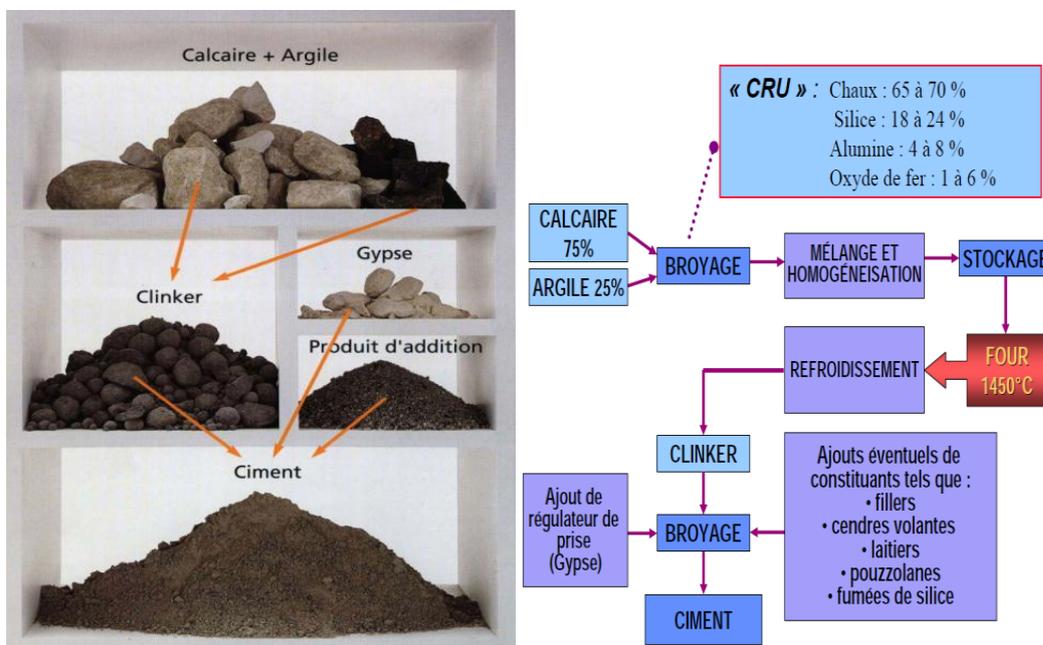


Figure 1.1: Les composants de ciment

Figure 1.2: Prévu Construction Chemicals de ciment

1.4.2 Les granulats :

1.4.2.1 Définition:

On appelle granulats des matériaux pierreux de petites dimensions, produits par l'érosion ou le broyage mécanique (concassage) des roches. Ce sont des matériaux inertes entrant dans la composition des bétons et mortiers. Ils constituent le squelette du béton et ils représentent, environ 80 % du poids total du béton. Ils sont constitués de sables (Gros et Fin) et de gravier. Cependant, les granulats doivent satisfaire à certaines exigences de qualité pour qu'ils soient utilisés dans le béton. Il y a deux Intérêts d'utiliser des granulats dans le béton : le 1er économique : Diminution de la quantité de liant (ciment et addition); et le 2eme technique : Limitent les variations dimensionnelles dans le béton (les granulats sont plus rigide que la pâte de ciment).



Figure 1.3:les granulats

1.4.2.2 Le rôle de granulat :

Le rôle des granulats dans un mélange de béton est de permettre de produire un matériau ayant une résistance et une durabilité appropriées avec le moindre coût possible. La maniabilité (l'ouvrabilité) des bétons dépend grandement des caractéristiques des granulats dont les principales sont:

- la granulométrie, la texture de surface des granulats et la forme des particules.
- la résistance mécanique (compression, traction et module).
- La densité relative, la masse volumique.

- l'absorption, la porosité et la teneur en humidité.
- la présence de matières nuisibles.
- la résistance aux cycles de gel et dégel.
- la résistance à l'abrasion et aux chocs.

1.4.2.3 Classification des granulats selon la provenance :

a. Granulats naturels :

- **Granulats roulés :**

Ils sont les résultats de la désagrégation des roches par l'eau, le vent ou le gel.

Ainsi ils se sont formés des dépôts sédimentaires de grains de grosseur allant du sable fin aux gros blocs, de natures minéralogiques différentes.

Trois catégories de granulats roulés existent dans la nature :

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

Les granulats roulés se caractérisent par leur aspect de **grains arrondis et polis**.



- **Granulats concassés (de carrières) :**

Ils proviennent du concassage de roches dures (granits, porphyres, basaltes, calcaires durs...etc.). Ils sont caractérisés par un aspect anguleux à arrêtes vives.



b. Granulats artificiels :

Ils proviennent de la transformation thermique des roches (exemple : laitier du haut fourneau) ou de démolition d'ouvrages.

1.4.2.4 Classification des granulats selon la grosseur :

Selon leurs dimensions on distingue : les sables, les graviers, les cailloux, les galets et les moellons. Les dimensions sont celles de la série de base préconisée par la norme européenne (NF EN 933-2).

On distingue les familles de granulats suivantes :

- fillers d/D où $D < 2$ mm avec au moins 70 % de passant à 0,063 mm ;
- sablons d/D où $D < 1$ mm avec moins de 70 % de passant à 0,063 mm ;
- sables d/D où $1 < D < 6,3$ mm ;
- graves d/D où $D > 6,3$ mm ;
- gravillons d/D où $d > \text{let } D < 125$ mm ;
- ballasts d/D où $d > 25$ mm et $D < 50$ mm.



Figure 1.4: Différent dimension du granulat

1.4.2.5 Désignation des granulats :

Les granulats sont souvent désignés en fonction de leur plus petite et leur plus grande dimension comme suit :

- *Granulat d/D* : sable ou gravier.
- *d* : dimension minimale des grains.
- *D* : dimension maximale des grains.

Tableau 1.1: les caractéristiques des granulats les plus utilisées

Les granulats les plus utilisée		
familles	dimensions	caractéristique
Filles	d/D	$D \leq 2$ mm avec au moins 85% de passant à 1,25 mm et 70% de passant à 0,063
Sables	d/D	$d=0$ et $D \leq 4$ mm
Graves	d/D	$D \geq 6,3$ mm
Gravillons	d/D	$d \geq 2$ mm et $D \leq 63$ MM
ballasts	d/D	$d= 31,5$ mm et $D=50$ ou 63 mm

1.4.2.6 Caractéristiques physiques:

Les caractéristiques physiques sont :

- La résistance à la fragmentation, mesurée par la méthode d'essai Los Angeles (LA).
- La résistance aux chocs (SZ).
- La résistance à l'usure, mesurée par la méthode d'essai « micro-Deval humide » (MDE).
- La résistance au polissage, mesurée par le « coefficient de polissage accéléré » (PSV).
- La masse volumique réelle, et le coefficient d'absorption d'eau.
- La masse volumique en vrac, nommée aussi masse volumique apparente.

- La résistance à l'alternance gel-dégel.
- La stabilité volumique au séchage.

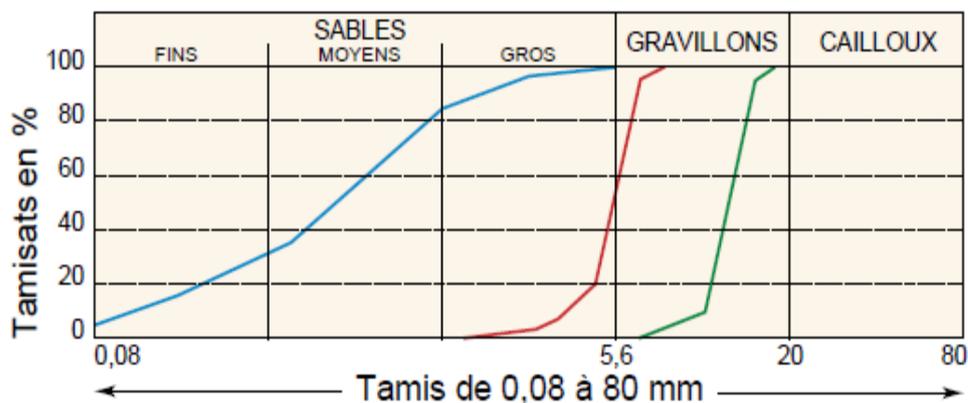
1.4.2.7 Caractéristiques chimiques

Les caractéristiques chimiques sont :

- La teneur en chlorures.
- La teneur en composés contenant du soufre.
- La teneur en alcalins (sodium, potassium).

Quelques propriétés de la granulométrie tirées des courbes granulométriques :

Ci-dessus quelques courbes granulométriques typiques de sable, gravillons et cailloux.[5]



1.4.3 Gravier :

1.4.3.1 Définition :

Grains de dimensions allant de 1 à 125 mm, d'après la norme P18-591, que l'essai de propreté des graviers consiste à déterminer le pourcentage d'éléments $< D \leq 6,3$ mm, d'après la norme P18-598, que l'essai d'équivalent de sable (ES), les sables ayant un ES compris entre 75 et 85%, de granularité définies principalement par les paramètres suivants:

- Teneur en fines (passant à $0,08\text{mm} \leq 12\%$) -Module de finesse ($M_f = 1,8$ à $3,2$)
- Bonne continuité de la courbe granulométrique est nécessaire pour la maniabilité du béton suivant la norme P18-541.[3]



Figure 1.5 : Le gravier

1.4.3.2 Les critères de choix:

De nombreux critères permettent d'effectuer le bon choix de gravier :

- **l'utilisation** : disposer un tapis de graviers autour d'un arbre pour le décorer ne requiert pas le même gravier que pour réaliser une aire de stationnement pour la voiture devant le garage. Chaque type de gravier est en effet plus ou moins adapté à une utilisation précise.

- **la granulométrie** : elle est directement liée à l'utilisation du gravier. Plus le gravier est utilisé à des fins décoratives, plus la granulométrie peut être faible (entre 1 et 10 mm). En revanche, pour une allée carrossable, mieux vaut s'orienter vers une granulométrie supérieure à 10 mm.

1.4.4 Le sable :



Figure 1.6: sable

1.4.4.1 Définition :

On définit les sables comme étant la fraction des granulats pierreux dont les grains ont des dimensions comprises entre $80\mu\text{m}$ et $05\mu\text{m}$; il s'agit d'une définition globale, dont les bornes varient d'une classification à une autre. Ce matériau dont le diamètre maximal est inférieur à 6.3 mm et dont le passant à $80\mu\text{m}$ n'excède pas 30% dans le sens le plus courant, on entend par « sable » les éléments de dimension 0 à 5 mm , les fillers non compris. Les sables utilisables sont ceux conformément aux définitions des normes NFP 18-541 ($E_s \geq 75$ si le sable est roulé et $E_s \geq 65$ s'il est broyé). Il peut s'agir d'un sable alluvionnaire, de ballastière ou de concassage 0/d.

Les sables peuvent être classés, selon leurs provenances comme suit:

- **Sable de rivière:** il est obtenu par dragage des lits des cours d'eau. Il doit être dur et propre pour qu'on puisse l'utiliser dans les bétons.
- **Sable de mer :** il provient des côtes de la mer. Pour l'utiliser dans les bétons, il faut qu'il ne soit pas trop fin et qu'il soit lavé de son sel.
- **Sable de carrière:** Il contient souvent de l'argile qui enrobe les grains et les empêche d'adhérer aux liants. Il est donc à proscrire.

1.4.5 Eau de gâchage :

Nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier.



Figure 1.7: Eau de gâchage

Attention : un excès d'eau diminue les résistances et la durabilité du béton.

L'eau doit être propre ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient toujours. Le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé. Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme NF EN 1008. [6]

1.4.5.1 Dosage en eau :

Le dosage en eau est un facteur très important de la composition du béton. On ressent bien l'influence qu'il a sur la porosité du béton par les vides créés, lorsque l'eau s'élimine pour différentes raisons (évaporation, combinaison chimique, absorption par les granulats).

Par exemple, avec un E/C, couramment utilisé, de 0.55, on estime que la moitié de l'eau de gâchage sert à l'hydratation du ciment, l'autre moitié est une eau de mouillage interstitielle qui contribue à la plasticité du béton requise pour sa mise en œuvre. Ce schéma est modifié par l'emploi croissant d'adjuvants contribuant à améliorer la plasticité sans nécessiter une présence d'eau en excès, nuisible aux caractéristiques finales du béton durci.

1.4.6 Les adjuvants :

Sont ajoutés au béton en général sous forme liquide. Ils influent par leurs effets chimiques et/ou physiques sur les propriétés du béton. Selon le type d'adjuvant utilisé, il est possible de modifier de manière ciblée tant les propriétés du béton frais, p. ex.

Le temps de prise et l'ouvrabilité, que les caractéristiques du béton durci, telles que la résistance à la compression et la durabilité.[7]

Tableau 1.2: Désignation, abréviations et description des adjuvants.

Désignation	Abréviation	Effet
Plastifiant	BV	réduit la demande en eau et/ou augmente l'ouvrabilité
Fluidifiant	FM	réduit fortement la demande en eau et/ou augmente l'ouvrabilité
Entraîneur d'air	LP	création de fines bulles d'air uniformément réparties pour augmenter la résistance au gel/dégel avec sels de

		déverglaça gé
retardateur de prise	VZ	retarde le temps de début de prise (bétonnage par temps chaud)
Accélérateur de prise	SBE	diminue le temps de début de prise après le malaxage
Accélérateur de durcissement	HBE	augmente la vitesse de développement des résistances initiales du béton, avec ou sans modification du temps de prise
Modificateur de viscosité	VMA	limitation de la ségrégation par l'amélioration de la cohésion du béton
Hydrofuge	DM	réduit l'absorption capillaire du béton durci

1.4.7 Les ajouts :

Les ajouts du béton sont des matières fines qui, généralement, sont ajoutées au béton en grandes quantités (souvent entre 5 et 20 % du dosage en ciment). De nombreux ajouts sont déjà mélangés au ciment à la cimenterie, car les matériaux pré mélangés peuvent être répartis plus uniformément dans le béton. De plus, l'action d'un ajout ne doit pas dépendre de la façon dont le produit est introduit dans le béton.

Les ajouts servent à influencer sur certaines propriétés du béton, par des effets chimiques ou physiques, par exemple :

- propriétés du béton frais (teneur en air, consistance, ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau)
- raidissement, prise et durcissement, pour les ajouts qui interviennent dans le processus réactionnel du ciment avec l'eau.
- propriétés du béton durci (résistances mécaniques et autres, compacité).
- couleur du béton.

1.5 Propriétés du béton

Moulable : c'est-à-dire qu'on peut lui faire prendre facilement des formes volumiques

Simples : une grande variété des formes qu'il peut épouser c'est la Maniabilité.

Durcit : avec le temps le béton doit devenir un matériau dur et relativement indéformable c'est-à-dire mécaniquement résistant.

Compacité : La résistance à la compression d'un béton contenant suffisamment de liant croit avec sa compacité.

Maniabilité et résistance mécaniques sont deux (02) objectifs contraires :

- Eau en excès bonne maniabilité, mauvaise résistance.
- Granulat roulé bonne maniabilité, mauvaise résistance.
- Granulats concassés mauvaise maniabilité, bonne résistance.

Pour réaliser un béton qui réponde aux deux critères, il faut optimiser tous les facteurs.

1.5.1 Béton frais :

Ouvrabilité (ou maniabilité): qualité du béton; qui se traduit par la capacité du béton de bien remplir tous l'espace du coffrage et d'assurer un bon enrobage des armatures. L'ouvrabilité d'un béton est couramment appréciée par le test du cône d'Abrams, ou le béton est mis dans un moule conique, l'affaissement du béton une fois le moule enlever donne une appréciation sur sa maniabilité. La mise en place du béton dans le moule se fait en 4 couches d'épaisseurs égales, piquer à l'aide d'une tige à raison de 25 coups pour chaque couche. Le cône est ensuite enlevé doucement sans secousses.[5]

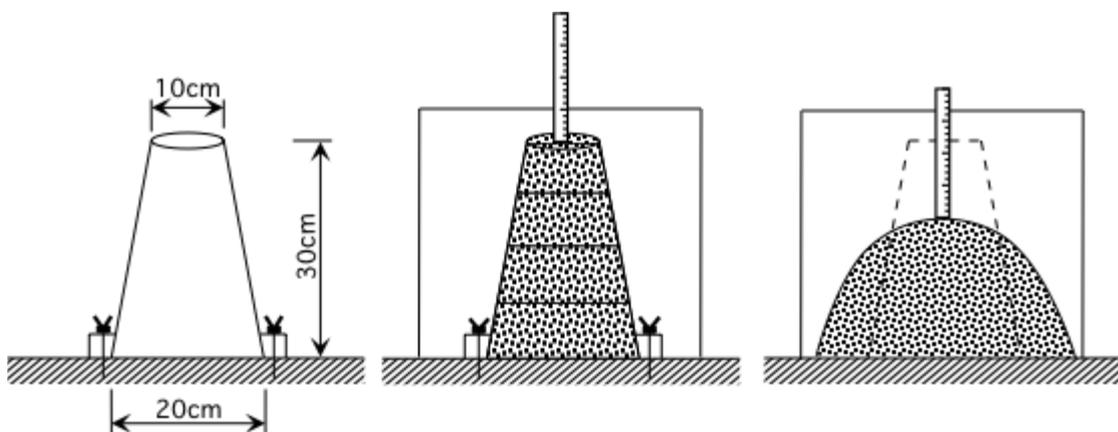


Figure 1.8: test du cône d'Abrams

1.5.2 Béton durci :

Résistance mécanique : La résistance mécanique la plus importante pour le béton étant la résistance à la compression, elle est couramment mesurée sur des éprouvettes cylindriques 16x32cm (16cm de diamètre et 32cm de hauteur).

Le béton reste toujours avec leurs inconvénients tels que : Temps de durcissement relativement long, une exécution peu précise et difficulté de reprise des ouvrages en cas de transformations.

Le Béton de ciment présente une excellente résistance à la compression, mais une faible résistance à la traction, et donc aussi à la flexion a peu près 1/10 de sa valeur de compression. [5]

Tableau 1.3: dosage en ciment basé sur les volumes

Produit	Volume de ciment	Volume de sable	Volume de gravier	Volume de d'eau
Béton pour fondations scellement de piquets de clôture	1	2.5	3.5	½
Béton tous usages linteaux poteaux	1	2	3	1/2
Mortier	1	4	0	1/2

Tableau 1.4: dosage de ciment basé sur les masses pour 1 m³ de béton.

Produit	Masse de ciment	Masse de sable	Masse de gravier
Béton pour fondations scellement de piquets de clôture	300 kg	720 kg	1165 kg
Béton tous usages linteaux poteaux	350 kg	680 kg	1175 kg
Mortier	400 kg	1400 kg	0

1.6 Conclusion :

Avec la recherche de performances toujours plus élevées, la fabrication joue un rôle de plus en plus important sur la qualité du béton, tant sur l'obtention du niveau de performance que sur leur régularités pendant la construction des ouvrages.

Il faut pour cela, bien connaître la caractéristique des constituants dont certaines sont très variables dans le temps.

Conserver les caractéristiques des constituants et mettre tout en œuvre pour que les propriétés finales du mélange bénéficient au mieux de ces caractéristiques, doivent être les objectifs permanents. Pour cela, il dispose d'outils pour lesquels il lui revient d'effectuer les opérations de contrôle et d'entretien permettant de garantir leur constante fiabilité.

Chapitre 02 :

Durabilité

Des

Bétons

2. Chapitre 02 : durabilité des bétons

2.1 Introduction :

Avec les caractéristiques mécaniques présentées dans le chapitre précédent, les propriétés de durabilité des bétons sont aussi d'une importance capitale. En effet, bien que la résistance mécanique ait été choisie comme critère d'équivalence entre les divers bétons, l'objectif de cette étude concerne l'estimation de la durabilité des bétons.

La durabilité peut être, donc, définie comme la résistance du béton aux agressions chimiques ou physiques, en maintenant son comportement et ses performances dans de bonnes conditions de service prévues pour l'ouvrage. Généralement, les agressions chimiques sur le béton affectent d'abord la pâte de ciment. Le béton, le mortier ainsi que la pâte de ciment hydraté, peuvent être considérés comme des matériaux multiphasiques composés d'une phase solide (squelette poreux comme les granulats et hydrates) et d'une phase liquide (solution interstitielle) et d'une phase gazeuse (air sec, vapeur d'eau, CO₂ ...) se trouvant à l'intérieur du matériau solide. [8]

Le concept de durabilité ne signifie pas une durée de vie infinie, pas plus qu'il ne signifie que le béton doit résister à n'importe quelle agression. De plus, on constate de nos jours que, dans certains cas, un entretien régulier du béton est nécessaire.

La durabilité des ouvrages en béton est une caractéristique très importante, surtout pour les ouvrages importants de génie civil (ponts, silos, réservoirs, barrages, enceintes nucléaires...), car en cas de dégradations de tels ouvrages, les conséquences seront néfastes voire graves, sur les coûts de réparation, la limitation de la durée de vie de l'ouvrage, et dans des cas extrêmes la ruine partielle ou totale de l'ouvrage. S'occuper des facteurs qui peuvent affecter la durabilité des ouvrages, leur économie et leur sécurité, est impératif lors de la conception et de l'élaboration de ces ouvrages. [9]

La durabilité d'un béton dépend essentiellement de sa porosité donc de la fissuration développée et de la résistance à la compression, mais aussi de la différence de concentration des alcalins entre la solution interstitielle et l'environnement extérieur [10]

2.2 Notion sur la durabilité

La durabilité du béton s'explique en grande partie, par la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans les réseaux poreux des bétons.

Traditionnellement l'aptitude d'un béton à résister à la dégradation – c'est-à-dire sa stabilité - était d'apprécier par sa résistance à la compression. Bien qu'une forte résistance soit une propriété liée étroitement à la structure poreuse, à la perméabilité et la diffusivité et par conséquent à la durabilité. Ces deux grandeurs physiques permettent de caractériser l'aptitude des bétons à résister à l'intrusion des agents agressifs.

La perméabilité est relative au déplacement d'un fluide sous l'effet d'une pression motrice. Elle dépend de la taille des espaces poreux dans lesquels s'écoule le fluide, ainsi que leur interconnecte la figure. La diffusivité est relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration. Contrairement à la perméabilité, la diffusivité dans un matériau poreux ne dépend pas de la taille des pores, elle dépend que de leur interconnexion.

2.3 Les paramètres de la durabilité du mortier :

2.3.1 La porosité :

2.3.1.1 Définition :

Le béton est un matériau poreux, en d'autres termes, il comporte des pores ou vides, ces pores sont déterminants pour la résistance et la durabilité du béton. En effet, une faible porosité constitue le meilleur moyen de défense des bétons contre tous les agents agressifs. La porosité volumique totale η d'un matériau est définie par : [11]

$$\eta = \frac{v_P}{v_T} \times 100 (\%) \quad (2.1)$$

η : est la porosité

v_T : volume total d'un échantillon de matériau.

v_P : volume des pores de l'échantillon.

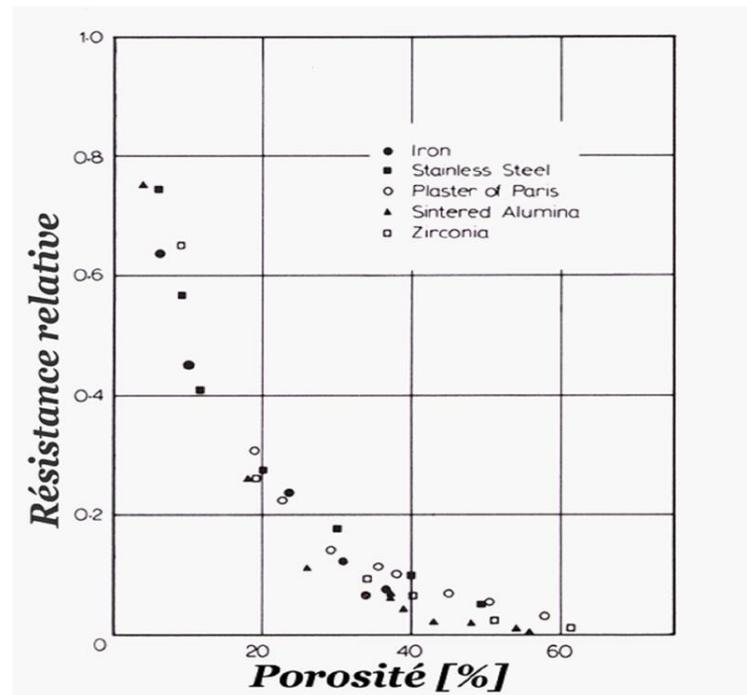


Figure 2.1: la relation entre la porosité et résistance relative [11]

2.3.1.2 Effet du rapport Eau/Ciment (E/C) sur la porosité effectif :

Les rapports E/C les plus utilisés sont de l'ordre de 0,27 à 0,30. Des rapports plus élevés de l'ordre de 0,34 à 0,40 ont également été utilisés avec succès. Richard Meininger a travaillé avec différents rapports E/C et a observé que les rapports situés entre

0,35 et 0,40 offrent des meilleures résistances à la compression. Une attention particulière doit être faite lors de l'utilisation de rapports E/C élevés, car la pâte de ciment deviendrait plus poreuse et fluide et aurait tendance à bloquer les vides inters granulaires par gravité, ce qui réduit considérablement la conductivité hydraulique.

Pour le cas des rapports très faibles, un problème de cure et un faible développement des propriétés mécaniques dus au risque d'évaporation plus grand, causés par la structure poreuse ouverte des bétons drainant. À énergie de consolidation et rapport C/G (ciment/granulat) constants, la porosité effective décroît linéairement avec le rapport E/C. [12]

2.3.1.3 Effet de la porosité effective :

Le volume des vides (la porosité effective) est essentiel pour assurer une certaine conductivité hydraulique du béton drainant. Le volume des vides est fonction de l'énergie de consolidation, de la forme et du coefficient d'uniformité des granulats. Une étude a montré une relation entre la taille des granulats et la porosité effective des échantillons du béton drainant (figure 2.2). Cette figure montre également que les granulats de grande taille

fournissent des bétons drainants de porosité supérieure que ceux de petites tailles. La combinaison de deux granulats de taille différente peut altérer la porosité effective, notamment dans le cas de deux granulométries assez éloignées (figure 2.2). Une porosité effective d'au moins de 15% est nécessaire pour assurer une perméabilité minimale. Au-delà de cette valeur, elle commence à affecter négativement la résistance à la compression et la perméabilité. Enfin, l'énergie de consolidation a une influence importante sur le volume des vides total et la masse volumique. Vernon et al. ont trouvé une excellente relation entre la masse volumique des échantillons au laboratoire et le volume total de vides. [13]

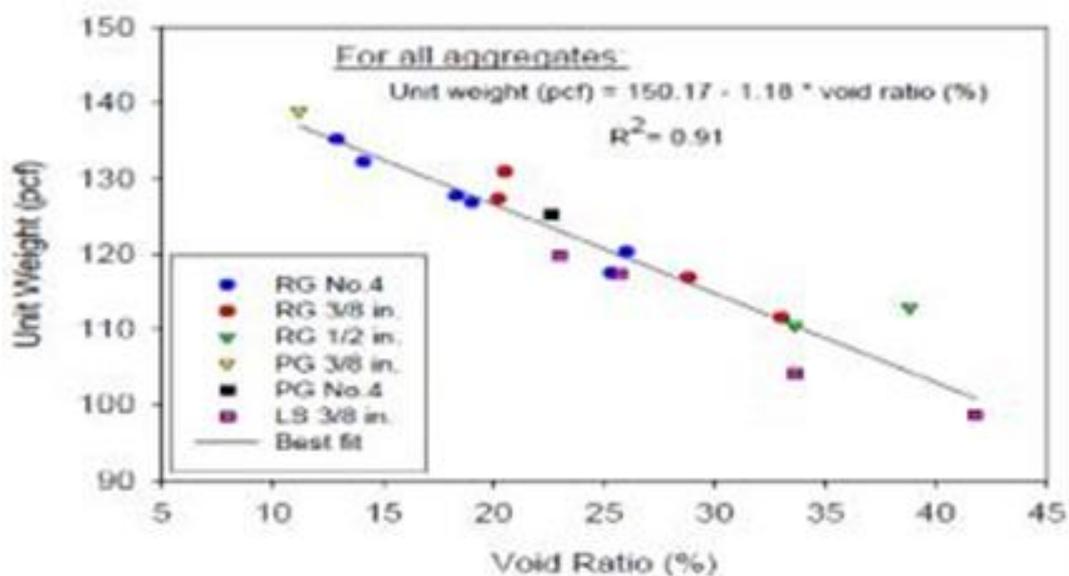


Figure 2.1: Relation entre le volume de vides et la masse volumique

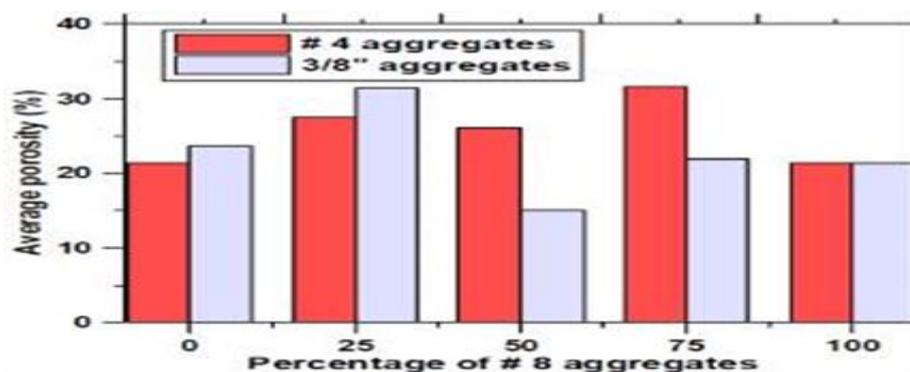


Figure 2.3: Relation entre la taille des granulats et la porosité effective.

2.3.2 La perméabilité :

Les trois principaux fluides qui peuvent pénétrer dans le béton et mettent en cause sa durabilité sont: l'eau pure ou contenant des ions agressifs, le gaz carbonique et l'oxygène.

Ils peuvent se déplacer au travers du béton de différentes manières, mais tous les mouvements dépendent principalement de la structure de la pâte de ciment.

La durabilité du béton dépend largement de la facilité avec laquelle les fluides, quels qu'ils soient, peuvent pénétrer et se déplacer à l'intérieur du béton; c'est ce qu'on appelle communément la perméabilité du béton. Elle se définit comme l'aptitude d'un matériau à se laisser traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de pression, elle s'exprime au moyen de la relation de DARCY.

$$Q = -k \frac{A}{\mu} \frac{dP}{dz} \quad (2.2)$$

Avec:

Q = débit volumétrique (m³/s) du fluide de viscosité μ

K = perméabilité du milieu

A = aire apparente du matériau (m²)

$\frac{dP}{dz}$ = gradient de pression

La perméabilité du béton est un paramètre fondamental contrôlant la durabilité des structures. La perméabilité du béton et celle de la pâte de ciment hydratée lié aux caractéristiques du réseau de pores capillaires qui influencent la perméabilité. [14]

2.3.2.1 Paramètres influençant la perméabilité :

De nombreux facteurs influent sur la perméabilité du sol. Certains, comme la nature du fluide (sa viscosité, son poids spécifique, sa masse volumique, sa température et la quantité de sels dissous). Par exemple, plus un fluide sera visqueux moins il aura tendance à s'écouler dans l'aquifère. D'autres facteurs tels que la nature du milieu traversé (sa granulométrie, sa porosité) et la taille des pores du sol ont beaucoup d'importance en ce qui concerne le taux d'infiltration (pénétration de l'eau dans le sol) et le taux de percolation (déplacement de l'eau à

l'intérieur du sol). Enfin, la perméabilité dépend aussi des interactions éventuelles d'ordre chimique et physique entre fluide et roche.

2.3.3 La diffusivité :

2.3.3.1 Définition :

La diffusivité constitue un autre indicateur majeur de la durabilité et la mesure du coefficient de diffusion des ions chlore est très importante dans la perspective de la prédiction de la durée de vie des ouvrages en béton armé. L'attaque du béton par les chlorures entraîne en effet la destruction de la couche de passivation des aciers et la corrosion de ces derniers en présence d'eau et d'oxygène peut alors avoir lieu. Ces ions chlore peuvent provenir du béton lui-même (granulats, eau de gâchage) mais l'existence de normes limitatives à cet égard conduit à s'intéresser aux chlorures venant du milieu extérieur (eau de mer, sels fondants). Pour cela, il est intéressant de connaître la résistance du béton à la pénétration des ions chlore. [11]

2.3.3.2 Valeurs de diffusivité de quelques matériaux :

Valeurs typiques, assez variables dans le bâtiment, suivant les conditions de préparation et composition des matériaux, comme le béton, la brique, le bois, la terre ou argile mais restant grossièrement proches de 1 entre 0,1 et 1,5 en 10^{-6} m²/s sauf pour les métaux (très fonction de leur pureté) et les isolants usuels très légers à diffusivité bien plus rapide, avec des conséquences pratiques.

2.4 L'absorption :

L'absorption est la tendance du béton à prendre l'eau en l'absence d'une pression hydraulique externe. Ceci est censé se produire presque totalement dans les pores capillaires en dehors du gel. L'eau liquide est tirée dans ces pores par la tension superficielle, juste comme l'eau se lèvera dans un capillaire de verre. L'absorption est le mécanisme principal par lequel le béton sec ou partiellement sec prend l'eau. Si l'eau contient des produits chimiques nocifs, ceux-ci pénétreront également dans le béton. Plus les pores sont petits, plus l'aspiration est grande.

2.5 Les attaques chimiques des bétons

2.5.1 Attaque chimique par différents milieux agressifs :

Les ouvrages en béton peuvent se trouver dans des milieux, industriels au naturel, agressifs pour le béton et/ou l'action des armatures. En raison des interactions du béton avec des influences externes, la durabilité du béton peut être menacée et perdue. Parmi les facteurs menaçants on site, le cycle gel/ dégel, l'abrasion, corrosion d'acier, l'attaque chimiques qui peuvent détériorer le béton ACI Commette 201 à classé les attaque chimique comme suit : [15]

- attaque acide.
- attaque alcaline.
- carbonatation.
- Attaque par les chlorures lixiviation et vi.
- attaque par les sulfates.

2.5.2 Attaques des acides

2.5.2.1 Définition :

Les attaques acides se font principalement suivant un mécanisme de dissolution. Suivant le cas, le phénomène de dissolution peut être accompagné de la précipitation du sel formé lors de la réaction base + acide si le sel est peu soluble. Ce sel peut avoir un effet colmatant et ralentir les réactions de dissolution.

Le produit final de dégradation par un acide peut-être un gel de silice résultant de la décalcification totale des C-S-H qui, peut avoir un rôle protecteur à la surface du béton et ralentir les réactions. Ces auteurs insistent également sur le fait que les conditions de transport de l'agent agressif sont plus importantes que sa concentration.



Figure 0.2: La détérioration des silos-tours en béton due à l'attaque des acides d'ensilage.

2.5.2.2 Les différents types des acides :

Les acides peuvent être divisés en acides organiques et acides inorganiques : l'acide chlorhydrique, l'acide nitrique et l'acide sulfurique par exemple sont des acides inorganiques

L'acide formique, l'acide acétique et l'acide oléique sont des acides organiques. Les acides inorganiques sont plus nuisibles pour le béton que les acides organiques.

✚ Acides organiques :

Les acides organiques tels que l'acide acétique, lactique, butyrique, formique, contenus dans certains eaux usées, attaquent les constituants calciques du ciment. Ces acides faibles, peu dissociés, sont généralement modérément agressifs et provoquent des dégradations lentes.

✚ Acides minéraux :

Les acides chlorhydriques et nitriques réagissent avec la chaux de ciment et donnent des sels très solubles, sont très agressifs vis-à-vis des ciments portland.

L'acide sulfurique H_2SO_4 est doublement agressif par son acidité et par l'anion SO_4^{2-} qui peut conduire à la formation de sels expansifs tel que le gypse et l'étrangeité.

L'acide phosphorique H_3PO_4 , qui entraîne la précipitation de phosphates de calcium très peu solubles, est modérément agressif.[16]

2.5.2.3 Mécanisme d'attaque

Le béton est très alcalin en nature, il est extrêmement susceptible à l'attaque de l'acide. Le mécanisme pour ce processus est très simple. De façon générale, les réactions chimiques et ou l'élimination physique n'endommage qu'un ou deux composants de la pâte de ciment.

Tableau 0.1: Composants du béton menacé par la corrosion.

Composants du béton	Désignation	Formule chimique
Pâte de ciment	Hydroxyde de calcium (CH)	Ca(OH)_2
	Silicate de calcium hydraté (CSH)	$3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
	Aluminate de calcium hydraté	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
	Aluminate de calcium ferrique hydraté	$6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
Granulats	Calcaire (Carbonate de calcium)	CaCO_3
	Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
	Grès amorphe	$\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$

Des acides plus agressifs tels que les acides chlorhydriques, acétiques, nitriques, et sulfuriques produisent les sels de calcium qui sont très solubles. Les acides moins agressifs tels que les acides phosphoriques et humiques produisent des sels de calcium avec une faible solubilité. Ces sels de basse solubilité peuvent agir en tant qu'inhibiteur partiel au processus global en bloquant les pores dans la pâte de ciment par lesquels l'eau passe. Ceci réduit la quantité de sels de calcium qui entrent dans la solution et retardent le processus global.

Un cas plus agressif et plus destructif d'attaque par l'acide se produit lorsque le béton est exposé à l'acide sulfurique. Le sel de calcium produit par la réaction de l'acide sulfurique et de l'hydroxyde de calcium est un sulfate de calcium qui cause alternativement une dégradation accrue due à l'attaque de sulfate. [17]

2.5.2.4 Sources des acides

Les milieux acides les plus fréquents sont :

- ❖ Les eaux naturelles dans les tourbières et les marécages, où le pH peut s'abaisser jusqu'à 4.
- ❖ Les milieux industriels : dans les industries chimiques ainsi que les industries agroalimentaires.
- ❖ Les réseaux d'égouts : l'activité bactérienne conduit au dégagement d'hydrogène sulfuré par la transformation des produits soufrés qui, combiné à l'humidité atmosphérique se condensent sous forme d'acide sulfurique qui va attaquer le béton.
- ❖ Les pluies acides, qui contiennent principalement de l'acide sulfurique et de l'acide nitrique, ayant un pH entre 4.0 et 4.5, peuvent provoquer la dégradation de la surface exposée du béton. [13]

2.5.3 Attaques du béton par les sulfates

2.5.3.1 Définition

Les phénomènes à l'origine de l'attaque sulfatique ne sont pas parfaitement bien connus ni maîtrisés. L'attaque sulfatique est associée à la précipitation de produits sulfatés secondaires, d'une expansion importante et de la détérioration chimio- mécanique (modifications des propriétés de transport de la porosité, fissures, perte de résistance et de cohésion,...). Ceci peut conduire à la ruine du matériau cimentaire, à plus ou moins long terme en fonction de l'attaque (nature, teneur et concentration des sulfates au contact) et du ciment utilisé (type et rapport Eau/Ciment).

On distingue l'attaque sulfatique interne, qui fait intervenir des sulfates déjà présents dans le béton, de l'attaque sulfatique externe qui se produit dès lors que les conditions externes sont réunies.



Figure 0.3: Les attaques des sulfates sur les armatures et le béton.

2.5.3.2 Mécanisme d'attaque

Les sulfates peuvent détériorer le béton selon deux mécanismes physico-chimiques :

- Expansion
- Perte des propriétés liantes des C-S-H

Les aluminates et la portlandites ont les deux produits les plus sensibles à l'attaque par les sulfates [18].

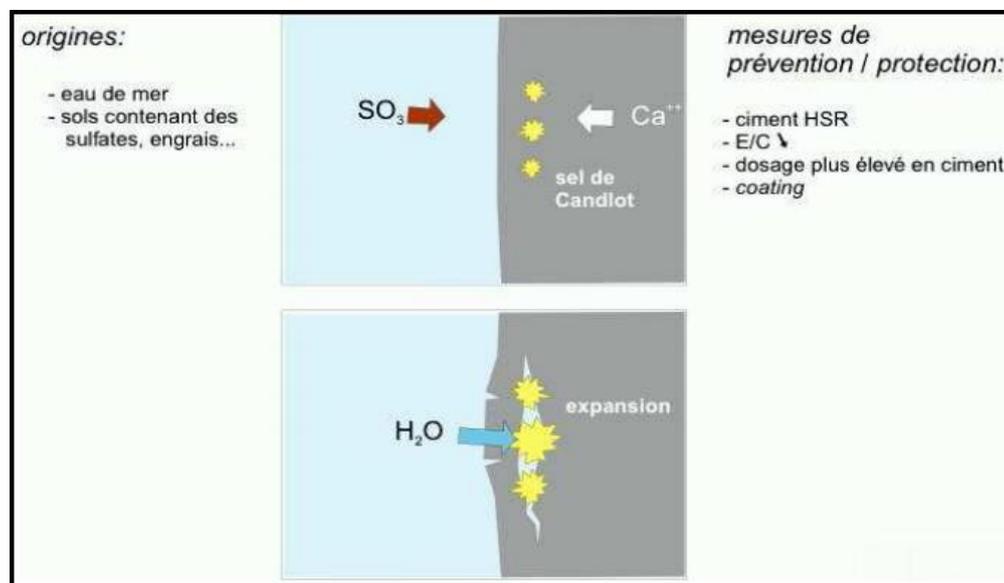


Figure 0.4: L'attaque par les sulfates.

2.5.3.3 Les sources des sulfates :

Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollution domestique et industrielle. La plupart des sols contiennent des sulfates sous la forme de gypse (généralement entre 0,01% et 0,05 % (sol sec) exprimés en SO_4), ces concentrations relativement faibles ne sont généralement pas agressives pour le béton, car la solubilité du

gypse dans l'eau à température normale est relativement faible (environ 1400 mg/litre). On peut trouver les sulfates également dans :

- Les eaux souterraines, les concentrations plus élevées en sulfates sont généralement dues à la présence de sulfates de magnésium ($MgSO_4$) ou de sulfates alcalins (K_2SO_4 - Na_2SO_4).

Les effluents des fours utilisant des combustibles riches en soufre et les effluents des industries chimiques peuvent contenir de l'acide sulfurique.

- La décomposition des matières organiques dans les égouts, les silos ou dans les réservoirs d'entreposage peut conduire à la formation de H_2S (gaz) qui peut être transformé en acide sulfurique par l'activité bactérienne.
- Les sulfates peuvent aussi provenir de la décomposition biologique aérobie de substances organiques contenant du soufre (engrais, plantes).
- Les sources de sulfates peuvent aussi être internes :
 - Contamination des granulats par du plâtre.
 - Granulats gypseux.
 - Sulfures dans certains granulats. [19]

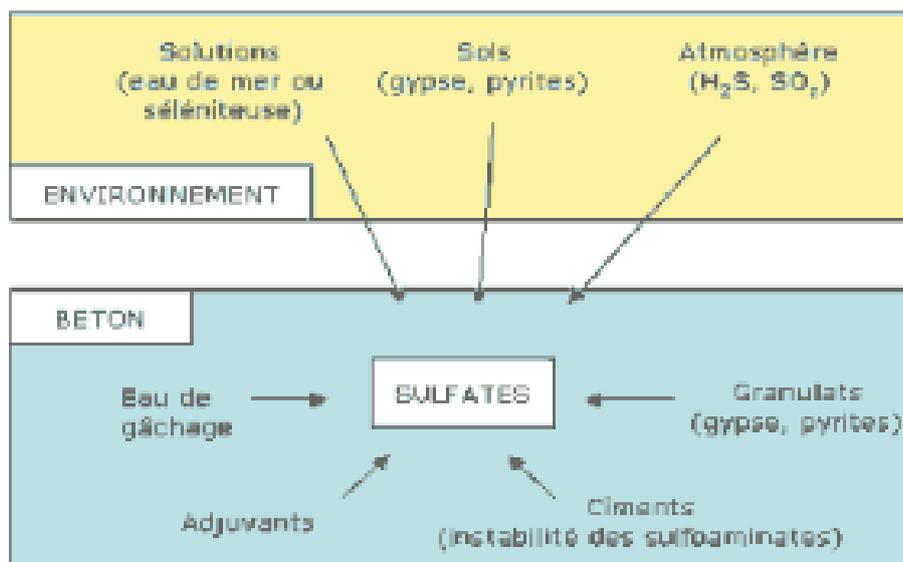


Figure 0.5: L'attaque par les sulfates.

2.5.3.4 Facteurs contrôlant la résistance aux sulfates du béton

- La résistance aux sulfates augmente avec la teneur en ciment.
- Les bétons avec un dosage en ciment plus élevé sont généralement plus compacts et ont une perméabilité plus faible qui ralentit la pénétration des sulfates et de l'ion qui leur est associé.

- Le taux de dégradation est proportionnel à la quantité de C3A du ciment (Fig2.7)

Un béton poreux (faible dosage en ciment) peut être vulnérable mais si la teneur en C3A du ciment est faible.

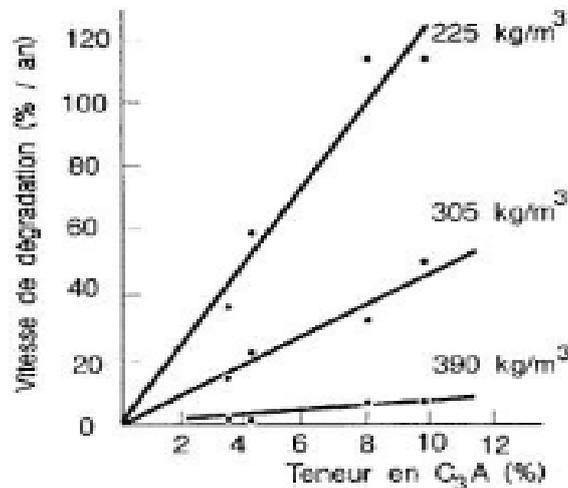


Figure 0.6: Influence du dosage en ciment et de la teneur en C3A sur la vitesse de dégradation du béton (16 ans dans Na2SO4 à 10%).

2.5.3.5 Processus d'attaque par les sulfates internes :

La dégradation des bétons par les sulfates est due principalement à des phénomènes d'expansion en relation avec la cristallisation d'ettringite, dite ettringite secondaire. La formation de cette ettringite expansive est à distinguer de l'ettringite primaire, obtenue au premier stade de l'hydratation des ciments portland par réaction du gypse, car cette ettringite primaire n'est jamais expansive. Schématiquement, la formation de l'ettringite est résumée ci-après :

1. Formation de gypse dit secondaire par opposition au gypse primaire ajouté au ciment comme régulateur de prise, la formation du gypse secondaire résulte d'une réaction de substitution entre la portlandite et le sulfate de sodium.
2. Réaction entre le gypse secondaire et les aluminates de calcium du ciment forment l'ettringite, plusieurs scénarios sont envisageables.

L'action des sulfates peut aussi engendrer une perte de résistance et une perte de masse du béton de surface. Ces effets sont dus à l'altération des propriétés liantes de certains hydrates.



Figure 0.7: L'attaque sulfatique interne

2.5.3.6 Processus d'attaque par les sulfates externes :

Au travers du développement qui suit, ce type de dégradation sera abordée autant par son aspect phénoménologique que par les conséquences et les moyens de s'en prémunir en agissant sur des paramètres de formulation. Les études en laboratoire ont conduit à mieux définir les différentes étapes du processus qui entraîne la dégradation du béton :

- ❖ Mise en contact de la surface du béton avec la solution agressive.
- ❖ Pénétration des anions SO_4 , par diffusion limitée à une zone superficielle.
- ❖ Réaction ponctuelle des ions sulfates avec les aluminates anhydres (C_3A) ou hydraté (C_4AH_x et $C_3ACASO_4H_{12}$).
- ❖ Fissuration par effet de coin due aux pressions de cristallisation de l'ettringite.
- ❖ Accentuation de la pénétration des sulfates à la faveur des fissures.
- ❖ Progression de l'attaque suivant un front de dégradation, dont l'épaisseur a tendance à s'élargir au cours du temps.
- ❖ Destruction plus au moins complète du béton.[20]



Figure 0.8: L'attaque sulfatique externe

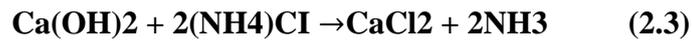
2.5.3.7 Mesures de préventions contre les ions sulfates :

Pour éviter une attaque due aux sulfates, on fera les choix suivants :

- Utiliser un ciment HSR (High Sulfate Resisting). Un ciment CEM I HSR (ciment Portland à haute résistance aux sulfates) donne un béton avec une teneur en aluminates de calcium fort réduite.
- Réaliser une perméabilité limitée. Selon la teneur en sulfates à laquelle le béton est exposé, il faut respecter des valeurs minimales pour la teneur en ciment et maximales pour le rapport eau/ciment.

2.5.4 Action des sels :

De très nombreux sels attaquent la pâte de ciment durcie en formant des sels solubles dans l'eau, lesquels sont lessivés. Tous les sels de magnésium, à l'exception du sulfate de magnésium très difficilement soluble dans l'eau sont ainsi à même de remplacer les ions de calcium dans la pâte de ciment durcie. Il se forme à la surface du béton de l'hydroxyde de magnésium et des silicates de magnésium, qui empêchent une autre attaque. L'hydroxyde de magnésium se présente toutefois sous forme de masse molle, gélatineuse, qui est emportée par l'eau coulant plus rapidement [21]. Les sels d'ammonium dissolvent sur tout le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de la pâte de ciment durcie, ce qui engendre de l'ammoniac. Pour le chlorure d'ammonium, la réaction est par exemple :



Hydroxyde de calcium + chlorure d'ammonium chlorure de calcium + ammoniac

L'ammoniac libéré, une base se dissout dans l'eau. Il n'attaque pas le béton. Le carbonate d'ammonium et le fluorure d'ammonium, qui engendreraient du carbonate de calcium et de fluorure de calcium, des composés difficilement solubles, ne sont pas dangereux pour la pâte de ciment durcie [21]. Contrairement à l'armature, la pâte de ciment durcie n'est altérée par les ions de chlorure que s'ils sont fortement concentrés. Dans l'eau de gâchage, les chlorures accélèrent l'hydratation du clinker Portland encore existant. Par réaction avec les aluminates hydratés, les ions de chlorure se transforment en chlore aluminates difficilement solubles, par exemple $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, partiellement fixés dans le béton.

2.5.5 L'ATTAQUE PAR L'EAU DE MER

La durabilité du béton en milieu marin est un problème complexe en raison du nombre de facteurs pouvant intervenir lors d'une attaque par l'eau de mer qui se résument comme suit: complexité des conditions environnementales (immersion totale, marnage, aspersion, embruns). Complexité des réactions chimiques susceptibles de se produire en relation avec la diversité des ions présents dans l'eau de mer (action simultanée des chlorures, desulfates, des carbonates), certaines réactions pouvant avoir un effet atténuateur (carbonatation, précipitation de brucite Mg(OH)_2).

Couplage avec des agressions physiques et mécaniques (cycles d'humidification/séchage, gel, actions mécaniques des vagues, érosion...). par ailleurs, aux attaques physico-chimiques subies intrinsèquement par le matériau béton, il y a lieu d'ajouter les dégradations possibles du béton dues à la corrosion des aciers.

L'eau de mer peut être considérée comme un électrolyte dont la concentration en espèces dissoutes est élevée et dont la salinité varie largement d'une région à l'autre.

Les principaux sels qui composent l'eau de mer sont les suivants :

- ✓ le chlorure de sodium (Na Cl) qui est prépondérant ;

- ✓ le chlorure de magnésium ($MgCl_2$)
- ✓ le sulfate de magnésium ($MgSO_4$)
- ✓ le sulfate de calcium ($CaSO_4$)
- ✓ le chlorure de calcium ($CaCl_2$)
- ✓ le carbonate acide de potassium ($KHCO_3$)

Dans les zones immergées en permanence, l'agressivité chimique de l'eau de mer vis-à-vis des bétons fabriqués suivant les règles de l'art est modérée et, sauf conditions exceptionnelles (gel par exemple) les dégradations restent superficielles. Dans ces zones, où le béton est constamment saturé, les risques de corrosion des aciers sont également limités du fait du très faible coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'eau.

Les zones de marnage, les zones soumises à des projections ou des embruns sont les plus exposées en raison des actions physiques qui viennent se superposer aux processus chimiques: effets mécaniques des vagues et érosion par les sables et graviers, cycles d'humidification/séchage, variations de température journalières et saisonnières,

dissolution/recristallisation de sels (chlorure de sodium)... Les risques de corrosion des aciers sont également les plus importants dans ces zones.

Dans les zones aériennes, le béton est exposé à l'air véhiculant du sel marin mais n'est pas en contact avec l'eau de mer.

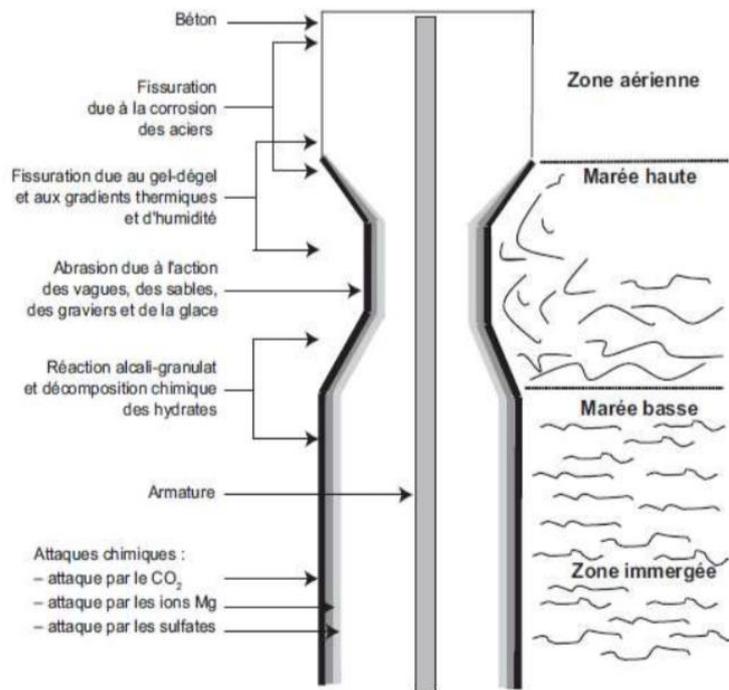


Figure 0.9: représentation schématique des différents processus d'attaque du béton par l'eau de mer [22]

2.5.5.1 Mécanismes d'attaque par les composants agressifs de l'eau de mer :

Le processus chimique d'attaque des bétons par l'eau de mer résulte de plusieurs réactions plus ou moins simultanées et interdépendantes faisant appel à différents mécanismes : [23]

- dissolution-lixiviation.
- réaction d'échange de bases.
- précipitation de composé insolubles.
- cristallisation de sels expansifs.

2.5.5.2 Les paramètres contrôlant la durabilité du béton en milieu marin :

- **Perméabilité** : Une faible perméabilité retarde la pénétration des ions agressifs.
- **Rapport E/C** : Un rapport E/C faible diminue la porosité, la perméabilité et retarde la pénétration des ions agressifs.
- **Recouvrement** : Il faut prévoir un bon recouvrement (60 mm) des aciers d'armature pour éviter la corrosion métallique.

2.6 Conclusion :

La durabilité d'un béton n'est pas une de ses caractéristiques, mais plutôt sa réponse aux charges en service et aux conditions environnementales. Ainsi, la durabilité d'un béton dépend d'une multitude de caractéristiques du matériau, mais aussi de l'agressivité de son environnement.

Chapitre 03 :

Le béton fibre

3. Chapitre 03 : le béton fibre.

3.1 Introduction :

Pour présenter le béton de fibres, nous avons pris le parti de suivre l'itinéraire des matériaux de base que l'on associe pour leurs comportements respectifs transmettant, par un effet synergétique, de nouvelles propriétés au composite créé. Ainsi successivement nous abordons la présentation du matériau de base (les fibres), sa formulation, son comportement et ses propriétés.

Ce choix s'impose pour positionner notre étude. En effet, il convient de montrer par une recherche les nombreux paramètres qui influencent le comportement de ce composite dont la matrice est un matériau vieillissant, poreux, retenant l'eau, dont la stabilité est fonction de l'hygrométrie ambiante, présentant un état initial complexe (microfissures, déformations) ; quant aux fibres, elles sont de nature et de géométrie très diverses.

3.2 Généralités :

Le béton avec fibre est un béton conventionnel auquel on a ajouté des fibres durant le malaxage. Son nom: la microfibre.

Les microfibres peuvent être utilisées quand on souhaite réduire la fissuration et améliorer la durabilité. Et elles conviennent particulièrement bien aux dalles sur le sol, dalles surélevées, pavages, piscines, trottoirs, béton projet etc...

Comme armature secondaire utilisée pour assurer le contrôle de la fissuration, elle constitue une solution idéale lorsqu'elle est combinée au treillis métallique soudé ou ferrailage en acier. Cette fibre n'est pas recommandée pour remplacer l'armature exigée par les codes et les normes du bâtiment.

Les propriétés de cette fibre sont étonnantes. En effet, sa force majeure est sa capacité à diminuer le retrait plastique et les fissures d'environ 40% et plus.

Les propriétés du béton de fibres dépendent de la qualité de la matrice et des caractéristiques de fibres. La matrice considérée est identique à la matrice d'un béton courant, les fibres sont de formes et de dimensions différentes liées aux technologies d'élaboration. Chacune de ces catégories de fibres donne au béton des propriétés spécifiques lesquelles

dépendent de la nature, la forme géométrique, l'élançement, et la teneur en volume de fibre. [24]

3.3 Historique du béton de fibres

Une analyse profonde de ce concept nous indique que cette idée est très ancienne et date depuis l'antiquité. En effet les pharaons ont pensé à l'idée des pailles pour renforcer la brique de boue d'après Exode 5:6 comme il est le cas Finlandais utilisant pour la 1ère fois, les fibres d'amiantes dans le renforcement des poteries en argile, il y'a de cela 5000 années. D'autres sources ANTOINE, E.N - Mars 1985 et ACI COMMITTEE 554 Mars- Avril 1984 ont indiqué que l'usage de cette technique par le biais de pailles afin de renforcer les briques, tandis que les poils des animaux et les fibres pour renforcer le plâtre et la pâte de ciment. On peut noter aussi la réalisation, au milieu du XX é siècle, d'alliages métalliques avec fibre de carbone.

En 1910, une série d'essais pour améliorer la résistance du béton a été faite par J.PORTER qui a conclu que la présence des fibres courtes dans le béton augmente sa résistance à l'écrasement et à la traction.

Par la suite 1911, GRAHAM a établi un brevet sur les bétons de fibres. C'était le premier brevet Américain où il a décrit l'emploi des tranches d'acier comme des renforts fibreux dans les matériaux de construction. Un deuxième brevet Américain sur ce sujet a été pris par WEAKLY.

En 1912, qui consiste à l'utilisation des bandes en fils d'acier fabriquées avec deux fils, avec l'intermédiaire d'un anneau, afin d'assurer une adhérence durable avec le béton.

En 1920, A. KLEINLOGEL a déposé le premier brevet Allemand qui a décrit la synthèse d'ajouter un volume relativement important, de particules de fer au béton pour produire une masse capable d'être usinée (par tournage) comme une masse d'acier.

Quelques années après, en 1938, un autre brevet a été établi par N. ZITEVIC en Grande Bretagne. Son procédé consiste à mélanger avec le béton des petits éléments en fer approximativement avec 100 mm de long et 1.00 mm de diamètre. Ces éléments métalliques sont très semblables aux fibres utilisées aujourd'hui pour armer le béton. Il a conclu qu'il y a une amélioration de la résistance du béton à la compression, à la traction et au cisaillement.

A partir de 1940, plusieurs procédés sont apparus dans de différents pays. Ces procédés recommandent en général l'inclusion des fibres d'acier dans le béton pour améliorer

sa performance. Mais on note ici que celui de G.CONSTANTINESCO, en 1943 en Angleterre et en 1954 en U.S.A, mérite une attention particulière.

A partir des années 1970, il s'est produit une sorte de réveil dans le domaine de la technologie des bétons renforcés de fibres d'acier. La confiance acquise dans certaines propriétés spécifiques des bétons renforcés de fibres d'acier augmente de façon permanente par l'utilisation de ces bétons dans des applications industrielles. Le premier article dans ce concept peut-être attribué à LANKARD et SHEETS. Dans cet article, ils ont confirmé que l'ajout de 1% à 2% de fibres au béton réfractaire donne une amélioration significative à sa résistance. [25]

3.4 Les fibres :

Il existe un grand nombre de fibres qui se différencient par leur nature, leur diamètre, leur longueur, leur forme et leur état de surface. Elles possèdent des caractéristiques différentes les unes des autres. Nous distinguons les fibres naturelles et les fibres artificielles ou synthétiques ; Ou le tableau () classe les différents types de fibres selon Veniat M.1983.[26]

Tableau 3.1 : différent type des fibres (venuat M.1983).

Fibres naturelles			Fibres artificielles	
Végétales	Animales	Minérales	Minérales	Organiques
Lin	Poil	Amiante de roches	Laitiers de haut fourneau	Polymères longs dont les Molécules sont orientés dans l'axe de fibre
Chanvre	Crin	Silicomagnésiennes	molécules sont Laine de roche dans l'axe de fibre (basalte)	
Coton	Laine		Carbone	
Celluloses	Soie		Céramique	
Sisal			Métaux (acier, fonte)	
			Verres spéciaux	

3.4.1 DIFFERENTES NATURE DE FIBRES

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

3.4.1.1 Fibres naturelle :

➤ Fibres végétales :

La principale fibre végétale est la cellulose qui résiste aux alcalis. Les fibres végétales résistent aussi à la plupart des acides organiques mais sont détruites par les acides minéraux forts. Il existe quatre sortes de fibres végétales : les fibres provenant des poils, les fibres du liber, et les fibres extraites des troncs de certaines graminées. Elles sont souvent utilisées dans la fabrication du papier et dans les panneaux de construction (fibres de bois).[27]



Figure 3.1: fibres de bois

➤ Fibres animale :

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

3.4.1.2 Fibres minérales :

➤ Fibres d'amiante :

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

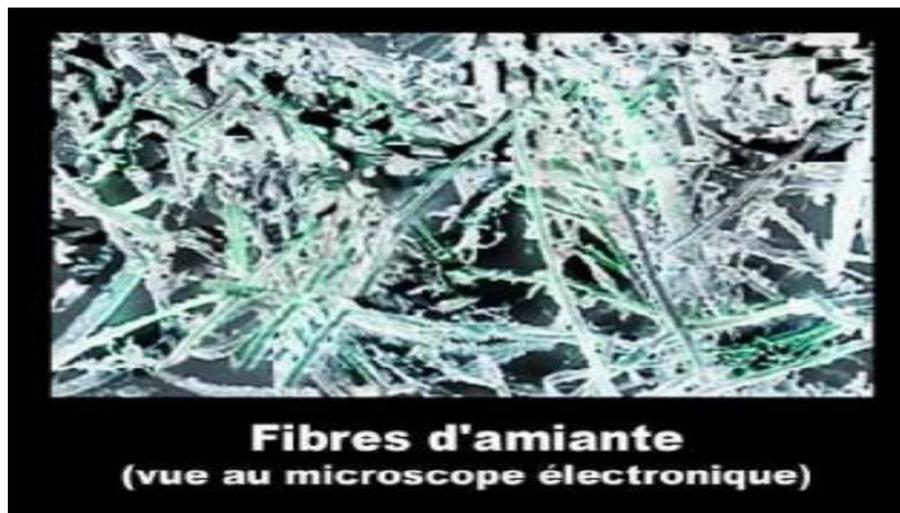


Figure 3.2: vue au microscope fibres d'amiante

➤ Fibres de verre :

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

- ❖ Bonne adhérence avec la matrice ;
- ❖ Disponibilité sous toutes les formes (coupées, continues ...)

- ❖ Bonne résistance à l'humidité et à la corrosion ;
- ❖ Conductivité thermique relativement faible. [25]



Figure 3.3:fibres de verre

➤ **Fibres de carbone :**

Le carbone est très dispendieux ce qui le rend beaucoup moins populaire que le verre. Moins disponible sur le marché, les fibres de carbone sont cependant reconnues comme étant les fibres les plus performantes. Les types de fibres de carbone sont classés selon leurs propriétés mécaniques. Ces propriétés dépendent des cycles de pyrolyse ainsi que de la nature du précurseur.

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

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

Les fibres de carbone sont très fragiles ce qui rend l'opération de malaxage du béton de ces fibres très difficile. Pour cela, elles sont ajoutées par la suite au béton par projection. Par ailleurs, le béton de ces fibres présente des caractéristiques de durabilité très intéressantes. [26]

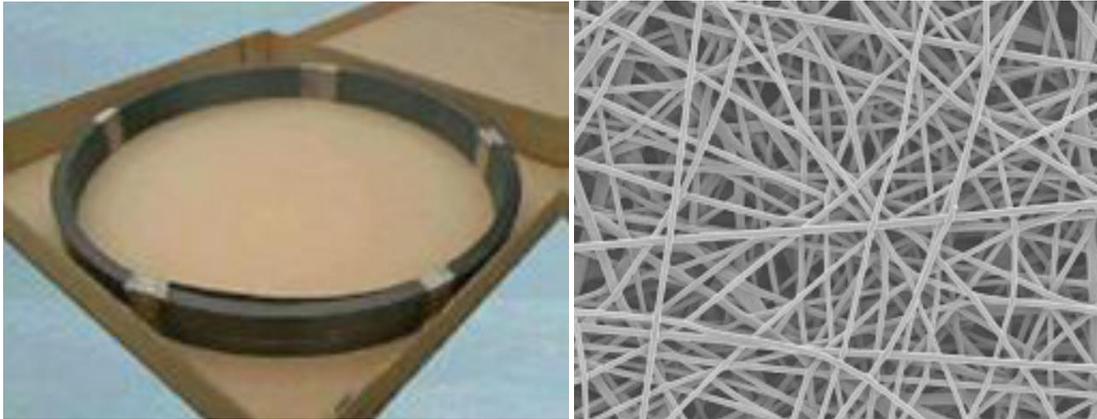


Figure 3.4: les Fibres de carbone

3.4.1.3 Fibres organique :

Les fibres de polymères sont d'origine plastique, on distingue trois familles principales de ces fibres à savoir :

➤ **Le polyamide :**

Qui représente la famille la plus importante des plastiques par leur tonnage. Le PA résiste mal aux acides minéraux.

➤ **Le polychlorure de vinyle (PVC) :**

Est une matière thermoplastique obtenue par polymérisation du chlorure de vinyle. Le PVC résiste bien aux acides et aux alcalis.

➤ **Le polypropylène (PP) :**

Est un thermoplastique formé de chaîne linéaire constitué de motifs propylènes dans le cas d'un homopolymère et d'une altération contrôlée de motifs propylène et éthylène dans les copolymères. Le PP résiste bien aux alcalis et aux acides.



Figure 3.5: les fibres polyamide, PVC, PP

Le module de Young de ces fibres est de même ordre de grandeur que celui du béton.

L'adhérence fibre-béton est généralement faible, du fait qu'il n'y a aucune liaison chimique possible entre les fibres et la matrice, ce qui limite la reprise des efforts par les fibres à l'interface fibre-matrice après la fissuration de la matrice. Par contre, il faut noter l'excellente résistance de ces fibres (PVC, PP) vis-à-vis aux acides, aux sels et alcalins du béton. (27)

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

3.4.1.4 Fibres Métallique :

Ce type de fibres, qui regroupe les fibres d'acier et les fibres de fonte amorphe, a été et reste encore l'objet de recherches très importantes dans le monde.

Dans la présente étude, nous nous sommes intéressé à la fibre métallique (acier), vue les caractéristiques (forme, élanement, caractéristiques physicochimique... etc.) qu'elles présentent.

L'ajout des fibres au béton, apporte une certaine ductilité ; pour une longueur de fibres égale à 30 mm et un pourcentage en fibres de 1%, le résultat est meilleur avec les fibres en copeaux.

Cependant, en ce qui concerne l'énergie de rupture, elle est plus importante dans le cas des éprouvettes armées de fibres Dramix (pour $L_f=50\text{mm}$). Ceci peut s'expliquer par le fait que ces fibres présentent un système d'ancrage, elles sont munies de crochets aux extrémités. L'adhérence fibres-matrice (béton) est ainsi meilleure.

Il existe sur le marché, une panoplie de fibres métalliques d'acier, voici quelques types de fibres :

- fibres ondulées - crantées - torsadées-droites ;
- fils, rubans ;
- fibres à extrémités aplaties, à crochets, à têtes coniques.[28]



Figure 3.6:Fibres Métallique

3.5 Le role des fibres dans le béton :

Le béton est un matériau fragile qui se rompt brutalement lorsqu' il atteint sa résistance à la traction. Les fissures s'y propagent donc de façon très rapide. Le béton armé de fibres se distingue du béton ordinaire par l'absorption d'énergie que procurent les fibres. La courbe (I.14) effort- déformation est différente : le matériau fragile au départ, s'est transformé en matériau ductile qui se rompt lentement après un allongement plus important dû à la formation d'un grand nombre de microfissures (plus grande énergie de rupture).

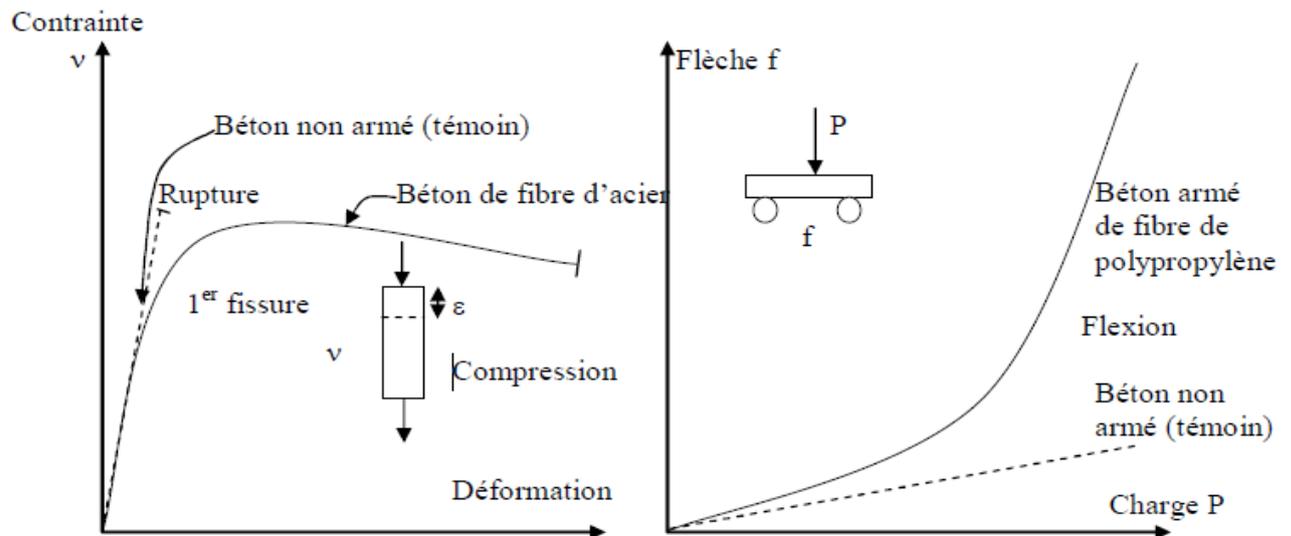


Figure 3.7: déformation d'un béton armé de fibres, comparée à celle d'un béton non armé d'après Venuat M.1987)

En effet, lorsqu'une fissure tend à se propager à l'intérieur d'un béton armé de fibres, ses deux faces sont maintenues l'une contre l'autre par la force d'adhérence de l'interface fibrematrice et aussi, dans le cas de fibres d'acier, par le phénomène d'ancrage mécanique. L'ouverture et la propagation des fissures nécessite donc un apport d'énergie supplémentaire afin de provoquer le glissement et éventuellement la rupture des fibres. [29]

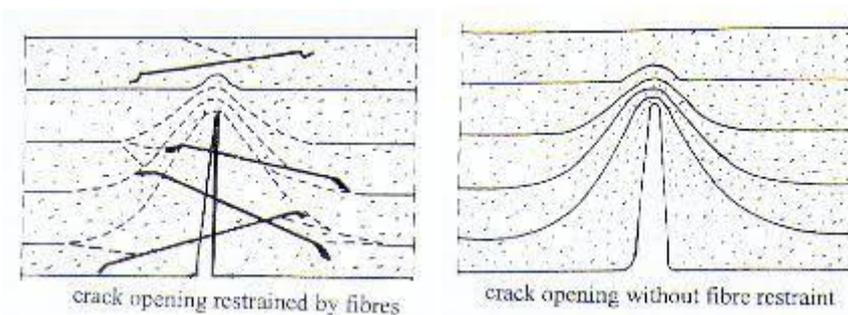


Figure 3.8: Béton avec fibres sollicité en traction.

Figure 3.9: Béton sans fibres sollicité en traction

3.6 Caractéristiques du béton fibré :

Il existe plusieurs **natures** de fibres : métalliques, organiques et céramiques. En fonction de leur nature, ces fibres ont des **caractéristiques différentes** et ne réagissent pas de la même façon. De ce fait, leur impact sur le béton peut varier.

Le principal avantage que présente le béton fibré métalliquement par rapport au béton ordinaire est le **remplacement total ou partiel** de ferraille dans la composition. Le but premier dans l'utilisation de ces fibres est donc de **remplacer** les armatures traditionnelles, ce qui facilite l'application du béton. Pas de découpe ni de manipulation de ferraille à prévoir. De plus, elles ont aussi la capacité d'offrir au béton certaines **propriétés** telles qu'une résistance au feu augmentée ou une diminution des risques de fissuration.

Les fibres organiques, quant à elles, améliorent le comportement du béton au **jeune âge**. Le treillis anti-fissuration devient inutile, le béton est plus homogène et les retraits de dessiccation pendant la phase de prise sont limités.

Les fibres sont intégrées dans le béton afin de **l'améliorer**. Mais il est bon de savoir que ces fibres lui confèrent également d'autres caractéristiques qu'on ne retrouve pas chez les autres bétons.

Parmi ces caractéristiques on peut citer :

- Résistance à la flexion et ductilité : les fibres améliorent la **ductilité** du béton. Autrement dit, elles permettent au béton fibré de se déformer sans se rompre.
- Résistance à la fatigue : les fibres rendent également le béton plus **résistant** sur le long terme en limitant la fissuration du matériau.
- Résistance à l'abrasion : l'abrasion est un phénomène d'usure provoqué par des frottements répétés, pouvant provoquer la fissuration du matériau. Le fait d'incorporer des fibres au béton permet donc d'améliorer la résistance à l'abrasion et par conséquent de **limiter la fissuration**.

Les différentes propriétés de ces fibres rendent possible la construction d'ouvrages confrontés à des contraintes plus élevées.[30]

3.7 TECHNOLOGIE DE FABRICATION DES BÉTONS DE FIBRES

3.7.1 Granulométrie :

Tout comme pour le béton classique, la qualité du granulat et la granulométrie affectent de façon significative la résistance et la performance du béton armé de fibres. Un granulat de qualité s'impose quand le béton de fibres est utilisé en milieu défavorable, lorsqu'une grande résistance est demandée. Le choix des fibres doit être compatible avec la taille des granulats afin d'aboutir à une bonne compacité et à une meilleure distribution des

fibres. Le positionnement local des fibres dépend du rapport entre la longueur des fibres et le diamètre des granulats (**Figure3.7**).[31]

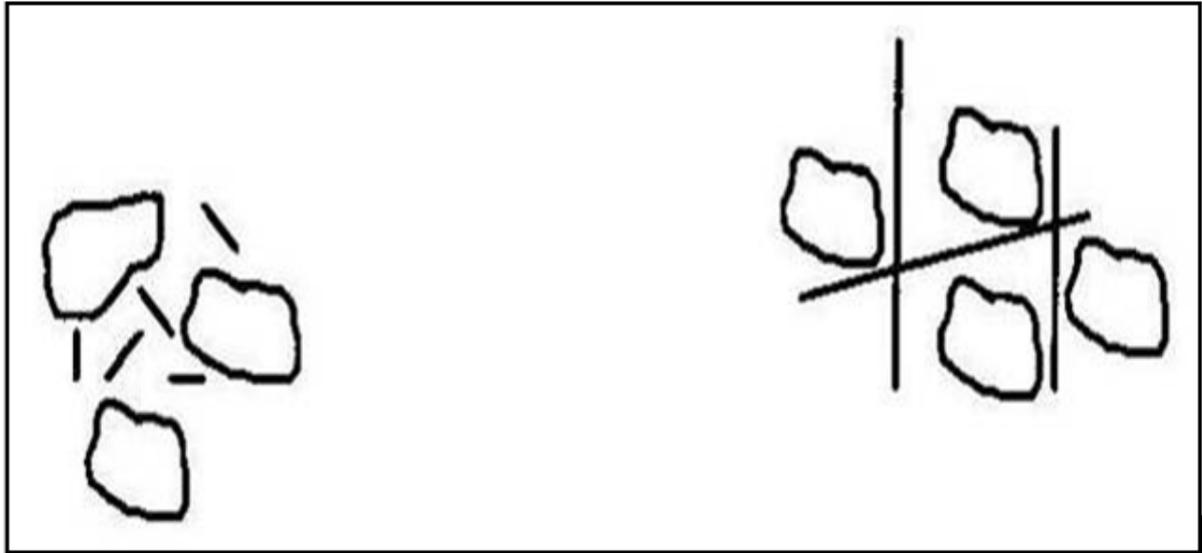


Figure 3.10: Effet de L/Dg sur la structure interne d'une matrice

3.7.2 Malaxage :

Il faut apporter une grande attention à la méthode de malaxage et donc à la séquence d'introduction des différents composants de façon à assurer une distribution homogène des fibres dans le mélange frais. Un temps minimum est recommandé pour assurer l'homogénéité du mélange. Paillere préconise de rajouter les fibres après avoir malaxé les matériaux avec 1/3 du volume d'eau. L'ajout des fibres s'effectue à la main au laboratoire pour des petites proportions, en revanche pour les grandes quantités, un matériel spécifique s'impose, nécessitant donc quelques minutes supplémentaires d'homogénéisation. Toutefois, on peut rencontrer quelques difficultés comme :

- ❖ Agglomération ou formation de pelotes de fibres (oursins), lorsque les fibres sont introduites sans précaution particulière ou temps de malaxage trop long ou un dosage excessif de fibres,
- ❖ Distribution hétérogène (temps de malaxage trop court). En général, l'ajout des fibres se fait lorsque le malaxage du béton est terminé. Il faut donc prolonger de quelques instants le malaxage pour permettre la distribution des fibres dans le mélange. [25]

3.7.3 Mise en œuvre :

Le déversement du béton doit s'effectuer de telle sorte que le moule ou le coffrage se remplisse aisément. Toute vibration doit faire l'objet d'une étude attentive. Sauf cas

exceptionnel, la mise en œuvre à l'aiguille vibrante est à déconseiller du fait de l'orientation préférentielle des fibres et de l'effet de cheminée. Il est préférable d'utiliser des vibreurs de coffrage.

Quand à l'état de surface des éléments coulés à plat, le talochage ne pose pas de problème. Il a néanmoins comme inconvénient de faire apparaître quelques fibres sur les arêtes périphériques supérieures qu'il convient de faire disparaître ensuite. Le coulage en banches verticales remédie en grande partie à cet inconvénient en supprimant le talochage. Comme toujours, il faut veiller à l'étanchéité des moules ou des coffrages, car toute fuite de laitance entraîne un phénomène de convection d'air déclenché par la vibration, préjudiciable à la qualité du béton en générale. De plus, ces fuites permettent le passage des fibres entre les éléments et, découvrant localement les agrégats, font apparaître les fibres intercalées entre eux, ce qui impose la reprise et le ragréage. [32]

3.7.4 Propriétés mécaniques des bétons fibrés :

Les propriétés mécaniques des bétons fibrés dépendent de plusieurs paramètres :

- la forme de la section dont dépend la surface adhérente de la fibre,
- la forme de la fibre,
- la longueur de la fibre et son élancement,
- la nature des fibres
- la fraction volumique des fibres dans la matrice,
- la distribution spatiale des fibres et leur orientation. [29]

3.8 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons résumé, l'état de connaissance sur le historique et le comportement mécanique des bétons de fibres, les types, les caractéristiques, la mise en œuvre et les compositions de béton de fibres aussi que influence de la présence des fibres dans les bétons renforcés par des fibres.

Quelques recherches sur les domaines d'application de chaque type et leurs effets sur la maniabilité et la résistance.

Chapitre 04 :

Durabilité de béton

A base

De pouzzolane

4. Chapitre 04 : Durabilité de béton a base de pouzzolane

4.1 Introduction :

Les matériaux pouzzolaniques sont employés d'une manière globale comme additifs (les cendres volantes, le laitier de haut fourneau, la fumée de silice, le calcaire et les pouzzolanes naturelles) avec les liants aériens et hydrauliques dans le but d'améliorer certaines caractéristiques des mortiers et des bétons. Seul des ajouts bien définis permettent d'exploiter au mieux leurs propriétés et avantages.

4.2 Historique

En Algérie :

Dés la fin de l'époque tertiaire, la côte oranaise fut le siège d'une activité volcanisme et passe d'une nature acide à un volcanisme basique où les formations basaltiques prédominent.

L'activité volcanique du tell oranais est manifestée presque entièrement dans sa partie côtière durant la période comprise entre la fin du miocène et le quaternaire. Cette activité est liée à la seconde phase de l'activité tectonique, phase de la tectonique cassante.

Les premières études sur le volcanisme de la Basse-Tafna remontent à 1874 lorsque Vélani donne une très courte description pétrographique du matériel éruptif et signale entre autre une néphéline dans l'île de Rachgoun qui a également été décrite par Lacroix .

Grâce à cette activité volcanique, l'Algérie possède une quantité appréciable de matériaux pouzzolaniques d'origine volcanique qui s'étend de façon sporadique sur une longueur de 160 km entre la frontière Algéro-Marocaine et le Sahel d'Oran.

Dés 1985, et après une étude sur les matériaux pouzzolaniques du gisement de Bou-Hamidi (situé à 2 Km 500 au sud de Béni-Saf), l'unité FER-PHOS entreprit l'exploitation decette pouzzolane et grâce à la ligne ferroviaire Béni-Saf - Ain Temouchent, elle est expédiée vers Zahana, Saïda, Chlef et d'autres régions du territoire Algérien. [33]

4.3 Définition

Le terme pouzzolane a deux sens bien distinct, le premier indique les roches pyroclastiques de structure vitreuse et parfois zéolithique, qu'on trouve au voisinage de la région de Pouzzolane ou de Rome en Italie, le second qui est plus large en terme d'origine géologique, composition et de structure, englobe tous les matériaux inorganiques d'origine naturelle ou artificielle qui réagissent puis se solidifient dans l'eau en présence de la chaux ou mélangés avec d'autres matériaux qui peuvent libérer de l'hydroxyde de calcium (clinker du ciment Portland).

Depuis longtemps, l'usage de pouzzolanes a été restreint à l'Italie, ou des réserves considérables de pouzzolane fut trouvés et à la Grèce. Dans les autres pays l'intéressement à ses matériaux est relativement de récente date, il émerge du besoin de réutilisé des déchets de matériaux tels que les cendres volantes ou la fumée de silice. Cette aperçue historique peut expliquer pourquoi tant de pays ont si longtemps décrédibilisé les ciments contenant de la

pouzzolane, malgré le fait que l'usage de mortier $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -pouzzolane date de plusieurs millénaires, plusieurs études ont montrées par la suite que les bétons avec ajout de matériaux pouzzolanique ont montrés d'incroyable résistance mécanique et de bonne résistances au agents agressifs. [34]



Figure 4.1: Pouzzolane Béni-Saf - Ain Temouchent

4.4 Types de pouzzolane

Les matériaux pouzzolaniques sont divisés en deux grandes catégories : les matériaux naturels et les artificiels.

4.3.1 Pouzzolanes naturelles

Est un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolanique .Elle peut être d'origine volcanique: verre volcanique, ponce, rhyolite, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire: terre à diatomites.

Tableau 4.1: caractéristique physique de la pouzzolane naturelle [33]

Caractéristique physique	Valeurs
Masse volumique apparente (g/cm ³)	0.98
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.75
Surface spécifique Blaine (cm ²)	3560
Pouzzolanité (%)	85
Porosité (%)	58.70
Humidité (%)	2.50
Absorption (%)	57.10
Perte au feu	5.60

Tableau 4.2: caractéristique chimique de la pouzzolane naturelle [35]

Les Composante	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	So ₄	Cl	PF	T
Les teneurs(%)	74.48	12.83	1.51	3.92	0.34	Nul	Nul	0.21	100.29

➤ **Verre volcanique**

Il y a lieu de citer les pouzzolanes des roches pyroclastiques meubles ou à faible cohésion provenant des éruptions volcaniques. Ce type de roche se trouve dans un état vitreux ou du moins sous une forme d'instabilité ou de réactivité qui les rend sensibles à l'attaque par l'hydroxyde de calcium. On mentionne à titre d'exemples : pouzzolane de SANTORIN, de BALCOL en Italie et de SHIRASHU au Japon.

➤ **Tufs volcaniques compacts**

Elles sont différentes des pouzzolanes de type verre volcanique. Ce sont les mêmes roches, mais ayant subi des transformations chimiques. L'altération du verre volcanique dans des conditions hydro thermiques se traduit par la formation des minéraux zéolitiques de composition chimique variable. Ce genre de pouzzolanes se distingue par une texture dure et compacte.

4.4.1 Pouzzolanes artificielles

Les pouzzolanes artificielles sont toute matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Elles sont des déchets des effluents industriels. On distingue. Soit des résidus de fabrication industrielle tel que. le mach fers , cendre de bois ou d'houille , soit des débris de brique et de tuile fabriquées avec des argiles pures des températures modérées . On distingue aussi le schiste cuit, et les déchets de l'industrie à base de méta kaolinite. [36]

4.4.1.1 Cendres volantes

Les cendres volantes sont le résidu finement divisé résultant de la combustion de la houille pulvérisée, dans les centrales thermiques. La première utilisation des cendres volantes comme matériau pouzzolanique a débuté aux USA en 1937.

On définit trois types de cendres volantes, en fonction de leur teneur en oxyde de calcium (CaO). Les cendres volantes qui présentent des teneurs en CaO inférieures à 8 %, celles allant de 8 % à 20 % et celles supérieures à 20 %. En général, plus la teneur en CaO est élevée, plus

les propriétés d'auto-cimentation sont bonnes. Le constituant majeur est une phase vitreuse formée de silice et d'alumine de 50 à 90%. [37]



Figure 4.2: Les cendres volantes.

Tableau 4.3: Composition chimique type de certaines cendres volantes d'après Aitcin.

Composés	Classe F	Classe F	Classe C	Sulfo – calcique	Sulfo – calcique
SiO₂	59.4	47.4	36.2	24.0	13.5
Al₂O₃	22.4	21.3	17.4	18.5	5.5
Fe₂O₃	8.9	6.2	6.4	17.0	3.5
CaO	2.6	16.6	26.5	24.0	56
MgO	1.3	4.7	6.6	1.0	1.8
Na₂O	2.2	0.4	2.2	0.8
SO₃	2.4	1.5	2.8	8.0	15.1

Perte au feu	2.0	1.5	0.6
SiO₂+AL₂O₃+Fe₂O₃	90.7	74.9	60	59.5	22.5
Chaux libre	28.0

4.4.1.2 Laitier granulé de haut fourneau (LGHF)

Le laitier granulé de haut fourneau (LGHF) est un produit composé essentiellement de silicates, d'aluminosilicates de calcium et d'autres bases, qui provient de fusion du minerai de fer dans un haut fourneau, et qui est obtenu par refroidissement rapide à l'eau pour former des particules vitreuses granulées, puis broyé à une finesse égale ou inférieure à celle du ciment.

Les analyses minéralogiques de LGHF indiquent que la teneur en verre varie de 80 % à 100 %. [37]



Figure 4.3: laitier de haut fourneau.

Tableau 4.4: Composition chimique de laitiers de haut fourneau.

OXYDES	Laitier français	Laitier nord U S A	Laitier algérien
SiO₂ %	29 à 36	33 à 42	38 à 42
Al₂O₃ %	13 à 19	10 à 16	8 à 12
CaO%	40 à 43	36 à 45	48 à 52
Fe₂O₃ %	4	0.3 à 20	2.0
MgO%	6	3 à 12	4.7

4.4.1.3 Argiles calcinées

Obtenues par cuisson d'argiles à une température variant de 600° à 900° C, puis elle est moulue à la finesse du ciment.

L'argile de base utilisée est en grande partie constituée de silicate d'aluminium. Le traitement thermique transforme la silice et l'alumine dans un état amorphe qui favorise l'activité pouzzolanique. Un autre type d'argile crue peut être traité de la même manière d'origine sédimentaire contenant de l'argile et riche en silice. [38]

**Figure 4.4: Fillers calcaires.**

4.4.1.4 Fumée de silice

Les fumées de silice sont des particules de très petite taille (environ $0,1\mu\text{m}$) issues de l'industrie de l'acier. Ces particules sont principalement composées de silice amorphe (>85%) et présentent des propriétés pouzzolaniques. Elles permettent de compléter la granulométrie des ciments et ainsi d'améliorer la compacité du matériau durci et donc sa résistance mécanique.



Figure 4.5: La fumée de silice.

D'un point de vue chimique, la fumée de silice est essentiellement composée de silice (Tableau). La teneur en SiO_2 de la fumée de silice varie selon le type d'alliage produit. Plus la teneur en silicium de l'alliage est élevée plus la teneur en SiO_2 de la fumée de silice est élevée. Les fumées de silice produites durant la fabrication de silicium métal contiennent en général plus de 90% de SiO_2 . La fumée de silice produite lors de la fabrication d'un alliage Fe– Si à 75% à une teneur en silice généralement supérieure à 85%.

Tableau 4.5 : Composition chimique de certaines fumées de silice

Composés	Silicium (grise)	Ferro silicium (grise)	Blanche
% SiO ₂	93.7	87.3	90.0
% AL ₂ O ₃	0.6	1.0	1.0
% CaO	0.2	0.4	0.1
% Fe ₂ O ₃	0.3	4.4	2.9
% MgO	0.2	0.3	0.2
% Na ₂ O	0.2	0.2	0.9
% K ₂ O	0.5	0.6	1.3
% Perte au feu	2.9	0.6	1.2

4.5 Effet de La pouzzolane

La pouzzolane confère aux bétons les propriétés suivantes :

4.5.1 A l'état frais

Les pouzzolanes améliorent l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité couplées à une réduction de la tendance au ressuage. Elles réduisent la chaleur d'hydratation, cet effet se traduit par une réduction sensible de la fissuration.

4.5.2 A l'état durci

Les pouzzolanes améliorent la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très favorables.

- ✚ accroissement de la résistance finale.
- ✚ Légère diminution du retrait et du fluage.
- ✚ Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité.

- ✚ Amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques.
- ✚ Protection des armatures contre la corrosion.
- ✚ Une réduction générale de la teneur en hydroxyde de calcium dans le béton avec deux conséquences bénéfiques.
- ✚ Une réduction notable du risque d'apparition d'efflorescences de chaux sur les faces Exposées du béton.
- ✚ Une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces. [37]

4.6 Propriété de la pouzzolane

Les pouzzolanes sont des roches " acides " ayant des teneurs élevées en silice et en alumine (entre 70 et 80% pour les deux composants ensemble), puis en fer, en alcalins, en magnésie et en chaux.

4.6.1 Propriétés hydrauliques

La pouzzolane est capable de réagir en présence d'eau avec de l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stable, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes. [39]

4.6.2 Propriétés physiques de remplissage

En plus de leur effet pouzzolanique, elles jouent un rôle de remplissage des pores des produits hydratés et de correcteurs granulaires, ce qui améliore la compacité et diminue la perméabilité.

4.6.3 L'utilisation des ajouts en Algérie :

L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour l'Algérie comme tous pays en voie de développement. Cependant, parmi les moyens efficaces qui existent pour augmenter la production du ciment est celui d'utiliser des ajouts qui sont très peu coûteux et disponibles en grande quantité en Algérie, comme le laitier d'El – Hadjar, le calcaire et la pouzzolane naturelle de Beni – Saf. [40]

Tableau 4.6: Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes [41]

Entreprise	Cimenterie	Ajouts Utilisés
ERCE	Ain Tauta	Pouzzolane
	Ain El kibira	
	Hamma Bouziane	
	H'djarEssaoud	Laitier
	Tebessa	
ERCC	Meftah	Tuf / Calcaire
	Raiss Hamidou	Poussiere
ECDE	Sour ElGhozlane	Calcaire
ERCO	Béni Saf	Pouzzolane
	Zahna	
	Saida	

4.7 Evaluation de l'activité pouzzolanique :

Plusieurs méthodes ont été avancées pour expliquer les propriétés des pouzzolanes comme étant un matériau naturel ou artificiel riche en silice et l'alumine capable de :

- Réagir avec la chaux en présence d'eau,
- Former par cette réaction des produits aux propriétés liantes.

A partir de cette définition, on distingue deux catégories d'essais qui, en premier lieu caractérisent l'existence de la réaction pouzzolanique, et en second lieu, mettre en évidence les produits d'hydratation aux propriétés liantes et leur influence sur les caractéristiques mécaniques.

4.8 Domaine d'utilisation de la pouzzolane :

Les pouzzolanes présentent diverses possibilités d'utilisation, les principaux domaines sont les suivants:

- ✚ Dans la fabrication du ciment : la pouzzolane est fournie principalement aux cimenteries pour être utilisé autant qu'ajout actif au clinker.
- ✚ En hiver : elle sert pour le sablage des routes verglacées.
- ✚ Dans les travaux publics : elle est utilisée comme matériaux de remblais légers pour la réalisation des terrains de sport, piste d'athlétisme, amendement de terrains gazonnés.
- ✚ Dans l'industrie : additionnée au ciment elle permet la confection de béton léger très utile pour la construction des bâtiments, elle entre dans la fabrication des parpaings et hourdis légers.
- ✚ En agriculture : La pouzzolane est utilisée pour l'amendement de certains sols.
- ✚ Dans la fabrication des carreaux granito.
- ✚ Fabrication des allumettes.
- ✚ Fabrication des produits cosmétiques

4.9 Conclusion :

Vu que l'effet pouzzolanique pouvait être obtenu non seulement à partir de matériaux naturels notamment d'origine volcanique et d'origine sédimentaire mais aussi à partir de matériaux artificiels tels que : cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux, fumée de silice et autres, la pouzzolane en générale, se définit comme étant un ajout minéral actif d'origine naturelle ou artificielle riche en silice et en alumine.

Les pouzzolanes naturelles sont des produits émis essentiellement par une lave vitreuse, On peut citer comme produit provenant généralement d'une lave vitreuse, les formations volcaniques.

Selon beaucoup de chercheur, la réaction pouzzolanique est liée à certaines exigences chimiques et physiques. En effet l'activité pouzzolanique est vérifiée par le taux de fixation de la chaux et le temps nécessaire qu'il faut. On distingue deux catégories d'essais qui caractérisent les propriétés des pouzzolanes, comme étant un matériau riche en silice et l'alumine capable de réagir avec la chaux et former des produits aux caractères liant, de sorte à influencer les caractéristiques mécaniques. Ces essais se basent essentiellement sur les déterminations chimiques, et s'appuie sur les méthodes physiques et mécaniques.

Chapitre 05 :

Matériaux utilisé

Et

Méthodes d'essais

5. Chapitre 05 : Matériaux utilisé et méthodes d'essais

5.1 Introduction :

Nous présentons dans ce chapitre, les différentes essais et méthodes de caractérisation des matériaux utilisés durant ce travail, les procédures des malaxages pour confectionner nos mélanges ainsi que les essais expérimentaux pour caractériser les bétons à l'état frais et durci.

5.2 Matériaux utilisés

5.2.1 Préparation de l'échantillon de la pouzzolane

Le concassage des roches pouzzolaniques a été effectué manuellement à l'aide du marteau-pilon. Cette tâche était un peu difficile mais elle nous a permis d'obtenir les classes granulaires servant à la formulation des mortiers qu'on a étudiés.

5.2.2 Ciment

L'étude a été menée sur du béton léger, en utilisant des matériaux locaux. Il a été fabriqué avec le Ciment Composite Portland (CEM II / A 42.5) de l'usine de Beni-Saf (ouest de l'Algérie), selon la norme algérienne NA 442. Ce ciment est bien adapté aux usages les plus courants du bâtiment dans la région ouest d'Algérie.

5.2.2.1 Composition du ciment :

Dans les Tableaux 1 et 2 on retrouve les analyses chimiques et minéralogiques du ciment utilisé, les essais ont été effectués au niveau du laboratoire de contrôle de la cimenterie de Beni Saf. Les caractéristiques physiques ont été déterminées au niveau du laboratoire de génie civil de Ain Témouchent (Tableau).

Tableau 5.1: Composition chimique du ciment CPJ CEMII /A 42.5

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Perte au feu	Insolubles	Total
23.65	56.80	5.52	3.22	1.03	2.45	2.42	4.6	99.69

C3S	C2S	C3A	C4AF	CaO libre
51.74	24.50	8.78	10.51	0.91



Figure 5.1: Le ciment utilisé CEM-II/AP 42.5

5.2.3 Granulats pouzzolaniques

La pouzzolane utilisée est une pouzzolane naturelle de provenance du gisement de BOUHAMIDI (Béni-Saf, Ain Témouchent). Cette pouzzolane est fournie sous forme de roches concassées de type pierre ponce et scorie, de diamètres variant entre 50 et 100 mm. Ces roches sont concassées et criblées afin d'obtenir les fractions granulaires utilisées dans le présent travail, à savoir un sable concassé 0/3, 0/5 Les caractéristiques chimiques de la pouzzolane sont données dans le tableau

Tableau 5.2: Analyse chimique de la pouzzolane.

Composants	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P.F
teneurs	47.48	18.83	10.51	9.92	4.38	0.50	2.20	0.81	3.91

**Figure 5.2: pouzzolane**

5.2.4 L'adjuvant

L'adjuvant utilisé est nommé {SUPERIOR 9 WG}, c'est un adjuvant super plastifiant à base de poly-carboxylates de nouvelle génération qui permettent de réaliser des béton très fluides avec des rapport E/C très. Produit par l'entreprise TEKNA CHEM. Dont Les caractéristiques sont présentées dans le tableau :

Tableau 5.3: Caractéristique de l'adjuvant.

Etat physique	Liquide
Couleur	Brun
Densité (g/cm ³ , à 20°C)	1.10(±0.03)
Ph (20°C)	5.5(±1)
Extrait sec	33%(±2%)
Teneur en chlorures	≤ 0.1%



Figure 5.3:L'adjuvant utilisé

5.2.5 Eau de Gâchage :

L'eau de gâchage utilisée est l'eau potable de robinet. Sa température est comprise entre 18 et 20 °C.

D'après l'analyse chimique de l'eau dans laboratoire des travaux publics à Oran nous avons acquis



Figure 5.4:L'eau de gâchage utilisé.

Tableau 5.4: Résultats d'analyse chimique de l'eau.

Constituants	Valeurs
HCO ₃	85.428 mg/L
SO ₄	28.80 mg/L
Chlorure	300mg/L
Résidu sec	740mg/L
Dureté	20°F
PH	5.65

5.2.6 Fibres :

Pour améliorer la résistance à la traction du béton nous avons utilisés des différents type de fibres tels que les fibres métalliques, fibres polypropylènes et fibre polyéthylènes (figure), dont les caractéristiques sont présentées dans le (tableau).

Tableau 5.5: Résultats d'analyse chimique de l'eau.

Type de fibre	Métallique	Polyéthylènes	Polypropylènes
Longueur (mm)	30	50	6
Diamètre (mm)	0.5	0.3	0.05
Densité (g/cm ³)	7.85	0.935	0.900
Résistance à la traction (Mpa)	1700	350	600
Module d'élasticité (Gpa)	150-200	5	5-10
Allongement à la rupture (%)	3-4	3-80	10-20



Figure 5.5: Type des fibres utilisées.

5.3 Méthodes d'essais

Afin de caractériser les différents matériaux utilisés on a entamé plusieurs essais au niveau du laboratoire de matériaux de génie civil Ain Témouchent.

5.3.1 Masse volumique apparent des granulats et ciments :

Cette manipulation a pour but de déterminer la masse volumique avec la méthode d'un récipient jaugé et pour plus de précision dans notre calcul de cette masse volumique, nous effectuerons les essais trois fois de suite :

La masse volumique apparente sera calculée avec cette formule :

$$\rho_{app} = \frac{(m_1+m_2+m_3)}{V} \quad (5.1)$$

Tableau 5.6: Masse volumique apparente

	Sable fin	Sable grosse	Ciment
Masse volumique apparente (g/cm)	1.46	1.17	1.02

5.3.2 Masse volumique absolue :

5.3.2.1 Définition :

La masse volumique absolue ρ_s est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains. Il ne faut pas confondre ρ_s avec la masse volumique ρ qui est la masse de matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides. Les masses volumiques s'expriment en t/m^3 , en kg/dm^3 , ou en g/cm^3 .



Figure 5.6: Entonnoir et récipient de mesure

5.3.2.2 But de l'essai :

Cet essai a pour but de permettre de connaître la masse d'une fraction granulaire lorsque par exemple on élabore une compression de béton. Ce paramètre permet, en particulier, de déterminer la masse ou le volume des différentes classes granulaires malaxées pour l'obtention d'un béton dont les caractéristiques sont imposées.

5.3.2.3 Conduite de l'essai :

- Remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau.
- Peser un échantillon sec M_s de granulats (environ 100g) et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
- Le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume V_2 .

5.3.3 Equivalant de sable :

Il est défini par la norme NFP 18-598 ; cet essai d'équivalent de sable, permettant de mesurer la propreté d'un sable, est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5mm. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent.

5.3.3.1 But de l'essai :

Cet essai utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci. b-Principe de l'essai :

_ L'essai est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier.

_ Le tamisage se fait par voie humide afin de ne pas perdre d'éléments fins. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 minutes, on mesure les éléments suivants :

- **Hauteur h_1** : sable propre + éléments fins,
- **Hauteur h_2** : sable propre seulement. On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention, est :

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad (5.2)$$

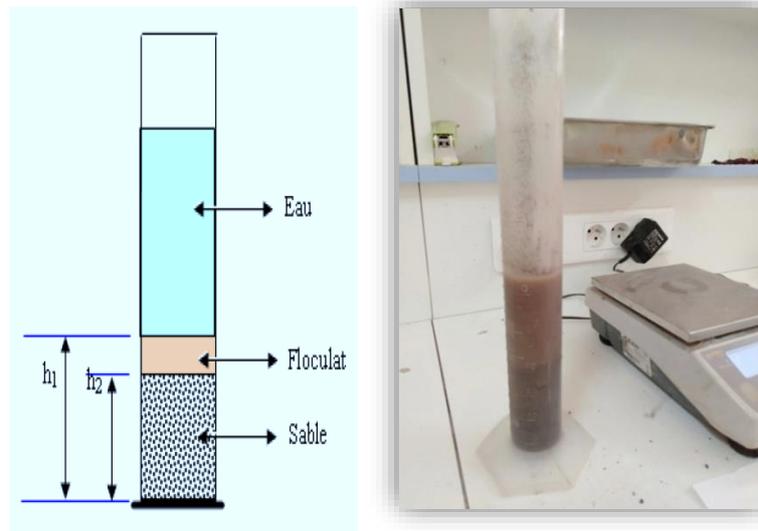


Figure 5.7: Essai de l'équivalent de sable

h1: hauteur des grains solides sableux.

h2: hauteur des grains solides sableux + des impuretés argileuses.

Es: l'équivalent de sable.

Selon que la hauteur **h2** est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston.

Tableau 5.7: Résultats de l'essai d'équivalence de sable.

	Sable fine	Sable grosse
Equivalence de sable (%)	74.46	80.35

5.3.4 Analyse granulométrique.

On peut définir l'analyse granulométrique par tamisage c'est un ensemble des opérations aboutissant à la séparation selon leur grosseur des éléments constituant échantillon, en employant des tamis à maille carrée afin d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension.

a. But de l'essai Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de détecter et miner la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63mm, à l'exclusion des filets.

A notre qu'il faut éviter la confusion entre la granulométrie qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité qui concerne la distribution dimensionnelle des graines d'un granulat.

b. Matériel nécessaire :

- Etuve ventilée.
- Tamis.
- Tamiseur.
- Balance.
- Fond et couvercle.



Figure 5.8: Matériel nécessaire de l'essai Analyse granulométrique

5.3.4.1 Analyse granulométrique de la pouzzolane (0/5) :



Figure 5.9: pouzzolane (0/5)

Poids initial d'échantillon sec : 1000 g

Tableau 5.8: Résultat d'analyse granulométrique pouzzolane (0/5)

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamis cumulé (%)	Module de finesse
5	34.9	34.9	3.49	96.57	3.32%
2.5	176.5	211.4	21.14	78.86	
1.25	315.6	527.0	52.70	47.3	
0.63	220.9	747.9	74.79	25.21	
0.31	123.3	871.2	87.12	12.88	
0.16	65.4	936.6	93.66	6.34	
0.08	35.5	972.1	97.21	2.79	
Fond	25.2	997.3	99.73	0.27	

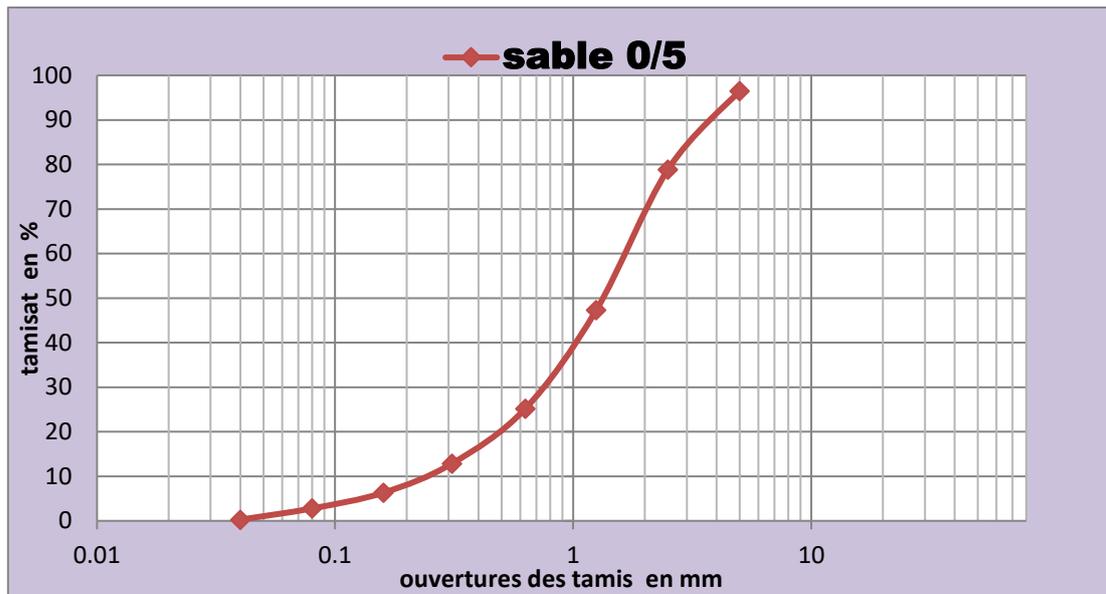


Figure 5.10: La courbe d'analyse granulométrique du pouzzolane (0/5)

5.3.4.2 Analyse granulométrique de la pouzzolane (sable fine) :



Figure 5.11: pouzzolane (sable fine)

Poids initial d'échantillon sec : 1000 g

Tableau 5.9: Résultat d'analyse granulométrique pouzzolane (sable fin)

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamis cumulé (%)	Module de finesse
5	0	0	0	0	2.1
2.5	20.1	20.1	2.01	97.99	
1.25	176.6	196.7	19.67	80.33	
0.63	257	453.7	45.37	54.63	
0.31	482.7	679.4	67.94	32.05	
0.16	157	836.4	86.64	16.36	
0.08	148.5	984.9	98.49	1.51	
Fond	14.3	999.2	99.92	0.08	

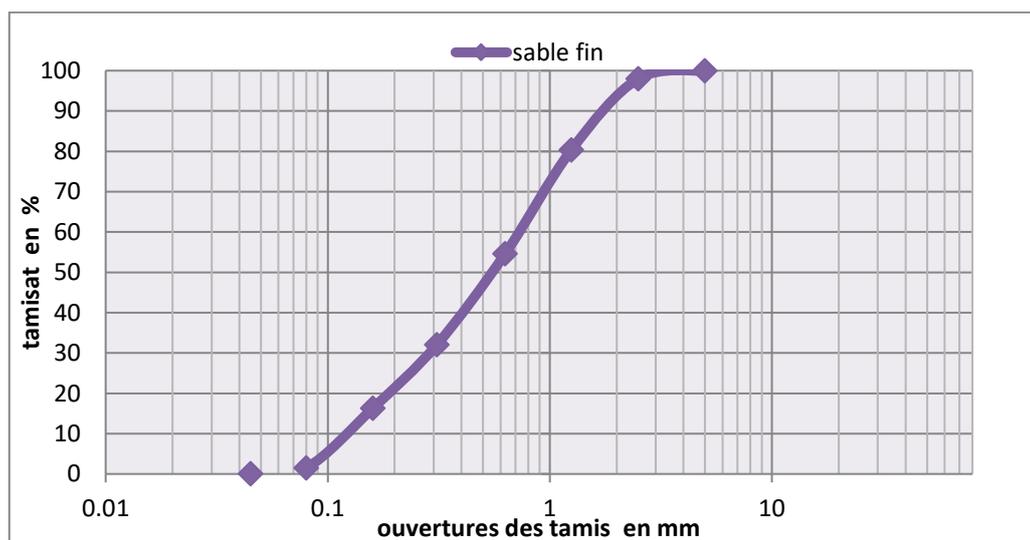


Figure 5.12: La courbe d'analyse granulométrique de la pouzzolane (sable fin)

Module de finesse(Mf) :

Est une caractéristique importante surtout en ce qui concerne les sables. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse Mf compris entre 2,2 et 2,8 ; au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité.

Pour $1,8 < \mathbf{Mf} < 2,2$: le sable est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance.

Pour $2,2 < \mathbf{Mf} < 2,8$: le sable est à utiliser si l'on recherche une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités.

Pour $2,8 < \mathbf{Mf} < 3,2$: le sable est à utiliser si l'on recherche des résistances élevées au détriment de l'ouvrabilité et avec des risques de ségrégation.

Pour $\mathbf{Mf} > 3,2$: le sable est à rejeter. Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables à bétons (NF P 18-540)

$$\mathbf{Mf} = \Sigma RC / 100 \quad (5.3)$$

Rc: refus cumulé en (%) sous les tamis de module 23 à 38.

Alors :

$$\mathbf{Mf} = 2,01 + 19,67 + 45,37 + 67,94 + 83,64 / 100 = 2,1$$

Correction de sable :

$$\text{Sable fine \%} = \frac{\mathbf{M.fsmelange} - \mathbf{M.fsgrand}}{\mathbf{M.fsgrand} - \mathbf{M.fsfine}} = \frac{2,80 - 3,32}{3,32 - 2,1} = 55 \%$$

$$\text{Sable grand \%} = \frac{\mathbf{M.fsmelange} - \mathbf{M.fsgrand}}{\mathbf{M.fsfine} - \mathbf{M.fsgrand}} = \frac{2,80 - 2,1}{3,32 - 2,1} = 45 \%$$

M.fs.m: module de finesse du sable fine.

M.fs.c : module de finesse du sable grand.

5.3.5 Essai de perméabilité de Blain



Figure 5.13:Essai de Blain

5.3.5.1 But de l'essai :

La notion de finesse de mouture est liée à la notion de "surface spécifique" qui désigne le total des aires de tous les grains contenus dans une quantité unité. Cette aire est d'autant plus grande que les grains sont plus petits, donc que la finesse de mouture est grande.

On a cherché une relation entre ces trois grandeurs. Il est possible de déterminer la surface spécifique d'un corps granulaire en mesurant la vitesse d'écoulement de l'air à travers ce corps ; et cette surface massique caractérise la finesse de mouture.

5.3.5.2 Principe :

Faire passer, dans des conditions bien définies, une certaine quantité de pouzzolane (par exemple) ; mesurer le temps de passage, et en déduire la surface spécifique par application d'une formule empirique.

5.3.5.3 Calcul :

Le volume V de la cellule est celui occupé par la pouzzolane

$$V = \frac{P_1 - P_2}{Mvhg} \quad (5.4)$$

En déduire la surface spécifique :

$$S_{sp} = \frac{K\sqrt{n^3} \times \sqrt{t}}{Mva(1-n)\sqrt{0.1n}} \quad (5,5)$$

D'après l'essai :

Le volume est : $V = 1.80 \text{ cm}^3$

La surface spécifique : $S_{sp} = 2583.42 \text{ g/cm}^2$

5.4 Préparation des éprouvettes :

- Dimensions des éprouvettes

Les éprouvettes doivent être de forme prismatique de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$.

- Moulage des éprouvettes Le moulage des éprouvettes se fait immédiatement après la préparation du mortier. Le moule et la hausse étant solidement fixés sur la table à chocs, introduire, à l'aide d'une cuillère appropriée, en une ou plusieurs fois, la première des deux couches de mortier dans chacun des compartiments du moule, directement à partir du bol de malaxage. Étaler la couche uniformément à l'aide de la grande spatule, tenu presque verticalement, avec ses épaulements en contact avec la partie supérieure de la hausse, et mue en avant et en arrière, une fois, sur toute la longueur de chaque compartiment du moule. Note le nombre de mouvements de scie et l'angle de la règle plate dépendent de la consistance du mortier. Les mortiers durs nécessitent un plus grand nombre de mouvements de scie et un angle plus aigu. Le nombre de mouvements des scies transversales nécessaires est plus petit pour le lissage que pour l'arasement. Enlever le résidu de mortier laissé sur le périmètre démoule par suite de l'arasement. Étiqueter ou marquer les moules pour permettre leur identification.



Figure 5.14: Malaxage



Figure 5.15: éprouvette

5.4.1.1 Codification du différent type de béton :

Tableau 5.10: Codification des bétons.

Mortier	Code
Mortier témoin	MT
Mortier avec fibre métallique	MFM
Mortier avec fibre polypropylène	MFP

Mortier avec fibre polyéthylène	MFE
---------------------------------	-----

La composition du mortier:

- sable corrigé = 1350g
- ciment = 400g
- eau de gâchage = 240g

Tableau 5.11: Formulations des bétons.

Matériaux	MT	MFM	MFP	MFE
Ciment (g)	400	400	400	400
Pouzzolane (g)	1350	1350	1350	1350
Eau (g)	240	240	240	240
Fibre (%)	0	0.11%	0.51%	0.67%
adjuvant	5.2	5.2	5.2	5.2

5.5 Préparation des solutions chimique :

5.5.1 L'acide sulfurique (H₂SO₄) :

L'acide sulfurique (H₂SO₄) est le plus fort des acides. Cet acide est incolore et inodore. Dans l'eau, il libère des ions hydroniums, H₃O⁺ et des ions sulfates, SO₄²⁻

L'hydratation de l'acide sulfurique est fortement exothermique c'est pourquoi, pour éviter les projections, on prendra toujours soin de verser l'acide dans l'eau et non l'inverse.

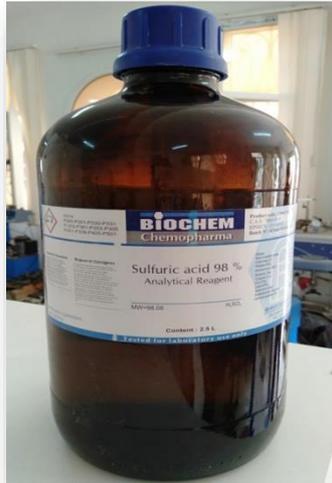
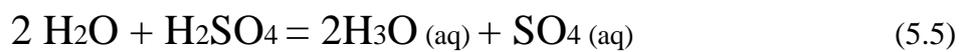


Figure 5.16: L'acide sulfurique (H₂SO₄)



Solution	Concentration(%)	Quantité/10 litres d'eau	Observation
H ₂ SO ₄	5	520ml / 10 L	Acide fort

5.5.2 L'eau de mer :

L'eau de mer qu'on a porté de la plage de Béni-Saf, est utilisée pour les résultats relatifs à l'analyse physico –chimique sont portés sur le (Tableau)

Tableau 5.12: Analyse physico-chimique de l'eau de mer.

Fer (Fe en mg/L)	2
Nitrite (NO ₂ - en mg/L)	7

Phosphate (PO ₄ ²⁻ en mg/L)	5
Sulfate (SO ₄ ²⁻ en mg/L)	3100
Bicarbonate (HCO ₃ ⁻ en mg / L)	1838
Les chlorures (CL ⁻ en mg/L)	19738
Dureté magnésique (Mg ₂₊ en mg/L)	851.76
Dureté calcique (Ca ₂₊ en mg/L)	175.5
Dureté totale (TH en mg/L)	246.48
Titre alcalimétrie complet (TAC en mg/L)	1500
Turbidité (NTU ; Nephelometric Turbidity Unit)	28.59
Salinité	10
PH	6.20

5.5.3 Le sel



Figure 5.17: le sel

Le sel de cuisine est une substance cristallisée, friable, soluble dans l'eau qu'on a utilisé pour les résultats relatifs à l'analyse physico –chimique sont portés sur le (Tableau)

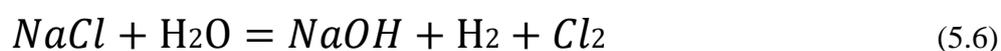


Tableau 5.13: Analyse physico-chimique de sel.

Analyses		Analyse physico-chimique	
Potassium	0,13%	Teneur en eau	6.9%
Sodium	36.18%	Insoluble dans l'eau	0.53%
Sulfates	0.99%	Chlorures	89.26%
Fer	180.4 mg /kg	Chlorures (sur extrait sec)	95.88%
Manganèse	2.4 mg/ kg	Calcium	0.20%
Zinc	1.0 mg/kg	Magnésium	0.34%

5.6 Conclusion

Les essais de caractérisation effectués au laboratoire donnent une idée générale sur les caractéristiques principales de la pouzzolane qui a été incorporée dans les différentes formulations étudiées en substitution de gravier.

Chapitre 06.

Résultats

Et

Discussions

6. Chapitre 06 : Résultats et discussions

6.1 Introduction :

Le présent chapitre récapitule les résultats des différents essais effectués sur les mortiers et de perte de masse, après leur exposition à des différents milieux agressives dans le but d'évaluer leur capacité à résister à ses agressions.

6.2 Les Milieux agressifs :

6.3 Essai de la perte de masse :

Après 24 heures du coulage, les éprouvettes de mortier ont été démoulées puis conservées Immédiatement dans une solution d'eau saturée en chaux, Après 28 jours de cure les éprouvettes des mortiers léger pouzzolanique sont pesées pour déterminer M1, puis elles sont amenées dans les bacs de conservation. Chaque bac contient une seule solution à une concentration de 5%. D'autres éprouvettes sont laissées à l'air libre.

Les éprouvettes conservées que ce soit dans les différents milieux agressifs ou l'air libre sont sorties après 7, 14,28 et 60 jours, sont nettoyées, lavées et séchées, par la suite les éprouvettes sont pesées pour déterminer M2. Enfin les éprouvettes sont soumises à l'essai de perte de masse après 7, 14,28 et 6 0jours. La perte de masse de l'éprouvette est mesurée comme suit :

$$\text{Perte de masse (\%)} = [(M1-M2) / M1] \times 100 \quad (6.1)$$

M1, M2 : les masses des éprouvettes avant et après immersion, respectivement.



Figure 6.1: Préparations des éprouvettes des mortiers

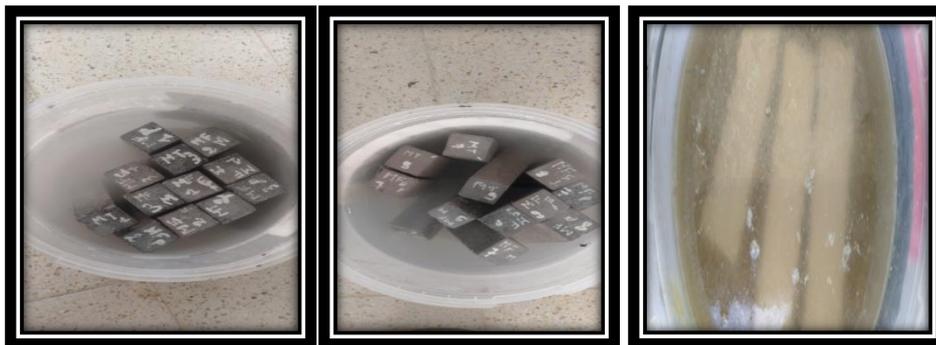


Figure 6.2: Conservation des éprouvettes dans des solutions chimiques à 5%

6.3.1 Masses des éprouvettes émergées dans l'acide sulfurique H_2SO_4 (acide fort)

La perte de masse pour les éprouvettes immergées dans l'acide sulfurique est assez importante. Après examen visuel, on a constaté une déformation des parois extérieures des mortiers.

Tableau 6.1: la Perte et le gain de masse des éprouvettes de BLP sans fibres immergées dans (H2SO4).

Epro	La perte de masse(%)				
	24h (g)	07 jours (g)	14 jours(g)	28 jours(g)	60 jours(g)
BT	556,4	565	/	/	/
BT	560,3	/	565	/	/
BT	576,2	/	/	587	/
BT	576,2	/	/	/	582
R (%)		-1,55	-0,84	-1,90	-1,01

Tableau 6.2 : la Perte et le gain de masse des éprouvettes de MLP avec fibres métalliques émergées dans l'acide sulfurique.

Epro	La perte de masse(%)				
	24h (g)	07 jours (g)	14 jours(g)	28 jours(g)	60 jours(g)
BFM	547,8	544	/	/	/
BFM	556,4	/	547	/	/
BFM	556,7	/	/	544	/
BFM	556,7	/	/	/	537
R (%)		0,69	1,68	2,28	3,53

Tableau 6.33 : la Perte et le gain de masse des éprouvettes de BLP avec fibres polypropylènes émergées dans l'acide sulfurique.

Epro	La perte de masse(%)				
	24h (g)	07 jours (g)	14 jours(g)	28 jours(g)	60 jours(g)
BFP	551,1	563	/	/	/
BFP	560,4	/	570	/	/
BFP	566,6	/	/	571	/
BFP	566,6	/	/	/	574
R (%)		-2,15	-1,71	-0,77	-1,30

Tableau 6.44 : la Perte et le gain de masse des éprouvettes de BLP avec fibres Polyéthylènes émergées dans l'acide sulfurique.

Epro	La perte de masse(%)				
	24h (g)	07 jours (g)	14 jours(g)	28 jours(g)	60 jours(g)
BFE	566,8	582	/	/	/
BFE	587,5	/	583	/	/
BFE	566,5	/	/	571	/
BFE	566,5	/	/	/	567
R (%)		-2,68	-0,76	-0,79	-0,08

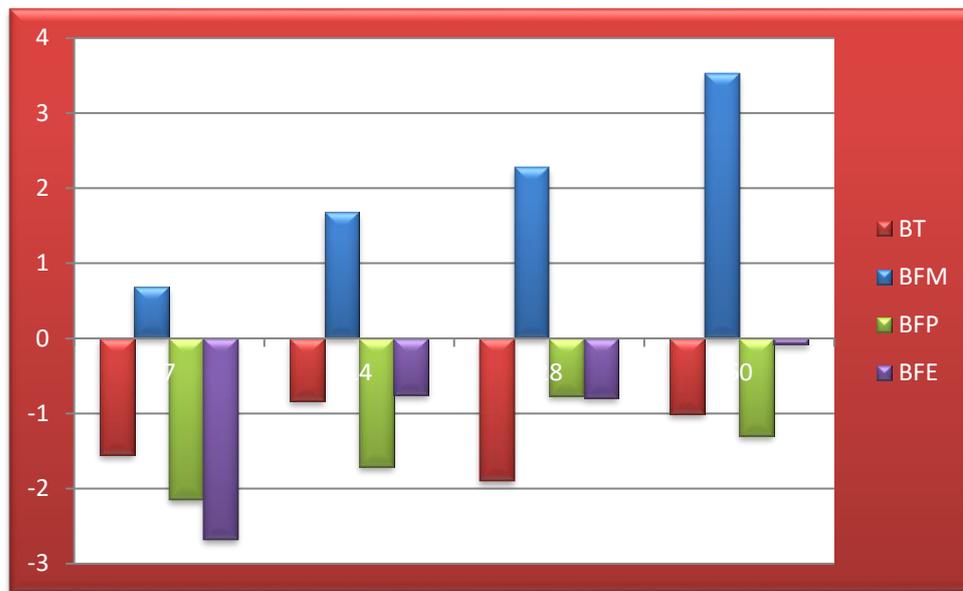


Figure 6.3: Evaluation de la Perte et du gain de masse des BLP dans l'acide sulfurique (H₂SO₄)

D'après cette figure :

Les résultats de l'immersion des échantillons de **BLP** dans l' H₂SO₄ à une concentration de 5% montrent une augmentation régulière de masse avec l'âge. Pour les éprouvettes de BFM il y a une perte de masse due a la formation des produits d'hydratation, et pour les autres éprouvettes de BT, BFP et PFE il s'est produit un gain de masse due à l'absorption des granulats pouzzolaniques qui continue jusqu'à 60 jours.

Attaque de l'acide sulfurique

6.3.1.1 Examen visuel

La solution a acquis une couleur blanchâtre après avoir été clair avant l'immersion des éprouvettes en BLP ;

- ✚ La solution s'avère comme elle est saturée des fines ayant une couleur blanchâtre.
- ✚ La quantité des débris de béton est relativement importante composé des éléments très Fin.
- ✚ La rugosité de la surface des éprouvettes est relativement élevée, cependant les surfaces sont lavées dénuées complètement de la pate ciment.
- ✚ Le gonflement des éprouvettes est très remarquable cela se traduit par la difficulté de
- ✚ prélèvement des éprouvettes dans le bac de conservation autrement sont trop serrées entre eux.



Figure 6.4: Résultat visuel dans le milieu acide sulfurique (H₂SO₄) après prélèvement des éprouvettes dans les bacs de conservation

6.3.2 Milieu Acide sulfurique H₂SO₄ :

L'acide sulfurique a une solubilité très faible dans l'eau (0.0043g /100 ml de H₂O) donc il est relativement inoffensif mais c'est les ions de sulfates qui jouent en l'occurrence le rôle nuisible.

La coloration de la surface des éprouvettes en blanc après leurs immersions dans L'acide sulfurique explique la présence de gypse et d'étrangéité Lorsque le béton est exposé à l'acide sulfurique. Le sel de calcium produit par la réaction de l'acide sulfurique et de l'hydroxyde de calcium est un sulfate de calcium qui cause alternativement une dégradation accrue due à l'attaque de sulfate. Ce processus est illustré ci-dessous :



Acide sulfurique + hydroxyde de calcium sulfate de calcium + eau.

(Le produit de sulfate de calcium contribue à l'attaque de sulfate).

La dissolution de l'hydroxyde de calcium provoquée par l'attaque acide procède en deux phases. La première phase étant la réaction acide-hydroxyde de calcium dans la pâte de ciment. La deuxième phase étant la réaction acide-silicate de calcium hydraté, cette phase ne commencera pas jusqu'à ce que tout l'hydroxyde de calcium soit consommé. La dissolution desilicate de calcium hydraté, dans les cas les plus avancés de l'attaque par l'acide, peut endommager considérablement le béton.

L'attaque de l'acide sulfurique peut être sous la forme de gonflement provoqué par naissance des formations nouvelles très volumineuses. A l'état plastique, les pressions

décristallisation et d'hydratation sont neutres étant donné qu'il y a des possibilités de déformation. Ce n'est qu'après un état de durcissement minimal que les réactions de gonflement peuvent causer des dommages.

Sulfate de calcium + portlandite \rightarrow gypse secondaire

Gypse secondaire + aluminat de calcium \rightarrow Ettringite \rightarrow expansion

6.3.3 Masses des éprouvettes émergées dans l'eau de mer :

Tableau 6.5: la Perte et le gain de masse des éprouvettes de BLP sans fibres immergées dans L'eau de mer.

Epro	La perte de masse(%)				
	24h (g)	7 jours (g)	14 jours(g)	28 jours(g)	60jours (g)
BT	567,9	569	/	/	/
BT	568,2	/	571	/	/
BT	561,1	/	/	564	/
BT	561,1	/	/	/	565
R (%)		-0,17	-0,49	-0,51	-0,69

Tableau 6.6: la Perte et le gain de masse des éprouvettes de MLP avec fibres métalliques émergées dans L'eau de mer.

Epro	La perte de masse(%)				
	24h (g)	07 jours	14	28	60

		(g)	jours(g)	jours(g)	jours(g)
BFM	553,3	555	/	/	/
BFM	579,2	/	582	/	/
BFM	584,2	/	/	587	/
BFM	553,3	/	/	/	556
R (%)		-0,30	-0,43	-0,47	-0,48

Tableau 6.77 : la Perte et le gain de masse des éprouvettes de BL Pavéc fibres polypropylènes émergées dans L'eau de mer.

Epro	La perte de masse(%)				
	24h (g)	07 jours (g)	14 jours(g)	28 jours(g)	60 jours(g)
BFP	556,4	559	/	/	/
BFP	565,9	/	569	/	/
BFP	570,4	/	/	574	/
BFP	565,9	/	/	/	570
R (%)		-0,46	-0,54	-0,63	-0,72

Tableau 6.8: la Perte et le gain de masse des éprouvettes de BLP avec fibres Polyéthylènes émergées dans L'eau de mer.

Epro	La perte de masse(%)				
	24h (g)	07 jours (g)	14 jours(g)	28 jours(g)	60 jours(g)
BFE	574,3	577	/	/	/
BFE	586,7	/	590	/	/
BFE	574,3	/	/	573	/
BFE	574,3	/	/	/	579
R (%)		-0,47	-0 ,56	-0,64	-0,81

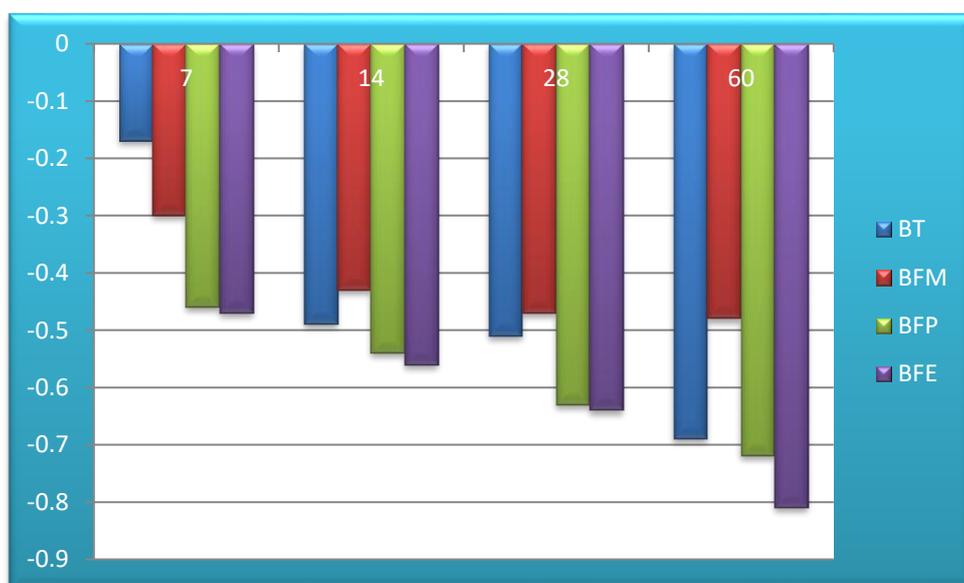


Figure 6.5: Evaluation du gain de masse de BLP dans l'eau de mer

- ❖ Les résultats de l'immersion des échantillons de **BT, BFM, BFP, et BFE** dans l'eau de mer montrent une augmentation plus au moins importante de gain de masse, qui continue jusqu'à 60 jours

6.3.4 Masse des éprouvettes émergées dans le sel :

Tableau 6.99 : la Perte et le gain de masse des éprouvettes de BLP sans fibres immergées dans le sel.

Epro	La perte de masse(%)				
	24h (g)	07 jours (g)	14 jours(g)	28 jours(g)	60 jours(g)
BT	576,4	577	/	/	/
BT	580,4	/	581	/	/
BT	557,9	/	/	557	/
BT	576,4	/	/	/	576,4
R (%)		-0,10	-0,10	-0,16	-0,42

Tableau 6.10: la Perte et le gain de masse des éprouvettes de MLP avec fibres métalliques émergées dans le sel.

Epro	La perte de masse(%)				
	24h (g)	07 jours (g)	14 jours(g)	28 jours(g)	60 jours(g)
BFM	577,5	578	/	/	/
BFM	560,9	/	562	/	/

BFM	577,5	/	/	579	/
BFM		/	/	/	552
R (%)		-0,08	-0,19	-0,25	-0,20

Tableau 6.11: la Perte et le gain de masse des éprouvettes de BLP avec fibres polypropylènes émergées dans le sel.

Epro	La perte de masse(%)				
	24h (g)	07 jours (g)	14 jours(g)	28 jours(g)	60 jours(g)
BFP	485,1	486	/	/	/
BFP	571,3	/	573	/	/
BFP	485,1	/	/	486	/
BFP	485,1	/	/	/	487
R (%)		-0,20	-0,29	-0,39	-0,39

Tableau 6.12: la Perte et le gain de masse des éprouvettes de BLP avec fibres Polyéthylènes émergées dans le sel.

Epro	La perte de masse(%)				
	24h (g)	07 jours (g)	14 jours(g)	28 jours(g)	60 jours(g)

BFE	567,6	568	/	/	/
BFE	561,7	/	564	/	/
BFE	567,6	/	/	569	/
BFE	567,6	/	/	/	570
R (%)		-0,07	-0,23	-0,24	-0,42

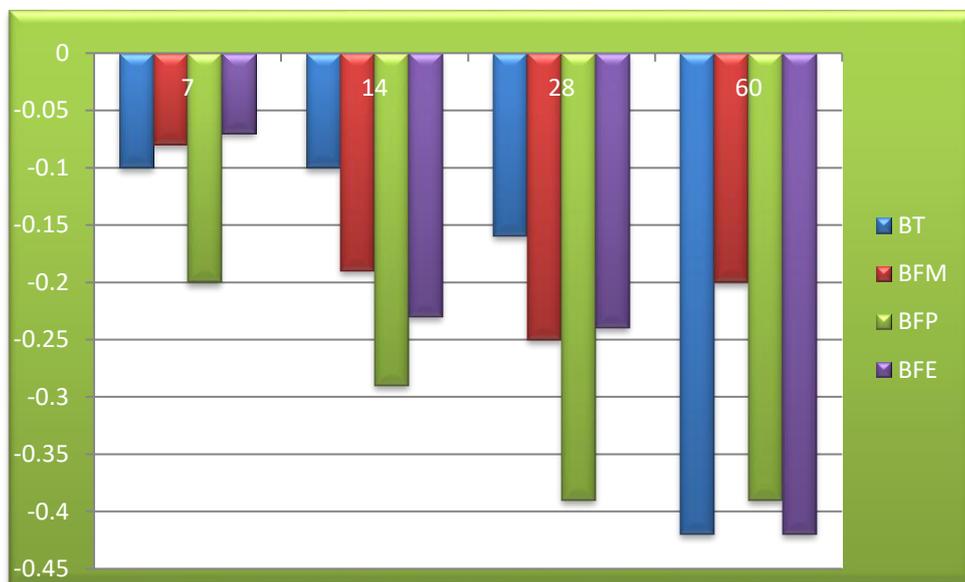


Figure 6.6: Evaluation le gain de masse de BLP dans le sel (Na Cl).

❖ Les résultats de l'immersion des échantillons **BT**, **BFM**, **BFP**, et **BFE** dans le sel (Na Cl) à une concentration de 5% montrent une augmentation plus au moins importante de gain de masse, qui continue jusqu'à 60 jours.

6.4 Interprétation des résultats :

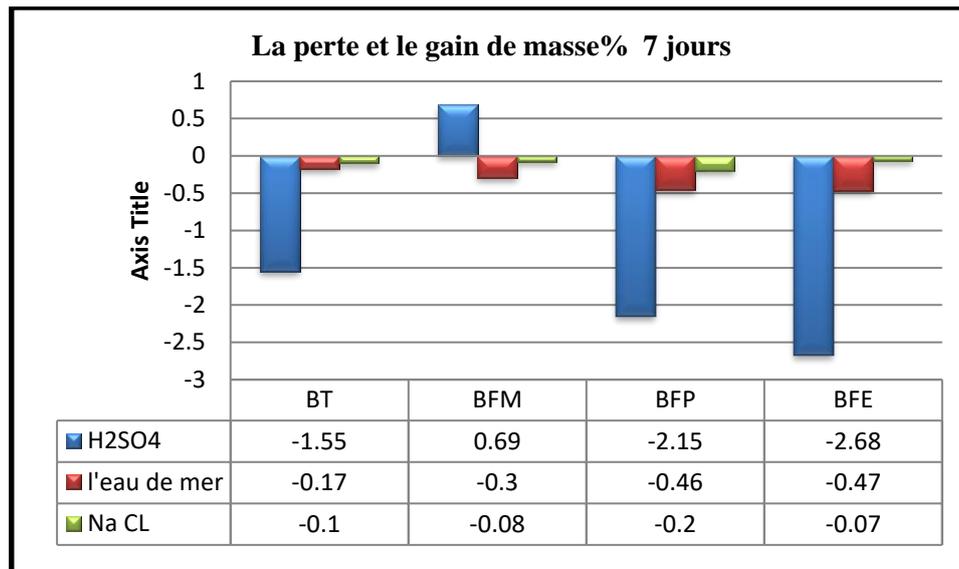


Figure 6.7: Evaluation de la Perte et du gain de masse des BLP.

6.4.1 Interprétation des résultats 7 jours:

A l'âge de 7 jours on a remarqué un gain de masse pour tous les échantillons immergés dans les trois attaques chimiques utilisés, sauf pour les BFM dont une perte de masse de 0,69% est mesurée.

Les gains de masse ont été très remarquables pour les éprouvettes immergées dans l'acide sulfurique. Les BFE ont donné la valeur la plus importante de gain de masse 2,68%, les BFP 2,15% et les BT ont donné une valeur de 1,55%.

La submersion des éprouvettes des quatre formulations étudiées dans l'eau de mer a produit un gain de masse mais il est moins important par rapport à celle des éprouvettes immergées dans l' H_2SO_4 , tandis que la submersion dans le sel a montré un léger gain de masse pour les quatre séries BFE 0,07% BFP 0,2% BFM 0,08% BT 0,1 %.

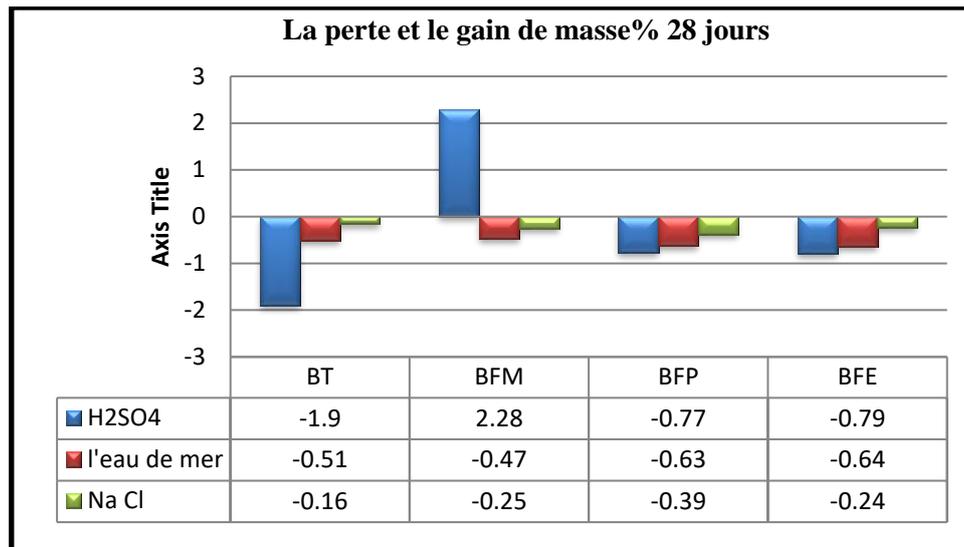


Figure 6.8: Evaluation de la Perte et du gain de masse des BLP

6.4.2 Interprétation des résultats 28 jours :

A l'âge de 28 jours, on a une augmentation considérable de la perte de masse des BFM immergés dans l'acide sulfurique, sa valeur égale à 2,28%, un gain de masse est observé toujours pour toutes les autres formulations et quelque soit l'attaque chimique. Mais pour les éprouvettes immergées dans l' H_2SO_4 on remarque une diminution du gain de masse pour les BT 1,9% par rapport à l'âge de 7 jours, la même remarque été observée pour les BFP et BFE mais la diminution du gain de masse pour les deux derniers est plus importante BEP 0,77%, BFE 0,79%.

Le cas contraire dans les éprouvettes immergées dans l'eau de mer, où le gain de masse a augmenté légèrement BT 0,51%, BFM 0,47%, BFP 0,63%, BFE 0,64%. Les séries immergées dans le sel ont présenté une évolution pareille que celle de l'eau de mer. Une augmentation légère été notée pour toutes les éprouvettes BT 0,16%, BFM 0,25%, BFP 0,39% et BFE 0,24%.

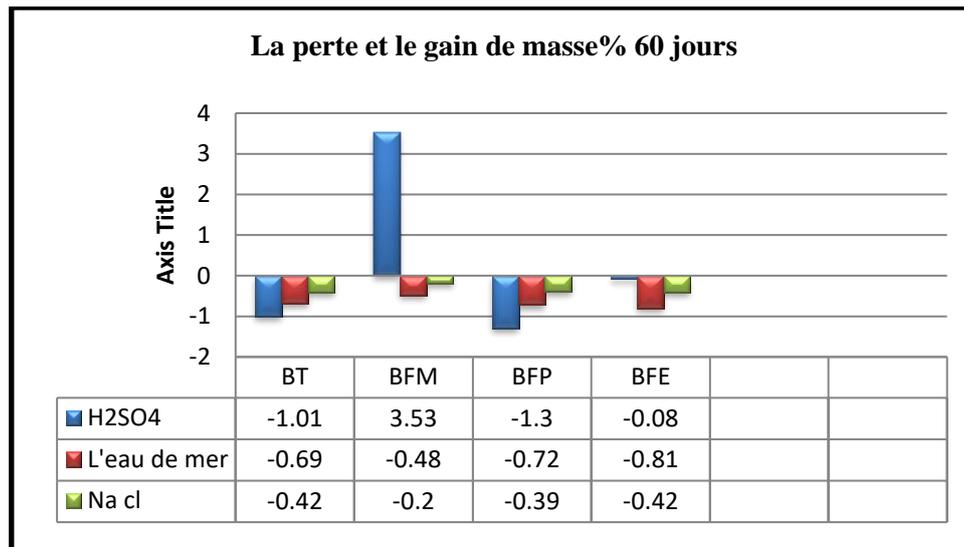


Figure 6.9: Evaluation de la Perte et du gain de masse des BLP.

6.4.3 Interprétation des résultats 60 jours :

A l'âge de 60 jours et en comparaison avec les résultats obtenues à l'âge de 28 jours. Pour les éprouvettes immergées dans l' H_2SO_4 une augmentation légère de la perte de masse a été observée pour les BFM 3,53%. Les BT et les BFE ont présenté une diminution du gain de masse à 60 jours mais celle de BFE est très importante BFE 0,08 %, BT 1,01%. Cependant pour les BFP on a une faible augmentation du gain de masse 1,3%.

Pour ce même âge on a observé un léger gain de masse pour les séries mises dans l'eau de mère, les valeurs obtenues sont les suivantes : BT 0,69%, BFP 0,72% et BFE 0,81%.

Concernant les échantillons immergés dans le sel, l'évolution du gain de masse est variable, on a une augmentation pour les BT 0,2% et une stabilisation de masse pour les BFP 0,39%.

6.5 Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté les résultats des essais expérimentaux effectués dans cette étude. Ces essais font partie des testes de durabilité du béton léger il s'agit de la perte de masses. Ce travail expérimental nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- ❖ L'influence des acides forts H_2SO_4 sur la perte de masses des échantillons est plus importante que les autres attaques chimiques (l'eau de mère et l' $Na Cl$). On constate que l'effet des acides H_2SO_4 est plus agressif.
- ❖ Le résultat du gain de masse des éprouvettes conservées en acide sulfurique, au sel et à l'eau de mer augmente en fonction du temps, et ça revient au gonflement des éprouvettes.
- ❖ On remarque que le gain de masse dans le milieu d'acide sulfurique (H_2SO_4) est supérieure que le gain de masse dans le milieu agressif d'eau de mer et du $Na Cl$.
- ❖ Les fibres métalliques favorisent la dégradation des BLP dans l'acide sulfurique, En revanche cet effet n'été pas observé pour les autres fibres de polypropylènes et polyéthylènes.

Conclusion

Général

Conclusion général :

L'objet de ce travail était d'évaluer l'influence de la pouzzolane de la carrière de Bou Hamidi de Béni Safsur la durabilité du Béton à partir de plusieurs essais de perte de masse réalisés sur des éprouvettes en béton léger exposées à différents milieux agressives. Des ajouts ont été ajoutés au béton léger élaborés a base de pouzzolane afin d'améliorer sa durabilité. Ces ajouts sont des fibres métalliques, fibres de polypropylènes et fibres polyéthylènes.

Les conclusions les plus importantes peuvent être notées comme suivant :

- ❖ Pour garder une maniabilité constante, il faut augmenter la quantité d'eau de gâchage par rapport au béton ordinaire.
- ❖ On a constaté que le milieu d'acide sulfurique (H_2SO_4) est le plus agressif au béton léger à base de granulats pouzzolaniques, avec au sans ajout de fibres et quelques soit le type de fibre utilisé. On effet, Les bétons exposés à cet acide ont une grande perte de masse par rapport a ceux conservés dans l'Na Cl et l'eau de mer.
- ❖ Une perte de masse était observée dans les BFM à jeune âge pour tous les milieux d'attaques chimiques. De cela on a pu constater que les fibres métalliques favorisent la dégradation des BLP. En revanche cet effet n'était pas observé pour les autres fibres de polypropylènes et polyéthylènes.
- ❖ Le gain de masse des éprouvettes de BT, BFP et BFE conservées en acide sulfurique, au sel et à l'eau de mer augmente en fonction du temps, et ça revient au gonflement des éprouvettes. Ce phénomène s'apparaisse à cause de l'absorption d'eau des granulats pouzzolaniques. On remarque aussi que le gain de masse dans le milieu d'acide sulfurique (H_2SO_4) est supérieur que le gain de masse dans l'eau de mer et l'Na Cl Car dans ce milieu le gonflement est due non seulement à l'absorption de la pouzzolane mais aussi a des réactions chimiques qui provoquent la naissance des nouvelles composants volumineux.
- ❖ Selon l'étude bibliographique, l'utilisation des granulats pouzzolaniques dans les bétons légers améliore ses propriétés mécaniques et sa longévité. Ce qui permet de

l'utiliser dans les nouvelles constructions [Mme DERBAL]. Sa légèreté favorise aussi son utilisation dans les solives des dalles.

- ❖ Les granulats de la pouzzolane sont très poreuses et leur masse volumique est moins importante que la masse volumique des granulats ordinaires.
- ❖ L'utilisation des bétons légers dans le domaine de la construction est très bénéfique, en terme de la diminution de la masse totale des constructions, ceci va baisser l'intensité des forces sismiques, donc il donne une meilleure résistance sismique.
- ❖ L'incorporation de la pouzzolane naturelle dans les bétons légers fournit une possibilité économique de production dans l'industrie.
- ❖ Les bétons légers à base de pouzzolane avec ajouts sont actuellement utilisés pour la confection des bétons. Cela présente plusieurs avantages non seulement économiques mais aussi écologiques et de point de vue technique ils améliorent certaines propriétés des bétons.

- ❖ En perspective nous pouvons dire que cette étude doit être complétée par des essais de propriétés mécaniques Afin de valider l'utilisation de ces granulats pouzzolaniques dans l'élaboration des bétons légers. Mais nous sommes navrés de ne pouvoir compléter ces essais planifiés auparavant à cause de la pandémie covid-19.

Références

Bibliographiques

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Cours de matériaux de construction II Dr. AHMED
- [2] **Benazzouzeyacin** « béton fibre Centre universitaire Belhadj Bouchaïb d'Ain-Temouchent 2017
- [3] <https://www.coffrages-cosmos.com/les-differents-types-de-beton-et-leurs-specificites/>
- [4] **Cours-Béton** ETS S-Laldji 2015
- [5] **Cours** de MDC U.F.A. de Sétif Dr. A.MERDAS
- [6] Conception et réalisation : Amprincipe Paris – Édition 2005 Impression : Gibert-Clarey à Tours
- [7] Guide pratique du béton 6ème édition (français, édition Suisse), janvier
- [8] **GUILLON.E.** « Durabilité des matériaux cimentaires –modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles», Thèse de doctorat, d'Ecole Normale Supérieure de Cachan, France 2004.
- [9] **Melle BELABID Jouhr** «comportement mécanique et durabilité des matériaux cimentaires avec ajouts de des matériaux cimentaires avec ajouts de cendre et fumée de silice»
- [10] « Durabilité des bétons fibrés conservés en réseau d'assainissement» Ourdia Fedouï-Akmoussi, Raoul Jauberthie, Laurent Molez, Salah Kaci, Ourdia Haddad
- [11] **Amraoui Benamer, Lagha Sidi Ahmed**, «durabilité des mortiers à base de fibres», mémoire de master, Centre université d'Ain témouchent Belhadj bouchaïb, année 2015.
- [12] **Daddy KABAGIRE KIBENGA**, Mémoire de maîtrise, Nouvelle approche de formulation du béton drainant aux propriétés mécanique. UNIVERSITE DE SHERBROOKE mars 2013.
- [13] **GAGNE ET AITCIN**, Superplasticités for durable concret, Comptes rendus de la conférence internationale sur la durabilité du béton, Monterrey, Octobre 1993.

- [14] **BELARIBI OMAR** « durabilité des bétons autoplacants à base de vase et de pouzzolane »
- [15] **ACI Committee, 201** « Guide to durable concrete, American Concrete Institute. Report »
of ACI Committee, dérivé, ACI 201.2R-77, Detroit, 1982.37.
- [16] **AZRAR Taous** « influence du pH sur les propriétés physico-mécaniques d'un mortier autoplacant »
- [17] « Mécanismes d'altérations des matériaux cimentaires soumis aux milieux fortement agressifs » par Soumaya Amina Bensafir université de Mascara-Algérie-Diplôme d'ingénieur d'état en génie civil.
- [18] **A. M. Neville** « Propriétés des bétons » édition Eyrolles, Paris, pp. 463-506 -2000.
- [19] **Projet de fin d'étude** « Etude de la Durabilité des mortiers à base de pouzzolane » **BEN Mostefa fatima. Bouhafskheira**
- [20] **M. CHEMROUK.** « Notions avancées de béton structural » Post_Graduation. USTHB 2002
- [21] **H. Weigler, S. Karl** « Béton : art de fabrication - propriétés » Verlag Ernest and Sohn, Berlin, pp 383-404 – 1989.
- [22] **MEHTA P.K., (1980)** Performance of concrete in marine environment. ACI SP- 65, pp. 1-20.
- [23] **Zeroub Hamid,** « valorisation du verre dans l'élaboration de béton durable (Approche expérimentale) », mémoire de magister, université Mohamed bougera boumerdes, année 2012.
- [24] COLLECTION TECHNIQUE CIM-BÉTON DGM09/UMBB/2011-2012
- [25] Collection Technique Cim béton. Centre d'information sur le ciment et ses applications P.120, Janvier 2007. France
- [26] **Creep and shrinkage: structural design effects.** » The Adam Neville Symposium (1997, Atlanta, USA), ACI Michigan Farmington Hills, 2000, 424p
- [27] **BOUCHEKOUK,** Etude du béton renforcé par des fibres de verre enduites de polymère thermoplastiques, thèse doctorat, INSA de Lyon, France, 1992.

- [28] PAILLÈRE, A.M. (1993), « Le béton de fibres métalliques état actuel des connaissances », Annales de l'ITBTP N°515, 1993.
- [29] **THÈSE DE DOCTORAT** Étude du comportement mécanique et durabilité des bétons fibrés 2016
- [30] LES BETONS DE FIBRES METALLIQUES, Université de Tébessa 2015/2016
- [31] **Djebali Saïd**, Thèse de Doctorat, Caractérisation des éléments de structures en béton de fibres métalliques. Université MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2013
- [32] PAILLÈRE, A.M. (1993), « Le béton de fibres métalliques état actuel des connaissances », Annales de l'ITBTP N°515, 1993.
- [33] Les formations volcaniques tertiaires et quaternaires du Tell oranais, Edition Eyrolles, 1958.
- [34] **ARAB Azedine.ARAFAI Hichem** « Elaboration et étude des caractéristiques physico-mécaniques des Bétons fibrés à ultra hautes performances avec ajouts de pouzzolane naturelle et de fumées de silice »
- [35] **Mokhtaria Benkaddour, Fatiha Kazi Aoual, Abdelaziz Semcha**, «durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle» (1) laboratoire « LABMAT » Département Génie Civil, Ecole Normale supérieure d'Enseignement Technique (ENST Oran). B.P.1523 Oran El M'Nouer 31000, Algérie.
- [36] **A.MEBROUKI** «influence de la pouzzolane de Béni-Saf sur les caractéristiques mécaniques des mortiers » thèse de Magister- Université Mostaganem - juin 2003.
- [37] **Nabil Bouzoubaâ et Simon Foo**, utilisation de cendres volantes et de laitier dans le béton : guide des règles de l'art, laboratoire de la technologie des matériaux, Canada, 2005
- [38] **V. Furian et Y.Houst**, les matériaux pouzzolaniques et leurs utilisations, laboratoire des matériaux pierreux de l'EPF, Lausanne, chronique du LMP 1980.
- [39] La pratique des ciments mortier et bétons « caractéristiques des liants des bétons mise en oeuvre des coulis et mortiers » (chapitre 1) **Michel Vénuat 1989.**

[40] **A Kerbouche, M. Mouli, L. Laoufi, Y. Senhadji, S. Benosmane**(Faculté des sciences, Laboratoire de Chimie des Polymères, Université d'Oran, Es-sénia, Oran)(Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques des mortiers).

[41] **Belhocine Aida, NagoudiNadjat**, «Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux », mémoire master en génie civil, université KasdiMerbah-Ouargla,année 2013/2014.

[42] **A.Komar**, « Matériaux et éléments de construction » 3ème édition MIR 1976.

[43] **CANMET, 1987**, centre canadien de la technologie, des matériaux et de l'énergie
«Matériaux complémentaires en cimentation pour le béton.