

وزارة التعليم العالي و البحث

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



Année : 2016

Faculté des sciences de l'ingénieur

Département de Génie Civil

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT 3^{ème} Cycle

**DURABILITE DES BETONS DE SABLE FIBRES DANS LES
DIFFERENTS MILIEUX AGRESSIFS
« EFFETS DE LA NATURE DES FINES D'AJOUTS ET FIBRES »**

Option

Matériaux innovants et durabilité

Par

Fatma Zohra MELAIS

DEVANT LE JURY

Président	Nourredine ARABI	Pr	Université Badji Mokhtar - Annaba
Rapporteur	Djamel ACHOURA	Pr	Université Badji Mokhtar - Annaba
Examineur	Redjem BELOUETTAR	Pr	Université Badji Mokhtar - Annaba
Examineur	Mohamed MOULI	Pr	École nationale polytechnique - Oran
Examineur	Ahmed BOUAZIZ	M.C/A	Université Mohamed Khider -Biskra

Remerciements

Je remercie tout d'abord ALLAH tout-puissant de nous avoir donné le courage, la force et la patience d'achever ce modeste travail.

Le plus grand mérite revient à mon directeur de thèse *Pr. Djamel ACHOURA*, grâce à lui, j'ai pu réaliser ce travail dans un cadre aussi agréable. Je tiens absolument à lui exprimer toute ma gratitude pour la confiance qu'il m'a accordée, pour sa patience tout au long de mon parcours, pour tout le temps qu'il a pu consacrer à ce travail, pour les longues discussions que nous avons eues sur des sujets concernant ce travail. Je tiens aussi à signaler que quoi que je fasse, je ne pourrais jamais assez le remercier pour tout ce qu'il a fait pour moi.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude aux membres du jury. Tout d'abord, à *Pr. Nouredine ARABI* pour avoir accepté de présider mon jury de soutenance, mes remerciements s'adressent également à *Pr. Redjem BELOUETTAR*, *Pr. Mohamed MOULI*, *Dr. Ahmed BOUAZIZ* et *Dr. Siham KAMALI-BERNARD HDR* pour avoir acceptés de rapporter cette thèse.

Ce travail de recherche a été réalisé au laboratoire 'Matériaux, Géomatériaux et Environnement' (LMGE) de l'université d'Annaba sous la direction du *Pr. Djamel ACHOURA* et au laboratoire (LGCGM) de l'INSA de Rennes.

Je remercie également *Mr. Raoul JAUBERTHIE* et *Mme. Siham KAMALI-BERNARD* qui m'ont bien accueilli au laboratoire (LGCGM) de l'INSA de Rennes et à toute l'équipe du LGCGM, Ingénieurs, techniciens et doctorants. Merci également au *Pr. Bachir REDJEL* ex-dire cteur du laboratoire LG, à *Hassiba SMIDA* et *Brahim MAZEHOUD*.

Je souhaite remercier aussi, *MR. Davood NIKNEZHAD* doctorant au département de Génie Civil à l'INSA de RENNES pour son aide lors de la réalisation des tests de la durabilité et sa disponibilité tout le long de la période de mon stage.

Je tiens également à remercier toute l'équipe de département de Génie Civil : enseignants, personnels administratifs et techniques ; merci à messieurs *Khair-Eddine KHOUALDI* et *Kamel AKROUM* pour leurs aides durant les essais expérimentaux au laboratoire.

Mes remerciements à tous mes amis et collègues doctorants (Houria, Yasmina, Amira, Imene, Asma, Ghania, Nadia, Meriem, Fethia, Tahar, Oussama, Adel, Walid et Miloud) et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Enfin, je dédie ce travail à mes parents et à toute ma famille qui m'ont toujours soutenu et encouragé dans mes différents choix d'études et personnels. Un grand merci à ma mère et à mon père, mon frère (Amine), mes sœurs (Besma et Meriem) et à ma tante (Dalila), sans oublier la petite (Kawter).

Résumé

AUTEUR : **Fatma Zohra MELAIS**

TITRE : DURABILITE DES BETONS DE SABLE FIBRES DANS LES
DIFFERENTS MILIEUX AGRESSIFS.
« EFFETS DE LA NATURE DES FINES D'AJOUTS ET FIBRES »

DIRECTEUR DE THESE : **Pr. Djamel ACHOURA**

La valorisation des sous-produits locaux sous forme de sables ou additions minérales dans la fabrication d'une nouvelle gamme de béton de sable et l'amélioration de leurs propriétés, conduira à rechercher un arrangement entre les performances et le coût dans le but de réaliser un matériau résistant avec une durabilité accrue.

La première partie de ce travail porte sur l'influence de la nature minéralogique et morphologique des sables et des additions minérales d'origine naturelle et artificielle ainsi que le taux en fibres de polypropylène sur les propriétés physico-mécaniques et microstructurales des bétons de sable. Deux fillers et deux sables artificiels utilisés, sont principalement obtenus par broyage ou concassage des sous-produits de l'usine sidérurgiques d'El-Hadjar (Algérie) (laitier cristallisé et laitier granulé). Le sable siliceux et le sable de calcaire concassé présentent les sables naturels utilisés pour les bétons de référence.

La deuxième partie porte sur l'influence de la nature des additions minérales (laitiers granulés et/ou cristallisé, fillers calcaires) et le taux de substitution en laitier granulé et/ou cristallisé sur la durabilité des mortiers et des bétons de sable fibré dans les différents milieux agressifs.

La troisième partie de l'étude est consacrée à la détermination des principaux indicateurs de la durabilité par évaluation de la porosité, de l'absorption, de la perméabilité et de la pénétration des ions chlore.

Les résultats obtenus montrent que les propriétés physico-mécaniques des bétons de sable varient selon la minéralogie, la morphologie, la densité et la granulométrie des sables utilisés et l'incorporation des fibres dans ces bétons est bénéfique pour l'amélioration de la ductilité et la cinétique de retrait de ces matériaux.

L'utilisation du laitier granulé comme fines d'ajout pour les bétons de sable ou comme substituant au ciment pour les mortiers est bénéfique pour la diminution de la porosité accessible à l'eau, la perméabilité et l'amélioration de la durabilité des bétons de sable et des mortiers, notamment vis-à-vis de l'attaque sulfatique externe.

Mots clés : Béton de sable, Mortier, Laitier granulé, Laitier cristallisé, Fibres de polypropylène, Sulfates, Durabilité

Abstract

AUTHOR : **Fatma Zohra MELAIS**

TITLE : DURABILITY OF SANDCRETE FIBER REINFORCED IN DIFFERENT AGGRESSIVE ENVIRONMENTS.
"EFFECTS OF THE NATURE OF THE FINE ADDITIONS AND FIBERS"

DIRECTOR OF THESIS : **Pr. Djamel ACHOURA**

The valuation of local products in the form of sand or mineral additions in the manufacture of a new range of sandcrete and the improvement of their properties will lead to seek an arrangement between performance and cost, in order to achieve a resistant material with enhanced durability.

The first part of this work focuses on the influence of morphological and mineralogical nature of natural and artificial sands, and the rate of polypropylene fiber on the properties of sandcretes. Two mineral admixtures and artificial sands obtained by grinding or crushing granulated or crystallized blast furnace slag produced by Arcelor Mittal Steel plant of El Hadjar (Algeria) are used. The silica and crushed limestone sand present the natural sands used for reference concretes.

The second part focuses on the influence of the nature of mineral additives (granulated and / or crystallized slag and limestone fillers) on the durability of mortars and sandcretes fiber reinforced in different aggressive environments.

The third part of the study is devoted to the identification of key sustainability indicators for evaluation of porosity, absorption, permeability and penetration of chloride ions.

The results obtained show that the physico-mechanical properties of the sand vary concretes mineralogical, morphology, density and particle size of the sand used, and the incorporation of fibers in these concretes is beneficial for improving the ductility.

The use of granulated slag as an addition or partial replacement of cement is beneficial to the reduction of the porosity accessible to water, permeability and for improving the durability of mortar and sand concretes, especially vis-à-vis the external sulphatic attack.

Keywords: sandcrete, Morter, granulated blast furnace slag, crystallized blast furnace slag, polypropylene fiber, Sulfate, Durability.

فاطمة الزهراء مليص

خرسانة الرمل المدعمة بألياف البولي بروبين في مختلف البيئات العدوانية

" تأثير طبيعة الإضافات المعدنية و الألياف "

.

تتمين المنتجات الصناعية الثانوية المحلية على شكل رمال أو إضافات معدنية في تصنيع مجموعة جديدة من خرسانة الرمال وتحسين خواصها , يؤدي بنا للبحث عن تنسيق بين الأداء والتكلفة، لصناعة مواد قوية مع تعزيز الاستدامة

الجزء الأول من هذا العمل يركز على تأثير الطبيعة المعدنية والمورفولوجيا لرمال ذات الأصل الطبيعي والاصطناعي، ونسبة ألياف البولي بروبين على خصائص خرسانة الرمل. اثنين من الإضافات واثنين من الرمل الاصطناعي استخدموا. ل عليهم أساسا عن طريق سحق أو طحن المنتجات الصناعية الثانوية لمصنع الحديد و الصلب الحجار () () . رمل السيليس و رمل الحجر الجيري المسحوق تقديم الرمال الطبيعية المستخدمة للخرسانة المرجعية

الجزء الثاني يركز على تأثير الإضافات المعدنية (, الخبث البلوري ودقائق الحجر الجيري) على ديمومة قذائف الهاون و خرسانة الرمل المدعمة بالألياف في بيئات عدوانية مختلفة.

هذه لتحديد الرئيسية لتقييم مسامية، به أيونات الكلوريد

أظهرت النتائج أن الخصائص الفيزيو- ميكانيكية لخرسانة الرمل تختلف حسب الطبيعة المعدنية ، مورفولوجيا وكثافة وحجم الحبيبات الرمال المستخدمة، وإدراج الألياف في هذه الخرسانات مفيد لتحسين صلابتها

استخدام الخبث المحبب كإضافة معدنية هاون مفيد المسامية المسهلة لنفاذيه المياه حسين متانة هاون و الخرسانة الرم خاصة مع هجوم ريتات الخارجي

الكلمات المفتاحية : - الهاون- - ألياف البولي بروبين - الكبريتات -

Sommaire

Remerciements	2
Résumé	3
Abstract	4
.....	5
Sommaire.....	6
Liste des tableaux.....	10
Liste des figures	11
Notions cimentaires	19
Introduction générale	20

Chapitre I

Etat de connaissances

I.1- Introduction	25
I.2- Etat de connaissance sur les bétons de sable	25
I.2.1- Historique	25
I.2.2- Généralité	25
I.2.3- Constituants du béton de sable	26
I.2.3.1-Sables	26
I.2.3.2- Ciments	26
I.2.3.3- Additions minérales.....	29
I.2.3.4- Eau de gâchage.....	32
I.2.3.5-Adjuvants	32
I.2.3.6-Autres ajouts	32
I.2.4- Propriétés des bétons de sable	33
I.2.4.1- Ouvrabilité	33
I.2.4.2- Maniabilité	33
I.2.4.3- Résistance mécanique	34

I.2.4.4- Retrait.....	36
I.2.5 - Domaine d'utilisation des bétons de sable	37
I.2.6- Inconvénients des bétons de sable	37
I.2.7- Amélioration des propriétés des bétons de sable	37
I.3- Etat de connaissance sur les fibres.....	38
I.3.1- Historique	38
I.3.2- Définition	39
I.3.3- Rôle des fibres	39
I.3.4- Qualités principales des fibres.....	39
I.3.5- Types de fibres	40
I.3.5.1- Fibres végétales	41
I.3.5.2- Fibres métalliques.....	42
I.3.5.3- Fibres de polypropylène	42
I.3.6- Bétons de fibres de polypropylène	43
I.3.7- Comportement du béton de fibre polypropylène	44
<i>I.4 –Etat de connaissance sur la durabilité des matériaux cimentaire</i>	<i>45</i>
I.4.1- Bref historique sur les problèmes de durabilité.....	45
I.4.2- Définition.....	45
I.4.3- Facteurs de la durabilité	46
I.4.3.1-Porosité.....	46
I.4.3.2- Fissuration	48
I.4.4- Classification des milieux agressifs et leurs modes d'action.....	48
I.4.5- Problèmes spécifiques de la durabilité	49
I.4.5.1- Attaque sulfatique	50
I.4.5.2- Perméabilité au gaz	53

I.4.5.3- Diffusion des ions chlorure	54
I.4.5.4- Absorption par capillarité	55
I.5- Conclusion	46

Chapitre II

Matériaux et formulation

II.1- Introduction	60
II.2- Matériaux utilisés	60
II. 2.1- Sables	60
II.2.2- Ciment et additions minérales	63
II. 2.3- Fibres	66
II. 2.4- Adjuvants	66
II.2.5- Solution sulfatique	66
II.2.6- Eau de gâchage	67
II.3- Méthode de formulation des bétons de sable.....	67
II.3.1- Approche théorique de formulation de SABLOCRETE	67
II.3.2- Méthode de Cissé	68
II.3.3- Composition des bétons de sable	70
II.4- Formulation des mortiers à base de laitier de haut fourneau.....	73
II.5 - Confection des éprouvettes	74
II.6- Caractérisation des bétons et des mortiers à l'état frais	75
II.6.1- Masse volumique	75
II.6.2- Maniabilité	76
II.7- Résultats et interprétation	77
II.8- Conclusion	83

Chapitre III

Comportement et caractérisation des bétons de sable avec fibres de polypropylène

III.1- Introduction	86
III.2- Procédure expérimentale	86
III.2.1- Choix des éprouvettes	86
III.2.2 - Préparation et Conservation des éprouvettes	86
III.2.4 – Essais physico- mécaniques	87
III.2.4.1-Masse Volumique	87
III.2.4.2- Essai de compression	87
III.2.4.3- Essai de traction par flexion	87
III.2.4.4- Essai du retrait	88
III.3-Résultats et discussion	89
III.3.1- Masse volumique à l'état durci	89
III.3.2. - Résistance mécanique des bétons de sable	90
III.3.3. - Effet du taux de fibres sur l'évolution du retrait des bétons de sable	96
.. III.4- Mode de rupture	97
III.5-Analyse microstructurale	99
III.6-Conclusion	100

Chapitre IV

Durabilité des mortiers et des bétons de sable fibré dans les différents milieux agressifs

IV.1- Introduction	104
IV.2-Procédure expérimentale	104
IV.2.1- Attaque sulfatique.....	104
IV.2.1.1- Résistance en compression et en traction par flexion	106
IV.2.1.2- Variation de masse	106
IV.2.1.3- Profondeur d'alcalinité	106
IV.2.1.4- Analyse macro et microstructurale	106
IV.2.2- Absorption d'eau par capillarité	108
IV.2.3- Perméabilité au gaz (Hélium).....	109
IV.2.4- Diffusion des ions chlorure	111
IV.3- Résultats et interprétation	115
IV.3.1- Influence de l'attaque sulfatique sur la résistance mécanique	115

Sommaire

IV.3.2- Variation de masse.....	140
IV.3.3- Influence de la nature des additions minérales et le mode de conservation sur la profondeur d'alcalinité.....	146
IV.3.4- Dégradation macrostructurale et microstructurale.....	150
IV.3.5- Propriétés de transfert.....	164
VI.4-Conclusion	173
Conclusion générale et perspectives	176
Références bibliographiques	181
Annexes	193

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
I.1	Caractéristiques des différentes fibres.....	39
II.1	Caractéristiques physiques des sables utilisés.....	59
II.2	Composition chimique des ciments et des additions minérales.....	61
II.3	Caractéristiques physiques des ciments.....	61
II.4	Caractéristiques physiques des additions minérales.....	62
II.5	Composition des bétons de sable à base d'étude.....	68
II.6	Composition des mortiers à base de laitier de haut fourneau.....	68
II.7	Types et forme d'éprouvettes avec les essais réalisés.....	69
III.1	Résistance en compression et en traction par flexion des bétons de sable avec différents types de sable	70
III.2	Résistance en compression et en traction par flexion des bétons de sable fibré.....	72
IV.1	Résistance en compression et en traction par flexion du mortier témoin	124
IV.2	Résistance en compression et en traction par flexion du mortier avec 30% substitution de laitier granulé.....	125
IV.3	Résistance en compression et en traction par flexion du mortier avec 40% substitution de laitier granulé.....	126
IV.4	Résistance en compression et en traction par flexion du mortier avec 50% substitution de laitier granulé.....	127
IV.5	Résistance en compression et en traction par flexion du mortier avec 10% substitution de laitier cristallisé.....	128
IV.6	Résistance en compression et en traction par flexion du mortier avec 20% substitution de laitier cristallisé.....	129
IV.7	Résistance en compression et en traction par flexion du mortier avec 30% substitution de laitier cristallisé.....	130
IV.8	Résistance à la compression et à la traction par flexion du béton de sable avec fillers calcaire	137
IV.9	Résistance à la compression et à la traction par flexion de sable avec addition de laitier granulé.....	138
IV.10	Résistance à la compression et à la traction par flexion de sable avec laitier cristallisé.....	139
IV.11	Effet du taux de substitution en laitier granulé sur la porosité accessible à l'eau des mortiers.....	165
IV.12	Effet de la nature des fines d'ajouts sur la porosité accessible à l'eau des bétons de sable fibré.....	165

Liste des figures

IV.13	Coefficient de perméabilité intrinsèque et le coefficient de Klinkenberg des mortiers avec différent taux de substitution en laitier granulé.....	170
IV.14	Coefficient de perméabilité intrinsèque et le coefficient de Klinkenberg des bétons de sable fibré avec différent types de fines d'ajouts.....	170

Liste des figures

Tableau	Titre	Page
I.1	Observation au Microscopie Electronique à Balayage du Gel de C-S-H.....	28
I.2	Observation au Microscopie Electronique à Balayage du Portlandite.....	28
I.3	Observation au Microscopie Electronique à Balayage d'ettringite.....	29
I.4	Spectre DRX d'un laitier cristallisé.....	31
I.5	Spectre DRX d'un laitier vitrifié.....	31
I.6	Maniabilité en fonction de module de finesse.....	33
I.7	Influence de la nature et du dosage en addition sur la maniabilité.....	34
I.8	Influence de la finesse de l'addition sur la résistance.....	35
I.9	Influence de la nature de l'addition sur la résistance.....	35
I.10	Effets de la granularité sur la résistance.....	36
I.11	Illustration de l'apport du renfort par des fibres.....	39
I.12	Quelques types des Fibres végétaux.....	41
I.13	Quelques types des Fibres métalliques.....	42
I.14	Fibres de polypropylène.....	42
I.15	Synthèse du polypropylène.....	43
I.16	Relation entre la perméabilité, la résistance à la compression et le niveau de porosité du béton.....	46
I.17	Différentes formes de pores dans la pâte de ciment durcie classées par taille.....	47
I.18	Influence du degré d'interconnectivité sur la perméabilité de la pâte.....	48
I.19	Attaque sulfatique externe.....	50
I.20	Attaque sulfatique interne.....	50
I.21	Diagramme schématique illustrant le mécanisme proposé de l'expansion d'un mortier ou béton à travers DEF.....	51
I.22	Schéma représente la dégradation par l'attaque sulfatique de la surface à l'intérieur.....	51
I.23	Distribution de la porosité en fonction du rayon des pores.....	54
I.24	Pénétration des ions de chlore après cinq ans d'exposition en milieu marin.....	55
II.1	Analyse granulométrique des sables d'étude.....	59
II.2	Morphologie et état de surface de sable siliceux.....	61

Liste des figures

II.3	Morphologie et état de surface de sable de laitier cristallisé.....	62
II.4	Morphologie et état de surface de sable de laitier granulé.....	62
II.5	Morphologie et état de surface de sable de carrière.....	62
II.6	Fillers de laitier cristallisé.....	63
II.7	Grains de fillers de laitier cristallisé MEB.....	64
II.8	Spectres DRX de laitier cristallisé.....	64
II.9	Fillers de laitier granulé.....	64
II.10	Grains de fillers de laitier granulé MEB.....	65
II.11	Spectres DRX de laitier granulé.....	65
II.12	Fillers calcaire.....	65
II.13	Grains de fillers calcaire MEB.....	65
II.14	Spectres DRX de calcaire.....	65
II.15	Fibres de polypropylène.....	66
II.16	Coefficient d'activité du filler calcaire.....	68
II.17	Organigramme montre la formulation des bétons de sable d'étude	72
II.18	Composition des mortiers à base de laitier de haut fourneau.....	74
II.19	Essai d'affaissement cône d'Abrams.....	76
II.20	Essai d'étalement à la table à secousses.....	76
II.21	Variation de la maniabilité des bétons de sable en fonction de la nature des sables.....	77
II.22	Variation de la maniabilité des bétons de sable en fonction de taux de fibre.....	78
II.23	Variation de la maniabilité des bétons de sable en fonction de la nature des additions minérales	79
II.24	Variation de la maniabilité des mortiers en fonction de taux de substitution en laitiers (granulé et/ou cristallisé).....	80
II.25	Variation de la masse volumique des bétons de sable avec la nature des sables... ..	81
II.26	Variation de la masse volumique des bétons de sable en fonction de taux de fibre. ..	82
II.27	Variation de la masse volumique des bétons de sable en fonction de la nature des additions minérales	82
III.1	Description d'essai de compression.....	87
III.2	Description d'essai de traction par flexion.....	88
III.3	Mesure du retrait.....	88
III.4	Effet de la nature des sables sur variation de la masse volumique des bétons de sable.....	89
III.5	Effet du taux des fibres sur variation de la masse volumique des bétons de sable. ..	89
III.6	Effet de la nature minéralogique des sables sur la résistance à la compression des bétons de sable.....	92
III.7	Effet de la nature minéralogique des sables sur la résistance à la traction par flexion des bétons de sable.....	92
III.8	Influence du taux de fibres sur la résistance à la compression des bétons de sable fibré.....	95
III.9	Influence du taux de fibres sur la traction par flexion des bétons de sable fibré.. ..	95

Liste des figures

III.10	Evolution du retrait des bétons de sable selon le taux de fibres.....	96
III.11	Mode de rupture des bétons de sable en compression.....	98
III.12	Mode de rupture des bétons de sable sans fibre.....	98
III.13	Modes de rupture des bétons de sable fibré.....	98
III.14	Liaison sable siliceux- matrice cimentaire.....	99
III.15	Liaison sable de carrière - matrice cimentaire.....	99
III.16	Liaison sable de laitier granulé - matrice cimentaire.....	99
III.17	Liaison fibre –matrice cimentaire.....	100
IV.1	Variation de PH de la solution sulfatique en fonction de l'âge de conservation.....	105
IV.2	Schéma présente le mode de conservation.....	105
IV.3	Echantillons préparées pour l'analyse au MEB.....	107
IV.4	Mesure de la porosité accessible à l'eau et de la masse volumique apparente.....	108
IV.5	Schéma du dispositif expérimental pour l'essai d'absorption capillaire.....	109
IV.6	Dessiccateur à vide pour le dégazage des échantillons.....	110
IV.7	Schéma du dispositif expérimental pour l'essai de la perméabilité au gaz.....	110
IV.8	Perméabilité en fonction de l'inverse de la pression moyenne.....	111
IV.9	Schéma de principe des essais de migration.....	112
IV.10	Dispositif expérimental pour l'essai de migration des ions chlorure.....	113
IV.11	Cellule d'essai de la diffusion	113
IV.12	Mesure de la profondeur de pénétration des chlorures.....	114
IV.13	Profondeur de pénétration des chlorures.....	114
IV.14	Résistance en compression des mortiers à base de laitier granulé en substitution partielle au ciment conservés dans l'eau.....	115
IV.15	Résistance en compression des mortiers à base de laitier cristallisé en substitution partielle au ciment conservés dans l'eau.....	116
IV.16	Résistance en traction par flexion des mortiers à base de laitier granulé en substitution partielle au ciment conservés dans l'eau.....	116
IV.17	Résistance en traction par flexion des mortiers à base de laitier cristallisé en substitution partielle au ciment conservés dans l'eau.....	117
IV.18	Résistance en compression des mortiers à base de laitier granulé en substitution partielle au ciment conservés dans le MgSO ₄ après démoulage.....	118
IV.19	Résistance en compression des mortiers à base de laitier cristallisé en substitution partielle au ciment conservés dans le MgSO ₄ après démoulage.....	119
IV.20	Résistance en traction par flexion des mortiers à base de laitier granulé en substitution partielle au ciment conservés dans le MgSO ₄ après démoulage.....	119
IV.21	Résistance en traction par flexion des mortiers à base de laitier cristallisé en substitution partielle au ciment conservés dans le MgSO ₄ après démoulage	120
IV.22	Résistance en compression des mortiers à base de laitier granulé en substitution partielle au ciment conservés dans le MgSO ₄ après une cure de 28 jours.....	122
IV.23	Résistance en compression des mortiers à base de laitier cristallisé en substitution partielle au ciment conservés dans le MgSO ₄ après une cure de 28 jours.....	122

Liste des figures

IV.24	Résistance en traction par flexion des mortiers à base de laitier granulé en substitution partielle au ciment conservés dans le $MgSO_4$ après une cure de 28 jours.....	123
IV.25	Résistance en traction par flexion des mortiers à base de laitier cristallisé en substitution partielle au ciment conservés dans le $MgSO_4$ après une cure de 28 jours.....	123
IV.26	Effet de la nature des additions minérales sur l'évolution de la résistance en compression des bétons de sable avec fibre de polypropylène conservées dans l'eau.....	131
IV.27	Effet de la nature des additions minérales sur l'évolution de la résistance en traction par flexion des bétons de sable avec fibre de polypropylène conservées dans l'eau.....	132
IV.28	Effet de la nature des additions minérales sur l'évolution de la résistance en compression des bétons de sable avec fibre de polypropylène conservées dans le $MgSO_4$ après démoulage.....	133
IV.29	Effet de la nature des additions minérales sur l'évolution de la résistance en traction par flexion des bétons de sable avec fibre de polypropylène conservées dans le $MgSO_4$ après démoulage.....	133
IV.30	Effet de la nature des additions minérales sur l'évolution de la résistance en compression des bétons de sable avec fibre de polypropylène conservées dans le $MgSO_4$ après une cure de 28 jours dans l'eau.....	135
IV.31	Effet de la nature des additions minérales sur l'évolution de la résistance en traction par flexion des bétons de sable avec fibre de polypropylène conservées dans le $MgSO_4$ après une cure de 28 jours dans l'eau.....	135
IV.32	Variation de masse des mortiers avec substitution de laitier granulé conservées dans l'eau.....	140
IV.33	Variation de masse des mortiers avec substitution de laitier cristallisé conservées dans l'eau.....	140
IV.34	Variation de masse des mortiers avec substitution de laitier granulé conservées dans le $MgSO_4$ après démoulage.....	141
IV.35	Variation de masse des mortiers avec substitution de laitier cristallisé conservées dans le $MgSO_4$ après démoulage.....	141
IV.36	Variation de masse des mortiers avec substitution de laitier granulé conservées dans le $MgSO_4$ après une cure de 28 jours dans l'eau.....	143
IV.37	Variation de masse des mortiers avec substitution de laitier cristallisé conservées dans le $MgSO_4$ après une cure de 28 jours dans l'eau.....	143
IV.38	Variation de masse des bétons de sable conservées dans l'eau selon la nature des additions minérales.....	144
IV.39	Variation de masse des bétons de sable conservées dans le $MgSO_4$ après une cure de 28 jours dans l'eau selon la nature des additions minérales.....	144
IV.40	Variation de masse des bétons de sable conservées dans le $MgSO_4$ après démoulage selon la nature des additions minérales.....	145
IV.41	Profondeur d'alcalinité du mortier témoin.....	146

Liste des figures

IV.42	Profondeur d'alcalinité des mortiers avec laitier cristallisé conservées après démoulage en $MgSO_4$	146
IV.43	Profondeur d'alcalinité des mortiers avec laitier cristallisé conservées après une cure de 28 jours dans l'eau en $MgSO_4$	147
IV.44	Profondeur d'alcalinité des mortiers avec de laitier granulé conservées après démoulage en $MgSO_4$	147
IV.45	Profondeur d'alcalinité des mortiers avec substitution de laitier granulé conservées après une cure de 28 jours dans l'eau en $MgSO_4$	147
IV.46	Profondeur d'alcalinité béton de sable conservées dans le $MgSO_4$ après démoulage.....	149
IV.47	Profondeur d'alcalinité béton de sable conservées dans le $MgSO_4$ après une cure de 28 jours dans l'eau.....	149
IV.48	Dégradation visuelle des mortiers témoin (sans addition) conservés dans le $MgSO_4$	150
IV.49	Dégradation visuelle des mortiers à base de laitier granulé conservés dans le $MgSO_4$	150
IV.50	Dégradation visuelle des mortiers à base de laitier cristallisé conservés dans le $MgSO_4$	151
IV.51	Dégradation visuelle des bétons de sable à base avec fillers calcaire conservés dans le $MgSO_4$	151
IV.52	Dégradation visuelle des bétons de sable à base avec laitier granulé conservés dans le $MgSO_4$	151
IV.53	Dégradation visuelle des bétons de sable à base avec laitier cristallisé conservés dans le $MgSO_4$	151
IV.54	Représentation schématique de la microstructure d'une coupe d'une éprouvette après immersion dans une solution sulfatique.....	152
IV.55	Mortier témoin conservé dans le $MgSO_4$ après une cure de 28 jours dans l'eau /cœur de l'éprouvette.....	153
IV.56	Mortier témoin conservé dans le $MgSO_4$ après une cure de 28 jours dans l'eau /couche extérieur.....	154
IV.57	Mortier témoin conservé dans le $MgSO_4$ après démoulage / cœur de l'éprouvette..	154
IV.58	Mortier témoin conservé dans le $MgSO_4$ après démoulage / couche extérieur.....	155
IV.59	Mortier avec addition de laitier granulé conservé dans $MgSO_4$ après cure de 28 jours dans l'eau/cœur de l'éprouvette.....	165
IV.60	Mortier avec addition de laitier granulé conservé dans $MgSO_4$ après cure de 28 jours dans l'eau/ couche extérieur.....	165
IV.61	Mortier avec addition de laitier granulé conservé dans le $MgSO_4$ après démoulage / cœur de l'éprouvette.....	157
IV.62	Mortier avec addition de laitier granulé conservé dans le $MgSO_4$ après démoulage / couche extérieur.....	157
IV.63	Mortier à base de fillers de laitier cristallisé conservé dans $MgSO_4$ après cure de 28 jours dans l'eau/ cœur de l'éprouvette.....	158

Liste des figures

IV.64	Mortier à base de fillers de laitier cristallisé conservé dans $MgSO_4$ après cure de 28 jours dans l'eau /couche extérieur.....	159
IV.65	Mortier à base de fillers de laitier cristallisé conservé dans $MgSO_4$ après démoulage/ cœur de l'éprouvette.....	160
IV.66	Mortier à base de fillers de laitier cristallisé conservé dans $MgSO_4$ après démoulage/ couche extérieur.....	160
IV.67	Béton de sable avec addition de fillers calcaire conservé dans l'eau / couche extérieur.....	161
IV.68	Béton de sable avec addition de fillers calcaire conservé dans l'eau / cœur de l'éprouvette	161
IV.69	Béton de sable avec addition de fillers calcaire conservé dans $MgSO_4$ après démoulage / couche extérieur.....	162
IV.70	Béton de sable avec addition de fillers calcaire conservé dans $MgSO_4$ après démoulage / cœur de l'éprouvette.....	162
IV.71	Béton de sable avec addition de fillers de laitier granulé conservé dans l'eau / cœur de l'éprouvette.....	163
IV.72	Béton de sable avec addition de fillers de laitier granulé conservé dans $MgSO_4$ après démoulage / cœur de l'éprouvette.....	163
IV.73	Béton de sable avec addition de fillers de laitier granulé conservé dans $MgSO_4$ après démoulage / cœur de l'éprouvette.....	164
IV.74	Effet du taux de substitution en laitier granulé sur porosité accessible à l'eau des mortiers	165
IV.75	Effet du la nature des additions minérales sur porosité accessible à l'eau des bétons de sable fibré.....	166
IV.76	Effet du taux de substitution en laitier granulé sur l'absorption d'eau par capillarité des mortiers.....	167
IV.77	Effet du la nature des additions minérales sur l'absorption d'eau par capillarité des bétons de sable fibré.....	167
IV.78	Effet du taux de substitution en laitier granulé sur la perméabilité au gaz des mortiers.....	169
IV.79	Effet du la nature des additions minérales sur la perméabilité au gaz des bétons de sable fibré.....	169
IV.80	Effet du taux de substitution en laitier granulé sur le coefficient de la diffusion des ions chlorure des mortiers.....	171
IV.81	Effet du la nature des additions minérales sur le coefficient de la diffusion des bétons de sable fibré.....	172

Notation cimentaire

Eléments	Formules chimiques
Chaux	CaO
Silice	SiO ₂
Magnésium	MgO
Alumine	Al ₂ O ₃
Silicate tricalcique C ₃ S (Alite)	3CaO.SiO ₂
Silicate bicalcique C ₂ S (Belite)	2CaO.SiO ₂
Aluminate tricalcique C ₃ A	3CaO.Al ₂ O ₃
Ferroaluminate calcique C ₄ AF(Célite)	4CaO .Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃
Portlandite (CH)	Ca(OH) ₂
Silicates de calcium hydratés (CSH)	CaO.SiO ₂ .1(H ₂ O)
Ettringite	Ca ₆ Al ₂ (SO ₄) ₃ (OH) ₁₂ .26H ₂ O
Gypse	CaSO ₄ .2H ₂ O
Brucite	Mg(OH) ₂
Calcite	CaCO ₃



INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction Générale

La diversification et l'amélioration des performances et de la durabilité des matériaux de construction et leurs adaptations au climat et à l'environnement de chaque région ainsi que la réduction au maximum des coûts de réalisation des ouvrages sont les objectifs les plus recherchés dans le secteur du bâtiment et travaux publics.

Le béton de sable, par sa conception actuelle, sa simplicité de fabrication et de mise en place, son prix de revient compétitif, ses performances mécaniques et sa durabilité, constitue une nouvelle avancée pour la construction en béton et il offre des avantages aussi bien d'ordre économique, technique, esthétique et même écologique.

Les bétons de sable peuvent présenter une bonne alternative pour remplacer les bétons classiques dans la confection de certains éléments de construction. Ces bétons, définis par la norme NF P18- 500 [NF P18- 500, 2005], sont une nouvelle gamme de matériaux de construction confectionnés essentiellement à partir d'un ou plusieurs sables, de ciment, d'eau et des fines d'ajouts minérales naturelles ou industrielles.

Plusieurs paramètres tels que le rapport Eau /Ciment, la nature et dosage de ciment et des additions minérales, type et dimension des granulats influencent la qualité des bétons en particulier la résistance mécanique et la durabilité. Ces dernières restent toujours les facteurs les plus importants pour juger la qualité des bétons. Plusieurs travaux de recherches ont été réalisés sur le béton de sable afin de réduire au maximum ses inconvénients et d'améliorer sa durabilité et ses performances mécaniques par : la correction de l'étendue granulaire, le choix du type et du dosage en fines d'ajout ou addition minérale, addition des adjuvants et addition des fibres.

L'Algérie en plus de sa richesse en sable, possède un complexe sidérurgique « El-Hadjar » qui produit chaque année des quantités énormes de déchets et de sous-produits en particulier le laitier concassé et le laitier granulé. Ces quantités sont estimées à 500.000 tonnes par an. Ces laitiers peuvent être exploités dans la fabrication des bétons et mortiers sous forme de sable, gravillon et fines d'ajout ou additions minérales.

Le laitier granulé comme addition minérale, fines d'ajout ou comme substituant au ciment est très utilisé dans la formulation des différents types de mortiers, bétons et bétons innovants. Il présente des qualités intéressantes: composition chimique proche de celle du ciment, régularité de composition pour une même source de production, activité ou réactivité chimique.

Notre travail de recherche a trois principaux objectifs, le premier concerne une étude de l'effet de la nature minéralogique et morphologique ainsi que la granularité des sables sur le comportement physico-mécanique des bétons de sable dans le but d'améliorer ses performances.

Le deuxième objectif porte sur l'amélioration de la ductilité et la cinétique du retrait des bétons de sable renforcé de fibres polypropylène. Cette partie traite l'influence du taux de

fibres de polypropylène sur l'évolution de la cinétique du retrait et la variation des propriétés physiques et mécaniques des bétons de sable.

Le troisième objectif concerne l'amélioration de la durabilité et du comportement des mortiers et des bétons de sable dans un environnement agressif.

Ce mémoire comporte de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, une analyse bibliographique qui synthétise les recherches effectuées sur les bétons de sable et il comporte des généralités sur les bétons de sable, leurs caractéristiques, les principales applications, leur inconvénient et l'amélioration de leurs propriétés aussi une présentation des différents types de fibres utilisées pour renforcer les matériaux cimentaires, leurs caractéristiques et leur application..., en particulier fibres de polypropylène. Ce chapitre termine par une synthèse des travaux de recherches réalisées pour évaluer la durabilité des matériaux cimentaires dans les différents milieux agressifs.

La première partie du deuxième chapitre est consacrée à l'identification des différents matériaux utilisés dans la formulation des mortiers et bétons de sable d'étude. Les caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques sont ainsi déterminées. Dans la deuxième partie on a présenté les protocoles expérimentaux qui concernent les méthodes de formulation des bétons d'études et les résultats des essais expérimentaux qui caractérisent l'influence de la nature des sables, des additions minérales ainsi que le taux des fibres de polypropylène sur les propriétés bétons de sable à l'état frais.

Dans le troisième chapitre on présente une analyse des résultats de l'influence de la nature minéralogique des sables et du taux de fibres de polypropylène sur le comportement physico-mécanique (masse volumique, résistance en compression, résistance en traction par flexion et retrait) ainsi que sur la microstructure des bétons de sable.

Le principal et quatrième chapitre présente une étude de la durabilité des mortiers et bétons de sable. Cette étude décrit, dans la première partie, l'influence de la nature des fines d'ajout, le taux de substitution en additions minérales et le mode de conservation sur le comportement des mortiers et des bétons de sable fibré dans un milieu riche en sulfate de magnésium (MgSO_4). La dégradation des mortiers et bétons de sable est estimée par le suivi de la régression, dans le temps, des résistances mécaniques et de la perte de masse.

La deuxième partie de l'étude est consacrée à la détermination des principaux indicateurs de la durabilité par évaluation de la porosité, de l'absorption, de la perméabilité et de la pénétration des ions chlore.

La conclusion générale clôture ce manuscrit de thèse en synthétisant les principaux résultats de l'influence des différents paramètres sur le comportement physico-mécanique des bétons de sable et sur la durabilité des mortiers et béton de sable.

Des perspectives de recherche sont aussi présentées pour continuer à apporter de nouvelles informations pertinentes à ces matériaux du génie civil.



ETAT DE CONNAISSANCES

CHAPITRE I

CHAPITRE I

Etat de connaissances

SOMMAIRE

I.1- Introduction	25
I.2- Etat de connaissance sur les bétons de sable	25
I.2.1- Historique	25
I.2.2- Généralité	25
I.2.3- Constituants du béton de sable	26
I.2.3.1- Sables	26
I.2.3.2- Ciments	26
I.2.3.3- Additions minérales.....	29
I.2.3.4- Eau de gâchage.....	32
I.2.3.5- Adjuvants	32
I.2.3.6- Autres ajouts	32
I.2.4- Propriétés des bétons de sable	33
I.2.4.1- Ouvrabilité	33
I.2.4.2- Maniabilité	33
I.2.4.3- Résistance mécanique	34
I.2.4.4- Retrait.....	36
I.2.5 - Domaine d'utilisation des bétons de sable	37
I.2.6- Inconvénients des bétons de sable	37
I.2.7- Amélioration des propriétés des bétons de sable	37
I.3- Etat de connaissance sur les fibres	38
I.3.1- Historique	38
I.3.2- Définition	39
I.3.3- Rôle des fibres	39
I.3.4- Qualités principales des fibres.....	39
I.3.5- Types de fibres	40
I.3.5.1- Fibres végétales	41
I.3.5.2- Fibres métalliques.....	42
I.3.5.3- Fibres de polypropylène	42
I.3.6- Bétons de fibres de polypropylène	43
I.3.7- Comportement du béton de fibre polypropylène	44
I.4 –Etat de connaissance sur la durabilité des matériaux cimentaire	45
I.4.1- Bref historique sur les problèmes de durabilité.....	45
I.4.2- Définition.....	45
I.4.3- Facteurs de la durabilité	46
I.4.3.1- Porosité.....	46
I.4.3.2- Fissuration	48
I.4.4- Classification des milieux agressifs et leurs modes d'action.....	48

I.4.5- Problèmes spécifiques de la durabilité	49
I.4.5.1- Attaque sulfatique	50
I.4.5.2- Perméabilité au gaz	53
I.4.5.3- Diffusion des ions chlorure	54
I.4.5.4- Absorption par capillarité	55
I.5- Conclusion	46

I.1 Introduction

Dans ce premier chapitre nous allons présenter une analyse bibliographique qui synthétise les travaux de recherches effectués sur les bétons de sable et leurs comportements. Ce chapitre sera divisé en trois parties principales : la première partie comporte des généralités sur les bétons de sable, leurs caractéristiques physico-mécaniques, leurs applications ainsi que leurs inconvénients et les possibilités d'amélioration de leurs propriétés.

La deuxième partie est consacrée à la présentation des différents types de fibres utilisées pour renforcer les matériaux cimentaires, leurs caractéristiques et leurs applications, en particulier fibres de polypropylène et leurs influences sur le comportement des bétons.

Dans la troisième et la dernière partie nous allons aborder les travaux de recherches réalisés pour évaluer la durabilité des matériaux cimentaires dans les différents milieux agressifs.

I.2- Etat de connaissance sur les bétons de sable

I.2.1- Historique

Depuis l'apparition des premiers bétons, la technique du béton de sable n'en était pas loin. En 1853, le béton de sable trouve ses origines dans « le béton aggloméré », il était confectionné par l'ingénieur François Coinget. Le béton aggloméré s'agissait à l'époque d'un mélange de sable, de cendres, de chaux et d'eau. Les premières applications de cette technique étaient réalisées sur : le mur de soutènement à Passy, la maison Coinget à Saint-Denis, la réalisation de la tour de port Saïd en Egypte de 52 m d'hauteur, et un pont à Brooklyn. En 1918 une expérience très originale fut faite par Nicolas Rochefort, à Saint-Petersbourg. Elle consistait à broyer ensemble du sable et du clinker à parts égales puis à mélanger ce produit à du sable dans un rapport de 1 produit broyé à 3 sable. Les réalisations à base de ce type de matériau sont nombreuses : Les pistes d'aérodromes militaires de Pevec et Arkangelsk, Route et autoroutes (ex : Serpoukhov – total), bâtiments (toitures à plis, éléments divers préfabriqués) et tunnels et métros (ombrelles d'étanchéité) ... [Sablocrete, 1994]

I.2.2- Généralités

Le béton de sable est défini selon la norme NF P18- 500[NF P18- 500, 2005] comme un béton fin, constitué par le mélange d'un ou plusieurs sable(s), de ciment, d'addition(s) et d'eau. D'autres additions peuvent être incorporées : adjuvants, fibres, gravillons [Achoura, 2005].

L'incorporation des gravillons tels que le rapport massique G/S soit inférieur à 0,7 nous permet d'obtenir un béton de sable chargé. Ce type d'ajout vise à augmenter la rigidité du squelette granulaire du béton de sable. [Zri, 2010]

La conception actuelle des bétons de sable, permet leur utilisation pour le remplacement des bétons classiques (de gros granulats) dans certains éléments de structures de bâtiment peu sollicités ; ainsi que pour la fabrication des éléments de remplissages (briques, parpaings, hourdis...). Dans ce cas les questions qui pourraient se poser sont:

- Quelle est la différence entre un béton de sable et un mortier ?
- Quelle est la différence entre un béton de sable et un béton ordinaire ?

On distingue un béton de sable d'un mortier par : la composition (il comporte des additions) ; le dosage en liant (quantité faible) ; la résistance plus élevée et la destination similaire aux usages traditionnels du béton.

En terme de composition, il se distingue d'un béton ordinaire par un fort dosage en sable ; l'absence ou le faible dosage en gravillons et l'incorporation d'additions. Mais en termes de résistance et le dosage en ciment, ils sont presque similaires. [Zri, 2010], [Ben Amara, 2002].

I.2.3- Constituants du béton de sable

Les composants rentrant dans la composition du béton de sable sont ceux du béton traditionnel à l'exception des fines d'ajout. Il s'agit donc de composants normalisés.

I.2.3.1- Sables

Le terme sable englobe tous les granulats 0/D conformes aux définitions des normes P 18-541[P 18-541, 2007]. Le sable influe selon ses qualités sur les propriétés des bétons ; il participe à la résistance, il donne la cohésion du mélange et il doit être dense provenant de roches chimiquement inertes tels que : les calcaires durs, les granits et les quartzites

Suivant leurs grosseurs les sables sont classés en:

- sable fin de 0.03 à 0.315mm
- sable moyen de 0.315 à 2mm
- sable gros de 2 à 5mm

Ils peuvent aussi être distingués selon leur origine :

- **Sables naturels roulés** : Sable de rivière, Sable de mer, Sable de dune, Sable de carrière.
- **Sables artificiels** : On peut les obtenir Par:
 - Broyage de certains déchets.
 - Transformation industrielle de l'argile
 - Trempe à l'eau et à l'air du laitier de haut fourneau... [Lacroix et al, 1982]

I.2.3.2- Ciments

D'après la norme NF EN 197-1[NF EN 197-1, 2001] le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Dans les bétons de sable, les ciments utilisés doivent être conformes aux normes. Ils peuvent avoir deux rôles essentiels : assurer la résistance du béton et combler les vides entre les grains de sable... [Ahoura, 2005]

Le ciment Portland est fabriqué par cuisson à haute température 1450°C d'un mélange de calcaire et d'argile. Le clinker obtenu est finement broyé et additionné d'une petite quantité de gypse (sulfate de calcium CaSO_4). Ce dernier est constitué de quatre phases principales nommées : [Moranville, 1997], [Viallis - Terrisse, 2000]

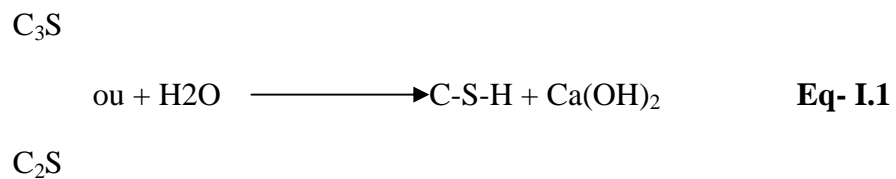
- Silicate tricalcique C_3S $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (Alite)
- Silicate bicalcique C_2S $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (Belite)
- Aluminate tricalcique C_3A $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$
- Ferroaluminate calcique C_4AF $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (Célite)

Et d'autres phases minoritaires. Ces phases ne sont pas pures et contiennent des ions étrangers qui entraînent une altération de leurs structures cristallines.

Le ciment est un liant hydraulique qui peut durcir à l'air ou dans l'eau suite aux réactions d'hydratation. La réaction de l'eau avec les quatre phases du ciment forme des hydrates stables qui lui donnent une résistance mécanique aux matériaux cimentaires.

➤ **Hydratation des silicates (C_3S , C_2S)**

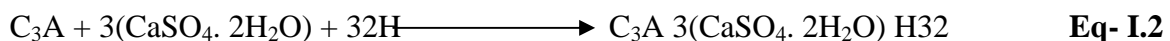
L'hydratation des silicates produit des gels de silicate de calcium hydraté $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (**CSH**) et l'hydroxyde de calcium ou la Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (**CH**), selon la réaction suivante:



➤ **Hydratation des Aluminates (C_3A)**

La présence du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) joue un rôle très important dans l'hydratation des aluminates, dans le cas d'absence du gypse, la réaction de C_3A avec de l'eau est très violente et mène au raidissement immédiat de la pâte.

En présence du gypse, les C_3A réagissent d'abord pour former le trisulfoaluminate hydraté (Ettringite) selon la réaction suivante :



➤ **Hydratation de l'aluminoferrite tétracalcique (C_4AF)**

La réaction d'hydratation du C_4AF est de la même façon que C_3A , et elle est encore mal connue. Cette réaction dégage peu de chaleur et le C_4AF présente une participation très modeste aux développements de la résistance mécanique. [GCI, 2008]

➤ **Bilan de l'hydratation**

Les hydrates sont des produits obtenus suite à la réaction de l'eau avec les quatre phases du ciment ; le résumé suivant synthétise les caractéristiques principales des hydrates formés :

A/ Silicates de calcium hydratés (CSH)

Les CSH occupent entre 60 et 70% du volume de solide d'une pâte de ciment complètement hydratée. Ils ont une structure en feuillets formés de cristaux très petits et mal cristallisés. [Rougelot, 2008]

Les C-S-H sont des matériaux poreux, contenant une quantité d'eau variable, et en équilibre chimique avec la solution aqueuse. En particulier, la stœchiométrie des C-S-H dépend fortement de la composition de la solution interstitielle. [Viallis- Terrisse, 2000]

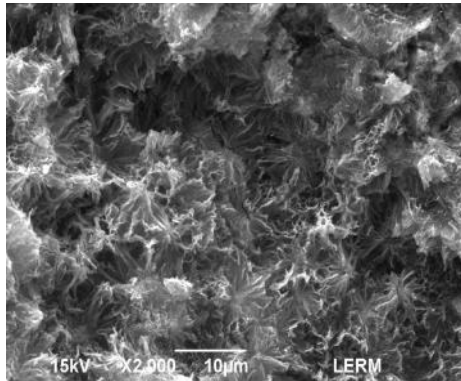


Figure I.1- Observation au Microscopie Electronique à Balayage du Gel de C-S-H. [GCI, 2008]

B/ Portlandite (CH)

La portlandite occupe entre 20 à 25% du volume des solides de la pâte de ciment complètement hydratée. La portlandite a une morphologie hexagonale prismatique. Elle participe peu au développement de la résistance. En fait, la présence de la portlandite peut être un risque, parce qu'elle est fortement soluble et susceptible à l'attaque d'acide et de sulfate.

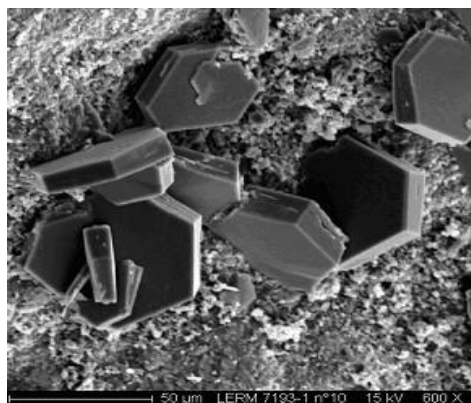


Figure I.2- Observation au Microscopie Electronique à Balayage du Portlandite. [GCI, 2008]

C/ Aluminates hydratés ou ettringite

Ils occupent de 15 à 20 % du volume solide de la pâte de ciment hydraté, on les retrouve généralement sous deux formes : Ettringite (trisulfoaluminate) aiguilles prismatiques et Mono sulfoaluminates (plaquettes hexagonales).



Figure I.3- Observation au Microscopie Electronique à Balayage d'ettringite. [GCI, 2008]

I.2.3.3- Additions minérales

Les additions minérales ou fillers sont des grains qui ne dépassent pas 0.08 mm, le mot fillers provient de l'Anglais « to fill » signifiant remplir. Les fines sont des produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches naturelles ou artificielles (calcaire, basalte, laitier...) [Ben Amara, 2002]. Ces fines sont utilisées essentiellement pour améliorer la compacité en complétant l'ossature granulaire ; et pour réduire le dosage en ciment coûteux. Il existe deux types d'additions minérales : les additions minérales actives et les additions minérales inertes... [Sablocrete, 1994]

En matière de maniabilité et de résistance, la morphologie et la texture des fillers sont des paramètres très importants. La différence entre le béton classique et un béton de sable réside principalement dans la différence granulométrique, la compacité maximale est en relation avec l'optimisation de la granulométrie. Pour les bétons ordinaires, les macro-vides des gros granulats sont remplis par le sable, et les vides de sable sont remplis par le ciment. Pour les bétons de sable les vides entre grains de sable sont remplis par les fines d'ajout [Ambroise et Pera, 1992]

Le sable non seulement utilisé essentiellement comme granulats dans le béton, mais il y a des travaux qui ont été faits pour étudier la possibilité d'utiliser le sable de dune en poudre comme addition. [Guettala et Mezghiche, 2013] ont étudié cette possibilité et ils ont montré que l'incorporation du sable de dune en poudre, sous forme de substitution au ciment Portland permet d'obtenir une nouvelle variété de ciment composé ayant des propriétés physico-mécaniques supérieures à celles du ciment Portland. Cette étude montre aussi que la contribution de l'addition du sable de dune en poudre à l'activité liante du ciment résulte essentiellement de trois effets : physique, physico-chimique et chimique. Ces effets agissent simultanément et de manière complémentaire sur les propriétés des bétons.

I.2.3.3.1-Effets des additions minérales

A/ Effet fillers ou effet de remplissage

L'incorporation de l'addition minérale permet le remplissage d'une partie du volume des vides du squelette granulaire par les particules fines, et donc libérer l'eau contenue dans les pores. Si la quantité d'eau est réduite, et la maniabilité est conservée, la résistance mécanique

va s'améliorer. La réduction progressive du dosage en eau pour une même consistance en incorporant les additions [Benachour, 2009]

B/ Effet physique ou de surface

Il concerne les modifications induites par la présence des particules d'additions minérales sur le processus d'hydratation du ciment et sur la structuration des produits hydratés. La présence des additions minérales provoque une accélération des réactions d'hydratation du ciment ceci est d'autant plus que les particules sont fines. Il agit essentiellement sur l'évolution des résistances mécaniques aux jeunes âges. [Bessa-Baderddine, 2004]

C/ Effet chimique ou pouzzolanique

Il concerne la capacité des additions, caractérisé par des propriétés pouzzolanique et/ou hydraulique, à réagir avec l'eau et les constituants anhydres ou hydratés du ciment pour former de nouvelles phases minérales qui contribuent à la résistance mécanique au même titre que les produits hydratés du ciment. [Benachour, 2009]

La réaction pouzzolanique concerne principalement la fumée de silice, la poudre de verre, la cendre volante siliceuse, etc. La silice amorphe contenue dans ces matériaux réagit en présence d'eau avec la portlandite formée pendant l'hydratation des C_3S et C_2S pour former des silicates de calcium hydratés C-S-H, mais d'un rapport C/S voisin de 1, donc plus riche en silice [Ali-Boucetta, 2014]

I.2.3.3.2- Quelque type d'additions minérales

A/ Laitier cristallisé

Obtenu par refroidissement lent, il correspond à une forme minéralogique stable, il est chimiquement stable, et son pouvoir hydraulique, lorsqu'il existe, ne peut être que modeste. Ses constituants sont essentiellement des silicates et des silico aluminates de calcium. [Alexandre et Sebileau, 1988]

Le constituant principal donné dans la figure I.4 est la mélilite, mélange cristallin de gelhénite C_2AS et d'akermatite C_2MS_2 . Les autres minéraux qui peuvent être présents sont : la bélite C_2S , la wollastonite CS, la rankinite C_3S_2 , la merwinite C_3MS_2 , la monticellite CMS et l'oldamite CaS. [Michel, 2009]

D'après la norme P18-302 [P 18-302,1991] et plusieurs travaux réalisés sur l'emploi de laitier cristallisé dans les matériaux cimentaires; [Choquet, 1947], [Alexandre et Sebileau, 1988], [Cherfa et Ait Mokhtar, 2011], Ont montré que l'utilisation du laitier cristallisé découle de ces propriétés comme un granulat dans la fabrication du béton et les techniques routières, et son utilisation comme fillers permet juste d'avoir une amélioration de la compacité par l'effet de remplissage.

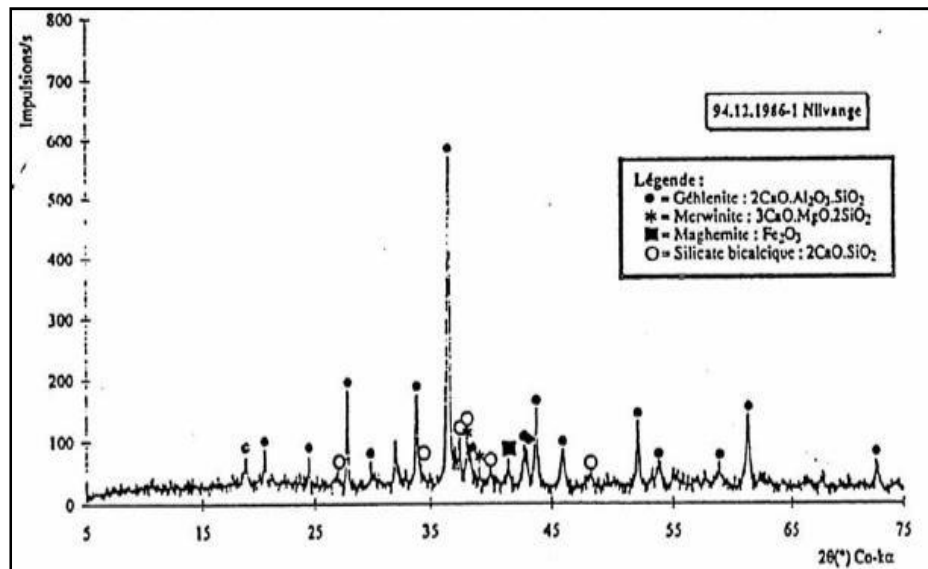


Figure I.4- Spectre DRX d'un laitier cristallisé [Michel, 2009]

B/ Laitier vitrifié (granulé)

Défini par la norme NF EN 15167-1 [NF EN 15167-1, 2006] comme un matériau vitrifié, il est obtenu par refroidissement rapide (par trempe), et présente une structure vitreuse et par conséquent riche en énergie. Cette forme vitreuse est une forme instable qui présente une hydraulité latente. Donc le laitier granulé est un liant hydraulique qui contient essentiellement quatre oxydes : chaux (CaO), magnésie (MgO), silice (SiO₃) et l'alumine (Al₂O₃), la figure I.5 de spectre DRX d'un laitier vitrifié donne les phases cristallines qui présentes, en faibles proportions (5 à 10%), sont la merwinite, la méllilite, la calcite et le quartz [Michel, 2009].

Le laitier granulé moulu est défini aussi par la norme NF EN 15167-1 [NF EN 15167-1, 2006] comme une fine poudre, il est obtenu par broyage de laitier granulé de haut-fourneau, il est utilisé comme addition minérale dans les mortiers et les bétons.

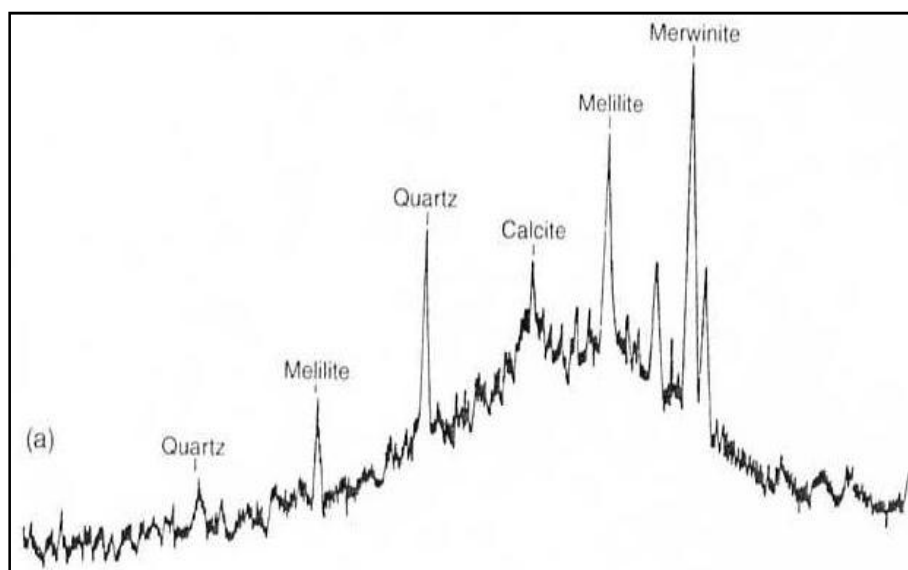


Figure I.5- Spectre DRX d'un laitier vitrifié [Michel, 2009]

C/ Fillers calcaire

D'après la norme NF P18-508 [NF P18-508, 1995] les fillers sont des matériaux minéraux finement divisés, et peuvent être substitués partiellement au ciment pour améliorer certaines propriétés du béton hydraulique, ou pour lui conférer des propriétés particulières. Les fillers calcaires obtenus par broyage et/ou sélection, proviennent des gisements de roches calcaires.

Un filler calcaire est essentiellement utilisé comme une addition inerte permettant de remplacer une partie du ciment, et éventuellement d'augmenter le volume de poudre dans le béton ; son influence sur les propriétés du béton depuis l'état frais jusqu'à l'état durci est un aspect important à prendre en compte pour limiter l'apparition de désordres (homogénéité, aspect de surface, baisse des résistances). [Paco, 2010] ; [Bessa-Baderddine, 2004]

[Bella, 2011] a montré que l'augmentation du dosage en addition calcaire est relative à une augmentation de la résistance à la compression des bétons de sable, à cause de l'augmentation de la compacité, jusqu'à arriver à un dosage optimal en addition, c'est-à-dire un optimum de compacité.

I.2.3.4- Eau de gâchage

La quantité d'eau de gâchage est la quantité totale ajoutée au mélange sec du béton, ou bien du mortier, pour le mouillage et l'hydratation, et cette quantité est déterminée en fonction de la composition et les moyens de mise en œuvre.

I.2.3.5-Adjuvants

Selon la norme NF EN 934-2 [NF EN 934-2, 2002], les adjuvants sont des produits chimiques incorporés à faible dose (moins de 5% de la masse du ciment) dans le béton ou le mortier, afin de modifier certaines de ses propriétés. L'incorporation se fait soit avant, pendant le mélange, ou bien au cours d'une opération supplémentaire de malaxage. Ils sont classés suivant leur fonction principale et on peut distinguer trois grandes catégories d'adjuvants :

- Ceux qui modifient l'ouvrabilité du béton : plastifiants, réducteurs d'eau, super plastifiants.
- Ceux qui modifient la prise et le durcissement: accélérateurs de prise, accélérateurs de durcissement, retardateurs de prise.
- Ceux qui modifient certaines propriétés particulières: entraîneurs d'air, générateurs de gaz [Dreux et Festa, 1998]

Les bétons de sable utilisent les mêmes adjuvants que les bétons traditionnels, souvent les plastifiants ou super plastifiants... [Achoura, 2005]

I.2.3.6-Autres ajouts

Comme les autres bétons, on peut utiliser d'autres ajouts au béton de sable pour améliorer certaines propriétés, les plus utilisés sont les fibres métalliques (en acier ou en fonte) ou les fibres de polypropylène, les gravillons et les colorants.

I.2.4- Propriétés des bétons de sable

I.2.4.1- Ouvrabilité

Le béton de sable a une aptitude à remplir parfaitement les moules, avec une énergie de mise en place moindre, sans préjudice pour les autres propriétés, cela est dû à la petite granularité qui garantit un bon enrobage des armatures même dans un milieu fortement ferrailleur.

[Achoura, 2005]

I.2.4.2- Maniabilité

Le béton de sable se traduit par des valeurs E/C (eau /ciment) supérieures à 0.5, ce rapport généralement varie entre 0.6 et 0.7. Cette valeur élevée est due à une surface spécifique plus importante du mélange. La maniabilité des bétons de sable dépend aussi du module de la finesse de sable ; la nature, le dosage en fine et le taux de gravillon dans le béton de sable [Denis et al, 2002].

Le module de finesse de sable influence les propriétés du béton à l'état frais et le comportement mécanique du durci. La dimension des particules d'un sable à béton peut être évaluée d'après l'analyse granulométrique et son module de finesse (MF). Plus MF est élevé plus le sable est grossier et moins le béton est ouvrable. Pour un béton normal : plus les granulats sont fins, plus il y aura des vides dans le mélange. Or ces vides doivent être remplis par la pâte de ciment. Par conséquent, le mélange sera moins économique pour un rapport E/C constant. Plus les granulats sont rugueux moins ils sont maniables mais plus ils sont résistants car ils offrent une meilleure adhérence.

La granulométrie (dimension et distribution) et la nature des particules (forme, texture, porosité ...etc.) sont deux caractéristiques essentielles pour le choix d'un granulat à béton [Ndiaye, 1993]. Le module de finesse est élevé lorsque le sable est riche en éléments gros ce qui implique une amélioration de la maniabilité.

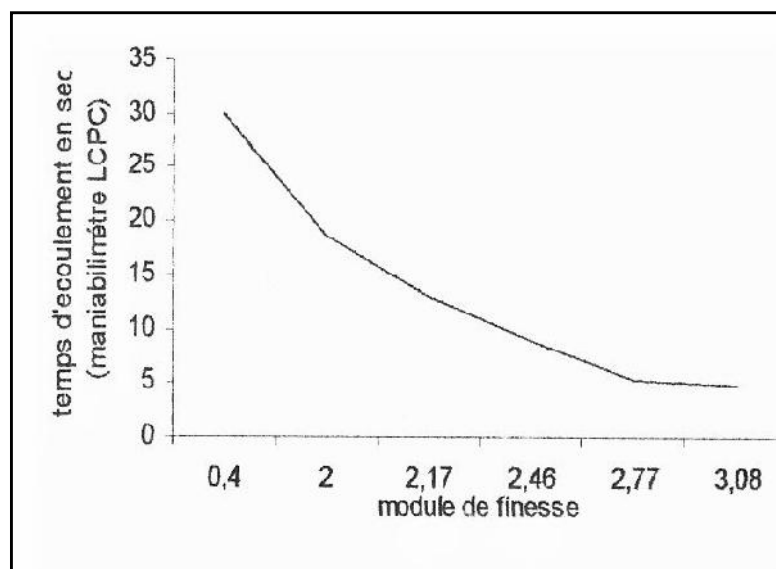


Figure I.6- Maniabilité en fonction de module de finesse [Sablocrete, 1994]

La nature et le dosage en fines (additions minérales) influencent de façon significative la maniabilité des bétons de sable. La maniabilité est améliorée lorsque le rapport E/C est augmenté et pour un rapport E/C fixe, la maniabilité dépend du dosage en additions fines [Sablocrete, 1994]

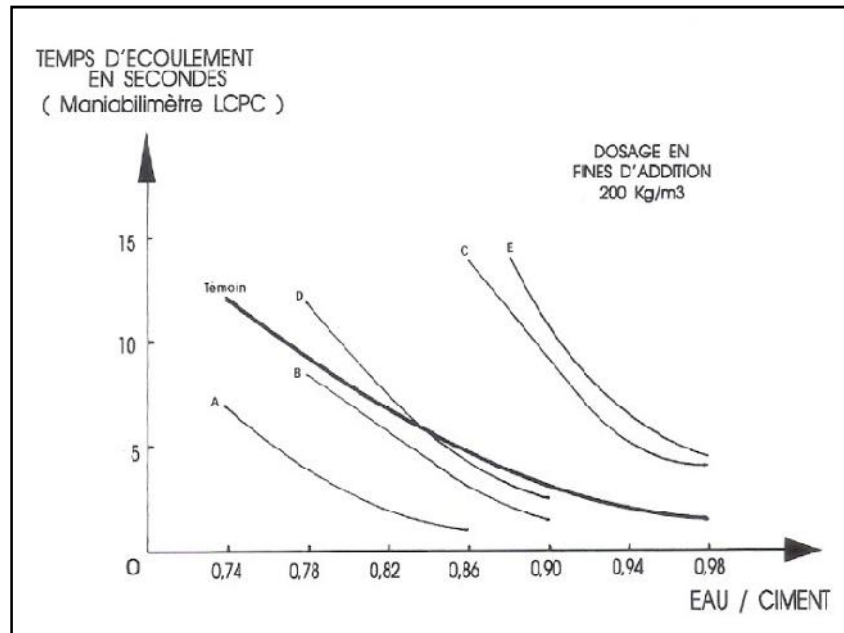


Figure I.7- Influence de la nature et du dosage en addition sur la maniabilité [Sablocrete,1994]

I.2.4.3- Résistance mécanique

Les performances mécaniques restent parmi les critères les plus utilisés pour le jugement de la qualité des bétons et pour leurs classifications. Généralement, les résistances mécaniques des bétons de sable sont inférieures à celles des bétons classiques. Cependant, cela n'empêche en aucun cas d'obtenir des bétons de sable à hautes performances mécaniques, c'est dans ce sens que plusieurs comparaisons ont été faites dans l'objectif de voir dans quelles mesures les bétons de sable pourraient remplacer les bétons classiques [Achoura et al, 2009].

La résistance est aussi dépendante d'un certain nombre de paramètres, en plus de la qualité et du dosage en ciment et du rapport (eau/ciment), on cite en particulier : la finesse de l'addition, la nature de l'addition et la dimension maximale

➤ Finesse de l'addition

Toute addition minérale, même chimiquement inerte, favorise l'hydratation du ciment pourvu qu'elle soit suffisamment fine. Cet accroissement d'hydratation est attribué à la germination hétérogène des hydrates. Cette accélération est fonction de la finesse de l'addition et de sa quantité. [Lawrence, 2000], [Rahmouni et al, 2012]. Plus l'addition est fine, plus elle est efficace au niveau du gain de compacité et donc du gain en résistance... [Sablocrete, 1994]

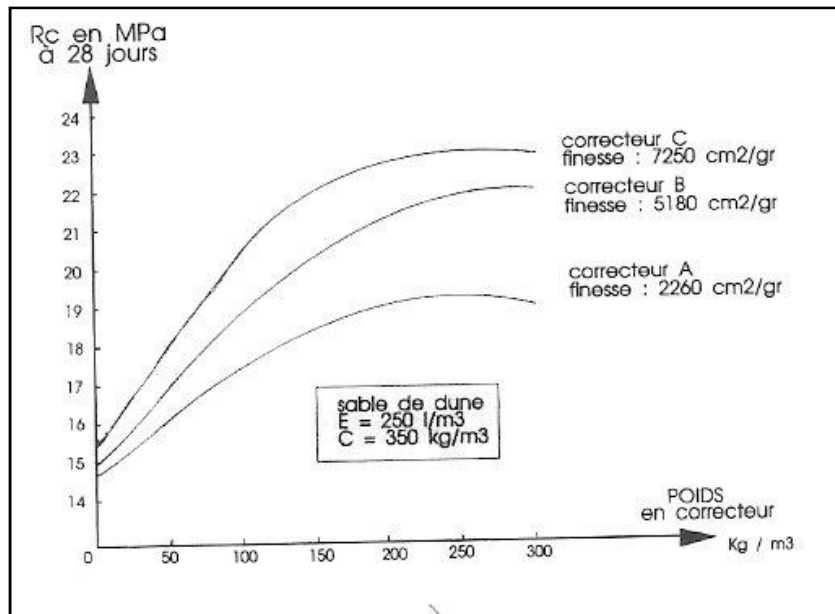


Figure I.8- Influence de la finesse de l'addition sur la résistance [Sablocrete, 1994]

➤ *Nature de l'addition*

Pour le même dosage en fine d'addition et pour le même rapport E/C, on constate que les résistances mécaniques sont très variables, ce qui explique que la nature des additions minérales influe aussi sur la résistance.

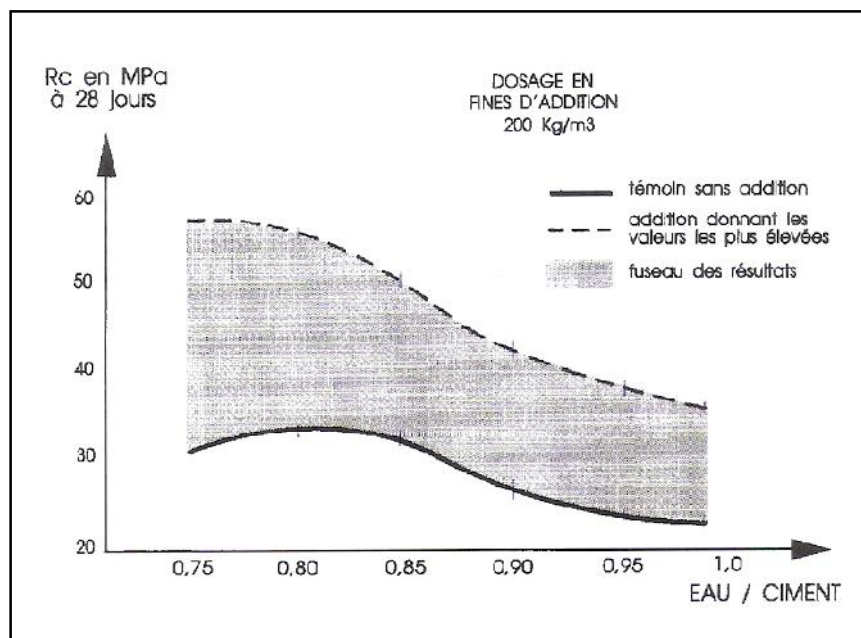


Figure I.9- Influence de la nature de l'addition sur la résistance [Sablocrete, 1994]

➤ Dimension maximale

Pour une même valeur du rapport Eau/Ciment, on constate que l'effet du diamètre maximal D_{\max} des plus gros granulats est peu important en tout état de cause, le béton est très maniable dans le cas d'un 0/20... [Sablocrete, 1994]

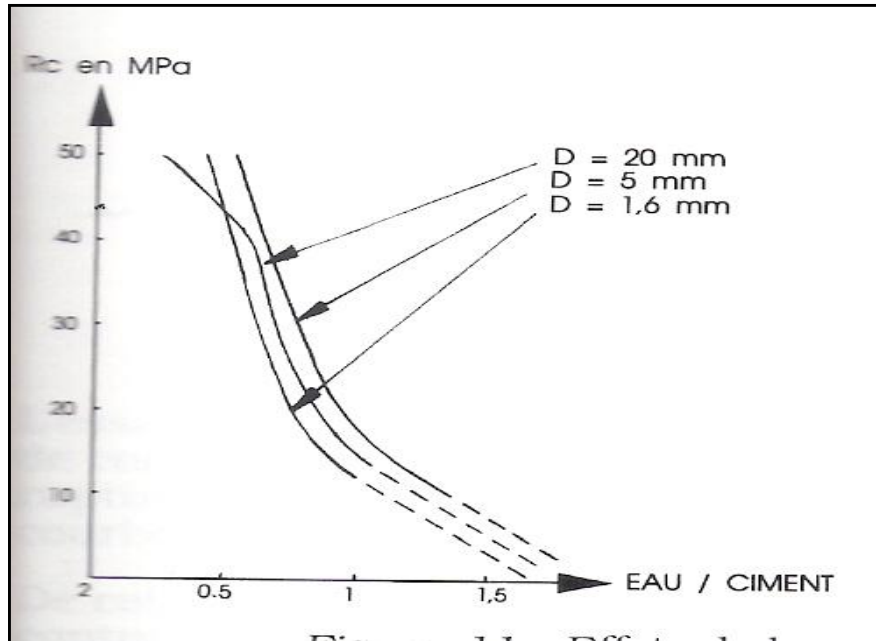


Figure I.10- Effets de la granularité sur la résistance [Sablocrete, 1994]

I.2.4.4- Retrait

Le retrait est un phénomène de raccourcissement qui accompagne la prise du ciment, le durcissement sous l'eau diminue beaucoup les effets du retrait c'est pourquoi il convient de tenir les pièces humides en les arrosant pendant leur durcissement ou le béton très jeune qui peut se fissurerait facilement sous l'effet du retrait... [Benaissa, 1992]

On peut distinguer plusieurs types de retrait suivant les conditions thermique, hygrométriques de durcissement et l'âge des bétons et peuvent être résumés en deux types : [Achoura, 2005]

I.2.4.4.1- Retrait endogène

Ce type de retrait appelé aussi retrait d'hydratation ou retrait d'autodessiccation, Il est lié aux facteurs internes d'échange entre l'eau et le ciment (réaction d'hydratation) ; avant et pendant la prise de 2 à 3 heures, une rétraction lors de l'introduction de l'eau de gâchage après une expansion due à la formation de l'ettringite à cause du dégagement de chaleur. Après prise il y a une contraction thermique qui suit l'expansion et qui se stabilise au bout de quelques jours.

I.2.4.4.2- Retrait de dessiccation

Le retrait de dessiccation est en fonction directe avec les conditions atmosphériques ambiantes. Pendant et après la prise du béton.

Le travail de Benaïssa et al [*Benaïssa et al, 1993*]² montre que les bétons de sable développent une cinétique de déformation deux fois plus rapide pendant les deux premiers mois, au-delà desquels on assiste à un ralentissement donnant des vitesses très proches de celles des bétons classiques.

Plusieurs travaux de recherche ont été réalisés pour étudier l'effet des ajouts minéraux sur la cinétique du retrait des bétons en particulier les bétons de sable. Achoura [*Achoura, 2005*], Gadri et Guettala [*Gadri et Guettala, 2014*] montrent que les retraits des dessiccations des bétons de sable diffèrent en fonction du type de sable, type et dosage en fine d'ajouts.

I.2.5 - Domaine d'utilisation des bétons de sable

Le béton de sable est un nouveau matériau créé pour remplacer le béton classique dans certains éléments de structure. Les principaux domaines d'utilisation des bétons de sable sont :

- Travaux avec du béton injecté.
- Travaux avec un fort cadrage.
- Pilots de béton armé sur place.
- Certains travaux de fondations pour les constructions.
- Travaux pour terrasses.
- Tuyaux de canalisation en béton simple ou armé.
- Panneaux préfabriqués pour murs intérieurs et extérieurs portants, ...etc [*Achoura, 2005*]; [*Ambroise et Pera, 1992*]

I.2.6- Inconvénients des bétons de sable

Les bétons de sable sont très utilisés malgré leurs inconvénients, par exemple :

- La grande teneur en grains fins donne une grande surface spécifique, cela conduit à la difficulté d'assurer une bonne enveloppe de pâte de ciment pour les grains de sable, donc le dosage en ciment augmente.

- Les grains très fins du sable peuvent abaisser l'activité du ciment ; donc la résistance mécanique du béton va diminuer.

- Augmentation de l'absorption capillaire à cause de la grande surface spécifique du ciment ; par conséquent l'imperméabilité du béton durci va diminuer et le retrait va augmenter... [*Ben Amara, 2002*].

I.2.7- Amélioration des propriétés des bétons de sable

Plusieurs recherches ont été réalisées afin de minimiser les inconvénients du béton de sable et lui assurer sa valeur économique, surtout dans les régions riches en sable comme le sud algérien. Le but principal de ces recherches est d'avoir une maniabilité correcte et d'atteindre une bonne résistance mécanique en visant plusieurs solutions : [*Ben Amara, 2002*]

- **Correction granulaire** : par le mélange d'un sable gros avec un sable fin ou le mélange de plusieurs types de sable on peut atteindre une performance mécanique acceptable. [Joudi et al, 2011]
- **Ajout de filler** : pour améliorer la compacité et la résistance mécanique des bétons de sable.
- **Ajout des adjuvants** : est généralement utilisé pour augmenter la fluidité des mélanges, on utilise les plastifiants et les superplastifiants. [Bella, 2011]
- **Compactage** : utilisé pour engendrer des compacités et des résistances mécaniques élevées avec un faible rapport E/C.
- **Ajout des fibres** : pour améliorer la ductilité du matériau, la résistance, et pour la prévision des contraintes à la rupture des matériaux. ...

Dans la littérature on trouve plusieurs travaux qui ont été réalisés pour montrer la valorisation des déchets industriels comme des ajouts dans les matériaux cimentaires, et la même chose pour le béton de sable, mais non seulement les déchets industriels qui sont utilisés, il ya aussi les déchets agricoles.

[Cisse et Laquerbe, 2000] dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux du Sénégal, ils ont utilisé la cendre de balle de riz comme un ajout au béton de sable et ils ont montré que l'introduction de cette cendre a permis une amélioration des performances physico-mécaniques des bétons de sable, la production d'un béton de sable léger, et moins couteux, avec des propriétés isolantes. Dans le même but on peut utiliser les copeaux de bois dans la fabrication des bétons de sable. [Bederina et al, 2011].

I.3- Etat de connaissance sur les fibres

I.3.1- Historique

Les fibres naturelles ont été utilisées depuis bien longtemps pour renforcer des matériaux très divers : terre, plâtre, brique ..., mais l'association avec le ciment, le mortier ou le béton est un procédé relativement récent.

Le brevet sur l'amiante ciment date de 1902, les premiers emplois de fibres d'acier interviennent en 1923. Les fibres de verre, bien que connues depuis le début du siècle, n'ont fait l'objet d'essais d'incorporation au béton qu'à partir de 1950.

Aujourd'hui, le renforcement du mortier du béton par des fibres constitue une voie nouvelle dans le domaine des matériaux composites, dont les applications sont très variées.

Les composites « ciment fibres » et « béton fibres » sont une avancée technologique importante dans de nombreux domaines du bâtiment et des travaux publics : panneaux minces, dallage, isolation, réparation... [CIM, 2006]

I.3.2- Définition

Nous appellerons fibre, tout matériau de forme élancée, dont le diamètre moyen est relativement petit, la plupart des fibres utilisées ont une longueur comprise entre 1 et 60 mm avec un élancement (rapport de la longueur sur le diamètre) de l'ordre de 30 à 300. La forme de la fibre est variable et contrôlée selon le comportement souhaité. [Ben Amara, 2002]

I.3.3- Rôle des fibres

Lorsque les charges appliquées au béton s'approchent de la charge de rupture, les fissures se propagent, parfois rapidement. Les fibres noyées dans le béton permettent d'arrêter le développement de la fissuration. Les barres d'armature en acier jouent un rôle analogue, car elles agissent comme des fibres de grande longueur. Les fibres courtes et discontinues ont cependant l'avantage de se mélanger et de se disperser dans le béton de façon uniforme. [Beaudoin, 1982]

Donc le rôle principal des fibres est :

- De limiter l'ouverture des fissures du béton (ces fissures sont dues à différentes causes, tel que le retrait, les contraintes thermiques,...). la figure I.11/B illustre ce phénomène.
- De transformer le comportement fragile du béton en comportement ductile illustré par la figure I.11/A [Fritih, 2009], [Djbali, 2013]
- D'améliorer la résistance à la flexion. [Boulekbache, 2013]

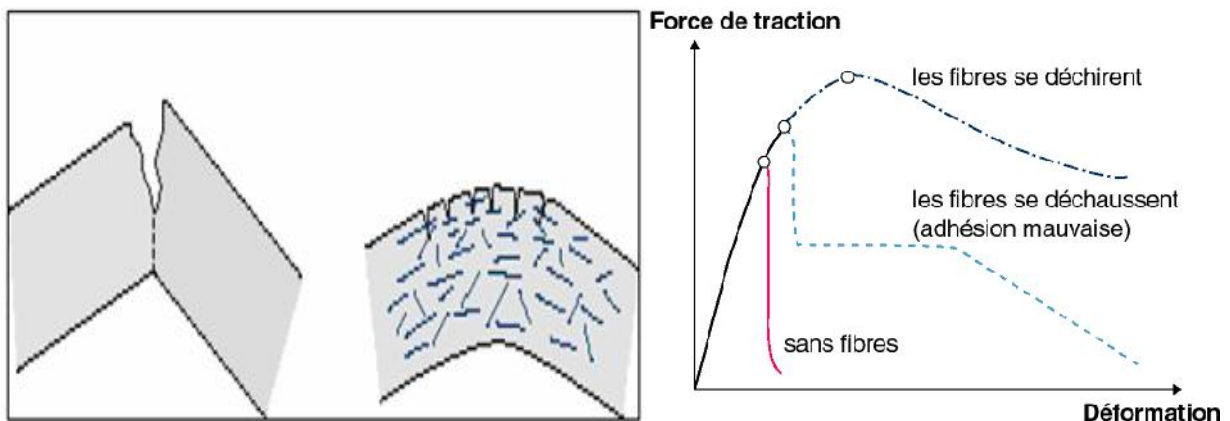


Figure I.11- Illustration de l'apport du renfort par des fibres [Fritih, 2009]

I.3.4- Qualités principales des fibres

La dispersion régulière des fibres dans les bétons et mortiers réalise un réseau fibré multidirectionnel de haute densité.

Les fibres guident et absorbent la fissuration qui se développe pendant les premières heures de leur mise en œuvre (phase plastique) ; cela permet à ces bétons et mortiers de développer des résistances suffisantes pour prévenir la fissuration.

La microfissuration développée pendant la phase plastique de ces bétons et mortiers, peut si elle n'est pas contrariée, évoluer en microfissuration. Aussi par :

- Pouvoir adhérer parfaitement à la pâte de ciment.
- Avoir une bonne résistance à la traction.
- Ne pas risquer d'être attaquée par le milieu basique du ciment.
- Ne pas se dégrader dans le temps et conserver leurs qualités propres.
- Ne présenter aucun danger pour la main d'œuvre qui les manipule.
- Ne pas avoir d'incidence excessive sur le cout du béton.
- Etre efficace pour un dosage peu élevé... [Ben Amara, 2002]

I.3.5- Types de fibres

Les fibres sont ajoutées à la gâchée de béton, qui contient habituellement du ciment, de l'eau et des granulats fins et grossiers .Il existe plusieurs types de fibres qui se différencient par leur nature, leur diamètre, leur longueur (macro ou micro fibres), leur forme et leur état de surface.

Le choix des fibres dépend de l'usage recherché (pièces minces ou massives, renforcement de pâte pure, de mortier ou de béton, réparation des structures), de leurs propriétés (résistance et module élevé, bonne adhérence), de leur disponibilité et de leur prix. [Bentalha-Malou, 2007]

Plusieurs types des fibres sont utilisés dans la construction, nous citons :

Les fibres métalliques (acier, fonte)

Les fibres organiques (polypropylènes, polyesters, polyamides et polystyrènes)

Les fibres minérales (amiante, verre, carbone)

Les fibres végétales (Jute, sisal, coir, bois, bambou, palmier)

Les fibres animales (poil, laine, soie).

Le tableau **I.1** donne quelques caractéristiques des différents types de fibres. [Akchiche, 2007]

Tableau I.1- Caractéristiques des différents types de fibres. [Akchiche, 2007]

Fibre	Diamètre en μm	Densité en (g/cm^3)	Module d'élasticité en GPa	Résistance à la traction en GPa	Allongement de rupture en %
Acier	5-500	7,8	200	1-3	3-4
Verre	5-20	2,6	80	1,5-3	2-3,5
Polypropylène	10-200	0,9	5-10	0,4-0,75	15-25
Amiante	0,02-20	2,5-3,4	200	3	2,3
Polyester	-	1,4	8	0,7-0,85	11-13
Carbone	5-9	1,7-2,0	250-400	2-3	0,5-1,5
Cellulose	14-45	1,5	20-40	0,15-0,5	8-12
Jute	18-2000	1,45	-	0,35	3-4
Sisal	10-50	1,5	15,2	0,8	3
Coir	20-700	1,08	2,8	0,17	37,7

I.3.5.1- Fibres végétales

Les fibres végétales sont des fibres d'origine naturelle, la première utilisation du composite liant - fibres végétales c'était le plâtre. Actuellement le monde connaît de récents développements dans le domaine du renforcement des matériaux cimentaires avec des fibres végétales. [Akchiche, 2007]

Généralement une fibre végétale est caractérisée physiquement par son diamètre, sa densité, sa teneur en eau et son pourcentage d'absorption d'eau. Elle est caractérisée mécaniquement par sa résistance à la traction, à la rupture et par le module d'élasticité. [Kriker, 2005]



A/ Fibres de jute



B/ Fibres de chanvre



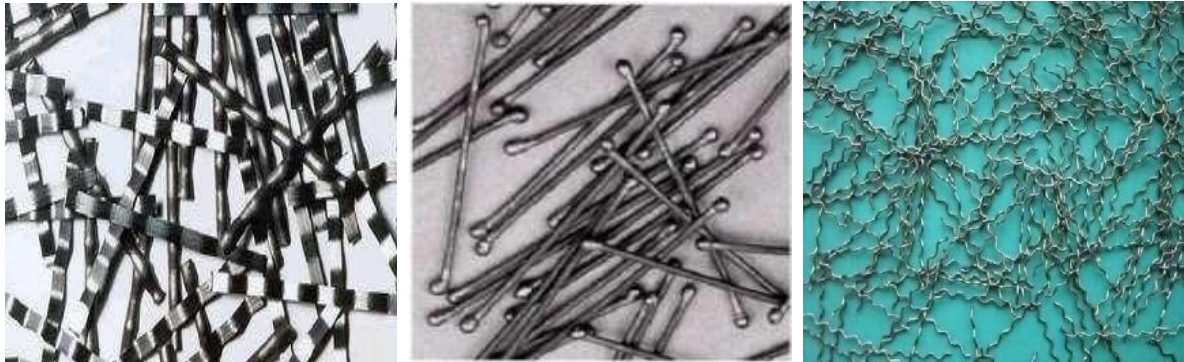
C/ Fibres de sisal

Figure I.12- Quelques types des Fibres végétales [Hameed, 2010]

I.3.5.2- Fibres métalliques

Les fibres d'acier sont les fibres les plus utilisées et il existe de nombreuses variétés de fibres qui se différencient les uns des autres par leurs diamètres, leur section (ronde, carrée, rectangulaire ...), leur longueur et leur mode d'élaboration. Elles peuvent être rectilignes ondulées ou présenter des élargissements aux extrémités, soit des coudes ou des crochets pour améliorer l'adhérence, comme il est illustré dans la figure I.13 [Abdou, 2007]

Les fibres métalliques sont destinées à renforcer le béton, elles sont courtes et leurs longueurs discrètes d'acier ayant un rapport (l/d) allant de 20 à 100, avec des sections transversales suffisamment petites pour être dispersées de manière aléatoire dans le béton frais en utilisant les techniques de mélange habituelles [Kaïkea, 2015].



A/ Fibres zigzagüées

B/ Fibres forme d'os

C/ Fibres ondulées

Figure I.13- Quelques types des Fibres métalliques [Hameed, 2010]

I.3.5.3- Fibres de polypropylène

Les fibres à béton sont conçues et fabriquées à base de polypropylène ayant fait l'objet d'un traitement particulier, elles sont fabriquées depuis 1954 pour l'industrie textile [Rehnstrom et Bhargava, 1977] et après elles sont utilisées pour renforcer les bétons et les mortiers. Ajoutées à la gâchée avec des dosages plus faibles entre 0,06 à 0,2% du volume total. [Hameed, 2010].



Figure I.14- Fibres de polypropylène

- Structure moléculaire du polypropylène

Le polypropylène est un polymère cristallisable de la famille des polyoléfines, de formule chimique $(-CH_2-CH(CH_3)-)_n$. Il est obtenu suivant le processus d'extrusion, étirage qui confère une orientation prépondérante aux molécules et qui engendre les propriétés mécaniques élevées. [Belferrag, 2006]

Le polypropylène est une polyoléfine linéaire obtenue par polymérisation du propène via une catalyse stéréospécifique. Ce type de catalyse autorise la synthèse de polypropylène isotactique qui présente les propriétés requises à un usage structural. Lors de la synthèse, l'encombrement stérique du groupe méthyle favorise l'enchaînement tête-queue, ce qui donne une grande régularité chimique à la chaîne de polypropylène. [Temimi-Maaref, 2006]; [Ragoubi, 2010]

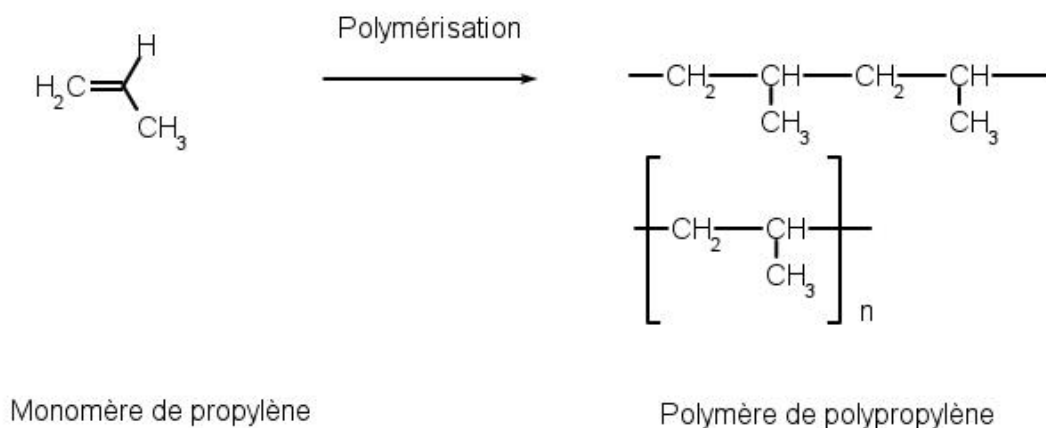


Figure I.15- Synthèse du polypropylène [Ragoubi, 2010]

I.3.6 - Bétons de fibres de polypropylène

La fabrication du béton avec les fibres de polypropylène ne soulève aucune difficulté, la répartition des fibres se fait facilement et ne nécessite pas de précaution particulière lors du malaxage. Plusieurs études montrent l'influence des fibres de polypropylène sur les bétons fibrés.

Les quantités de fibres de polypropylène à mettre en œuvre sont de l'ordre de 0.5Kg jusqu'à un maximum de 2Kg par m^3 de béton ; dans la majorité des cas, les dosages habituels sont de $600 g/m^3$ ou $900 g/m^3$ et très rarement $1200g/m^3$... [Dreux et Festa, 1998]

Plusieurs travaux de recherche [Wang et al, 1989] ; [Hsieh et al, 2008]; [Zhao et al, 2008] montrent que l'introduction des fibres de polypropylène comme matériau de renforcement du béton améliore considérablement la ductilité et la résistance à la traction.

L'étude réalisée par Kakooei [Kakooei et al, 2012] de l'effet des fibres de polypropylène sur la résistance à la compression et la perméabilité du béton, montre que la résistance à la compression du béton augmente proportionnellement avec l'augmentation du dosage en fibres polypropylène, les valeurs de résistance les plus élevées ont été observées avec les rapports de volume de $1,5 kg/m^3$ et $2 kg/m^3$.

Aussi la présence des fibres de polypropylène diminue la perméabilité du béton et par conséquent retarde le processus de dégradation.

Les fibres de polypropylène améliorent la résistance aux chocs, et limitent les risques de fissuration dus au retrait dans les premiers âges du béton comme il est montré par [Zollo et al, 1986], ces derniers montrent que les fibres de polypropylène limitent la déformation due au retrait à 20% pendant les 07 premiers jours.

En plus, l'addition des fibres de polypropylène dans les bétons permet d'améliorer sa stabilité thermique qui a été confirmé par [Pliya, 2010] ; [Haniche, 2012], [Lura et Terrasi, 2014], [Yermak, 2015]. Un travail de recherche sur le comportement du béton soumis à une température élevée, [Haniche, 2012] a montré que les éprouvettes en béton sans fibre conservées dans l'eau et chauffées jusqu'à 600°C ont présenté des éclatements, par contre celles avec les fibres de polypropylène pour des dosages 1 ; 1,5 et 2 g/m³ conservées dans les mêmes conditions et soumises au même cycle de chauffage n'ont pas éclaté.

D'après [Lamontagne et Pigeon, 1994] L'utilisation des fibres de polypropylène dépend essentiellement de la dimension des granulats.

I.3.7 - Comportement du béton de fibre polypropylène

I.3.7.1 - Maniabilité

Les fibres augmentent la cohésion apparente et réduisent l'affaissement d'un mélange de béton. Le test de l'affaissement peut être utilisé comme indicateur général de l'uniformité du mélange de béton contenant des fibres.

La mise en œuvre du béton renforcé de fibres dosées et sa compatibilité par vibration sont en effet bien meilleures que ne l'indique la basse consistance dans le test d'affaissement.

I.3.7.2 - Absorption de l'eau

L'addition de fibres à un mélange conventionnel de béton réduit les caractéristiques d'absorption d'eau du béton final, augmentant la résistance à la pénétration de solutions salines.

I.3.7.3 - Produits chimiques

La présence de fibres n'a aucun effet sur la résistance chimique du béton. Le polypropylène est un matériau inerte et résistant aux alcalis, cette caractéristique est fondamentale pour la durée des matériaux liés au ciment.

I.3.7.4 - Choc

Les tests indiquent, qu'un béton renforcé de fibres distribuées uniformément, a une résistance au choc qui est considérablement supérieure à celle d'un béton sans fibres. Ces résultats démontrent également une réduction des lézardes et de l'endommagement des arêtes. En ce qui concerne la résistance à la compression et à la flexion, aucune différence n'a été notée et, comme le béton traditionnel, celui chargé de fibres peut lui aussi être renforcé de manière appropriée [Beaudoin, 1982]

I.4 –Etat de connaissance sur la durabilité des matériaux cimentaires

I.4.1- Bref historique sur les problèmes de durabilité

Il existe un très grand nombre de structures en béton âgées de 40 à 90 ans qui sont encore en excellent état, mais il existe aussi de très nombreux cas où une mauvaise durabilité a provoqué la ruine complète ou partielle des ouvrages. A une certaine époque ; on ne connaissait pas tous les mécanismes de destruction et les façons d'éviter les détériorations : Gel-dégel ; Réaction alcalis-granulats ; Corrosion ...etc.

On accorde trop d'importance à la résistance à la compression et pas assez aux facteurs environnementaux (on ne devrait pas concevoir un stationnement extérieur en béton de 20 MPa).

Une partie des échecs peut aussi être associée à l'évolution de la technologie de fabrication et de la performance des ciments. La performance des ciments progresse constamment et on peut atteindre une résistance donnée en utilisant un rapport E /C toujours de plus en plus élevé.

- En 1945, pour obtenir 33MPa on devait utiliser 380 Kg/m³ de ciment et un rapport E/C de 0.47
- En 1978, seulement 250 Kg/m³ de ciment peuvent suffire avec un E/C 0.72

En terme de résistance ; ces deux bétons sont équivalents ; leur durabilité est cependant complètement différente.

La réactivité chimique des ciments était plus faible (MPa en réserve) et Il n'y avait pas de fluidifiants ni de superplastifiants (on devait utiliser plus de ciment par m³).

Le contact n'est pas toujours adéquat entre les chercheurs, les concepteurs et les propriétaires d'ouvrage. Les recommandations touchant la durabilité n'atteignent souvent pas les bonnes personnes en raison des trois solitudes du monde de la construction : les responsables des matériaux ; les concepteurs et les ingénieurs de chantier.

Pour obtenir un ouvrage durable ; il faut :

- ✓ Utiliser un matériau durable
- ✓ Concevoir la structure en fonction des facteurs environnementaux
- ✓ Exercer un bon contrôle de la qualité des matériaux et des techniques de construction.
[GCI, 2008]

I.4.2- Définition et objectif

Un ouvrage doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations (physiques ; mécaniques ; chimiques...), c'est-à-dire aux charges aux quelles il est soumis ; ainsi qu'aux actions diverses tels que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant..., tout en conservant son esthétique, il doit satisfaire, sans perdre ses performances, aux besoins des utilisateurs au cours du temps.

Il devient possible de définir des objectifs de durabilité, et de choisir avec précision, les caractéristiques du béton en fonction de l'agressivité du milieu dans lequel se trouve l'ouvrage, et d'optimiser ses caractéristiques afin de les adapter à la durée d'utilisation souhaitée. Les spécifications concernent la nature et le dosage minimal en ciment, la compacité minimale, la valeur maximale du rapport Eau /Ciment, l'enrobage minimal des armateurs, et la teneur maximale en chlorures dans le béton. [Kelifa, 2009]

I.4.3- Facteurs de la durabilité

I.4.3.1-Porosité

Le béton est un mélange composé d'un ensemble de constituants (ciment, granulats, eau, adjuvants), mais renfermant aussi des vides dus entre autres, à l'eau excédentaire.

Le béton durci courant présente une porosité de 10 à 12%. Cette porosité est due à la présence de pores inclus dans la texture même des hydrates et de capillaires qui se développent dans la structure des grains. Les capillaires qui sont dimensionnellement les plus importants, ne dépassent pas un diamètre de quelques microns. Les pores des hydrates sont 10 à 12 fois plus petits.

Le comportement du béton et son évaluation dans le temps ont montré, l'influence de la porosité sur la résistance (relation établie par Féret). Mais les corrélations entre durabilité et résistance mécanique, entre absorption d'eau et résistance au gel, ou perméabilité et carbonatation ont été mises en évidence plus récemment.

La durabilité du béton dépend essentiellement de la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans le réseau poreux du matériau. La porosité est un paramètre déterminant de la durabilité du béton ; plus la porosité diminue, plus les propriétés mécaniques augmentent et plus la perméabilité diminue (Figure 1). [Foughali, 2010]

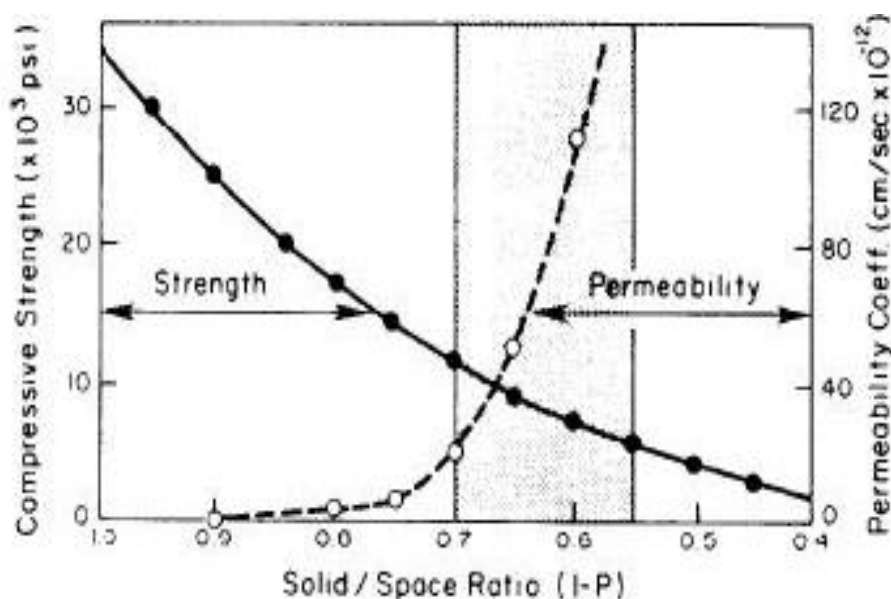


Figure I.16-Relation entre la perméabilité, la résistance à la compression et le niveau de porosité du béton. [Metha, 1986]

A/ Types des pores

La porosité du béton est constituée de plusieurs familles de vide, qu'on peut classer en fonction de leurs dimensions, leurs géométries et de leur rôle dans le transport de matière :

✚ Dimensions des pores

Les dimensions sont comprises entre quelques mm et quelques dizaines d'Ångström (Å). Les plus petits vides du béton sont donc 1 million de fois plus petits que les plus gros. Par ordre décroissant de diamètre on retrouve:

- les vides d'air ou pores (diamètre > 1mm), ces vides ne sont généralement pas remplis d'eau.
- les bulles d'air entraînées ($10\ \mu < \text{diamètre} < 1\ \text{mm}$)
- Les pores capillaires ($0,01\ \mu\text{m} < \text{diamètre} < 5\ \mu\text{m}$), si le béton est constamment conservé à l'humidité, on peut considérer que les pores capillaires sont pratiquement remplis d'eau. Par contre, si le béton est soumis au séchage, les pores capillaires commencent à se vider graduellement en commençant par les plus gros.
- les pores de gel (diamètre < 40 Å), contiennent de l'eau qui est en partie adsorbée à la surface des feuillettes de C-S-H. Cette eau est relativement stable et il est difficile de l'extraire par séchage.

✚ Géométrie des pores

La forme des pores a aussi un rôle très important dans le transport des matières et on distingue :

- des pores capillaires interconnectés, qui forment un espace continu dans le réseau poreux.
- des pores isolés qui ne communiquent pas avec l'environnement.
- de pores aveugles qui sont interconnectés d'un seul côté.

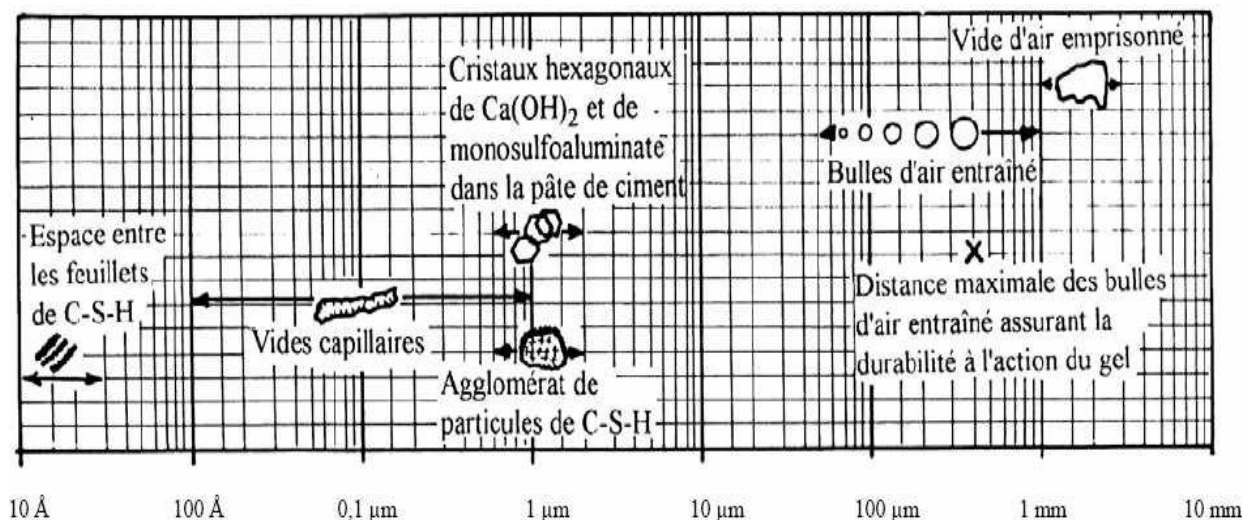


Figure I.17- Différentes formes de pores dans la pâte de ciment durcie classées par taille
[Mehta et Monteiro, 2005]

B/ Rôle des pores dans le transport de la matière

Ce sont surtout les pores capillaires qui influencent le plus la perméabilité du béton. Les pores de gel n'ont pas une grande influence sur la perméabilité.

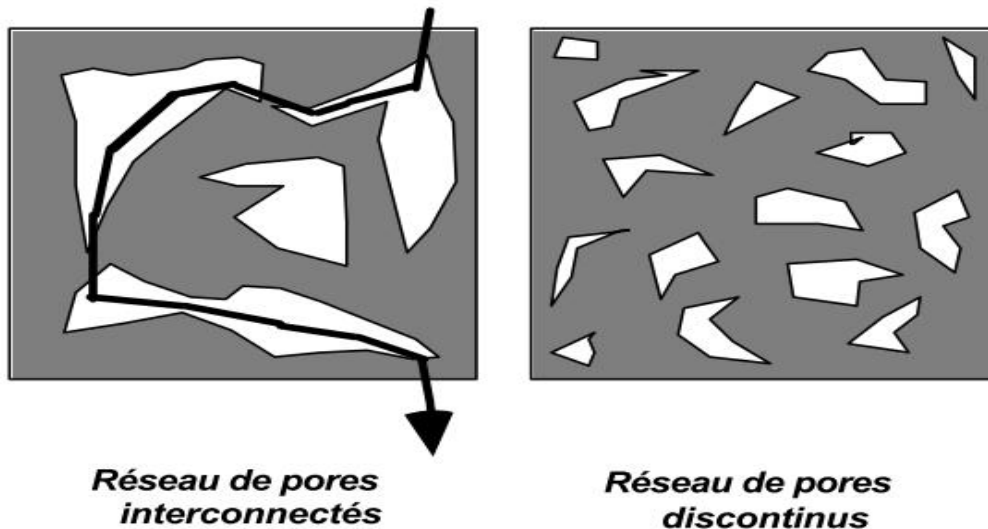


Figure I.18-Influence du degré d'interconnectivité sur la perméabilité de la pâte

[GCI, 2008]

Trois facteurs sont prépondérants dans la conception d'un béton de faible porosité :

- Un dosage en ciment adéquat.
- Une faible teneur en eau.
- Une granulométrie comportant des éléments fins, éventuellement actifs, en quantité suffisante pour remplir les espaces entre les plus gros granulats.

I.4.3.2- Fissuration

La fissuration des ouvrages en béton et en béton armé correspond généralement à une altération des propriétés mécaniques, ou physiques du matériau. La connaissance exacte de ce type de désordre doit permettre en outre d'en comprendre la cause, et de définir le type de réparation à envisager. Les fissures peuvent survenir dans le béton non durci, le béton en phase de durcissement ou le béton durci. Dans le cas du béton durci, les fissures se forment lorsque les forces de traction dépassent la résistance à la traction du béton.

Les causes de la fissuration sont diverses, elles peuvent être liées, soit à la qualité du matériau (ressuage, retrait), à la mise en œuvre (ajout d'eau, vibration, météo,...), au fonctionnement de la structure (mécanique, thermique), ou encore aux facteurs chimiques (carbonatation, attaque sulfatique,...) [Tahenni, 2006]

I.4.4- Classification des milieux agressifs et leurs modes d'action

Les milieux agressifs sont d'ordre chimique ou physique, ils peuvent être classés en trois catégories : [Baron, 1992]

❖ **Les gaz** : ils sont d'origine naturelle, ou résultant de pollutions atmosphériques et fermentation, les plus fréquemment rencontrés sont les dioxydes de carbone, de soufre, et d'azote, l'hydrogène sulfuré, les vapeurs chlorées, bromées et iodées, l'ammoniac, ...

❖ **Les liquides inorganiques ou organiques** : qui indépendamment de leurs éventuels effets purement physiques, agissent surtout par leur caractère acide ou basique et par les ions agressifs qu'ils peuvent contenir.

❖ **Les solides** : ce sont essentiellement des sols et des déchets d'origines diverses.

Le mode d'action des agents agressifs dépend du milieu dont le béton est placé, ils agissent comme suit :

❖ **Mode d'action des gaz**

Le transfert des gaz dans le béton se fait généralement par diffusion, et dépend très fortement de l'humidité relative du matériau. Les transferts par diffusion peuvent intervenir sous deux formes : en phase liquide et en phase gazeuse.

❖ **Mode d'action des liquides**

Le transfert de liquide se fait, soit par mouvement du liquide sous gradient de pression hydraulique ou par capillarité d'une part, soit par diffusion d'autre part. L'écoulement ou le mouvement du liquide se produit lorsque le béton est soumis à un gradient de pression hydraulique (barrage). L'écoulement en phase liquide est engendré par les tensions capillaires, ou encore lorsque le béton est sec, il subit une ascension capillaire d'eau d'origine extérieure.

❖ **Mode d'action des solides**

La nocivité des substances solides est directement liée à leur capacité d'extraction et de passage en solution dans les eaux avec lesquelles ils entrent en contact. Leurs actions se réduisent alors à des phénomènes voisins de ceux observés dans le cas des agressions par les liquides.

I.4.5- Problèmes spécifiques de la durabilité

I.4.5.1-L'attaque sulfatique

L'attaque sulfatique peut détériorer très significativement les différents types de bétons dans un laps de temps relativement court (10 à 15 ans), selon deux mécanismes physico-chimiques, à savoir la perte des propriétés liantes des CSH et l'expansion. [GCI, 2008]

Les ions sulfates sont soit d'origine interne au béton ou externe (environnant) ; généralement les ions sulfates d'origine interne proviennent des constituants du béton (ciment, granulats, eau de gâchage ...), la dégradation des bétons suite à ce type d'attaque, traduite par le phénomène d'expansion, qui est en relation avec la cristallisation d'ettringite secondaire.

[Scrivener et al, 1999]; [Taylor et al, 2001]; [Pavoine, 2003]; [Brunetaud, 2005]; [Leklou, 2008] ont étudié la dégradation des matériaux cimentaires par l'attaque des sulfates interne, ils ont montrés que la formation de l'ettringite secondaire de caractère expansive provoque un gonflement, ce type d'ettringite est à distinguer de l'ettringite primaire, qui est obtenu au premier stade de l'hydratation des ciments portland, par réaction du gypse pendant les

premières minutes suivant le contact eau - ciment, et qui est non nocive, et indispensable pour réguler la prise du ciment.

Les attaques sulfatiques externes recouvrent l'ensemble de phénomènes de dégradation des matériaux cimentaires dans lesquels l'agent agressif est l'ion sulfate (SO_4^{2-}) qui provient du milieu environnant par exemple : eau de mer, sol riche en gypse, eaux souterraines... [Rozière et al, 2007].

Ces attaques sont associées à une précipitation de produits sulfatés secondaires, une expansion importante et d'une détérioration physico-chimique et mécanique (modifications des propriétés de transport de la porosité, fissures, perte de résistance et de cohésion,...). [Kelifa, 2009]

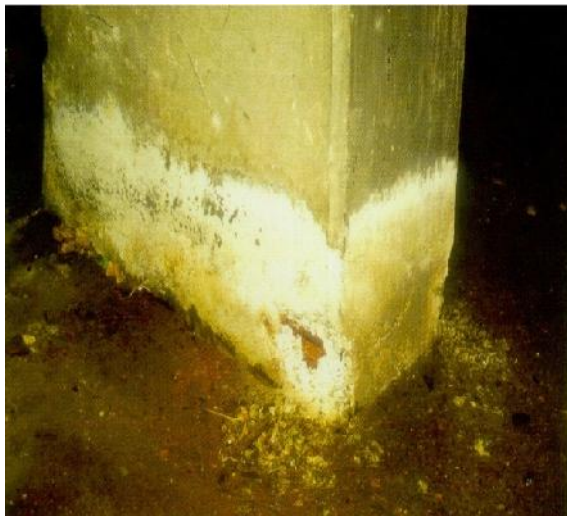


Figure I.19- Attaque sulfatique externe
[LCPC]



Figure I.20- Attaque sulfatique interne
[LCPC]

A/ Processus d'attaque par les sulfates externes

Dans la littérature plusieurs travaux ont été réalisés pour mieux définir les différentes étapes et processus de la dégradation des matériaux cimentaires par l'attaque sulfates externes [Le Bescop et al, 1993] ; [Le roux et Orsett, 2000] ; [Santhanam et al, 2003] ; [Boualleg, 2004]. On peut résumer le processus d'attaque sulfatique externe par les étapes suivantes :

1^{er} étape : Mise en contact de la surface du matériau avec la solution agressive, solution avec un $\text{pH} < 11,5$.

2^{ème} étape : Pénétration des anions SO_4^{2-} par diffusion limitée à une zone superficielle .

3^{ème} étape : Pénétration du cation associé et réaction de substitution: cation (Mg^{+2} , Na^{+2} ...) et formation de gypse en solution ou cristallisé suivant les concentrations en ions sulfates (SO_4^{2-}) et en portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

4^{ème} étape : Réaction ponctuelle des ions sulfates avec les aluminates anhydres (C_3A) ou hydratés (C_4AH_x et $\text{C}_3\text{ACASO}_4\text{H}_{12}$)

5^{ème} étape : Fissuration par effet de coin due aux pressions de cristallisation de l'ettringite, comme il est illustré sur la figure I.21.

6^{ème} étape : Accentuation de la pénétration des sulfates à la faveur des fissures.

7^{ème} étape : Progression de l'attaque suivant un front de dégradation, dont l'épaisseur a tendance à s'élargir au cours du temps.

8^{ème} étape : Destruction plus au moins complète du béton, comme il est illustré sur la figure I.22

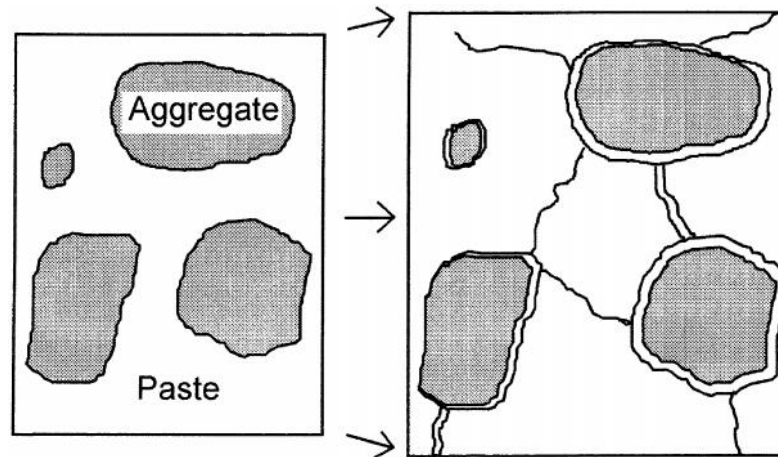


Figure I.21- Diagramme schématique illustrant le mécanisme proposé de l'expansion d'un mortier ou béton à travers DEF (formation d'ettringite différée) [Taylor et al, 2011]

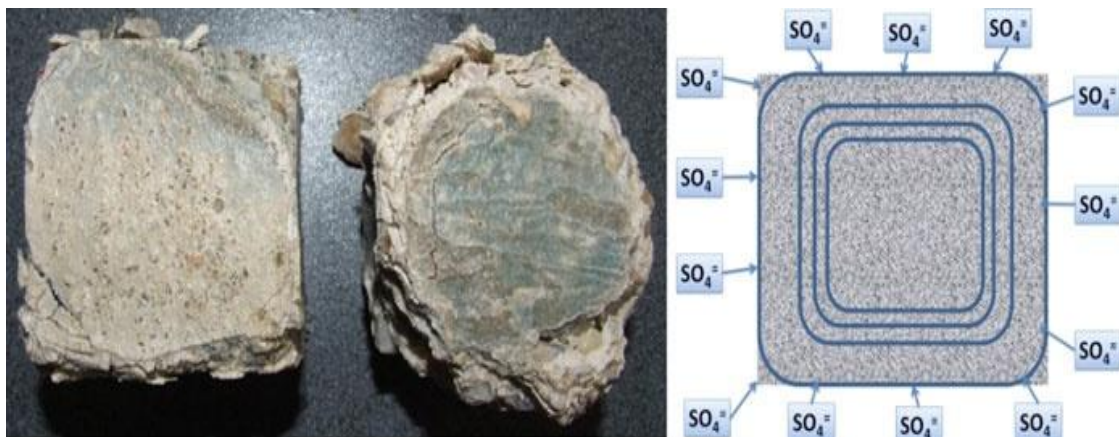
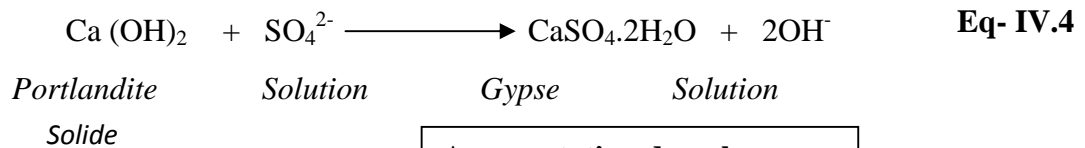
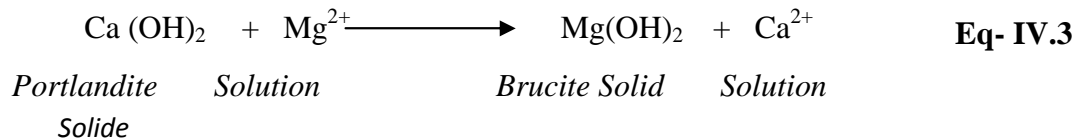


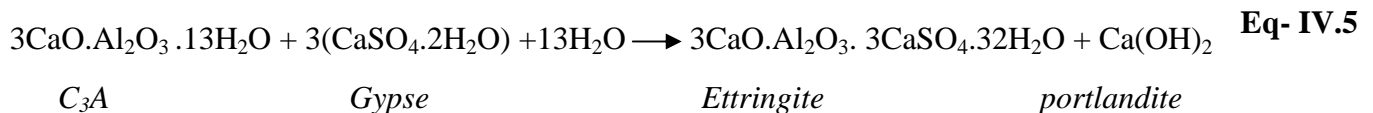
Figure I.22- Schéma représente la dégradation par l'attaque sulfatique de la surface à l'intérieur [Alexandre et al, 2013]

B/ Action du sulfate de magnésium

Le sulfate de magnésium est particulièrement à la fois l'anion SO_4^{2-} et cation Ca^{2+} réagissent avec l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$. L'hydroxyde de magnésium comme brucite cristallise tandis que des ions sulfate réagissent avec la portlandite pour former du gypse secondaire, qui peut réagir avec les aluminates de calcium pour former de l'ettringite. Les réactions mises en jeu sont les suivantes [Alexandre et al, 2013]



Augmentation du volume



Expansion

Lorsque toute la portlandite est consommée pour former du gypse et de la brucite, la phase C-S-H est dégradée par la formation de brucite et de gypse selon la réaction : [Dauzères, 2010]



Les échanges de Mg^{2+} avec Ca^{2+} conduisent à la formation de la brucite $\text{Mg}(\text{OH})_2$ qui peut ralentir temporairement la pénétration des sulfates. Ils provoquent aussi la transformation progressive des CSH en un silicate de magnésium hydraté MSH sans propriétés liantes. De plus la cristallisation de l'ettringite instable en présence de sulfate de magnésium intensifie la réaction de formation du gypse secondaire [Santhanam et al, 2003]

L'attaque chimique des matériaux cimentaires s'effectue principalement sur la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ contenue dans la pâte de ciment, mais l'attaque des silicates et d'aluminates de chaux hydratées CSH et CAH n'est pas négligeable [Boualleg et al, 2011] .où il y a formation de couches de gypse et d'ettringite secondaire ainsi que la thaumasite à partir de la surface exposée aux sulfates. [Rozière et al, 2009],

Plusieurs recherches ont été réalisées pour éclaircir le phénomène de dégradation des matériaux cimentaires dans les milieux sulfatiques. Certaines recherches [Long et al, 2007]; [Lee, 2007]; [Xiaojian et al, 2008]; [Irassar, 2009]; [Rozière et al, 2009], [Benosman et al, 2009]; [Patsikas et al, 2012], montrent que le type et la concentration des solutions la solution de MgSO_4 est plus agressive que la solution de Na_2SO_4 , aussi l'augmentation de la température accélère l'attaque de ces sulfates. [Demene et al, 2005] ont montré que la

conservation dans la solution de $MgSO_4$ influe d'une façon considérable sur la durabilité des mortiers et diminue les résistances mécaniques après 2 mois.

D'autres recherches [Bensted et Munn, 2004] ; [Boualleg et al 2009] ; [Chihaoui et al, 2009] ; [Bonakdar et Mobasher, 2010] ; [El-Hachem et al, 2012] ; [Barcoelo et al, 2014] ; [Hossack et Thomas, 2015] montrent que le type de ciment et les additions minérales influencent la dégradation des matériaux cimentaires, les performances de durabilité des mortiers à base des additions minérales réactives tels que la pouzzolane et le laitier granulé exposés à une solution sulfatique étaient meilleures que celles des mortiers à base de ciment sans pouzzolane ou laitier.

D'après [Boufenara et al, 2005] ; [Achoura et al, 2009] ; [Chaïd et al 2012] ; [Bur, 2012] le ciment au laitier et l'addition de laitier permettent d'obtenir des matériaux durables. Le laitier granulé est une addition minérale qui possède plusieurs qualités intéressantes, composition chimique proche de celle du ciment, régularité de composition pour une même source de production, réactivité latente activée en présence de ciment portland [Bousslama et Jelidi, 2003] ; [Van Rompaey, 2006] ; [Nacéri et Messaoudene, 2006]. Le laitier granulé est très couramment utilisé dans l'industrie cimentière.

La vitesse de réaction des additions minérales est plus faible que celle d'hydratation du ciment Portland ordinaire, non seulement car la réaction pouzzolanique ne débute que quand une quantité de chaux importante est formée, mais aussi, car les laitiers sont peu réactifs et nécessitent une activation extérieure. Cet activant peut être de nature sulfatique, sulfocalcique ou encore alcaline. Il permet de maintenir un pH favorisant la réactivité (au-dessus de 12,6) par hydrolyse de l'hydroxyde de calcium qui le compose. [Perlot, 2005]

L'utilisation des ciments composés ou l'addition du laitier granulé est essentielle pour l'amélioration de la durabilité des structures en béton et présente des avantages techniques, économiques et environnementaux. [Zeghichi et al 2007]

Le laitier de haut fourneau améliore la résistance des bétons aux sulfates par dilution des aluminates, par réduction de la teneur en portlandite et par l'accroissement de la compacité des hydrates en relation avec la diminution du volume poreux [Boutiba et al, 2013].

I.4.5.2- Perméabilité au gaz

La perméabilité est un indicateur très important qui peut caractériser la durabilité des bétons, elle est définie comme la capacité d'un milieu poreux à être traversé par des fluides sous gradient d'énergie potentielle. La perméabilité d'un béton dépend fortement de ses constituants comme le rapport Eau/Ciment, la nature des granulats, du sable et des additifs, ces derniers qui jouent un rôle très important sur la porosité du béton.

La perméabilité du béton est fortement influencée par des paramètres du milieu poreux comme la porosité et la connectivité des pores, plus la porosité est élevée et les pores sont connectés, plus la résistance au flux est faible. [Tran, 2009]

La dimension des pores aussi influe sur la perméabilité du béton et elle est directement liée au rapport E/C. Lorsque ce rapport (E/C) augmente, la porosité devient plus grande et la

structure poreuse plus grossière, ce qui facilite le transfert de matières de l'extérieur vers l'intérieur du béton, alors la perméabilité du matériau augmente [Perraton, 1999].

Plusieurs recherches ont été réalisées pour étudier l'effet de la fissuration du béton sur la perméabilité, quelque soit les causes et les origines de cette fissuration, d'origine mécanique [Djebri, 2007], [Affes, 2012] ou de la température élevée [Choinska, 2006], leur présence dans le béton entraîne une augmentation de la perméabilité.

Les bétons de sable sont plus poreux que les bétons classiques, donc les bétons de sable ont l'avantage des vides qui se distinguent de ceux du béton traditionnel, par la taille et le nombre : ils sont plus nombreux, plus petits, et davantage monodimensionnels. Leur nombre plus élevé entraîne une probabilité de colmatage plus fréquente et plus aisée compte tenu de leur faible taille. [Sablocrete, 1994]

La perméabilité à l'eau est de même ordre de grandeur que celle du béton traditionnel. Quant à la perméabilité à l'air elle conduit à des résultats globalement inférieurs ou comparables à ces mêmes bétons classiques.

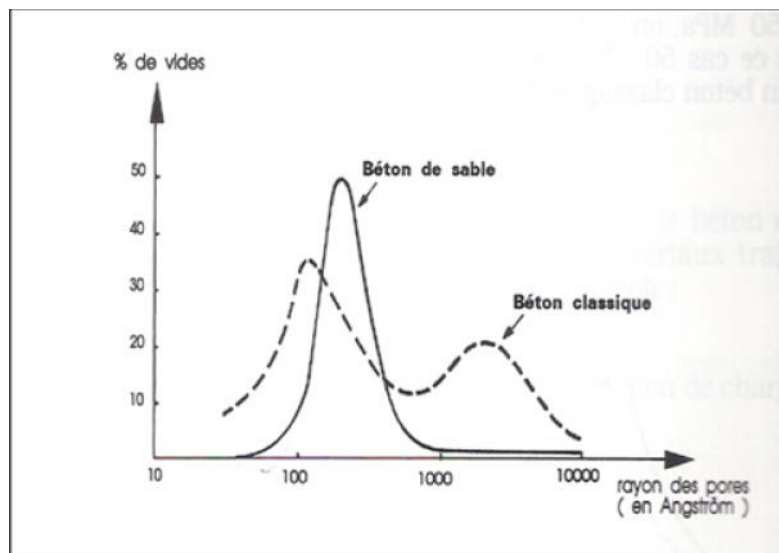


Figure I.23- Distribution de la porosité en fonction du rayon des pores [Sablocrete, 1994]

I.4.5.3- Diffusion des ions chlorure

Les chlorures peuvent être introduits dans le béton par les adjuvants ou les agrégats souillés ou par l'eau de gâchage. Ils peuvent aussi, se diffuser dans le béton durci à partir de sources extérieures d'exposition, tels que l'eau salée, les embruns marins ou les sels de déneigement. Lorsque les ions chlorures sont introduits dans le béton, une partie substantielle de ces ions est combinée dans les produits d'hydratation de ciment, ces chlorures ne demeurent pas dans la solution interstitielle. [Bentur et al, 1997]

Les ions chlorures pénètrent par diffusion dans le béton sous l'effet d'un gradient de concentration. Le coefficient de diffusion des ions chlorures est une grandeur essentielle de la durabilité des bétons exposés aux chlorures.

Les matériaux pouzzolaniques permettent de batailler la dégradation contre les attaques chimiques par une amélioration de la microstructure des matériaux cimentaires, des nombreux travaux [Thomas et al, 1999] ; [Ashraf et al, 2009]; [Mouli et al, 2010] montrent l'effet bénéfique des additions pouzzolanique et leurs effet sur la réduction de la taille des pores, la perméabilité du matériau et la réduction de la portlandite Ca(OH)_2 et par conséquent la diminution du coefficient de diffusion.

L'effet de la substitution partielle du ciment Portland par le laitier de haut fourneau sur la résistance du béton aux diffusions des ions chlorures a été examiné par [Maes et al, 2013] ; ils ont montré que les coefficients de diffusion sont réduits avec l'augmentation du taux de la substitution en laitier.

Le comportement à la pénétration des ions chlore, que se soit en milieu marin ou par le biais d'essais accélérés d'immersion –séchage est comparable à celui des bétons traditionnels. Des expériences à long terme montrent qu'après cinq ans d'exposition en milieu marin, les teneurs en ions de chlore du béton de sable, sont moins importantes que celles du béton traditionnel exposé au même environnement comme montre la figure suivante : [Sablocrete, 1994]

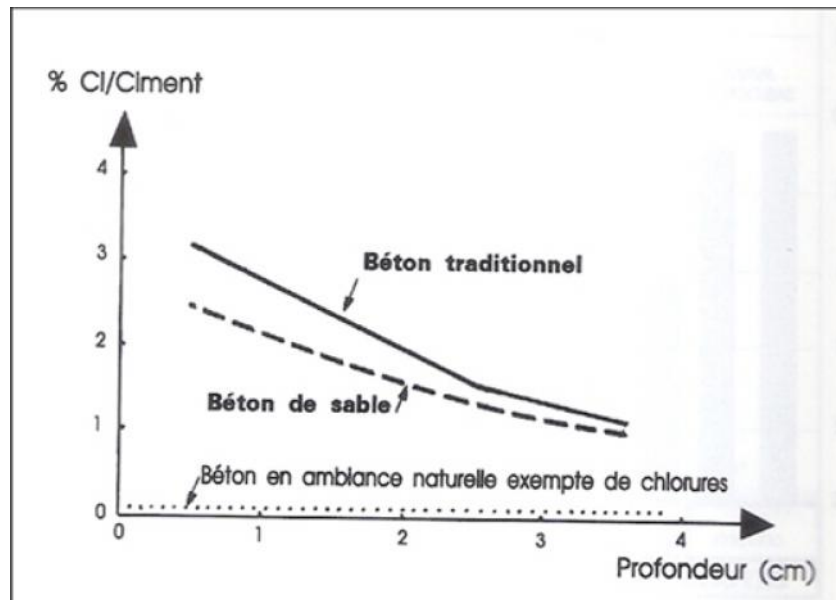


Figure I.24- Pénétration des ions de chlore après cinq ans d'exposition en milieu marin [Sablocrete, 1994]

I.4.5.4- Absorption par capillarité

L'absorption d'eau est un paramètre très utile pour caractériser la durabilité du béton vis-à-vis des agents agressifs. [Rabehi, 2014]

Dans un béton non saturé, un des principaux mouvements d'eau se fait par l'attraction des molécules d'eau par la tension superficielle des pores capillaires. En effet, la tension superficielle des pores capillaires entraîne un phénomène de succion de l'eau extérieure vers l'intérieur des pores et par le fait même entraîne les ions contenus dans l'eau. Ce phénomène se poursuivra jusqu'à la saturation du matériau. [Beau séjour, 2015]

[Bessa-Badreddine, 2004] a montré que l'incorporation des additions minérales en substitution du ciment à une teneur inférieure à 30% conserve la structure poreuse de la matrice cimentaire et permet de maintenir sa complexité vis-à-vis de la tortuosité et de la constructivité indépendamment de la nature de l'addition.

L'absorption dépend essentiellement du taux et de la continuité des petits pores: un matériau qui présente un taux élevé de petits pores continus aura une absorption capillaire très élevée, et par conséquent une durabilité plus faible. Par contre, s'il présente un taux élevé de petits pores discontinus, l'absorption capillaire sera moins élevée et la durabilité augmente, c'est le cas d'un béton de sable bien compacté. [Belferrag, 2006]

L'absorption d'eau est un phénomène physique représentatif du comportement hydrique du béton durci, c'est une propriété de transfert du matériau poreux qui caractérise son aptitude à absorber et à transporter un liquide mouillant par capillarité. Sa mesure est un outil de caractérisation macroscopique de son réseau poreux [Wirquin et al, 2000]

L'essai d'absorption d'eau par capillarité est un essai qui nous donne une information sur la capacité d'absorption d'eau dans un béton par remontée capillaire. La méthode la plus utilisée c'est suivant la recommandation de l'AFPC-AFREM [AFPC-AFREM, 1997], un petit changement peut être monté au niveau d'appareillage [sabir et al, 1998] ont présenté un appareillage assisté par ordinateur pour déterminer l'absorption d'eau par capillarité des mortiers et des bétons, et consulté les résultats au moyen d'un logiciel.

I.6- Conclusion

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique sur les bétons de sable, les caractéristiques des fibres, les améliorations apportées par l'incorporation des fibres dans le béton et la durabilité des bétons dans les différents milieux agressifs.

Les bétons de sable sont des bétons fins caractérisés par l'absence des gros granulats, ils sont créés pour le remplacement des bétons classiques (de gros granulats) dans certains éléments de structures de bâtiment.

La première partie de cette recherche a été basée sur l'identification des bétons de sable, leurs applications, les principaux avantages, inconvénients de ce béton et les principaux travaux qui ont été effectués pour réduire au maximum ces inconvénients et améliorer les propriétés des bétons de sable.

La deuxième partie a été consacrée à la présentation des différents types de fibres utilisées pour renforcer les matériaux cimentaires, et on a basé surtout sur les fibres de polypropylène et les bétons avec fibres de polypropylène.

La troisième et la dernière partie a été exprimée par les travaux de recherches réalisés pour évaluer la durabilité des matériaux cimentaires dans les différents milieux agressifs. Les principaux points tirés de ce chapitre sont :

- Les propriétés principales des bétons de sable (l'ouvrabilité, la maniabilité et la résistance mécanique) en plus de la qualité et du dosage en ciment et du rapport (eau/ciment) sont influencées par d'autres paramètres à savoir :
 - ✓ Le type, la granulométrie et la dimension maximale du sable utilisé
 - ✓ La nature et la finesse de l'addition ou de fines d'ajouts.
- Plusieurs recherches ont été réalisées afin de minimiser les inconvénients des bétons de sable par :
 - ✓ La correction granulaire
 - ✓ L'ajout des additions minérales réactives pour améliorer la résistance et la durabilité des bétons de sable
 - ✓ L'ajout des fibres pour améliorer la ductilité
 - ✓ L'addition des superplastifiants pour améliorer la rhéologie des bétons frais et réduire le dosage en eau.
- L'incorporation des fibres de polypropylène dans le béton de sable ne soulève aucune difficulté, la répartition de ces fibres se fait facilement et ne nécessite pas de précaution particulière lors du malaxage. A l'état durci, ils améliorent considérablement la ductilité, la résistance à la traction, la résistance au choc et la stabilité thermique des bétons.
- L'utilisation des fines d'ajouts réactifs tels que le laitier granulé dans les bétons de sable ou dans les mortiers en addition ou en substitution partielle au ciment, donne une amélioration du comportement mécanique et de la durabilité de ces matériaux.



MATERIAUX ET FORMULATION

CHAPITRE II

CHAPITRE II

Matériaux et formulation

SOMMAIRE

II.1- Introduction	60
II.2- Matériaux utilisés	60
II. 2.1- Sables	60
II.2.2- Ciment et additions minérales	63
II. 2.3- Fibres	66
II. 2.4- Adjuvants	66
II.2.5- Solution sulfatique	66
II.2.6- Eau de gâchage	67
II.3- Méthode de formulation des bétons de sable	67
II.3.1- Approche théorique de formulation de SABLOCRETE	67
II.3.2- Méthode de Cissé	68
II.3.3- Composition des bétons de sable	70
II.4- Formulation des mortiers à base de laitier de haut fourneau	73
II.5 - Confection des éprouvettes	74
II.6- Caractérisation des bétons et des mortiers à l'état frais	75
II.6.1- Masse volumique	75
II.6.2- Maniabilité	76
II.7- Résultats et interprétation	77
II.8- Conclusion	83

II.1-Introduction

Ce chapitre présente les différents types de matériaux utilisés dans notre étude, ainsi que le protocole de caractérisation physique, chimique, minéralogique et mécanique pour la préparation des mortiers et des bétons de sable avec fibres de polypropylène.

Nous avons présenté par la suite les différentes méthodes des formulations de béton de sable et les résultats de l'influence de la nature des sables, la nature des additions minérales et le taux de fibres de polypropylène sur les caractéristiques des bétons et des mortiers à l'état frais.

II.2- Matériaux utilisés

II. 2.1- Sables

Quatre types de sable de nature minéralogique différente sont utilisés dans cette étude dont deux sables naturels (sable siliceux, sable de calcaire concassé) et deux sables artificiels (sable de laitier granulé et sable de laitier cristallisé) issus des sous-produits de l'industrie sidérurgique d'El-Hadjar (Annaba, ont été caractérisés par les essais physiques suivants :

- Une analyse granulométrique.
- Détermination de la masse volumique apparente.
- Détermination de la masse volumique absolue.
- Détermination de l'équivalent du sable.

II.2.1.1- Sable siliceux

Le sable utilisé dans notre étude est un sable siliceux fin de la région de Annaba avec un module de finesse égal à 2,15.

II.2.1.2- Sable de carrière

Le sable de carrière est obtenu par réduction de gravillon ou plus simplement le déchet d'abatage et de concassage des roches pour l'obtention du gravier. Dans cette étude on a utilisé un sable de calcaire concassé inerte de fraction 0/5mm.

II.2.1.3- Sable de laitier granulé

Le laitier granulé est un sous produit de l'industrie sidérurgique **d'El-Hadjar (Annaba)**, il est utilisé dans notre étude comme sable avec granulométrie comprise entre 0 et 5 mm.

II.2.1.4- Sable de laitier cristallisé

Le sable de laitier cristallisé est obtenu par la réduction de gros granulats de laitier cristallisé en granulats fins de 0 à 5mm. Le laitier cristallisé est un sous produit sidérurgique de l'usine **d'El-Hadjar (Annaba)**.

Les caractéristiques physiques des sables utilisés sont regroupés dans le tableau II.1 et la composition granulométrique est illustré par la figure II. 1.

Tableau II-1 : Caractéristiques physiques des sables utilisés

Caractéristiques	Unité	Sable siliceux	Sable de carrière 1	Sable de carrière 2	Sable de laitier granulé	Sable de laitier cristallisé
Module de finesse	-	2.15	2.91	3.90	2.93	2.45
Masse volumique apparente	g/cm ³	1.42	1.39	1.45	0.81	1.76
Masse volumique absolue	g/cm ³	2.65	2.62	2.62	2.80	2.70
Porosité inter granulaire	%	46.57	46.94	35.13	59.5	34.70
Equivalent de sable	%	92.26	79.54	84.87	87.00	89.28

Nous pouvons constater d'après les résultats du tableau II-1 que le sable siliceux avec module de finesse de 2,15 présente le sable le plus fin par contre le sable de carrière et de laitier granulé possèdent des granulométries plus grandes avec des modules de finesse qui dépasse 2,7.

À partir des masses volumiques apparente et absolue on a déduit la porosité inter granulaire qui est définie par la formule suivant $P = \left(1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}}\right) \times 100 \%$. Le sable de laitier est plus poreux par rapport aux autres types de sable, ceci est confirmé par les observations au microscope électronique à balayage MEB. Les valeurs moyennes de l'équivalent de sable montrent que les sables utilisés sont propres.

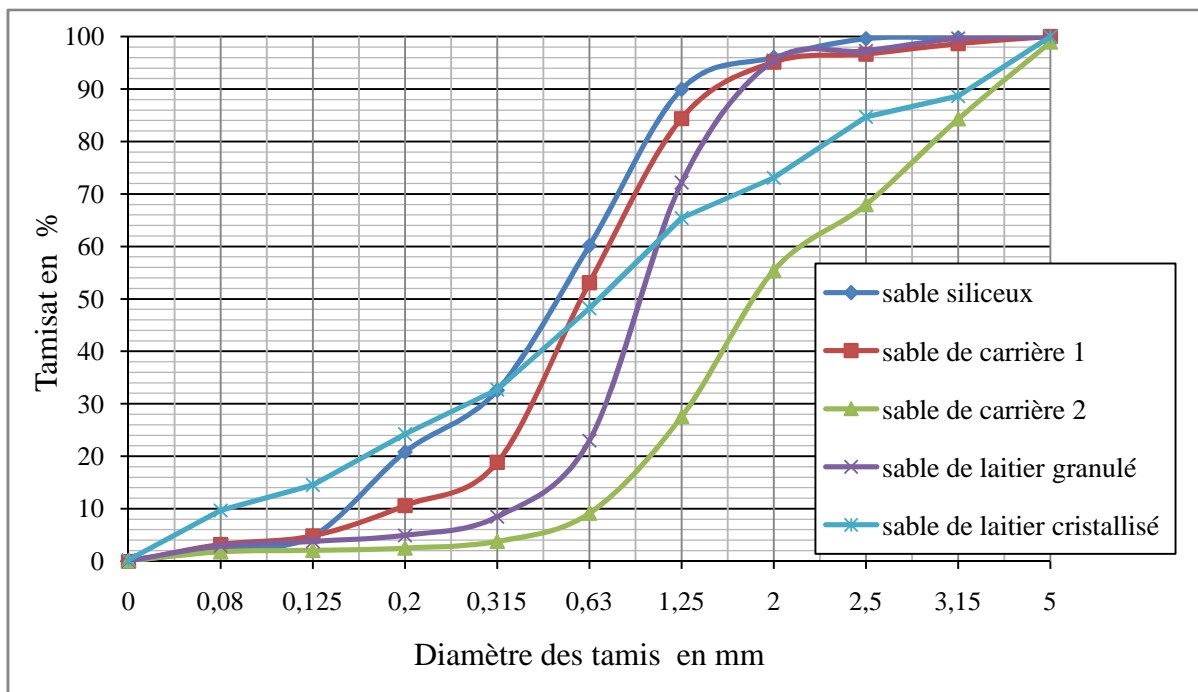


Figure II-1 : Analyse granulométrique des sables d'étude

L'observation au MEB des grains de sable de différentes natures illustrée au niveau des figures II- (2, 3, 4 et 5) a permis d'observer la morphologie des grains (forme, taille et état de surface). L'objectif de cette analyse est de mieux comprendre certains phénomènes physiques ou mécaniques dans le béton à l'état frais et durci.

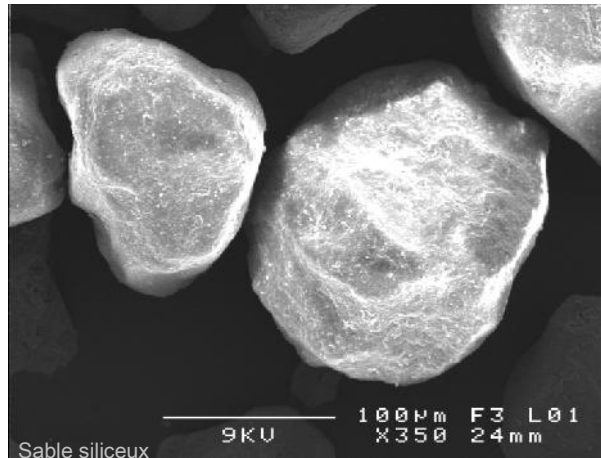


Figure II-2 : Morphologie et état de surface de sable siliceux

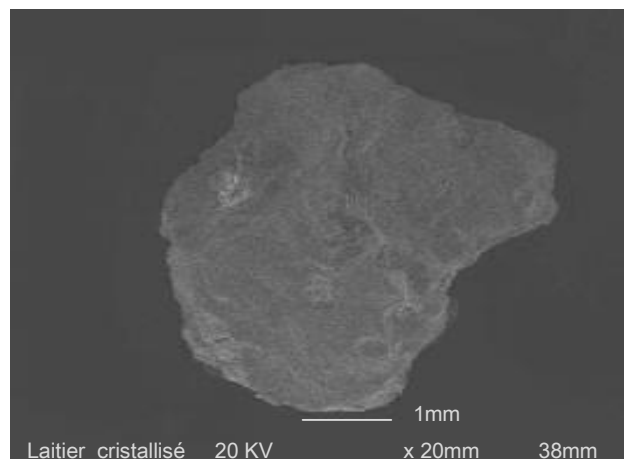


Figure II-3: Morphologie et état de surface de sable de laitier cristallisé

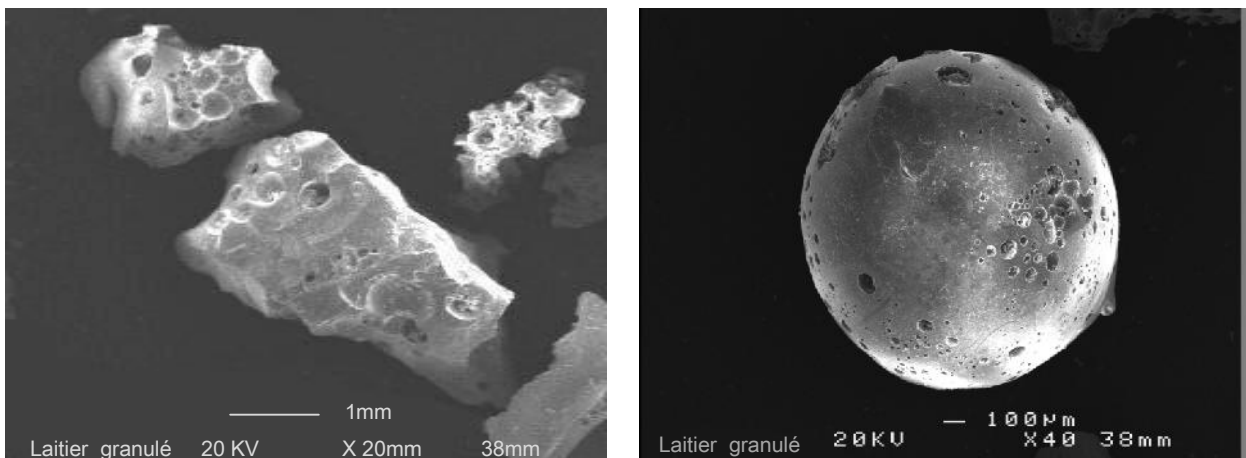


Figure II-4: Morphologie et état de surface de sable de laitier granulé

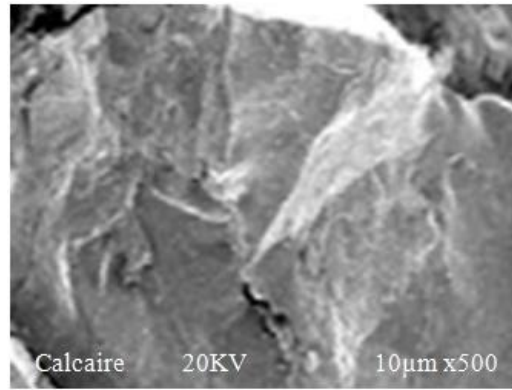


Figure II-5: Morphologie et état de surface de sable de carrière

L'analyse de la microstructure des sables a permis d'observer la morphologie des grains des sables d'étude (forme, taille et état de surface), il est nettement visible que les grains de sable siliceux sont de forme légèrement sphérique et un l'état de surface un peu lisse. Le sable de carrière et de laitier cristallisé présentent un état de surface d'une façon générale rigoureux. L'observation au MEB des grains de sable de laitier granulé montre qu'ils sont de structure très poreuse par rapport aux autres types de sable.

II.2.2- Ciment et additions minérales

Deux types de ciment sont utilisés : un CPJ-CEMII/A 42,5 d'origine Algérienne fabriqué par la cimenterie de HADJR ESSOUD avec ajout de laitier granulé et un CPA-CEM I 42,5 obtenu par broyage de 95 % de clinker et 5 % du gypse. Le clinker est fourni par la cimenterie de Hadjar Soud. Les additions minérales utilisées sont des fillers de calcaire, de laitier granulé et de laitier cristallisé obtenus par broyage au laboratoire de la roche de calcaire et des sous-produits de l'industrie sidérurgique du haut fourneau d'El-Hadjar. La composition chimique et les caractéristiques physiques sont représentées aux tableaux II-2, II-3 et II-4. On peut considérer que les laitiers du haut fourneau et les ciments sont composés essentiellement d'un mélange de quatre oxydes : silice SiO_2 , chaux CaO , alumine Al_2O_3 et magnésie MgO , pour 94% à 97% de leur composition, le complément étant constitué par des oxydes secondaires (FeO , MnO) et des composés sulfurés.

Tableau II-2: Composition chimique des ciments et des additions minérales

	Fe	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	PF
Ciment CPJ 42, 5	3.65	58.59	24.92	1.21	6.58	-	1.70
Ciment CPA 42,5	3.76	64.16	22.29	0.70	5.18	-	1,36
Clinker	3.75	67.75	21.91	0.91	4.86	-	0.47
Fillers laitier cristallisé	0.60	41.71	41.00	4.80	8.16	1.93	-
Fillers laitier granulé	1.49	40.82	40.34	5.53	7.70	1.58	-
Fillers calcaire	0.67	54.20	0.84	0.21	0.17	néant	42.66

Tableau II.3:Caractéristiques physiques des ciments

Caractéristiques	Unités	Valeurs	
		CPJ	CPA
Masse volumique apparente	g /cm ³	1.06	1.04
Masse volumique absolue	g /cm ³	3.10	3.00
Consistance normale	%	29	29
Début de prise	H /min	2/34	2/27
Surface spécifique de Blaine SSB	Cm ² /g	3480	3073

Tableau II-4:Caractéristiques physiques des additions minérales

Caractéristiques	Unité	Laitier granulé	Laitier cristallisé	Calcaire
La masse volumique apparente	g/cm ³	1.03	0.95	0.89
La masse volumique absolue	g/cm ³	2.80	2.70	2.62
Surface spécifique de Blaine SSB	cm ³ /g	3650	3500	4760

Les figures II-6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 et 14 présentent les observations au MEB et les spectres DRX des deux types de laitier utilisés (granulé, cristallisé) et de fillers calcaire.

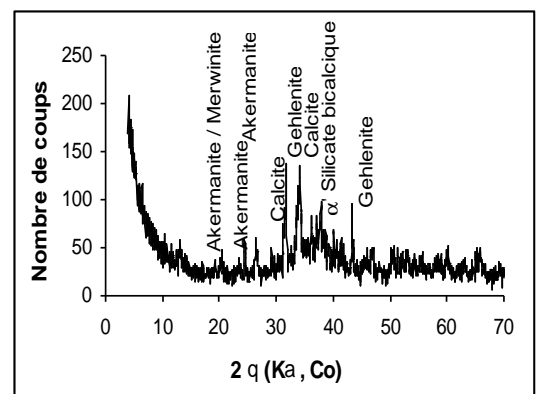
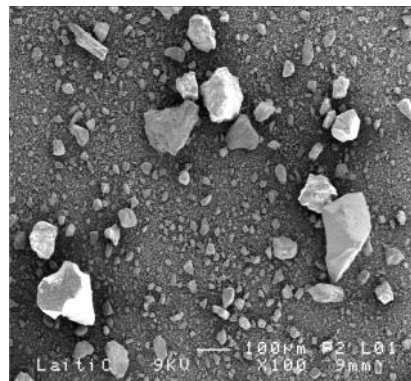


Figure II-6 : Fillers de laitier cristallisé

Figure II-7:Grains de fillers de laitier cristallisé MEB

Figure II-8 : Spectres DRX de laitier cristallisé [Ali-Boucetta, 2014]

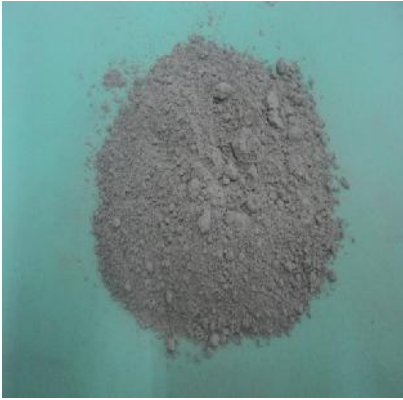


Figure II-9: Fillers de laitier granulé

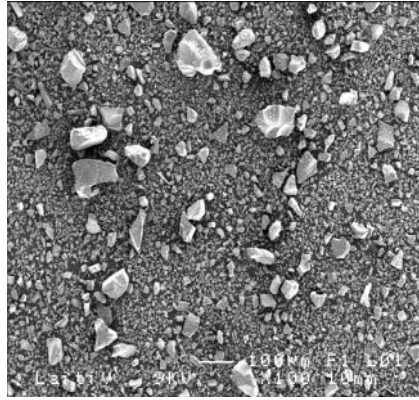


Figure II-10: Grains de fillers de laitier granulé MEB

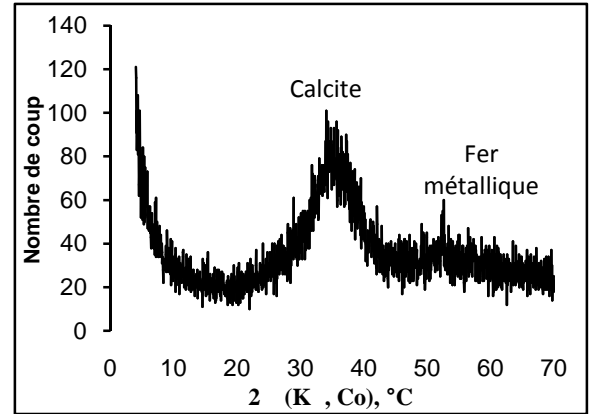


Figure II-11: Spectres DRX de laitier granulé [Ali-Boucetta, 2014]



Figure II-12: Fillers calcaire



Figure II-13: Grains de fillers calcaire MEB

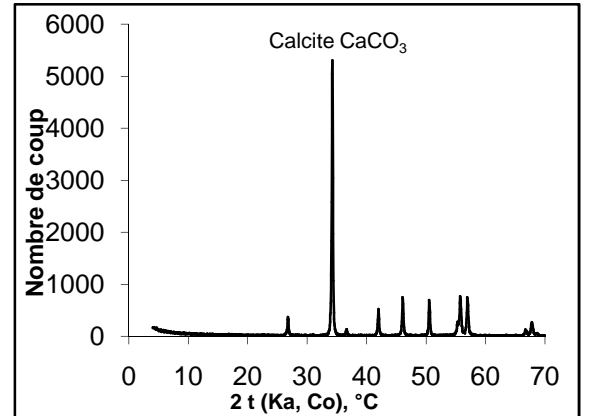


Figure II-14: Spectres DRX de calcaire [Ali-Boucetta, 2014]

L'observation visuelle des additions minérales montre que ce sont des poudres fines avec des couleurs différentes, cette observation est associée par des observations au microscope électronique à balayage MEB et une analyse de DRX.

L'observation au microscope électronique à balayage MEB des additions a permis de bien voir la morphologie des grains (forme, taille), les figures 7, 10 et 13 montrent que les trois types d'additions ont la même forme presque. La granulométrie et la taille des grains se diffèrent d'une addition à un autre selon leurs finesses.

Les phases obtenues dans les spectres DRX des additions montrent que le laitier granulé présente une structure vitreuse avec la présence de quelques traces de calcite et de fer métallique. Par contre, le laitier cristallisé est composé essentiellement des phases cristallines de type akermatite/ merwinite, calcite, gelhénite et silicate basique. Concernant les fillers calcaire, ce type d'addition est composé essentiellement de calcite.

II. 2. 3-Fibres

Les fibres utilisées sont des fibres de polypropylène commercialisées par la société algérienne « **GRANITEX** », leurs propriétés physiques et chimiques sont données par le fabricant :

- ✓ Longueur de la fibre12mm.
- ✓ Densité 0.9g/cm³.
- ✓ Point de fusion 150°.
- ✓ Module de Young 3KN/mm².
- ✓ Allongement à la rupture50%.
- ✓ Section de la fibre30 microns.



Figure II-15:Fibres de polypropylène

II.2.4- Adjuvant

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant hautement réducteur d'eau commercialisé par la société Algérienne Granitex sous l'appellation 'MEDAPLAST SP 40'. Ces propriétés données par fabricant sont :

- ✓ Forme.....Liquide
- ✓ Couleur.....Marron
- ✓ PH.....8,2
- ✓ Densité..... 1,20 ± 0,01
- ✓ Teneur en chlore.....< 1g/L

II.2.5- Solution sulfatique

La solution d'attaque sulfatique utilisée pour l'expérimentation est une solution de sulfate de magnésium (MgSO₄.7H₂O) de concentration 50g/l d'après la norme NF P18-837 [NF P18-837, 1993].

II.2.6- Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la préparation des différents mélanges est une eau potable de robinet conforme à la norme NF EN 1008 [NF EN 100, 2003].

II.3- Méthode de formulation des bétons de sable

La formulation ou l'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents composants (Ciment, granulats, eau, adjuvants,...), afin de réaliser un béton résistant et durable.

Il existe deux méthodes de formulation des bétons de sable, la première a été utilisée dans le projet de **SABLOCRETE** origine de l'amendement de la norme révisée P 18-500 « béton de sable » exposé dans l'ouvrage intitulé « bétons de sable : caractérisations et pratique d'utilisation » et la deuxième a été proposée par **Cisse (1996)**. [Zri, 2010]

II.3.1- Approche théorique de formulation de SABLOCRETE [Sablocrete, 1994]

II.3.1.1-Etapes de calcul

II.3.1.1.1-Estimation du dosage en fines d'un béton de sable

On considère que les constituants solides sont séparés en deux fractions :

Les fines regroupant l'ensemble de grains de taille inférieure à 80µm.

Le sable de dimension 80µm jusqu'à D (D : diamètre maximal du sable)

Les fines sont constituées du ciment, de fine d'addition et de la fraction du sable inférieure à 80µm.

Considérons que $p_s = 0.75 \left(\frac{0.08}{D}\right)^{1/5}$ (En % volumique). **Eq- II.1**

P_s = la porosité de l'étendue granulaire du sable.

D'après l'hypothèse de Caquot [fines] = [V], le dosage volumique optimal des fines s'écrit :

$[Fines] = 0.38 \left(\frac{0.08}{D}\right)^{1/5}$ (En % volumique). **Eq- II.2**

II.3.1.1.2- Porosité et dosage en eau dans le béton sable

$(E + V)_{min} = 0.8 \left(\frac{d}{D}\right)^{0.2}$ **Eq- II.3**

- 'd' calculé de la formule suivante : $d = \frac{60}{f * \rho}$

-f : surface spécifique en cm²/g

-ρ : densité en g/cm³.

$[vide] = K [eau]$ (l/m³) ; K compris entre 0.2 et 0.25 **Eq- II.4**

II.3.1.1.3- Estimation du dosage en sable

$$[\text{Sable}] = 1000 - [\text{fines}] - [\text{eau}] - [\text{eau}] - [\text{vides}] \text{ en (l/m}^3\text{)} \quad \text{Eq- II.5}$$

II.3.1.1.4- Estimation de la résistance en compression

$$R_b = \frac{(K_f * R_c)}{\left[1 + \frac{3.1(e+v)}{C(1+K_1+K_2)}\right]^2} \quad \text{Eq- II.6}$$

K_f : Coefficient granulaire (varie de 4.5 à 5)

R_c : Classe de résistance du ciment (Mpa).

$(e+v)$: volume d'eau + vide en litres

C : dosage en ciment.

R_b : résistance en compression de béton à 28 jours (MPa).

$$K_1: k_1 = k_{cv} \frac{cv}{c} + k_{fs} \frac{fs}{c}$$

$$0.2 < k_{cv} < 0.4 \quad 2 < k_{fs} < 3.3 \quad \text{et} \quad K_1 < 0.5$$

$$K_f = K_{fil} \frac{fil}{c} \quad 0 < k_{fil} < 0.5 \quad \text{et} \quad K_2 < 0.2$$

K_1 : Coefficient pouzzolanique.

K_2 : Coefficient d'activité du filler calcaire.

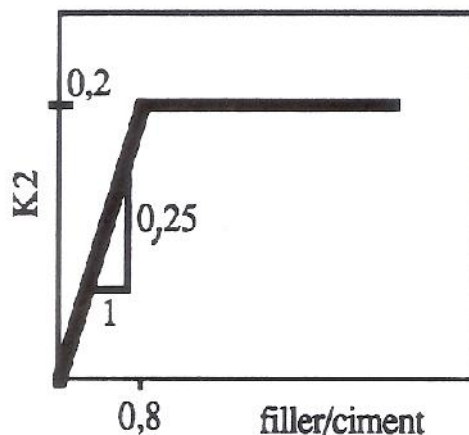


Figure II.16- Coefficient d'activité du filler calcaire [Sablocrete, 1994]

k_{cv} ; k_{fs} et k_{fil} : Coefficient d'équivalence en ciment des différentes additions en fines.

CV ; FS et FIL : Dosage en cendre volante, fumée de silice et de fillers (Kg/m^3).

II.3.2- Approche de Cissé [Zri, 2010]

Cette méthode se base sur la formule empirique du dosage minimum en fines en fonction du diamètre (D) du granulat employé. Contrairement aux méthodes classiques de formulation des bétons et celle de SABLOCRETE qui visent à chercher la porosité minimale, la méthode proposée par Cissé vise à chercher le mélange de composants tel que le dosage en ciment donné, la résistance soit maximale, elle se base sur la formule empirique suivante :

$$C' = C_{\min} = \frac{f_{cj} + 250}{\sqrt[5]{D}} \quad \text{Eq- II.7}$$

A l'instar du projet SABLOCRETE, le rapport massique des fines sur le squelette granulaire doit être compris entre 0,2 et 0,3 ; il est donné par la formule suivante :

$$r = \frac{C+F}{C+F+\sum_{i=1}^n S_i} \quad \text{Eq- II.8}$$

Avec

C' : quantité de ciment, de fine de sable (Kg/m^2)

C : quantité de ciment (Kg/m^2)

F : quantité de fillers ($<80\mu\text{m}$) dans le sable

D : diamètre maximum de l'ensemble des granulats (mm)

f_{cj} : résistance caractéristique

r : pourcentage de fines total (ciment compris)

S_{gi} : quantité de sable à l'exception des fillers (Kg/m^3)

Le dosage des sables est déterminé suite à la résolution du système suivant dont il faut fixer préalablement la quantité des fillers

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n S_{gi} = c' \frac{1-r}{r} \\ \sum_{i=1}^n f_j \cdot S_{gi} = \sum_{i=1}^n f_i \end{cases} \quad \text{Eq- II.9}$$

Avec :

F_i : quantité de fillers de sable

f_j : pourcentage de fillers dans le sable.

Les quantités de sable sont fixées par la relation suivante :

$$S_i = \frac{S_{gi}}{(1-f_i)} \quad \text{Eq- II.10}$$

Pour des faibles valeurs de f_i cette relation s'écrit :

$$S_i = S_{gi} (1 + f_i) \quad \text{Eq- II.11}$$

Le dosage en eau est calculé après avoir fixé de la valeur du rapport E/C en considérant la surface spécifique des granulats et les conditions d'exposition de l'ouvrage.

La valeur maximale théorique de ce rapport massique est égale à 0,7

Composition des bétons de sable

L'approche théorique de SABLOCRETE ajustée expérimentalement est utilisée pour la formulation des mélanges de bétons de sable de ce travail de recherche.

La composition de mélanges est récapitulée au tableau II.5, cette composition basée sur l'utilisation des additions minérales et d'un adjuvant superplastifiant avec la fixation de rapport E/C. Selon le plan de travail visé, on peut distinguer que cette composition divise en trois séries.

La première série, dans le but de l'étude de l'effet de la nature des sables sur les propriétés des bétons de sable, on a utilisé quatre types de sable (sable siliceux, de carrière, de laitier granulé, de laitier cristallisé et mélange de sable de carrière -sable siliceux) et le laitier granulé comme addition.

La deuxième série, le béton de sable avec un mélange de deux sables (sable de carrière -sable siliceux BS5) est choisi pour l'étude de l'influence du dosage en fibres de polypropylène sur le comportement physico-mécanique des bétons de sable. Quatre dosages en fibres sont choisis pour cette étude dont les formulations sont données au même tableau

La troisième série, le béton de sable avec un mélange de deux sables (sable siliceux et sable de carrière BS5) et avec le taux optimal en fibres de polypropylènes de 600 g/m^3 est choisi pour l'étude de l'influence de la nature des additions minérales sur le comportement et la durabilité des bétons de sable, trois types d'addition sont utilisés (fillers laitier granulé, de laitier cristallisé et de calcaire)

Tableau II.5 – Composition des bétons de sable d'étude

Dénomination des bétons de sable	Dosages en constituants (Kg/m ³)														
	Ciment CPJ	Ciment CPA	Eau	Sable siliceux	Sable carrière1	Sable carrière2	Sable LG	Sable LCr	Additions minérales			SP	fibres	E/C	E/(C+F)
									LG	LCr	FCal				
BS 1	398	-	218,5	1489,3	-	-	-	-	163	-	-	11,22	-	0,55	0,38
BS 2	398	-	218,5	-	1472,44	-	-	-	163	-	-	11,22	-	0,55	0,38
BS 3	398	-	218,5	-	-	-	1573,6	-	163	-	-	11,22	-	0,55	0,38
BS 4	398	-	218,5	-	-	-	-	1517,8	163	-	-	11,22	-	0,55	0,38
BS 5	398	-	218,5	744,65	-	736,22	-	-	163	-	-	11,22	-	0,55	0,38
BS F 1	398	-	218,5	744,36	-	735,39	-	-	163	-	-	11,22	0,2	0,55	0,38
BS F 2	398	-	218,5	743,78	-	735,35	-	-	163	-	-	11,22	0,6	0,55	0,38
BS F 3	398	-	218,5	743,17	-	734,75	-	-	163	-	-	11,22	1,0	0,55	0,38
BS F 4	398	-	218,5	742,87	-	734,46	-	-	163	-	-	11,22	1,4	0,55	0,38
BSFCal	-	370	214,8	749,95	-	741,46	-	-	-	-	293,6	13,27	0,6	0,58	0,32
BSFLG	-	370	211,0	746,7	-	741,0	-	-	200,56	-	-	11,42	0,6	0,57	0,37
BSFLCr	-	370	219,0	743,33	-	734,90	-	-	-	171,20	-	10,82	0,6	0,59	0,40

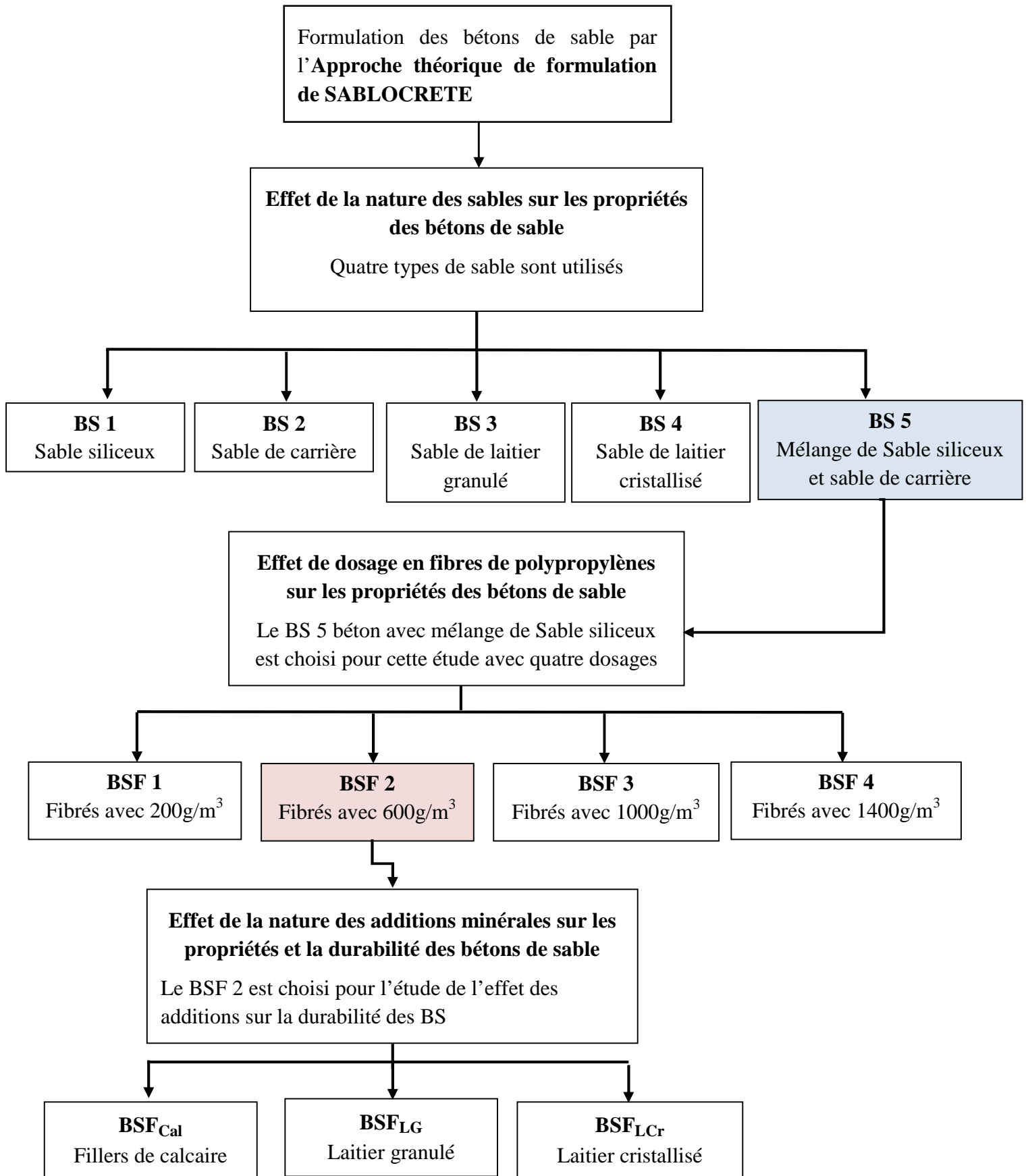


Figure II.17- Organigramme montre la formulation des bétons de sable d'étude

La 1^{ère} série :**BS 1** : béton de sable à base du sable siliceux**BS 2** : béton de sable à base du sable de carrière**BS 3** : béton de sable à base du sable de laitier granulé**BS 4** : béton de sable à base du sable de laitier cristallisé**BS 5** : béton de sable avec mélange du sable siliceux et sable de carrière**La 2^{ème} série :****BS T: BS 5** béton de sable avec mélange du sable siliceux et sable de carrière**BS F 1** : béton de sable fibrés avec 200g/m^3 **BS F 2** : béton de sable fibrés avec 600g/m^3 **BS F 3** : béton de sable fibrés avec 1000g/m^3 **BS F 4** : béton de sable fibrés avec 1400g/m^3 **La 3^{ème} série :****BSF_{Cal}** : béton de sable fibrés avec addition calcaire**BSF_{LG}**: béton de sable fibrés avec addition de laitier granulé**BSF_{LCr}**: béton de sable fibrés avec addition de laitier cristallisé**II.4- Formulation des mortiers à base de laitier de haut fourneau**

Les mortiers d'étude sont composés en masse, d'une partie de ciment, de trois parties de sable et d'un rapport eau /ciment =0,55. Avec substitution d'une partie de ciment avec le laitier de haut fourneau (laitier granulé et/ou cristallisé).

La quantité d'eau nécessaire utilisée dans la formulation des mortiers est plus d'une demi-partie (la quantité principale dans le mortier normale E/C= 0,5), cette petite quantité rajoutée dans le but d'améliorer la maniabilité des mortiers parce que le sable siliceux utilisé est sable fin avec un module de finesse égale à 2,15.

Vu que le laitier cristallisé présente une activité pouzzolanique très faible, on a préféré de l'associer au laitier granulé. La composition des différents types de mortiers utilisés dans cette étude est donnée au tableau II.6 et illustrée par la figure II.18

Tableau II.6: Composition des mortiers à base de laitier de haut fourneau

	Type de mortiers	% de ciment	% additions minérales	
			LG	LC
M1	Mortier témoin MT	100	0	0
M2	Mortier avec 30% fillers laitiers granulé MFLG 30%	70	30	0
M3	Mortier avec 40% fillers laitiers granulé MFLG 40%	60	40	0
M4	Mortier avec 50% fillers laitiers granulé MFLG 50%	50	50	0
M5	Mortier avec fillers laitiers cristallisé MFLCr10%	70	20	10
M6	Mortier avec fillers laitiers cristallisé MFLCr20%	60	20	20
M7	Mortier avec fillers laitiers cristallisé MFLCr30%	50	20	30

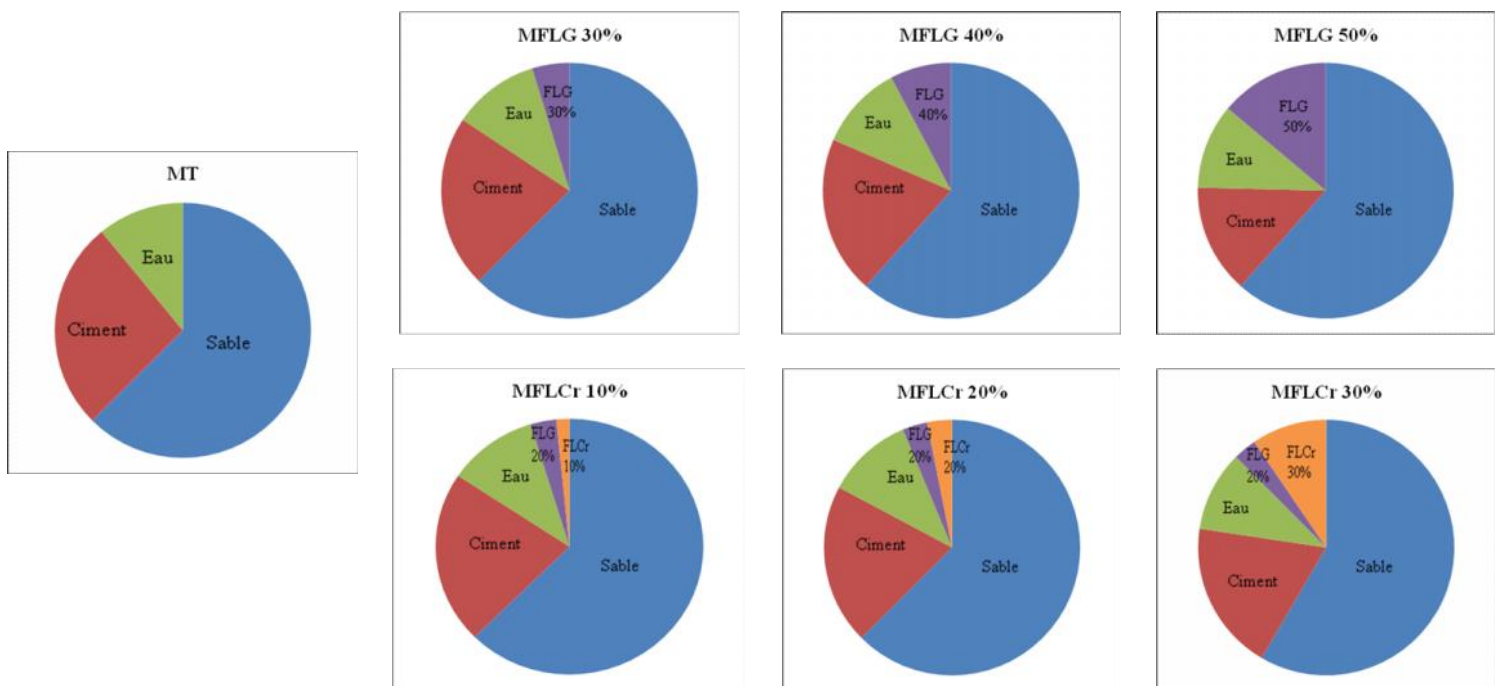


Figure II.18- Composition des mortiers à base de laitier de haut fourneau

II.5– Confection des éprouvettes

II.5.1– Béton de sable

Dans cette étude, on a utilisé quatre types d'éprouvettes, des éprouvettes prismatiques de dimensions (4 × 4 × 16) cm et (7 × 7 × 28) cm, des éprouvettes cubiques de dimension (10 × 10 × 10) cm et des éprouvettes cylindrique de dimension (11 × h 5) cm pour le béton de sable avec et sans fibres.

La préparation des éprouvettes est réalisée selon la norme NF EN 12390-1 [NF EN 12390-1, 2001], le malaxage est réalisé à l'aide d'une bétonnière de capacité de 25L avec une durée de malaxage totale de l'ordre de 5 minutes.

La durée de vibration choisie est conforme aux normes et qui donne au béton sa compacité maximale, la vibration est réalisée sur une table vibrante à amplitude de vibration réglable avec une durée de vibration totale d'une minute.

II. 5.2. Mortier

Deux types d'éprouvettes sont utilisés dans le cas de mortier, Le malaxage est réalisé à l'aide d'un malaxeur de capacité de 5L avec une durée de malaxage totale de 3 minutes selon la norme EN 196-1 [EN 196-1, 2006]

La vibration a été réalisée sur une table vibrante à amplitude de vibration réglable avec une durée de vibration d'une minute.

Les différents types d'éprouvettes avec les essais programmés à faire sont regroupés dans le tableau II.11

Tableau II.7- Types et formes d'éprouvettes avec les essais réalisés

Matériaux	Types d'éprouvettes	Essais
Béton de sable	Cubiques (10x10x10) cm	Résistance mécanique en compression.
	Prismatiques (7x7x28) cm	Retrait
Béton de sable	Prismatiques (4x4x16) cm	Résistance mécanique en traction par flexion
		Variation de masse (attaque sulfatique)
Mortier	Cylindriques (11x5) cm	Porosité accessible à l'eau
		Perméabilité au gaz (Hélium)
		Diffusion des ions chlore
		Absorption capillaire

II. 6. Caractérisation des bétons et des mortiers à l'état frais

II.6.1. Masse volumique

Elle est estimée à partir de la détermination de la masse volumique des mélanges de béton frais selon la norme NF EN 12350-6 [NF EN 12350-6, 1999]. Cette dernière caractérisée par la masse d'une quantité de béton frais rapporté à son volume après vibration, comme il est indiqué dans la formule suivante :

$$\rho = \frac{m_{\text{rempli}} - m_{\text{vide}}}{V} \quad (\text{g/cm}^3) \quad \text{Eq- II.12}$$

m_{vide} : la masse du récipient vide en g

m_{rempli} : la masse du récipient rempli de matériau en g

V : volume du récipient en cm^3

II.6.2. Maniabilité

Deux tests sont utilisés pour caractériser la maniabilité des mélanges d'étude. L'ouvrabilité des bétons est déterminée à l'aide de l'essai d'affaissement cône d'Abrams de dimensions ($D=20$; $d=10$; $h=30$ cm) selon la norme NF EN 12350-2 [NF EN 12350-2, 1999].

L'essai consiste à remplir une masse de béton frais dans un cône tronconique en trois couches tassées avec une tige d'acier, dont chacune subit un nombre déterminé de coups de piquage, puis démoulé verticalement et mesuré l'affaissement. La figure II-18 illustre un essai de l'affaissement du cône d'Abrams d'un mélange de béton de sable testé.



Figure II-19: Essai d'affaissement cône d'Abrams

L'ouvrabilité des mortiers est déterminée selon la norme NBN EN 1015-3 [NBN EN 1015-3, 1999], l'essai consiste à déterminer la valeur d'étalement, cette valeur est mesurée par le diamètre moyen d'un prélèvement de mortier frais, mis en place à l'aide d'un moule donné sur le plateau d'une table à secousses définie, et soumis à un nombre donné de secousses verticales en soulevant la table à secousses et en la laissant retomber librement d'une hauteur donnée.



Figure II-20: Essai d'étalement à la table à secousses

II.7. Résultats et interprétation

II.7.1- Maniabilité

II.7.1.1- Maniabilité des bétons de sable

II.7.1.1.1- Effet de la nature des sables sur l'ouvrabilité des bétons de sable

Les résultats de la maniabilité des bétons de sable à base de différents types et nature des sables caractérisée par l'essai de l'affaissement au cône d'Abrams sont illustrés à la figure II.21

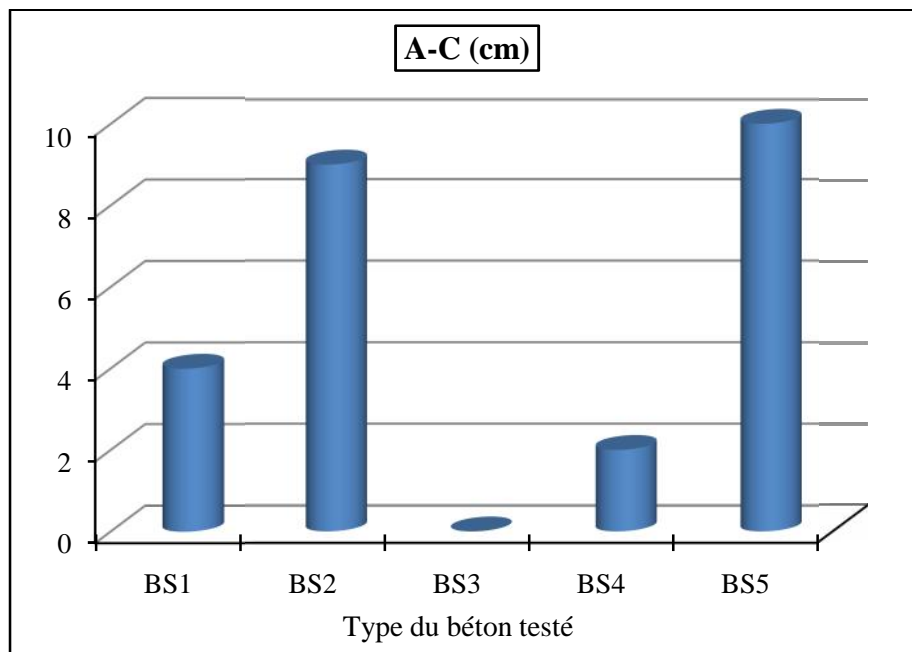


Figure II-21. Variation de la maniabilité des bétons de sable en fonction de la nature des sables

La figure II.21 montre clairement que la nature des sables influence considérablement la maniabilité des bétons testés, pour un dosage constant en eau et en ciment et avec une utilisation d'un superplastifiant. Les bétons de sable avec sable de carrière et avec mélange de deux sables (sable siliceux - sable de carrière) présentent les meilleures maniabilités avec des affaissements de l'ordre de 9 et 10cm. Par contre, le béton de sable avec sable siliceux fin et sable de laitier cristallisé donnent des affaissements au cône d'Abrams de l'ordre de 4 et 2cm respectivement qui correspond des bétons fermes, cela peut être expliqué par la finesse de ce de sable siliceux et la porosité de sable de laitier cristallisé.

La maniabilité des bétons de sable reste très affectée avec l'utilisation de sable de laitier de haut fourneau et surtout le sable laitier granulé qui a donné un affaissement au cône d'Abrams égale à 0cm. Ceci est dû au caractère absorbant des sables de laitier qui sont généralement poreux (voir les observations microscopiques aux figures II-3 et II-4 paragraphe II.2)

D'une manière générale la variation de la maniabilité est en fonction de la nature minéralogique, la morphologie (état de surface, types et formes des pores), la granulométrie et la dimension maximale des sables.

II.7.1.1.2- Effet du taux de fibres de polypropylène sur l'ouvrabilité des bétons de sable

Les résultats obtenus dans les paragraphes précédents montrent que la nature des sables influe sur la maniabilité des bétons par les caractéristiques intrinsèques des sables de composition. Le mélange de deux types de sable (sable siliceux-sable de carrière) donne un béton de sable avec les meilleures caractéristiques à l'état frais. Ce dernier est choisi pour l'étude de l'influence de la variation de taux de fibres de polypropylène.

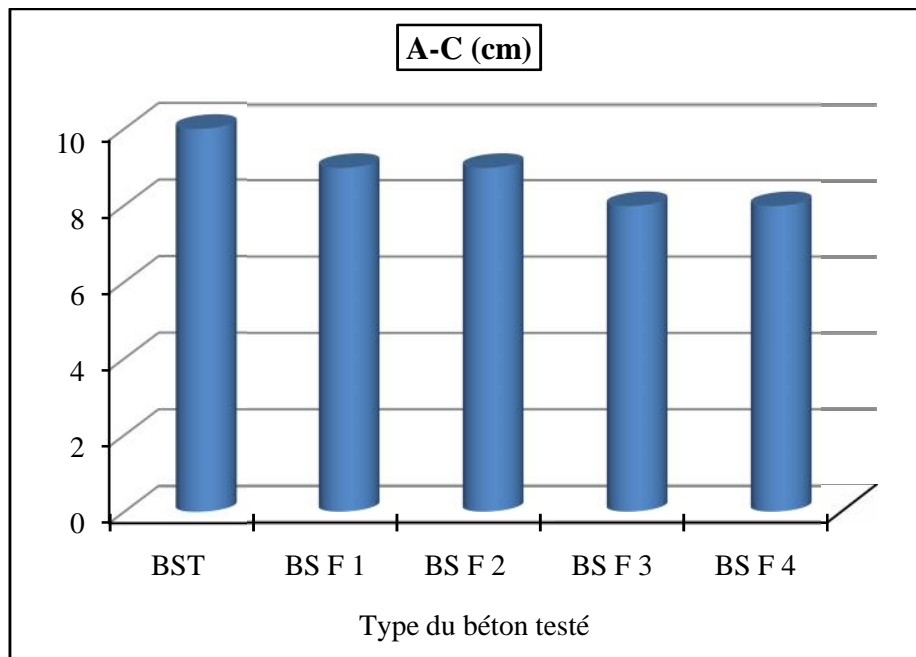


Figure II.22. Variation de la maniabilité des bétons en fonction de taux de fibre

Vu que la dimension maximale des granulats utilisés pour la préparation des bétons de sable est inférieure à 5 mm, l'introduction de fibres de polypropylène dans ces bétons ne soulève aucune difficulté et leurs répartitions se faisant facilement et ne nécessitant pas de précaution particulière lors du malaxage.

La figure II-22 montre que l'incorporation des fibres polypropylène donne une légère diminution de l'affaissement. Cela s'explique par l'amélioration de la cohésion du béton frais avec l'augmentation du taux de fibres de polypropylène. On peut considérer que l'influence du dosage en fibres de polypropylène sur la maniabilité caractérisée par l'affaissement est négligeable, la diminution de l'affaissement enregistrée est inférieure à 3 cm, et les bétons restent toujours dans le domaine plastique.

II.7.1.1.3- Effet de la nature des additions minérales sur l'ouvrabilité des bétons de sable

Le béton de sable avec un mélange de deux sables et avec le taux optimal en fibres de polypropylènes de 600g/m^3 est choisi pour l'étude de l'influence de la nature des additions

minérales sur le comportement et la durabilité des bétons de sable, trois types d'addition sont utilisés (fillers laitier granulé, laitier cristallisé et fillers calcaire)

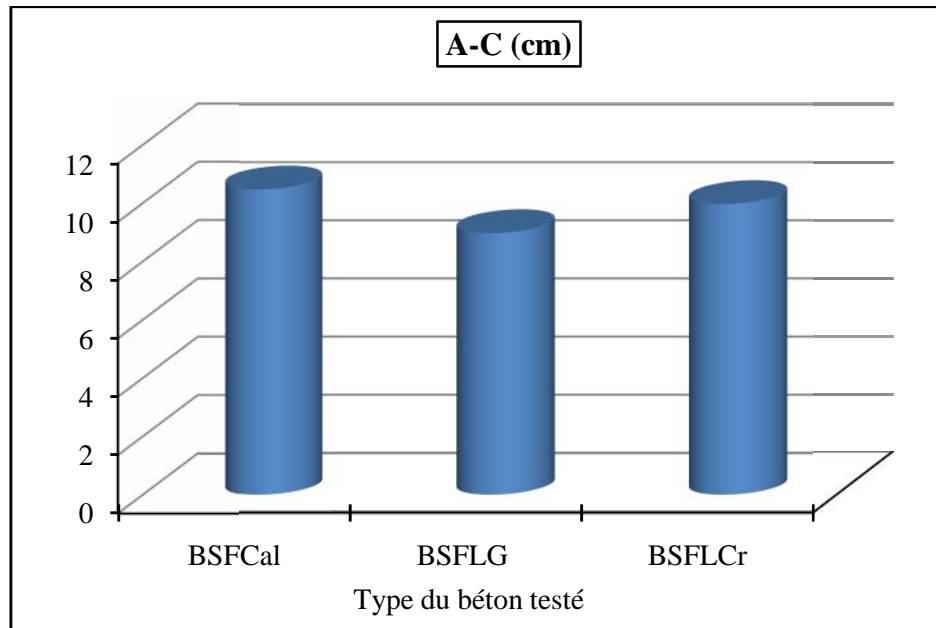


Figure II.23. Variation de la maniabilité des bétons en fonction de la nature des additions minérales

La figure II-23 présente la variation de la maniabilité des bétons de sable fibré en fonction de la nature des additions minérales, on constate que ces dernières sont légèrement influencées la maniabilité des bétons testés comme on peut négliger l'influence des additions dans notre cas, on remarque que la différence entre les trois types du béton donne une valeur de l'affaissement inférieure à 2 cm. Le BSFCal à base de fillers calcaire est le plus maniable par rapport au BSFLG et BSFLCr ceux à base du laitier granulé et laitier cristallisé, cela est dû à la présence de la microporosité dans le laitier qui absorbe une quantité d'eau aussi propriétés morphologique des particules des additions minérales, sa confirmer par [Bessa-Baderddine, 2004].

II.7.1.2- Maniabilité des mortiers

D'après la norme NBN EN 1015-3 [NBN EN 1015-3, 1999], la valeur d'étalement est mesurée par le diamètre moyen d'un prélèvement de mortier frais, mis en place à l'aide d'un moule donné sur le plateau d'une table à secousses définie, et soumis à un nombre donné de secousses verticales en soulevant la table à secousses et en la laissant retomber librement d'une hauteur donnée, l'étalement des mortiers avec substitution de laitier de haut fourneau (laitier granulé et laitier cristallisé) est donné par la figure II.19, les résultats sont illustrés par la figure II.24.

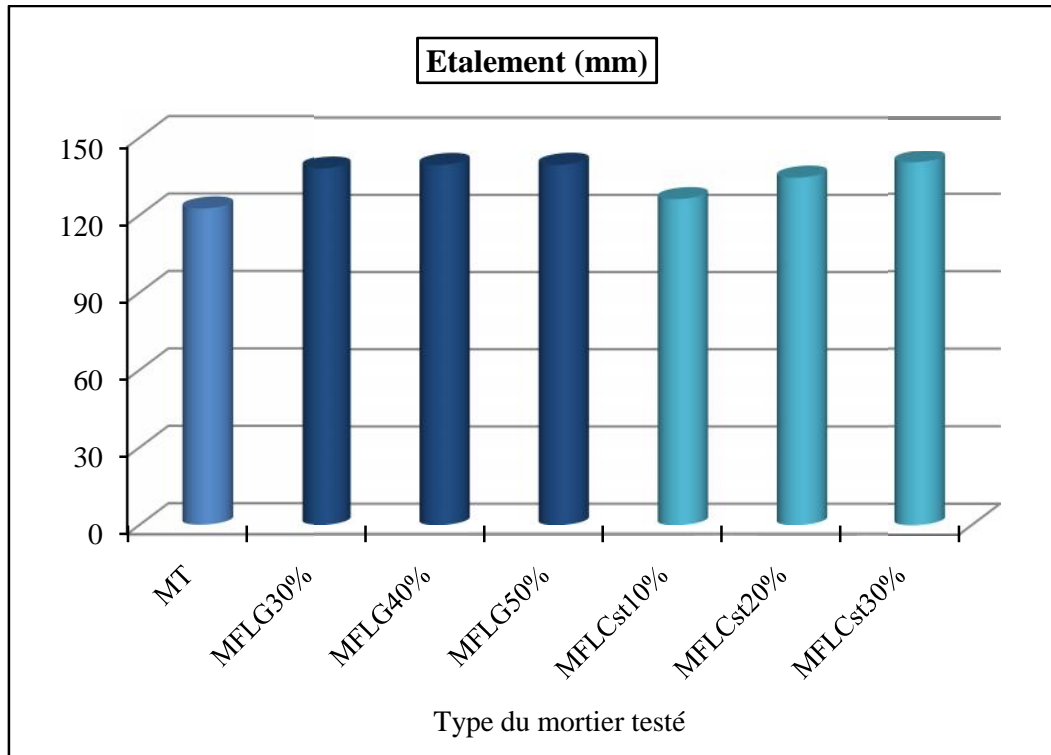


Figure II-24. Variation de la maniabilité des mortiers en fonction de taux de substitution

La figure II-24 montre que la maniabilité des mortiers caractérisée par les valeurs d'étalement est affectée par l'augmentation de taux de substitution. Avec un rapport E/C fixe, les mortiers avec substitution en laitier granulé comme les mortiers avec substitution en laitier cristallisé, on constate une augmentation de la maniabilité des mortiers avec l'augmentation de taux de substitution, ceci s'explique par l'effet fillers ou effet de remplissage des additions minérales qui améliore la maniabilité des mortiers.

II.7.2- Effet de la nature des sables sur la compacité des bétons de sable et des mortiers

Elle est estimée à partir de la détermination de la masse volumique des mélanges du béton de sable et du mortier à l'état frais. Cette dernière est caractérisée par la masse d'une quantité de béton frais rapporté à son volume après vibration. Les résultats expérimentaux de la masse volumique des bétons de sable et des mortiers à l'état frais sont présentés ci-dessous.

II.7.2.1- Compacité des bétons de sable

II.7.2.1.1- Effet de la nature des sables

La compacité des bétons est estimée à partir de la détermination de la masse volumique des mélanges de béton frais, Les résultats expérimentaux de cette masse volumique sont donnés à la figure II.25

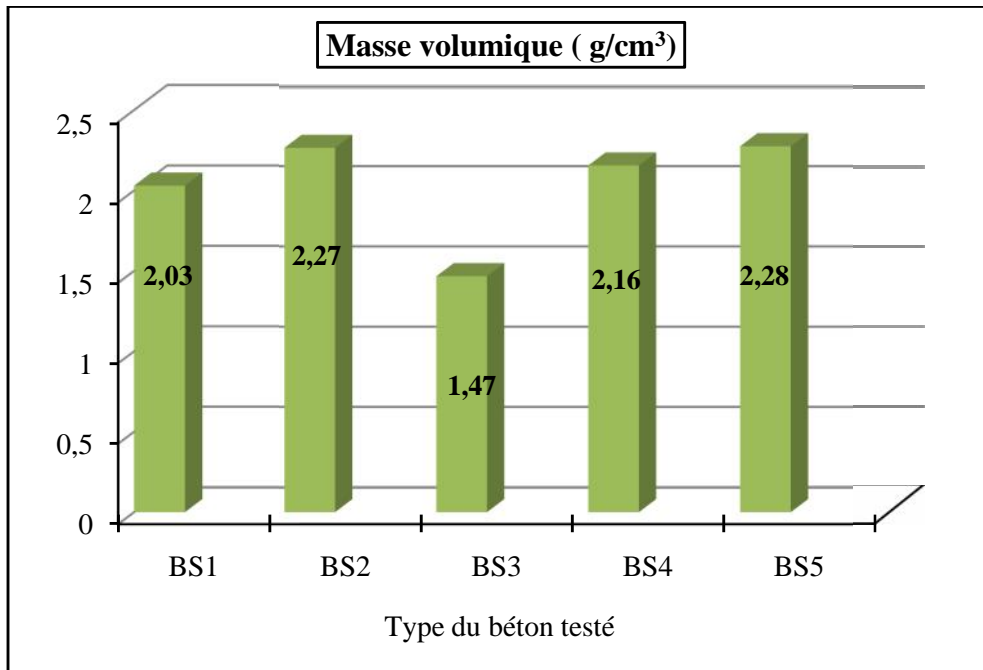


Figure II.25-Variation de la masse volumique des bétons de sable avec la nature des sables

La figure II.25 montre l'effet de la nature des sables sur la masse volumique des bétons de sable à l'état frais, cette dernière aussi comme la maniabilité est très influencée par le type de sable utilisé. Le sable de laitier granulé est caractérisé par une porosité très élevée et le béton de sable avec sable de laitier granulé présente une masse volumique de l'ordre de 1470 Kg/m^3 qui sera classé comme béton léger.

Les bétons de sable les plus compacts sont ceux avec sable de carrière, le mélange de deux sables (sable siliceux- sable de carrière) et sable de laitier cristallisé. Ceci est dû essentiellement à la bonne granulométrie de ces sables.

II.7.2.1.2-Effet de taux de fibre de polypropylène

Selon la figure II.26 on remarque que l'effet de l'ajout des fibres de polypropylène sur la masse volumique des bétons de sable comme l'effet sur la maniabilité est négligeable. Une légère diminution est enregistrée pour un dosage supérieur à 600g/m^3 cela est dû à la faible densité des fibres de polypropylène.

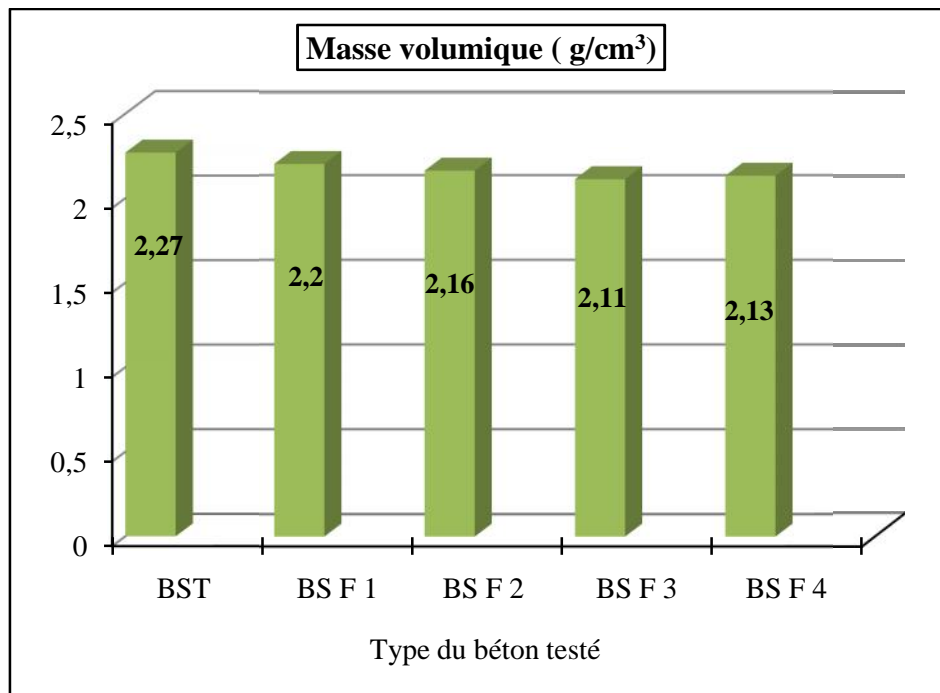


Figure II.26 -Variation de la masse volumique des bétons de sable en fonction de taux de fibre

II.7.2.1.3- Effet de la nature des additions minérales

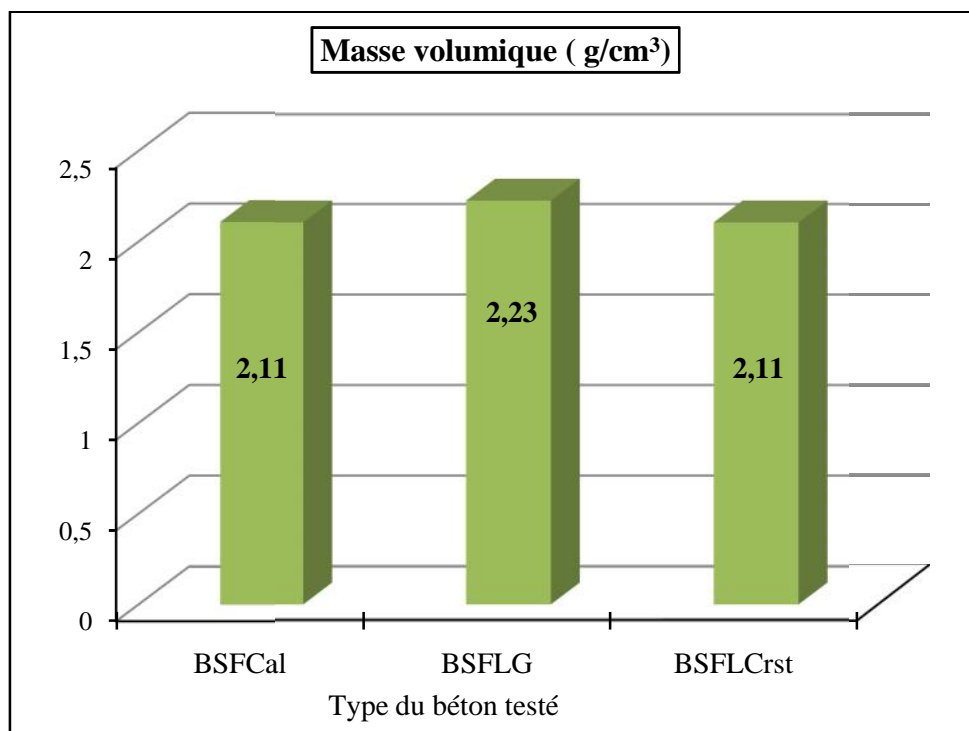


Figure II.27 - Variation de la masse volumique des bétons de sable en fonction de la nature des additions minérales

Selon la figure II.27, on observe que les masses volumiques des trois types du béton sont proches cela peut s'expliquer par les masses volumiques intrinsèques des additions minérales et leurs surfaces spécifiques SSB

II.8- Conclusion

Dans ce chapitre, on a identifié et caractérisé les différents matériaux constitutifs utilisés, les méthodes de formulation, les compositions optimales des bétons de sable d'études, les essais utilisés pour caractériser les mortiers et les bétons de sable en évidence le rôle et l'influence de certains paramètres à savoir : la nature des sables, l'ajout et le taux de fibre de polypropylène et la nature des additions minérales sur les caractéristiques des mortiers et des bétons de sable à l'état frais, par l'analyse des résultats obtenus, nous pouvons énoncer :

- ❖ La nature des sables influence considérablement les propriétés à l'état frais, la variation de la maniabilité et la masse volumique est en fonction de la nature minéralogique, morphologie (état de surface, types et formes des pores), granulométrie et dimension maximale des sables. Le mélange de deux types de sable (sable siliceux-sable de carrière) donne un béton de bonne compacité avec les meilleures caractéristiques à l'état frais.
- ❖ Le mélange de deux types de sable (sable siliceux-sable de carrière) donne un béton de sable avec les meilleures caractéristiques à l'état frais. Ce dernier est choisi pour l'étude de l'influence de la variation de taux de fibre de polypropylène.
- ❖ L'effet de l'ajout des fibres de polypropylène sur la masse volumique des bétons de sable frais comme l'effet sur la maniabilité est négligeable. Une légère diminution de la masse volumique a été enregistrée pour un dosage supérieur à 600g/m^3 . Cela est dû à la faible densité des fibres de polypropylène.
- ❖ La nature des additions minérales influence aussi sur les propriétés des bétons à l'état frais par la morphologie des particules de ces additions. La maniabilité et la masse volumique des trois types du béton sont proches avec une légère différence, cela est dû aux propriétés intrinsèques des additions minérales.
- ❖ L'augmentation du taux de substitution en laitier (granulé et/ou cristallisé) influe d'une façon positive la maniabilité des mortiers. On constate une légère augmentation de cette maniabilité avec l'accroissement du taux de substitution, cela est dû à l'amélioration de la rhéologie des mortiers par l'effet fillers ou l'effet de remplissage des fines ajouts (laitiers).

**COMPORTEMENT ET
CARACTERISATION DES
BÉTONS DE SABLE AVEC
FIBRES DE POLYPROPYLENE**

CHAPITRE III

CHAPITRE III

Comportement et caractérisation des bétons de sable avec fibres de polypropylène

SOMMAIRE

III.1- Introduction	86
III.2- Procédure expérimentale	86
III.2.1- Choix des éprouvettes	86
III.2.2 - Préparation et Conservation des éprouvettes	86
III.2.4 – Essais physico- mécaniques	87
III.2.4.1-Masse Volumique	87
III.2.4.2- Essai de compression	87
III.2.4.3- Essai de traction par flexion	87
III.2.4.4- Essai du retrait	88
III.3-Résultats et discussion	89
III.3.1- Masse volumique à l'état durci	89
III.3.2. - Résistance mécanique des bétons de sable	90
III.3.3. - Effet du taux de fibres sur l'évolution du retrait des bétons de sable	96
.. III.4- Mode de rupture	97
III.5-Analyse microstructurale	99
III.6-Conclusion	100

III.1- Introduction

Dans le but de la valorisation des matériaux locaux dans la fabrication d'une nouvelle gamme de béton de sable et l'amélioration de ses propriétés, ce chapitre est consacré à analyser et à évaluer l'influence de la nature des sables et le taux de fibres de polypropylène sur le comportement physico-mécaniques et la microstructure des bétons de sable.

La résistance mécanique reste toujours le facteur le plus important pour juger la qualité du béton, cette résistance qui dépend de plusieurs paramètres tels que le rapport Eau /Ciment, la nature et le dosage de ciment et des additions minérales, type et dimension des granulats ...etc,

Dans ce troisième chapitre, nous allons exposer les différents résultats obtenus à partir des essais expérimentaux qui portent sur les masses volumiques et les résistances mécaniques (compression et traction par flexion) et qui ont été réalisées sur les différentes formulations des bétons de sable d'étude.

Dans une première partie, nous présenterons les résultats d'étude de l'influence de la nature des sables et des additions minérales réalisées dans le but de démontrer la pertinence de la valorisation des sous produits sidérurgiques dans la fabrication des bétons de sable.

Dans la deuxième partie, nous exposerons l'effet du taux de fibres de polypropylènes sur la variation des résistances mécaniques et la cinétique du retrait.

Enfin, une comparaison systématique entre les résultats du comportement mécanique et celle obtenue lors de l'étude de la microstructure sera présentée.

III.2- Procédure expérimentale

III.2.1- Choix des éprouvettes

La caractérisation physico-mécanique des bétons de sable sans et avec fibres est obtenue en exploitant les mesures de la résistance en traction par flexion et en compression sur des éprouvettes (4x4x16) cm³ et (10x10x10) cm³ conformes à la norme NF EN12390-1 [NF EN12390-1, 2001] et NF EN12390-3 [NF EN12390-3, 2000].

III.2.2- Préparation et conservation des éprouvettes

La préparation des éprouvettes est réalisée selon la norme NF EN 12390-1 [NF EN 12390-1, 2001], le malaxage est effectué à l'aide d'une bétonnière de capacité de 25L avec une durée de malaxage totale est de 5 minutes, deux minutes à sec pour assurer l'homogénéisation du mélange (granulats, ciment et fillers) et trois minutes après l'introduction de l'eau de gâchage au cours du malaxage.

La vibration est le moyen le plus courant pour donner au béton sa compacité maximale et pour éliminer le maximum de vides. Elle est réalisée à l'aide d'une table vibrante à amplitude de vibration réglable avec une durée de vibration d'une minute. Après le démoulage des éprouvettes et après 24 heures de conservation à l'air libre, ces éprouvettes sont conservées sous l'eau (humidité saturante) et une température ambiante jusqu'à l'échéance d'essai.

III.2.4–Essais physico-mécaniques

III.2.4.1- Masse volumique

La masse volumique du béton à l'état durci est mesurée à partir de la masse de l'éprouvette rapportée à son volume après 28 jours de durcissement selon la norme NF EN 12390-7 [NF EN 12390-7, 2011], Les essais de la masse volumique ont été effectués sur des éprouvettes cubiques (10×10×10) cm et (4×4×16) cm.

III.2.4.2-Essai de compression

Les éprouvettes utilisées pour l'essai de compression sont des éprouvettes cubiques (10×10×10) cm et (4×4×4) cm obtenues après l'essai de traction par flexion. La machine d'essai est une presse hydraulique de capacité maximale de 2000 kN à vitesse constante, l'essai de compression est conduit jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

La résistance à la compression est calculée selon la formule suivante :

$$\sigma = \frac{P}{S} \quad [\text{MPa}] \quad \text{Eq- III.1}$$

P : charge de rupture en N

S : Section d'éprouvette en mm²



Figure III.1- Description d'essai de compression

III.2.4.3- Essai de traction par flexion

Les éprouvettes utilisées dans l'essai de traction par flexion sont des éprouvettes prismatiques (4×4×16) cm. L'essai consiste à rompre en deux points des éprouvettes à l'aide d'un appareillage de traction par flexion de la presse de ZWICK Roel de capacité maximale de 20 KN. La valeur de la résistance et de la charge à la rupture est enregistrée directement au cours de l'essai. Cette résistance aussi est déterminée par la formule suivante :

$$R_{tf} = \frac{3 PL}{2bh^2} \quad [\text{MPa}] \quad \text{Eq- III.2}$$

P : l'effort de rupture en N

L: la distance ente les appuis en mm

b, h : dimension d'éprouvette en mm²



Figure III.2- Description d'essai de traction par flexion

III.2.4.4- Essai du retrait

L'essai de retrait a été réalisé sur des éprouvettes prismatiques (7x7x28) cm équipées de plots fixés aux extrémités de l'axe central selon la norme NFP 15-433 [NFP 15-433, 1994]. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un rétractomètre équipé d'un comparateur.

L'essai consiste à mesurer en fonction du temps, la variation dimensionnelle des éprouvettes conservées dans une salle qui est en permanence à une température de (20±2)°C et à humidité relative de (50±5)°.

La variation de longueur ou la déformation de retrait a été déterminée par la formule suivante et exprimé en micromètre sur mètre.

$$\epsilon_{\text{retrait}} = \frac{\Delta L}{L} \left[\frac{\mu\text{m}}{\text{m}} \right] \quad \text{Eq- III.3}$$

L : La variation de longueur en μm , et égale à $l_t - l_0$

L: représente la hauteur de l'éprouvette entre les faces des deux plots de mesure en contact avec le béton. Dans notre cas L= 280 mm.

l₀: la mesure de référence, soit la longueur mesurée lors de la première échéance en mm.

l_t: la mesure relevée à un temps t en mm.

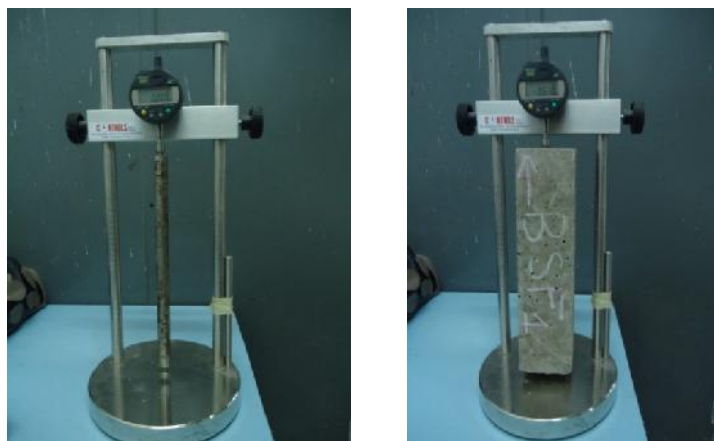


Figure III.3- Mesure du retrait

III.3-Résultats et discussion

III.3.1- Caractéristiques physico-mécaniques des bétons de sable sans et avec fibres

III.3.1.1- Masse volumique à l'état durci

La masse volumique des bétons de sable d'étude est mesurée à l'état durci après 24 heures de séchage et jusqu'à masse constante, les résultats obtenus illustrés par les figures III-3 et III-4.

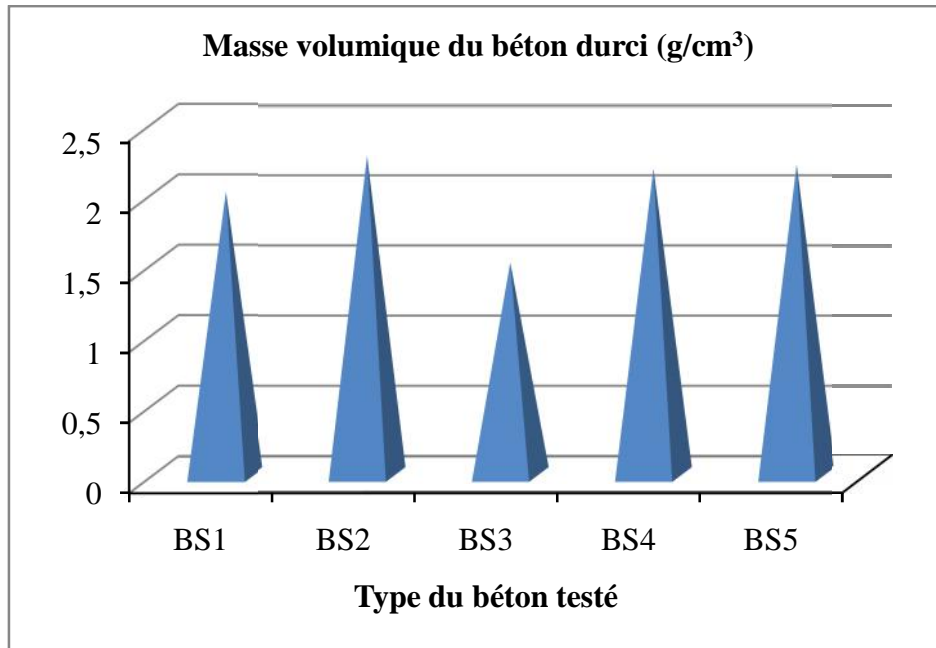


Figure III.4- Effet de la nature des sables sur variation de la masse volumique des bétons de sable

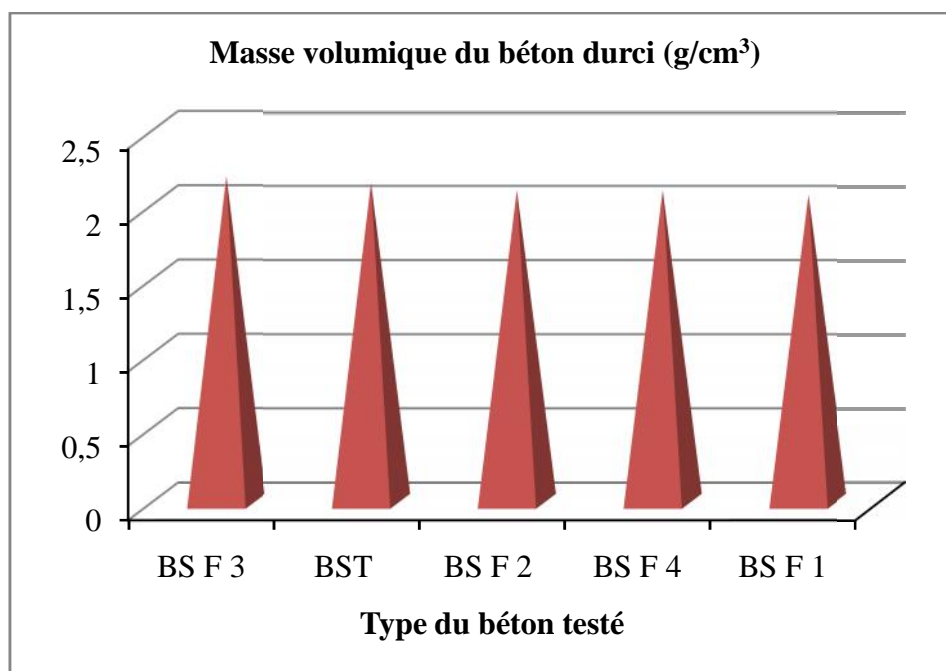


Figure III.5- Effet du taux des fibres sur variation de la masse volumique des bétons de sable

D'après la figure III-4 qui montre l'effet de la nature des sables sur la masse volumique des bétons de sable à l'état durci. On constate que grâce à la nature très poreuse du sable de laitier granulé, le BS3 (béton de sable avec sable de laitier granulé) présente la plus faible masse volumique avec une valeur égale à 1.51 g/cm^3 . Par contre le BS2, BS4 et BS5 les bétons de sable avec le sable de carrière, sable de laitier cristallisé et le mélange de deux sables présentent les meilleures masses volumiques ou densités par rapport au BS1 (béton avec sable siliceux), cela est dû de la densité intrinsèque des sables et à la bonne granulométrie de sable de carrière, de laitier cristallisé et le mélange de sable de dune et sable de carrière.

Dans le but d'améliorer certaines caractéristiques du béton de sable on a visé d'étudier l'effet du taux de fibres de polypropylène.

Une légère variation des masses volumiques a été enregistrée pour les différents dosages en fibres comme la montre la figure III.5 qui montre l'effet du taux des fibres sur la variation de la masse volumique des bétons de sable.

Les fibres de polypropylène sont de faible densité, de très petites dimensions ($L=12\text{mm}$ et $D=30 \mu\text{m}$) ajoutés aux bétons avec un faible dosage. Dans ce cas on peut dire que l'effet du taux de fibres sur la masse volumique à l'état durci est négligeable.

III.3.1.2- Résistance mécanique des bétons de sable

A / Effet de la nature de sable sur la résistance mécanique

Les essais mécaniques de compression et de traction par flexion ont été réalisés sur les éprouvettes du béton de sable dans le but d'étudier l'effet de la nature de sable sur l'évolution de la résistance mécanique.

Les essais ont été effectués aux différents âges du béton : 2, 14, et 28 jours. Les résultats de la résistance mécanique, qui sont représentés par la moyenne de six éprouvettes pour la compression et trois éprouvettes pour la traction par flexion, sont associés par l'écart type et le coefficient de variation. Ces résultats sont regroupés dans le tableau III.1 et illustrés par les figures III.6 et III.7

Tableau III.1- Résistance en compression et en traction par flexion des bétons de sable d'étude

Bétons de sable	Age d'essais (jours)	Résistance moyenne en compression (MPa)	Écart type (MPa)	Coefficient de variation (%)	Résistance moyenne en traction par flexion (MPa)	Écart type (MPa)	Coefficient de variation (%)
BS1	7	14,00	0,99	7,07	2,28	0,63	27,63
	14	18,47	0,97	5,25	3,91	0,27	6,91
	28	28,62	2,70	9,43	5,55	0,14	2,52
BS2	7	18,05	1,45	8,03	3,39	0,39	11,50
	14	23,96	0,39	1,63	5,57	0,75	13,46
	28	33,75	1,10	3,26	8,20	0,62	7,56
BS3	7	4,18	0,59	14,11	0,54	0,25	46,30
	14	8,13	1,61	19,80	1,75	0,49	28,00
	28	13,79	2,14	15,52	3,82	0,47	12,83
BS4	7	18,10	1,15	6,35	2,13	0,76	35,68
	14	20,08	0,87	4,33	5,25	0,66	12,57
	28	32,01	1,77	5,5	7,40	0,31	4,19
BS5	7	22,81	1,40	6,14	3,98	0,72	18,09
	14	27,10	1,82	6,72	6,58	0,36	5,47
	28	37,22	0,95	2,55	9,54	0,59	6,18

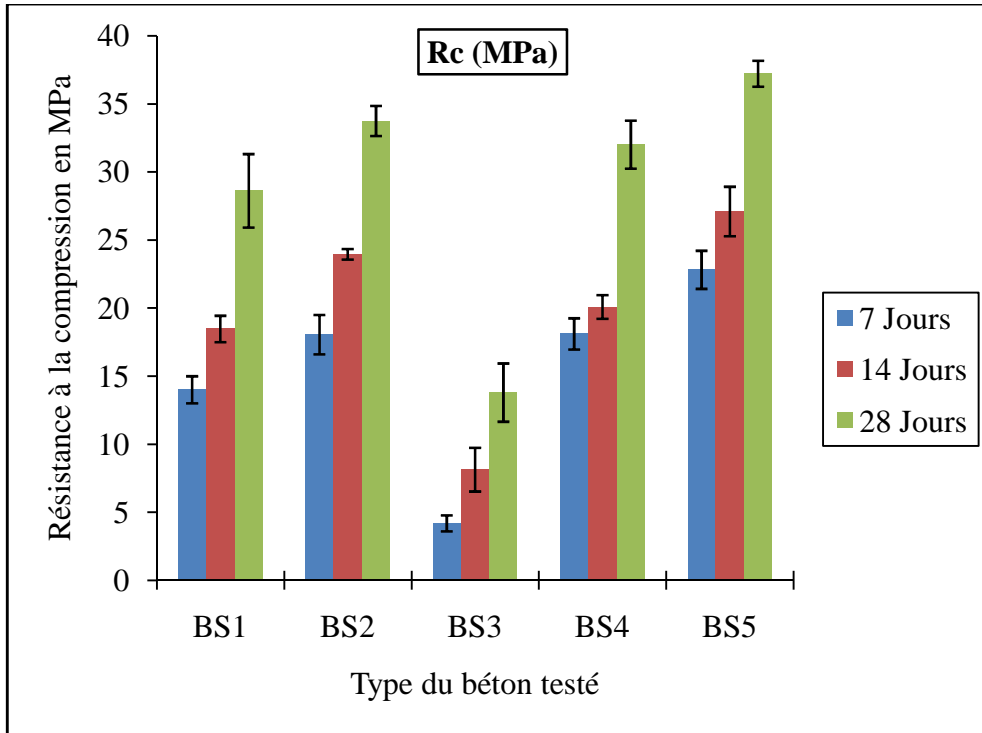


Figure III.6- Effet de la nature minéralogique des sables sur la résistance à la compression des bétons de sable

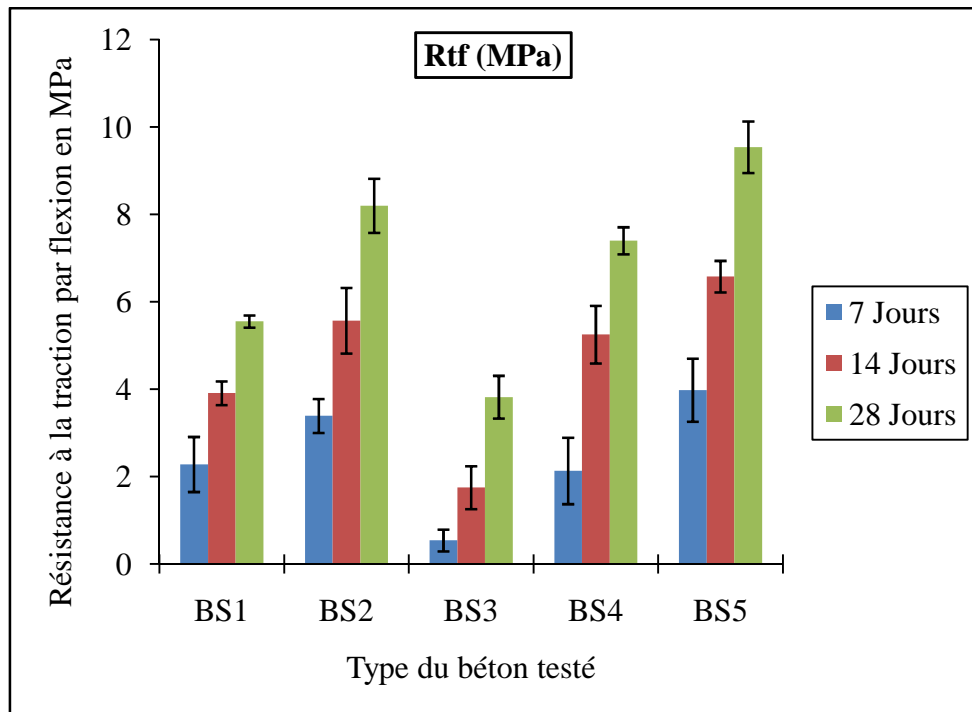


Figure III.7- Effet de la nature minéralogique des sables sur la résistance à la traction par flexion des bétons de sable

La granulométrie, la forme et l'état de surface des granulats peuvent jouer un rôle secondaire sur la résistance mécanique du béton après le rapport E/C qui est le facteur de premier ordre pouvant influencer sur cette dernière. Au niveau de la figure III.6 on peut constater que la résistance mécanique en compression diffère d'un béton à l'autre en fonction de la nature des sables utilisés.

Les meilleures résistances sont obtenues avec le mélange sable grossier de carrière – sable fin siliceux qui présentent le meilleur étendu granulaire avec une gaine 23%, ensuite le sable de carrière et le sable de laitier cristallisé avec des gains respectivement de 15% et 12%. On peut expliquer ces résultats par l'amélioration de la compacité des bétons de sable et par conséquence l'augmentation de la densité et la résistance mécanique ; cela est obtenu grâce à la bonne granulométrie de sable de carrière et le mélange sable siliceux - sable de carrière, ce qui est confirmé par [Khouadjia et al, 2015], qui ont montré que le comportement du béton est influencé par le type de sable, le taux des fines et de la forme des particules du sable.

La même chose pour le BS4 béton de sable avec sable de laitier cristallisé, la gain de résistance par rapport au BS1 béton avec sable siliceux est dû essentiellement à la bonne granulométrie, l'état de surface rugueuse et la nature minéralogique du sable de laitier cristallisé qui donne une bonne adhérence entre les grains de ce sable et la matrice cimentaire, ceci est montré dans plusieurs travaux sur le laitier cristallisé et son utilisation qui en découle de ces propriétés beaucoup plus comme un granulat dans la fabrication du béton comme il est montré dans le chapitre I.

La résistance la plus faible est celle du béton avec sable de laitier granulé qui présente un taux de diminution qui dépasse le 50 % par rapport au béton avec le mélange sable siliceux - sable de carrière qui a donné les meilleurs résultats. Cela s'explique par l'état morphologique très poreux et par une absorption initiale assez élevée de laitier granulé.

La résistance en traction par flexion comme en compression est influencée par la nature minéralogique et l'état de surface des sables utilisés et on constate selon la figure III.7 que l'influence de la nature des sables est nettement visible et que le béton avec mélange de deux sables (sable carrière-sable siliceux) présente le meilleur résultat.

L'utilisation de laitier granulé comme addition ou fillers joue un rôle dans l'amélioration des performances mécaniques des bétons de sable. Cela est dû à la nature pouzzolanique des fillers de laitier granulé qui participe à la formation des hydrates secondaires et améliore ainsi l'adhésivité des granulats à la matrice cimentaire et aussi à la nature morphologique des sables utilisés (état de surface et porosité). Les résistances de traction par flexion les plus élevées sont obtenues avec les sables de carrière et le mélange sable de carrière-sable siliceux.

B/ Influence du taux de fibres de polypropylène sur la résistance mécanique

Le BS4 béton de sable avec un mélange de deux sables (sable de carrière-sable siliceux) est choisi pour l'étude de l'influence du dosage en fibres de polypropylènes sur le comportement mécanique des bétons de sable. Quatre dosages en fibres sont choisis pour cette étude 200 g/m³ ; 600 g/m³, 1000 g/m³ et 1400 g/m³.

Les résistances mécaniques en compression et en traction par flexion des bétons de sable avec différents taux de fibre représentées dans le tableau III-2 et les figures III-8 et III-9.

Tableau III.2- Résistance en compression et en traction par flexion des bétons de sable d'étude

Bétons de sable	Age d'essais (jours)	Résistance moyenne en compression (MPa)	Écart type (MPa)	Coefficient de variation (%)	Résistance moyenne en traction par flexion (MPa)	Écart type (MPa)	Coefficient de variation (%)
BST	7	22,81	1,40	6,14	3,98	0,72	18,09
	14	27,10	1,82	6,72	6,58	0,36	5,47
	28	37,22	0,95	2,55	9,54	0,59	6,18
BSF1	7	19,55	1,4	7,16	3,87	0,14	3,62
	14	25,47	1,82	7,15	6,69	0,47	8,26
	28	37,37	0,95	2,54	9,54	1,03	11,04
BSF2	7	20,74	1,09	5,26	4,00	0,37	9,25
	14	26,23	2,03	7,74	5,58	0,38	6,81
	28	37,62	0,72	1,91	10,02	0,59	5,89
BSF3	7	20,04	0,46	2,30	3,75	0,36	9,60
	14	24,42	1,04	4,26	4,84	0,27	5,58
	28	35,39	1,87	5,28	7,27	0,85	11,69
BSF4	7	21,18	1,99	9,40	2,84	0,68	23,94
	14	24,87	2,71	10,90	4,61	0,49	10,63
	28	33,65	2,35	6,98	7,38	0,98	13,28

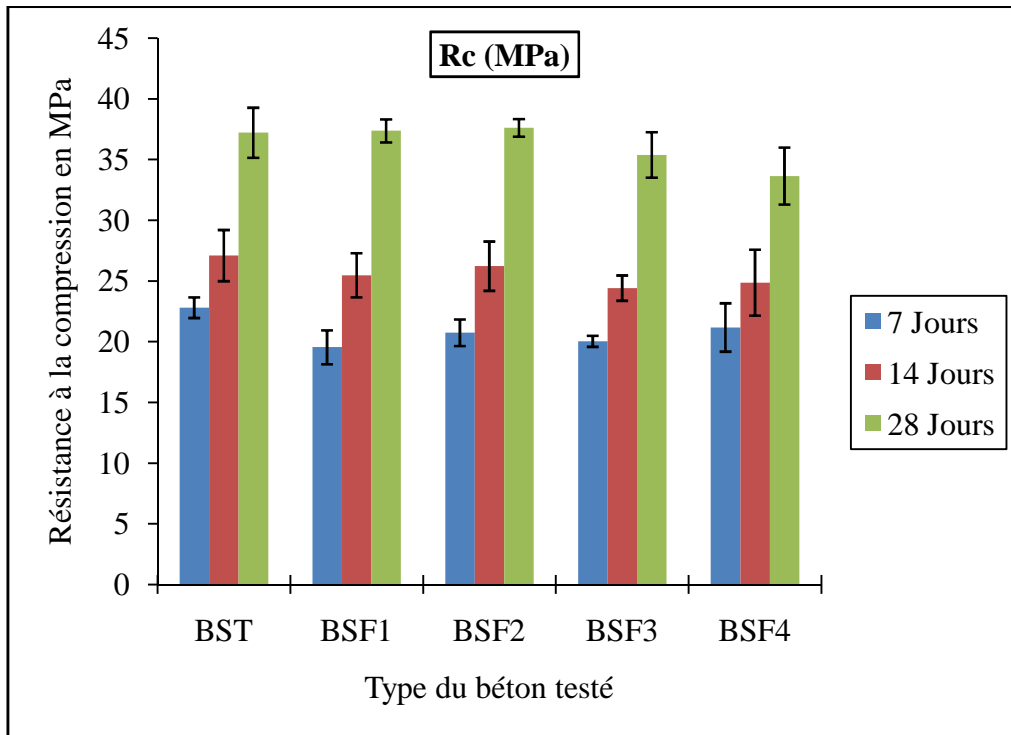


Figure III.8- Influence du taux de fibres sur la résistance à la compression des bétons de sable fibré

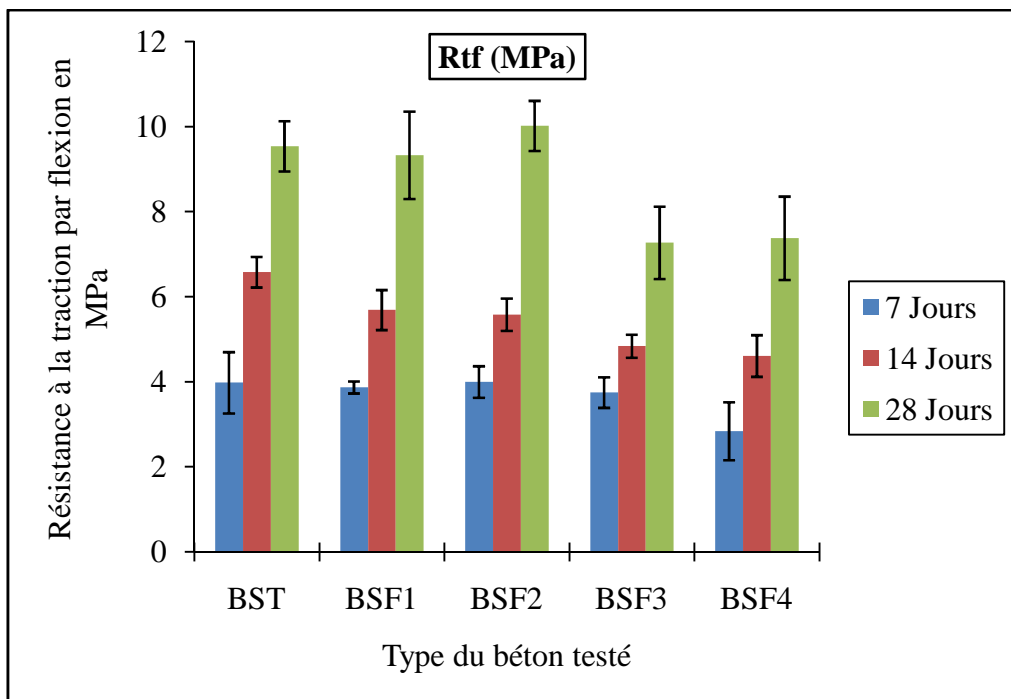


Figure III.9- Influence du taux de fibres sur la traction par flexion des bétons de sable fibré

Les figures III.8et III.9 montrent que les résistances mécaniques en compression comme en traction par flexion sont peu affectées par l'addition des fibres de polypropylène.

L'influence du taux de fibre jusqu'à 600 g/m^3 ne modifie pas de façon significative la résistance à la compression, par contre avec un taux élevé en fibre de polypropylène ($> 600 \text{ g/m}^3$) on constate une chute de la résistance en compression à 28 jours de l'ordre de 22% cela peut expliquer que le dosage élevé en fibre de polypropylène perturbe le réseau cristallin de la matrice cimentaire.

Les meilleurs résultats obtenus en traction par flexion sont ceux avec un taux de fibre de 600 g/m^3 avec un gain de l'ordre de 25 %. Par contre la ductilité est améliorée par l'incorporation des fibres dans le béton de sable comme il est expliqué au paragraphe III.4.

III.3.1.3- Effet du taux de fibres sur l'évolution du retrait des bétons de sable.

L'essai du retrait a été effectué sur des éprouvettes en béton de sable avec différents taux en fibres de polypropylène. Les mesures de la déformation ont été faites aux différentes échéances qui sont 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10,30 et 60 jours. Les résultats obtenus sont illustrés par la figure III.10

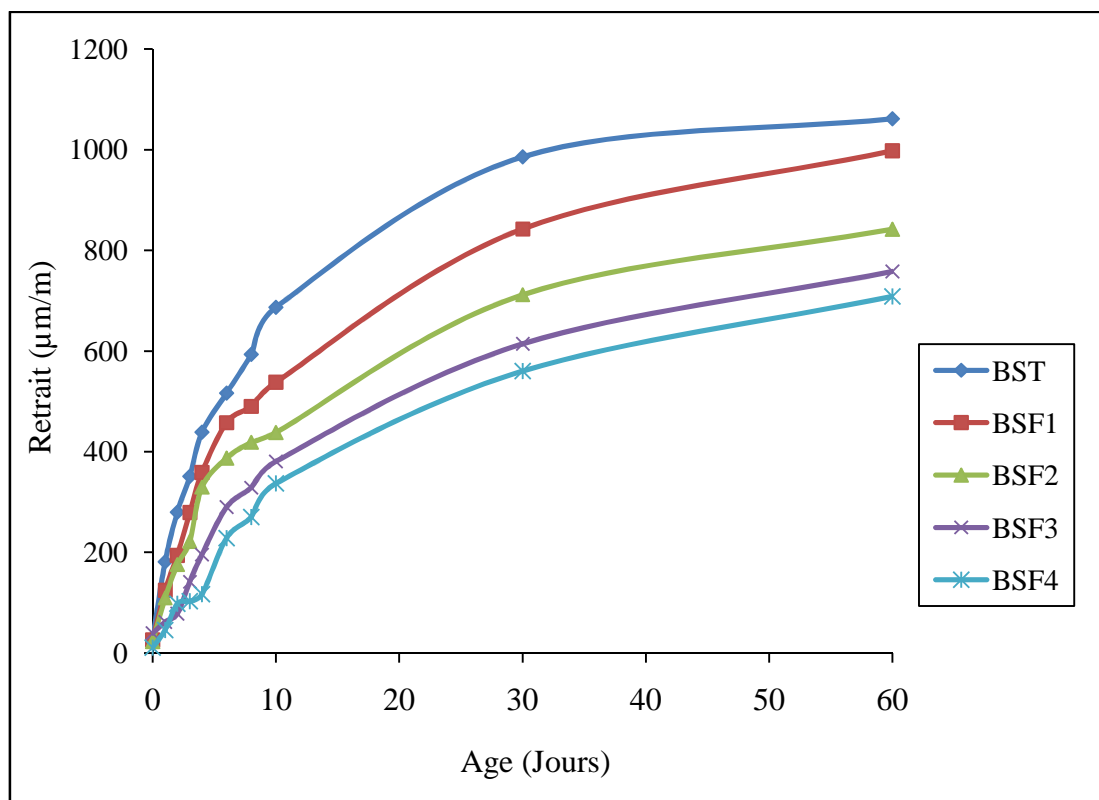


Figure III.10- Evolution du retrait des bétons de sable selon le taux de fibres

La figure III.10 présente l'évolution des valeurs de retrait total des bétons de sable avec différents taux de fibres de polypropylène. D'après cette figure on constate une diminution des valeurs de retrait avec l'augmentation de taux de fibres de polypropylène. Cette diminution à l'âge de 60 jours est de l'ordre de 6,17%, 20,66%, 28,57% et 33,24% respectivement avec les taux de fibres de 200, 600, 1000 et 1400 g/m³ par rapport au béton témoin (sans fibre). Ceci est dû essentiellement aux caractéristiques géométriques des fibres de polypropylène utilisés (fibre courte et avec un rapport L/D = 400). Les fibres courtes s'opposent aux contraintes de déformation du retrait et limitent ainsi les variations dimensionnelles et entraîne une réduction au niveau de la formation et la propagation des microfissures, suite à l'évaporation de l'eau, ce qui confirme les résultats obtenus par [Mazzoli et al, 2015] qui ont montré que l'incorporation de fibres au béton réduire ou empêcher la propagation des fissures au jeune âge, dans le but ont d'étudier l'effet de différents types de fibres sur l'évolution du retrait au jeune âge , les résultats obtenus montrent une différence considérable selon le type de fibres utilisées et les fibres de polypropylène présentant les meilleures performances.

D'une façon générale les bétons de sable présentent une cinétique de retrait un peu différente à celle de béton ordinaire. Elles présentent des valeurs de retrait plus supérieures de ce dernier.

Au jeune âge on observe une évolution rapide de la cinétique de retrait des bétons de sable témoin et ceux avec fibres. Cela peut s'expliquer par la consommation de l'eau gâchage lors des réactions d'hydratation, la chaleur d'hydratation (les réactions d'hydratation sont des réactions exothermiques) et ainsi que la présence de sable de carrière qui absorbe une quantité d'eau. Sans oublier l'absence des gros granulats dans le béton de sable, qui joue un rôle aussi dans l'évolution de retrait.

Après 28 jours les valeurs de retrait restent toujours plus élevées et peuvent aller jusqu'à 1000µm/mm pour le béton de sable témoin. Cela s'explique par le déclenchement des réactions hydrauliques des fillers du laitier granulé qui va consommer une partie d'eau.

III.4- Mode de rupture

D'après la norme EN 12390-3[EN 12390-3, 2001] le mode de rupture générale des éprouvettes du béton de sable d'étude sans fibre est incliné par un angle de 45°, ce mode est conditionné par les forces de frottement qui se développent entre les plateaux de la presse et les faces de l'éprouvette, ces forces de frottement sont dirigées vers l'intérieur de l'éprouvette et freinent l'évolution des déformations transversales du béton. [Ben Amara, 2002]

La comparaison du mode de rupture du béton de sable témoin et celui des bétons de sable fibrés illustrée par les figures III-10 et III-11 montre clairement et sans doute que ces derniers possèdent un caractère ductile lors de la rupture, cela veut dire que l'éprouvette reste après la rupture attachée par les fibres de polypropylène et aucun éclat n'a été observé, cela présente un avantage majeur pour la stabilité des éléments porteurs de structures en béton de sable.

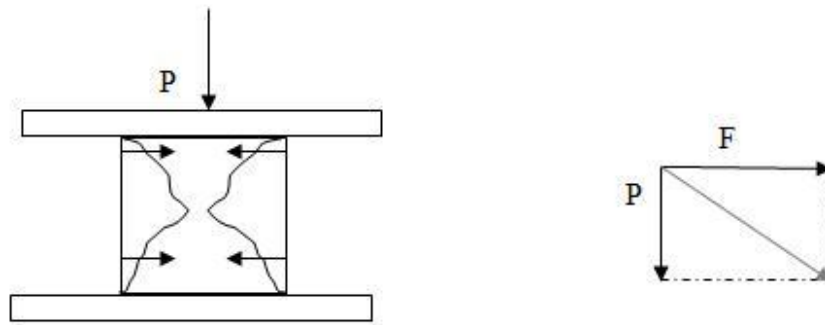


Figure III.11- Mode de rupture des bétons de sable en compression

P : Force de rupture.

F : Force de forttement



Figure III.12- Mode de rupture des bétons de sable sans fibres



Figure III.13- Modes de rupture des bétons de sable fibré

III.5-Analyse microstructurale

Les zones d'interfaces matrice-granulat, la compacité et la microporosité ont été explorées par une observation de la microstructure au microscope électronique à balayage (MEB) présentée sur les figures II (14, 15 et 16). Cette dernière montre la présence d'un certain nombre de micropores visibles qui diffèrent d'un béton à un autre. Ceci s'explique par l'arrangement de l'étendue granulaire des mélanges secs. Le dosage et la finesse de l'addition minérale jouent un rôle primordial dans le remplissage de la porosité et de la microporosité et l'amélioration de la compacité.

Les figures montrent que l'ensemble des bétons de sable présentent une microstructure dense avec une bonne adhérence matrice cimentaire – granulat. Par l'analyse de la figure 14, on peut voir le grain sable siliceux cramponné à la matrice cimentaire. Avec la présence d'un certain nombre de lamelles de portlandite dans la zone d'interface.

La bonne liaison carrière sable-matrice cimentaire a été présentée au niveau de la figure 15. Cela peut être attribué à l'état de surface de ce dernier qui est généralement rigoureux. La même chose pour le sable de laitier granulé présente aussi une excellente liaison avec la matrice, grâce à la structure très poreuse de ce type de sable. Les résultats de cette partie (de la microstructure des bétons de sable) confirment les résultats obtenus par Benaïssa [Benaïssa *et al*, 1993]¹.

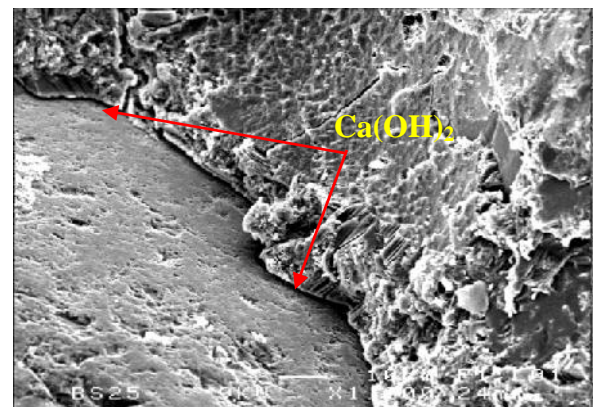
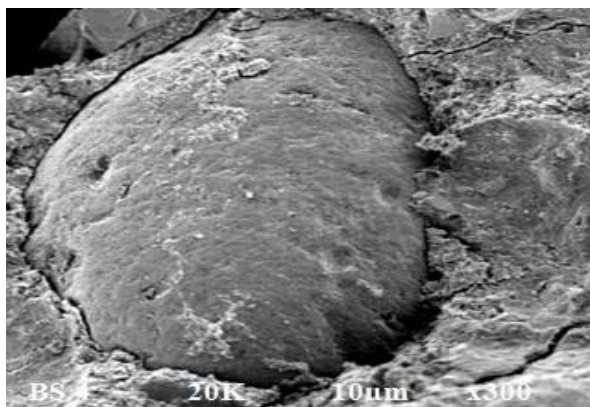


Figure III.14- Liaison sable siliceux- matrice cimentaire

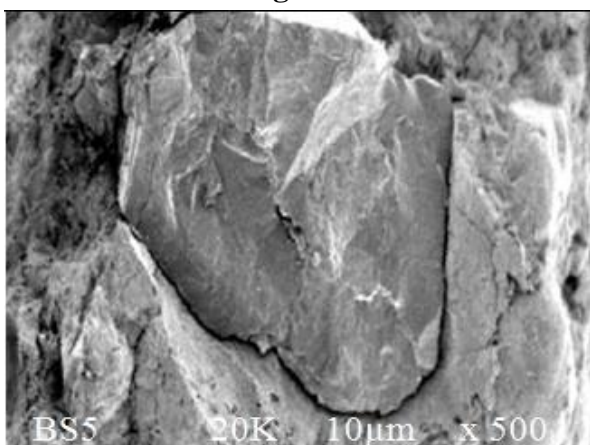


Figure III.15- Liaison sable de carrière - matrice cimentaire

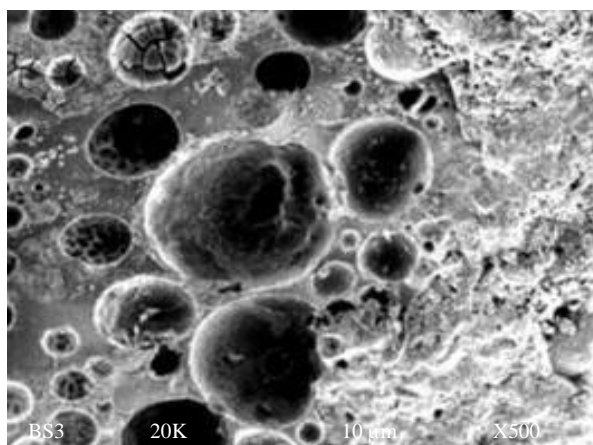


Figure III.16- Liaison sable de laitier granulé - matrice cimentaire

La liaison fibre de polypropylène -matrice cimentaire présentée au niveau de la figure 17 peut justifier l'amélioration de la ductilité et la résistance à la traction par flexion, et donne aussi une idée de la bonne d'adhérence entre la fibre et la matrice.

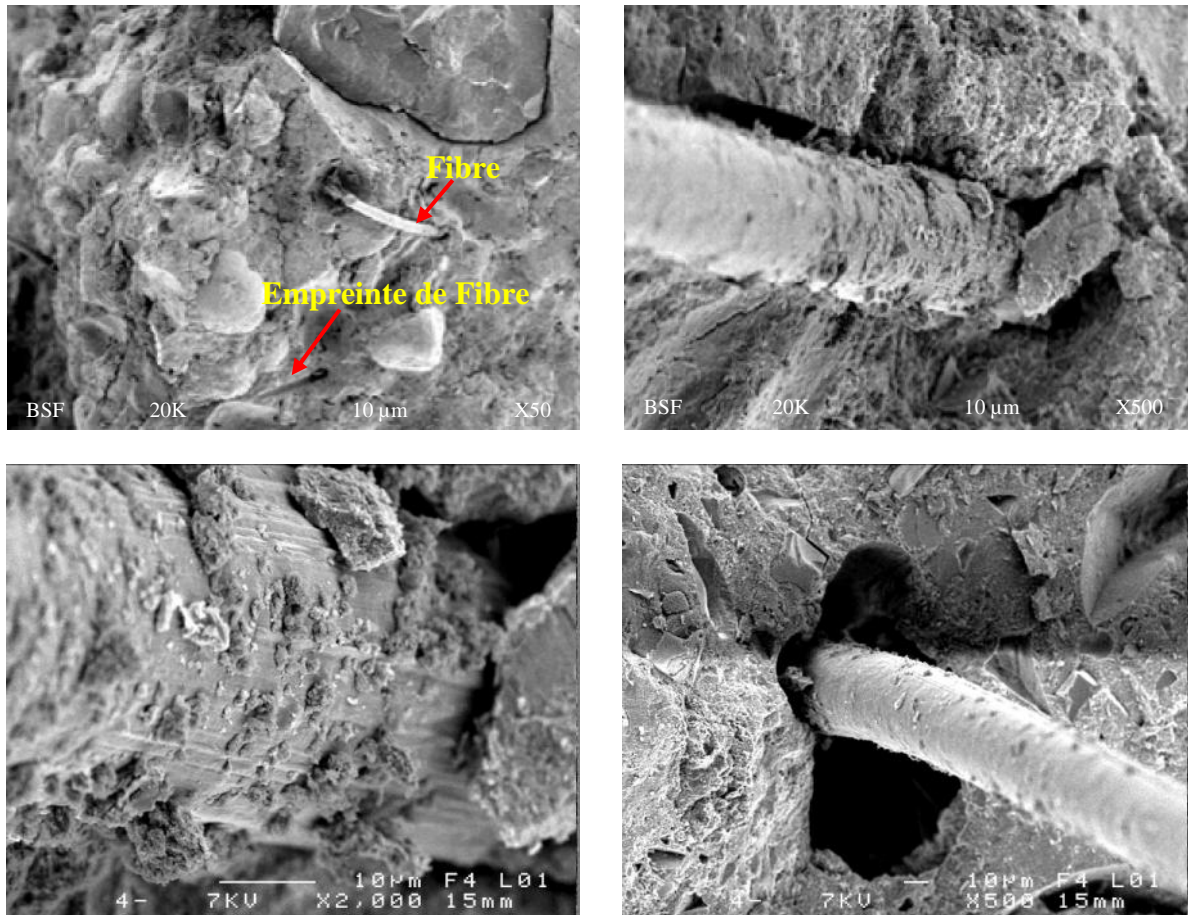


Figure III.17- liaison fibre –matrice cimentaire

III.6- CONCLUSION

Ce chapitre qui présente une étude sur le comportement physico-mécanique et microstructurale des bétons de sable, a mis en évidence le rôle et l'influence de la nature des sables et l'ajout de fibres de polypropylène sur ce comportement.

Par l'analyse des résultats obtenus nous pouvons énoncer :

- ❖ La granulométrie, la morphologie et les propriétés minéralogiques des granulats influencent considérablement la résistance mécanique des bétons. La bonne granulométrie du mélange sable de carrière - sable siliceux, sable de laitier cristallisé et sable de carrière donnent des bétons plus compacts et mécaniquement les plus résistants. Par contre le sable laitier granulé par son caractère poreux et absorbant présente les plus faibles résistances.

- ❖ L'incorporation des fibres de polypropylène dans les bétons de sable est bénéfique pour l'amélioration de la ductilité de ces matériaux. Les résultats obtenus montrent que cette incorporation affecte légèrement la maniabilité et la masse volumique des bétons frais. Par contre, les résistances mécaniques en traction par flexion sont légèrement améliorées avec l'introduction de fibres.
- ❖ Une diminution du retrait total en fonction du taux en fibres de polypropylène a été obtenue, ceci est dû essentiellement aux caractéristiques mécaniques et géométriques des fibres de polypropylène utilisé. Ces fibres, qui sont généralement courtes, s'opposent aux contraintes de déformation du retrait, limitent ainsi les variations dimensionnelles, ce qui réduit la formation et la propagation des microfissures.
- ❖ Une nouvelle gamme de bétons de sable léger a été définie grâce à l'utilisation du sable de laitier granulé. Ce type de béton de sable dont la densité est de l'ordre de 1470 Kg/m³ répond à certaines exigences de la construction en particulier l'isolation thermique et phonique.
- ❖ L'emploi des laitiers de haut fourneau directement dans la fabrication des bétons de sable en tant que fillers peut apparaître intéressant dans plusieurs points de vue: maniabilité, résistance, économie et écologie.
- ❖ Les observations au microscope électronique à balayage (MEB) montrent que l'ensemble des bétons de sable présente une microstructure plus au moins dense et avec un minimum de porosité. La zone d'interface granulat – matrice cimentaire se diffère d'un béton à un autre en fonction du type de sable. La bonne adhérence entre la fibre et la matrice cimentaire (liaison fibre – matrice cimentaire) peut justifier l'amélioration de la ductilité et la résistance à la traction par flexion.

**DURABILITE DES MORTIERS ET
DES BETONS DE SABLE FIBRÉ
DANS LES DIFFERENTS MILIEUX
AGRESSIFS**

CHAPITRE IV

CHAPITRE IV

Durabilité des mortiers et des bétons de sable fibré dans les différents milieux agressifs

SOMMAIRE

IV.1- Introduction	104
IV.2-Procédure expérimentale	104
IV.2.1- Attaque sulfatique.....	104
IV.2.1.1- Résistance en compression et en traction par flexion	106
IV.2.1.2- Variation de masse	106
IV.2.1.3- Profondeur d'alcalinité	106
IV.2.1.4- Analyse macro et microstructurale	106
IV.2.2- Absorption d'eau par capillarité	108
IV.2.3- Perméabilité au gaz (Hélium).....	109
IV.2.4- Diffusion des ions chlorure	111
IV.3- Résultats et interprétation	115
IV.3.1- Influence de l'attaque sulfatique sur la résistance mécanique	115
IV.3.2- Variation de masse.....	140
IV.3.3- Influence de la nature des additions minérales et le mode de conservation sur la profondeur d'alcalinité.....	146
IV.3.4- Dégradation macrostructurale et microstructurale.....	150
IV.3.5- Propriétés de transfert.....	164
VI.4-Conclusion	173

IV.1- Introduction

La durabilité des matériaux cimentaires est définie comme la résistance aux diverses agressions au cours du temps. Ces agressions ont des origines différentes (chimique, physique, physico-chimique et mécanique).

Les additions minérales, utilisées comme ajout ou substituant au ciment, ont plusieurs effets bénéfiques qui favorisent leurs utilisations dans les matériaux cimentaires. Dans le cadre de la valorisation des sous-produits et déchets industriels, l'utilisation du laitier granulé et cristallisé comme addition minérale présente non seulement une amélioration de la durabilité et des caractéristiques rhéologiques et mécaniques, mais aussi elle présente un intérêt économique et écologique.

Ce dernier chapitre est consacré pour évaluer la durabilité des mortiers et des bétons de sable à base de matériaux locaux. Cette durabilité est estimée par des tests mécaniques, physiques et chimiques qui concernent la détermination des indicateurs principaux de la durabilité (porosité, absorption et perméabilité) et de la dégradation physico-mécanique et chimique (perte de masse, chute de résistance mécanique et détérioration de la microstructure) suite à l'attaque sulfatique et aux ions chlore. Ainsi, ce chapitre est composé de deux parties principales.

Dans la première partie nous présenterons les résultats expérimentaux de l'effet de la nature des additions minérales sur la résistance des mortiers et bétons de sable à l'attaque sulfatique externe. Ensuite nous exposerons les effets de cette attaque sur la microstructure.

La deuxième partie est consacrée à l'étude des différents mécanismes de transfert des mortiers et bétons de sable de l'étude.

L'objectif principal de cette expérimentation est d'étudier l'évolution de la résistance mécanique et les changements apportés à la microstructure des mortiers et des bétons de sable à base d'additions minérales (laitier granulé, laitier cristallisé et fillers calcaire) vis-à-vis à l'attaque de sulfate de magnésium ($MgSO_4$).

IV.2-Procédure expérimentale.

Nous exposerons ci-dessous les méthodes expérimentales utilisées pour caractériser la durabilité des mortiers et des bétons de sable d'étude. Les testes de caractérisation sont :

- ✓ Détermination de la résistance des mortiers et des bétons de sable fibré à l'attaque sulfatique.
- ✓ Porosité accessible à l'eau
- ✓ Absorption d'eau par capillarité
- ✓ Perméabilité au gaz
- ✓ Diffusion des ions chlorure

IV.2.1- Attaque sulfatique

L'étude expérimentale est menée sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (4×4×16)cm. La démarche de cette étude consiste à quantifier dans le temps la résistance à l'attaque sulfatique externe caractérisée par la dégradation physico-mécanique et

microstructurale des mortiers à base de laitiers de haut fourneau (laitier granulé et/ou laitier cristallisé), en substitution partielle au ciment portland et des bétons de sable à base de laitiers de haut fourneau (granulé et cristallisé) et fillers calcaires conservés dans l'eau et dans une solution eau-sulfate de magnésium ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) de concentration 50g/l avec renouvellement des solutions et contrôle du PH. Ce test est conforme à la norme NF P18-837[NF P18-837, 1993]

La variation du PH de la solution sulfatique en fonction de l'âge de conservation est illustrée par la figure IV.1.

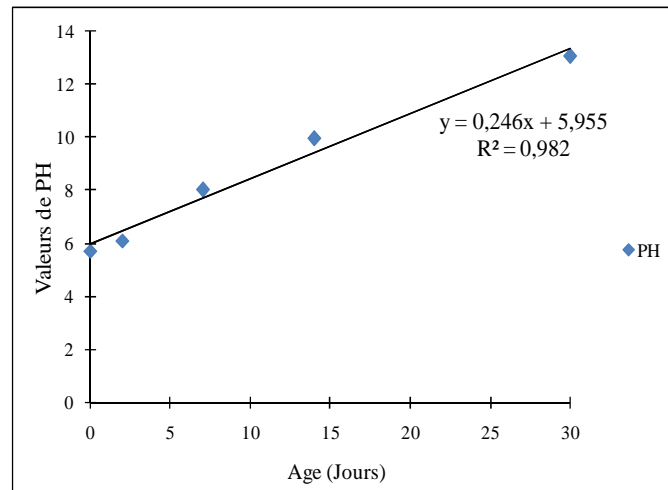


Figure IV.1-Variation de PH de la solution sulfatique en fonction de l'âge de conservation

Le mode de conservation des éprouvettes est illustré par l'organigramme suivant :

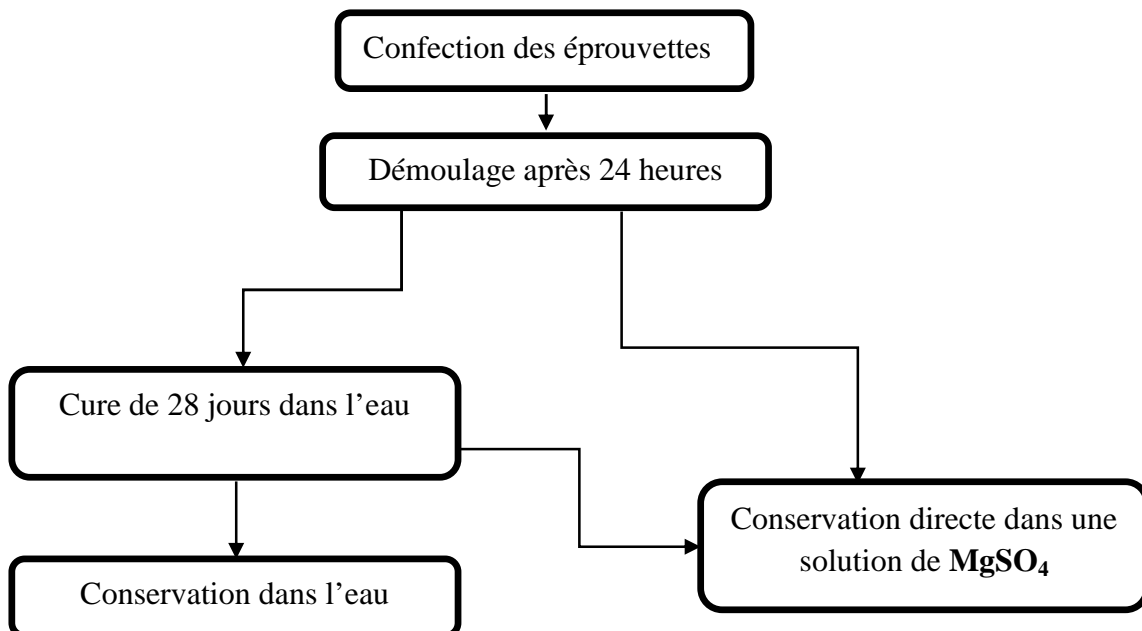


Figure IV.2- Schéma présentant le mode de conservation

IV.2 .1.1- Résistance en compression et en traction par flexion

Les éprouvettes prismatiques (4×4×16) cm sont utilisées pour la détermination de la résistance en traction par flexion et celles de section (4x4) cm sont utilisées pour les tests de compression. Les essais sont réalisés selon les normes NF EN12390-1 [NF EN12390-1, 2001] et NF EN12390-3 [NF EN12390-3, 2000].

IV.2.1.2- Variation de masse

Le principe d'essai consiste à suivre dans le temps la variation de masse des éprouvettes de mortiers et de bétons de sable conservées en humidité saturante et dans une solution de sulfate de magnésium.

La variation de masse des échantillons selon les trois modes de conservation sont menées sur des éprouvettes prismatiques de dimension (4×4×16) cm. Le pesage est effectué à l'aide d'une balance électronique.

La variation de masse est déterminée selon la formule suivante :

$$PM\% = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad \text{Eq- IV.1}$$

M_1 : masse de l'éprouvette après démoulage en (g)

M_2 : masse de l'éprouvette après immersion aux différentes échéances en (g)

IV.2.1.3- Profondeur d'alcalinité

La Profondeur d'alcalinité des mortiers et des bétons de sable conservée dans un milieu sulfatique a été déterminée par pulvérisation d'une solution de phénolphtaléine sur les surfaces fraîches des échantillons obtenus après l'essai de traction par flexion.

La phénolphtaléine est un indicateur coloré de PH qui change de couleur selon la valeur de PH, elle est incolore sur les zones de $PH < 10$ et de rose sur les zones alcalin avec des PH de 12 à 14.

IV.2.1.4 - Analyse macro et microstructurale

L'analyse macrostructurale des échantillons est remarquée par observations visuelles. Elle nous permet de bien voir le degré d'endommagement de ces échantillons conservés dans une solution de sulfate de magnésium ($MgSO_4$).

L'analyse de la microstructure est réalisée à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) associées de une analyse élémentaire par spectrométrie de rayon X (EDX), effectuée sur des échantillons de mortier et de béton de sable ayant subis une attaque sulfatique.

Les échantillons après séchage sont déposés sur un porte – échantillons comme le montre la figure IV.3

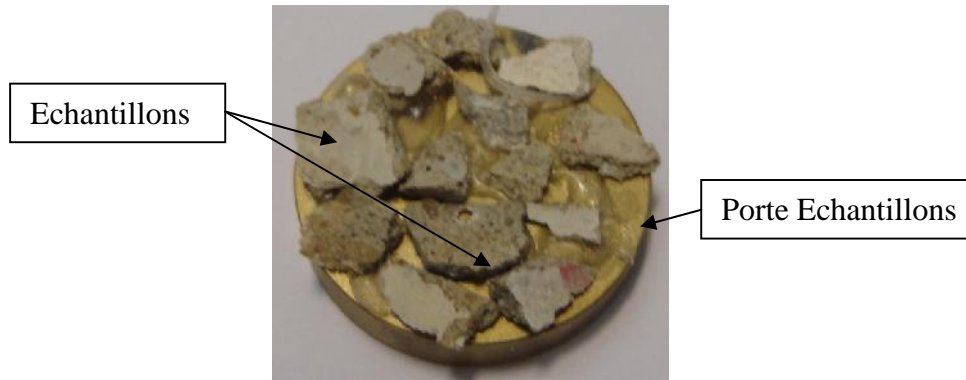


Figure IV.3-Echantillons préparées pour l'analyse au MEB

IV.2 .2 - Porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau est définie par le rapport du volume total des pores ouverts dans un corps poreux à son volume apparent. Elle s'exprime en pourcentage du volume apparent. Cette porosité est déterminée selon le mode opératoire des recommandations de l'**AFPC-AFREM** [AFPC-AFREM, 1997]. Les mesures sont effectuées après 28 jours de maturation sur trois échantillons prismatiques (4x4x5) cm de béton de sable ou de mortier pour chaque formulation. Le principe de cette méthode consiste en réalité de peser les échantillons sous différents états (hydrostatique, saturé et sec).

Les échantillons sont placés dans un dessiccateur à vide, sous une dépression de 25 mbar pendant 4 heures, puis sont immergés dans l'eau, toujours sous vide, pendant 20heures \pm 1heure pour s'assurer que les échantillons sont saturés en eau.

Ensuite, les éprouvettes subissent une pesée hydrostatique mentionnée sur la figure (IV.4/ B) qui donne la masse du corps d'épreuve immergée M_{eau} .

Les éprouvettes sont ensuite pesées à l'air on obtient alors la masse du corps d'épreuve imbibé pesé dans l'air (M_{air}). La troisième pesée nécessite un passage dans une étuve de séchage à $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, jusqu'à stabilisation de la masse de l'échantillon. La dernière pesée nous fournit la masse sèche du corps d'épreuve (M_{sec})

A partir de ces trois masses on détermine la porosité accessible à l'eau ϵ en % et la masse volumique apparente sèche en g/cm^3 .

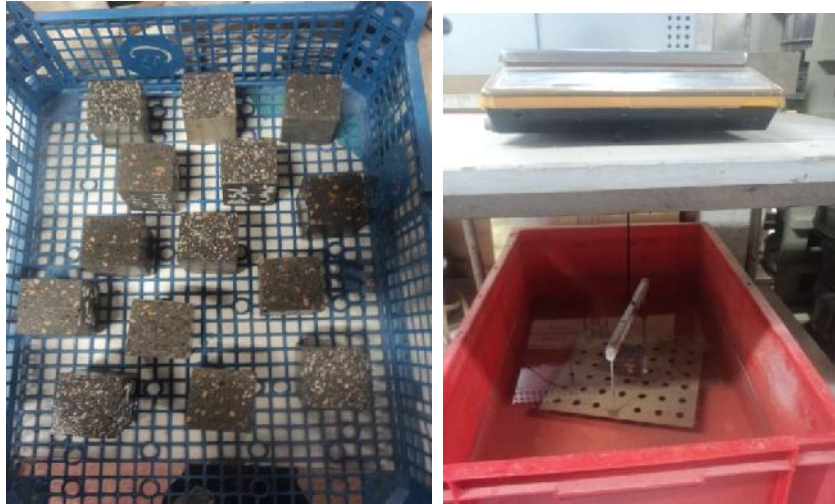
$$= \frac{M_{\text{air}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{air}} - M_{\text{eau}}} \times 100 \quad \text{Eq- IV.2}$$

$$= \frac{M_{\text{sec}}}{M_{\text{air}} - M_{\text{eau}}} \quad \text{Eq- IV.3}$$

M_{eau} : Masse du corps d'épreuve immergé dans l'eau (en gr)

M_{air} : Masse du corps d'épreuve imbibé pesé dans l'air (en gr)

M_{sec} : Masse du corps d'épreuve sec (en gr)



A/ Epreuve (4x4x5) cm de l'essai B/ Pesée hydrostatique

Figure IV.4- Mesure de la porosité accessible à l'eau et de la masse volumique apparente

IV.2.3- Absorption d'eau par capillarité

L'essai d'absorption d'eau par capillarité est un essai qui nous donne une information sur la capacité d'absorption d'eau dans un béton par remontée capillaire. Il consiste à mesurer la masse d'eau absorbée par une éprouvette de béton préalablement conditionnée par un étuvage à 80°C.

L'essai a été réalisé suivant la recommandation de l'**AFPC-AFREM** [AFPC-AFREM, 1997] sur des échantillons de béton de sable et de mortiers de forme cylindrique et de dimensions (x h) (11x 5) cm. Deux échantillons pour chaque type du béton et du mortier ont été testés, la procédure de pré-conditionnement des échantillons est la suivante :

- Un séchage de l'échantillon à 80°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante (l'état sec est obtenu lorsque deux pesées espacées de 24 heures, ne diffèrent pas plus, de 0,1%).
- L'étanchéité latérale est assurée à l'aide d'un papier d'aluminium adhésif.
- Les échantillons sont immergés dans l'eau du récipient sur une hauteur maximale de 3 millimètres à l'aide de cales (voir la figure IV.5). Par ailleurs, le récipient est muni d'un couvercle évitant l'évaporation de l'eau.
- L'essai consiste à suivre par pesées successives la quantité d'eau absorbée par un échantillon de béton ou de mortier préalablement séché à des échéances de 0, 15min, 30min, 1h, 2h, 4h, 8h et 24h. Ce qui permet une caractérisation indirecte de la porosité capillaire.

À partir des mesures des masses et pour chaque échéance t, on peut déterminer le coefficient d'absorption capillaire par l'équation suivante :

$$Ca_t = \frac{M_t - M_0}{A} \quad \text{Eq- IV.4}$$

Ca_t : Coefficient d'absorption à l'échéance t (kg/m²).

M_t : Masse de l'éprouvette à une échéance donnée (kg).

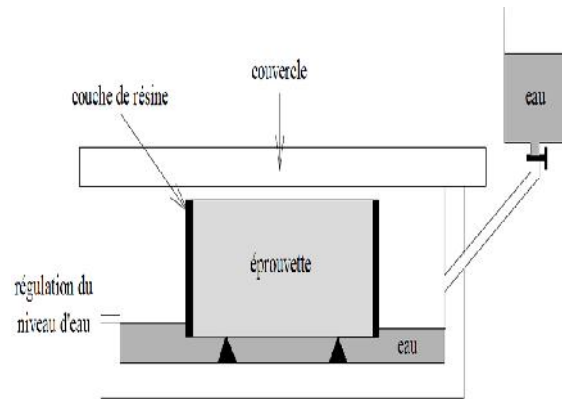
M_0 : Masse initiale de l'éprouvette (kg).

A : la section de l'éprouvette au contact de l'eau (m^2).

Finalement, le coefficient d'absorption capillaire est présenté schématiquement en fonction de la racine carrée du temps.



A/ Dispositif expérimental pour l'essai d'absorption capillaire



B/ Schéma du dispositif de la mesure de l'absorption d'eau par capillarité

[AFPC-AFREM 1997].

Figure IV.5- Schéma du dispositif expérimental pour l'essai d'absorption capillaire

IV.2.4-Perméabilité au gaz (Hélium)

La perméabilité au gaz est un indicateur de durabilité qui mesure la capacité de matériau poreux traversé par des fluides sous un gradient de pression. Le flux se produit dans un réseau poreux. Le but de cet essai est de mesurer la perméabilité au gaz traversant un échantillon de béton, en fonction de la pression donnée.

La perméabilité a été réalisée suivant la recommandation de l'AFPC-AFREM [AFPC-AFREM, 1997], sur deux échantillons de béton de sable et de mortier de chaque formulation de diamètre = 11 cm et hauteur $h = 5$ cm. Les essais ont été réalisés après une cure humide de plus 60 jours à une température de 20°C.

Préparation des échantillons

- ✓ Séchage à 80°C jusqu'à stabilisation de la masse (l'état sec est obtenu lorsque deux pesées espacées de 24 heures, ne diffèrent pas plus de 0,05%).
- ✓ Les échantillons sont placés dans un dessiccateur hermétiquement fermé 24h avant l'essai (figure IV.6)
- ✓ Une dernière pesée est effectuée à la sortie de dessiccateur avant l'essai (pour s'assurer de la stabilisation de la masse).
- ✓ L'échantillon est placé dans le porte échantillon préalablement graissé, puis placé dans la cellule de perméabilité. Une chambre à air torique gonflée avec une pression minimale de 6

bars comprime le porte échantillon et assure ainsi l'étanchéité latérale. Le dispositif d'essai représenté sur la figure IV.7

- ✓ La pression de confinement latéral est établie à 8 Bars.
- ✓ Les pressions d'essais sont 1, 2, 3 et 4 Bars.



Figure IV.6- Dessiccateur à vide pour le dégazage des échantillons



Figure IV.7- Schéma du dispositif expérimental pour l'essai de la perméabilité au gaz

Détermination de la perméabilité apparente

La perméabilité apparente (K_{app}) des échantillons de béton de sable et de mortier est déterminée à partir de la formule suivante :

$$K_{app} = \frac{Q_1 2\mu L P_{atm}}{S(P_1^2 - P_{atm}^2)} \quad \text{Eq- IV.5}$$

Q_1 : Débit volumique à l'entrée (m^3/s)

μ : Viscosité dynamique de l'hélium (Pa.s)

P_1 : Pression d'injection (Pa)

P_{atm} : Pression atmosphérique (Pa)

L : Epaisseur de l'échantillon (m)

S : Section de l'échantillon (m²)

Le coefficient de Klinkenberg est en fonction de la finesse du réseau poreux et de la nature du gaz. Ce coefficient est défini par le rapport entre la pente des courbes représentatives et leurs ordonnées à l'origine (K_{int}). (Figure IV.8)

La perméabilité intrinsèque (K_{int}) est la valeur limite de la perméabilité apparente lorsque que la pression moyenne du fluide tend vers l'infini, c'est-à-dire lorsque le gaz tend vers une phase condensée (liquide).

A partir des mesures de la perméabilité apparentes on peut déduire la perméabilité intrinsèque K_{int} selon l'approche de Klinkenberg

$$K_{app} = K_{int} \left(1 + \frac{\beta}{P_m} \right) \quad \text{Eq- IV.6}$$

P_m : Pression moyenne, $P_m = \frac{(P_1 + P_{atm})}{2}$

β : Coefficient de Klinkenberg.

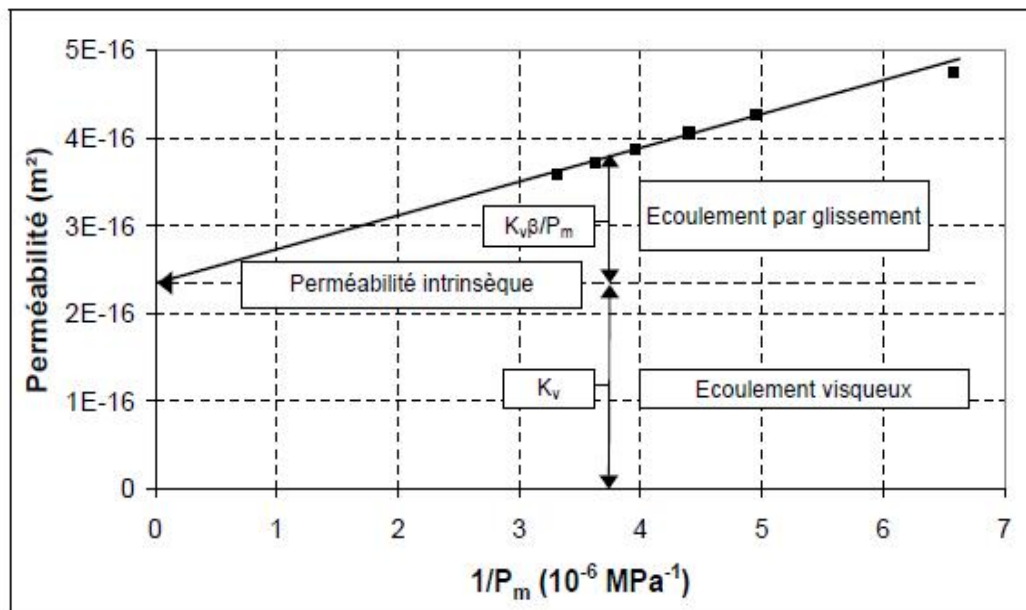


Figure IV.8-Perméabilité en fonction de l'inverse de la pression moyenne [Rozière, 2007]

IV.2.5 - Coefficient de diffusion des ions chlorures

Le coefficient de diffusion des ions chlorures est un paramètre de transport très important, qui caractérise la pénétration d'agents agressifs dans un réseau poreux exposé en environnement marin.

Dans des conditions réelles, la diffusion des ions chlorures demande beaucoup de temps qui peut aller de plusieurs jours à quelques mois. C'est dans cette optique que plusieurs recherches sont menées afin de mettre en place des méthodes d'essais accélérées permettant d'avoir des conditions expérimentales équivalentes aux conditions réelles. En effet, un compromis entre rapidité et représentativité semble être atteint par un essai de migration en régime stationnaire dont le mode opératoire est décrit dans la Nordtest method **NT BUILD 492** [NT BUILD 492, 1999].

Préparation des échantillons

La préparation des éprouvettes avant l'essai est la suivante :

L'essai a été effectué sur des échantillons de mortier et de béton de sable. Après démoulage à 24 heures et une cure en humidité saturante pendant 28 jours, les éprouvettes cylindriques de diamètre $\phi = 11$ cm et hauteur $h = 22$ cm sont sciées pour obtenir trois disques de diamètre $\phi = 11$ cm et hauteur $h = 5$ cm. Ils sont ensuite saturés sous vide dans un dessiccateur étanche avec un liquide d'imbibition. Les échantillons sont maintenus sous pression réduite et dans ce liquide pendant 20 ± 1 h à $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Tous les échantillons sont ensuite montés dans la cellule d'essai. Les compartiments amont et aval sont remplis des solutions indiquées sur le schéma de la figure IV.9. L'essai a été réalisé dans une chambre régulée à une température constante de 21°C .

L'anode et la cathode sont reliées au générateur comme le montre les figures IV.10 et IV.11, et la tension du champ électrique appliquée aux bornes de l'échantillon varie en fonction de la nature du béton, celle-ci est déterminée en appliquant une tension initiale de 30V.

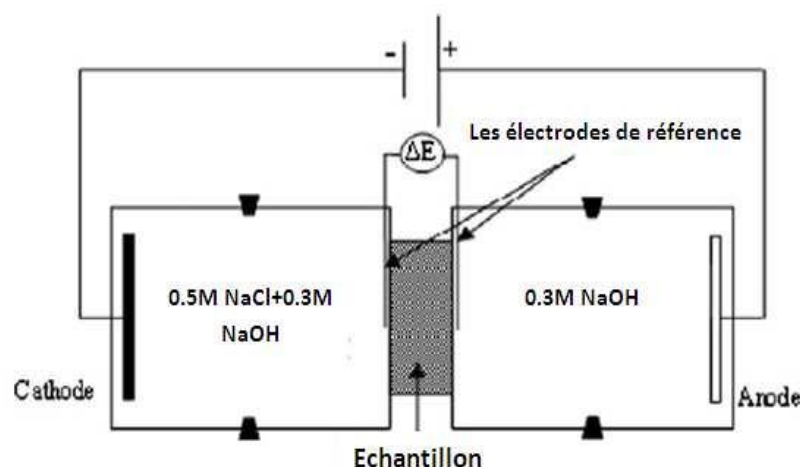
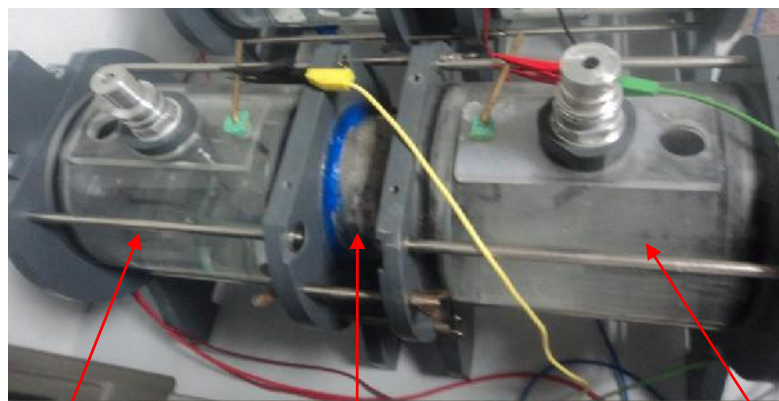


Figure IV.9-Schéma de principe des essais de migration. [Niknezhad et Kamali-Bernard, 2015]



Figure IV.10-Dispositif expérimental pour l'essai de migration des ions chlorure



Compartiment aval

Echantillon

Compartiment amont

Figure IV.11-Cellule d'essai de la diffusion

Détermination du coefficient de diffusion

À la fin de l'essai de migration des ions chlorures, l'échantillon est fendu en deux. Un indicateur colorimétrique à base de nitrate d'argent permet de déterminer la profondeur de pénétration des chlorures. Cette profondeur de pénétration apparaît en couleur claire, tandis que la zone ne contenant pas de chlorures apparaît en couleur foncée. La méthode de mesure de la profondeur de pénétration des chlorures est présentée par les figures IV.12 et IV.13.

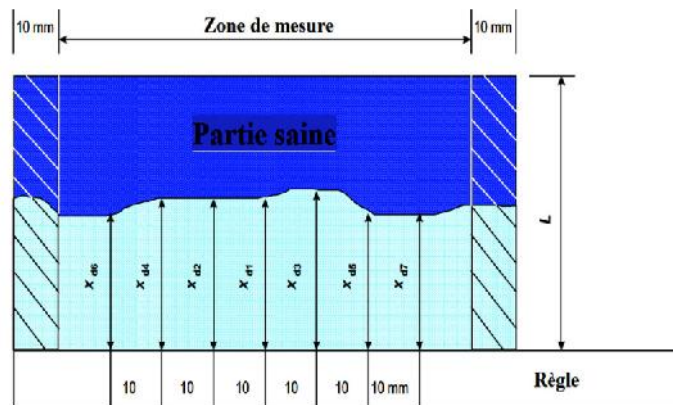


Figure IV.12- Mesure de la profondeur de pénétration des chlorures [NT BUILD 492 ,1999].

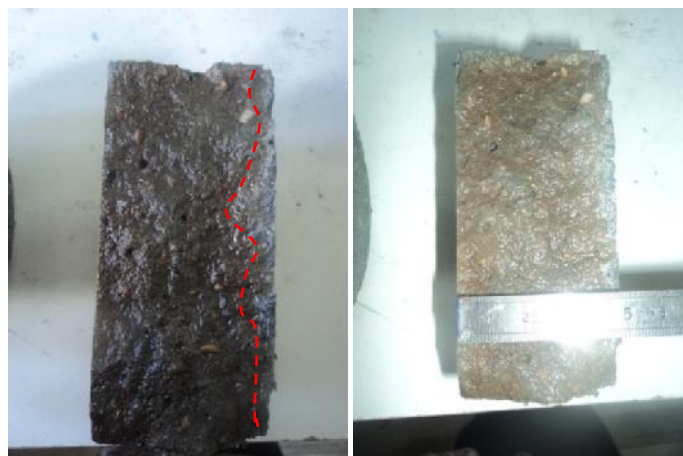


Figure IV.13- Profondeur de pénétration des chlorures

Le calcul du coefficient de diffusion effectif ($D_{e, up}$) d'un corps d'épreuve s'effectue selon la formule suivante

$$D_{nssm} = \frac{0,0239(273+T)L}{(U-2)t} \left(X_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273+T)LX_d}{U-2}} \right) \quad \text{Eq- IV.7}$$

D_{nssm} : Coefficient de migration non-stationnaire ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)

U : Valeur absolue de la tension appliquée (V)

T : Valeur moyenne des températures initiales et finales dans la solution amont ($^{\circ}\text{C}$)

L : Epaisseur de l'éprouvette (mm)

X_d : Valeur moyenne de la pénétration des profondeurs (mm)

t : Durée d'essai (heure)

IV.3- Résultats et interprétation

IV.3.1- Influence de l'attaque sulfatique sur la résistance mécanique

L'étude de la résistance aux attaques sulfatiques est un indicateur spécifique de la durabilité du béton souvent recherchée pour évaluer la durée de vie des ouvrages.

Cette partie présente les résultats de l'effet de l'attaque sulfatique sur l'évolution des résistances mécaniques en compression et en traction par flexion des mortiers et des bétons de sable à base de laitier granulé et/ou cristallisé.

Les essais de la résistance en compression et en traction par flexion ont été effectués aux différentes échéances allant de 28 jours jusqu'à une année. Les résultats obtenus de la résistance moyenne, associée par l'écart-type et le coefficient de variation, sont regroupés dans les tableaux et illustrés par les figures ci-dessous.

IV.3.1.1- Effet de la nature des additions sur l'évolution de la de la résistance mécanique des mortiers

IV.3.1.1.1- Cas de conservation dans l'eau

L'effet du taux de laitier de haut fourneau (granulé et/ou cristallisé) en substitution partielle au ciment sur les résistances mécaniques des mortiers conservés en humidité saturante est illustré par les figures IV-14, IV-15, IV-16 et IV-17 et présenté aux tableaux IV.1, IV.2, IV.3, IV.4, IV.5 et IV.6.

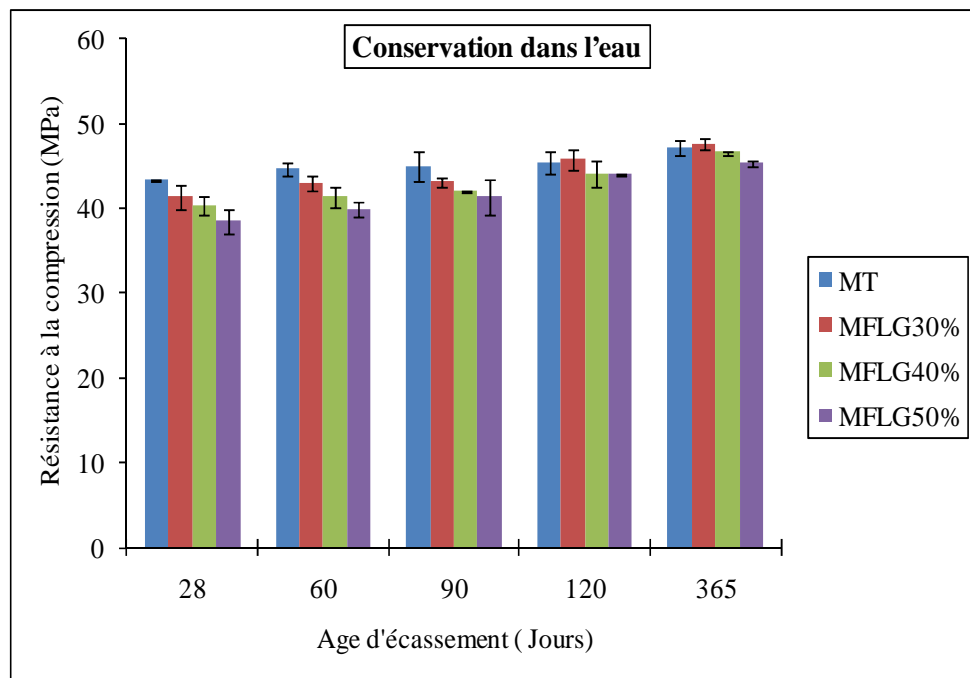


Figure IV.14- Résistance en compression des mortiers à base de laitier granulé en substitution partielle au ciment conservés dans l'eau

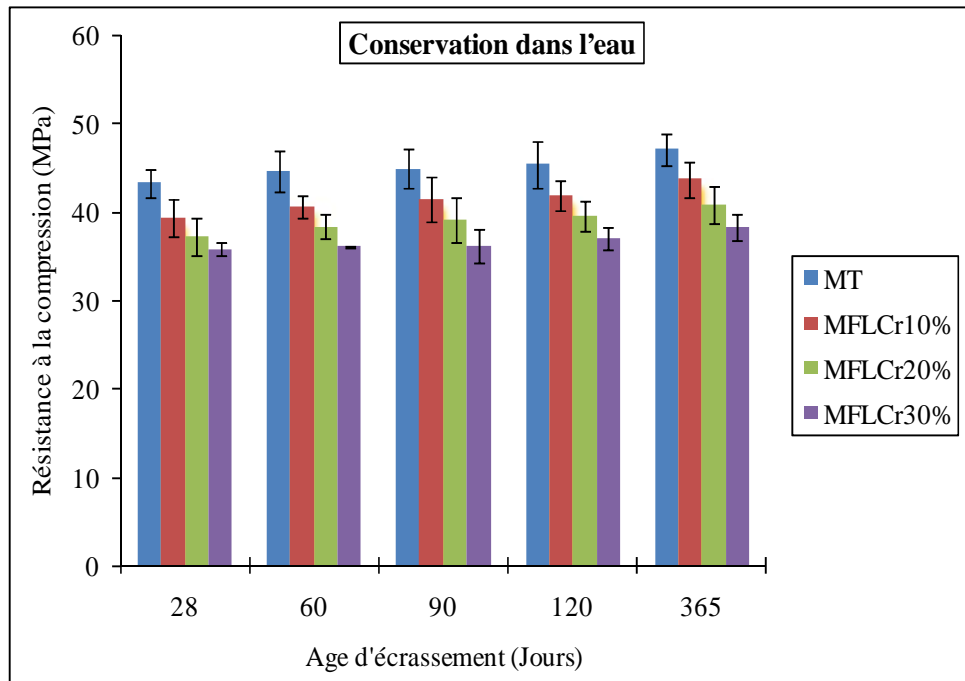


Figure IV.15- Résistance en compression des mortiers à base de laitier cristallisé en substitution partielle au ciment conservés dans l'eau

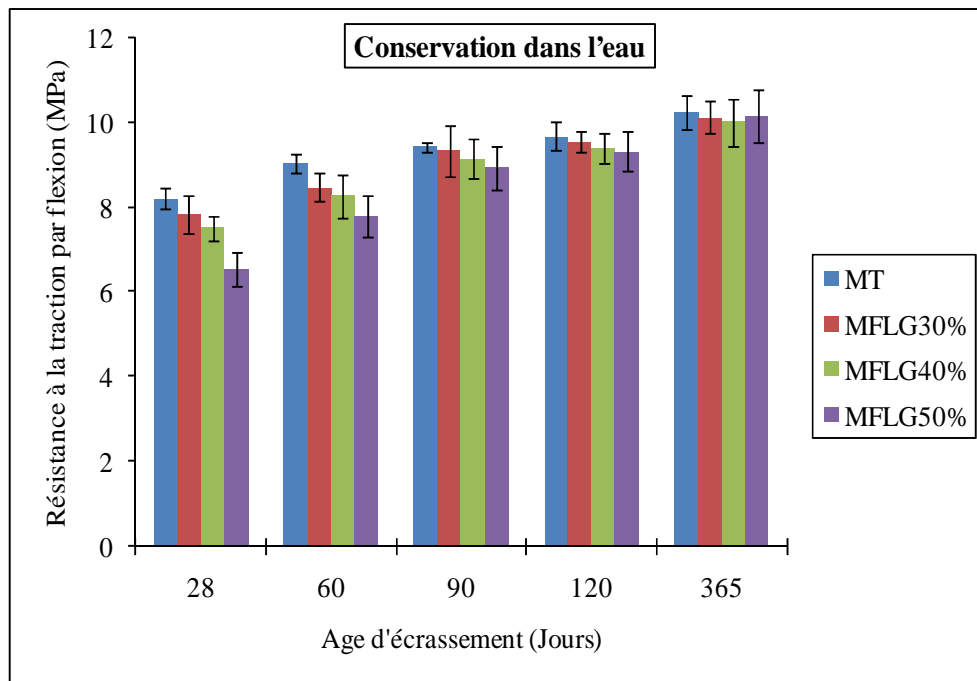


Figure IV.16- Résistance en traction par flexion des mortiers à base de laitier granulé en substitution partielle au ciment conservés dans l'eau

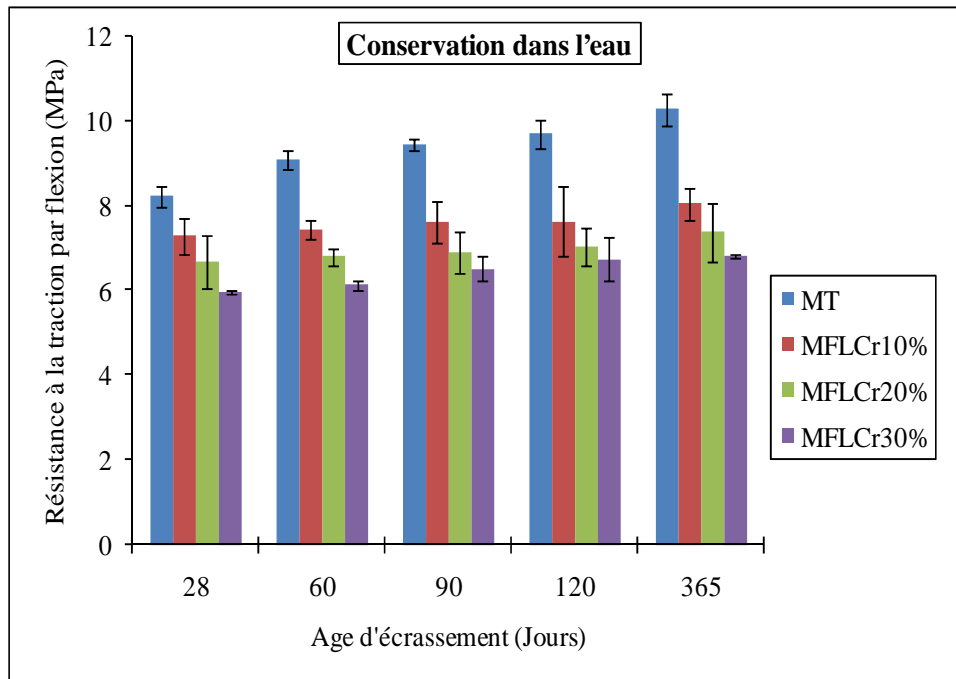


Figure IV.17- Résistance en traction par flexion des mortiers à base de laitier cristallisé en substitution partielle au ciment conservés dans l'eau

Les figures IV.14, IV-15, IV-16 et IV-17 montrent que les résistances mécaniques des mortiers conservés en humidité saturante sont très influencées par la nature et le taux de substitution en laitier.

Dans le cas des mortiers à base de laitier granulé les résistances mécaniques en compression et en traction par flexion de 28 à 60 jours diminuent avec l'augmentation de taux de la substitution en laitier granulé. Ceci s'explique par l'activité hydraulique lente de laitier granulé à court terme et aussi par diminution de la quantité du clinker en particulier le taux des minéraux C_3S et C_2S qui sont responsables de l'augmentation de la résistance à court terme.

Après 60 jours on constate une évolution progressive des résistances mécaniques dans le temps seulement pour les mortiers à base de laitier granulé. Par contre les mortiers témoin présentent une progression lente ou stationnaire. Les gains de résistance en compression des mortiers avec laitier granulé sont de l'ordre de 15%, 16% et 18% respectivement avec les taux de 30, 40 et 50% de laitier granulé en comparaison avec celle obtenue à 28 jours.

Cette progression dans la résistance des mortiers à base de laitier granulé peut s'expliquer par la finesse et l'activité hydraulique latente de laitier granulé. Cela déjà a été confirmé par [Nacéri et Messaoudene, 2006] qui ont montré que le mortier avec 30% de laitier granulé peut atteindre des résistances à la compression et à la traction par flexion comparable à celle témoin (sans laitier). Ils ont montré aussi que l'activité hydraulique et la surface spécifique de

laitier granulé sont les principaux facteurs responsables de l'accroissement de la résistance mécanique.

Dans le cas des mortiers avec laitier cristallisé en substitution partielle en ciment, on constate selon les figures IV.15 et IV.17, une régression de la résistance mécanique avec l'augmentation du taux de substitution. Cette dégressivité peut s'expliquer par la perturbation et le ralentissement du processus d'hydratation de ciment avec l'augmentation de taux de laitier cristallisé. Ce type de laitier correspond à une forme minéralogiquement et chimiquement stable et son pouvoir hydraulique lorsqu'il existe ne peut être que modeste [Alexandre et Sebileau, 1988]

IV.3.1.1.2- Cas de conservation dans la solution sulfatique après démoulage

L'effet du taux de laitier de haut fourneau (granulé et cristallisé) sur les résistances mécaniques des mortiers conservés directement dans une solution de sulfate de magnésium $MgSO_4$ après démoulage est illustré par les figures IV-18, IV-19, IV-20 et IV-21 associés par les tableaux IV.1, IV.2, IV.3 , IV.4, IV.5et IV.6.

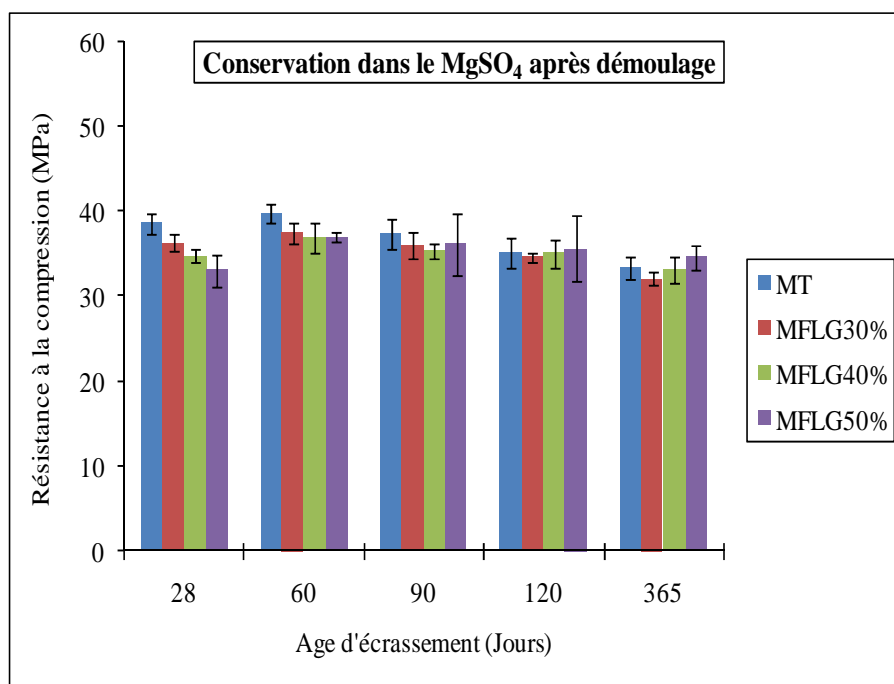


Figure IV.18- Résistance en compression des mortiers à base de laitier granulé en substitution partielle au ciment conservés dans le $MgSO_4$ après démoulage

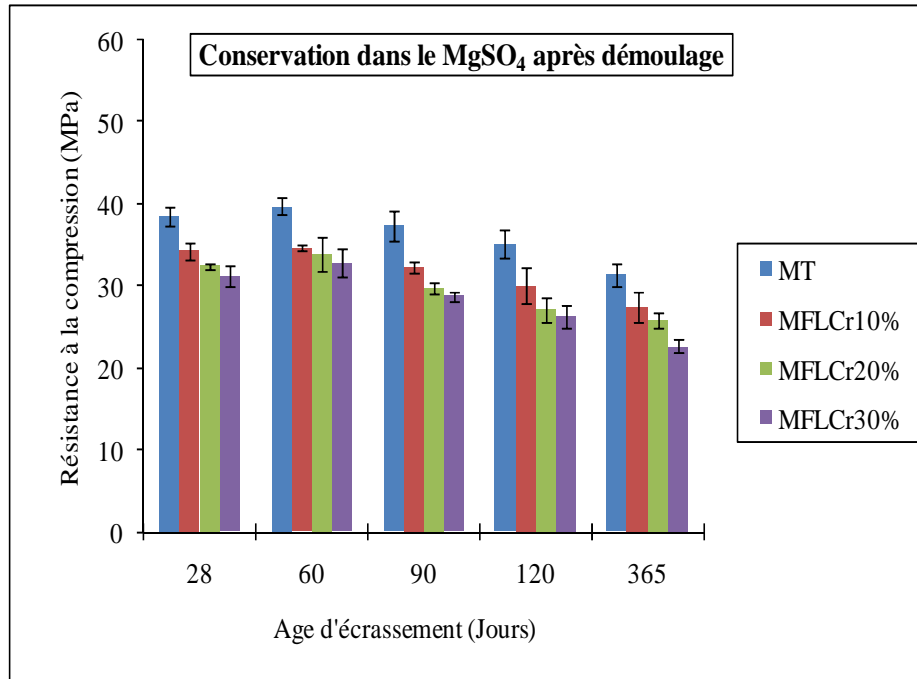


Figure IV.19- Résistance en compression des mortiers à base de laitier cristallisé en substitution partielle au ciment conservés dans le MgSO₄ après démoulage

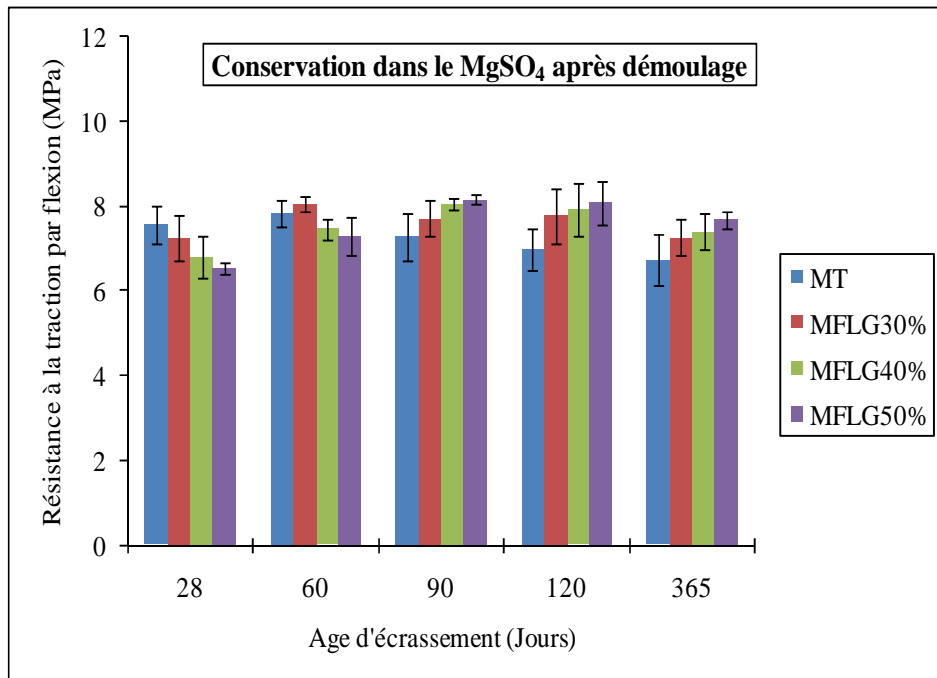


Figure IV.20- Résistance en traction par flexion des mortiers à base de laitier granulé en substitution partielle au ciment conservés dans le MgSO₄ après démoulage

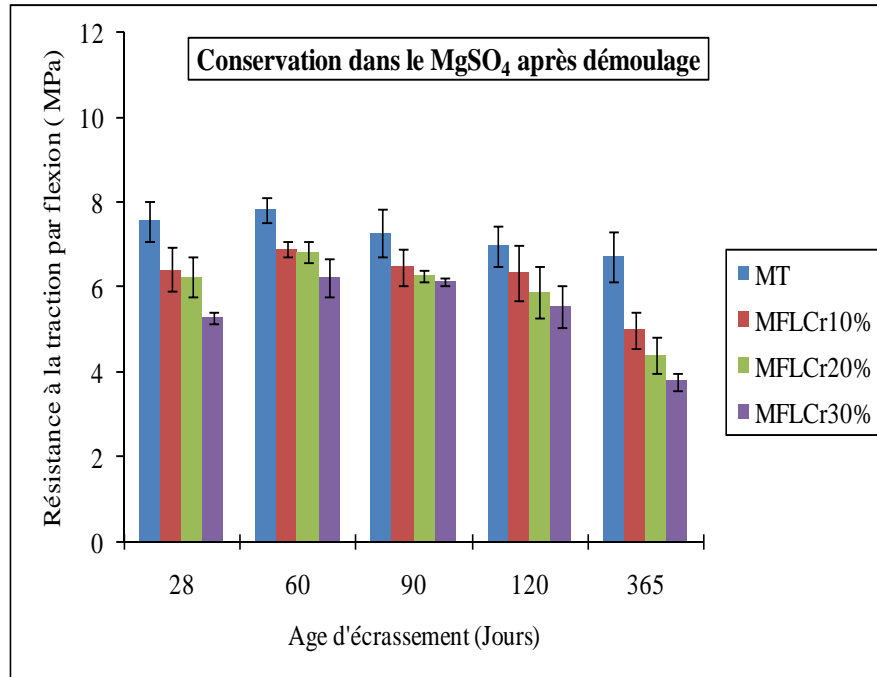


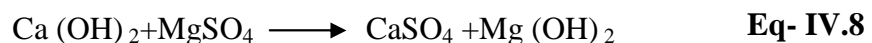
Figure IV.21- Résistance en traction par flexion des mortiers à base de laitier cristallisé en substitution partielle au ciment conservés dans le $MgSO_4$ après démoulage

Dans le cas de conservation dans une solution de sulfate de magnésium $MgSO_4$ après démoulage et d'après les figures IV-18, IV-19, IV-20 et IV-21 on constat deux phases :

- **1^{ère} phase allant de 0 à 90 jours**

Durant cette période, on remarque une stabilisation de la résistance mécanique en compression comme en traction par flexion pour les mortiers témoin. Par contre, les mortiers avec différents taux de laitier granulé présentent une amélioration au niveau des résistances mécaniques.

Les résistances mécaniques d'une manière générale ne sont pas affectées par l'attaque sulfatique externe, cela peut s'expliquer par la formation de la brucite $Mg(OH)_2$ sur la couche extérieure des éprouvettes exposées dans la solution du sulfate qui peut retarder temporairement la pénétration des ions sulfatiques et donc l'évolution de la cinétique d'hydratation. La brucite $Mg(OH)_2$ est le produit de la réaction entre la portlandite et le sulfate de magnésium selon la réaction suivante :



Pour les mortiers à base de laitier granulé, les améliorations observées sont dues essentiellement à l'activité hydraulique de ce type de laitier et à la formation des CSH secondaire et par conséquent la densification de la matrice cimentaire.

Concernant les mortiers à base de laitier cristallisé, la résistance mécanique est stabilisée grâce à la présence de la couche de la brucite et de 20% de laitier granulé qui peut améliorer légèrement cette résistance.

2^{ème} phase allant de 90 à 365 jours

On constate une diminution de la résistance mécanique pour l'ensemble des mortiers étudiés. Cette régression se diffère selon la nature du laitier (granulé ou cristallisé) et le taux de substitution. Les mortiers avec laitier granulé présentent les plus faibles diminutions des résistances. L'effet du taux de substitution en laitier sur l'amélioration de la résistance mécanique durant cette période est bien visible. Les diminutions des résistances de compression sont de l'ordre de 10, 6 et 4 % respectivement avec 30, 40 et 50 % de laitier granulé en substitution partielle au ciment.

La bonne résistance des mortiers à base de laitier granulé aux attaques sulfatiques externes est due essentiellement à l'activité hydraulique de laitier granulé concrétisée par une consommation d'une partie de la portlandite et formation des CSH. Le laitier granulé broyé et mélangé avec l'eau ne s'hydrate pas, à cause de la formation d'une couche acide autour du grain de laitier empêchant ce dernier de s'hydrater. La portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) libérée pendant l'hydratation du ciment Portland va dissoudre cette couche acide et entre en réaction avec les composants du laitier, pour former des hydrates secondaires et réduit le PH du mélange et par conséquence améliore les résistances dans les milieux agressifs. [Zeghichi et al, 2007], [Achoura et al. 2009]

Même si l'activité du laitier granulé algérien à court terme est relativement faible en comparaison avec d'autres types de laitier granulé, elle donne de bons résultats à long terme. Ceci est confirmé par les travaux de recherche réalisés sur la réactivité de laitier granulé d'El-Hadjar –Annaba que nous avons utilisé dans notre étude [Behim et al, 2011], [Hadj Sadok et al, 2011]

Pour le mortier témoin (sans addition), la chute de résistance après une année de conservation est de l'ordre de 18%. Par contre, les mortiers avec laitier cristallisé sont les plus affectés par l'attaque sulfatique et les diminutions résistances sont de l'ordre de 20% à 29%.

Les mortiers avec laitier cristallisé même avec un pourcentage de 20% de laitier granulé ont subi des chutes de résistance plus importantes comparativement à celle des mortiers témoins ou avec le laitier granulé. Cette chute peut s'expliquer par la perturbation du processus de la cinétique d'hydratation du ciment avec l'augmentation du taux de substitution en laitier cristallisé.

IV.3.1.1.3- Cas de conservation dans la solution sulfatique après une cure de 28 jours dans l'eau

Une cure antérieure de 28 jours dans l'eau avant l'immersion des éprouvettes de mortiers dans la solution sulfatique améliore leurs comportements mécaniques vis-à-vis à l'attaque sulfatique comme le montre les figures IV.22, IV.23, IV.24 et IV.25.

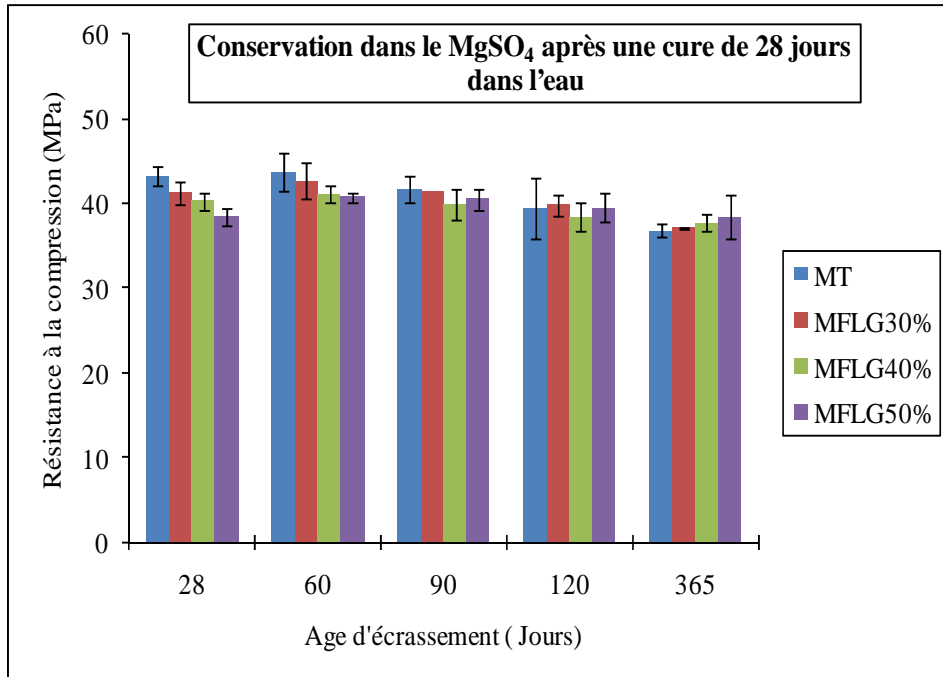


Figure IV.22- Résistance en compression des mortiers à base de laitier granulé en substitution partielle au ciment conservés dans le $MgSO_4$ après une cure de 28 jours.

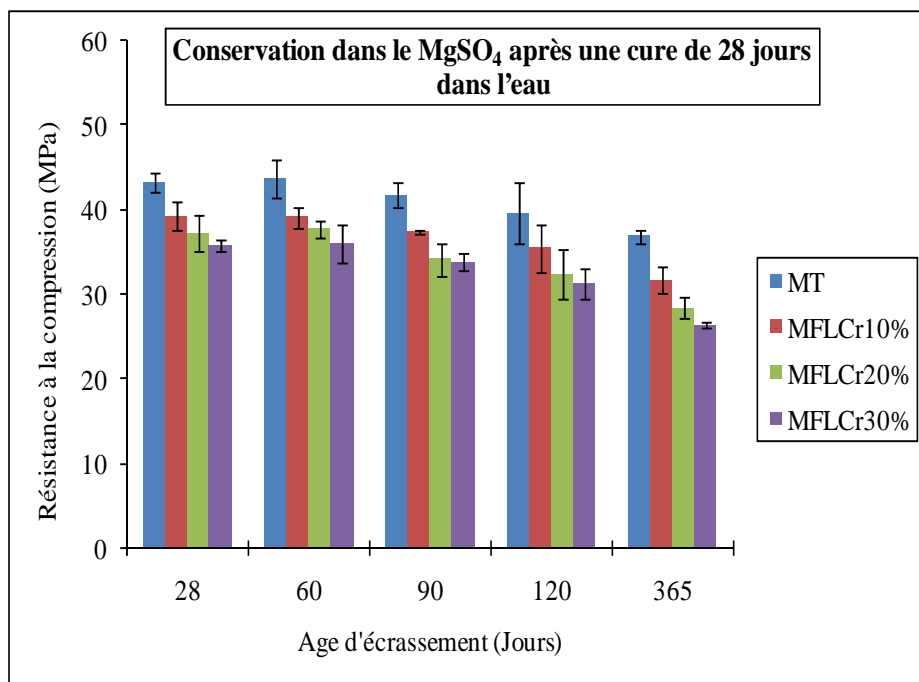


Figure IV.23- Résistance en compression des mortiers à base de laitier cristallisé en substitution partielle au ciment conservés dans le $MgSO_4$ après une cure de 28 jours.

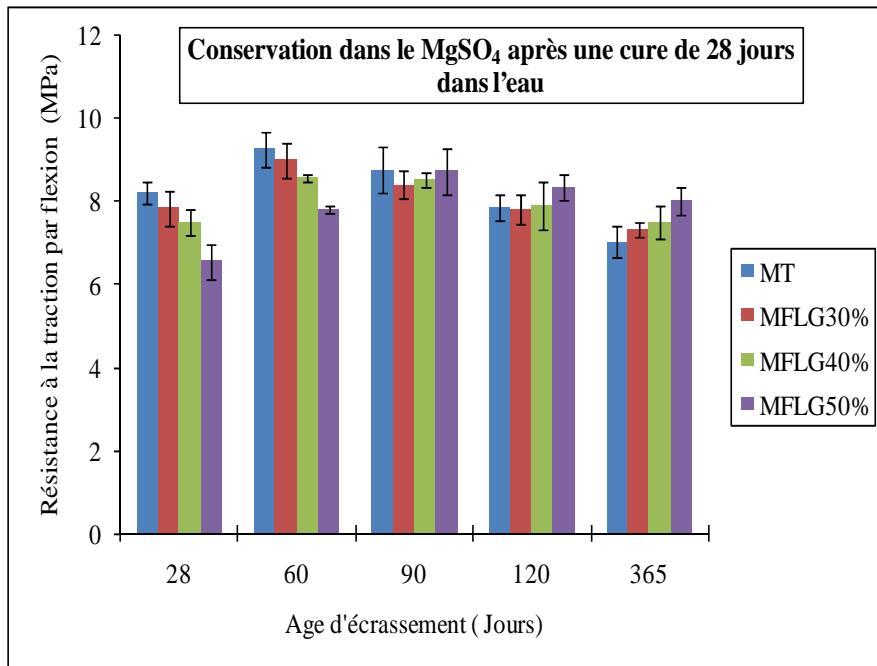


Figure IV.24- Résistance en traction par flexion des mortiers à base de laitier granulé en substitution partielle au ciment conservés dans le MgSO₄ après une cure de 28 jours.

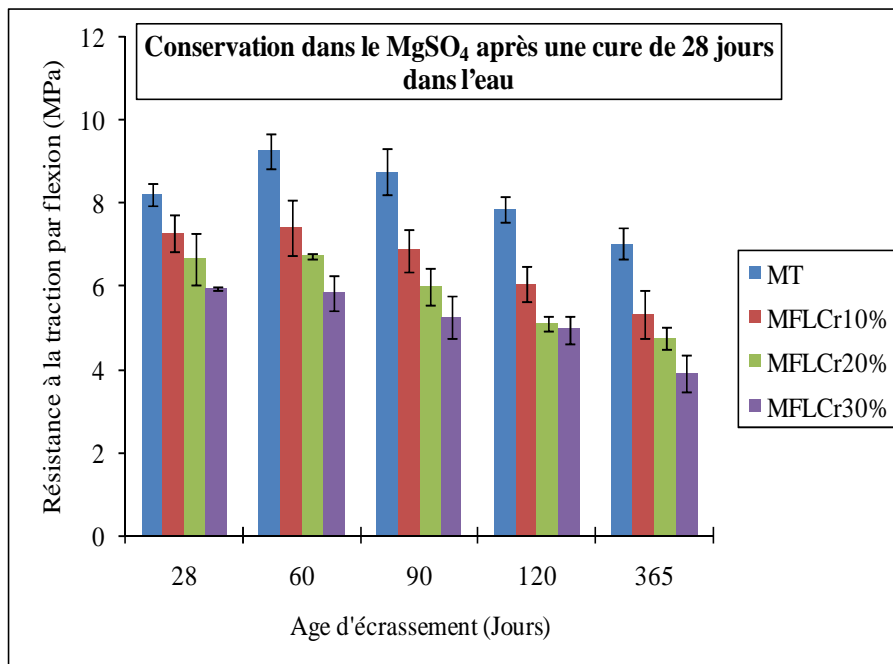


Figure IV.25- Résistance en traction par flexion des mortiers à base de laitier cristallisé en substitution partielle au ciment conservés dans le MgSO₄ après une cure de 28 jours.

Tous les mortiers testés ont donné des résistances mécaniques en compression comme en traction par flexion plus élevée comparativement à celle conservée directement dans la solution sulfatique. Cela peut s'expliquer par un processus d'hydratation correcte et non gêné qui favorise la formation de maximum des hydrates ce qui donne une matrice cimentaire de

structure cristalline plus stable et plus résistante que celle-ci obtenue après démoulage directement.

L'attaque de sulfate de magnésium $MgSO_4$ sur les mortiers préalablement soumis à une cure de 28 jours dans l'eau se manifeste par la formation des produits expansifs (gypse et ettringite secondaire) obtenus suite à la réaction des ions sulfatiques de $MgSO_4$ avec la portlandite $Ca(OH)_2$. Pratiquement les mêmes interprétations données pour les mortiers conservés dans le $MgSO_4$ après démoulage sont valables aussi pour les mortiers conservés dans le $MgSO_4$ après une cure de 28 jours dans l'eau.

Les résultats obtenus de la résistance moyenne en compression et en traction par flexion des mortiers conservés dans l'eau et dans une solution de sulfate de magnésium associé à l'écart-type et le coefficient de variation sont regroupés dans les tableaux IV.1, IV.2, IV.3, IV.4, IV.5 et IV.6.

Tableau IV.1- Résistance en compression et en traction par flexion du mortier témoin

Age d'essais (jours)	Résistance moyenne en compression (MPa)	Écart type (MPa)	Coefficient de variation (%)	Résistance moyenne en traction par flexion (MPa)	Écart type (MPa)	Coefficient de variation (%)
Conservation dans l'eau						
28	43,25	0,14	0,3	8,21	0,25	3,0
60	44,58	0,71	1,6	9,05	0,22	2,4
90	44,89	1,74	3,9	9,43	0,12	1,3
120	45,37	1,31	2,9	9,67	0,34	3,5
365	47,1	0,85	1,8	10,25	0,39	3,8
Conservation dans le $MgSO_4$ après démoulage						
28	38,59	1,18	3,1	7,56	0,46	6,1
60	39,72	1,08	2,7	7,83	0,3	3,8
90	37,38	1,77	4,7	7,28	0,56	7,7
120	35,13	1,76	5,0	6,97	0,49	7,0
365	33,35	1,41	4,2	6,73	0,59	8,8
Conservation dans le $MgSO_4$ après une cure de 28 jours dans l'eau						
28	43,25	1,14	2,6	8,21	0,25	3,0
60	43,67	2,2	5,0	9,25	0,41	4,4
90	41,73	1,54	3,7	8,75	0,56	6,4
120	39,5	3,6	9,1	7,85	0,3	3,8
365	36,84	0,8	2,2	7,02	0,37	5,3

Tableau IV.2- Résistance en compression et en traction par flexion du mortier avec 30% substitution de laitier granulé

Age d'essais (jours)	Résistance moyenne en compression (MPa)	Écart type (MPa)	Coefficient de variation (%)	Résistance moyenne en traction par flexion (MPa)	Écart type (MPa)	Coefficient de variation (%)
Conservation dans l'eau						
28	41,28	1,38	3,3	7,83	0,44	5,6
60	42,93	0,98	2,3	8,47	0,34	4,0
90	43,13	0,53	1,2	9,33	0,61	6,5
120	45,7	1,13	2,5	9,54	0,24	2,5
365	47,5	0,66	1,4	10,13	0,39	3,9
Conservation dans le MgSO₄ après démoulage						
28	36,27	0,97	2,7	7,25	0,52	7,2
60	37,48	1,24	3,3	8,05	0,16	1,9
90	35,93	1,53	4,3	7,71	0,42	5,5
120	34,56	0,58	1,7	7,77	0,65	8,4
365	32,06	0,8	2,5	7,26	0,43	5,9
Conservation dans le MgSO₄ après une cure de 28 jours dans l'eau						
28	41,28	1,38	3,3	7,83	0,44	5,6
60	42,63	2,12	4,9	8,98	0,41	4,6
90	41,42	0	0,0	8,4	0,33	3,9
120	39,88	1,24	3,1	7,8	0,37	4,7
365	37,09	0,1	0,3	7,32	0,19	2,6

Tableau IV.3- Résistance en compression et en traction par flexion du mortier avec 40% substitution de laitier granulé

Age d'essais (jours)	Résistance moyenne en compression (MPa)	Écart type (MPa)	Coefficient de variation (%)	Résistance moyenne en traction par flexion (MPa)	Écart type (MPa)	Coefficient de variation (%)
Conservation dans l'eau						
28	40,24	1,08	2,7	7,5	0,3	4,0
60	41,31	1,23	2,9	8,26	0,53	6,4
90	41,95	0,1	0,2	9,14	0,47	5,1
120	44,04	1,61	3,7	9,4	0,34	3,6
365	46,53	0,2	0,4	10	0,55	5,5
Conservation dans le MgSO₄ après démoulage						
28	34,75	0,71	2,0	6,8	0,49	7,2
60	36,95	1,76	4,8	7,45	0,25	3,4
90	35,31	0,9	2,6	8,04	0,14	1,7
120	35	1,63	4,7	7,92	0,61	7,7
365	33,08	1,59	4,8	7,4	0,44	5,9
Conservation dans le MgSO₄ après une cure de 28jours dans l'eau						
28	40,24	1,08	2,7	7,5	0,3	4,0
60	41,09	1,08	2,6	8,55	0,1	1,2
90	39,97	1,77	4,4	8,25	0,17	2,1
120	38,43	1,7	4,4	7,9	0,56	7,1
365	37,75	1,01	2,7	7,5	0,39	5,2

Tableau IV.4- Résistance en compression et en traction par flexion du mortier avec 50% substitution de laitier granulé

Age d'essais (jours)	Résistance moyenne en compression (MPa)	Écart type (MPa)	Coefficient de variation (%)	Résistance moyenne en traction par flexion (MPa)	Écart type (MPa)	Coefficient de variation (%)
Conservation dans l'eau						
28	38,45	1,46	3,80	6,55	0,41	6,3
60	39,89	0,88	2,21	7,78	0,48	6,2
90	41,28	2,11	5,11	8,93	0,5	5,6
120	43,85	0,1	0,23	9,31	0,47	5,1
365	45,25	0,25	0,55	10,15	0,64	6,3
Conservation dans le MgSO₄ après démoulage						
28	33,05	1,85	5,6	6,54	0,14	2,1
60	36,98	0,63	1,7	7,3	0,45	6,2
90	36,15	3,71	10,3	8,15	0,1	1,2
120	35,63	3,92	11,0	8,08	0,5	6,2
365	34,61	1,44	4,2	7,68	0,2	2,6
Conservation dans le MgSO₄ après une cure de 28 jours dans l'eau						
28	38,45	1,03	2,7	6,55	0,41	6,3
60	40,68	0,58	1,4	7,81	0,1	1,3
90	40,54	1,23	3,0	8,32	0,56	6,8
120	39,53	1,61	4,0	8,03	0,3	3,7
365	38,43	2,65	6,9	7,71	0,34	4,4

Tableau IV.5- Résistance en compression et en traction par flexion du mortier avec 10% substitution de laitier cristallisé

Age d'essais (jours)	Résistance moyenne en compression (MPa)	Écart type (MPa)	Coefficient de variation (%)	Résistance moyenne en traction par flexion (MPa)	Écart type (MPa)	Coefficient de variation (%)
Conservation dans l'eau						
28	39,23	1,65	4,2	7,27	0,44	6,1
60	40,63	2,29	5,6	7,42	0,23	3,1
90	41,37	2,17	5,3	7,59	0,49	6,5
120	41,88	2,63	6,3	7,61	0,82	10,8
365	43,67	1,77	4,1	8,03	0,37	4,6
Conservation dans le MgSO₄ après démoulage						
28	34,25	1,09	3,2	6,43	0,83	12,9
60	34,63	0,35	1,0	6,9	0,6	8,7
90	32,25	0,71	2,2	6,48	0,71	10,9
120	30,05	2,14	7,1	6,36	0,44	6,9
365	27,46	1,86	6,8	5	0,27	5,4
Conservation dans le MgSO₄ après une cure de 28 jours dans l'eau						
28	39,23	1,65	4,2	7,27	0,44	6,1
60	39,08	1,19	3,1	7,4	0,68	9,2
90	37,25	0,22	0,6	6,87	0,51	7,4
120	35,42	2,77	7,8	6,05	0,42	6,9
365	31,69	1,50	4,7	5,33	0,57	10,7

Tableau IV.6- Résistance en compression et en traction par flexion du mortier avec 20% substitution de laitier cristallisé

Age d'essais (jours)	Résistance moyenne en compression (MPa)	Écart type (MPa)	Coefficient de variation (%)	Résistance moyenne en traction par flexion (MPa)	Écart type (MPa)	Coefficient de variation (%)
Conservation dans l'eau						
28	37,15	2,12	5,71	6,66	0,61	9,16
60	38,34	1,33	3,47	6,79	0,2	2,95
90	39,18	2,51	6,41	6,91	0,49	7,09
120	39,54	1,75	4,43	7,03	0,44	6,26
365	40,82	2,04	5,00	7,36	0,69	9,38
Conservation dans le MgSO₄ après démoulage						
28	32,5	0,35	1,08	6,43	0,1	1,60
60	33,88	2,07	6,11	6,9	0,69	10,12
90	29,79	0,65	2,18	6,48	0,43	6,86
120	27,19	1,5	5,52	6,36	0,35	5,95
365	25,92	0,9	3,47	5,0	0,43	9,77
Conservation dans le MgSO₄ après une cure de 28jours dans l'eau						
28	37,15	2,12	5,71	6,66	0,61	9,16
60	37,68	0,97	2,57	6,72	0,08	1,19
90	34,13	1,94	5,68	5,99	0,43	7,18
120	32,31	2,92	9,04	5,1	0,17	3,33
365	28,38	1,27	4,47	4,75	0,26	5,47

Tableau IV.7- Résistance en compression et en traction par flexion du mortier avec 30% substitution de laitier cristallisé

Age d'essais (jours)	Résistance moyenne en compression (MPa)	Écart type (MPa)	Coefficient de variation (%)	Résistance moyenne en traction par flexion (MPa)	Écart type (MPa)	Coefficient de variation (%)
Conservation dans l'eau						
28	35,78	0,71	1,98	5,94	0,04	0,67
60	36,03	0,14	0,39	6,12	0,11	1,80
90	36,13	1,94	5,37	6,5	0,29	4,46
120	37,01	1,31	3,54	6,72	0,52	7,74
365	38,31	1,49	3,89	6,79	0,05	0,74
Conservation dans le MgSO₄ après démoulage						
28	31,25	1,38	4,42	5,27	0,32	6,07
60	32,79	1,75	5,34	6,21	0,24	3,86
90	28,75	0,53	1,84	6,14	0,37	6,03
120	26,33	1,42	5,39	5,57	0,45	8,08
365	22,67	0,83	3,66	3,78	0,4	10,58
Conservation dans le MgSO₄ après une cure de 28jours dans l'eau						
28	35,78	0,71	1,98	5,94	0,04	0,67
60	35,98	2,27	6,31	5,84	0,42	7,19
90	33,79	1,02	3,02	5,25	0,52	9,90
120	31,29	1,75	5,59	4,96	0,33	6,65
365	26,35	0,35	1,33	3,9	0,43	11,03

IV.3.1.2- Effet de la nature des additions sur l'évolution de la de la résistance mécanique des bétons de sable avec fibre de polypropylène.

Les additions minérales ou les fines d'ajout sont des composants de base dans la composition du béton de sable selon la norme NF P18- 500 [NF P18- 500, 2005], elles présentent plusieurs effets bénéfiques sur le comportement de ce dernier.

L'activité et la finesse des additions minérales sont deux facteurs principaux dans l'amélioration de la compacité et de la résistance mécanique. Dans cette partie nous exposerons les résultats de l'influence de la nature des fines d'ajout (laitier cristallisé ou granulé) sur la variation de la résistance mécanique des bétons de sable avec fibres de polypropylène conservés dans un milieu sulfatique en comparaison avec celle des bétons de sable avec filler calcaire considéré comme témoin.

IV.3.1.2.1- Cas de conservation dans l'eau

L'effet de la nature des additions minérales sur les résistances mécaniques des bétons de sable conservés en humidité saturante est illustré par les figures IV.26, IV .27 et IV-18 associés aux tableaux IV.7, IV.8 et IV.9.

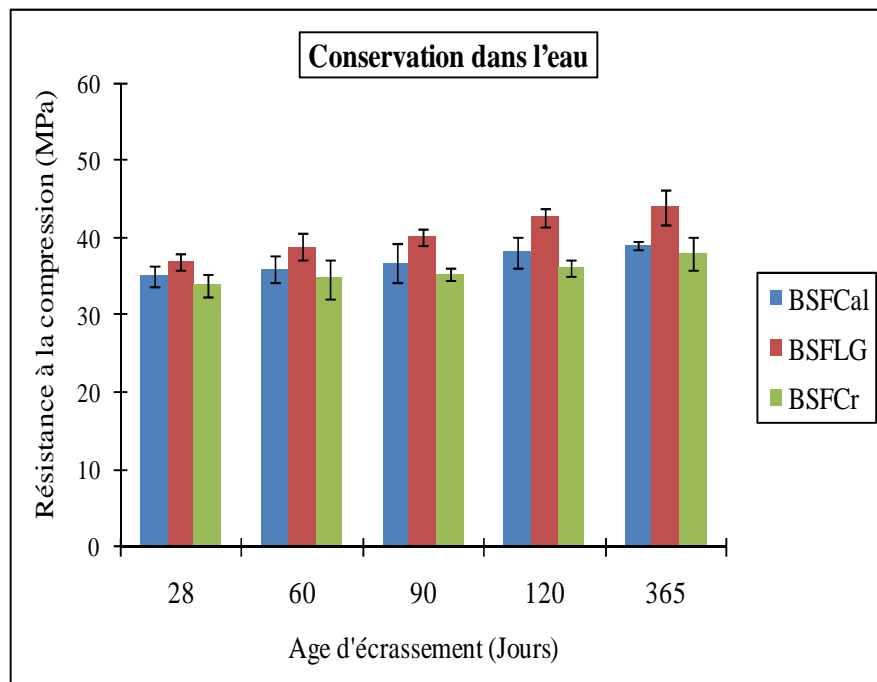


Figure IV.26- Effet de la nature des additions minérales sur l'évolution de la résistance en compression des bétons de sable avec fibre de polypropylène conservés dans l'eau

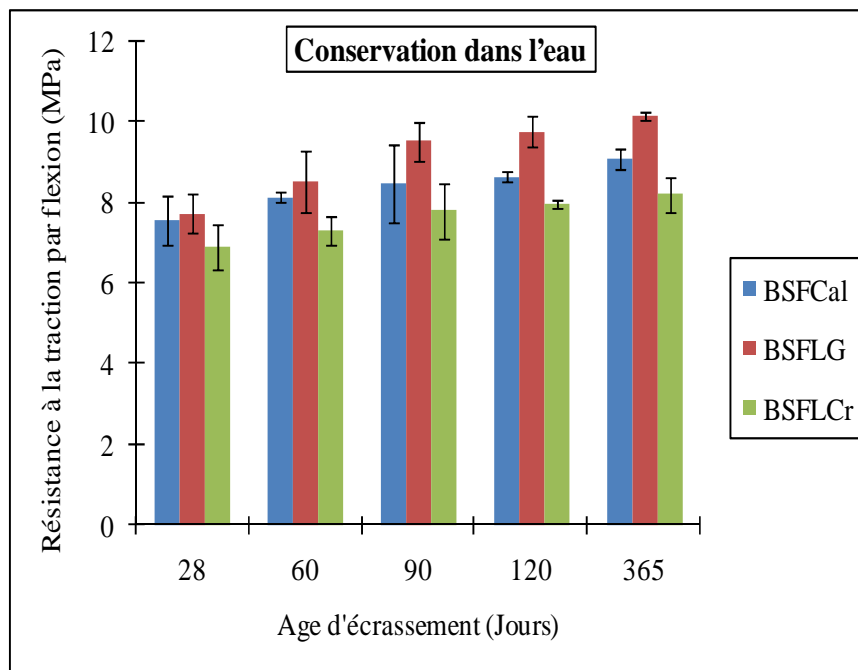


Figure IV.27- Effet de la nature des additions minérales sur l'évolution de la résistance en traction par flexion des bétons de sable avec fibre de polypropylène conservés dans l'eau

Les figures IV.26 et IV.27 montrent que l'évolution des résistances en compression et en traction par flexion des bétons de sable conservés en humidité saturante est sensiblement affectée par la nature des additions.

Avec le même dosage en addition, les bétons avec laitier granulé donnent les meilleures résistances avec des gains allant jusqu'à 20 %. Cela est dû à l'activité hydraulique de ce type d'addition, qui donne une microstructure plus dense surtout à long terme obtenue grâce à l'effet du remplissage et à la formation des CSH secondaire par réaction entre la silice de laitier granulé et la portlandite formée pendant l'hydratation du ciment.

Les bétons avec fillers de calcaire donnent aussi des résistances inférieures à celles des bétons de sable avec laitier granulé, mais avec une progression lente dans le temps. Cela peut s'expliquer par l'amélioration de la compacité de ces bétons par l'effet de remplissage. La finesse d'addition calcaire utilisée a joué aussi un rôle important dans l'accroissement de la résistance mécanique. D'autre part les fillers de calcaire peuvent accélérer les réactions d'hydratation du ciment comme le montrent les travaux de Caré [Caré et al, 2000] qui expliquent que plus que les particules sont fines, la présence de carbonates de calcium (CaCO_3) favoriserait l'hydratation du C_3S dès les premiers instants.

On peut remarquer aussi que l'addition de laitier cristallisé en tant que fines d'ajout a un effet de remplissage et son activité chimique est très faible. Les résistances mécaniques des bétons de sable à base de ce type d'addition sont inférieures à celles des BSFLG et BSFCal. Cela est dû essentiellement à sa finesse de mouture plus grossière que celle de calcaire.

IV.3.1.2.2- Cas de conservation dans la solution sulfatique après démoulage

Les résultats des résistances mécaniques des bétons de sable conservé dans une solution de sulfate de magnésium $MgSO_4$ après démoulage sont illustrés dans les figures IV.28 et IV.29.

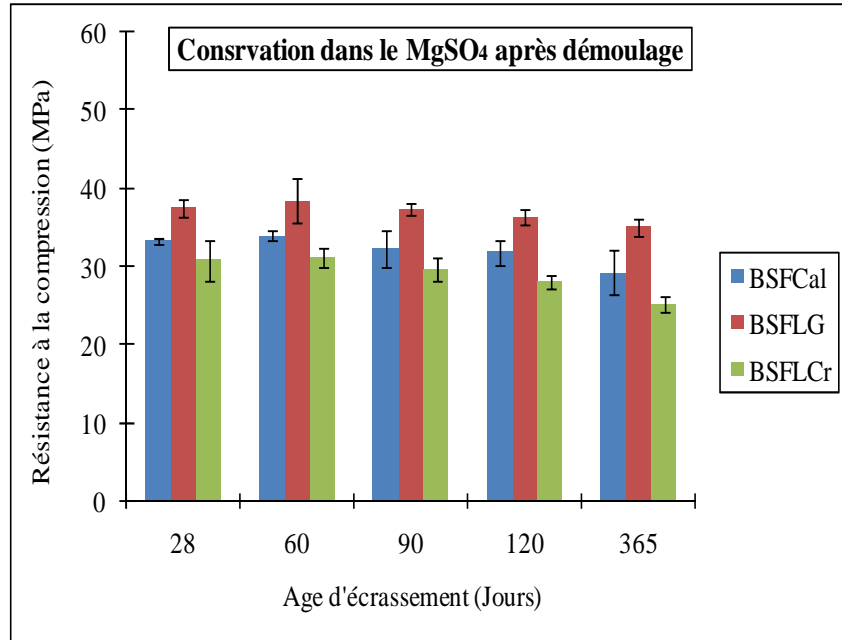


Figure IV.28 - Effet de la nature des additions minérales sur l'évolution de la résistance en compression des bétons de sable avec fibre de polypropylène conservés dans le $MgSO_4$ après démoulage

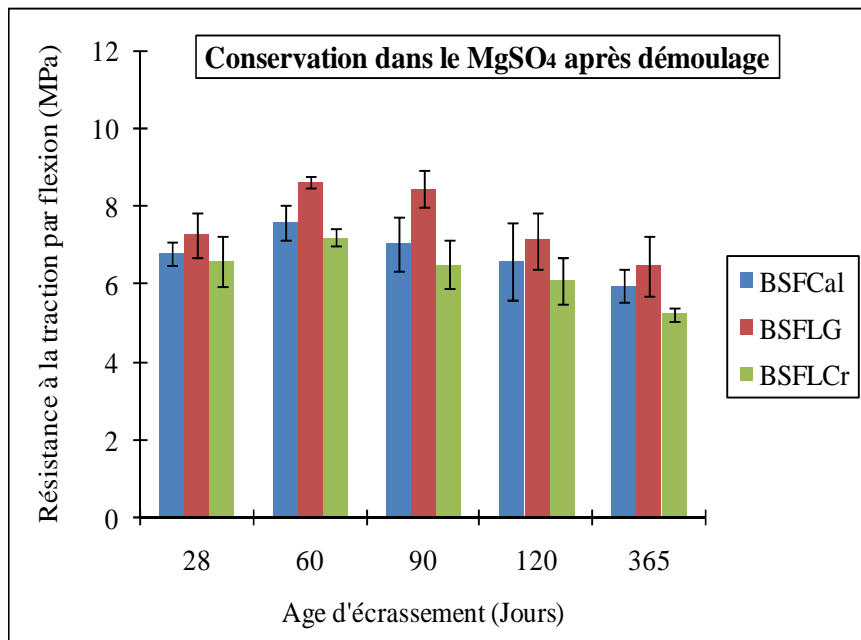


Figure IV.29- Effet de la nature des additions minérales sur l'évolution de la résistance en traction par flexion des bétons de sable avec fibre de polypropylène conservés dans le $MgSO_4$ après démoulage

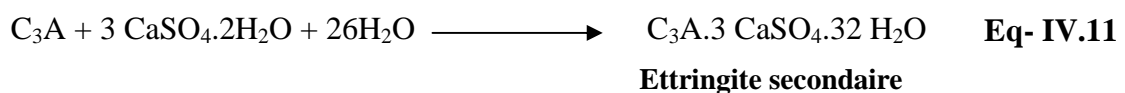
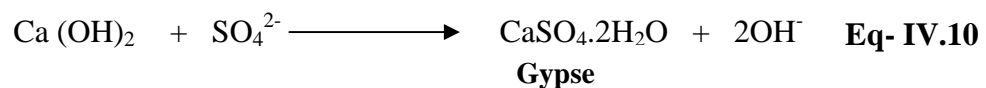
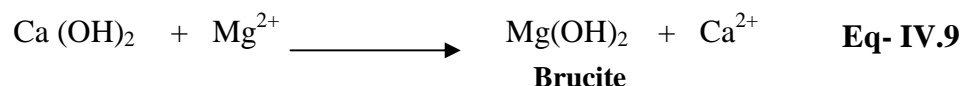
À partir de 90 jours et jusqu'à une année, on observe une diminution progressive de la résistance mécanique en compression et en traction par flexion pour les bétons de sable avec fillers de calcaire et de laitier cristallisé. Cette diminution est de l'ordre de 4.8, 6.4 et 14% pour les BSFCal et de 5, 9.7 et 18.8 % pour les BSFLCr, respectivement à 90, 120 et 365 jours.

Par contre pour les bétons de sable avec laitier granulé, on remarque une légère augmentation suivie d'une stabilisation de la résistance jusqu'à 90 jours. À partir de 90 jours et jusqu'à 365 jours on observe une légère diminution des résistances mécaniques qui sont de l'ordre de 2.8 et 6.2% respectivement à 120 et 365 jours.

La stabilisation de la résistance mécanique avant 90 jours s'explique par la formation de la brucite $Mg(OH)_2$ qui retarde la pénétration des sulfates temporairement, ce qui favorise la continuité du processus d'hydratation et par conséquent l'évolution des résistances surtout pour le béton de sable avec le laitier granulé. Ce type de laitier qui est caractérisé par activité hydraulique latente qui engendre l'amélioration de la résistance mécanique.

La diminution de la résistance après 90 jours de conservation est due essentiellement à l'agressivité de la solution $MgSO_4$ et à la formation de gypse et de l'ettringite secondaire qui provoquent un gonflement. Ceci favorise la naissance et l'accroissement des fissures suivie d'une augmentation de la fragilité et une chute de résistance de ces bétons.

L'attaque de sulfate de magnésium $MgSO_4$ se manifeste par la formation des produits expansifs (gypse et ettringite secondaire) obtenue suite à la réaction des ions sulfatiques de $MgSO_4$ avec la portlandite $Ca(OH)_2$ et les Aluminates tricalciques anhydres C_3A :



Durant le suivi de l'attaque des sulfates de magnésium $MgSO_4$ aux BS avec fibres polypropylènes, on a constaté que la dégradation se passe surtout au niveau de la matrice cimentaire. Par contre, on a observé que les fibres de polypropylène ne sont plus affectées (restent intactes) et qu'elles ne subissent aucune dégradation. Ce qui confirme les travaux de [Ramezianpour et al, 2013] qui considèrent que le polypropylène est un matériau inerte et sa présence ne montre aucune modification dans la structure de la matrice cimentaire dans un milieu riche en sulfate.

IV.3.1.2.3- Cas de conservation dans la solution sulfatique après une cure de 28 jours dans l'eau

Les résultats des résistances mécaniques des bétons de sable conservé dans une solution de sulfate de magnésium $MgSO_4$ après une cure de 28 jours dans l'eau sont illustrés dans les figures IV.30 et IV.31

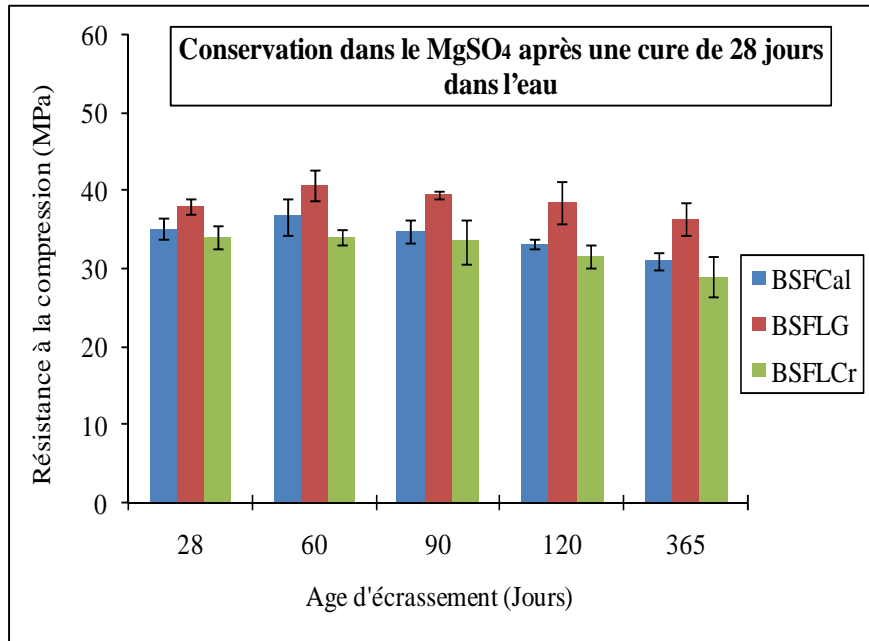


Figure VI-30. Effet de la nature des additions minérales sur l'évolution de la résistance en compression des bétons de sable avec fibre de polypropylène conservés dans le $MgSO_4$ après une cure de 28 jours dans l'eau

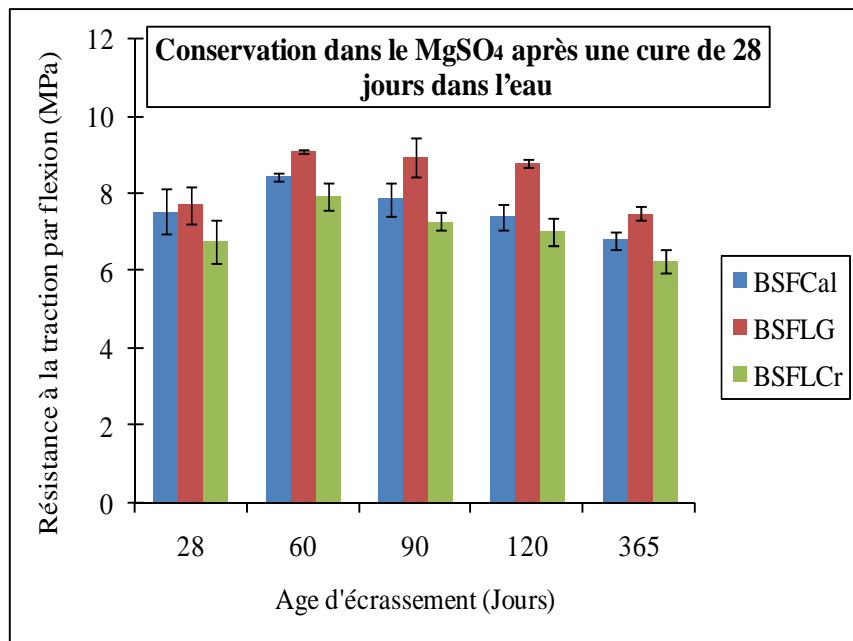


Figure VI-31. Effet de la nature des additions minérales sur l'évolution de la résistance en traction par flexion des bétons de sable avec fibre de polypropylène conservés dans le $MgSO_4$ après une cure de 28 jours dans l'eau

Selon les résultats obtenus on peut énoncer que le comportement des bétons de sable après une cure de 28 jours dans l'eau est semblable à celui des mortiers conservés dans les mêmes conditions.

Une amélioration visible de la résistance aux attaques sulfatiques a été enregistré (voir les figures IV.30 et IV.31). Par comparaison des trois types du béton de sable testés, on peut conclure que les BS avec laitier granulé présentent les meilleures résistances mécaniques vis-à-vis aux attaques des sulfates par rapport aux deux autres types de BS à base de fillers calcaires et laitier cristallisé.

Les résistances mécaniques en compression comme en traction par flexion sont moins affectées après une cure de 28 jours dans l'eau. Cette cure favorise le développement de la cinétique d'hydratation et l'amélioration de la microstructure par la formation des hydrates.

Les mêmes interprétations données pour le cas de mortiers sont valables aussi pour les bétons de sable

Les résultats obtenus de la résistance moyenne en compression et en traction par flexion des bétons de sable avec fibre de polypropylène conservés dans l'eau et dans une solution de sulfate de magnésium après démoulage et après une cure de 28 jours dans l'eau, associée par l'écart-type et le coefficient de variation sont regroupées dans les tableaux IV.8, IV.9 et IV.10.

Tableau IV.8- Résistance à la compression et à la traction par flexion du béton de sable avec fillers calcaire

Age d'essais (jours)	Résistance moyenne en compression (MPa)	Écart type (MPa)	Coefficient de variation (%)	Résistance moyenne en traction par flexion (MPa)	Écart type (MPa)	Coefficient de variation (%)
Conservation dans l'eau						
28	35,15	1,41	4,0	7,54	0,6	8,0
60	36,03	1,8	4,9	8,12	0,11	1,4
90	36,87	2,65	7,2	8,46	0,94	11,1
120	38,23	1,9	4,9	8,63	0,13	1,5
365	39,25	1,32	1,3	9,07	0,26	2,9
Conservation dans le MgSO₄ après démoulage						
28	33,28	0,45	1,4	6,79	0,30	4,4
60	34,00	0,57	1,7	7,56	0,45	5,9
90	32,36	2,32	7,2	7,04	0,69	9,8
120	31,81	1,68	5,3	6,59	0,98	14,8
365	29,24	2,8	9,6	5,95	0,42	7,1
Conservation dans le MgSO₄ après une cure de 28 jours dans l'eau						
28	35,15	1,41	4,0	7,94	0,6	7,5
60	36,75	2,33	6,3	8,43	0,11	1,3
90	34,82	1,5	4,3	7,86	0,42	5,3
120	33,12	0,65	1,9	7,41	0,33	4,4
365	31,03	1,18	3,8	6,79	0,23	3,4

Tableau IV.9- Résistance à la compression et à la traction par flexion de sable avec addition de laitier granulé

Age d'essais (jours)	Résistance moyenne en compression (MPa)	Écart type (MPa)	Coefficient de variation (%)	Résistance moyenne en traction par flexion (MPa)	Écart type (MPa)	Coefficient de variation (%)
Conservation dans l'eau						
28	37,04	1,06	2,9	7,71	0,47	6,1
60	39,00	1,77	4,5	8,49	0,76	8,9
90	40,25	1,1	2,7	9,51	0,49	5,2
120	42,77	1,24	2,9	9,74	0,37	3,8
365	44,14	2,3	5,2	10,22	0,09	0,9
Conservation dans le MgSO₄ après démoulage						
28	37,6	1,12	2,9	7,28	0,57	7,8
60	38,45	2,86	7,4	8,62	0,15	1,7
90	37,37	0,74	1,9	8,45	0,46	5,4
120	36,33	0,92	2,5	7,12	0,72	10,1
365	35,07	1,08	3,1	6,47	0,77	11,9
Conservation dans le MgSO₄ après une cure de 28 jours dans l'eau						
28	38,04	1,06	2,7	7,71	0,47	6,1
60	40,64	1,93	4,8	9,38	0,05	0,5
90	39,56	0,52	1,3	9,22	0,51	5,5
120	38,43	2,7	7,0	8,78	0,12	1,4
365	36,33	2,05	5,6	7,48	0,17	2,3

Tableau IV.10- Résistance à la compression et à la traction par flexion de sable avec laitier cristallisé

Age d'essais (jours)	Résistance moyenne en compression (MPa)	Écart type (MPa)	Coefficient de variation (%)	Résistance moyenne en traction par flexion (MPa)	Écart type (MPa)	Coefficient de variation (%)
Conservation dans l'eau						
28	34,00	1,45	4,3	6,78	0,55	8,1
60	34,75	2,57	7,4	7,29	0,37	5,1
90	35,5	0,8	2,3	8,08	0,68	8,4
120	36,14	1,07	2,9	8,64	0,10	1,2
365	38,13	2,11	5,5	9,08	0,42	4,6
Conservation dans le MgSO₄ après démoulage						
28	30,80	2,57	8,34	6,57	0,65	9,89
60	31,12	1,23	3,95	7,20	0,23	3,19
90	29,68	1,58	5,32	6,51	0,6	9,22
120	28,08	0,92	3,28	6,09	0,58	9,52
365	25,27	0,96	3,80	5,24	0,17	3,24
Conservation dans le MgSO₄ après une cure de 28 jours dans l'eau						
28	34,00	1,45	4,26	6,78	0,55	8,11
60	34,16	0,98	2,87	7,94	0,35	4,41
90	33,50	2,8	8,36	7,29	0,21	2,88
120	31,60	1,41	4,46	7,02	0,37	5,27
365	29,02	2,63	9,06	6,25	0,30	4,80

V.3.2-Variation de masse

V.3.2.1-Influence de la nature des additions minérales et le mode de conservation sur la variation de masse des mortiers

Cette partie présente les résultats de la variation de masse des mortiers d'étude selon les trois modes de conservation dans l'eau, dans une solution sulfatique après démoulage et après une cure de 28 jours dans l'eau.

V.3.2.1.1-Cas de conservation dans l'eau

L'effet du taux de laitier granulé et/ou cristallisé comme addition minérale en substitution partielle au ciment sur la variation de la masse des mortiers conservés en humidité saturante est illustré par les figures IV.32 et IV.33.

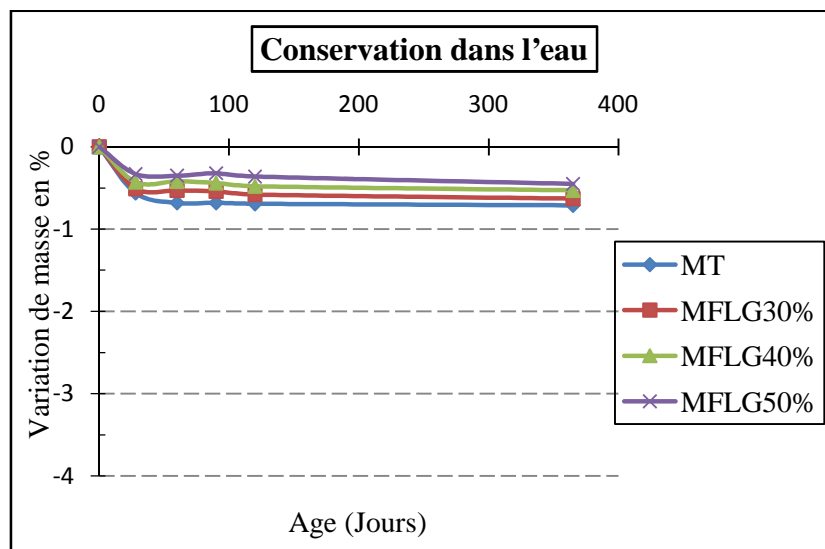


Figure IV.32-Variation de masse des mortiers avec substitution de laitier granulé conservés dans l'eau

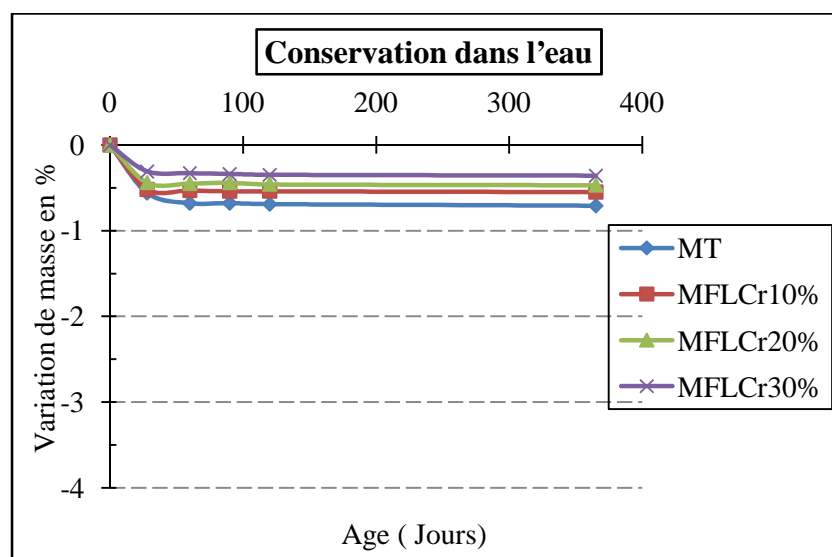


Figure IV.33-Variation de masse des mortiers avec substitution de laitier cristallisé conservés dans l'eau

Selon les résultats obtenus, on constate à court terme (jusqu'à 28 jours) une légère augmentation de la masse avec l'âge pour tous les mortiers d'étude. Cela peut s'expliquer par la fixation d'une partie de H₂O lors de la formation des hydrates dans le temps. Cette quantité d'eau fixée est plus élevée pour le mortier témoin que pour les mortiers avec laitier. Ensuite on constate pratiquement une stabilisation de la masse jusqu'à 365 jours.

V.3.2.1.2-Cas de conservation dans la solution sulfatique après démoulage

Dans le cas de conservation, juste après démoulage, dans une solution de sulfate de magnésium MgSO₄ on constat deux phases de la variation de masse comme il est illustré par les figures IV.34 et IV.35.

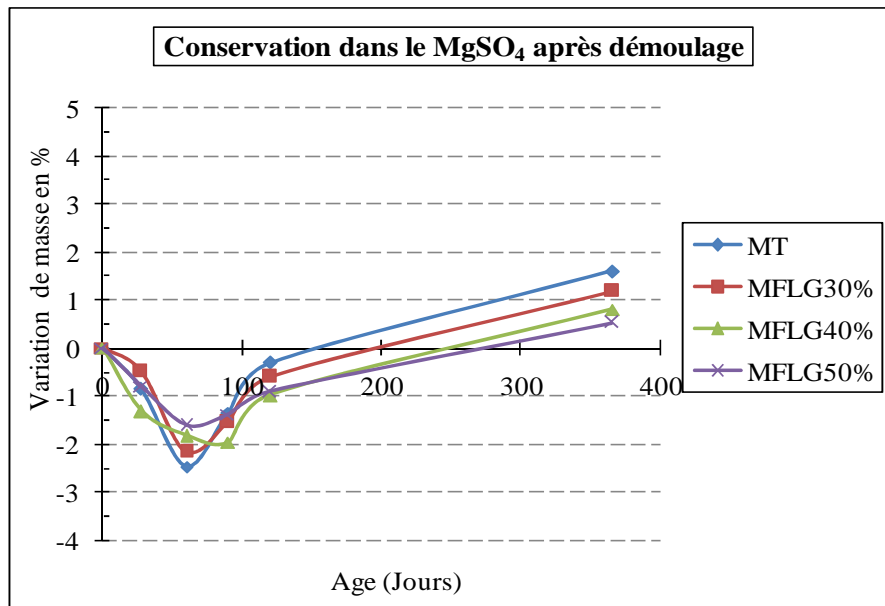


Figure IV.34- Variation de masse des mortiers avec substitution de laitier granulé conservés dans le MgSO₄ après démoulage

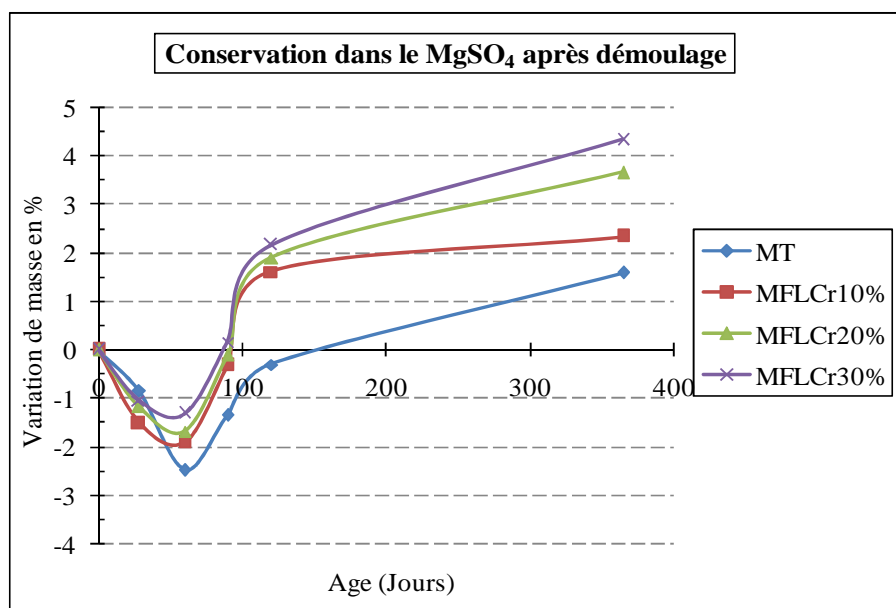


Figure IV.35- Variation de masse des mortiers avec substitution de laitier cristallisé conservés dans le MgSO₄ après démoulage

1^{ère} phase allant de 0 à 90 jours

Tous les mortiers présentent les mêmes allures de variation de masse. Durant cette phase, On constate une augmentation de masse importante pour tous les mortiers d'études conservés directement dans la solution sulfatique après démoulage par rapport à celles des mortiers conservés dans l'eau. Cette augmentation est obtenue suite à la formation de la brucite $Mg(OH)_2$, d'ettringite et du gypse secondaire qui résulte de la réaction entre la portlandite $Ca(OH)_2$ et $MgSO_4$ en présence de l'eau. Cette réaction est accompagnée d'un gonflement suivi d'un endommagement des échantillons de mortier.

Cette augmentation de la masse se diffère d'un mortier à l'autre et elle est en fonction du type et du taux de laitier. Cela peut s'expliquer par la diminution de la quantité des aluminates tricalciques C_3A dans le ciment en fonction du taux substitution utilisé et par conséquent une diminution de la quantité d'ettringite formée.

2^{ème} phase allant de 90 à 365 jours

Durant cette phase, on constate une diminution progressive de la masse avec l'âge de conservation. La perte de masse est de l'ordre de 1.17, 0.80 et 0.52 % pour les mortiers avec 30, 40 et 50% de laitier granulé, et de l'ordre de 2.33, 3.65 et 4.32% pour les mortiers avec 10, 20 et 30% de laitier cristallisé respectivement à 365 jours.

cette perte de masse est due à la lixiviation de la portlandite $Ca(OH)_2$. Ce phénomène se produit lorsque les éprouvettes de mortiers (matériaux cimentaires poreux) à caractère basique (PH entre 12,5 et 13,5) sont immergées dans une solution sulfatique $MgSO_4$ de faible concentration et d'un PH de 5,73. Ce changement de concentration provoque la dissolution de certains produits d'hydratation et plus particulièrement la portlandite (base forte) ce qui augmente la porosité des mortiers avec le temps.

V.3.2.1.3-Cas de conservation dans la solution sulfatique après une cure de 28 jours

Dans le cas de conservation dans une solution de sulfate de magnésium $MgSO_4$ après une cure de 28 jours, on constate deux phases de la variation de masse comme dans le cas de conservation directement après démoulage. Cette variation de masse illustrée par les figures IV.34 et IV.35.

Selon les résultats obtenus on observe une augmentation de la masse des éprouvettes durant la phase de 0 à 90 jours. Cette augmentation de masse est légèrement faible par rapport aux éprouvettes conservées directement dans la solution sulfatique, qui est due à la formation de la brucite $Mg(OH)_2$, d'ettringite et du gypse secondaire qui résulte de la réaction entre la portlandite $Ca(OH)_2$ et $MgSO_4$ en présence de l'eau.

Pour la 2^{ème} phase de 90 à 365 jours, on constate une diminution de la masse se différencier d'un mortier à l'autre et elle est en fonction du type et du taux de laitier qui est dû à la lixiviation de la portlandite $Ca(OH)_2$.

On a déjà montré dans les paragraphes précédents qu'une cure de 28 jours dans l'eau favorise le développement de la cinétique d'hydratation et l'amélioration de la microstructure par la

formation des hydrates et par conséquent l'amélioration compacité des mortiers. Ce qui gêne la pénétration des ions sulfatiques.

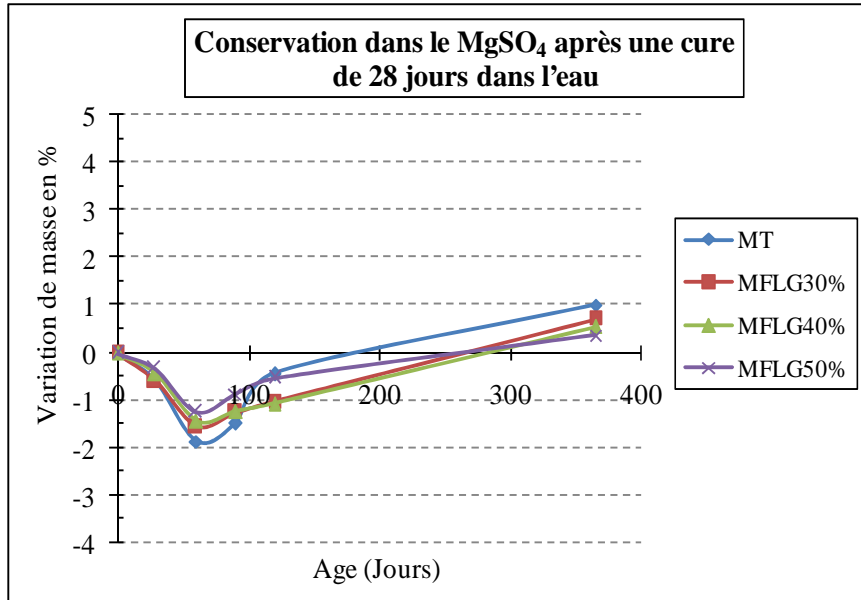


Figure IV.36-Variation de masse des mortiers avec substitution de laitier granulé conservés dans le MgSO₄ après une cure de 28 jours dans l'eau

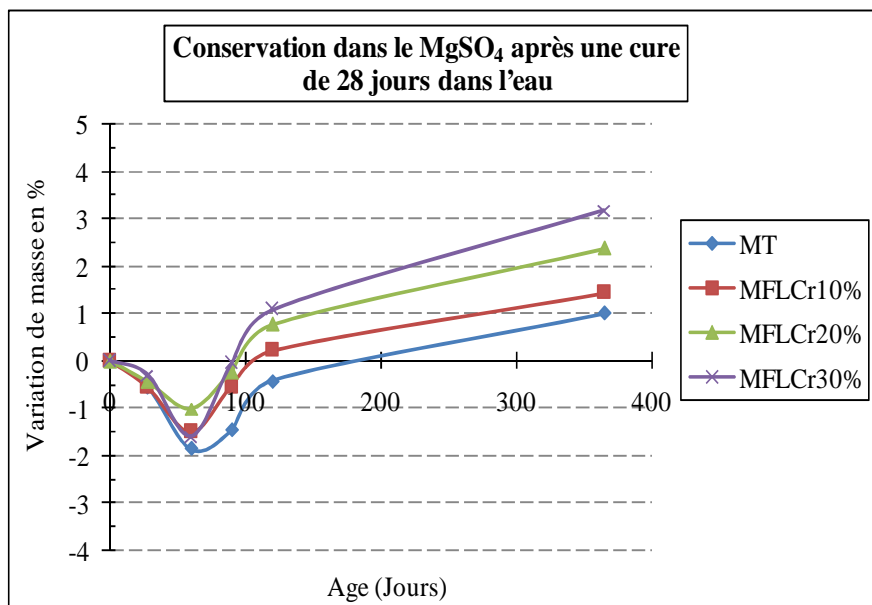


Figure IV.37-Variation de masse des mortiers avec substitution de laitier cristallisé conservés dans le MgSO₄ après une cure de 28 jours dans l'eau

V.3.2.2-Influence de la nature des additions minérales et le mode de conservation sur la variation de masse des bétons de sable

V.3.2.2.1-Cas de conservation dans l'eau

Les variations de masse des bétons de sable selon le type des additions minérales conservé dans une humidité saturante sont présentées sur la figure IV.38, d'après cette figure on remarque une légère augmentation de masse jusqu'à 28 jours, cette augmentation est presque similaire et porche pour les trois types d'additions à court terme, mais avec le temps on peut voir une légère augmentation dans la masse de BSFLG, cela est dû au propriété hydraulique de laitier granulé , qui forme plus d'hydrate avec le temps .

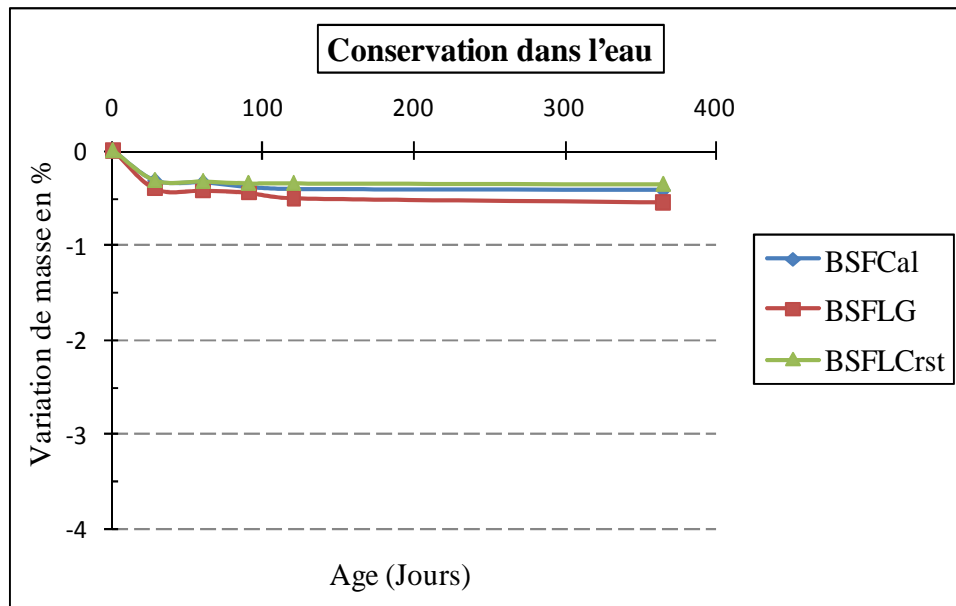


Figure IV.38- Variation de masse des bétons de sable conservés dans l'eau selon la nature des additions minérales

V.3.2.2.2-Cas de conservation dans le $MgSO_4$

Dans le cas de conservation dans une solution sulfate de magnésium $MgSO_4$, on constate deux phases dans la variation de masse comme il est illustré par les figures IV.39et IV.40.

- 1^{ère} phase allant de 0 à 90 jours

Comme les résultats obtenus sur les mortiers, on constate une augmentation de masse des éprouvettes d'études par rapport a celles conservées dans l'eau, cette augmentation est obtenue suite à la formation d'ettringite et du gypse secondaire par réaction entre la portlandite $Ca(OH)_2$ ou les C_3A et la solution de $MgSO_4$ en présence de l'eau, Cette augmentation de masse légèrement différente d'un béton à un autre en fonction de la nature d'addition.

- 2^{ème} phase allant de 90 à 365 jours

Après 60 jours on constate que la masse commence à diminuer progressivement avec l'âge de conservation, cette diminution est due à la lixiviation de la portlandite $Ca(OH)_2$. Les

échantillons sont exposés à une solution sulfatique de $MgSO_4$ de faible concentration par rapport aux échantillons qui sont des matériaux cimentaires poreux de caractère basique dû à la nature de la pâte durcie. Pendant la conservation dans la solution sulfatique, ce changement de concentration provoque la dissolution des produits d'hydratation de la matrice cimentaire principalement la portlandite (base forte) ce qui augmente la porosité des mortiers avec le temps.

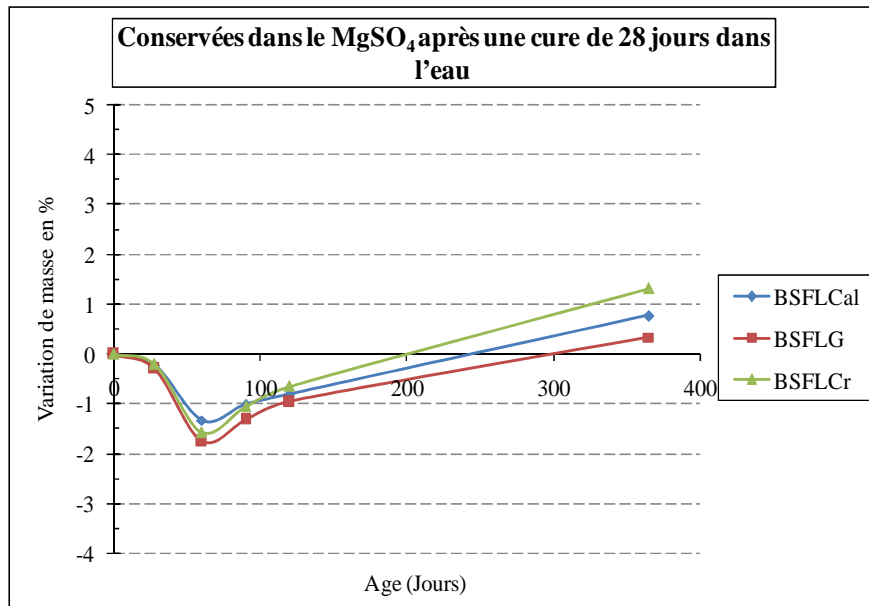


Figure IV.39- Variation de masse des bétons de sable conservés dans le $MgSO_4$ après une cure de 28 jours dans l'eau selon la nature des additions minérales

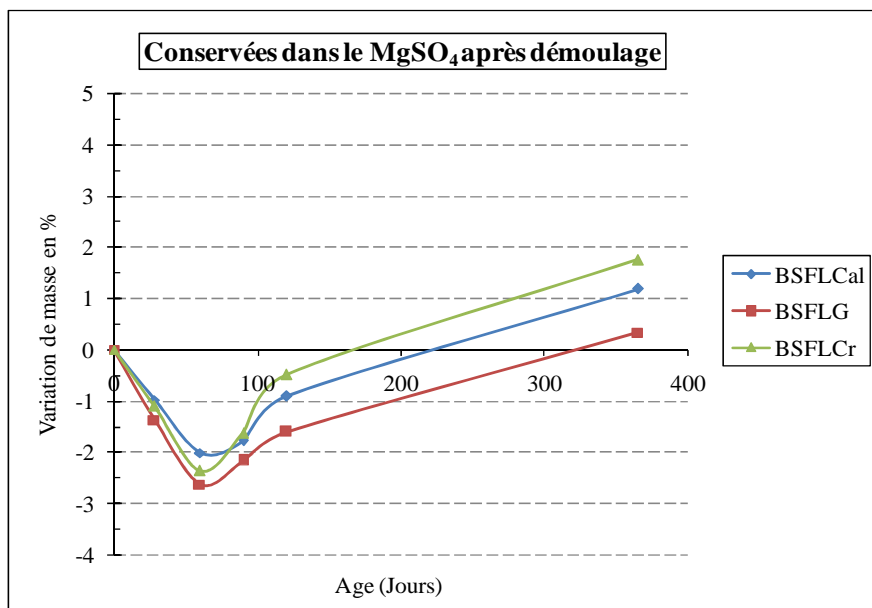


Figure IV.40- Variation de masse des bétons de sable conservés dans le $MgSO_4$ après démoulage selon la nature des additions minérales

V.3.3- Influence de la nature des additions minérales et le mode de conservation sur la profondeur d'alcalinité

La profondeur d'alcalinité des mortiers et des bétons de sable conservé dans un milieu sulfatique a été déterminée par pulvérisation d'une solution de phénolphthaléine sur les surfaces fraîches des éprouvettes.

V.3.3.1- Cas des mortiers

L'effet de la nature des additions minérales et le mode de conservation sur la profondeur d'alcalinité est illustré par les figures IV.41, IV.42, V.43, IV.44 et IV.45

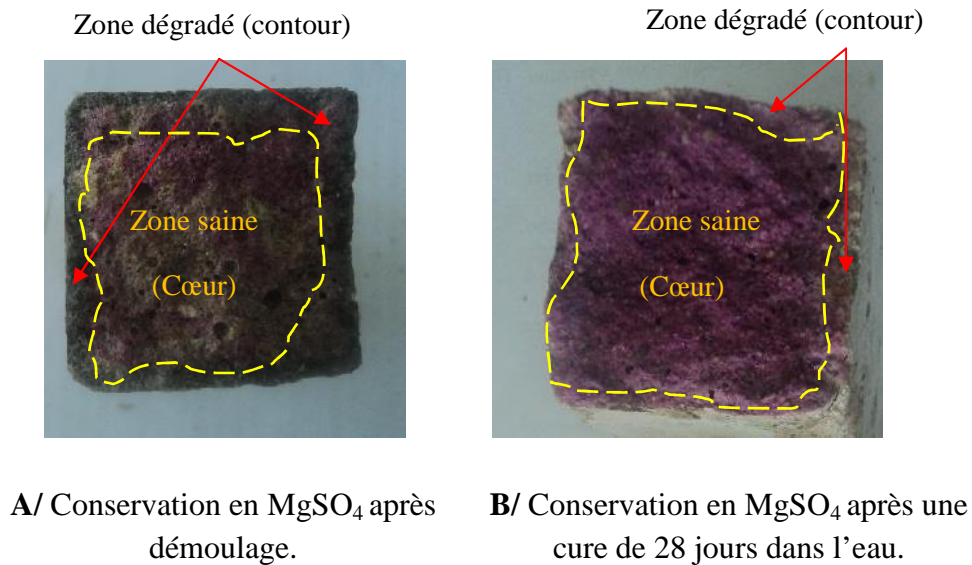


Figure IV.41- Profondeur d'alcalinité du mortier témoin

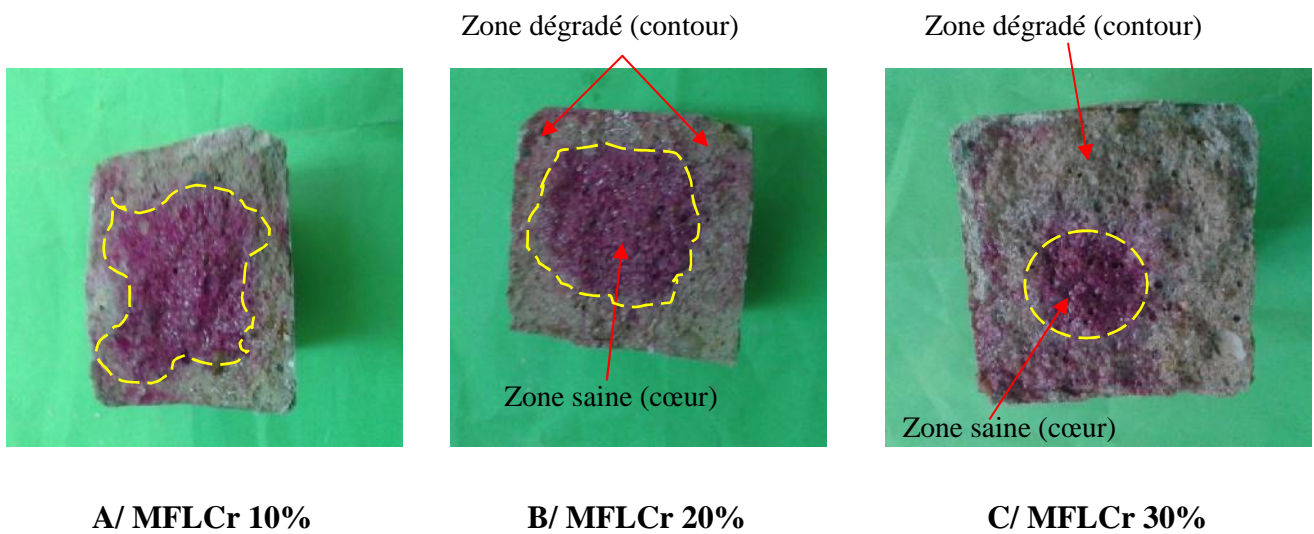


Figure V.42- Profondeur d'alcalinité des mortiers avec laitier cristallisé conservées après démoulage en $MgSO_4$

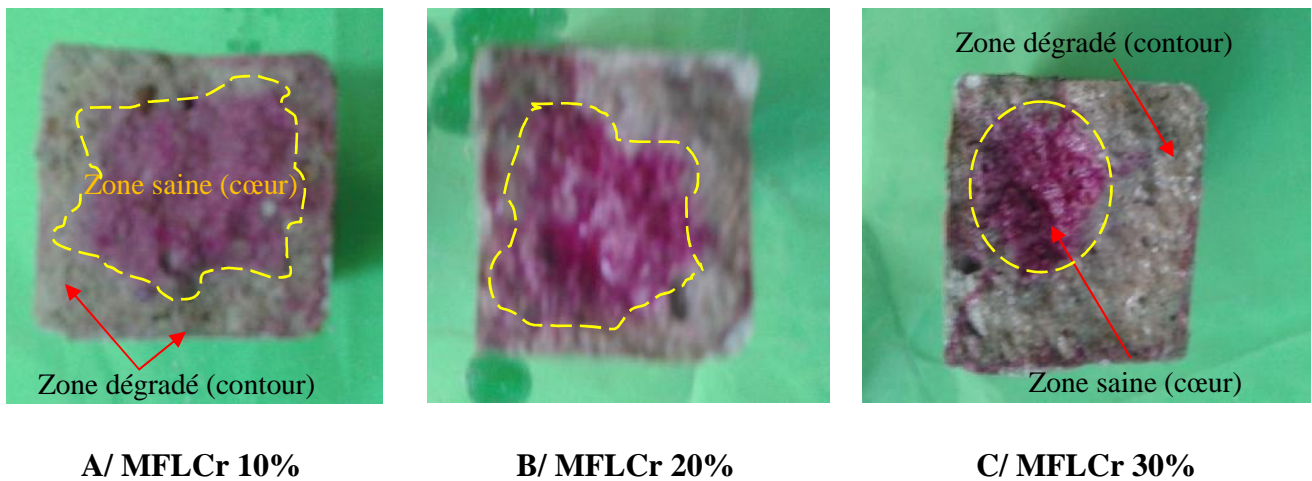


Figure V.43- Profondeur d'alcalinité des mortiers avec laitier cristallisé conservées après une cure de 28 jours dans l'eau en $MgSO_4$

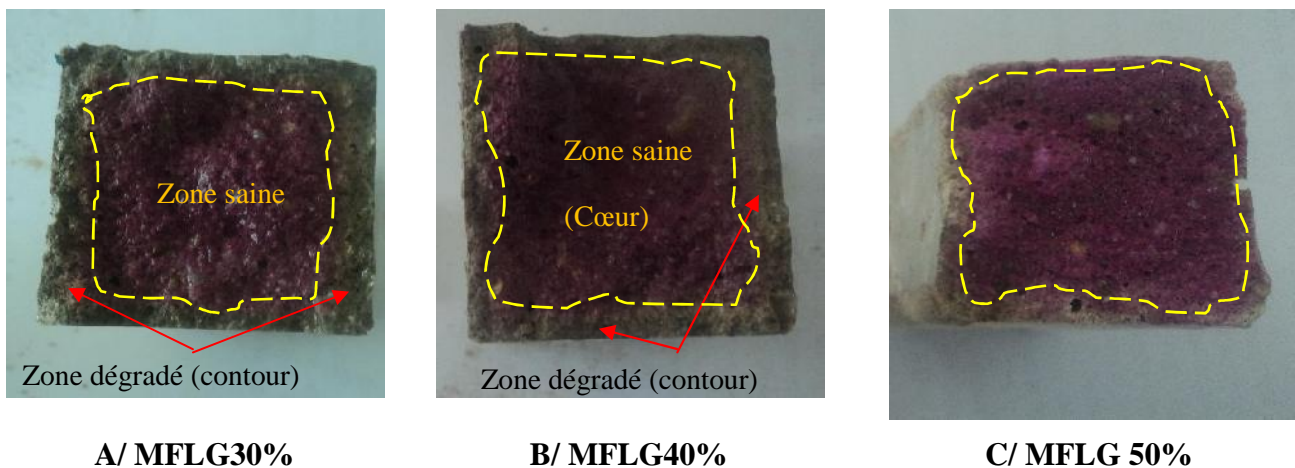


Figure IV.44-Profondeur d'alcalinité des mortiers avec de laitier granulé conservées après démouillage en $MgSO_4$

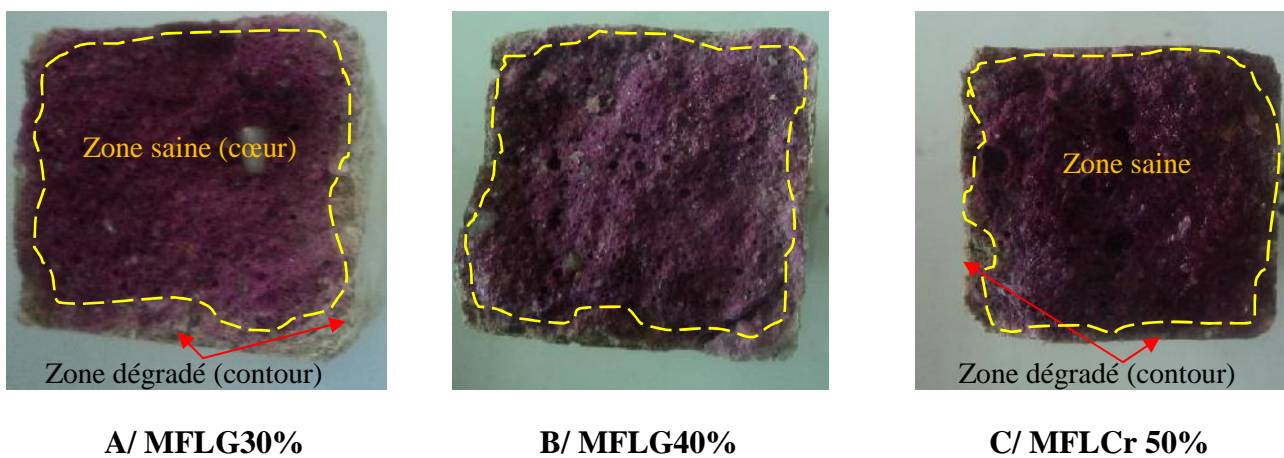


Figure IV.45-Profondeur d'alcalinité des mortiers avec substitution de laitier granulé conservées après une cure de 28 jours dans l'eau en $MgSO_4$

Par l'analyse des figures IV.41, IV.42, V.43, IV.44 et IV.45, on peut confirmer que la profondeur d'alcalinité est très influencée par la nature et le dosage de l'addition minérale. Cette profondeur se diffère d'un mortier à l'autre en fonction de plusieurs paramètres à savoir :

✓ **Effet du PH de la solution** : la durabilité des matériaux cimentaires est très influencée par la concentration du milieu de conservation. D'après [Cao et al, 1997], le PH est un facteur très important dans l'étude de l'agressivité des sulfates.

pour la matrice cimentaire à caractère alcalin (PH variable de 12,5 à 13,5), tous les milieux extérieurs dont le PH est inférieur à ces valeurs sont considérés comme des milieux agressifs. Donc les milieux sulfatiques avec un PH de 6 rentrent dans cette catégorie. Elles provoquent l'augmentation de la profondeur d'alcalinité par lixiviation de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$, suivie d'une dégradation des mortiers.

✓ **Effet du type de l'addition minéral** : la lixiviation de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$, exprimée par la profondeur d'alcalinité, traduit le degré de dégradation des matériaux. Cette profondeur est très affectée par le type d'addition. Elle est très visible dans le cas des mortiers avec laitier cristallisé et moins visible dans les cas des mortiers témoins et ceux avec laitier granulé.

Ceci s'explique par l'activité hydraulique du laitier granulé qui consomme une bonne partie de la portlandite et par conséquent réduit le degré de lixiviation et améliore la résistance aux attaques sulfatiques. En plus le milieu sulfatique est considéré comme un activateur pour l'hydratation des grains de laitier granulé, comme le montre Perlot [Perlot, 2005].

✓ **Effet du taux de substitution** : Le taux de substitution est un paramètre d'influence de la profondeur d'alcalinité. L'accroissement de cette profondeur est nettement visible avec l'augmentation du taux de substitution en laitier cristallisé. Ceci s'explique par la diminution des minéraux du clinker (surtout les C_3S et C_2S) lors du remplacement d'une partie du ciment par le laitier cristallisé qui présente une réactivité hydraulique très faible.

Par contre, la profondeur d'alcalinité diminue avec l'augmentation du taux de substitution en laitier granulé qui présente une réactivité chimique plus meilleure dans les milieux sulfatiques

✓ **Effet du mode de conservation**: les mortiers conservés directement après démoulage dans la solution sulfatique sont plus endommagés par rapport à ceux conservés après une cure de 28 jours dans la même solution. Cela s'explique par la double action des sulfates de MgSO_4 avec la portlandite et le C_3A . La lixiviation de la portlandite dans ce cas elle est très importante comme le montre les figures ci-dessous.

La cure de 28 jours en humidité saturante avant l'immersion des éprouvettes de mortiers dans la solution sulfatique permet la formation d'un maximum d'hydrates qui possèdent une structure cristalline plus stable, plus dense et plus résistante que celle obtenue après démoulage directement.

En conclusion on peut dire, que la détermination de la profondeur d'alcalinité confirme d'une façon significative les résultats de l'influence de la nature des additions minérales et le mode

de conservation des mortiers sur l'évolution des résistances mécaniques et sur la variation de masse.

V.3.3.1- Cas des bétons de sable fibré

La profondeur de l'alcalinité des bétons de sable dans un milieu sulfatique est influencée par les mêmes paramètres présentés au paragraphe précédent à savoir la nature d'addition et le mode de conservation. Grâce à la réactivité hydraulique du laitier granulé, les bétons de sable avec laitier granulé présentent une bonne résistance à l'attaque sulfatique avec une profondeur d'alcalinité plus petite par rapport aux bétons de sable respectivement avec fillers de calcaire et laitier cristallisé.

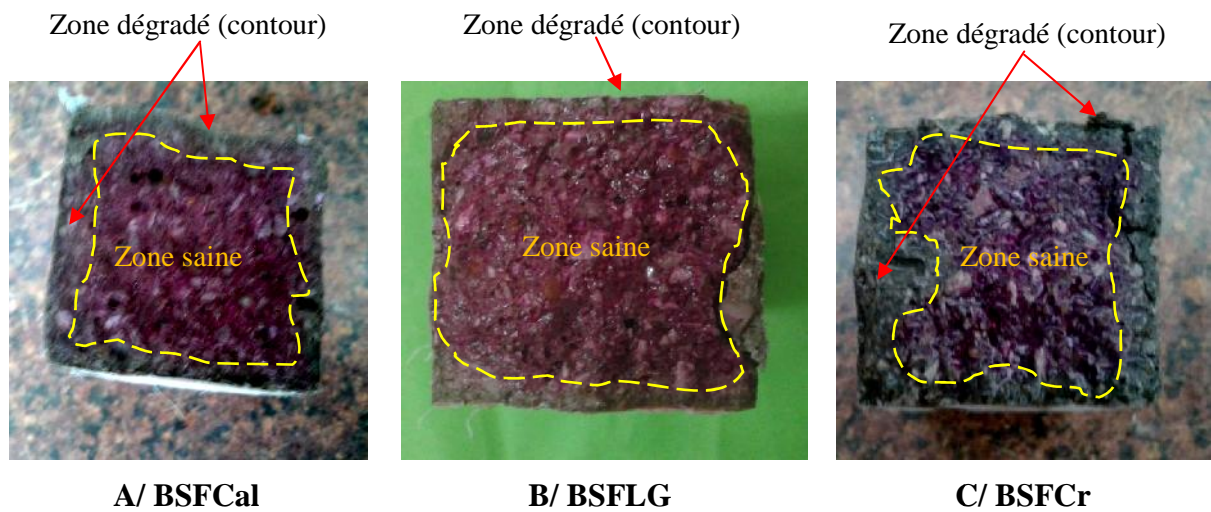


Figure IV.46-Profondeur d'alcalinité béton de sable conservées dans le $MgSO_4$ après démoulage

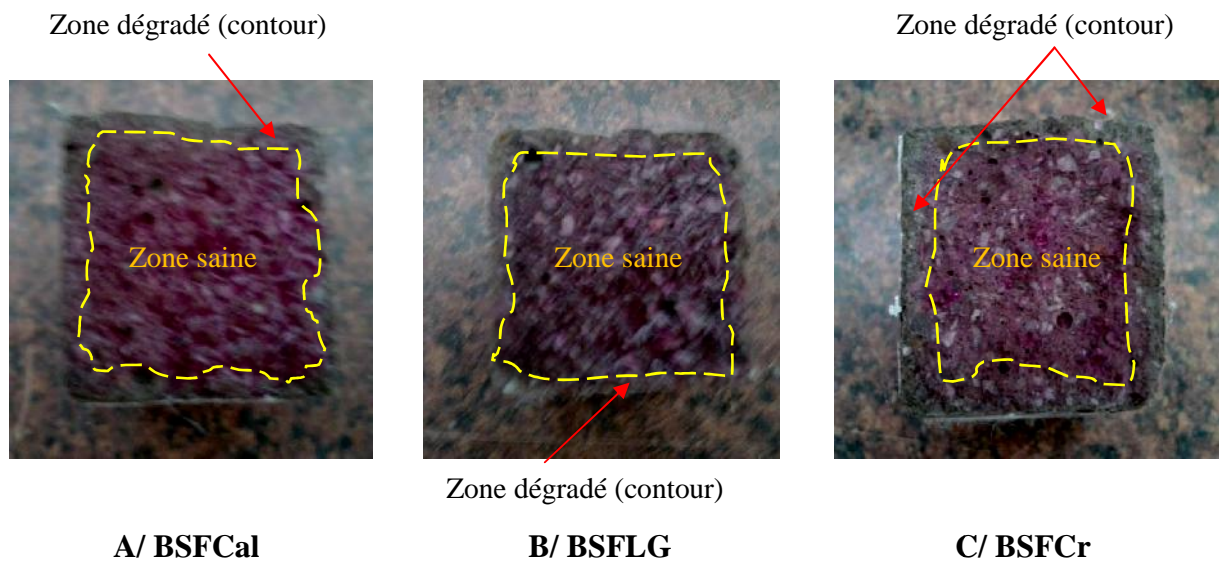


Figure IV.47-Profondeur d'alcalinité béton de sable conservées dans le $MgSO_4$ après une cure de 28 jours dans l'eau

V.3.4- Dégradation macrostructurale et microstructurale

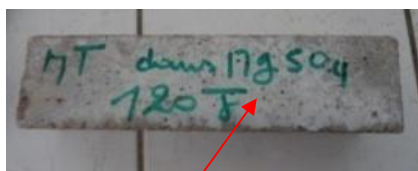
V.3.4.1- Dégradation macrostructurale des mortiers et des bétons de sable

Selon les photos présentées au niveau des figures IV.48, IV.49, IV .50, IV.51, IV .52 et IV.53, on peut voir que le degré d'endommagement des échantillons conservés dans une solution de sulfate de magnésium $MgSO_4$ se diffère selon le taux de substitution et la nature de l'addition minérale pour les mortiers et selon la nature fines d'ajout pour les béton de sable.

L'observation visuelle est marquée par la présence d'une couche de brucite de couleur blanche au niveau de la surface des éprouvettes. Cette couche est formée suite à la réaction entre la portlandite CH et le $MgSO_4$ (voir l'équation IV.12).



Les échantillons les moins affectés sont ceux des mortiers à base de laitier granulé, à l'inverse les échantillons de mortier avec laitier cristallisé sont les plus endommagés. L'endommagement observé (fissures et éclatement) est attribué à la formation des sels à caractère expansif obtenu suite aux réactions entre certains composants de la matrice cimentaire (portlandite) et les sulfatiques de magnésium. Ces derniers sont particulièrement agressifs par une double action des cations de Mg^{2+} qui s'échange avec les cations de Ca^{2+} et les anions de SO_4^{2-} . Ces échanges de Mg^{2+} avec Ca^{2+} mènent à la formation de la brucite $Mg(OH)_2$ qui peut freiner temporairement la pénétration des sulfates. Ils provoquent aussi la transformation progressive des CSH en silicate de magnésium hydraté MSH sans propriétés liantes. De plus la cristallisation de l'ettringite instable en présence de sulfate de magnésium intensifie la réaction de formation de gypse secondaire. Ceci confirme les travaux de Santhanam [Santhanam et al, 2003].



Couche de brucite



Figure IV.48- Dégradation visuelle des mortiers témoin (sans addition) conservés dans le $MgSO_4$

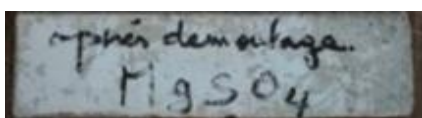


Figure IV.49- Dégradation visuelle des mortiers à base de laitier granulé conservés dans le $MgSO_4$

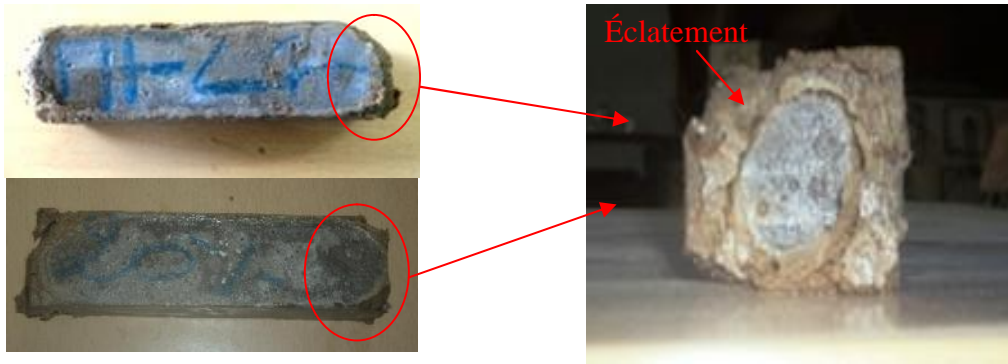


Figure IV.50- Dégradation visuelle des mortiers à base de laitier cristallisé conservés dans le $MgSO_4$



Figure IV.51- Dégradation visuelle des bétons de sable à base avec fillers calcaire conservés dans le $MgSO_4$



Figure IV.52- Dégradation visuelle des bétons de sable à base avec laitier granulé conservés dans le $MgSO_4$

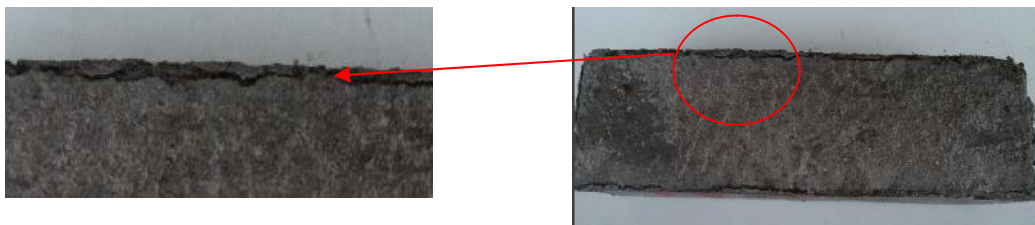


Figure V.53- Dégradation visuelle des bétons de sable à base avec laitier cristallisé conservés dans le $MgSO_4$

Gollop et Taylor [Gallop et Taylor, 1995] ont donné un schéma (figure IV.54) qui représente le mécanisme d'expansion et de dégradation des échantillons immergé dans une solution sulfatique, ils ont montrés que la réaction des composants de la pâte cimentaire avec la

solution sulfatique produise en premier lieu l'ettringite et par la suite le gypse. Ces deux composants se forment proche de la surface externe. Ce schéma peut donner une explication à la dégradation des mortiers d'étude en particulier ceux à base de laitier cristallisé.

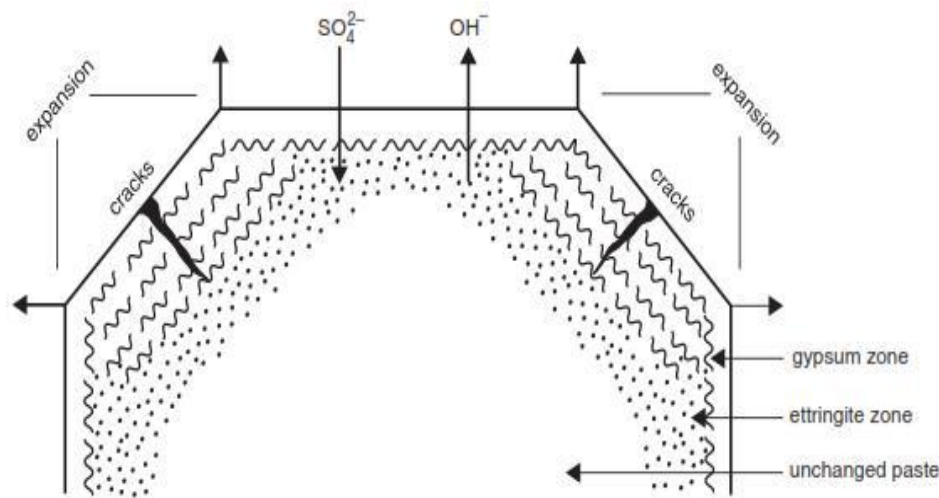


Figure IV.54-Représentation schématique de la microstructure d'une coupe d'une éprouvette après immersion dans une solution sulfatique [Gallop et Taylor, 1995]

V.3.4.2- Dégradation de la microstructure

V.3.4.2.1- La microstructure des mortiers

L'analyse de la microstructure a été réalisée sur des échantillons de mortier de référence, de mortier avec 50% de fillers de laitier granulé et ceux avec un mélange de 20% laitier granulé et 30% laitier cristallisé conservé pendant une année dans une solution de sulfate de magnésium $MgSO_4$. Cette analyse nous a permis d'identifier les nouveaux produits obtenus suite aux réactions entre les ions sulfatés et les produits d'hydratation du ciment. On peut voir au niveau des figures IV.55, IV.56, IV.57 et IV.58 les images de la microstructure associées de l'analyse élémentaire par spectrométrie de rayon X (EDX) des différents échantillons analysés.

Pour le mortier témoin sans additions minérales conservé dans la solution de $MgSO_4$ après une cure de 28 jours dans l'eau, la microstructure est très affectée par l'attaque sulfatique. La figure IV.56 qui caractérise l'attaque au niveau de la couche externe montre la formation des cristaux d'ettringite en pelotes.

La figure IV.55, qui caractérise l'attaque au niveau du cœur de l'éprouvette, montre la présence abondante de la portlandite avec une porosité très visible.

Pour ce même type de mortier conservé dans la solution sulfatique $MgSO_4$ juste après démoulage, on peut constater au niveau de la figure IV.58 la présence de la brucite à la surface de l'échantillon, cette dernière a été formée suite à la réaction de la portlandite CH et la solution de $MgSO_4$. Ceci justifie l'absence de la portlandite à la surface d'échantillon.

Au niveau du cœur de l'échantillon, la figure IV.57 montre la présence du gel de CSH.

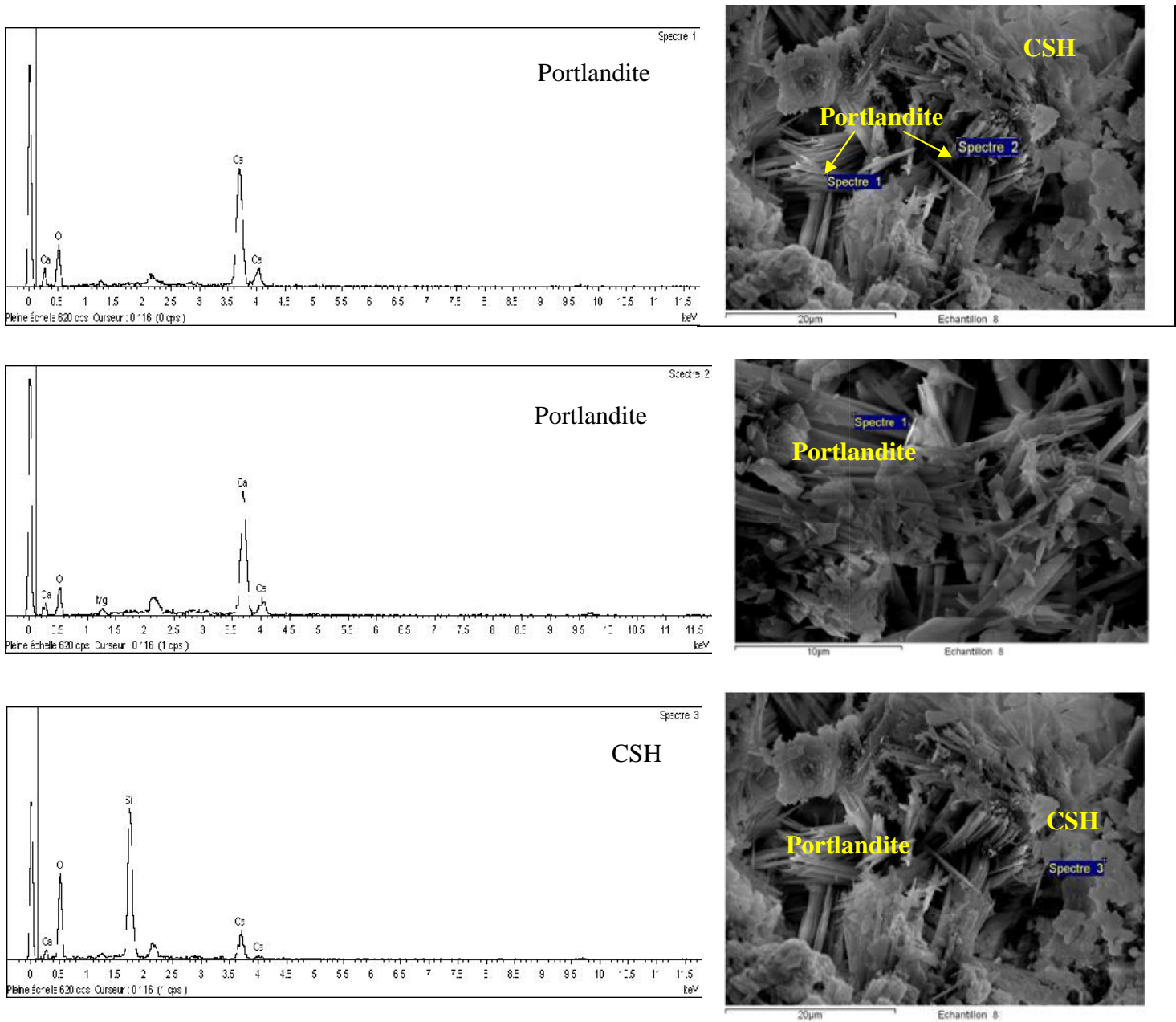
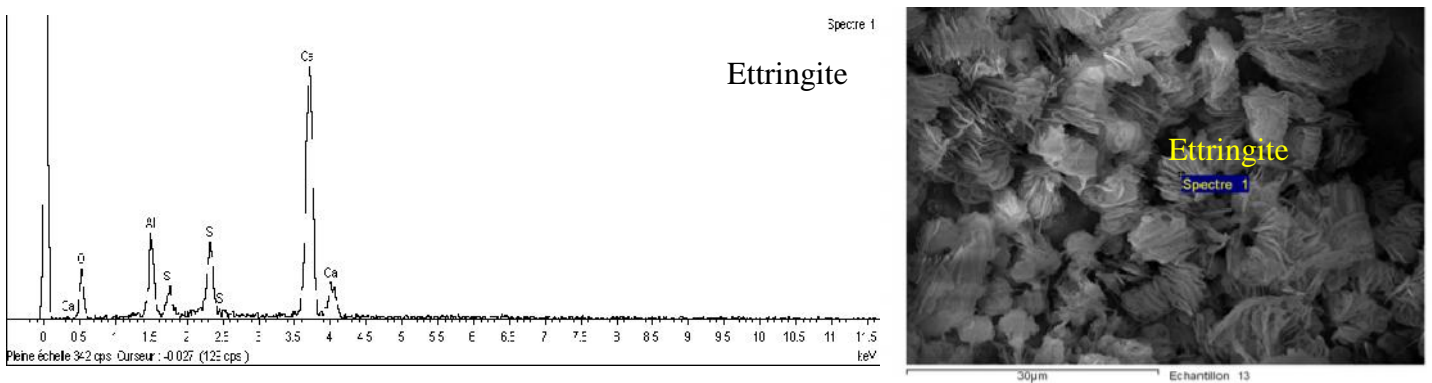


Figure IV.55-Mortier témoin conservé dans le $MgSO_4$ après une cure de 28 jours dans l'eau /cœur de l'éprouvette



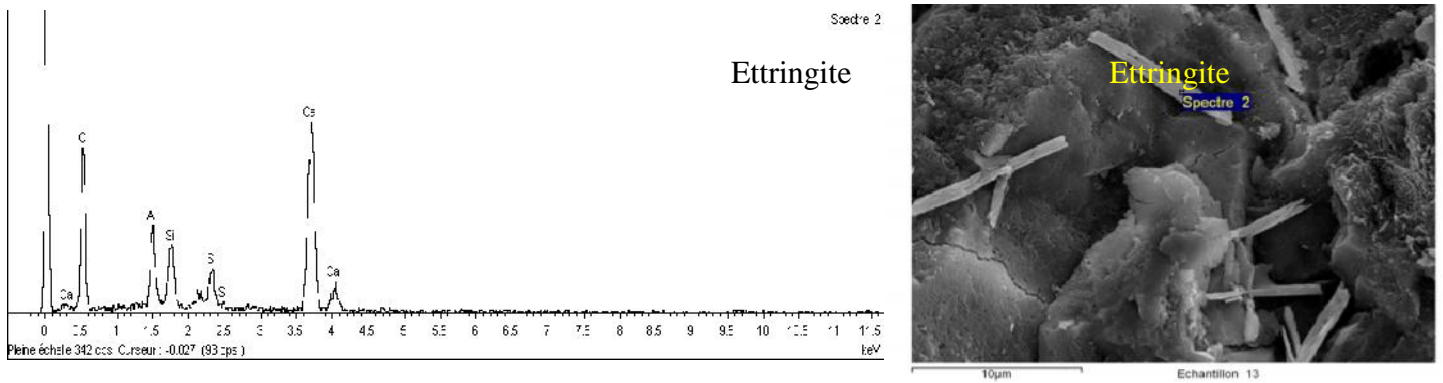


Figure IV.56 -Mortier témoin conservé dans le $MgSO_4$ après une cure de 28 jours dans l'eau /couche extérieure

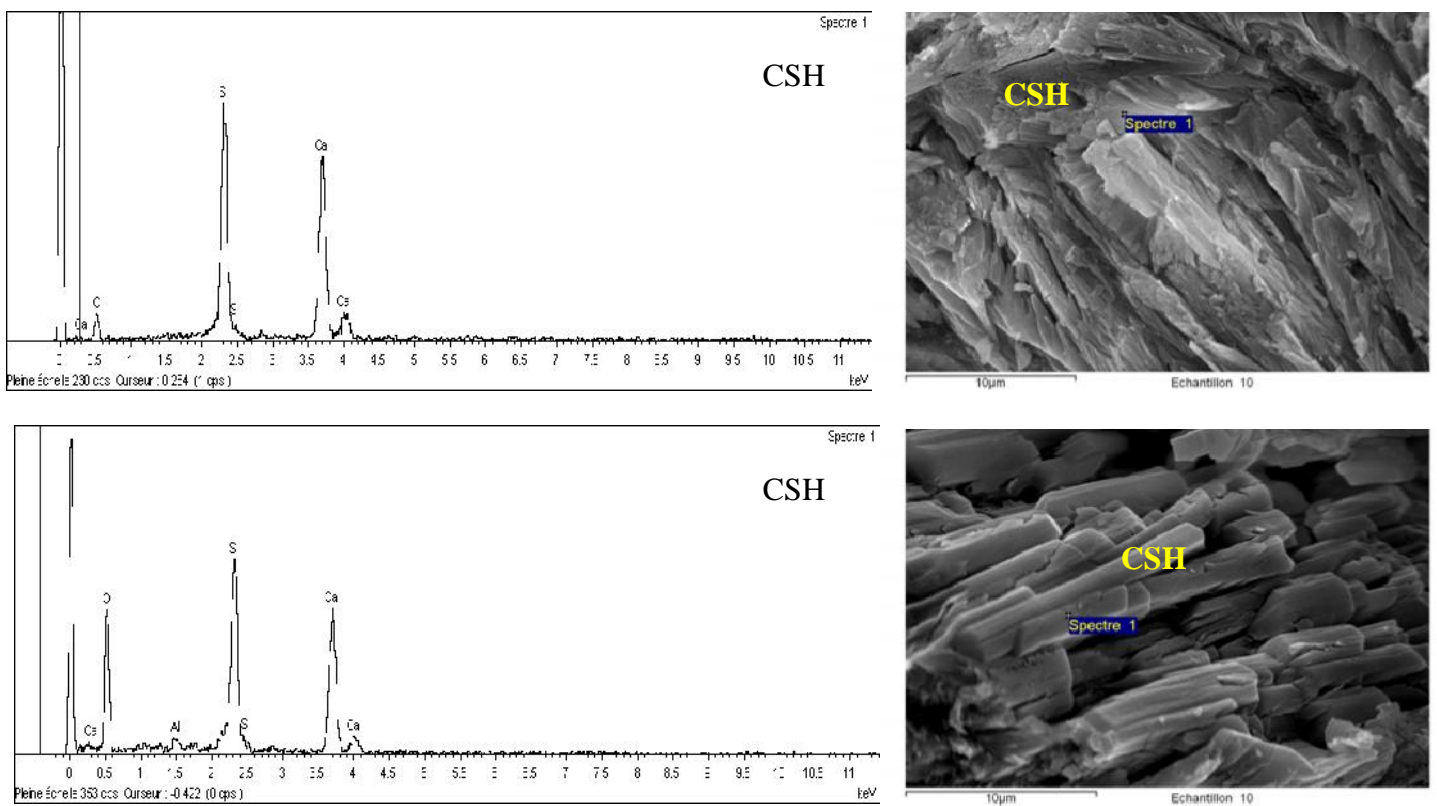
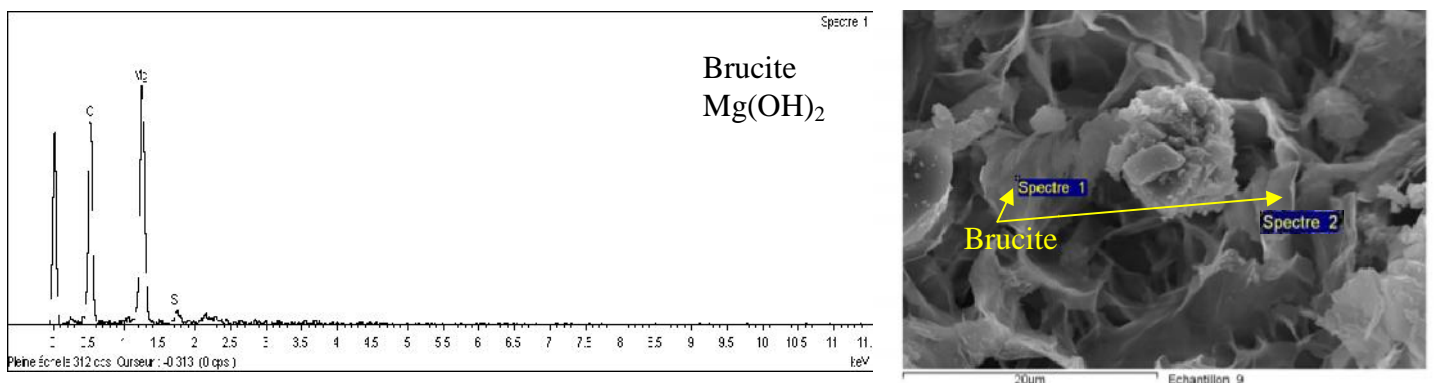


Figure IV.57-Mortier témoin conservé dans le $MgSO_4$ après démoulage / cœur de l'éprouvette



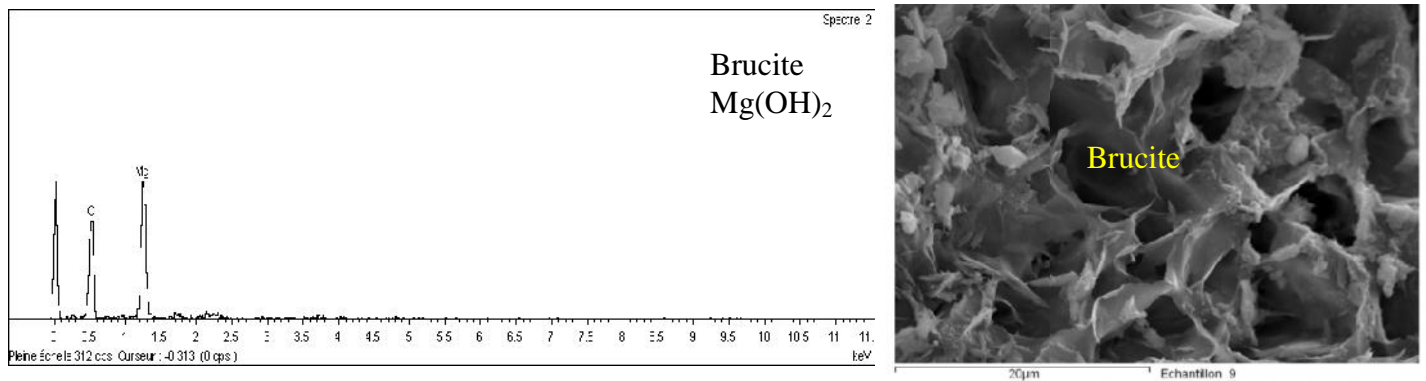


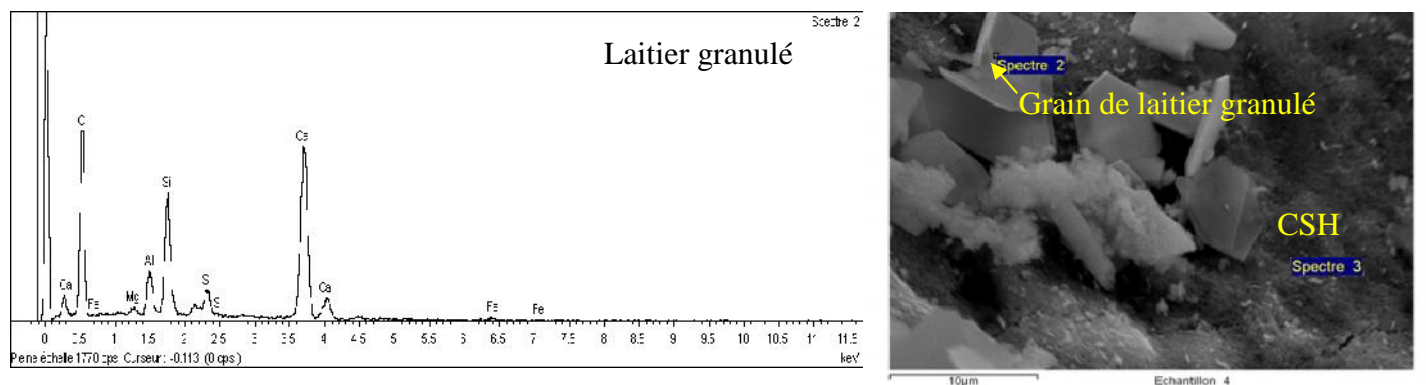
Figure IV.58-Mortier témoin conservé dans le $MgSO_4$ après démoulage / couche extérieure

Concernant le mortier à base de laitier granulé conservé dans la solution de $MgSO_4$ après une cure de 28 jours dans l'eau, on peut voir la présence des silicates de magnésium hydraté MSH à la face extérieure de l'éprouvette (figure 60) suite à la transformation des silicates de calcium hydraté CSH après la lixiviation de la portlandite.

Au niveau du cœur de l'éprouvette (figure 59), on peut observer une structure très dense de la pâte due à la formation d'une grande quantité de CSH avec la présence de quelques grains de laitier granulé anhydre.

Pour les mortiers à base de laitier granulé conservé directement après démoulage dans la solution de $MgSO_4$ présenté au niveau de la figure 62, on remarque la formation de cristaux d'ettringite à la surface d'éprouvette et le gel de CSH au cœur comme le montre la figure 61.

La quantité assez élevée de CSH dans les mortiers à base de laitier granulé due à l'activité de laitier granulé, ce dernier réagit avec la chaux libérée pendant l'hydratation du ciment pour former les CSH secondaires.



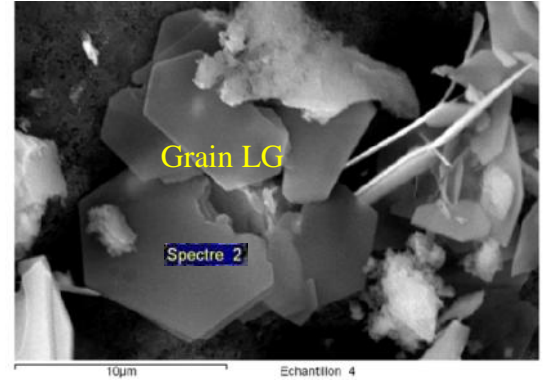
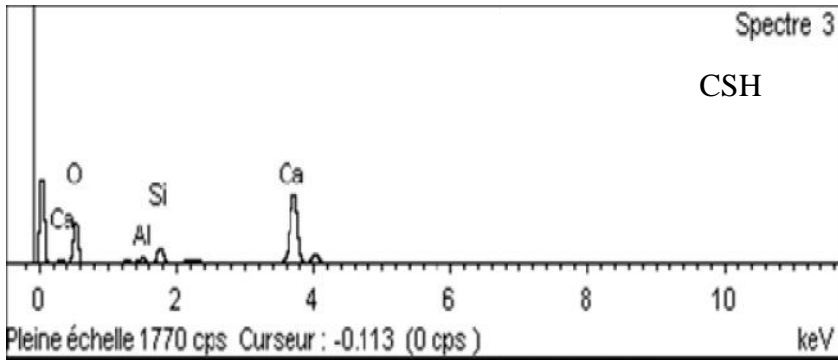


Figure IV.59-Mortier avec addition de laitier granulé conservé dans $MgSO_4$ après cure de 28 jours dans l'eau/cœur de l'éprouvette

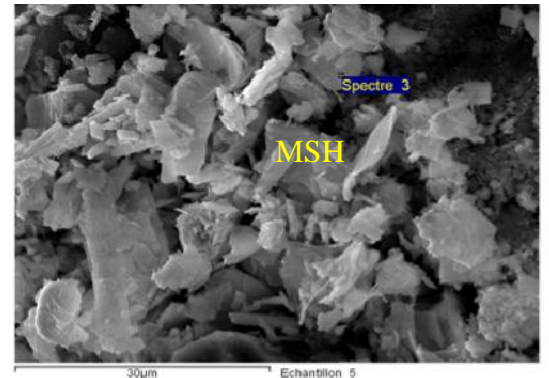
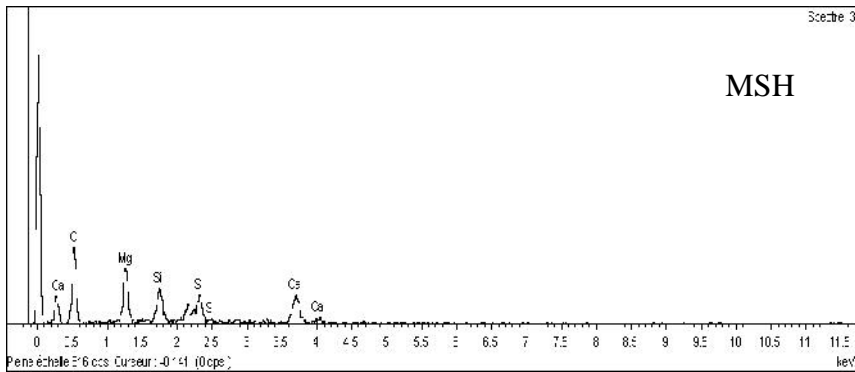
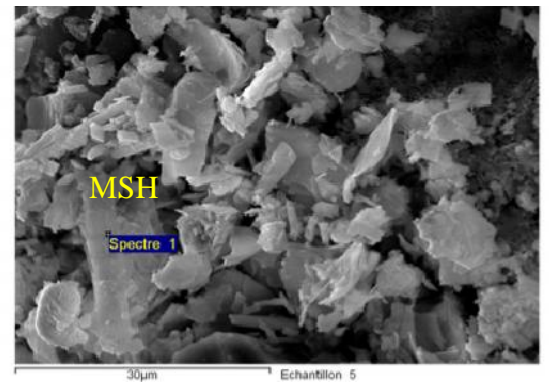
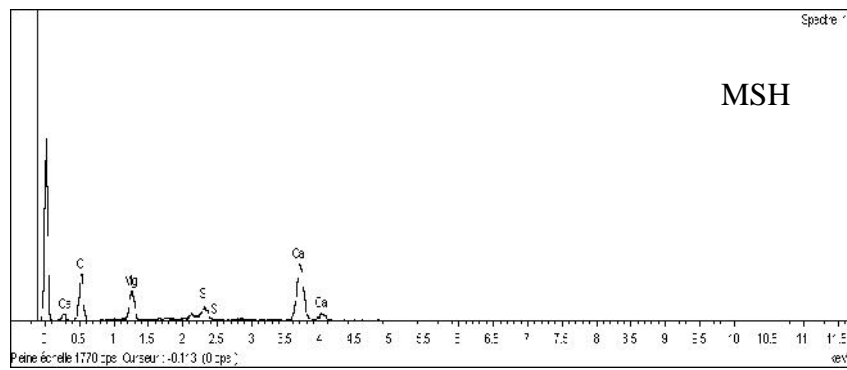
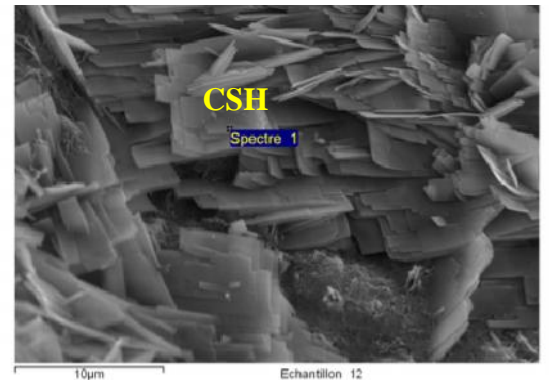
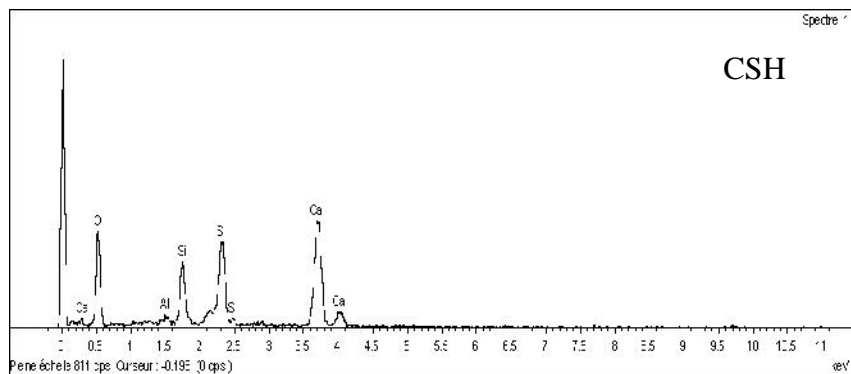


Figure IV.60-Mortier avec addition de laitier granulé conservé dans $MgSO_4$ après cure de 28 jours dans l'eau/ couche extérieure



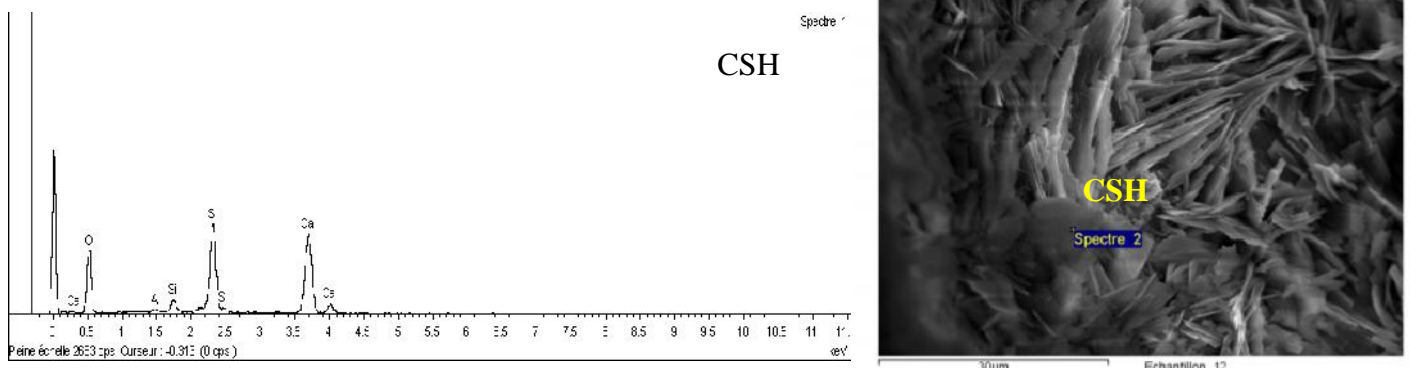


Figure IV.61-Mortier avec addition de laitier granulé conservé dans le $MgSO_4$ après démoulage / cœur de l'éprouvette

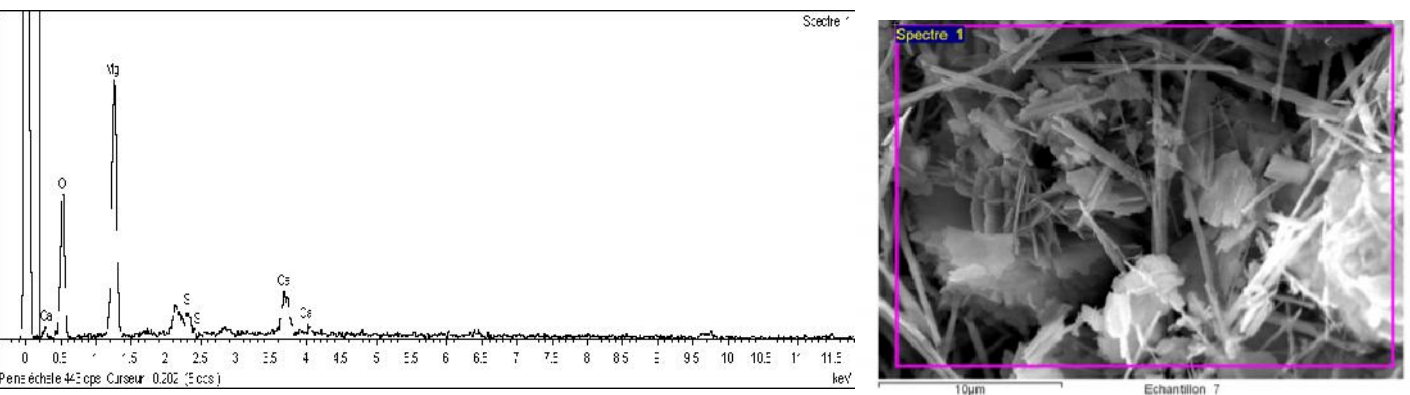
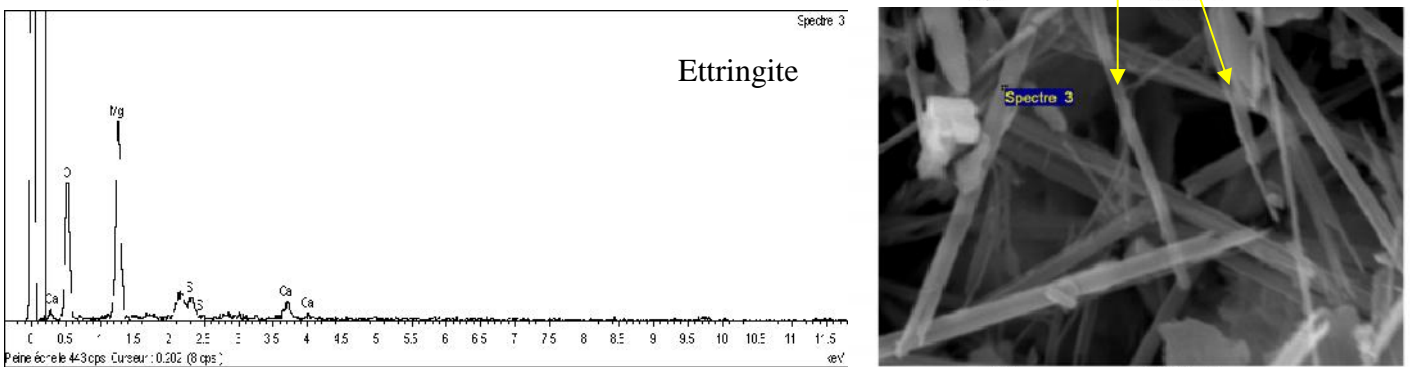
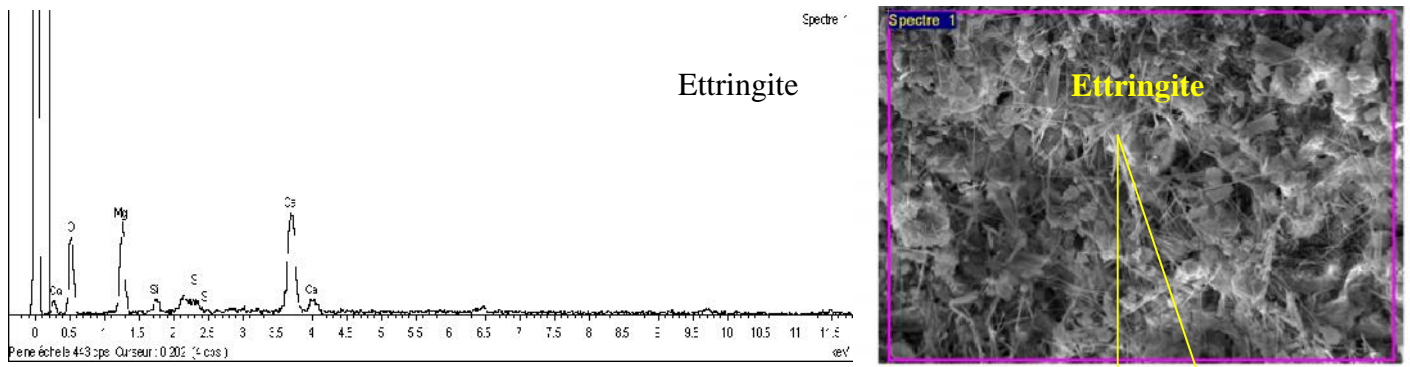


Figure IV.62-Mortier avec addition de laitier granulé conservé dans le $MgSO_4$ après démoulage / couche extérieur

Pour le mortier à base de laitier cristallisé conservé dans la solution de $MgSO_4$ après une cure de 28 jours dans l'eau, on peut voir la présence de la calcite au faciès extérieur de l'éprouvette (figure 64) et le gel de CSH dans le cœur d'échantillon comme le montre la figure 63.

La figure 66 montre que le faciès extérieur des mortiers avec laitier cristallisé conservé dans le $MgSO_4$ après démoulage est marqué par la présence de grandes quantités de gypse formé suite à la réaction entre la portlandite et l'ion sulfatique SO_4^{2-} . Au niveau du faciès intérieur on a observé la présence de la portlandite en quantité abondante (figure 65).

On peut conclure que les endommagements observés visuellement sont confirmés par l'analyse de la microstructure des mortiers après une année de conservation dans un milieu sulfatique et que la dégradation est plus visible au niveau des faciès suite à la formation des produits expansifs et moins affectés au niveau du cœur des échantillons qui restent plus au moins sain.

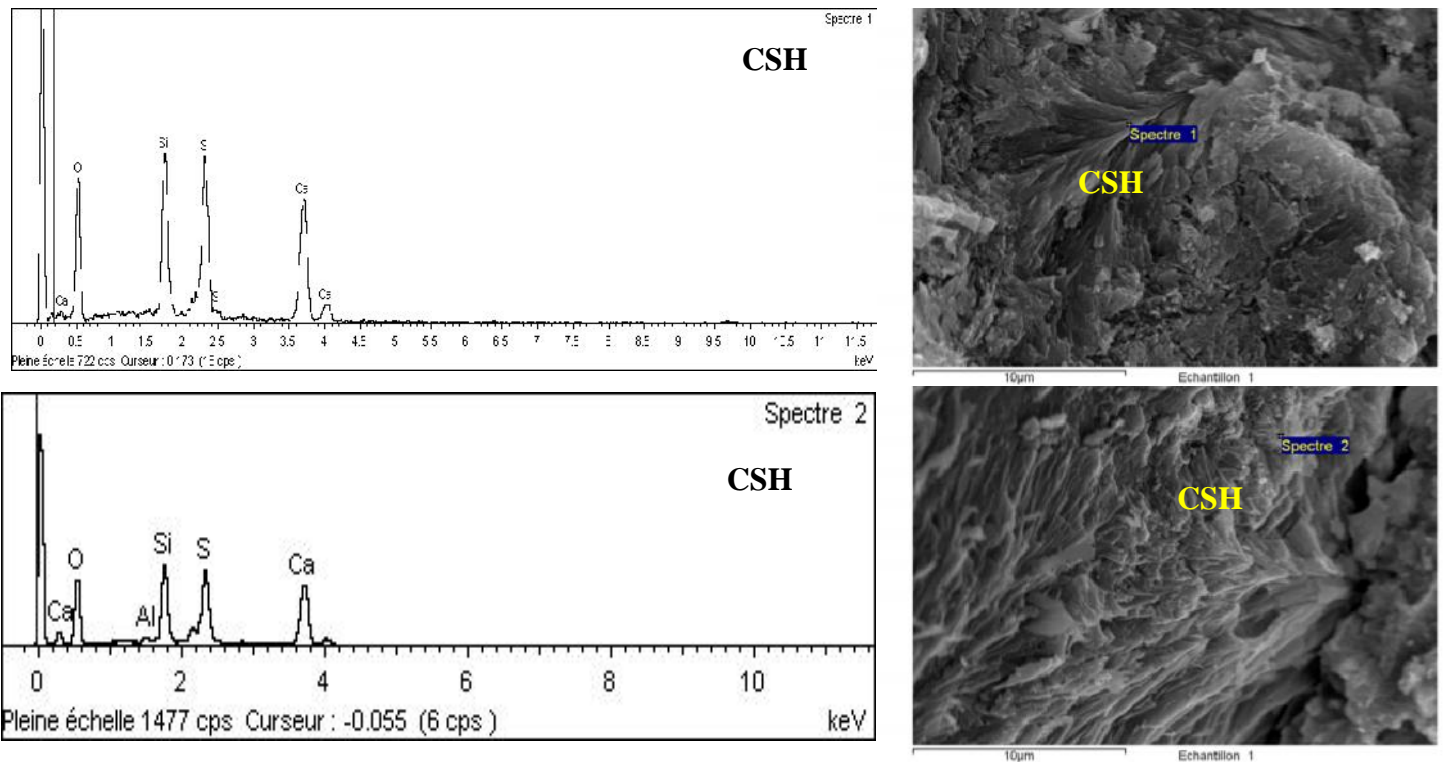


Figure IV.63-Mortier à base de fillers de laitier cristallisé conservé dans $MgSO_4$ après cure de 28 jours dans l'eau/ cœur de l'éprouvette

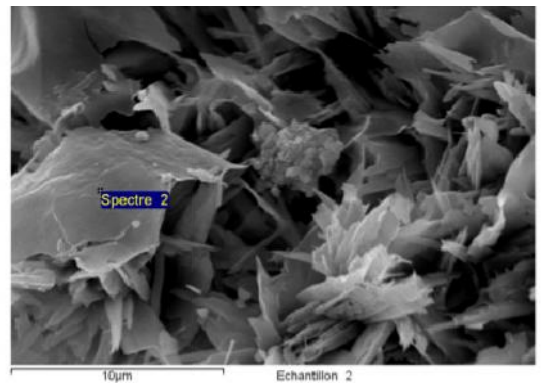
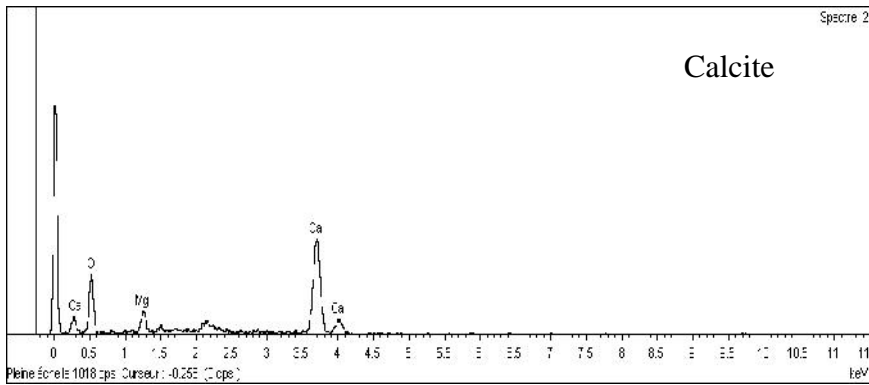
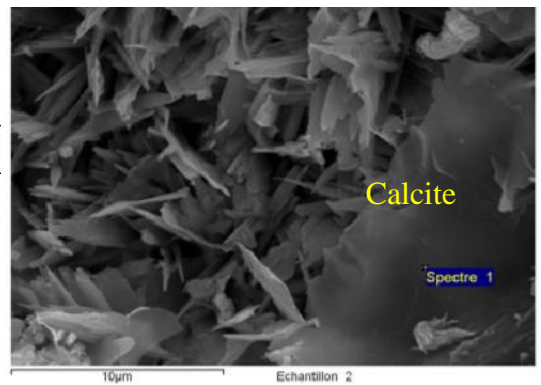
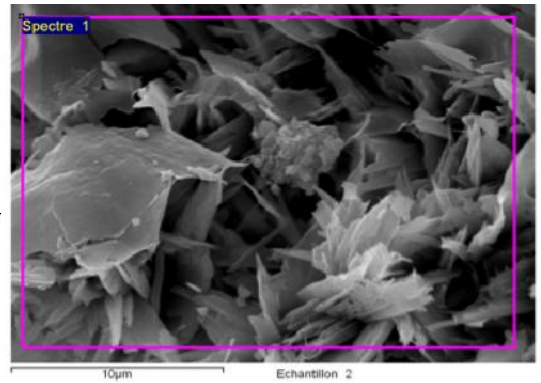
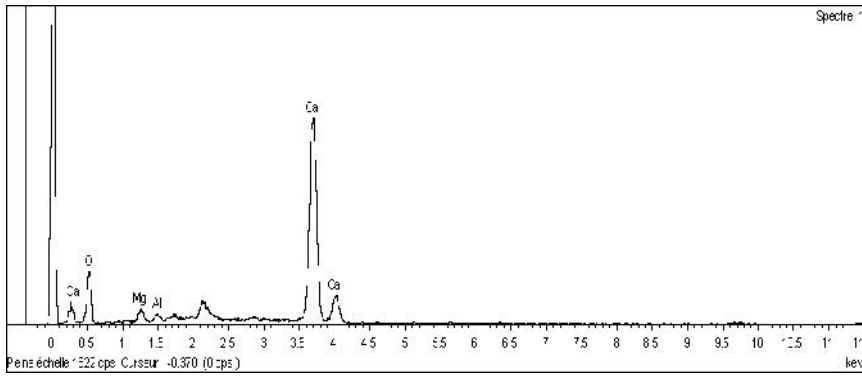


Figure IV.64-Mortier à base de fillers de laitier cristallisé conservé dans $MgSO_4$ après cure de 28 jours dans l'eau /couche extérieur



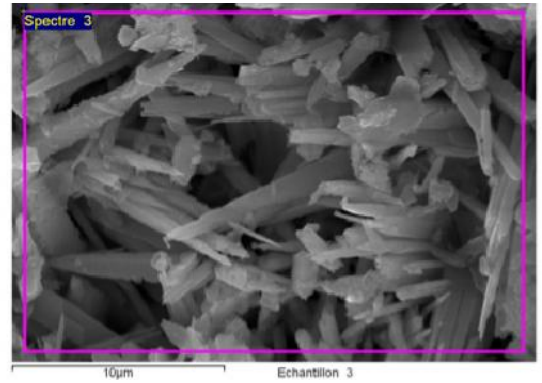
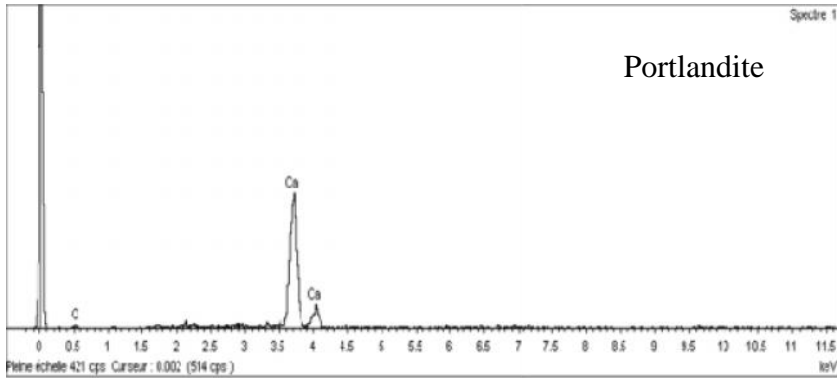


Figure IV.65-Mortier à base de fillers de laitier cristallisé conservé dans $MgSO_4$ après démoulage/ cœur de l'éprouvette

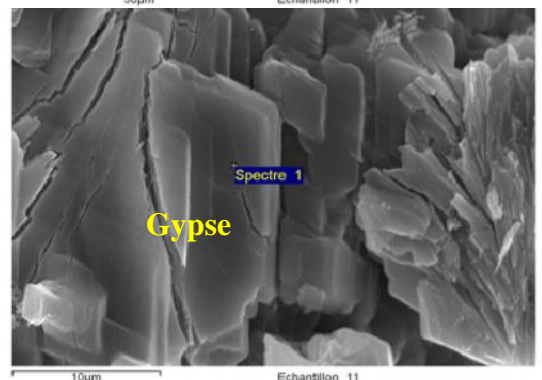
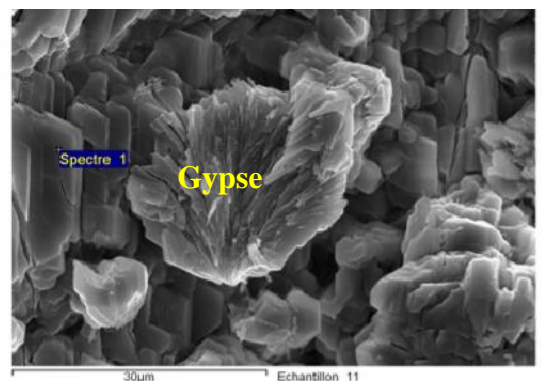
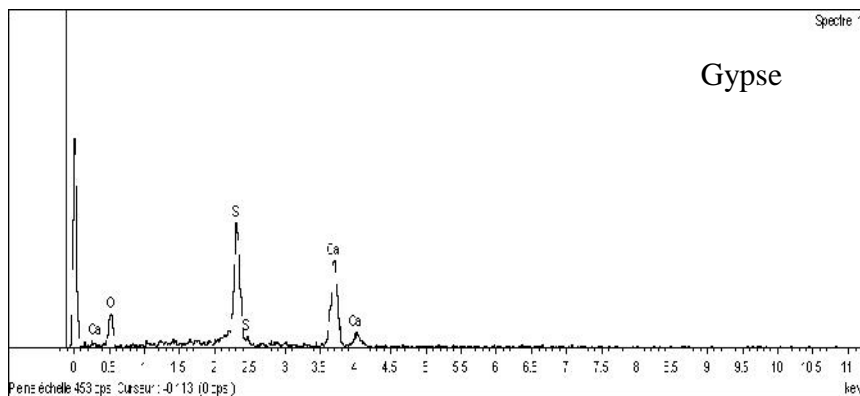


Figure IV.66-Mortier à base de fillers de laitier cristallisé conservé dans $MgSO_4$ après démoulage/ couche extérieure

V.3.4.2.2- La microstructure des bétons de sable fibré

L'analyse de la microstructure des échantillons de béton de sable fibré avec différents types d'addition (laitier granulé, laitier cristallisé et fillers calcaire) conservés dans une solution de sulfate de magnésium $MgSO_4$ a été réalisée après 6mois de dégradation. Cette analyse nous a permis d'identifier les nouveaux produits formés suite aux réactions entre les ions sulfatés et les produits d'hydratation du ciment. La microstructure associée de l'analyse élémentaire par spectrométrie de rayon X (EDX) des différents échantillons analysés illustrés par les figures 67, 68, 69, 70, 71, 72 et 73.

Pour les bétons de sable avec fillers calcaire conservé dans l'eau, on peut voir la présence de la portlandite phase extérieure (figure 67) et du gel de CSH dans le cœur de l'éprouvette (figure 68).

La figure montre que le faciès extérieur des bétons de sable avec addition de calcaire conservé dans le $MgSO_4$ après démoulage est marqué par la présence d'ettringite, comme le montre la figure 69 et on enregistre l'existence de la portlandite (calcite) au faciès intérieur (figure 70)

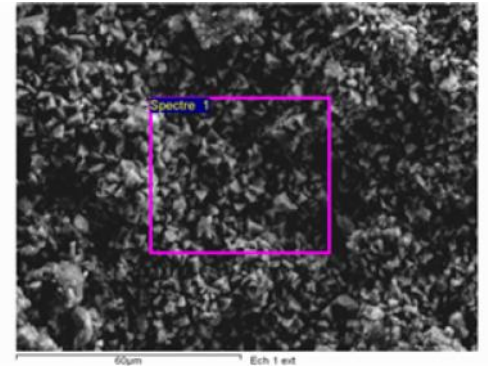
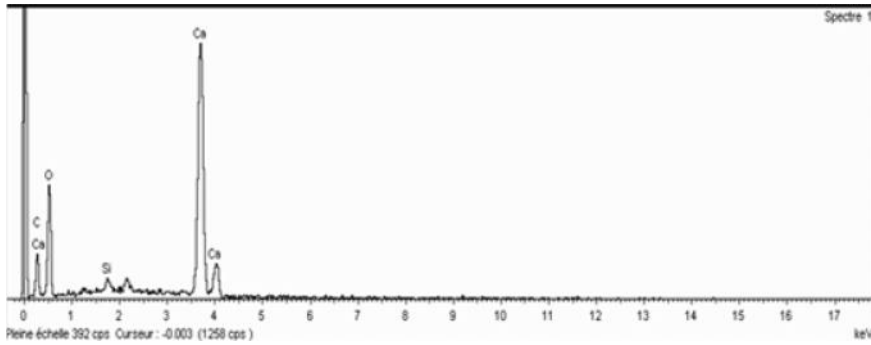


Figure IV.67- Béton de sable avec addition de fillers calcaire conservé dans l'eau / couche extérieure

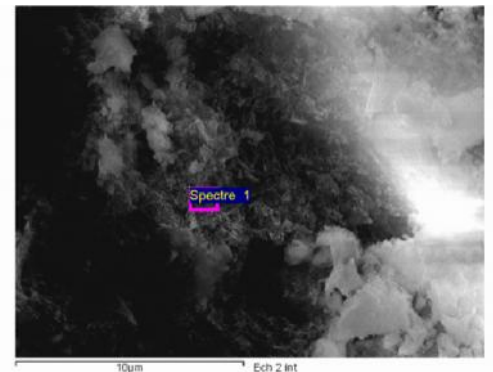
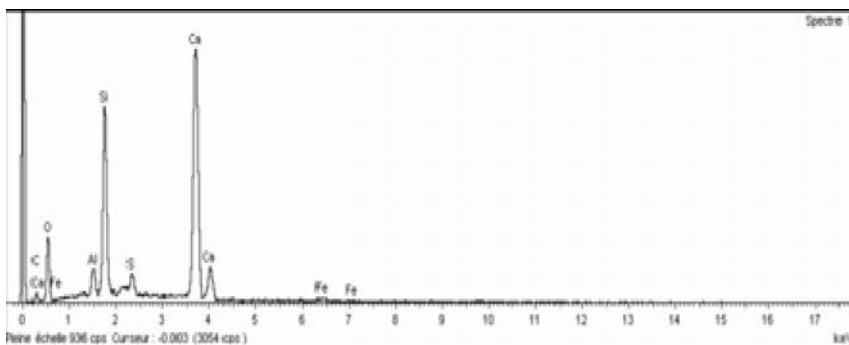
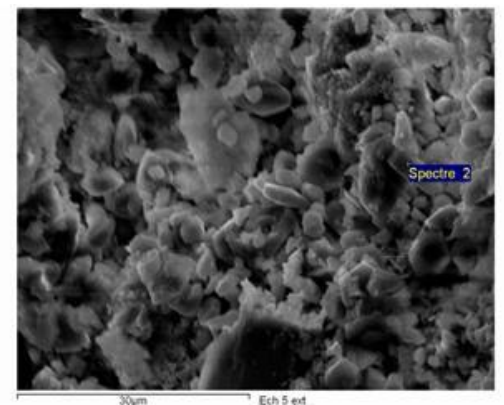
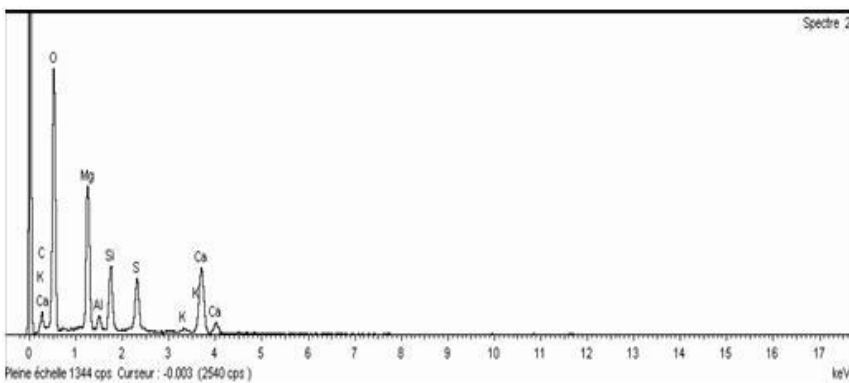


Figure IV.68- Béton de sable avec addition de fillers calcaire conservé dans l'eau / cœur de l'éprouvette



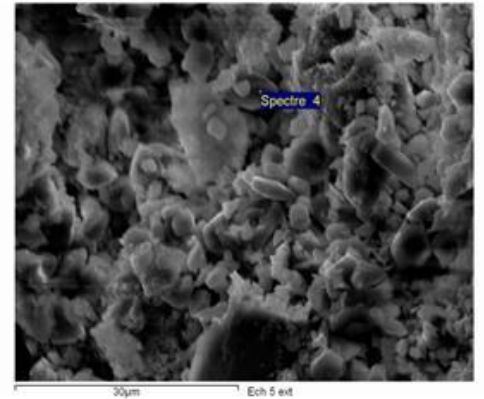
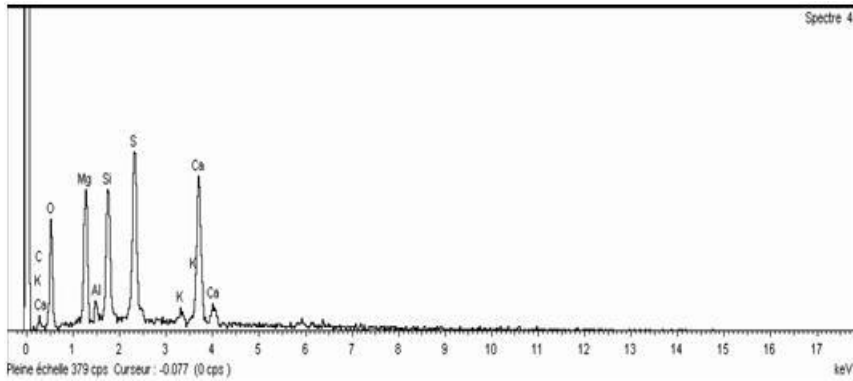


Figure IV.69- Béton de sable avec addition de fillers calcaire conservé dans $MgSO_4$ après démoulage / couche extérieure

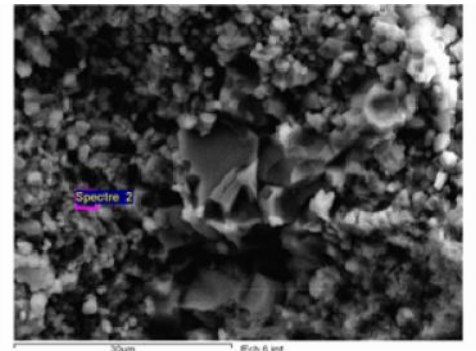
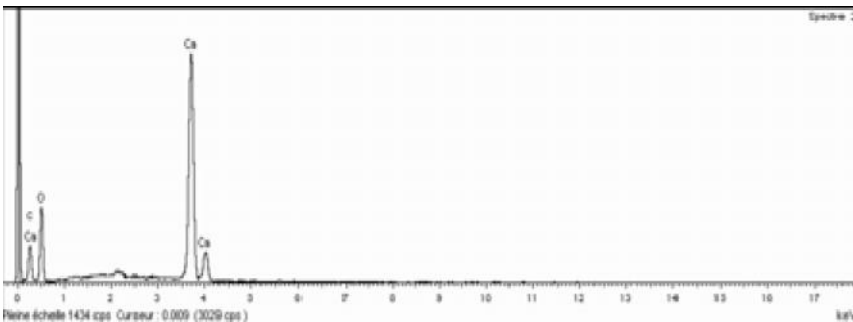
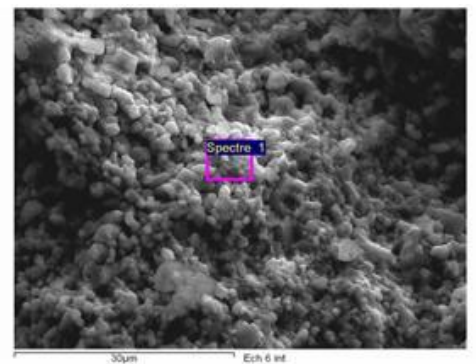
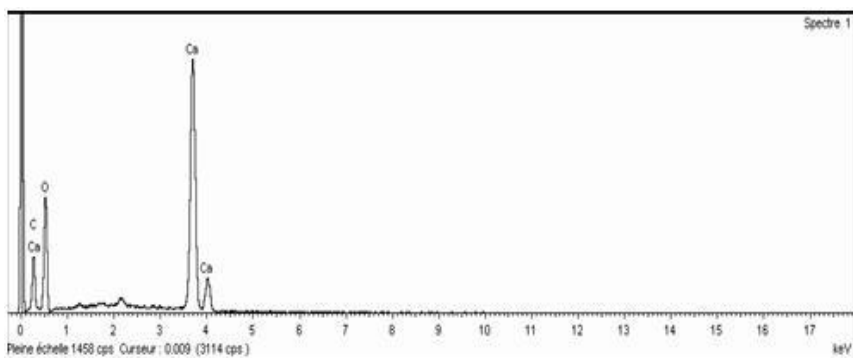


Figure IV.70- Béton de sable avec addition de fillers calcaire conservé dans $MgSO_4$ après démoulage / cœur de l'éprouvette

Concernant les bétons de sable avec fillers de laitier granulé conservé dans l'eau, au niveau du cœur de l'éprouvette (figure 71), on peut observer une structure très compacte de la matrice cimentaire avec la présence de la portlandite et des grains de laitier granulé non hydratés. Les mêmes produits sont observés au cœur d'éprouvettes conservées en $MgSO_4$ (figure 72).

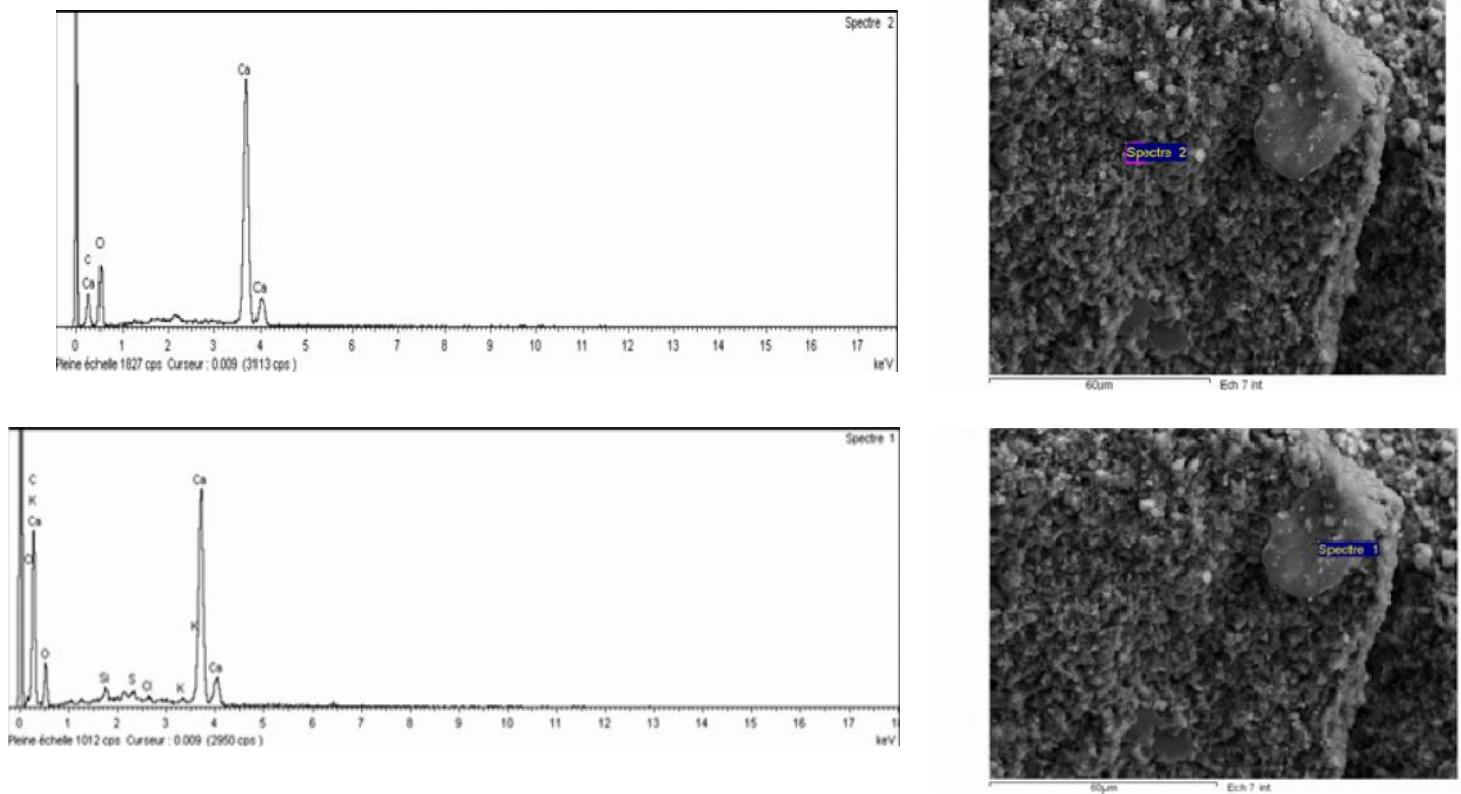


Figure IV.71- Béton de sable avec addition de fillers de laitier granulé conservé dans l'eau / cœur de l'éprouvette

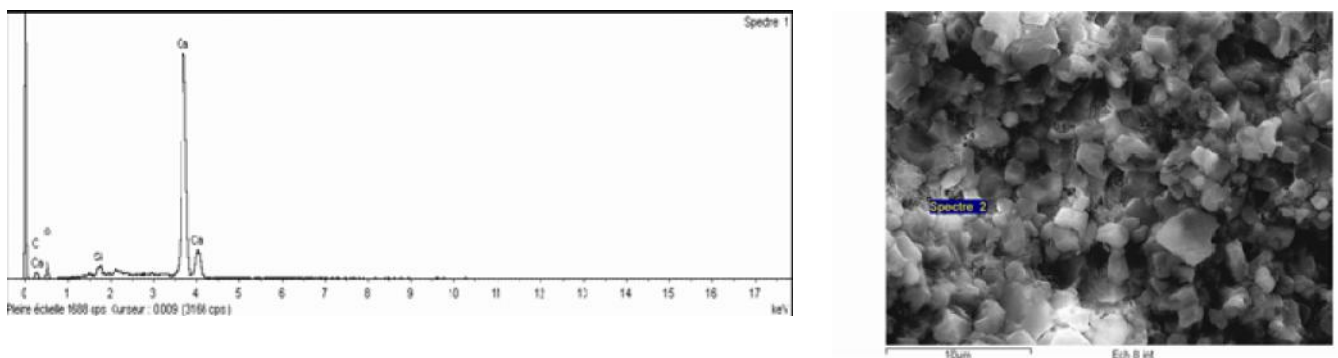
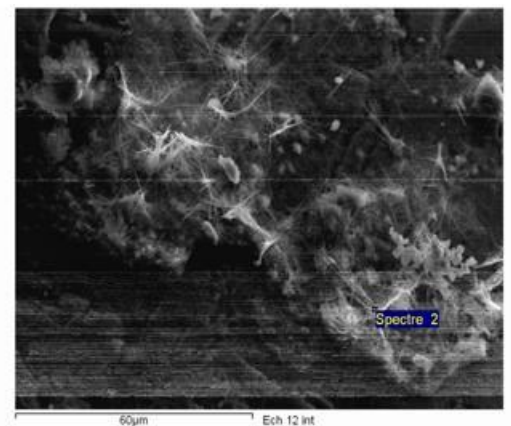


Figure IV.72- Béton de sable avec addition de fillers de laitier granulé conservé dans MgSO₄ après démoulage / cœur de l'éprouvette



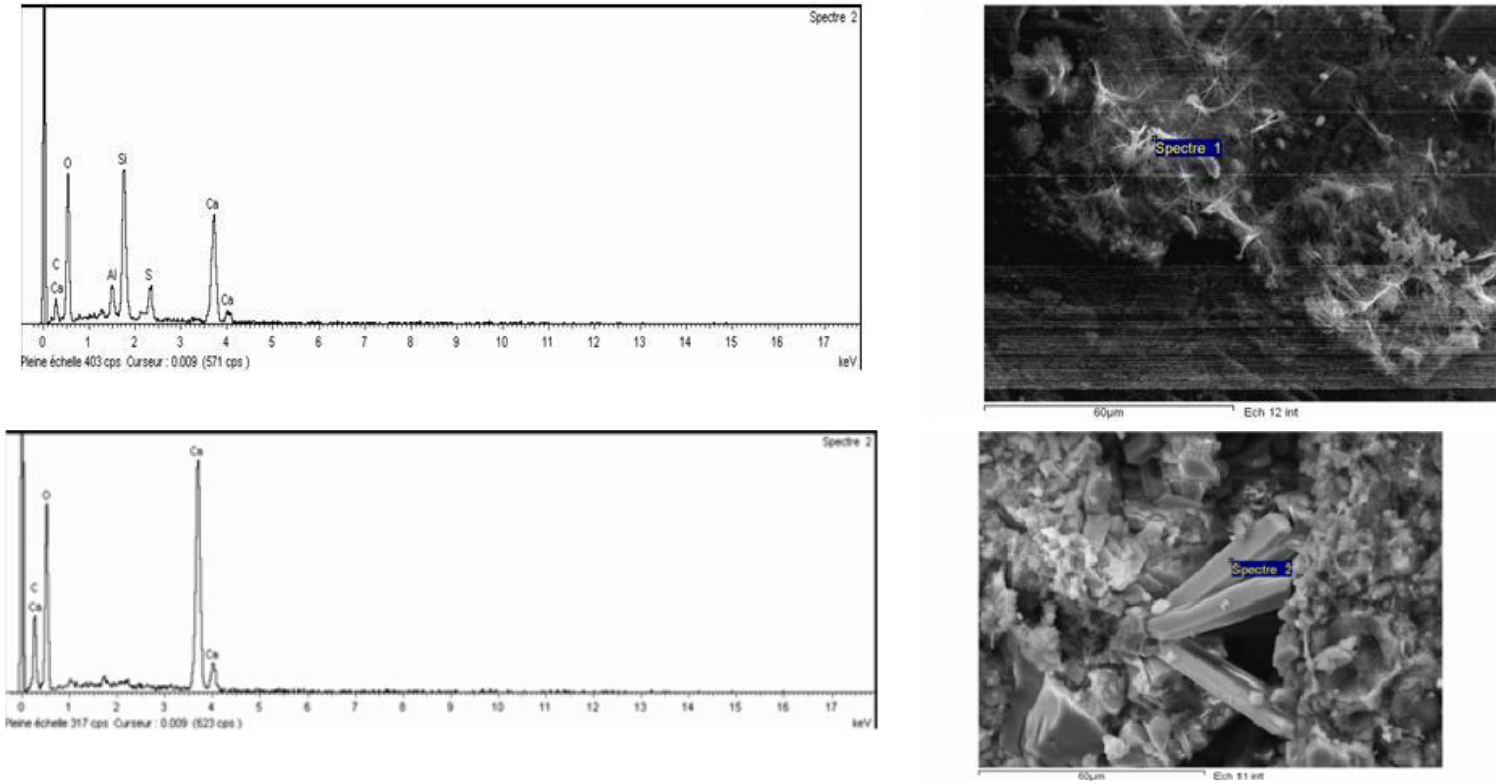


Figure IV.73- Béton de sable avec addition de fillers de laitier granulé conservé dans $MgSO_4$ après démoulage / cœur de l'éprouvette

La figure 73 montre que les bétons de sable avec fillers de laitier cristallisé conservé dans le $MgSO_4$ après démoulage restent intacts au niveau du cœur avec une structure dense marquée par la présence de gel des CSH et de la portlandite.

On remarque après 6 mois de conservation des mortiers d'étude dans un milieu sulfatique que les éprouvettes ont été soumises à une dégradation superficielle suite à la formation des produits expansifs, mais le cœur reste plus au moins sain.

V.3.4- Propriétés de transfert

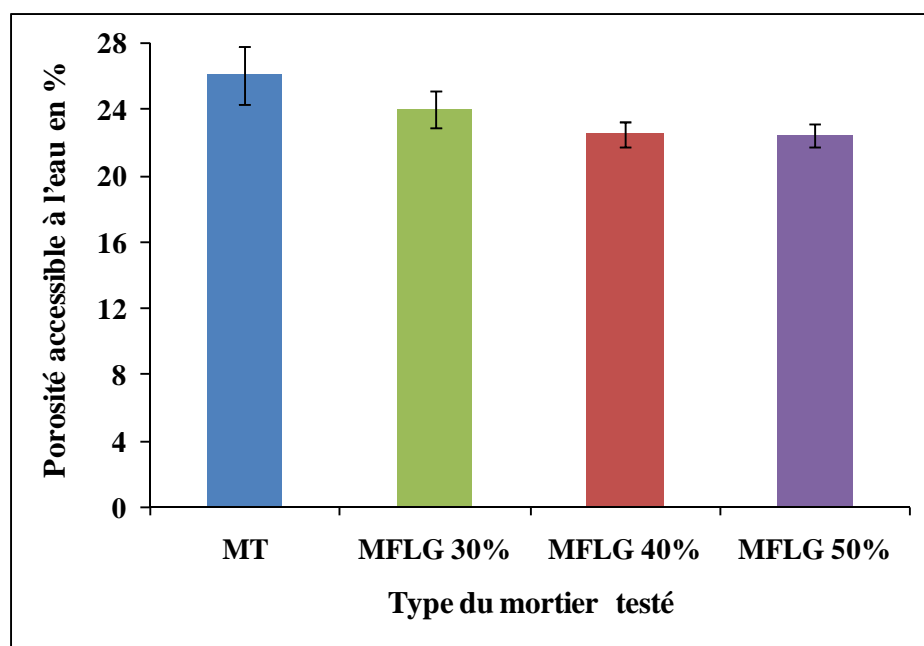
Vu que le laitier cristallisé a donné de mauvais résultats (dégradation physique et chimique) on a choisi uniquement les mortiers à base de laitier granulé en substitution partielle au ciment pour les autres tests de la durabilité et les Propriétés de transfert (perméabilité au gaz, diffusion,)

V.3.4.1- Porosité accessible à l'eau

Les résultats de la porosité accessible à l'eau des mortiers avec différents taux de substitution en laitier granulé et des bétons de sable fibré avec différents types fines d'ajout sont récapitulés au niveau des tableaux IV.11 et IV.12 et présentés par les figures IV.74 et IV.75.

Tableau IV.11- Effet du taux de substitution en laitier granulé sur la porosité accessible à l'eau des mortiers.

	MT	MFLG 30%	MFLG 40%	MFLG 50%
Porosité accessible à l'eau (%)	26,03	24,00	22,53	22,42
Écart type (%)	1,71	1,12	0,75	0,73
Coefficient de variation (%)	6,57	4,67	3,32	3,26

**Figure IV.74-** Effet du taux de substitution en laitier granulé sur porosité accessible à l'eau des mortiers**Tableau IV.12-** Effet de la nature des fines d'ajouts sur la porosité accessible à l'eau des bétons de sable fibré

	BSCal	BSFLG	BSFLCrst
Porosité accessible à l'eau (%)	20,14	19,51	19,75
Écart type (%)	1,70	0,28	0,07
Coefficient de variation (%)	8,44	1,44	0,35

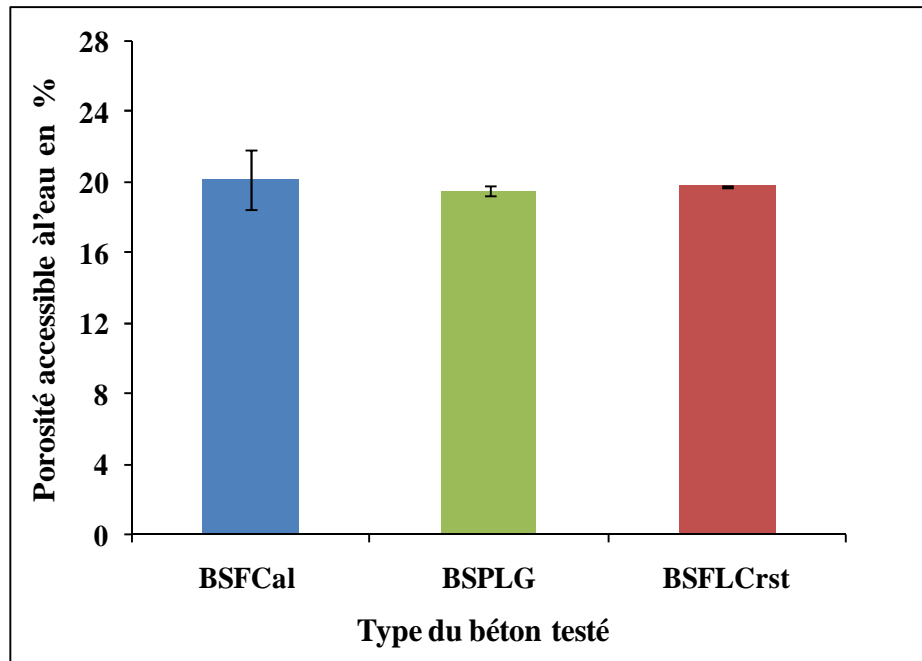


Figure IV.75- Effet de la nature des additions minérales sur porosité accessible à l'eau des bétons de sable fibré

On peut nettement constater que la porosité des mortiers diminue avec l'augmentation du taux de substitution en laitier granulé. Cette diminution est de l'ordre de 7.8, 13.4 et 13.9% respectivement avec les taux de substitution de 30, 40 et 50%. Cela est attribué à l'effet de remplissage et la formation des CSH secondaires obtenus grâce à la finesse et la réactivité du laitier granulé. Les essais sont effectués après trois (3) mois de conservation en humidité saturante ce qui laisse croire qu'une bonne partie de la portlandite est consommée par le laitier granulé, ce qui donne naissance aux CSH secondaires.

Pour les bétons de sable fibré, on peut voir selon la figure IV.75 que la porosité accessible est légèrement affectée par la nature des fines d'ajout utilisées. Cette porosité est de l'ordre de 20.14, 19.75 et 19.5 pour les BS % respectivement avec filler calcaire, filler de laitier cristallisé et filler de laitier granulé.

V.3.4.3- Absorption d'eau par capillarité

Les résultats du coefficient d'absorption d'eau des mortiers avec différents taux de substitution en laitier granulé et celui des bétons de sable fibré avec différents types de fines d'ajout sont présentés au niveau des figures V.76 et V.77.

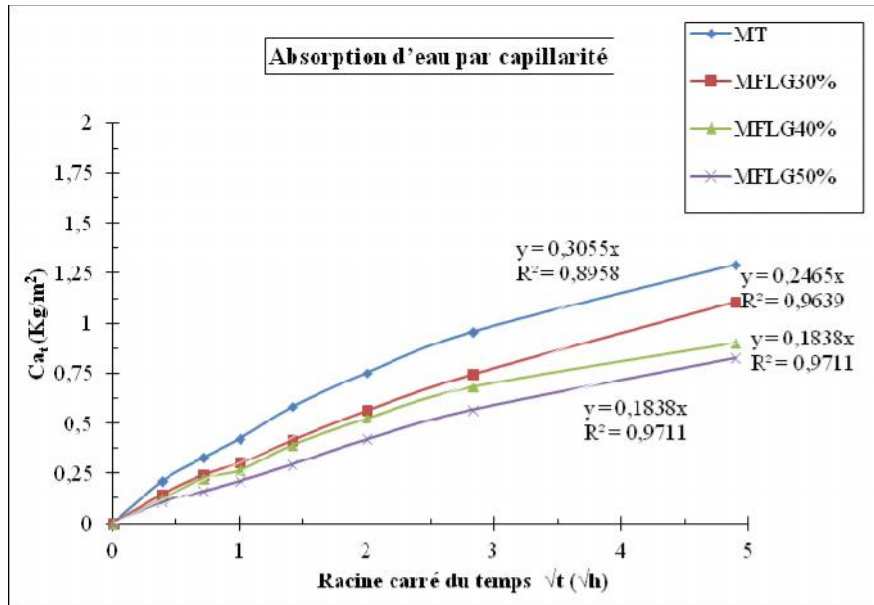


Figure. IV.76- Effet du taux de substitution en laitier granulé sur l'absorption d'eau par capillarité des mortiers

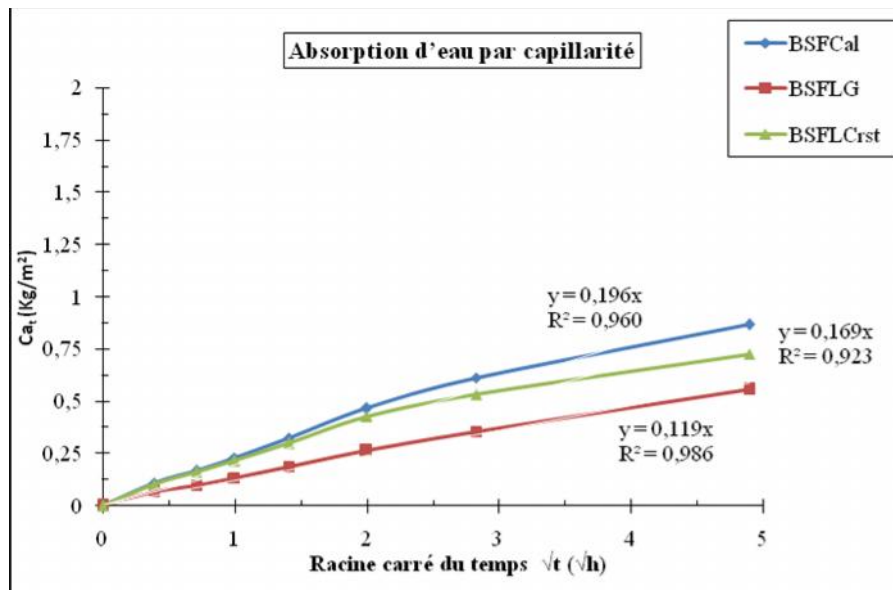


Figure. IV.77 - Effet de la nature des additions minérales sur l'absorption d'eau par capillarité des bétons de sable fibré

D'après les figures IV.76 et IV.77, On peut constater que le coefficient d'absorption d'eau des mortiers et des bétons de sable augmente avec l'augmentation de la racine carrée du temps. Pour les mortiers ce coefficient diminue avec l'augmentation de taux de substitution en laitier granulé, qui peut s'expliquer par la réduction de la porosité avec l'augmentation du taux de laitier et l'amélioration de la densité et la structure cristalline de la matrice cimentaire suite à la formation de nouveau CSH.

Le réseau poreux, la forme, la géométrie et la taille des pores influencent la cinétique d'absorption d'eau. D'après la littérature plusieurs auteurs donnent une interprétation sur cette relation entre la porosité et cinétiques d'absorption. *Bessa* a montré que plus le réseau poreux est fin, plus la cinétique d'absorption est faible et par conséquent le coefficient d'absorption est faible [*Bessa- Badreddine, 2004*].

D'après le même auteur, plus la pente de la droite de la courbe d'absorption est élevée, plus les pores sont plus gros et dès que la remontée capillaire est accomplie dans les plus gros pores au bout d'un certain temps, l'absorption se poursuit dans les pores les plus fins et de ce fait, la cinétique d'absorption sera ralentie. Cela confirme les résultats d'absorption capillaire des mortiers testés (témoin et avec laitier granulé).

Dans le cas des bétons de sable fibré on constate selon la figure IV.81, que la pente de la droite de la courbe d'absorption du BSFLG est plus faible par rapport à celle des BSFCal et BSFLCr. Ceci est dû à la combinaison d'une partie de H₂O existant dans les pores et capillaires suite à la réaction de formation des CSH secondaires ce qui améliore la compacité.

Les bétons de sable présentent un nombre de vides plus élevé que celui des bétons classiques, mais la répartition en fonction de la taille des vides se distingue de celle du béton classique. Les vides des BS sont plus nombreux, plus petits et d'avantage monodimensionnels [*Sablocrete, 1994*].

Les bétons de sable sont caractérisés par un réseau capillaire fine avec des dimensions des pores très petits, dans ce cas la remontée capillaire dans ce réseau justifie le ralentissement de la cinétique d'absorption d'eau de ces bétons.

V.3.4.4-Perméabilité au gaz (Hélium)

La perméabilité a été réalisée suivant la recommandation de l'**AFPC-AFREM** [*AFPC-AFREM, 1997*], dans le but de mesurer la perméabilité au gaz traversant des échantillons du mortier et du béton de sable fibré en fonction de la pression donnée. Le fluide de percolation utilisé est l'hélium.

Les résultats de la perméabilité apparente (K_{app}) en fonction de l'inverse de la pression moyenne (P_{moy}) des mortiers avec différents taux de substitution en laitier granulé et celui des bétons de sable fibré avec différents types de fines d'ajout sont présentés au niveau des figures IV.78 et IV.79.

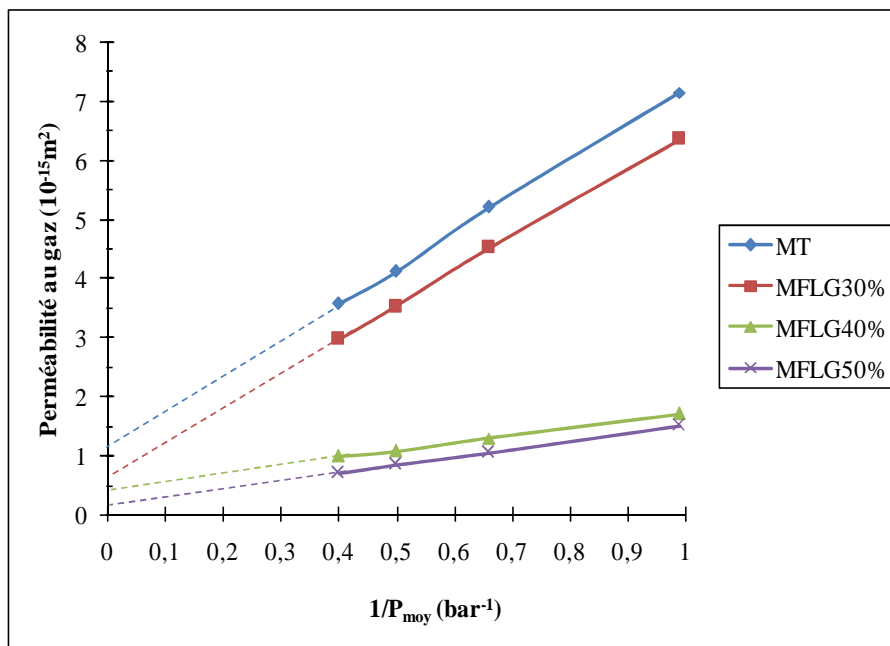


Figure IV.78- Effet du taux de substitution en laitier granulé sur la perméabilité au gaz des mortiers

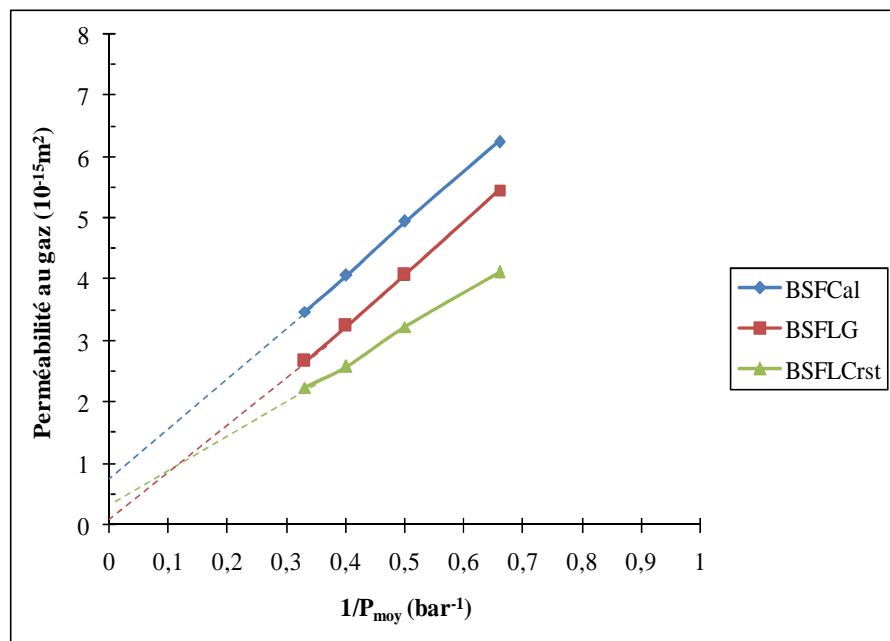


Figure. IV.79- Effet de la nature des additions minérales sur la perméabilité au gaz des bétons de sable fibré

D'après la figure IV.78 on peut constater que la perméabilité au gaz des mortiers diminue avec l'augmentation du taux de substitution en laitier granulé. Cela est dû essentiellement à la diminution de la porosité de ces mortiers. Après trois mois de conservation une bonne partie de laitier granulé participe aux réactions hydrauliques avec la portlandite Ca(OH)_2 , ce qui donne naissance aux CSH secondaires. Ceci entraîne une amélioration de la structure cristalline de la matrice cimentaire qui devient plus dense et moins poreuse. Ceci confirme les

résultats de la porosité et l'absorption par capillarité. D'après la littérature les ajouts cimentaires réduisent la perméabilité ainsi que les coefficients de diffusion. [Feldman et Cheng-Hy, 1985] Feldman et Cheng-Hy ont montré que la substitution partielle du ciment par du laitier de haut fourneau (au moins 50% du poids de ciment) et pour un même rapport eau/liant conduit à une réduction de la perméabilité et de la diffusivité par un facteur de l'ordre de 10% en comparaison avec un CPA ordinaire (sans ajouts) pour une cure de 28 jours.

Selon la figure IV.79 on peut constater que le béton de sable avec le laitier granulé est le moins perméable par rapport à ceux avec fillers calcaires ou laitier cristallisé. Cela est attribué à l'effet de remplissage et à l'amélioration de la compacité par la formation des hydrates grâce à la finesse et à la réactivité du laitier granulé. Ces résultats justifient et confirment les résultats de la porosité accessible à l'eau.

Le coefficient de Klinkenberg, qui est en fonction de la finesse du réseau poreux, nous fournit des informations sur la connectivité et la tortuosité de ce réseau.

Le coefficient de perméabilité intrinsèque est calculé à partir de l'approche de Klinkenberg (selon l'équation IV.6 au paragraphe IV.2.4)

Les valeurs du coefficient de perméabilité intrinsèque et du coefficient de Klinkenberg des mortiers avec différent taux de substitution en laitier granulé et celles des bétons de sable fibré avec différents types de fines d'ajout sont récapitulés au niveau des tableaux IV.13 et IV.14

Tableau IV.13- le coefficient de perméabilité intrinsèque et le coefficient de Klinkenberg des mortiers avec différent taux de substitution en laitier granulé

	MT	MFLG 30%	MFLG 40%	MFLG 50%
k_{int} ($10^{-16} m^2$)	11,50	7,00	4,50	2,00
Écart type ($10^{-16} m^2$)	0,14	0,75	0,25	0,21
Coefficient de variation (%)	1,22	10,71	5,56	10,50
(bar)	5,49	6,76	2,71	6,75

Tableau IV.14- le coefficient de perméabilité intrinsèque et le coefficient de Klinkenberg des bétons de sable fibré avec différent types de fines d'ajouts

	BSFCal	BSFLG	BSFLCrst
k_{int} ($10^{-16} m^2$)	4,00	8,00	2,00
Écart type ($10^{-16} m^2$)	0,40	0,82	0,09
Coefficient de variation (%)	10,00	10,25	4,50
(bar)	10,60	29,60	21,00

Les résultats du tableau IV.13 montre que le coefficient de perméabilité intrinsèque des mortiers diminue avec l'augmentation du taux de substitution en laitier granulé. Toujours cela est dû l'activité du laitier granulé et l'amélioration de la densité par diminution de la porosité de ces mortiers et donc la diminution de connectivité et l'augmentation de la tortuosité. Cela confirme les valeurs du coefficient de Klinkenberg.

La même interprétation est valable pour le béton de sable fibré avec laitier granulé qui donne la valeur la plus faible de la perméabilité intrinsèque ($K_{int} = 8.10^{-16} \text{ m}^2$) et la plus élevée de du coefficient de Klinkenberg, par rapport aux deux autres types de béton de sable. Donc on peut conclure que la nature des fines d'ajouts (finesse et réactivité) joue un rôle très important dans l'amélioration de la perméabilité des bétons de sable.

V.3.4.5-Diffusion des ions chlorure

L'essai de migration des ions chlorure en régime transitoire est réalisé selon le mode opératoire [NT BUILD 492 1999]. Les résultats obtenus du coefficient de diffusion apparent des mortiers avec différents taux de substitution en laitier granulé et celui des bétons de sable fibré avec différent type de fines d'ajout sont présentés au niveau des figures IV.80 et IV.81.

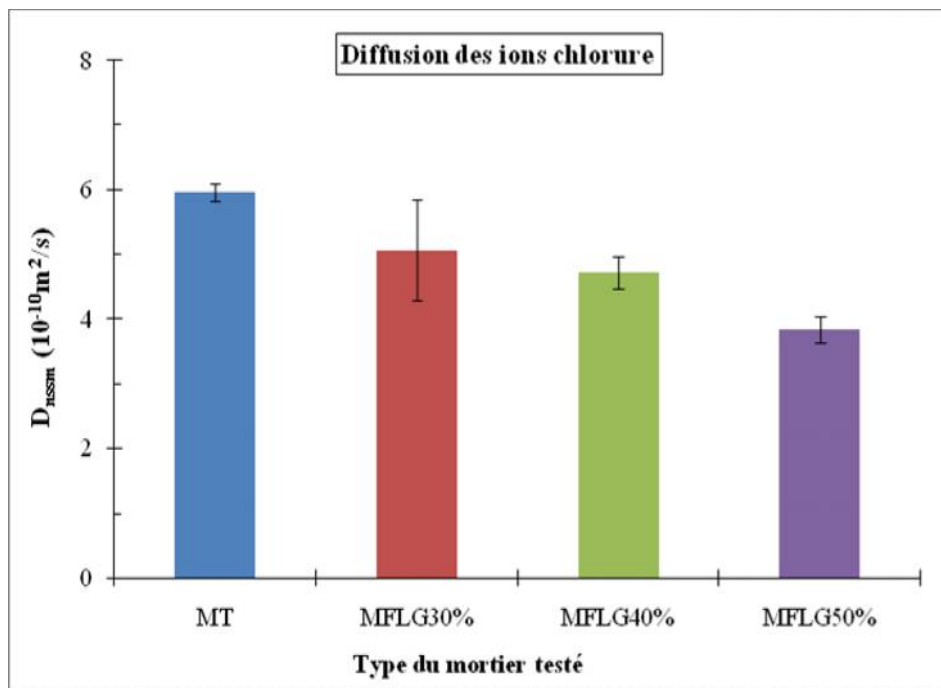


Figure. IV.80- Effet du taux de substitution en laitier granulé sur le coefficient de la diffusion des ions chlorure des mortiers

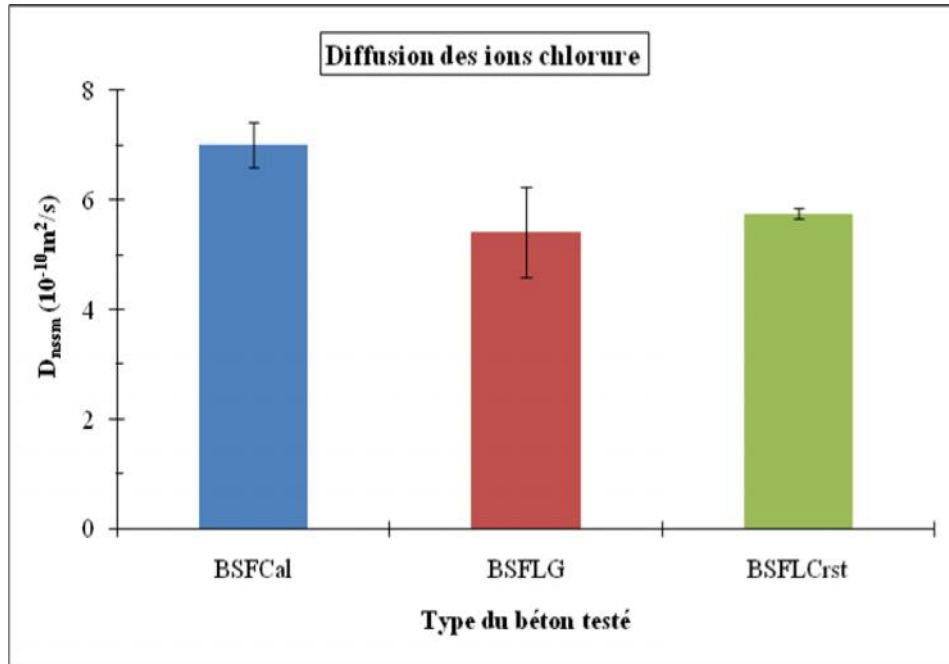


Figure. IV.81- Effet de la nature des additions minérales sur le coefficient de la diffusion des bétons de sable fibré

La figure IV.80 montre l'effet du taux de substitution en laitier granulé sur la variation du coefficient de la diffusion des ions chlorure pour les différents types de mortiers. La figure montre une nette amélioration de la résistance à la pénétration des ions chlorure des mortiers à base de laitier granulé en substitution partielle au ciment par rapport au mortier témoin. Cette amélioration est caractérisée par la diminution du coefficient de migration des ions chlorure avec le taux de substitution de en laitier granulé. Les valeurs de ce coefficient sont de l'ordre de 6.10^{-10} , $5,1.10^{-10}$, $4,7.10^{-10}$ et $3,8.10^{-10}$ respectivement avec les taux de substitution de 0, 30, 40 et 50%.

L'effet de la nature des fines d'ajouts sur la variation du coefficient de migration des ions chlorure des bétons de sable fibré est nettement visible au niveau de la figure IV.85. Ce coefficient est de l'ordre de $5,4.10^{-10}$ pour les BSFLG et il est de l'ordre de 7.10^{-10} et $5,8.10^{-10}$ pour les deux autres types de béton de sable à savoir le BSFLCal et le BSFLCrst. Cela est dû essentiellement à l'activité hydraulique du laitier granulé. Ce dernier améliore la compacité de la matrice cimentaire et donne naissance aux CSH secondaires suite à sa combinaison avec la portlandite $Ca(OH)_2$ ce qui engendre une diminution de la connectivité par augmentation de la tortuosité et réduit la pénétration des ions de chlore.

La diffusion des ions chlore dans un mortier ou dans un béton est fonction du volume et des dimensions des pores. Ces paramètres essentiellement influencés par la nature et le dosage en addition minérale utilisée dans la formulation de ces matériaux. Ceci confirme les travaux de Rozière [Rozière, 2007].

VI.5- Conclusion

Ce dernier chapitre est consacré à l'étude de l'effet des additions minérales ou fines d'ajout sur la durabilité des mortiers et bétons de sable renforcés de fibres de polypropylène. Cette étude a mis en évidence les pertinences d'utilisation des laitiers de haut fourneau algériens (laitier granulé et/ou laitier cristallisé) dans l'amélioration de la résistance aux attaques sulfatiques et l'amélioration des propriétés de transfert (la porosité accessible à l'eau, l'absorption capillaire, la diffusion des ions chlore et la perméabilité au gaz). Par l'analyse des résultats obtenus nous pouvons énoncer :

- ❖ Une chute de résistance mécanique a été enregistrée pour l'ensemble des mortiers d'études conservés directement après démoulage en solution de sulfate de magnésium $MgSO_4$ au-delà de 90 jours. Cette chute est due essentiellement à la formation du gypse et de l'ettringite secondaire qui provoquent une expansion. Ceci favorise la naissance et l'accroissement des fissures suivies d'une chute de résistances mécaniques.
- ❖ Durant la période allant jusqu'à 90 jours, les résistances mécaniques sont légèrement affectées par l'attaque sulfatique externe. Cela s'explique par la formation d'une couche de brucite $Mg(OH)_2$ sur les faciès extérieurs des éprouvettes conservées en solution sulfatique qui retarde temporairement l'effet des ions sulfatiques et permet la continuité de la cinétique d'hydratation.
- ❖ Les mortiers avec substitution en laitier granulé présentent les plus faibles diminutions des résistances mécaniques par rapport à ceux avec laitier cristallisé. La bonne résistance de ces mortiers aux attaques sulfatiques externe est due essentiellement à l'activité hydraulique de laitier granulé concrétisée par une consommation d'une partie de la portlandite et formation des CSH.
- ❖ l'évolution des résistances mécaniques des bétons de sable fibré conservés dans une solution de sulfate de magnésium $MgSO_4$ est sensiblement affectée par la nature des additions. Les bétons de sable avec laitier granulé présentent les meilleures résistances mécaniques vis-à-vis aux attaque des sulfates par rapport aux deux autres types de bétons de sable à base de fillers calcaires et laitier cristallisé.
- ❖ la présence des fibres de polypropylène n'a aucun effet sur la variation de la résistance mécanique des bétons de sable conservés dans un milieu agressif et les fibres de polypropylène ne sont pas affectées et ne subissent aucune dégradation,
- ❖ Une cure de 28 jours en humidité saturante avant l'immersion des éprouvettes en solution sulfatique atténue l'endommagement et améliore le comportement mécanique des mortiers et bétons de sable d'étude.
- ❖ les mortiers et les bétons de sable conservés en solution sulfatique ont subi des augmentations de masse jusqu'à 90 jours. Cette augmentation est obtenue suite à la formation d'ettringite et du gypse secondaire. Au-delà de 90 jours une diminution progressive de la masse avec l'âge a été enregistrée. Cela est dû à la lixiviation de la portlandite $Ca(OH)_2$.

- ❖ Le phénomène lixiviation, caractérisé par la profondeur d'alcalinité, est influencé par le PH de la solution d'attaque, la nature des additions minérales ou fines d'ajout, le taux de substitution et le mode de conservation.
- ❖ Les observations au microscope électronique à balayage (MEB), après une année de conservation des mortiers d'étude dans un milieu sulfatique, ont montrées que toutes les éprouvettes subit un endommagement superficiele avec des degrés différents selon le volume des produits expansifs formés (ettringite et gypse secondaire). le cœur des échantillons analysés reste plus au moins sain.
- ❖ Après six mois de conservation des bétons de sable d'étude dans un milieu sulfatique, Les observations au microscope électronique à balayage ont montré le déclenchement de la dégradation de ces bétons par la formation des produits expansifs à la couche extérieure de l'éprouvette.
- ❖ Le coefficient d'absorption d'eau par capillarité des mortiers et des bétons de sable augmente avec l'augmentation de racine carré du temps, pour les mortiers ce coefficient diminue avec l'augmentation de taux de substitution en laitier granulé, ceci est attribué à l'amélioration de la densité de la matrice cimentaire suite à la formation de nouveau CSH.
- ❖ La diminution de la perméabilité au gaz et le coefficient de diffusion des ions chlorure des mortiers avec l'augmentation de taux des fillers de laitier granulé. le béton de sable avec addition de laitier granulé donne la plus faible valeur soit pour la perméabilité au gaz ou bien le coefficient de diffusion des ions chlorure par apport au autre béton à base de fillers de laitier cristallisé et fillers calcaire. Ceci peut s'expliqué par l'activité hydraulique de laitier et l'amélioration de la structure cristalline de la matrice cimentaire, une bonne partie de laitier granulé participe aux réactions hydraulique avec la portlandite pour formé les CSH, et par conséquence l'amélioration du réseau poreux du béton.



**CONCLUSION GÉNÉRALE ET
PERSPECTIVES**

Conclusion générale et perspectives

La valorisation des sous produits industriels peut être profitable dans les filières mortier et béton de sable tant sur le plan environnemental qu'économique et technique. Leur incorporation peut contribuer à l'amélioration de la durabilité ainsi que des performances physiques, mécaniques.

Cette étude de recherche avait pour but de caractériser la durabilité et l'évolution des performances mécaniques de mortier et béton de sable fibré à base de laitiers de haut-fourneau en tant que sable et addition minérale ou fines d'ajouts en milieux agressifs.

Trois principaux paramètres ont été pris en considération dans cette étude :

- ❖ L'effet de la nature minéralogique et la granulométrie des sables
- ❖ L'influence du taux de fibres de polypropylène
- ❖ L'effet des additions minérales et les modes de conservation

L'évaluation de l'effet de ces paramètres est caractérisée par le suivi de l'évolution des résistances mécaniques des mortiers et des bétons de sable conservés en milieu sulfatique externe et par l'étude des différents mécanismes de transfert (porosité accessible à l'eau, absorption, la perméabilité au gaz et la diffusion des ions chlore).

Dans le premier chapitre, une étude bibliographique synthétise les recherches effectuées sur les bétons de sable, les bétons fibrés avec fibre de polypropylène et sur la durabilité des matériaux cimentaires. Cette synthèse a permis de bien comprendre le comportement de ces matériaux.

Le deuxième chapitre a été consacré à l'identification et à la caractérisation des différents matériaux utilisés, la formulation des mortiers et des bétons de sable d'étude ainsi que leurs propriétés à l'état frais.

Dans le troisième chapitre on présente une analyse des résultats de l'influence de la nature minéralogique des sables et du taux de fibres de polypropylène sur le comportement physico-mécanique des bétons de sable.

Le quatrième chapitre a été consacré à l'étude de la durabilité des mortiers et bétons de sable.

Par l'analyse des résultats obtenus, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

Effet de la nature minéralogique des sables et le taux de fibre de polypropylène sur les propriétés des bétons de sable à l'état frais et durci:

- ❖ Les propriétés des bétons de sable à l'état frais (maniabilité et masse volumique) sont influencées considérablement par la nature minéralogique, morphologie des sables et des additions minérales, par contre l'incorporation des fibres de polypropylène n'affecte pas d'une façon significative les caractéristiques de ces bétons à l'état frais.
- ❖ la résistance mécanique des bétons de sable est très influencée par les propriétés des sables (La granulométrie, la morphologie et les propriétés minéralogiques des sables). La bonne granulométrie du sable de carrière, sable de laitier cristallisé et le mélange sable de

carrière – sable siliceux donnent des bétons plus compacts et mécaniquement les plus résistants. Par contre le sable laitier granulé par son caractère poreux et absorbant présente les plus faibles résistances mécaniques.

❖ L'utilisation des laitiers de haut fourneau dans la fabrication des bétons de sable en tant que sable ou fillers a donné satisfaction des points de vue: maniabilité, résistance, économie et écologie. Grâce à cette utilisation, une nouvelle gamme de béton de sable léger avec sable de laitier granulé a été définie dont la masse volumique obtenue est de l'ordre de 1470 Kg/m^3 . Ce type de BS peut satisfaire certaines exigences et améliorer le confort thermique de la construction.

❖ L'incorporation de fibres de polypropylène dans les bétons de sable est bénéfique pour l'amélioration de la ductilité de ces matériaux et diminue le retrait avec l'augmentation du taux de fibres. un taux optimal de 600g/m^3 améliore légèrement la résistance à la traction

Effet de la nature le dosage de l'addition minérale et le mode de conservation sur le comportement physico- mécanique des mortiers et des bétons de sable vis-à-vis de l'attaque sulfatique externe :

❖ Les résistances mécaniques des mortiers conservés directement après démoulage en solution de sulfate de magnésium MgSO_4 sont très influencées par la nature et le taux de substitution en laitiers de haut fourneau. Pour la période allant jusqu'à 90 jours, les résistances mécaniques sont légèrement affectées par l'attaque sulfatique externe. Cela s'explique par la formation d'une couche de brucite Mg(OH)_2 sur les faciès extérieurs des éprouvettes conservées en solution sulfatique qui retarde temporairement l'effet des ions sulfatiques et permet la continuité de la cinétique d'hydratation.

❖ Au delà de 90 jours, la dégradation est nettement visible. Une chute de résistance mécanique a été enregistrée pour l'ensemble des mortiers d'étude. Cette chute est due essentiellement à la formation du gypse et de l'ettringite secondaire qui provoquent une expansion. Ceci favorise la naissance et l'accroissement des fissures suivies d'une chute de résistances mécaniques.

❖ L'effet du taux de substitution en laitier granulé sur l'amélioration de la résistance mécanique des mortiers vis-à-vis à l'attaque sulfatique est bien visible. Ces mortiers présentent les plus faibles diminutions des résistances mécaniques par rapport à ceux avec laitier cristallisé. La bonne résistance des mortiers avec laitier granulé aux attaques sulfatiques externe est due essentiellement à l'activité hydraulique de laitier granulé concrétisée par une consommation d'une partie de la portlandite et formation des CSH.

❖ l'évolution des résistances mécaniques des bétons de sable fibré conservés dans une solution de sulfate de magnésium MgSO_4 est sensiblement affectée par la nature des fines d'ajout. les bétons de sable avec laitier granulé présentent les meilleures résistances mécaniques vis-à-vis aux attaques des sulfates par rapport aux deux autres types de bétons de sable à base de fillers calcaires et laitier cristallisé.

❖ Les fibres de polypropylène ne sont pas affectées et ne subissent aucune dégradation. Le polypropylène est un matériau inerte et sa présence ne montre pas une modification dans la structure de la matrice cimentaire dans un milieu riche en sulfate.

- ❖ La présence des fibres de polypropylène n'a aucun effet sur la variation de la résistance mécanique des bétons de sable conservé dans un milieu agressif.
- ❖ Une cure de 28 jours en humidité saturante avant l'immersion des éprouvettes en solution sulfatique atténue l'endommagement et améliore le comportement mécanique des mortiers et bétons de sable d'étude.
- ❖ Les mortiers et les bétons de sable conservés en solution sulfatique ont subi des augmentations de masse jusqu'à 90 jours. Cette augmentation est obtenue suite à la formation d'ettringite et du gypse secondaire. Au-delà de 90 jours une diminution progressive de la masse avec l'âge a été enregistrée. Cela est dû à la lixiviation de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$.
- ❖ Le phénomène lixiviation, caractérisé par la profondeur d'alcalinité, confirme d'une façon significative les résultats de l'influence de la nature des additions minérales et le mode de conservation des mortiers et des bétons de sable sur l'évolution des résistances mécaniques et la variation de masse. Cette profondeur est influencée par le PH de la solution d'attaque, la nature des additions minérales ou fines d'ajout, le taux de substitution et le mode de conservation.
- ❖ Les observations au microscope électronique à balayage (MEB), après une année de conservation des mortiers d'étude dans un milieu sulfatique, ont montré que toutes les éprouvettes ont subi un endommagement superficiel avec des degrés différents et variable selon le volume des produits expansifs formés (ettringite et gypse secondaire). Le cœur des échantillons analysés reste plus ou moins sain.
- ❖ Les observations au microscope électronique à balayage, des bétons de sable d'étude conservés dans un milieu sulfatique, ont montré une dégradation au niveau de la matrice cimentaire suite à la formation des produits expansifs au niveau des couches extérieures des éprouvettes. Cet endommagement se différencie selon la nature des fines d'ajout.

Effet de la nature et le taux des additions minérales sur les différents mécanismes de transfert :

- ❖ La porosité accessible à l'eau des mortiers diminue avec l'augmentation du taux de substitution en laitier granulé. Ceci est attribué à l'effet de remplissage et la formation des CSH secondaires obtenus grâce à la finesse et la réactivité du laitier granulé. Dans le cas des bétons de sable fibré cette porosité accessible est légèrement affectée par la nature des fines d'ajout utilisées. Le béton de sable avec filler laitier granulé est le moins poreux par rapport à ceux avec filler calcaire ou filler de laitier cristallisé.
- ❖ Le coefficient d'absorption d'eau des mortiers et des bétons de sable augmente avec l'augmentation de racine carrée du temps, pour les mortiers ce coefficient diminue avec l'augmentation de taux de substitution en laitier granulé.
- ❖ Une diminution de la perméabilité au gaz et du coefficient de diffusion des ions chlore des mortiers avec l'augmentation du taux de substitution en laitier granulé a été constaté. Le béton de sable avec addition de laitier granulé donne la plus faible valeur soit pour la perméabilité au gaz ou bien pour le coefficient de diffusion des ions chlore par rapport aux

Conclusion générale et perspectives

autres bétons à base de fillers de laitier cristallisé et fillers calcaires. Ceci s'explique par l'activité hydraulique de laitier et l'amélioration de la structure cristalline de la matrice cimentaire. Une bonne partie de laitier granulé participe aux réactions hydrauliques avec la portlandite pour former les CSH, et par conséquent l'amélioration du réseau poreux des matériaux.

Ce travail ouvre plusieurs perspectives concernant aussi bien l'amélioration de certaines caractéristiques du béton de sable en particulier, les caractéristiques thermiques et phoniques afin d'élargir le domaine d'utilisation de ce matériaux, par la valorisation des résidus de bois et de pétioles de palmier dattier comme granulats végétaux afin d'obtenir des bétons de sable chargé.

- ✓ Une étude complémentaire sur le comportement de ces bétons à haute température.
- ✓ Une modélisation numérique de la dégradation des mortiers et des bétons de sable dans un milieu sulfatique
- ✓ Une étude de l'effet de laitier granulé sur la carbonatation de ces bétons.



REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

A

[**Abdou, 2007**] Abdou. K., «*Influence des fibres métalliques sur les variations dimensionnelles et pondérales d'une matrice cimentaire*», thèse de doctorat, Université Mentouri, Constantine, Algérie, (2007) 151p.

[**Achoura, 2005**] Achoura. D., «*contribution à l'étude de la formulation et de la caractérisation des bétons de sable à base de laitiers de hauts fourneaux d'El-Hadjar*», thèse de doctorat, Université Badji-Mokhtar, Annaba, Algérie, (2005) 175p.

[**Achoura et al, 2009**] Achoura. D, Redjel. B., Jauberthie. R., «*Durabilité des bétons de sable a base de laitier de haut fourneaux dans les milieux sulfatique*», 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria), October 12-14 (2009) ,7p.

[**Affes, 2012**] Affes. R., «*Relations microstructure -fissuration- perméabilité dans les milieux granulaires cimentés*», thèse de doctorat, Université Montpellier II, (2012) ,145p

[**AFPC-AFREM 1997**] AFPC-AFREM., Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM «*Durabilité des bétons* », Toulouse, (1997).

[**Akchiche, 2007**] Akchiche. H., «*Contribution à la modélisation du retrait et du fluage des bétons et mortiers renforcés par des fibres de palmier dattier en régions désertiques*», mémoire de magister, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie, (2007) 145p

[**Alexandre et al, 2013**] Alexandre. M., Berton. A., De Belin. N., «*Performance of Cement-Based Material in Aggressive Aqueous Environments* », Stat-of-the-Art Report, Rilem, Springer, (2013), 471p.

[**Alexandre et Sebileau, 1988**] Alexandre. J., Sebileau. J.L., «*le laitier de haut fourneau*», livre, (1988) 341p.

[**Ali-Boucetta, 2014**] Ali Boucetta. T., «*Contribution du laitier granulé et de la poudre de verre sur les propriétés d'écoulement et de durabilité des bétons autoplaçants et de hautes performances*». Thèse de doctorat, Université d'Annaba, Algérie, (2014), 226p.

[**Ambroise et Pera, 1992**] Ambroise. J., Pera. J., «*Relation entre les caractéristiques des fillers et les bétons de sable dans lesquels ils sont employés* », rapport de recherche, INSA de Lyon, France, (1992).

[**Ashraf et al, 2009**] Ashraf. M., Naeem Khan. A., Qasair. A., Mirza. J., Goyal. A., Anwar. A.M., «*Physico-chemical, morphological and thermal analysis for the combined pozzolanic activities of minerals additives*», Construction and Building Materials, Volume 23, Issue 6, (2009), P2207-2213.

B

[Barcoelo et al, 2014] Barcelo. L., Gartner. E., Barbarulo. R., Hossack. A., Ahani. R., Hooton. D., Brouard. E., Delagrave. A., Blair. B., Thomas. M., « *Amodified ASTM C1012 procedure for qualifying blended cements containing limestone and SCMs for use in sulfate-rich environments* », Cement and Concrete Research, Vol 63, (2014), p 75–88.

[Baron, 1992] Baron. J., « *Introduction à la durabilité des bétons* », La durabilité des bétons, Presses de l'école nationale des ponts et chaussés, ISBN 2-85978-184-6, Paris(1992), p 23-40.

[Beaudoin, 1982] Beaudoin. J.J., « *Béton renforcé de fibres* » juillet (1982)

[Beauséjour, 2015] Beauséjour. P., « *Contribution à l'essai de migration dans les matériaux cimentaires* », thèse de doctorat, université de Laval, (2015), 285p.

[Bederina et al, 2011] Bederina. M., Bouziani. T., Khenfer. M. M., Quéneudec. M., « *Absorption de l'eau et son effet sur la durabilité des bétons de sable allégés par ajout de copeaux de bois* », INVACO2, séminaire international, innovation et valorisation dans le génie civil et matériaux de construction, N°1Q-021, Algérie, (2011), 6p.

[Behim et al, 2011] Behim. M., Cyr. M., Clastres. P., « *Physical and chemical effects of El-Hadjar slag used as an additive in cement-based materials* », European Journal of Environmental and Civil Engineering, vol.15, N° 10, (2011) p1413-1432.

[Belferrag, 2006] Belferrag. A., « *Valorisation des fibres métalliques issus des déchets pneumatiques dans les bétons de sable de dune* », mémoire de magister, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie, (2006) 139p.

[Bella et al, 2011] Bella. I., Asroun. A., Bella. N., « *Influence des ajouts de type addition calcaire sur les caractéristiques mécaniques du béton de sable* », INVACO2, séminaire international, innovation et valorisation dans le génie civil et matériaux de construction, N°1Q-038, Algérie, (2011), 12p.

[Ben Amara, 2002] Ben Amara. D., « *Formulation et comportement d'un béton de sable de la région de Biskra renforcé de fibre métallique* », mémoire de magister, Université de Annaba, Algérie, (2002).

[Benachour, 2009] Benachour. Y., « *Analyse de l'influence de l'ajout de taux élevée de fillers calcaires sur les propriétés physiques, mécaniques, microstructurales, de transfert et de durabilité des mortiers* », thèse de doctorat, université Mentouri, Constantine, Algérie, (2009), 148p.

[Benaïssa, 1992] Benaïssa. A., « *Déformation différée du béton de sable* » thèse de doctorat de génie civil, université de bordeaux, France, (1992), 104p.

[Benaïssa et al, 1993]¹ Benaïssa. A., Morlier. P., Viguier. C., « *Microstructure du béton de sable* », Cement and concrete reserch, Vol. 23, (1993), p 663-674.

[Benaïssa et al, 1993]² Benaïssa. A., Morlier. P., Viguier. C., « *Retrait et fluage du béton de sable* », Materials and Structures, Vol 26, (1993), p 333-339.

[Benosman et al, 2009] Benosman. A.S., Mouli. M., Taïbi. H., Belbachir. M., Senhadji. Y., Bahlouli. I., Houivet. D., « *Etude des matériaux composites mortier-polymère en milieux sulfatiques (Na₂SO₄, MgSO₄)* », 1st International Conference on Sustainable Built Environment

Infrastructures in Developing Countries ENSET, Oran, Algeria, October 12-14(2009), 8p.

[**Bensted et Munn, 2004**] Bensted. J., Munn. J., « *A discussion of the paper ‘Redefining cement characteristics for sulphate-resistant Portland cement’ by P.J. Tikalsky, D. Roy, B. Scheetz, T. Krize* », Cement and Concrete Research, Vol 34, (2004) , p355–357.

[**Bentalha-Malou, 2007**] Bentalha-Malou. M., « *Influence de l'introduction de fibres métalliques sur le comportement différé d'une matrice cimentaire. caractérisation - comportement monotone – microstructure* », thèse de doctorat, Université Mentouri, Constantine, Algérie, (2002), 169p.

[**Bentur et al, 1997**] Bentur. A., Diamond. S., Berke. N.S., « *Steel Corrosion in Concrete: Fundamentals and Civil Engineering Practise* », Taylor & Francis, (1997).

[**Bessa-Baderddine, 2004**] Bessa-Baderddine. A., « *Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers* », thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise, France, (2004), 236p.

[**Bonakdar et Mobasher, 2010**] Bonakdar. A., Mobasher. B., « *Multi-Parameter Study of Sulfate Attack in Blended Cement Materials* », Concrete Sustainability Conference, (2010), 13p.

[**Boualleg et al, 2011**] Boualleg .S., Bencheikh. M., Clastres. P., « *Effets des milieux agressifs sur les propriétés des matrices cimentaires* », INVACO2, séminaire international, innovation et valorisation dans le génie civil et matériaux de construction, N°4P-079, Algérie, (2011), 8p.

[**Boualleg, 2004**] Boualleg .S., « *Effet des milieux agressifs sur les caractéristiques de durabilité des bétons et des matrices cimentaires* », mémoire de magister, Université Mohamed Boudiaf, M'sila, Algérie, (2004), 137p.

[**Boufenara et al, 2005**] Boufenara.K., Guetteche. M.N., Mezhoud. S., « *Durabilité des mortiers a base des laitiers de haut fourneau* », Colloque CMEDIMAT, 6-7 Décembre (2005), 8p.

[**Boulekbache et al, 2013**] Boulekbache. B., Hamrat. M., Chemrouk. M., Amziane. S., « *Comportement des bétons fibrés à la flexion: influence des fibres et de la résistance à la compression* », 31èmes Rencontres de l'AUGC, E.N.S. Cachan, 29-31 mai (2013), 11p.

[**Bouslama et Jelidi, 2003**] Bouslama. S., Jelidi. A., « *Elaboration de béton hydraulique à base de laitiers de haut fourneau Tunisien* », Materials and Structures, vol 36, January – February (2003), p 59-67.

[**Boutiba et al, 2013**] Boutiba. A., Chaid. R., Jauberthie. R., Molez. L., « *Murissement des BHPF avec ajout de laitier dans les milieux sulfatés* », 31èmes Rencontres de l'AUGC, E.N.S. Cachan, 29-31 mai (2013)

[**Brunetaud, 2005**] Brunetaud. X., « *Etude de l'influence de différents paramètres et de leurs interactions sur la cinétique et l'amplitude de la réaction sulfatique interne au béton* », thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris, France,(2005)

[**Bur, 2012**] Bur. N., « *Etude des caractéristiques physico-chimiques de nouveaux béton éco-respectueux pour leur résistance à l'environnement dans le cadre du développement durable* », thèse de doctorat, université de Strasbourg, (2012), 225p.

C

[Cao et al, 1997] Cao. H.T., Bucea. L., Ray. A., Yozghatlian. S., «*The effect of cement composition and ph of environment on sulfate resistance of Portland cements and blended cements*», Cement and Concrete Composites, Vol 19, (1997), p161-171.

[Caré et al, 2000] Caré. S., Linder. R., Baroghel-Bouny. V., De Larrard. F., Charonnat. Y., «*Effet des additions minérales sur les propriétés d'usage des bétons – Plan d'expérience et analyse statique* », LCPC, Ouvrages d'art OA 33, (2000) ,102 p.

[Chaïd et al 2012] Chaïd. R., Bali. A., Jauberthie. R., Talah. A., «*Comportement d'un béton à hautes performances à base de laitier en milieu sulfatique* », Revue. Science et Technologie, Synthèse Vol 24, (2012), p 91-99

[Cherfa et Ait Mokhtar, 2011] Cherfa. H., Ait Mokhtar. K., «*Utilisation de granulats de laitier cristallisé comme matériau de construction en technique routière* », 29èmes rencontre de l'AUGC, Tlemcen, Algérie, (2011),p 128-137.

[Chihaoui et al, 2009] Chihaoui. R., Khelafi. H., Mouli. M., Senhadji. Y., «*Effets de la pouzzolane naturelle sur la durabilité des mortiers exposés aux attaques sulfatiques* », 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria), October 12-14 (2009) ,8p.

[Choinska, 2006] Choinska. M., «*Etude expérimentale de l'interaction endommagement-température perméabilité du béton*», XXIVemes Rencontres Universitaires de Génie Civil 2006 - PRIX JEUNES CHERCHEURS, (2006), 8p.

[Choquet, 1947] Choquet. F., «*Etude en laboratoire des possibilités de la valorisation des scories d'aciéries et des laitiers de haut fourneau en construction routière*», Edité par le centre de recherches routières, Bruxelles, (1947).

[CIM, 2006] CIM béton, «*Guide de prescription des ciments pour des constructions durables* », centre d'information sur le ciment et ses applications, (2006)

[Cisse et Laquerbe, 2000] Cisse. I.K., Laquerbe. M., «*Mechanical characterisation of filler sandcretes with rice husk ash additions Study applied to Senegal*», Cement and Concrete Research, Vol 30, (2000), p13–18.

D

[Dauzères, 2010] Dauzères. A., «*Etude expérimentale et modélisation des mécanismes physico-chimiques des interactions béton-argile dans le contexte du stockage géologique des déchets radioactifs* », thèse de doctorat, Université de Poitiers, (2010), 272p.

[Demene et al, 2005] Demene. Z., Azzouz. L., Goual. M.S., «*Durabilité de mortiers a base de ciments Algériens vis-à-vis du sulfate de magnésium (MgSO₄) et effet de sable de dune sur le taux de chute de résistance*», Colloque CMEDIMAT 2005, 06 -07 Décembre (2005), 8p.

[Denis et al, 2002] Denis. A., Attar. A., Breysse. D., «*effect of coarse aggregate on the workability of sandcrete*», cement and concrete research, Vol 32, (2002), p 701-706.

[**Djbali, 2013**] Djballi. S., «*Caractérisation des éléments de structure en béton de fibre métallique* », thèse de doctorat, université de Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Algérie, (2013), p191.

[**Djebri, 2007**] Djebri. A., «*Effet de l'endommagement mécanique sur la diffusion des ions chlorure dans les bétons*», XXV^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil, PRIX RENE HOUPERT, (2007), 8p.

[**Dreux et Festa, 1998**] Dreux. G., Festa. J., «*Nouveau guide du béton et de ses constituants* », 8^e édition, Eyrolles, (1998), 416p.

E

[**El-Hachem et al, 2012**] El-Hachem. R., Rozière. E., Grondin. F., Loukili. A., «*Multi-criteria analysis of the mechanism of degradation of Portland cement based mortars exposed to external sulphate attack* », Cement and Concrete Research , Vol 42, (2012), p1327–1335.

F

[**Feldman et Cheng-Hy, 1985**] Feldman. R.F., Cheng-Hy. H., «*Properties of Portland cement-silica fume pastes. 1. Porosity and surface properties*», Cement and Concrete Research, Vol 15, N°5, (1985), p765-774.

[**Foughali, 2010**] Foughali. A., «*Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques*», thèse de doctorat, (2010), 120p.

[**Fritih, 2009**] Fritih. Y., «*Apport d'un renfort de fibres sur le comportement d'éléments en béton autoplaçant armé* », thèse de doctorat, université de Toulouse, France, (2009), 246p.

G

[**Gadri et Guettala, 2014**] Gadri.K., Guettala .A.,« *Etude du comportement physico-mécanique des bétons de sable à base de déchets de polissage de carrelage* » conférence Matériaux 2014 - Colloque Ecomatériau, Montpellier, France, (2014)

[**Gallop et Taylor, 1995**] Gallop. R.S., Taylor. H.F.W., «*Microstructural and microanalytical studies of sulfate attack, III. Sulfate-resisting portland cement: reactions with sodium and magnesium sulfate solutions*», Cement and Concrete Research, Vol 25, N° 7, (1995), p1581–1590.

[**Gallop et Taylor, 1996**] Gallop. R.S., Taylor. H.F.W., « *Microstructural and microanalytical studies of sulfate attack. V. comparison of different slag blends*», Cement and Concrete Research, Vol 26, (1996), p1029–1044.

[**GCI, 2008**] GCI-714, Cours de génie civil «*Durabilité et réparation du béton*», Université de Sherbrooke, Canada, Internet, (2008)

[**Guettala et Mezghiche, 2013**] Guettala. S., Mezghiche. B., « *Influence de l'addition du sable de dune en poudre au ciment sur les propriétés des bétons* » 21^{ème} Congrès Français de Mécanique, Bordeaux, 26- 30 août (2013), 6p.

H

[**Hadj Sadok et al, 2011**] Hadj Sadok .A., Kenai. S., Courard. L., « *Perméabilité au gaz et aux ions chlore des mortiers à base de laitier de faible hydraulicité* », INVACO2, séminaire

Références bibliographiques

international, innovation et valorisation dans le génie civil et matériaux de construction, N°1Q-189, Algérie, (2011), 6p.

[Hameed, 2010] Hameed. R., «*Apport d'un renfort de fibres sur les performances des structures en béton armé pour les applications parasismiques*», Thèse doctorat, INSA de Toulouse, France, (2010), 383p.

[Haniche, 2012] Haniche. R., «*Contribution à l'étude des bétons portés en température / Evolution des propriétés de transfert / Etude de l'éclatement* ». Thèse de doctorat, INSA Lyon, France (2012), 309p.

[Hossack et Thomas, 2015] Hossack. A.M., Thomas M.D.A., «*Varying fly ash and slag contents in Portland limestone cement mortars exposed to external sulfates*» Construction and Building Materials, Vol 78, (2015), p 333–341.

[Hsiea et al, 2008] Hsiea. M., Tua. C., Songb. P.S., «*Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete*», Materials Science and Engineering A 494, (2008) , p153–157.

I

[Irassar, 2009] Irassar. E.F., «*Sulfate attack on cementitious materials containing limestone fillers — A review*», Cement and Concrete Research, Vol 39, (2009), p241–254.

J

[Joudi et al, 2011] Joudi. I., Lecomte. A., Ben Ouezdou. M., «*Influence des sables de concassage à différents taux de filler sur les performances mécaniques des bétons* », INVACO2, séminaire international, innovation et valorisation dans le génie civil et matériaux de construction, N°1Q-311, Algérie, (2011), 7p.

K

[Kaikea, 2015] Kaikea. A., «*élaboration des bétons fibrés à haute performances avec addition du laitier granulé -comportement mécanique et durabilité-*», thèse de doctorat, Université Badji-Mokhtar, Annaba, Algérie, (2015) 178p.

[Kakooei et al, 2012] Kakooei. S., Akil. H.M., Jamshidi. M., Rouhi. J., «*The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures* », Construction and Building Materials, Vol 27, (2012),p 73–77.

[Kelifa, 2009] Kelifa. M.R., «*Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants*», thèse de doctorat, Université de Constantine et Université D'Orléans, (2009) 173p

[Khouadjia et al, 2015] Khouadjia. M.L.K. , Mezghiche. B., Drissi. M., «*Experimental evaluation of workability and compressive strength of concrete with several local sand and mineral additions*», Construction and Building Materials, Vol 98, N°15, November (2015), P 194–203.

[Kriker, 2005] Kriker .A., Derbicki. G., Bali. A., Khanfer. M.M., «*Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate*», Construction and Building Materials, (2005)

L

[Lacroix et al, 1982] Lacroix. R., fuentes. A., Thonier. H., « *Traité de béton armé* ». Livre edition Eyrolles, (1982).

[Lamontagne et Pigeon, 1994] Lamontagne. A., Pigeon.M., « *The influence of polypropylene fibers and aggregate grading on the properties of dry-mix shotcrete*», Cement and Concrete Research, Vol 25, (1994), p293–298.

[Lawrence, 2000] Lawrence. P., « *sur l'activité des cendres volantes et des additions minérales chimiquement inertes dans les matériaux cimentaires* », thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse III, France, (2000).

[LCPC, 2004] LCPC « *Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis d'une réaction sulfatique interne* », projet de mode opératoire, (2004).

[Le Bescop et al, 1993] Le Bescop. P., Adenot. F., Galle. C., Lovera. P., « *Dégradation des matériaux à base de liants hydrauliques en milieu saturé Application au comportement à long terme des colis "béton"*», CEA-DCC/DESD/SESD - CE Saclay et CE Cadarache, France, (1993), 4p.

[Le Roux et Orsett, 2000] Le Roux.A., Orsett. S., « *Les réactions sulfatiques : conditions de formation, structure et expansion des minéraux secondaires sulfatés*», bulletin des laboratoires des ponts et chaussées- 225, Mars-Avril (2000), RÉF. 4316 - p41-50.

[Lee, 2007] Lee. S.T., « *Performance Deterioration of Portland Cement Matrix due to Magnesium Sulfate Attack*», KSCE Journal of Civil Engineering, Vol 11, N° 3, May (2007) p 157-163.

[Leklou, 2008] Leklou. N., « *Contribution à la connaissance de la réaction sulfatique interne*», thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse III, France, (2008), 224p.

[Long et al, 2007] Long. G., Xie. Y., Tang. X., « *Evaluating deterioration of concrete by sulfate attack*», Journal of wuhan university of technology-Master, sci. Ed , September (2007), p 572-576

[Lura et Terrasi, 2014] Lura ., Terrasi «*Reduction of fire spalling in high-performance concrete by means of superabsorbent polymers and polypropylene fibers Small scale fire tests of carbon fiber reinforced plastic-prestressed self-compacting concrete*», Cement and Concrete Composites, Vol 49, (2014), p 36–42.

M

[Mazzoli et al, 2015] Mazzoli. A., Monosi.S., Plescia.ES., «*Evaluation of the early-age-shrinkage of Fiber Reinforced Concrete (FRC) using image analysis methods*», Construction and Building Materials, Vol101, (2015), p596–601.

[Maes et al, 2013] Maes. M., Gruyaert. E., De Belie. N., « *Resistance of concrete with blast-furnace slag against chlorides, investigated by comparing chloride profiles after migration and diffusion*», Materials and Structures, Vol 46, (2013), p89–103.

[Mehta et Monteiro, 2005] Mehta. P.K., Monteiro P.J.M., «*Concrete: Structure, Properties, and Materials*», McGraw-Hill Professional, New York, (2005).

[Metha, 1973] Metha. P.K., «*Mechanism of expansion associates with ettringite formation*», Cement and Concrete Research, Vol 3, (1973), p 1–6.

[**Metha, 1986**] Mehta P.K., Mehta P.K., «Concrete structure: properties, and materials», Prentice Hall, (1986), 450 p

[**Michel, 2009**] Michel. M., « Accélération de ciment au laitier par du ciment sulfo-alumineux », thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, (2009), 280p.

[**Moranville, 1997**] Moranville. M., « Ciments et bétons-Composition, propriétés et utilisations », Bulletin de L'union des Physiciens, Vol 91, N° 790, Janvier (1997), p 125-143.

[**Mouli et al, 2010**] Mouli. M., Senhadji. Y., Benosman. A. S., Khelafi. H., «Résistance aux acides et à la pénétration des ions chlorures des mortiers avec pouzzolane et fine calcaire», revue Technologiques, Scientifiques et Linguistique, Communication Sciences et Technologie, COST, vol 8, janvier (2010), p59-65.

N

[**Naceri et Messaoudene, 2006**] Naceri. A., Messaoudene. I., «Effet de l'activation mécanique du laitier de haut fourneau sur le comportement mécanique du mortier», Lebanese Science Journal, Vol. 7, No. 2, (2006), p 85-96.

[**Ndiaye, 1993**] Ndiaye. K., « Optimisation des formulations des bétons de sable »,projet fin d'étude , université Cheikh Anta Diop, Thies, (1993), 140p.

[**NF EN 1008, 2003**] NF EN 1008 «Eau de gâchage pour bétons », Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton, (2003).

[**NF P18- 500, 2005**] NF P18- 500, « Béton : Béton de sable », (2005)

[**NF P18- 508, 2005**] NF P 18-508. « Additions pour béton hydraulique - Additions calcaires - Spécifications e critères de conformité » (2005).

[**Niknezhad et Kamali-Bernard, 2015**] Niknezhad.D., Kamali-Bernard.S., « Etude du retrait et des propriétés de transport d'Eco-BAP à base d'additions minérales »,33èmes Rencontres de l'AUGC, ISABTP/UPPA, Anglet, 27 -29 mai(2015) ,9p.

[**NT BUILD 492, 1999**] BUILD 492., « Concrete, mortar and cement based repair materials: chloride migration coefficient from non steady state migration experiments, Nordtest method ». 1999.

[**NF EN 12350-2, 1999**] NF EN 12350-2, « Essai pour béton frais. Partie 2: Essai d'affaissement » AFNOR, décembre 1(999).

[**NBN EN 1015-3,1999**] NBN EN 1015-3 « Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie – partie 3 : détermination de la consistance du mortier frais (à la table a secousses)», (1999).

[**NF EN12390-3, 2000**] NF EN12390-3, « Essai pour béton durci, partie3: résistance à la compression sur éprouvette », Aout (2000).

[**NF EN12390-1, 2001**] NF EN12390-1, « Essai pour béton durci, partie1: Forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules », Octobre (2001).

[**NF EN 934-2, 2002**] NF EN 934-2 « Adjuvants pour béton, mortier et coulis Partie 2 : Adjuvants

pour béton -Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage », (2002)

[NF EN 197-1/A1, 2004] NF EN 197-1/A1 « *Ciment Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants* », (2004).

[NF EN 15167-1, 2006] NF EN 15167-1 « *Laitier granulé de haut-fourneau moulu pour utilisation dans le béton, mortier et coulis - Partie 1 : définitions, exigences et critères de conformité* », (2006).

P

[Paco, 2010] Paco. D., « *Contribution à l'étude de l'influence des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton* », thèse de doctorat, Université de Toulouse, France, (2010), 253p.

[Patsikas et al, 2012] Patsikas. N., Katsiotis. N., Pipilikaki. P., Papageorgiou. D., Chaniotakis. E., Beazi-Katsioti. M., « *Durability of mortars of white cement against sulfate attack in elevated temperatures* », Construction and Building Materials, Vol36, (2012), p1082–1089.

[Pavoine, 2003] Pavoine. A., « *Evaluation du potentiel de réactivité des bétons vis-à-vis de la formation différée de l'ettringite* », thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, France, (2003), 244p

[Perlot, 2005] Perlot. C., « *Influence de la décalcification de matériaux cimentaires sur les propriétés de transfert : application au stockage profond de déchets radioactifs* », thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, (2005), 254p.

[Perraton ,1999] Perraton. D., Aitcin. P.C., Carles – Gibergues. A., « *Mesure de la perméabilité aux gaz des bétons: perméabilité apparente et perméabilité intrinsèque*», Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Vol. 221, (1999), p 69-78.

[Pliya, 2010] Pliya. B.A.P., « *Contribution des fibres de polypropylène et métalliques à l'amélioration du comportement du béton soumis à une température élevée*», thèse de doctorat, université de Cergy-Pontoise, France, (2010) ,260p.

R

[Rabehi, 2014] Rabehi. M., « *Apport à la caractérisation de la porosité ouverte du béton d'enrobage par l'utilisation des tests d'absorption capillaire*», thèse de doctorat, université Mohamed Khider, Biskra, Algérie, (2014), 166p.

[Ragoubi, 2010] Ragoubi. M., « *Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne* », thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy 1, France, (2010), 200p.

[Rahmouni et al, 2012] Rahmouni. Z., Belouadah. M., Tebbal. N., « *Influence des additions minérales sur les propriétés à l'état durci des bétons ordinaires à base de matériaux locaux* », XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie, 6-8 juin (2012), 10p.

[Ramezaniapour et al, 2013] Ramezaniapour. A.A., Esmaeili. M., Ghahari. S.A., Najafi. M.H., « *Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers*», Construction and Building Materials, Vol 44, (2013), p 411–418.

[*Rehnstrom et Bhargava, 1977*] Rehnstrom. A., Bhargav. A.J., « Dynamic Strenght of Polymer modified and fibere inforced concrete cement and research », 1977

[*Rougelot, 2008*] Rougelot. T., « *Etude expérimentale multi-échelles des couplages hydriques, mécaniques et chimiques dans les matériaux cimentaires* », thèse de doctorat, Université de sciences et technologies de Lille, France, (2008), 223p.

[*Rozière, 2007*] Rozière. E. « *Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle* », thèse de doctorat, Université de Nantes, France, (2007),250p

[*Rozière et al, 2007*] Rozière. E., Grondin .F., Loukili .A., Wenger. E., « *Etude expérimentale et modélisation des attaques de sulfate dans les matériaux cimentaires* », 18^{ème} Congrès Français de Mécanique, Grenoble, 27-31 août (2007), 6p.

[*Rozière et al, 2009*] Rozière. E., Loukili .A., El Hachem. R., Grondin .F., « *Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks* », Cement and Concrete Research, Vol 39, (2009), p1188–1198.

S

[*Sabir et al, 1998*] Sabir. B.B., Wild. S., O'Farrell. M., « *A water sorptivity test for mortar and concrete* », Materials and Structures, Vol 31, October (1998), p 568-574.

[*Sablocrete, 1994*] « *Sablocrete, béton de sable : caractéristiques et pratiques d'utilisation* », presses de l'école nationale des ponts et chaussées, France, (1994) 230p.

[*Santhanam et al, 2003*] Santhanam. M., Cohen. M.D., Olek. J., « *Mechanism of sulfate attack: a fresh look, Part 2. Proposed mechanisms* », Cement and Concrete Research, Vol 33, (2003), p 341–346.

[*Scrivener et al, 1999*] Scrivener. K., Damidot. D., Famy. C., « *Possible mechanisms of expansion of concrete exposed to elevated temperatures during curing (Also known as DEF) and implications for avoidance of field problems* », Cement. Concrete. Aggregate, CCAGDP, vol 21, No°1(1999), p 93-101.

T

[*Tahenni, 2006*] Tahenni. T., « *Fissuration en béton avec référence particulière au béton à haute performance* », mémoire de magister, USTHB, Algérie, (2006)

[*Taylor et al, 2011*] Taylor. H. F. W., Famy. C., Scrivener. K. L., « *Review: Delayed Ettringite Formation* », Cement and Concrete Research, vol 31, N° 5, (2001), p 683-693.

[*Temimi-Maaref, 2006*] Temimi-Maaref. N., « *Comportement thermo-mécanique et rupture de polypropylènes. Etude expérimentale et modélisation* », Thèse de doctorat, L'Ecole des Mines de Paris, France, (2006), 190p.

[*Thomas et al, 1999*] Thomas. M.D.A., Bamforth. P.B., « *Modelling chloride diffusion in concrete. Effect of fly ash and slag* », Cement and Concrete Research, vol 29, (1999), p 487-495.

[*Tran, 2009*] Tran. T.T., « *Contribution à l'étude du comportement mécanique et hydromécanique du béton* », thèse de doctorat, université de liège, (2009), 257p.

V

Références bibliographiques

[**Van Rompaey, 2006**] Van Rompaey. G., « *Etude de la réactivité des ciments riches en laitier, à basse température et à temps court, sans ajout chloruré* », thèse de doctorat, Université libre de Bruxelles, (2006), 462p.

[**Viallis Terrisse, 2000**] Viallis Terrisse. H., « *Interaction des silicates de Calcium Hydratés, principaux constituants du ciment avec les chlorures d'alcalins. Analogie avec les argiles* », thèse de doctorat, Université de Bourgogne, (2000), 256p.

W

[**Wang et al, 1990**] Wang. Y., Li. V.C., Bacher. S., « *Tensile properties of synthetic fiber reinforced mortar* », Cement and concrete composites, Vol 12, (1990), p 29-40.

[**Wang, 1994**] Wang. J.G., « *Sulfate attack on hardened cement paste* », Cement and Concrete Research, vol 24, N° 4, (1994), p 735-742.

[**Wirquin et al, 2000**] Wirquin. E., Hadjieva-Zaharieva. R., Buyle-Bodin. F., « *Utilisation de l'absorption d'eau des bétons comme critères de leur durabilité- Application aux bétons de granulats recyclés* »,

X

[**Xiaojian et al, 2008**] Xiaojian. G., Baoguo. M., Yingzi. Y., Anshuang. S., « *Sulfate Attack of Cement-Based Material with Limestone Filler Exposed to Different Environments* », Journal of Materials Engineering and Performance, Vol 17, N°4, August (2008), p543–549.

Y

[**Yermak, 2015**] Yermak. N., « *Comportement à hautes températures des bétons additionnés de fibres* », Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert ». ISABTP/UPPA, Anglet, 27 -29 mai (2015), 8p.

Z

[**Zeghichi et al 2007**] Zeghichi. L., Mezliche. Z., Merzougui. A., « *l'influence de l'activation de laitier sur le comportement mécanique des bétons* », lebanese Science Journal, Vol 2, N2, (2007), p 105-113.

[**Zhao et al, 2008**] Zhao. B. « *Mechanical strength improvement of polypropylene threads modified by PVA/CNT* », Materials Letters, Vol 62, (2008), p 4380–4382.

[**Zollo et al, 1986**] Zollo. R.F., Ilter. J.A., Bouchacourt. G.B., « *Plastic and drying shrinkage in concrete containing collated fibrillated polypropylene fibers* », 3rd Int. Symp. on Developments in Fiber Reinforced Cement and Concrete RILEM Symposium FRC, 86(1), RILEM Technical Committee 49-TFR, Cachan, France, (1986).

[**Zri, 2010**] Zri. A., « *Mise en place d'une nouvelle approche de formulation d'une matrice cimentaire à base de sable de dragage : application aux bétons de sable et granulats* », thèse de doctorat, université de Lille I, France, (2010), 223p.



ANNEXES

MEDAPLAST SP 40

Conforme à la norme EN 934-2 Tab 1, 3.1 et 3.2 NA 774

Super plastifiant - haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le **MEDAPLAST SP 40** est un superplastifiant haut réducteur d'eau permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux
- Bétons extrudés
- Bétons BCR

PROPRIÉTÉS

Grâce à ses propriétés le **MEDAPLAST SP 40** permet :

Sur béton frais :

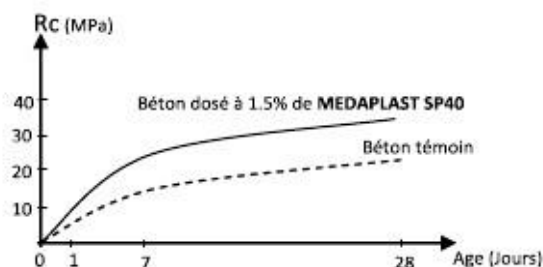
- Améliorer la fluidité
- Augmenter la maniabilité
- Réduire l'eau de gâchage
- Éviter la ségrégation
- Faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques même à jeune âge
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait

CARACTÉRISTIQUES

- Aspect Liquide
- Couleur Marron
- pH 8,2
- Densité 1,20 ± 0,01
- Teneur en chlore < 1g/L
- Extrait sec 40%



Evolution des résistances en compression

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAPLAST SP 40** est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait été introduite.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,6% à 2,5% du poids de ciment soit 0,5L à 2L pour 100 kg de ciment

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAPLAST SP 40** est conditionné en bidons de 12Kg, fûts de 270 kg et cubitenaire de 1200 kg.

Délai de conservation :

Une année emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ($5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$).

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex-dz.com

PV d'essais conforme aux normes, établi par le CNERIB en Janvier 2007.

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Granitex

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com

