REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA
FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL ET D'HYDRAULIQUE

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES EN : GENIE CIVIL

Option : Constructions civiles

Intitulé

EFFET DES AJOUTS MINERAUX ACTIFS ET INERTES SUR LES PROPRIETES PHYSIQUES, MECANIQUES ET CHIMIQUES DU MORTIER

Présentée par :

LOGBI Abdelaziz

Soutenue publiquement le :18/07/ 2019

devant le jury composé de :

Dr. BENTEBBA Med Tahar	Professeur	**Président**	Université Kasdi Merbah - Ouargla
Dr. KRIKER Abdelouahed	Professeur	**Rapporteur**	Université Kasdi Merbah - Ouargla
Dr. BALI Abderrahim	Professeur	**Co-directeur de thèse**	Ecole polytechnique - Alger
Dr. BOUAZIZ Ahmed	Professeur	**Examinateur**	Université Mohamed Khider - Biskra
Dr. GUETTALA Salim	Professeur	**Examinateur**	Université Ziane Achour – Djelfa

بسم الله الرحمن الرحيم

إهداء.....

إلى والدي الكريم...رحمة الله عليه...

إلى والدتي الغالية... حفظها الله ورعاها...

إلى كل أفراد العائلة...زوجتي، أبنائي ، إخوتي وأخواتي...

إلى كل أساتذتي و أصدقائي....

إلى كل هؤلاء أهدي عملي المتواضع هذا...

عبد العزيز العقبي....

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier particulièrement mon Directeur de thèse, Monsieur Abdelouahed Kriker, Professeur à l'université de Kasdi Merbah-Ouargla-, ainsi que mon co-directeur de thèse Monsieur Abderrahim BALI, Professeur à l'E.N.P d'Alger pour leurs contributions et leurs aides si précieuses.

Je tiens à remercier Monsieur Bentebba Mohamed Tahar, Professeur à l'université de Ouargla, qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider ce jury. Mes remerciements vont également à Monsieur Bouaziz Ahmed, Professeur à l'université de Biskra, et Monsieur Guettala Salim, Professeur à l'université de Djelfa qui m'ont fait l'honneur de prendre part au jury de cette thèse, pour leurs contributions accordées à l'évaluation et à l'enrichissement de ce travail. Qu'ils trouvent ici toute ma gratitude.

Je saisis également cette occasion pour remercier le personnel ingénieur et technicien des laboratoires, où nous avons pu réaliser les essais expérimentaux, notamment le L.T.PS (Ouargla et El-Oued), le laboratoire de génie civil de l'université de Ouargla, les laboratoires de contrôle de qualité des cimenteries de Ain Lekbira à Sétif et de Sour El Ghouzlène à Bouira, et enfin le laboratoire du département (DPTAGP) du CDTA (Alger).

Je souhaite aussi remercier mes collègues du département de génie civil et hydraulique de l'université Kasdi Merbah de Ouargla, et de l'université d'El-Oued ; sans oublier tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de ce travail, que ce soit au travers d'un simple encouragement ou d'un appui continu. Je leur adresse à tous, l'expression de ma sincère reconnaissance.

Mes reconnaissances aussi envers tous ceux qui m'ont aidé et encouragé dans l'élaboration de cette thèse plus particulièrement mon frère Abdelouahed et le Docteur M'hamed Khelif.

Enfin, évidement mes pensées vont également à toute ma famille et particulièrement à ma mère, ma femme, mes enfants et mes frères et sœurs pour leurs encouragements et leurs soutiens tout au long de ce travail.

Abdelaziz Logbi

RÉSUMÉ

Cette thèse consiste en l'étude expérimentale de l'effet de quatre (04) ajouts minéraux locaux (actifs et inertes) finement broyés :

- la pouzzolane naturelle de Béni Saf (Ain Témouchent),
- le laitier d'El-Hadjar (Annaba),
- le calcaire de Hassi Messaoud (Ouargla),
- le sable de dune d'EL-Oued sur les caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques du mortier.

Ces ajouts sont broyés jusqu'à obtenir une finesse proche de celle du ciment utilisé, et incorporé au mortier avec des pourcentages prédéterminés (par rapport au poids du ciment), sur la base des études antérieures.

Les taux de substitution approuvés sont de l'ordre de 20% de laitier, 15% de pouzzolane, 10% de fines calcaires et de 10% de sable de dunes broyé.

L'étude amène à une amélioration des performances physiques, mécaniques et chimiques (durabilité) de toutes les composantes du mortier.

L'étude de la durabilité a été effectuée en plusieurs étapes :

- L'effet des agressions chimiques des acides sulfurique et chlorydrique (H_2SO_4 et HCl) sur les caractéristiques des mortiers immergés,
- L'absorption capillaire,
- L'essai ultra-sonique,
- L'analyse par DRX et des observations sous MEB

L'étude a révélé l'effet bénéfique des quatre ajouts sur la microstructure, notamment le sable de dune broyé qui a donné des résultats très encourageants.

MOTS CLES : Ajout minéral, pouzzolane, laitier, fillers calcaires, sable de dunes, résistance mécanique, perte de masse, durabilité, Absorption capillaire.

ABSTRACT

This thesis is an experimental study of the effect of four (04) finely crushed local mineral admixtures (active and inert):

- Blast furnace Slag of El-Hadjar (Annaba),
- natural pouzzolan of Beni saf (Ain Témouchent),
- limestone of Hassi Messaoud (Ouargla),
- and dunes sand of El-Oued on the properties of mortar.

These additions are ground at a fineness nearly to that of the used cement, and incorporated into the mortar with predetermined percentages (of the weight of cement), in order to perform the physico-mechanical characteristics and durability of mortar.

Substitutions approved rates - on the basis of previous studies- are: 20% of slag, 15% of pozzolan, 10% of limestone fines and 10% of crushed sand dunes.

We found an improvement in physical, mechanical and chemical performances (durability) of all mortar compositions.

The study of durability has been in several stages:

- the effect of chemical attacks of sulfuric and Hydrochloric acids (H_2SO_4 and HCl) on the characteristics of submerged mortars,
- capillary absorption,
- ultrasonic testing.
- An analysis by XRD and observations under SEM,

The study showed the beneficial effect of the four additions on the microstructure, especially crushed dune sand which has produced very encouraging results.

KEY WORDS: mineral addition, natural pozzolan, slag, limestone fillers, dune sand, mechanical strength, durability , mass loss, capillary absorption.

- ملخص -

تتمثل الاطروحة في دراسة تجريبية حول تأثيرأربع إضافات معدنية ـ فعالة وحيادية ـ على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية و الكيميائية للملاط .

الإضافات المختارة هي: الجفاء المعدني (من مركب الحديد والصلب ـ الحجار ـ عنابة)، البوزولان الطبيعي من بني صاف (عين تموشنت)، كلس حاسي مسعود ورمل الكثبان لوادي سوف.

أخذت هذه الإضافات الأربع بنسب محددة مسبقا (حسب دراسة و أبحاث سابقة) ، وطحنتْ طحنا جيدا حتى نعومة الإسمنت المستعمل، ثمّ أضيفت إلى الإسمنت (بالنسب التالية : % 20جفاء معدني، % 15بوزولان ، %10كلس، %10رمل الكثبان المطحون (كل واحد على حده)).

خلصت الدراسة إلى تحسن في الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والكيميائية لكل تركيبات الملاط بالنسبة للملاط الشاهد.

دراسة الديمومة كانت على عدة محاور:

- تأثير محاليل: ($H_2 SO_4$) و (HCl) على خصائص الملاط.
- الإمتصاص الشعري.
- إنتشار الموجات الفوق الصوتية.
- الفحص الشعاعي (DRX) والمجهري(MEB).

الكلمات المفتاحية : إضافة معدنية ـ بوزولان طبيعي ـ جفاء معدني ـ دقائق الكلس ـ رمل الكثبان ـ مقاومة ميكانيكية ـ الضياع في الكتلة ـ ديمومة ـ امتصاص شعري.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	
RÉSUMÉS	
SOMMAIRE	**I**
LISTE DES FIGURES	**VI**
LISTE DES TABLEAUX	**XI**
INTRODUCTION GENERALE	**1**

CHAPITRE I : CIMENT ET AJOUTS MINERAUX: COMPOSITION, ACTIVATION ET HYDRATATION	**5**
I.1 INTRODUCTION	**5**
I.2.CIMENT PORTLAND	**6**
I.2.1.Définition	6
I.2.2.Classification des ciments en fonction de leur composition	7
I.2.3.Production mondiale et nationale du ciment	8
I.3.AJOUTS MINERAUX	**10**
I.3.1. Aperçu sur l'utilisation des ajouts minéraux	10
I.3.2. Le laitier de haut fourneau	11
I.3.2.1. Définition	11
I.3.2.2 . Historique sur la valorisation du laitier	12
I.3.3. Les pouzzolanes	12
I.3.3.1. Définition	12
I.3.3.2. Historique sur l'utilisation des pouzzolanes	13
I.3.4. Les fillers calcaires	13
I.3.4.1. Définition et utilisation	13
I.3.5. Sable des dunes	15
I.3.5.1. Définition	15
I.3.5.2. Localisation géographique du sable de dunes en Algérie	16
I.4. COMPOSITION CHIMIQUES DES AJOUTS MINERAUX	**17**
I.4.1. Composition chimique du laitier	18
I.4.1.1. Qualité d'un laitier	18
I.4.2. Composition chimique des pouzzolanes	19
I.4.3. Composition chimique des fillers calcaires	19
I.4.4. Composition chimique du sable de dunes	19
I.5. HYDRATATION ET ACTIVATION DU CIMENT ET DES AJOUTS MINERAUX	**20**
I.5.1. Hydraulicité	20
I.5.2. Processus d'hydratation	21

I.5.3. Hydratation des différents composants du ciment Portland	22
I.5.1.1. Hydratation du silicate tricalcique C_3S	22
I.5.3.2. Hydratation du silicate bicalcique C_2S	23
I .5.3.3. Hydratation de l'aluminate tricalcique C_3A	24
I.5.3.4. Hydratation de I'aluminoferrite tétracalcique C_4AF	25
I.5.4. Microstructure de la pâte du ciment	27
I.5.5. Présentation schématique du processus d'hydratation du ciment portland	29
I.5.6. Hydratation et activation du laitier	30
I.5.7. Activation et hydratation des pouzzolanes	31
I.5.7.1. Capacité de fixation de chaux par les pouzzolanes	32
I.5.8. Cinétique d'hydratation des laitiers et des pouzzolanes	33
I.6.CONCLUSION	**35**

CHAPITRE II : CARACTERISATION DES BETONS AUX AJOUTS MINERAUX	**36**
II.1.INTRODUCTION	**36**
II.2. AJOUTS MINERAUUX ET POROSITE	**36**
II.3. PROPRIETES DES BETONS AUX AJOUTS MINERAUX	**37**
II.3.1. Propriétés du béton au laitier	37
II.3.1.1. Béton frais	37
II.3.1. 2. Béton durci	39
II.3.2. Propriétés du béton à la pouzzolane	40
II.3.2.1. Béton frais	40
II.3.2.2. Béton durci	42
II.3.3. Propriétés du béton aux fines calcaires	44
II.3.3.1. Béton frais	45
II.3.3.2. Béton durci	48
II.3.4. Propriétés du béton au sable de dunes	48
II.3.4.2. Béton durci	48
II.4. AJOUTS MINERAUX ET DURABILITE	**49**
II.4.1. Béton et durabilité	49
II.4.2.Durabilité et développement durable	50
II.4.3. Facteurs de durabilité	50
II.4.3. 1.Compacité, porosité et perméabilité	50
II.4.3. 2.Effet du rapport E/C sur la porosité	51
II.4.4. Absorption capillaire	53
II.4.5. Différents aspects d'agressivité	54
II.4.5.1. Action des eaux agressives	54
II.4.5.2. Action des sulfates	54

II.4.6. Mécanismes d'attaques des sulfates	55
II.4.6.1.Cas de sulfate de sodium (Na_2SO_4)	56
A. Formation de gypse secondaire	56
B. Formation d'éttringite secondaire	56
II.4.6.2.Cas de sulfate de magnésium Mg SO_4	57
II.4.7.Action des chlorures	58
II.4.8. Carbonatation	58
II.4.9.Influence des ajouts minéraux sur la durabilité du béton et du mortier	60
II.4.9.1. Effet du laitier de haut fourneau	60
II.4.9.2. Effet de la Pouzzolane naturelle	61
II.4.9.3. Effet des fillers calcaires	63
II.4.9.4. Effet du sable de dunes broyé	64
II.5. CONCLUSION	**66**

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET METHODES D'ESSAIS	**67**
III.1. INTRODUCTION	**67**
III.2.MATERIAUX UTILISES	**69**
III.2.1. Le ciment Portland	69
III.2.2. Les ajouts minéraux actifs et inertes	70
III.2.2.1. Le laitier d'El-Hadjar	70
III.2.2.2. La pouzzolane de Béni Saf	71
III.2.2.3. Le calcaire de Hassi Messaoud	72
III.2.2.4. Le sable de dunes d'El-Oued	73
III.2.3. Le sable de construction	74
III.2.3.1. Caractérisation et choix du sable de construction	74
III.2.3.2. Essai d'équivalent de sable	75
III.2.3.3. Masse volumique apparente et absolue du sable	75
III.2.3.4.Analyse granulométrique	75
III.2.3.3.Module de finesse	76
III.3. METODES D'ANALYSE ET D'ESSAIS	**77**
III.3.1.Optimisation des taux d'incorporation des ajouts	77
III.3.1.1. Optimisation du taux d'incorporation du laitier de haut fourneau	78
III.3.1.2. Optimisation du taux d'incorporation de la pouzzolane naturelle	79
III.3.1.3. Optimisation du taux d'incorporation des fillers calcaires	80
III.3.1.4. Optimisation du taux d'incorporation du sable de dunes broyé	82
III.3.2.Confection des mortiers	83
III.3.2.1. Composition des mortiers	83
III.3.2.2 Confection et malaxage	84

III.3.3.Type d'éprouvettes	84
III.4. ESSAIS PHYSICO-MECANIQUES	**85**
III.4.1 Essais sur ajouts et ciment	85
III.4.2. Essais sur mortier frais	85
III.4.2.1. Essai de maniabilité (écoulement au maniabilimètre B)	85
III.4.2.2 Masse volumique du mortier frais	86
III.4.3. Essais sur mortier durci	86
III.4.3.1. Détermination de la masse volumique du mortier durci	86
III.4.3.2. Essais de résistance mécanique	87
A-Résistance à la traction par flexion	87
B- Résistance à la compression	88
III.4.3.3. Essai ultrasonique	89
III.4.3.4. Essai de l'absorption d'eau (Sorptivité)	90
III.5. ESSAIS DE DURABILITE	**92**
III.5.1.Attaque des mortiers par les acides	92
III.5.1.1. Procédure de l'essai	92
III.6. CONCLUSION	**94**

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS	**95**
IV.1 INTRODUCTION	**95**
IV.2.PROPRIETES DES MORTIERS FRAIS	**96**
IV.2.1.Masse volumique	96
III.2. 2.Maniabilité	97
IV.2. 2.1.Effet du laitier sur la maniabilité	98
IV.2. 2.2.Effet de la pouzzolane naturelle de Béni Saf sur la maniabilité	99
IV.2. 2.3.Effet des fillers calcaires sur la maniabilité	99
IV.2. 2.4.Effet du sable de dunes broyé sur la maniabilité	100
IV.3. PROPRIETES DES MORTIERS DURCIS	**101**
IV.3.1.Masse volumique	101
IV.3.2.Résistance mécanique	102
VI.3.2.1. Effet de la pouzzolane naturelle	102
A-Résistance à la compression	102
B-Résistance à la flexion	104
IV.3.2.2. Effet du laitier de haut fourneau	105
A-Résistance à la compression	105
B-Résistance à la flexion	106
IV.3.2.3. Effet des fillers calcaires	107
A-Résistance à la compression	107
B-Résistance à la flexion	109
IV.3.2.4. Effet du sable de dune broyé	110
A-Résistance à la compression	110

B-Résistance à la flexion	113
IV.3.2.5. Comparaison entre l'effet des quatre ajouts sur la résistance mécanique	114
IV.4.ESSAIS DE DURABILITE	**117**
IV.4.1.Absorption capillaire (sorptivité)	117
IV.4.2.Attaque par les acides	120
IV.4.2.1. Observations visuelles	121
A- Attaque par l'acide sulfurique (H_2SO_4)	121
B- Attaque par l'acide chlorhydrique (HCl)	123
IV.4.2.2. Variation de masse	125
A- Attaque par l'acide sulfurique (H_2SO_4)	125
B- Attaque par l'acide chlorydrique (HCl)	132
IV.4.3. Essai ultrasonique	137
IV.4.3.1. Conservation dans l'eau douce (cure normale)	137
IV.4.3.2. Conservation dans les solutions acides (HCl et H_2SO_4)	138
IV.4.4. Analyse de la microstructure	141
IV.4.4. 1. Analyse par DRX	141
A- Mortier témoin (MT)	143
B- Mortier au laitier (ML)	144
C- Mortier à la pouzzolane (MPN)	145
D- Mortier aux fillers calcaires (MC)	146
E- Mortier au sable de dunes broyé (MSDB)	147
IV.4.4.2. Observations par le MEB	152
A- Mortier témoin (MT)	153
B- Mortier au laitier (ML)	156
C- Mortier à la pouzzolane (MPN)	158
D- Mortier aux fillers calcaires (MC)	160
E- Mortier au sable de dunes broyé (MSDB)	162
IV.5. CONCLUSION	**164**
CONCLUSION GENERALE	**165**
PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS	**170**
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	**171**

LISTES DES FIGURES ET DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

CAHPITRE I : CIMENT ET AJOUTS MINERAUX: COMPOSITION, ACTIVATION ET HYDRATATION		
N° de figure	**Titre**	**Page**
Figure I.1	Cristaux anhydres du clinker. [Baron et Sauterey ,1995]	7
Figure I.2	Production du ciment des dix principaux pays producteurs du monde en 2016 en comparant avec l'Algérie [TSA 2018 ; Statista, 2017]	9
Figure I.3	Courbes granulométriques d'un sable de dunes (Mf = 1,22) et un sable alluvionnaire (Mf = 2.8) [Bouaziz et al., 2013].	15
Figure I .4	Situation géographique des Ergs (sables de dunes) de l'Algérie [Tafraoui , 2009]	16
Figure I.5	Diagramme ternaire (de RANKIN) C-S-A [Dron et Voinovitch, 1993 ; Vénuat, 1989]	21
Figure I.6	Image en MEB de C-S-H fibreux, avec Cristal de Portlandite et pore capillaire [Ollivier et Vichot, 2008]	23
Figure I.7	Réactivité relative des différentes composantes du ciment. La courbe « overal » représente une composition moyenne du ciment (55%C_3S, 18%C_2S, 10%C_3A, 8%C_4AF) [Tenis et Jennings , 2000].	24
Figure I.8	Image en microscopie électronique à balayage de cristaux d'éttringite [Ollivier et Vichot , 2008]	25
Figure I.9	Evolution comparée des vitesses de durcissement des différentes phases de clinker [Dupain, 2009]	26
Figure I.10	Représentation bidimensionnelle de l'empilement des grains de ciment dans la pâte [Ollivier et Vichot, 2008].	28
Figure.I.11	Description schématique de la formation de la structure dans la pâte de ciment, [Soroka, 2004].	29
Figure I.12	Description schématique de l'hydratation d'un grain de ciment, [Soroka, 2004].	30
Figure I.13	Hydratation du ciment ordinaire, [Kriker, 1992 ; Bakker, 1983].	31
Figure I.14	Hydratation des ciments au laitier, [Kriker, 1992].	31
Figure I.15	Illustration de l'effet de remplissage de la fumé de silice sur la porosité de la pâte hydratée du ciment [Soroka, 2004]	34

CAHPITRE II : CARACTERISATION DES BETONS AUX AJOUTS MINERAUX		
N° de figure	**Titre**	**Page**
Figure II.1	Variation de la température des différents bétons de masse avec l'âge ;(béton ordinaire, béton au laitier, béton à cendre volante)[[Soroka, 2004]	38
Figure II.2	Influence du laitier sur la résistance à la compression du ciment, [Boldyrev et Entine,1980]	39
Figure II.3	Effet d'incorporation du laitier dans le CPA sur le retrait du béton, [Soroka , 2004].	40
Figure II.4	Effet d'incorporation des cendres volantes dans les CPA sur la perte d'affaissement du béton frais, [Soroka , 2004]	41
Figure II.5	Effet de l'ajout pouzzolanique sur la chaleur d'hydratation du ciment, [(a)Soroka , 2004 ; (b) Senhadji et al, 2015 **].**	41
Figure II.6	Effet de l'ajout pouzzolanique dans différents cures sur la résistance mécanique du mortier ;(a) à l'eau douce. (b) à l'air libre. [Ghrici et al., 2006].	42
Figure II.7	Retrait du béton pour des différentes teneurs en pouzzolane, [Soroka , 2004].	43

Figure II.8	Variation de la maniabilité en fonction du pourcentage des fines calcaires, [Nouari et Touguy, 1997] .	44
Figure II.9	Évolution de la chaleur d'hydratation d'un mortier avec 10% de fines calcaires [Senhadji et al, 2015].	45
Figure II.10	Résistance mécanique des ciments aux fines calcaires. (a) :Compression (b) :Traction par flexion , [Nouari et Touguy, 1997].	46
Figure II.11	Résistance à la compression des mortiers en fonction de la teneur en fines calcaires (par rapport au sable) à l'âge de 28 jours, [Benna,1995].	46
Figure II.12	Résistance à la traction des mortiers en fonction de la teneur en fines calcaires (par rapport au sable) à l'âge de 28 jours, [Benna,1995].	47
Figure II.13	Retrait des ciments aux fines calcaires, [Nouari et Touguy, 1997].	47
Figure II.14	Effet de l'incorporation du sable de dunes broyé sur la résistance mécanique du ciment [Mechti et al, 2013].	48
Figure II.15	Représentation schématique de la création des pores capillaires (en haut) et la composition volumétrique de la pâte de ciment (en bas), en fonction du rapport E/C. (Holcim, 2015),	52
Figure II.16	Variation de la porosité totale en fonction du rapport E/C dans une pâte de ciment à l'âge de 28 jours, [Ollivier et Vichot, 2008].	53
Figure II.17	différents types d'agression sulfatique sur le béton [Dierkens, 2011].	55
Figure II.18	Mécanisme de carbonatation de $Ca(OH)_2$ [Ollivier et Vichot, 2008].	59
Figure II.19	Coefficient d' absorption capillaire du béton avec laitier: (a) E/Liant = 0.65 ; (b) E/Liant = 0.42[Hadjsadok et al, 2012].	60
Figure II.20	Expansion des mortiers immergés dans (a) 5% Na_2SO_4 et (b) 5% $MgSO_4$. [Hadjsadok et al, 2012].	61
Figure II.21	Evolution de la masse des mortiers en fonction de la période d'immersion dans une solution de 5% Na_2SO_4[Laoufi et al, 2016].	62
Figure II.22	Evolution de la perte du poids des mortiers à la pouzzolane de Béni- Saf en fonction de la période d'immersion en 5% H_2SO_4 [Senhadji et al 2015].	62
Figure II.23	Evolution de la perte du poids des mortiers à la pouzzolane de Béni- Saf en fonction de la période d'immersion en 1% HCl,[Ghrici et al 2006].	63
Figure II.24	Evolution de la perte du poids des mortiers aux fines calcaires en fonction de la période d'immersion en 5% H_2SO_4 [Senhadji et al 2015].	64
Figure II.25	Effet de la teneur en sable de dunes broyé sur la résistance à la compression du mortier (finesse du sable broyé = 4000 cm2/g, E/Liant = 0.25) [Guettala et Mezghiche, 2011].	65

CAHPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET METHODES D'ESSAIS

N° de figure	Titre	Page
Figure III.1	Ciment Portland utilisé (CEMI).	69
Figure III.2	Zones de prélèvement du sable de dunes utilisé (Guémar- El-oued)	74
Figure III.3	Analyse granulométrique du sable alluvionnaire utilisé	75
Figure III.4	Maniabilimètre LCL-(B)	85
Figure III.5	Dispositif pour l'essai de résistance à la traction par flexion (3 points).	87
Figure III.6	Presses utilisées dans l'essai de résistance mécanique.	88
Figure III.7	Dispositif pour l'essai de compression simple.	89
Figure III.8	Essai ultra-sonique (a) Principe de l'essai, (b)Appareil utilisé.	90
Figure III.9	Essai d'absorption capillaire	91

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS		
N° de figure	**Titre**	**Page**
Figure IV.1	Masse volumique des différentes compositions du mortier frais.	97
Figure IV.2	Maniabilité (Temps d'écoulement) au maniabilimètre B des différentes compositions de mortier.	98
Figure IV.3	Ecoulement relatif (par rapport au témoin) des différents mortiers	100
Figure IV.4	Masse volumique des différentes compositions à différents	101
Figure IV.5	Résistance à la compression du mortier à la pouzzolane en fonction d'âge	103
Figure IV.6	Représentation schématique d'une approche expliquant l'amélioration de l'hydratation du ciment avec et sans ajout inerte selon [Lawrence et al.,2003]	104
Figure IV.7	Résistance à la flexion du mortier à la pouzzolane en fonction d'âge	104
Figure IV.8	Résistance à la compression du mortier au laitier en fonction d'âge	105
Figure IV.9	Résistance à la flexion du mortier au laitier en fonction d'âge	107
Figure IV.10	Résistance à la compression du mortier au calcaire en fonction d'âge	108
Figure IV.11	Représentation schématique d'une approche expliquant l'amélioration de l'hydratation du ciment avec et sans ajout inerte selon [Lawrence et al.,2003]	109
Figure IV.12	Résistance à la flexion du mortier au calcaire en fonction d'âge	110
Figure IV.13	Résistance à la compression du mortier au sable de dunes broyé en fonction d'âge	111
Figure IV.14	Diffractogramme de rayons X du sable de dunes broyé utilisé par S. Guettala, et B. Mezghiche [Guettala et Mezghiche, 2011].	112
Figure IV.15	Résistance à la flexion du mortier au sable de dunes broyé en fonction d'âge	113
Figure IV.16	Résistance à la compression des différents mortiers avec ajouts en fonction d'âge.	115
Figure IV.17	Résistance à la flexion des différents mortiers avec ajouts en fonction d'âge	116
Figure IV.18	Essai d'absorption capillaire	117
Figure IV.19	Absorption capillaire des différents mortiers conservés dans l'eau douce à l'âge de 90jours (après 72 heures d'immersion).	118
Figure IV.20	Effet de l'incorporation du laitier (15, 30, 50%) sur l'absorption capillaire de béton à différents âges, [Hadjsadok et al, 2012].	119
Figure IV.21	Absorption capillaire relative (par rapport au témoin) des différents mortiers conservés dans l'eau douce à l'âge de 90 jours après 72 heures d'immersion.	120
Figure IV.22	Etat des éprouvettes immergé dans la solution de (H_2SO_4) pendant 180 jours (Formation d'une couche gypseuse et apparence des cavités)	122
Figure IV.23	Etat des éprouvettes immergé dans une solution de (HCl) pendant 180 jours (Apparence des cavités)	124
Figure IV.24	Evolution de la masse des différentes compositions de mortier immergées dans l'acide sulfurique (H_2SO_4)	125
Figure IV.25	Evolution de la masse du mortier témoin immergé dans l'acide sulfurique (H_2SO_4)	127
Figure IV.26	Evolution de la masse du mortier au laitier immergé dans l'acide sulfurique (H_2SO_4)	128
Figure IV.27	Evolution de la masse du mortier à la pouzzolane immergé dans l'acide sulfurique (H_2SO_4)	128
Figure IV.28	Evolution de la masse du mortier aux fillers calcaires immergé dans l'acide sulfurique (H_2SO_4)	129
Figure IV.29	Evolution de la masse du mortier au sable de dunes broyé immergé dans l'acide sulfurique (H_2SO_4)	130
Figure IV.30	Perte de masse (après rinçage et grattage) des différentes compositions à 180 jours d'immersion dans la solution (H_2SO_4).	131
Figure IV.31	Perte de masse des différentes compositions de mortier immergées dans l'acide chlorydrique (HCl).	133
Figure IV.32	Perte de masse du mortier témoin immergé dans l'acide chlorydrique (HCl).	134

Figure IV.33	Perte de masse du mortier au laitier immergé dans l'acide chlorydrique (HCl).	135
Figure IV.34	Perte de masse du mortier aux fillers calcaires immergé dans l'acide chlorydrique (HCl).	135
Figure IV.35	Perte de masse du mortier à la pouzzolane immergé dans l'acide chlorydrique (HCl).	136
Figure IV.36	Evolution de la masse du mortier au sable de dunes broyé immergé dans l'acide chlorydrique (HCl).	136
Figure IV.37	Vitesse de propagation du son dans les différentes compositions de mortier conservées dans l'eau douce à l'âge de 120 jours.	137
Figure IV.38	Vitesse de propagation du son dans les différentes compositions de mortier immergées (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution HCl).	139
Figure IV.39	Vitesse de propagation du son dans les différentes compositions de mortier immergées (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution H_2SO_4)	140
Figure IV.40	Interface du logiciel de traitement des analyses DRX (X'Pert HighScore).	141
Figure IV.41	Diffractogramme en R- X du mortier témoin (MT) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (H_2SO_4)).	143
Figure IV.42	Diffractogramme en R- X du mortier témoin (MT) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (HCl)).	143
Figure IV.43	Diffractogramme en R- X du mortier au laitier (ML) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (H_2SO_4)).	144
Figure IV.44	Diffractogramme en R- X du mortier au laitier (ML) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (HCl)).	144
Figure IV.45	Diffractogramme en R- X du mortier à la pouzzolane (MPN) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (H_2SO_4)).	145
Figure IV.46	Diffractogramme en R- X du mortier à la pouzzolane (MPN) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (HCl)).	145
Figure IV.47	Diffractogramme en R- X aux fillers calcaires (MC) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (H_2SO_4)).	146
Figure IV.48	Diffractogramme en R- X aux fillers calcaires (MC) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (HCl)).	146
Figure IV.49	Diffractogramme en R- X au sable de dunes broyé (MSDB) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (H_2SO_4)).	147
Figure IV.50	Diffractogramme en R- X au sable de dunes broyé (MSDB) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (HCl)).	147
Figure IV.51	Observation sous MEB du mortier témoin (MT) après 120 jours d'immersion dans l'eau douce.	153
Figure IV.52	Observation sous MEB du mortier témoin (MT) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (H_2SO_4)).	154
Figure IV.53	Observation sous MEB du mortier témoin (MT immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (HCl)).	155
Figure IV.54	Observation sous MEB du mortier au laitier (ML) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (H_2SO_4)).	156
Figure IV.55	Observation sous MEB du mortier au laitier (ML) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (HCl)).	157
Figure IV.56	Observation sous MEB du mortier à la pouzzolane (MPN) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (H_2SO_4)).	158
Figure IV.57	Observation sous MEB du mortier à la pouzzolane (MPN) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (HCl)).	159
Figure IV.58	Observation sous MEB du mortier aux fillers calcaires (MC) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (H_2SO_4)).	160

Figure IV.59	Observation sous MEB du mortier aux fillers calcaires (MC) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (HCl)).	161
Figure IV.60	Observation sous MEB du mortier au sable de dunes broyé (MSDB) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (H_2SO_4)).	162
Figure IV.61	Observation sous MEB du mortier au sable de dunes broyé (MSDB) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (HCl)).	163

LISTE DES TABLEAUX

CAHPITRE I : CIMENT ET AJOUTS MINERAUX: COMPOSITION, ACTIVATION ET HYDRATATION		
N° de tableau	**Titre**	**Page**
Tableau I.1	Différents types de ciment courants en fonction de leur composition [Dreux et Festa, 2007 ; Dupain et al., 2009].	8
Tableau I.2	Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes [Aichouba, 2005]	11
Tableau I.3	Teneur en silice (SiO_2) du sable de dunes des différentes régions	20
Tableau I.4	Propriétés des quatre principaux constituants du ciment portland [Soroka , 2004].	27
Tableau I.5	Variation de la dimension des capillaires en fonction de (E/C)	28

CAHPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX ET METHODES D'ESSAIS		
N° de tableau	**Titre**	**Page**
Tableau III.1	Composition chimique et minéralogique du ciment utilisé	69
Tableau III.2	Composition chimique du laitier d'El-Hadjar	70
Tableau III.3	Exigence pour de bonnes performances de laitier (Hadjsadok et al., 2012 ; Chabi et al., 2004 ; Kriker, 1992)	71
Tableau III.4	Composition chimique de la pouzzolane de Béni Saf	72
Tableau III.5	Composition chimique du calcaire de Hassi Messaoud	73
Tableau III.6	Composition chimique du sable des dunes d'El-Oued	73
Tableau III.7	Récapitulation des résultats des essais de caractérisation du sable alluvionnaire (de construction)	76
Tableau III.8	Classes de consistance selon la durée d'écoulement [Tafraoui A, 2009].	86
Tableau III.9	Analyse chimique de toutes les eaux remontées des nappes de la Wilaya d'El-Oued	93

NOTATION CIMENTAIRE

Eléments	Formules chimiques
Chaux (C)	CaO
Silice (S)	SiO_2
Alumine (A)	Al_2O_3
Silicate tricalcique C_3S (Alite)	$3CaO.SiO_2$
Silicate bicalcique C_2S (Bélite)	2CaO.SiO2
Aluminate tricalcique C_3A	$3CaO.Al_2O_3$
Ferroaluminate tétracalcique C_4AF_4 (Célite)	$4CaO .Al_2O_3 .Fe_2O_3$
Portlandite (CH)	$Ca(OH)_2$
Ettringite (E)	$C_3A. 3CaSO_4.32H_2O$
Gypse (G)	$CaSO_4.2H_2O$
Brucite	$Mg(OH)_2$
Calcite (C)	$CaCO_3$
Eau (H)	H_2O

Abréviation des différentes compositions des mortiers utilisés	
MT	Mortier témoin (de contrôle) avec 0% d'ajout et 100% de ciment (CEMI-42,5).
ML	Mortier avec 20% de laitier de haut fourneau broyé (d'El-Hadjar-Annaba) et 80% de ciment.
MPN	Mortier avec 15% de pouzzolane naturelle de Béni-Saf (Ain-Temouchent) et 85 % de ciment.
MC	Mortier avec 10% de filler de calcaire de Hassi Messaoud (Ouargla) et 90% de ciment.
MSDB	Mortier avec 10% de sable de dunes broyé d'El-Oued et 90% de ciment.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'étude du béton comporte plusieurs aspects. Ces aspects se déclinent en termes de spécification, de formulation et de mise en œuvre ; ils sont en pleine et constante évolution. De surcroît, le béton reste donc un matériau incontournable dans tout projet de construction. L'approche performantielle est l'objectif principal de toute la panoplie d'études théoriques et expérimentales. En balayant la littérature spécialisée, nous découvrons un nombre impressionnant de travaux sur le béton et ses propriétés. Il est édifiant de mentionner notamment les simulations numériques qui permettent d'étudier son comportement à différentes sollicitations mécaniques. Les méthodes utilisées s'appuient principalement sur les éléments finis.

L'autre approche est purement technologique, elle consiste à mettre en œuvre des variétés de béton qui doivent répondre à des cahiers de charges spécifiques. La réalisation de cet objectif implique l'étude du dosage des constituants de ce matériau à savoir : le ciment, les granulats, l'eau et les éventuelles additions ; ce dosage devra répondre à des critères précis. Ce volet sera abordé dans ce mémoire de thèse.

Enfin, un autre critère non moins important que nous devons considérer, il concerne l'énergie et l'environnement ; d'ailleurs ces deux derniers sont corrélés. Il est clair que pour des considérations environnementales, l'utilisation des additifs dans la production de béton et l'énergie consommée doivent répondre impérativement à des critères définis et précis. En d'autres termes, ils doivent régir à des normes.

Sur un autre registre, pour montrer l'importance de cet incontournable matériau, qu'en est-il de sa production ? En effet, il est l'un des matériaux de construction les plus utilisés au monde. Il est de haute qualité, et économique. Son utilisation dans les projets de construction

est diverse en ce sens que nous l'employons pour des infrastructures sur terre, sous terre et même dans les milieux aquatiques.

Le principal ingrédient du béton étant naturellement le ciment, de ce fait leurs productions sont liées ; voyons donc ce qui en est de la production du ciment. Les besoins en ciment, perpétuellement croissants des pays, notamment les pays émergents, font que sa production augmente régulièrement. Les statistiques nous permettent d'étayer ce constat.

A cette énorme quantité de ciment, une production de béton est toujours associée. Les statistiques disent qu'à chaque seconde dans le monde sont coulés 190 m^3 de béton, soit 6 milliards de m^3 par an ; soit $1m^3$ (plus de 2 tonnes) de béton pour chaque habitant de la planète. Ce qui en fait le matériau manufacturé le plus utilisé au monde après l'eau.

Selon un document du ministère de l'Industrie et des Mines sur la situation de la filière de production de ciment en Algérie, qui compte 17 cimenteries en service, la capacité de production de ciment est passée de 20 à 25 millions de tonnes entre de 2015 et 2017 grâce à la réception de plusieurs projets d'extension ou de nouvelles cimenteries. La production nationale de ciment, et selon la même source, devrait dépasser la barre des 25 millions de tonnes en 2017. Plus de 96% des capacités de cette production sont le fait de deux grands groupes, GICA (public) et Lafarge-Holcim (Partenariat). Ces derniers produisent respectivement 13.95 millions de tonnes et 11.1 millions de tonnes (TSA, 2018 ; GICA, 2018).

Sur le plan écologique et selon certaines études, la fabrication d'une tonne de ciment génère presque 0,85 tonne de CO_2, et cela dans une usine à ciment moderne comportant un précalcineur. La moitié de ce CO_2 vient de la calcination du $CaCO_3$ et l'autre moitié vient du combustible. Pour cette raison, l'industrie cimentière est responsable d'environ 7 à 8 % des émissions de ce gaz (CO_2) à effet de serre, sachant que 23000 millions de tonnes de CO_2 produites chaque année par les activités humaines sur la planète (Khudhair et al.,2017; Mladenka et Aïtcin, 2003 ; Rashad et al. , 2013).

L'industrie du ciment fait face alors au défi de la réduction à la fois de la consommation d'énergie et des émissions de CO_2, et ce sont deux problèmes qui se

chevauchent. En améliorant le rendement énergétique des fours, on réduit une partie du problème liée au combustible. Mais, la façon la plus simple et la plus avantageuse, d'un point de vue environnemental, est de diminuer la consommation de ciment Portland sans réduire la production du béton et d'utiliser des ajouts minéraux de différentes origines qu'ils soient naturels ou industriels en remplacement du ciment (Mladenka et Aïtcin,2003 ; Mehta, 2001).

Certains ajouts, qui sont inertes, comme le calcaire, peuvent être utilisés comme fillers et ainsi diminuer la demande en liant. Ils agissent également comme sites de précipitation du gel de C–S–H. En revanche, d'autres additifs possèdent une certaine réactivité hydraulique ou pouzzolanique à l'image du laitier et de la pouzzolane naturelle. Cette association permet d'augmenter leurs performances et les rend encore plus intéressants comme ajouts minéraux (Mladenka et Aïtcin, 2003 ; Aubert et al., 2012).

L'incorporation de ces ajouts minéraux actifs ou inertes dans les mortiers ou les bétons n'a pas seulement un impact sur l'environnement et l'économie d'énergie, mais aussi elle permet d'améliorer les caractéristiques, les performances et notamment la durabilité de ces derniers. En effet, le remplacement d'une partie du ciment par un ajout minéral finement broyé permet d'amplifier la compacité, parce qu'elle comble les vides d'empilements laissés entre les composantes granulométriques plus grossiers du mélange mortier ou béton ; c'est l'effet physique. Si l'ajout est actif, son incorporation permet d'une part, de réduire fortement la porosité initiale de la pâte de ciment; qui est un effet de remplissage. D'autre part, il a un effet actif qui est dû à leur réaction avec le $Ca(OH)_2$ libre issu de l'hydratation du ciment (Grandet, 1990).

Nous voyons clairement que l'association des additifs et leurs dosages est un domaine de recherche qui suscite un intérêt particulier en considérant les diverses contraintes applicatives du béton ou du mortier. A notre sens, la compréhension des processus physico-chimiques mis en jeu permettra incontestablement d'aborder l'approche performantielle du béton ou du mortier. Justement et dans ce contexte nous proposons notre contribution sur « l'étude de l'effet de l'incorporation des ajouts minéraux actifs et inertes sur les propriétés physiques, mécaniques et sur la durabilité des mortiers ».

Quatre (4) ajouts minéraux locaux sont choisis : le laitier d'El-Hadjar, la pouzzolane de Béni-Saf, le calcaire de Hassi Messaoud, le sable de dune d'El-Oued, finement broyés et incorporés au ciment avec des taux prédéterminés pour examiner leurs effets sur les mortiers.

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche initié par le laboratoire d'exploitation et de valorisation des ressources naturelles en zones arides (LEVRNSA) de l'Université de Kasdi Merbah à Ouargla en collaboration avec le laboratoire de Génie Civil de l'Ecole nationale polytechnique d'Alger (E.N.P.A).

Pour traiter la problématique, cette thèse s'articule sur quatre chapitres. Les deux premiers chapitres sont consacrés à la recherche bibliographique ; l'objectif est de présenter les résultats des travaux antérieurs effectués par différents chercheurs, notamment sur la composition chimique des trois ajouts et l'influence de ces derniers sur les caractéristiques physiques, mécaniques et sur la durabilité des mortiers et des bétons. Par souci d'homogénéisation structurelle de cette thèse, nous avons préféré segmenter la partie bibliographique en deux chapitres distincts. Le premier sera dédié plutôt à la définition et la composition des additifs ; tandis que le second a pour objectif d'étudier les différentes réactions de ces additifs avec en filigrane l'approche performantielle du béton ou du mortier.

Dans le troisième chapitre nous abordons la caractérisation des matériaux et les méthodes d'essais. Nous exposons des aperçus sur les méthodes et les modes opératoires des différents essais effectués sur les ajouts, le ciment, le sable et les mortiers ; les mortiers étant frais et durcis. Une description exhaustive de tous les protocoles d'expérimentations nous permettra d'accéder aux propriétés usuelles du mortier telles que la finesse, la granulométrie et la composition.

Le dernier chapitre s'appuie logiquement sur les trois premiers ; il est dédié à la présentation des résultats expérimentaux obtenus. Plusieurs variantes du mortier sont étudiées : frais et durci avec ou sans ajouts. Il s'en suit une partie où nous confronterons nos résultats avec ceux déjà publiés ; ils seront suivis par des commentaires, des interprétations et des conclusions.

Une conclusion générale achèvera cette thèse dont l'objectif est de faire le bilan de toutes les étapes de ce travail et la mise en perspective qui en découle.

CHAPITRE I

CIMENT ET AJOUTS MINERAUX : COMPOSITION, ACTIVATION ET HYDRATATION

CHAPITRE I

CIMENT ET AJOUTS MINERAUX: COMPOSITION, ACTIVATION ET HYDRATATION

I.1.INTRODUCTION

Comme nous l'avons précisé en introduction générale, il est fort instructif de rappeler la genèse des différents procédés d'incorporation des ajouts et leur identification. En effet, il y a déjà longtemps qu'a été remarquée et étudiée l'action sur les bétons de certains produits employés en faibles quantités. Vers 1880, l'incorporation du gypse ou du chlorure de calcium a permis de régulariser la prise du ciment. Vers 1888, Candlot a mis en évidence un adjuvant « $CaCl_2$ » capable d'accélérer ou de retarder la prise selon la concentration du dosage dans le béton (Duriez et Arrambide, 1961).

L'apparition du béton à haute résistance a été conjointe à l'apparition d'autres ajouts ; ces ajouts sont essentiellement minéraux. Les premiers bétons à très haute résistance, qui ont été fabriqués dans la région de Chicago, contenaient une certaine quantité de cendres volantes et de laitier. Toute une diversité de béton a été proposée selon le dosage de ces additifs ; ce qui implique des bétons de différentes qualités en termes de consistance, de finesse et de résistance. Il est évident qu'à cette époque le critère environnemental n'était pas la priorité. Des fumées de silice ont été incorporées dans d'autres bétons à très haute résistance (Duriez et Arrambide, 1961; Aitcin, 1987).

Les pouzzolanes et les calcaires finement broyés, ont été, parmi les premiers produits plastifiants utilisés dans la production du béton. Ils sont introduits pour palier le manque de finesse dans les sables et le faible dosage en ciment. Le but était naturellement d'obtenir un béton plastique, maniable et ouvrable (Dreux et Festa, 2007 ; Duriez et Arrambide, 1961).

Sur un autre registre, la substitution partielle d'une certaine quantité de ciment par un ou plusieurs ajouts minéraux lorsqu'ils sont disponibles à des prix compétitifs peut être avantageuse, non seulement du point de vue économique, mais aussi du point de vue rhéologique. De surcroît, des performances en termes de résistance et de durabilité sont susceptibles d'être réalisées (Kerbouche, 2009).

I.2.CIMENT PORTLAND

I.2.1.Définition

Le ciment est un" liant hydraulique" : le mot 'liant' veut dire une matière susceptible d'en agglomérer d'autres. Le qualificatif " hydraulique " précise, d'une part, que ce liant durcit à froid par gâchage à l'eau, sans addition d'un autre corps réactif et, d'autre part, qu'il durcit, non seulement dans l'air mais également dans l'eau (Bouhmid, 2011).

Le ciment Portland est un mélange de clinker et de sulfate de calcium (gypse) dans un rapport d'environ 95-5 %. Le clinker est fabriqué par cuisson vers 1450 °C d'un mélange finement broyé et homogénéisé de deux ingrédients ; le calcaire et l'argile (ou de marnes) sont combinés dans un rapport d'environ 80-20 %.

Dans la zone de clinkérisation du four, les quatre oxydes simples CaO, SiO_2 ,$A1_2O_3$ et Fe_2O_3 sont mis en jeu ; ils sont abrégés respectivement par les C,S,A et F dans la chimie de ciment. Ils proviennent du calcaire et de l'argile et ils se combinent pour former des silicates de calcium ainsi que des aluminates et alumino-ferrites de calcium :

- Silicate tricalcique (C_3S) : $3CaO.SiO_2$ (Alite) qui représente 50 à 70 % du clinker.
- Silicate bicalcique (C_2S) : $2CaO.SiO_2$ (Belite) (10 à 30%).
- Aluminate tricalcique (C_3A) : $3CaO.Al2O_3$ (2 à15%).
- Ferroaluminate calcique (alumino-ferrites tétracalsique) (C_4AF) :
  $4CaO .Al_2O_3 .Fe_2O_3$ (Celite) , (5 à 15%).

Le clinker, auquel on ajoute quelques pourcentages de gypse ($CaSO_4$) est ensuite finement broyé (moins de 1/10e de mm) de manière à obtenir une poudre dont la masse volumique absolue varie de 3 à 3,2 g/cm^3 ; c'est le ciment portland artificiel (CPA-CEMI).

Dans le cas où on ajoute d'autres constituants tels que le laitier de haut fourneau, la pouzzolane, les fillers calcaires, etc., on obtiendra le ciment portland composé (avec ajouts) (CPJ-CEMII, III,…) (Soroka, 2004; Dreux et Festa, 2007; Dupain et al., 2009).

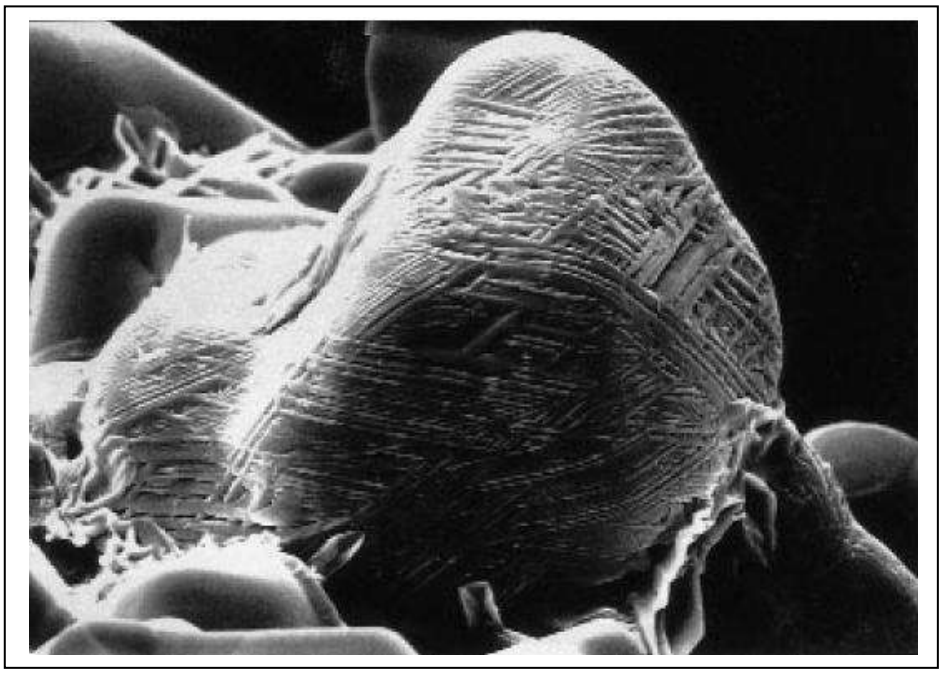


Figure I.1 : Cristaux anhydres du clinker (Baron et Sauterey, 1993).

I.2.2.Classification des ciments en fonction de leur composition

Les ciments sont classés en fonction de leur composition en cinq (5) types principaux par les normes NFP-301 et ENV 197-1, (EN 197-1 ; 2000). Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne. La proportion (en masse) des différents constituants est indiquée dans le tableau suivant :

Tableau I.1 : Différents types de ciment courants en fonction de leur composition (Dupain et al., 2009; Holcim, 2015).

Désignations	Types de ciments	Teneur en clinker	Teneur en % de l'un des constituants suivants: laitier-pouzzolanes - cendres – calcaires – schistes – fumées de silice	Teneur en constituants secondaires
CEM I	Ciment portland	95 à 100 %		0 à 5 %
CEM II/A	Ciment portland composé	80 à 94 %	De 6 à 20% d'un quelconque des constituants, sauf dans les cas où le constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10% (*);	0 à 5 %
CEM II/B		65 à 79 %	De 21 à 35% avec les mêmes restrictions que ci-dessus (*).	0 à 5 %
CEM III/A	Ciment de haut-fourneau	35 à 64 %	De 36 à 65 % de laitier de haut-fourneau	0 à 5 %
CEM III/B		20 à 34 %	De 66 à 80 % de laitier de haut-fourneau	0 à 5 %
CEM III/C		5 à 19 %	De 81 à 95 % de laitier de haut-fourneau	0 à 5 %
CEM IV/A	Ciment pouzzolanique	65 à 90 %	De 10 à35% de pouzzolanes, cendre siliceuses ou fumées de silice, ces dernières étant limitées à 10%,	0 à 5 %
CEM IV/B		45 à 64 %	De 36 à 50% comme ci-dessus	0 à 5 %
CEM V/A	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 %	De 18 à 30% de laitier de haut-fourneau et 18 à 30 % de cendres siliceuses ou de pouzzolanes,	0 à 5 %
CEM V/B		20 à 39 %	De 31 à 50% de chacun des deux constituants comme ci-dessus	0 à 5 %
(*)Le pourcentage des fillers est limité à 5%				

I.2.3.Production mondiale et nationale du ciment

Au total, la production mondiale de ciment augmente régulièrement, grâce à la croissance de la production dans les Pays émergents : 1,370 milliard de tonnes en 1994, 2,55 milliards en 2006, 3,4 milliards de tonnes en 2011, 4 milliards de tonnes en 2013, et 4,6

milliards de tonnes en 2015. En moyenne, sur le plan mondial la production s'élève à presque 750 kilos de ciment par habitant et par an, en 2015.

La Chine reste toujours le premier fabricant et consommateur de ciment. Les marchés émergents consomment aujourd'hui 57 % de la production de ciment, suivie par l'Inde; les USA et la Turquie. (selon les dernières statistiques de l'organisme américain USGS (United States Geological Survey), Global Cement Report et de Cembureau, l'Association européenne du ciment.) (Statista, 2017; Cembureau ,2017).

Vu le coût de transport élevée du ciment; la production cimentière reste toujours locale, et **95** % en moyenne du ciment consommé dans le monde sont utilisés dans les pays de production.

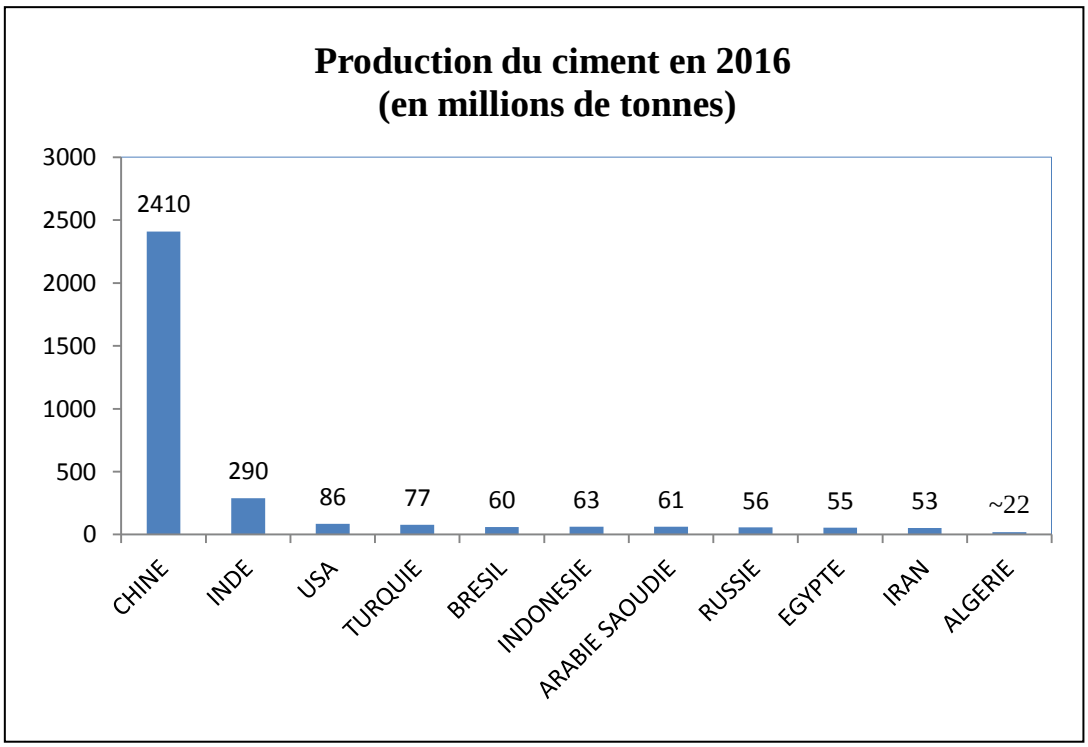


Figure I.2: Production du ciment des dix principaux pays producteurs du monde en 2016 en comparant avec l'Algérie (TSA, 2018 ; Statista, 2017).

En Algérie, les cimenteries publiques et privées ont produit quelque 25 millions de tonnes de ciment en 2017, selon des statistiques économiques récentes publiées par le ministère de l'Industrie et des Mines. Cette production, est passée de 20 à 25 millions de tonnes entre de 2015 et 2017 grâce à la réception de plusieurs projets d'extension ou de nouvelles cimenteries (TSA, 2018 ; GICA, 2018).

Selon les prévisions, en 2020, la capacité de production du pays doit augmenter à 40,6 millions de tonnes avec 20 millions de tonnes pour GICA, et 11,1 millions de tonnes pour LafargeHolcim Algérie, ainsi que 9,5 millions de tonnes pour les opérateurs privés. Et il va y avoir un excèdent de 10 millions de tonnes/an de ciment à l'horizon 2020. Et on envisage, dans une première phase, d'exporter 50.000 tonnes de ciment algérien dès le premier trimestre 2018 vers les pays de l'Afrique de l'Ouest, et 45000 tonnes vers l'Europe (APS, 2018).

I.3.AJOUTS MINERAUX

Selon les normes (ASTM C125, ASTM C219), les ajouts minéraux sont, par définition, « des matériau autres que l'eau, agrégats, ciment et acier de renfort, utilisés comme ingrédient de béton ou de mortier, et ajoutés, immédiatement avant ou pendant le malaxage». En outre, ce terme inclue des matériaux qui sont additionnés au ciment Portland, en quantités limitées et excédant 5 % de son poids, au cours de son fabrication ou de son utilisation pour modifier les propriétés d'usage du produit fini (mortier ou béton), telles que la maniabilité à l'état frais ou la résistance mécanique et la durabilité, à l'état durci (Soroka, 2004).

I.3.1. Aperçu sur l'utilisation des ajouts minéraux

L'utilisation des laitiers, des cendres (pouzzolaniques) des centrales thermiques et des fillers calcaires dans l'industrie de ciment, devient un moyen plus efficace pour atteindre les objectifs suivants :

1- Abaissement de la consommation en énergie lors de la fabrication.
2- Amélioration des caractéristiques chimiques, physiques, et mécaniques du ciment.
3- Utilisation des coproduits industriels tels que le laitier, les cendres, les fillers de calcaire dans les carrières qui permettent de contourner un problème écologique majeur.

La valorisation de ces coproduits dans l'industrie cimentière contribue donc à l'équilibre écologique, et depuis des dizaines d'années, une tendance permanente a été observée à l'accroissement de la mise en œuvre de ces matériaux dans l'industrie du ciment à nos jours ; cette tendance est devenue une réalité, en effet, actuellement la majorité des ciments produits dans le monde entier sont des ciments composés (avec ajouts), de type CPJ-CEM II. (Roskovicet et Bjegovic, 2005 ; Mladenka et Aïtcin, 2003; Kriker, 1992; Boldyrev et Entine, 1980 ; Komar, 1978).

Avec l'apparition des bétons de haute résistance et de haute performance, les éléments tels que les laitiers, la pouzzolane, les cendres volantes ou autres, sont utilisés comme des ajouts actifs pour améliorer les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques du béton frais et durci (Soroka, 2004 ; Chapon, 1990).

Les fillers calcaires ont également leur importance dans l'industrie du ciment et de la fabrication des bétons de qualité. En effet, ces particules ultra fines qui sont plus fines que les grains de ciment peuvent être utilisées pour obstruer les pores capillaires. Toutefois, ces « fillers » inertes à court terme deviennent actifs avec l'avancement d'âge. (Ghrici et al.,2007 ; Bessa, 2003 ; Nouari et Touguy, 1997 ; Kessal et Edward-Ladjnef, 1996).

Le tableau suivant nous décline les différents ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes :

Tableau I.2: Utilisation des ajouts dans les cimenteries algériennes

Groupe industriel	Cimenterie	Ciment fabriqué (*)	Ajouts Utilisés
Secteur public : Groupe Industriel des Ciments d'Algérie : (GICA)	Ain Touta –Batna- (SCIMAT)	CEM II /A-P CEM II /AM (L-P) CEM II /A-L	Pouzzolane et (ou) calcaire
	Ain El Kebira –Sétif-	CEM II /A-L	
	Hamma Bouziane –Constantine -	CEM II /A	
	H'djar Essaoud –Skikda- (SCHS)	CEM II /A-S	Laitier
	Tebessa (SCT)	CEM II /AM (P-L) CEM II /BM (P-L)	Pouzzolane et calcaire
	Meftah (Alger)	CEM II	Tuf / Calcaire
	Sour EL Ghozlane (Bouira)	CEM II	Calcaire/Tuf
	Chlef	CEM II /A-L	Calcaire
	Beni Saf (Ain Temouchent)	CEMII	Pouzzolane
	Zahana -Mascara- (SCIZ)	CEM II /A	
Lafarge Holcim-Algérie	M'sila-	CEM II /B-L	Calcaire
	Djemmoura (Biskra)	CEM II /B-L	Calcaire
	Oggaz (Mascara)	CEM II /B-L	Calcaire
Secteur privé	BISKRIA (Biskra)	CEM II /A CEMII /B CEM IV /A-SR	Calcaire / pouzzolane
(*) :Pour la désignation des ciments (II, IV,A et B) voir tableau I.1. L :calcaire / P :pouzzolane/ S :laitier /M :ciment contient plus qu'un ajout			

I.3.2. Le laitier de haut fourneau

I.3.2.1. Définition

Le laitier de haut fourneau est un coproduit de la production de la fonte dans les hauts fourneaux obtenu à partir du minerai et du coke métallurgique. Il sort du trou de coulée à une température de l'ordre de 1500 °C, figé par refroidissement brusque. Il donne un produit granulé (Dreux et Festa, 2007 ; Soroka , 2004 ; Duriez et Arrambide, 1961).

I.3.2.2 . Historique sur la valorisation du laitier

Dès le XVIIIème siècle, Belidor et S.Vab recommandaient le laitier broyé comme masse d'addition au mortier de chaux. Au XIXème siècle, Vicat avait entrevu les propriétés hydrauliques de ce produit. Enfin, en 1862, Hangen a pu confirmer par des essais ces propriétés (Dussart,1978).

Au début du XXème siècle, une première utilisation du ciment au laitier a été entreprise en Allemagne, puis en France. Puis, suite à la première guerre mondiale et à un usage massif en travaux maritimes, le ciment au laitier a été utilisé en grande quantité. Son utilisation dans le domaine cimentaire est régie par la norme NF P 18-506 (Amouri, 2009; Dussart,1978).

L'utilisation du laitier granulé dans le béton a été mise en œuvre à la fin de l'année 1950 dans plusieurs pays tels que l'Australie, le Japon, le Canada, etc. tandis que son emploi dans les constructions routières n'a commencé qu'en 1960 en France (Kriker, 1992).
Une importante production de laitier a été donc enregistrée annuellement et son stockage sous forme de collines artificielles a posé de sérieux problèmes écologiques. D'où l'importance de valoriser ce sous produit, notamment dans le domaine du génie civil.

Actuellement l'utilisation des ciments au laitier est estimée à 20% de la production totale en Europe. Par contre, en Algérie, cette utilisation reste toujours timide et ce, malgré une production conséquente (Bougara et al., 2009; Hoghn et Meusel,1981).

I.3.3. Les pouzzolanes

I.3.3.1. Définition

Les pouzzolanes peuvent être définies comme des matériaux ayant une aptitude à réagir avec la chaux en présence d'eau et à former des composés possédant des propriétés liantes (Jayant, 2013; Soroka, 2004).

Il est d'usage de les classer selon leurs origines en deux catégories :

- ***A- Les pouzzolanes naturelles*** : ce sont des produits d'origine volcanique ou sédimentaire essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxyde de fer. Ils ont naturellement des propriétés pouzzolaniques. La cendre volcanique, tuf, diatomite, gaize, etc. en font partie.

B- Les pouzzolanes artificielles : ce sont des matières essentiellement composées de silice, d'alumine et d'oxyde de fer. Elles ont subi un traitement thermique pour assurer des propriétés pouzzolaniques. Nous pouvons citer les cendres volantes et la fumée de silice (Jayant, 2013; Dron et Voinovitch, 1993).

I.3.3.2. Historique sur l'utilisation des pouzzolanes

Les cendres de ***pouzzoles,*** sur les flancs du Vésuve (Italie), ont été les premiers ajouts à être utilisés par les Romains. Vitruve, architecte romain, décrivit la pouzzolane comme étant une matière sableuse fine; mélangée avec de la chaux et des pierres, elle durcit aussi bien sous l'eau que dans les constructions aériennes.

En 1756 l'Anglais Smeaton a remarqué l'effet d'un mélange composé de chaux d'un peu de plâtre et de pouzzolane. Le résultat de cette association fut un produit qui, une fois gâché et mis en boule, durcissait malgré son immersion dans l'eau.

Au début de XIXème siècle, d'autres expériences apparurent avec les liants hydrauliques modernes, notamment le ciment portland artificiel, d'où la naissance des ciments pouzzolaniques.

Par la suite, les additifs sont devenus les cendres volantes des centrales thermiques et ce au début du XXème siècle.

Plus récemment, la technologie française a permis de mettre au point produit un ciment pouzzolanique combiné avec le laitier de haut fourneau : les ciments pouzzolano-métallurgiques. Ils se distinguent par leurs caractéristiques constructives excellentes telles que le durcissement rapide, la haute résistance mécanique, ainsi que le faible coût économique (Duriez et Arrambide, 1961).

Dans notre pays, des moyens importants ont été mis en œuvre quant à l'utilisation de la pouzzolane en industrie cimentière ; elle a ainsi connu une progression remarquable. Aujourd'hui plusieurs cimenteries utilisent cet ajout.

I.3.4. Les fillers calcaires

I.3.4.1. Définition et utilisation

Les fillers sont des grains qui ne dépassent pas 0.08 mm, le mot « fillers » provient de l'Anglais « to fil », signifiant remplir. Leur utilisation dans l'industrie cimentaire est régie par la norme NF P 18-508 (Amouri, 2009 ; Melais, 2016).

G.Dreux a défini les fillers comme étant des produits obtenus par broyage fin ou par pulvérisation de certaines roches en l'occurrence le calcaire, le basalte, les laitiers. Ces additions sont naturelles ou synthétiques ; elles agissent principalement, grâce à une granularité appropriée, par leurs propriétés physiques sur certaines qualités du ciment. Parmi ces qualités, on note :

- Accroissement de maniabilité,
- Diminution de perméabilité et de capillarité,
- Réduction de la fissurabilité.

La liste est loin d'être exhaustive.

D'autre part, il est à noter que les fillers sont inertes s'ils n'ont aucune action chimique sur les ciments en présence d'eau (Dreux et Festa, 2007).

Les fillers calcaires sont des ajouts cimentaires non hydrauliques (inertes) mais qui peuvent se révéler d'une grande efficacité dans l'utilisation pour les bétons de masse. Par effet filler, ils peuvent en effet améliorer la compacité du squelette granulaire dans les bétons. Aussi, par leur relative inertie chimique, ils peuvent contribuer à diminuer sensiblement la température dans les bétons de masse.

Les normes s'accordent pour définir comme " fines " les éléments passant à un tamis de mailles à 80µm. Dans la terminologie spécialisée, on adopte aussi le terme " filler " pour désigner les éléments bruts de concassage inférieurs à 80µm. Il s'agit donc de produits fins obtenus par fragmentation pouvant d'ailleurs contenir des éléments de pollution. (Benna,1995 ; NF P18-501, 1992 ; Bertrandy, 1977).

Notons que la norme AFNOR (NF P 15-301) permet de substituer jusqu'à 35 % de fillers calcaires au ciment portland (NF P15-301, 1994).

Aitcin et Pinsonneault (1983) estiment qu'en plus de son rôle principal, qui est de densifier la matrice de mortier, le filler calcaire aurait une certaine réactivité chimique. Cette réaction chimique contribue à augmenter les résistances en compression par la formation de carboaluminates.

Ramachandran et Chun-Mei (1986) ont observé que l'ajout de ($CaCO_3$) au (C_3S) accélère l'hydratation du ciment. Jiang et al (1993) estiment aussi que les fillers fins comme le calcaire, accélèrent les premières réactions d'hydratation. Ces dernières études confirment

l'effet non négligeable des fillers calcaires sur l'hydratation du ciment à un jeune âge (Benna,1995 ; Kessal et Edward-Ladjnef, 1996 ; Bertrandy, 1977).

I.3.5. Sable de dunes

I.3.5.1. Définition

Le sable de dunes est un sable fin d'origine éolienne, c'est un matériau naturel très abondant dans le sud algérien. Il est de nature siliceuse, constitué de petites particules provenant de la désagrégation lente d'autres roches sous l'action des agents d'érosion. Ce sable est caractérisé par sa granulométrie très fine (sable très fin, naturellement inférieur à 0.5 mm, de granulométrie (0 /0 .63 mm)), de sa morphologie, de sa propreté et de sa dureté (Tafraoui , 2009 ; Benchaa et al., 2012 ; Bouaziz et al., 2013).

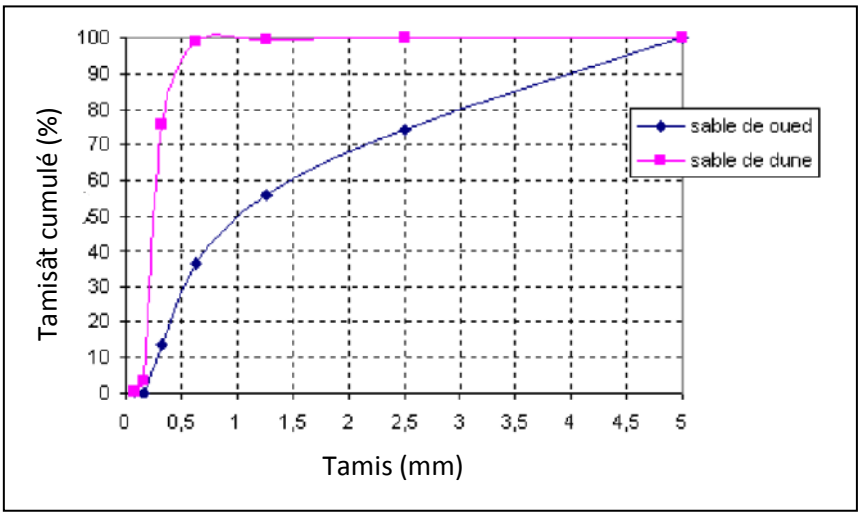


Figure I.3: Courbes granulométriques d'un sable de dunes (Mf = 1,22) et un sable alluvionnaire (Mf = 2.8) (Bouaziz et al., 2013).

Dans une étude récente réalisée par Guettala. S, (2012), on a trouvé que la substitution du ciment par le sable de dunes broyé fait augmenter les résistances en compression, ce qui traduit l'amélioration de la compacité par trois effets qui agissent simultanément et de manière complémentaire:

- effet physique,
- physico-chimique
- et chimique (Guettala, 2012).

I.3.5.2. Localisation géographique du sable de dunes en Algérie

Le sable de dunes se trouve en grande quantité dans le sud de l'Algérie, vu que cette région fait partie géographiquement du grand Sahara de l'Afrique.

Ces localisations énormes de sables de dune s'appellent « Erg ». On distingue trois ergs en Algérie : Le Grand Erg Oriental, Le Grand Erg Occidental et Erg Chech ; ces trois Ergs sont tous de forme dunaire, (Figure I.4).

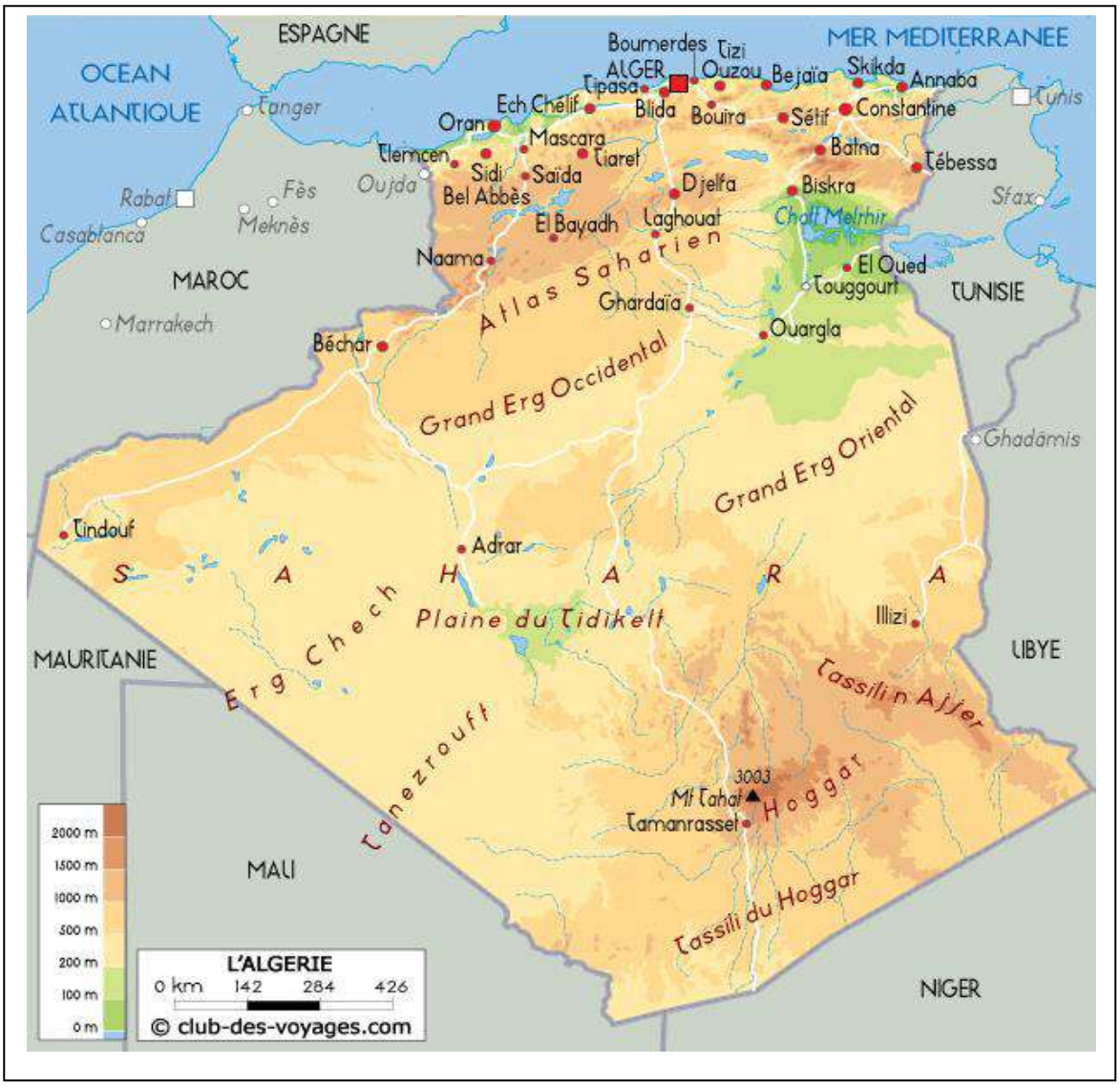


Figure I.4: Situation géographique des Ergs (sables de dunes) de l'Algérie (Tafraoui , 2009).

La dune est une colline ou un relief de sable empilé vers le haut par le vent. Elle existe sous trois formes:

- **La barkhane** est une dune en forme de croissant (les collines en demi-lune), à convexité au vent. Elle naît là où l'apport de sable est faible et sous des vents unidirectionnels.

- **La dune parabolique** est une dune dissymétrique en forme de fer à cheval à concavité au vent souvent plus ou moins fixée par la végétation. Sa disposition par rapport à la direction du vent est donc inverse de celle de la barkhane. La dune parabolique est peu mobile et généralement ne migre guère une fois qu'elle est formée.

- **Le sif (au pluriel « siouf »),** est une dune en forme de sabre, qui a l'aspect des ondulations longitudinales qui s'amincissant vers une extrémité qui sépare la partie en pente douce (pente « au vent ») de la partie en pente raide (pente « sous le vent »). Il s'agit de longs cordons dunaires (Tafraoui, 2009).

Notons que la plus haute dune de l'Afrique c'est « la mer de sable de Isaouane-n-Tifernine », qui se trouve en Algérie, à la wilaya d'Illizi ; avec 500m de hauteur et 3000m de longueur.

I.4. COMPOSITION CHIMIQUES DES AJOUTS MINERAUX

Les laitiers et les pouzzolanes ont une particularité commune. Ils renferment, à des teneurs différentes, les trois constituants fondamentaux du clinker à savoir :

- La chaux **(CaO)**,
- Le silice **(SiO_2),**
- L'alumine **(Al_2O_3)** (Komar, 1978 ; Soroka,2004 ; Jayant, 2013).

Le calcaire se compose principalement de carbonates de calcium ($CaCO_3$), dans des proportions suivantes de 56.03 % de (CaO) et de 43.97 % de (CO_2).

Le carbonate de calcium engendre les minéraux de calcite, d'aragonite et de vatérite. La calcite est la forme cristalline la plus stable et la plus courante de ($CaCO_3$) par rapport aux deux autres qui sont moins abondantes (Duriez et Arrambide, 1961; Komar, 1978).

Le sable de dune a une nature siliceuse d'où le constituant majeur est le SiO_2.

I.4.1. Composition chimique du laitier

Selon les proportions des trois composants principaux (SiO_2, CaO, Al_2O_3), est d'usage de distinguer deux classes de laitiers :

A. Le laitier acide

C'est un laitier qui contient en majeure partie du silice (SiO_2) fondue ; il y a très peu d'alumine (Al_2O_3) et il n'y a souvent que de 25 à 30 % de chaux (CaO).

Le rapport pondéral $\frac{CaO}{SiO_2}$ ne dépasse pas la valeur 1.10 (Vénuat, 1989 ; Dron et Voinovitch, 1993).

B. Le laitier basique

Lorsque le rapport $\frac{CaO}{SiO_2}$ est supérieur à 1.30, les laitiers sont dits basiques. A l'inverse des laitiers acides, ces laitiers sont très hydrauliques pour certaines teneurs en chaux, alumine et silice.

Pour la cimenterie, il convient que les laitiers ne soient pas trop basiques, et dans ce but on n'utilise pas les laitiers où le rapport $\frac{CaO}{SiO_2}$ est supérieur à 1.50 (Dron et Voinovitch, 1993).

.I.4.1.1. Qualité d'un laitier

Dans les normes anglaises BS 6699, 1986, on définit le module chimique d'un laitier en utilisant le rapport suivant:

$$\text{MCL}=\frac{(CaO)+(MgO)+(Al_2O_3)}{(SiO_2)} \qquad \text{(I.1)}$$

Où les valeurs sont exprimées en pourcentages.

Ce module ne doit pas être inférieur à 1, pour que le laitier soit utilisable en cimenterie. Ainsi que le rapport $\frac{CaO}{SiO_2}$ ne doit pas dépasser la valeur 1.4, (Soroka, 2004).

KEIL a défini un autre rapport (F), qui est très utilisé dans l'industrie cimentaire :

$$F = \frac{(CaO) + (CaS) + \frac{1}{2}(MgO) + (Al_2O_3)}{(SiO_3) + (MnO)} \qquad (I.2)$$

Selon *KEIL*, le laitier est bon si : 1.5 < F < 1.9 ; et il est très bon si F >1.9 (Behim, 1987 ; Smolczyk, 1980)

I.4.2. Composition chimique des pouzzolanes

Les pouzzolanes comportent les mêmes éléments de base que le laitier et le clinker, mais en proportions nettement différentes. Elles contiennent moins de 10 % de chaux (CaO), de 45 à 70% de silice (SiO_2), 12 à 15 % d'alumine (Al_2O_3), et jusqu'à 10 % de magnésie et d'oxyde de fer ; elles comportent également des oxydes alcalins.

La présence de verre est un facteur favorable sur le plan de la réactivité des pouzzolanes. Les pouzzolanes les plus vitreuses ou bien les plus acides sont celles qui contiennent beaucoup de silice et peu de chaux (Jayant, 2013 ; Soroka , 2004 ; Dron et Voinovitch, 1993).

I.4.3. Composition chimique des fillers calcaires

Le calcaire se compose principalement de carbonates de calcium ($CaCO_3$), dans des proportions suivantes de 56.03 % de (CaO) et de 43.97 % de (CO_2). Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine.

I.4.4. Composition chimique du sable de dunes

Le sable de dunes a une structure cristallisée de nature siliceuse (un taux de quartz très élevé et dominant : plus de trois quarts (¾) de SiO_2). Le tableau suivant donne la teneur en silice (SiO_2) de quelques sables de dunes de différentes provenances :

Tableau I.3: Teneur en silice (SiO_2) du sable de dunes des différentes régions.

Provenances du sable de dunes	Teneur en silice (SiO_2)
EL-Oued	Plus de 75%
Ouargla	Plus de 80%
Biskra	Plus de 74%
Taghit (Béchar)	Plus de 90%
Gabes (Tunisie)	Plus de 96%

Des récentes études ont montré que certaines variétés de sable de dunes qui sont riches en silice, étaient capables de développer une réaction pouzzolanique, en présence de chaux. Le résultat de cette réaction se traduit par la formation de silicates de calcium hydratés ; qui sont similaires à ceux produits par le ciment Portland et le laitier ou la pouzzolane (Guettala, 2012 ; Bouhmid, 2011; Bouchouika et al., 2009; Mechti et al., 2013).

I.5. HYDRATATION ET ACTIVATION DU CIMENT ET DES AJOUTS MINERAUX

« Hydratation » est un mot utilisé pour décrire de la manière la plus générale, l'ensemble des réactions qui interviennent dès qu'on mélange le ciment (ou ciment avec ajout) avec de l'eau (Ollivier et Vichot, 2008).

Le laitier granulé de haut fourneau et la pouzzolane, constituent des ajouts hydrauliquement actifs, grâce à l'hydroxyde de calcium ($Ca(OH)_2$) produit par l'hydratation du clinker. Ils réagissent avec l'eau pour donner des composés hydratés semblables à ceux du clinker et donc doués de propriétés liantes (Jayant, 2013 ; Dreux et Festa, 2007; Soroka , 2004).

I.5.1. Hydraulicité

Avant de passer aux équilibres chimiques d'hydratation, nous rappelons que les laitiers et les pouzzolanes ont une unité chimique, car ils possèdent tous les deux une particularité commune : ils contiennent, à des teneurs différentes, les trois constituants fondamentaux du clinker, à savoir la chaux, la silice et l'alumine. Il en résulte qu'on peut caractériser leur composition par les trois oxydes à savoir : $CaO - SiO_2 - Al_2O_3$. Ils sont illustrés par la représentation triangulaire du système ternaire, comme le montre la figure I.5. (Dron et Voinovitch, 1993).

- Chaque sommet représente un constituant pur
- Les combinaisons binaires sont représentées sur les côtés (exemple C_3A , AS_2)
- Les combinaisons ternaires sont représentées par des points intérieurs (exemple C_2AS)

Cela nous permet de délimiter ainsi la zone des clinkers comme suit :

- La zone des laitiers basiques
- La zone des laitiers acides
- La zone des pouzzolanes

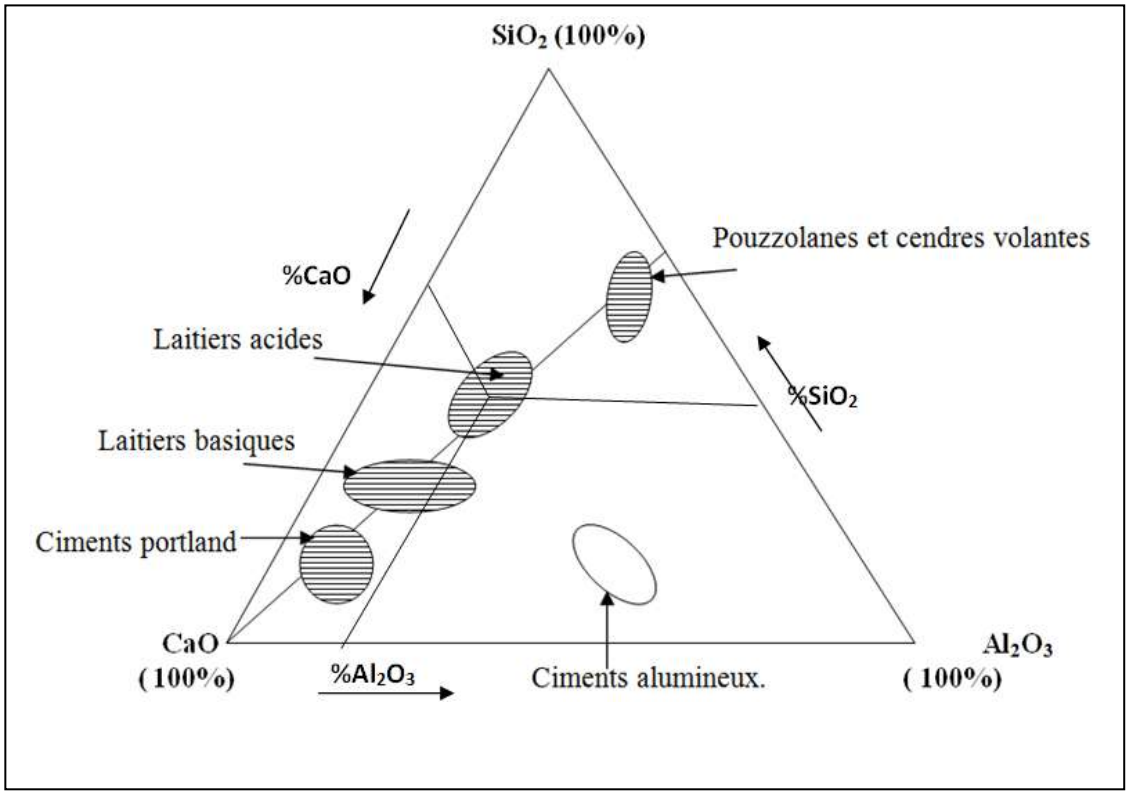


Figure I.5: Diagramme ternaire (de RANKIN) C-S-A (Dron et Voinovitch, 1993 ; Vénuat, 1989 ; Holcim, 2015).

I.5.2. Processus d'hydratation

Selon la théorie de Le-Chatelier, l'hydratation des liants hydrauliques se fait par l'intermédiaire d'un processus de dissolution des éléments du produit anhydre dans l'eau interstitielle, suivi d'une cristallisation (ou d'une précipitation) des hydrates par combinaison des ions présents dans la solution ainsi formée. Il se produit alors une cristallisation qui aboutit à un nouveau système de constituants hydratés stables. Ces constituants ainsi produits, et selon des études effectuées par Voinovitch (1970), Schviete (1969), Dron et al. (1973), ne

dépendent que de la nature et de la concentration des ions présents dans la solution et non de leur origine. Ce qui nous permet d'apprécier les processus d'hydratation du laitier, de la pouzzolane et même du clinker, par l'étude des équilibres chimiques qui régissent le système quaternaire (Dreux et Festa, 2007 ; Dron et Voinovitch, 1993):

Chaux (CaO) – Silice (SiO_2) – Alumine (Al_2O_3) –Eau (H_2O).

I.5.3. Hydratation des différents composants du ciment Portland

Le ciment est un liant hydraulique : il se combine à l'eau en donnant des hydrates stables qui lui confèrent une résistance mécanique. La réaction chimique d'hydratation du ciment conduit donc à la formation d'une pâte qui, après prise, durcit progressivement à l'air ou dans l'eau.

Le constituant le plus important en teneur est le silicate tricalcique (C_3S), considéré comme l'élément responsable de l'hydratation et du développement de la résistance (Soroka , 2004 ; Ollivier et Vichot, 2008 ; Baron et Sauterey, 1993).

Dans l'hydratation et le durcissement du ciment Portland artificiel (clinker), les deux silicates (C_3S) et (C_2S) donnent les mêmes hydrates C-S-H (le silicate de calcium hydraté). Seulement les (C_3S) s'hydratent les premiers en donnant C-S-H et un excès de chaux sous forme de $Ca(OH)_2$. L'hydratation du clinker peut nous donner aussi, des aluminates tétracalciques hydratés (C_4AH_{13}).

I.5.3.1. Hydratation du silicate tricalcique C_3S

L'hydratation des silicates produit des gels de silicate de calcium hydraté et l'hydroxyde de calcium. La réaction du C_3S avec de l'eau est la suivante:

$$2C_3S + 6H \rightarrow CSH + 3\ CH \qquad (I.3)$$

où CSH représente le $3CaO.2SiO_2.\ 3H_2O$ (Silicate de calcium hydraté), (H) c'est l'eau, et (CH) représente le $Ca(OH)_2$ (Portlandite) .

Les hydrates ainsi obtenus au cours de l'hydratation du C_3S sont :

- Les silicates de calcium hydratés (CSH) qui 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. La surface spécifique est très élevée (100 - 700 m²/g). La cohésion des feuillets de CSH est due aux forces de Van Der Waals entre leurs parties colloïdales ;

- L'autre composant principal dans l'hydratation des silicates tricalciques est l'hydroxyde de calcium CH (ou Portlandite) qui occupe entre 20 à 25% du volume des solides de la pâte de ciment complètement hydratée (Figure 1.6).

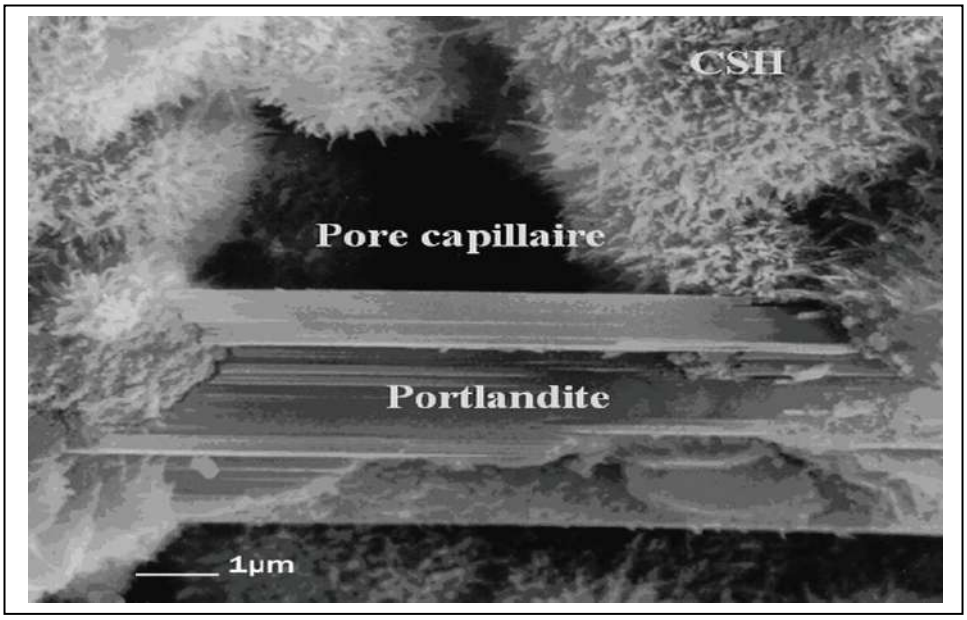


Figure I.6 : Image en MEB de C-S-H fibreux, avec Cristal de Portlandite et pore capillaire (Ollivier et Vichot, 2008).

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 (Kerbouche, 2009).

I.5.3.2. Hydratation du silicate bicalcique C_2S

Une fois hydratés, les silicates bicalciques **(**C_2S) donnent aussi des CSH. La réaction est donnée par :

$$2C_2S + 4H \rightarrow CSH + CH \qquad (I.4)$$

Les études calorimétriques ont montré des résultats semblables à ceux de l'hydratation du C_3S mais avec moins d'évolution de la chaleur. Selon des calculs de stœchiométrie, l'hydratation de C_3S produirait 61% de gel de CSH et 39% de CH alors que l'hydratation de C_2S produirait 82% de gel de CSH et seulement 18% de CH, donc une quantité plus élevée de C_2S dans le ciment aurait comme conséquence plus de résistance. Pour la résistance au jeune âge, cependant, plus de C_3S est nécessaire, parce que sa vitesse de réaction est plus élevée (Figure I.7).

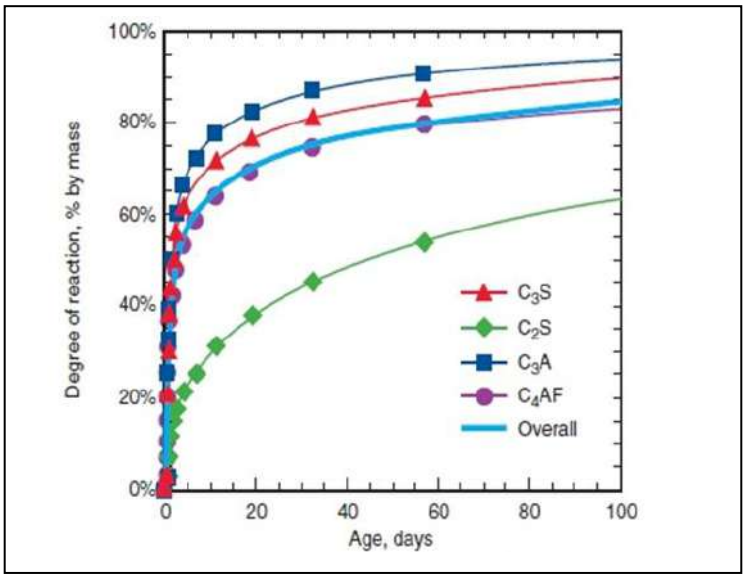


Figure I.7: Réactivité relative des différents composants du ciment. La courbe « overal » représente une composition moyenne du ciment (55%C_3S, 18%C_2S, 10%C_3A, 8%C_4AF) (Tenis et Jennings, 2000).

I.5.3.3. Hydratation de l'aluminate tricalcique C_3A

L'hydratation des aluminates est considérablement influencée par la présence du gypse ($CaSO_4$,$2H_2O$). En l'absence du gypse, la réaction de C_3A avec de l'eau est très violente et mène au raidissement immédiat de la pâte, connu sous le nom de prise rapide. En présence du gypse, les C_3A réagissent d'abord pour former le trisulfoaluminate hydraté (Ettringite) qui se cristallise en aiguilles à base Hexagonale (Figure I.8). La réaction est donnée par l'équation suivante :

$$C_3A + 3(CaSO_4\ 2H_2O) + 32H \longrightarrow C_3A.\ 3(CaSO_4.\ 2H_2O)\ H_{32} \qquad (I.5)$$

Le gypse ajouté au clinker (3 à 5% en poids) n'est pas en teneur suffisante pour transformer tous les aluminates en ettringite. Il apparaît donc secondairement un monosulfoaluminate ; il se cristallise en plaquettes hexagonales.

Dans cette situation, la réaction est régie par **:**

$$C_3A\ .3(CaSO_4\ 2H_2O)\ H_{32} + 2C_3A + 4H \longrightarrow 3\ C_3A\ (CaSO_4\ 2H_2O)\ H_{12} \qquad (1.6)$$

Les aluminates hydratés ainsi obtenus occupent 15 à 20% du volume de la pâte de ciment complètement hydratée (Soroka , 2004 ; Ollivier et Vichot, 2008; Baron et Sauterey , 1993).

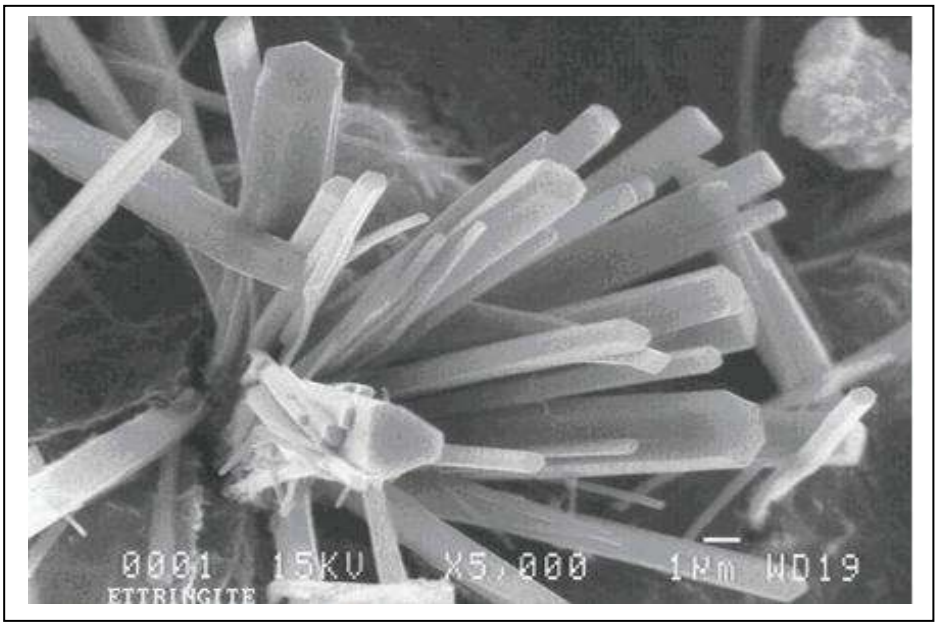


Figure I.8 : Image en microscopie électronique à balayage de cristaux d'éttringite (Ollivier et Vichot , 2008).

I.5.3.4. Hydratation de l'aluminoferrite tétracalcique C_4AF

Le C_4AF réagit avec le gypse avec un mode semblable que celui de C_3A, mais dans ce cas, la réaction est beaucoup plus lente (Figure I.9). Dans la première étape de la réaction, le C_4AF produit une forme élevée de sulfoaluminate de calcium qui réagit avec l'excès de C_4AF pour donner une basse forme de sulfoaluminate. Ces sulfoaluminates occupent environ 15-20% du volume des solides dans la pâte. La réaction du C_4AF dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance (Kerbouche, 2009).

L'hydratation des aluminates est de grande importance pratique parce qu'ils affectent les propriétés de prise du ciment.

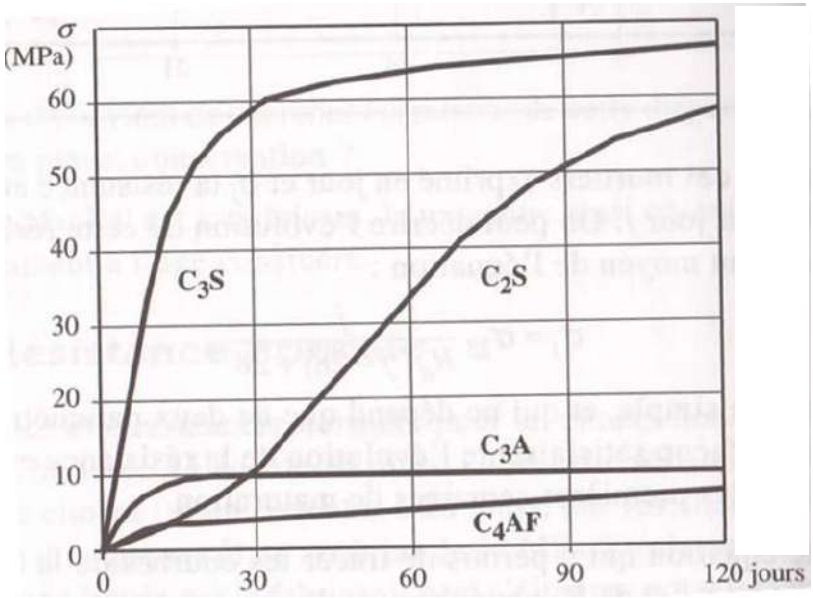


Figure I.9: Evolution comparée des vitesses de durcissement des différentes phases de clinker (Dupain et al., 2009).

Les équations simplifiées qui régissent toute cette hydratation peuvent être exprimées comme suit (Kriker, 1992; Soroka , 2004 ; Vernet et Demoulian ,1980) :

Clinker +Eau (absence de gypse) $\longrightarrow$ { C-S -H : Silicate de calcium hydraté. ; C_4AH_{11-13} :Aluminate tétracalcique hydraté. ; $Ca(OH)_2$: Hydroxyde de calcium } (I.7)

Clinker + Gypse +Eau (cas du ciment portland) $\longrightarrow$ { C-S -H : Silicate de calcium hydraté. ; $Ca(OH)_2$:Hydroxyde de calcium. ; $C_3A.\ 3CaSO_4.32H_2O$:Ettringite. } (I.8)

Tableau I.4 : Propriétés des quatre principaux constituants du ciment portland (Soroka , 2004).

constituant	Alite	Bélite	Phase aluminate	Célite
Composition chimique	(C_3S) $3CaO.SiO_2$	(C_2S) $2CaO.SiO_2$	(C_3A) $3CaO.Al_2O_3$	(C_4AF) $4CaO .Al_2O_3 .Fe_2O_3$
Prise	Rapide (heures)	Lente (jours)	Instantanée	Très rapide (minutes)
Développement de résistance	Rapide(jours)	Lent (semaines)	Très rapide (un jour)	Très rapide (un jour)
Résistance ultime	Grande (élevée) : Dizaine de MPa	Probablement Grande (élevée) : Dizaine de MPa	Faible : quelques MPa	Faible :quelques MPa
Chaleur d'hydratation	Moyenne : ~500j/g	Faible : ~250j/g	Très élevée : ~850j/g	Moyenne :~420j/g
Remarques	Le constituant caractérisant du ciment portland	/	Instable dans l'eau ; vulnérable à l'attaque des sulfates.	caractérisant la couleur grise du ciment

I.5.4. Microstructure de la pâte du ciment

Notons que la pâte de ciment est un mélange de ciment et d'eau initialement fluide : elle se structure au cours de l'hydratation pour former une pierre artificielle. La pâte de ciment durcie est un corps poreux qui contient deux catégories de pores :

- ***Les capillaires***

Ces capillaires sont les « vestiges » des espaces inter-granulaires de la pâte de ciment fraîche. Leur dimension augmente avec le rapport (Eau/Ciment : E/C) comme le montre le tableau suivant :

Tableau I.5 : Variation de la dimension des capillaires en fonction de (E/C)

Rapport Eau/Ciment (E/C)	0.35	0.60	0.80
Dimension typique des capillaires en (microns)	0.05	0.2	0.4

- ***Les micropores***

Ils constituent la porosité interne des hydrates. La microporosité qui est peu affectée par le rapport (E/C), provient surtout de l'hydrate principal des ciments, le C-S-H, dont la particule élémentaire est lamellaire.

La prise et l'hydratation des ciments s'accompagnent d'un remplissage progressif de capillaires par les amas d'hydrates (Figures I.10 et I.12). La porosité capillaire diminue et la microporosité augmente. Les résistances mécaniques des ciments dépendent principalement de la porosité capillaire (Ollivier et Vichot, 2008; Soroka , 2004 ; Folliot et Buil, 1993).

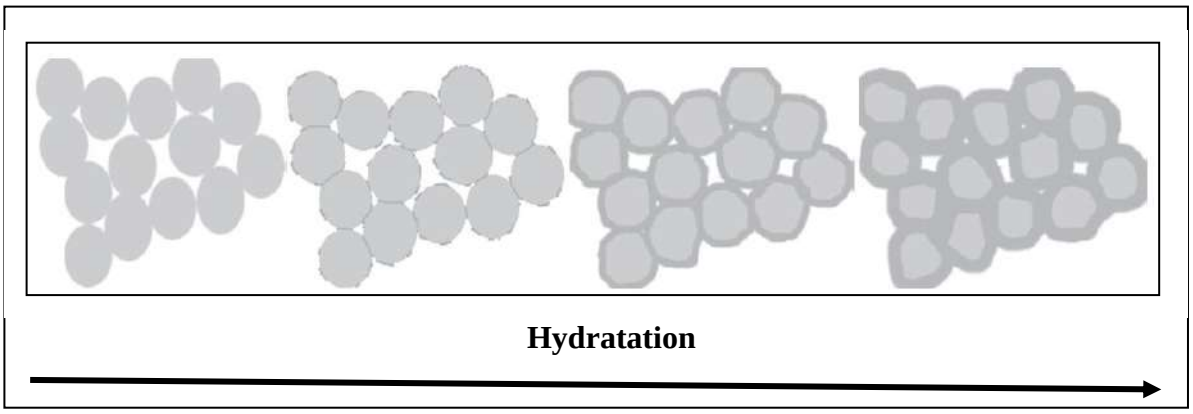


Figure I.10: Représentation bidimensionnelle de l'empilement des grains de ciment dans la pâte (Ollivier et Vichot, 2008).

L'hydratation entraîne une diminution du volume absolu total. Le volume de l'hydrate formé est inférieur à la somme des volumes initiaux de l'anhydre et de l'eau, c'est le phénomène de la contraction de Le Chatelier.

Powers(1946) et Czernin estiment que cette contraction est approximativement égale à 25% du volume d'eau liée chimiquement. La masse d'eau liée chimiquement est elle-même de l'ordre de 20% de la masse de ciment anhydre initiale.

Powers (1946) et Granju (1978) ont confirmé dans leurs études que le volume des amas d'hydrates (porosité comprise) est 2,2 fois plus grand que celui de l'anhydre (figure I.11). (Folliot et Buil, 1993)

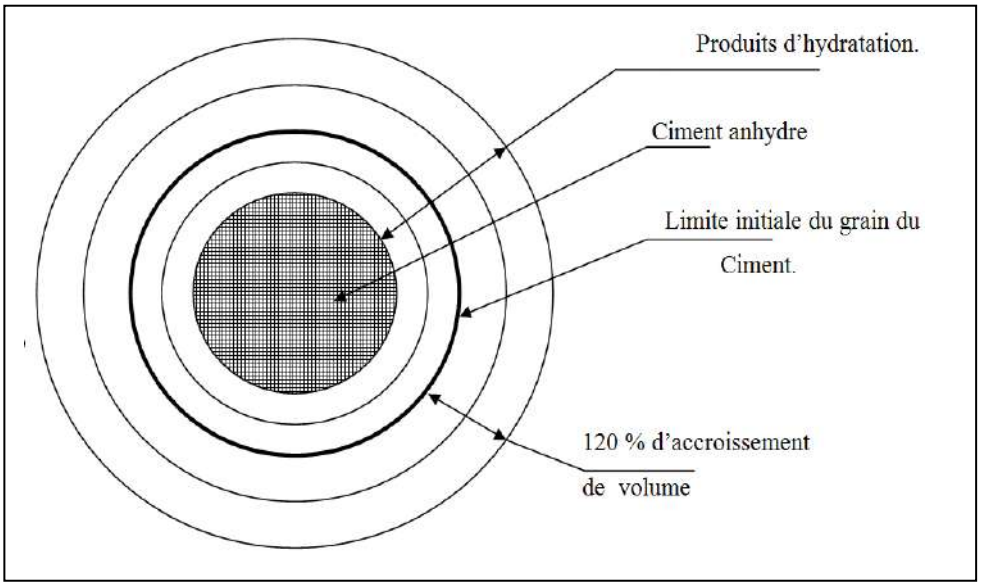


Figure I.11 : Description schématique de l'hydratation d'un grain de ciment (Soroka, 2004).

Ainsi, bien que pour hydrater totalement l'anhydre, il suffise de 20% d'eau en masse ; l'hydratation totale exige un rapport (E/C) supérieur à 0.35, l'hydrate immobilisant 15 % d'eau libre dans ses pores. Au-dessous de (E/C) =0.35, l'hydratation est incomplète et l'éprouvette contiendra du ciment anhydre. Au-delà de 0.35, l'eau en excès reste dans les capillaires.

Le volume des produits hydratés résultants dans l'hydratation du ciment peut atteindre le double du volume initial, et par conséquent le vide entre les grains du ciment se décroît avec l'évolution du taux d'hydratation (Soroka, 2004; Folliot et Buil, 1993).

I.5.5. Présentation schématique du processus d'hydratation du ciment portland

Les figures I.11 et I.12 éclairent d'une façon simple la formation progressive de la pâte du ciment hydraté :

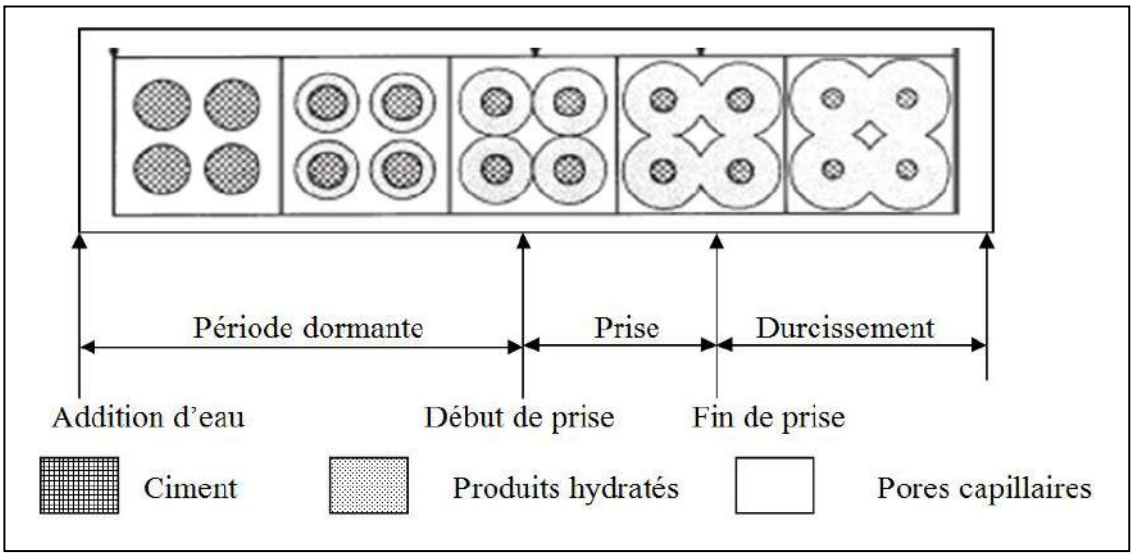


Figure I.12: Description schématique de la formation de la structure dans la pâte de ciment (Soroka, 2004).

I.5.6. Hydratation et activation du laitier

La propriété d'hydratation du laitier nécessite l'emploi des activants chimiques ou thermiques. (Soroka, 2004 ; Kriker, 1992 ; Dron et Voinovitch, 1993)

Dans les ciments au laitier où le clinker est l'activant principal du laitier ; l'hydratation est plus lente que celle du ciment ordinaire. Cependant, les premiers hydrates produits seront ceux du clinker : C-S-H et $Ca(OH)_2$; ils recouvrent uniformément les grains de laitier et du clinker. Ensuite, l'excès de la chaux active l'hydratation du laitier avec une texture C-S-H semblable à celle des ciments ordinaires. Il en résulte alors des silicates et des aluminates de calcium hydratés (Kriker, 1992 ; Dron et Voinovitch, 1993).

Il est intéressant de remarquer la formation des mêmes produits hydratés (C-S-H) que pour un ciment ordinaire, mais des précipitations différentes :

- Une précipitation d'hydroxyde de calcium ($Ca(OH)_2$) pour les ciments ordinaires (figure I.13).
- Une précipitation de silicate et d'aluminate de calcium hydratés pour les ciments au laitier (figure I.14) (Jayant D- Bapat, 2013; Kriker, 1992 ; Jiang et Grandet, 1989).

Ces précipitations sont normalement destinées à obturer les gros pores. Cependant, les précipitations des ciments au laitier sont fixes et imperméables alors que celles des ciments ordinaires ne le sont pas. Par conséquent, le béton ordinaire est plus poreux que le béton au laitier (Kriker, 1992 ; Jiang et Grandet,1989).

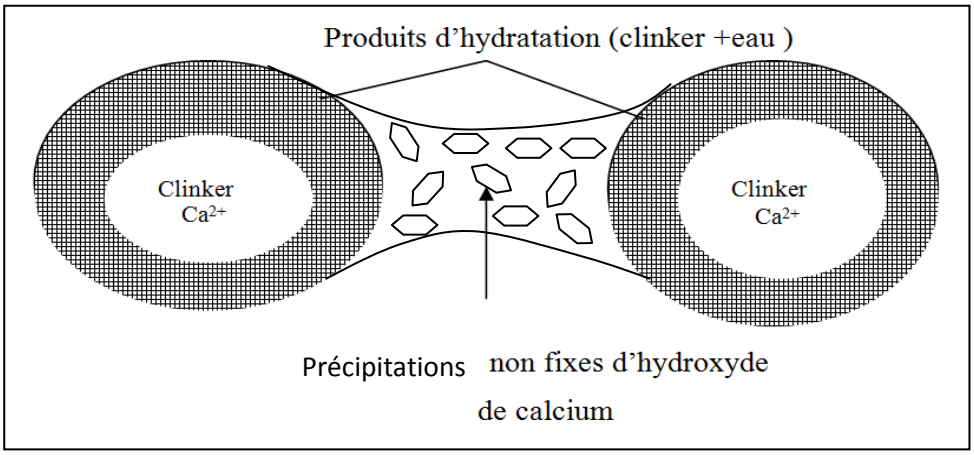


Figure I.13 : Hydratation du ciment ordinaire (Kriker, 1992).

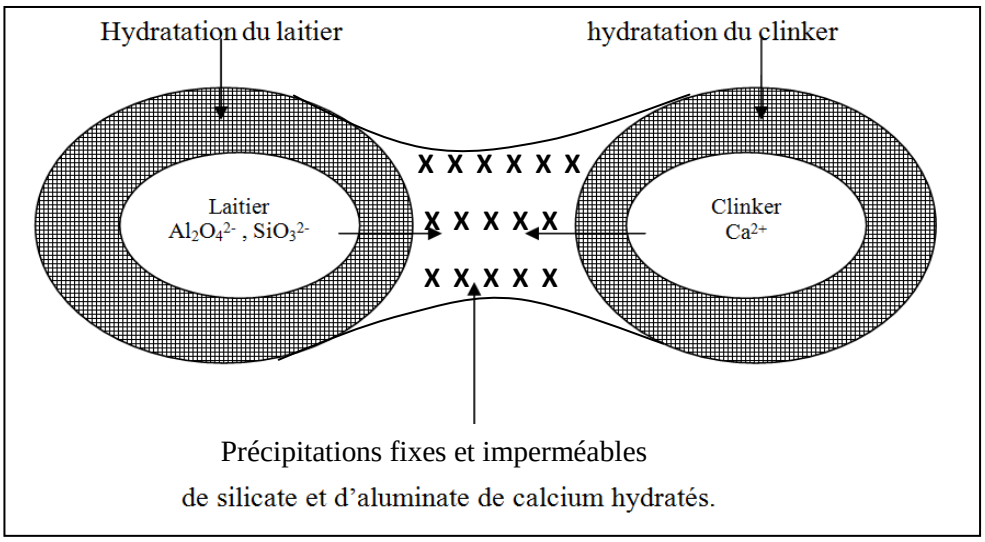


Figure I.14: Hydratation des ciments au laitier (Kriker, 1992**).**

I.5.7. Activation et hydratation des pouzzolanes

En se basant sur la définition simple et précise énoncée en (I.3.3.1), on peut déduire que la chaux est le meilleur activant des pouzzolanes.

L'activité pouzzolanique est donc la transformation pouzzolane/chaux en un matériau dur compact à des températures ordinaires.

Les pouzzolanes sont riches en éléments acides, silice, alumine qui réagissent avec la chaux selon la réaction suivante :

$$\begin{array}{l} \text{Silice } (SiO_2) \\ \qquad\qquad + \text{ Chaux } (Ca(OH)_2) + \text{Eau}(H_2O) \\ \text{Alumine } (Al_2O_3) \end{array} \Longrightarrow \begin{cases} \text{Silicate calcique hydraté CSH} \\ \\ \text{Aluminate calcique hydraté CAH} \end{cases} \qquad (I.9)$$

L'activité des additions minérales est aussi caractérisée par la quantité de chaux (CaO) absorbée par un 1g d'addition en un mois (30 jours).

L'activité pouzzolanique dépend alors de plusieurs facteurs :

- La composition chimique et minéralogique
- Etat de division
- Structure de l'état de surface.

I.5.7.1. Capacité de fixation de chaux par les pouzzolanes

Depuis des dizaines d'années, cette caractéristique capitale des pouzzolanes a été le sujet de plusieurs investigations. Duriez. M, qui se base sur les travaux de Steopoe, Feret et Lee ; rapporte qu'avec 40% de portland et 60% de pouzzolane active, on obtient, en un an, les mêmes résistances qu'avec 100 % de portland.

Les pouzzolanes augmentent la résistance chimique du liant hydraté, la maniabilité au gâchage, et l'imperméabilité après durcissement des mortiers et des bétons (Duriez et Arrambide, 1961).

Finalement, on note qu'il est difficile d'évaluer l'activité (ou le pouvoir) pouzzolanique par une méthode purement chimique. Cette activité, quoiqu'elle est liée à la rapidité de durcissement des liants pouzzolaniques, représente toujours un critère très complexe du fait que toutes les pouzzolanes ne fixent pas la même proportion de chaux dans le même temps. De surcroît, leur capacité de fixation totale de chaux (CaO) n'est pas la même suivant leur composition.

On note que la rapidité de fixation de la chaux augmente avec la température. Aussi, le broyage poussé des pouzzolanes augmente considérablement leur activité, à la fois par la rapidité de fixation de la chaux et par le total de la chaux fixée. (Duriez et Arrambide, 1961).

Avec l'addition de la chaux aux pouzzolanes, nous obtenons des silicates de calcium et des aluminates tétracalciques hydratés (Dron et Voinovitch, 1993). Cette réaction est schématisée comme suit :

$$\text{Pouzzolanes} + \text{chaux} + \text{eau} \longrightarrow \text{C-S-H} + C_4AH_{13} \qquad (\text{I.10})$$

Dans les ciments portlands pouzzolaniques, deux processus ont lieu pendant le durcissement :

1. Hydratation des minéraux faisant partie du clinker,
2. Interaction de l'adjuvant minéral actif (la pouzzolane) avec l'hydroxyde du calcium qui se dégage lors du durcissement du clinker.

Le $Ca(OH)_2$ se trouve alors fixé à l'hydrosilicate de calcium insoluble dans l'eau suivant la réaction suivante :

$$Ca(OH)_2 + SiO_2 + (n-1)H_2O \longrightarrow CaO.SiO_2.nH_2O \qquad (I.11)$$

Silicate provenant du laitier ou de la pouzzolane

Hydrosilicate de calcium (insoluble dans l'eau)

I.5.8. Cinétique d'hydratation des laitiers et des pouzzolanes

L'étude cinétique d'hydratation des laitiers et pouzzolanes consiste à examiner l'évolution physico-chimique du système initial hors équilibre vers le système final stable. Cette étude nous permet de connaître l'évolution mécanique parce que l'augmentation des résistances est liée directement au développement des phases hydratées. Cette augmentation est notable dès les premières semaines pour le laitier, elle est plus tardive pour les produits pouzzolaniques.

Le laitier et la pouzzolane ont alors des cinétiques d'hydratation plus lentes que celles du ciment portland (clinker) (Jayant, 2013 ; Dron et Voinovitch, 1993).

La cinétique d'hydratation est liée à la vitesse de solubilisation de ces ajouts (laitier et pouzzolane) qui dépend de :

- la composition chimique de ces derniers
- la finesse de broyage (surface spécifique SSB)
- la température, car toutes les transformations chimiques s'accélèrent lorsque la température croît (Dron et Voinovitch, 1993).

Le silicate tricalcique (C_3S) s'hydrate au cours des premiers jours qui suivent la mise en œuvre selon le schéma suivant :

$$3CaO,SiO_2 + nH_2O \longrightarrow CaOSiO_2,(n-2)H_2O,xCa(OH)_2 + (2-x)Ca(OH)_2 \qquad (I.12)$$

Silicate de calcium hydraté basique (C-S-H) — Portlandite

L'hydroxyde de calcium ($Ca(OH)_2$) provenant de l'hydratation primaire du (C_3S) joue le rôle de l'activant principal des ajouts pouzzolaniques ou de laitiers, selon l'équation I.11.

L'hydratation de laitier ou de pouzzolane, ne peut donc débuter que lorsque le (C_3S) a déjà partiellement réagi. Comme leur cinétique est plus lente que celle de (C_3S), il va se constituer une réserve de portlandite ($Ca(OH)_2$) qui sera ensuite progressivement absorbée (Jayant, 2013 ; Dron et Voinovitch, 1993).

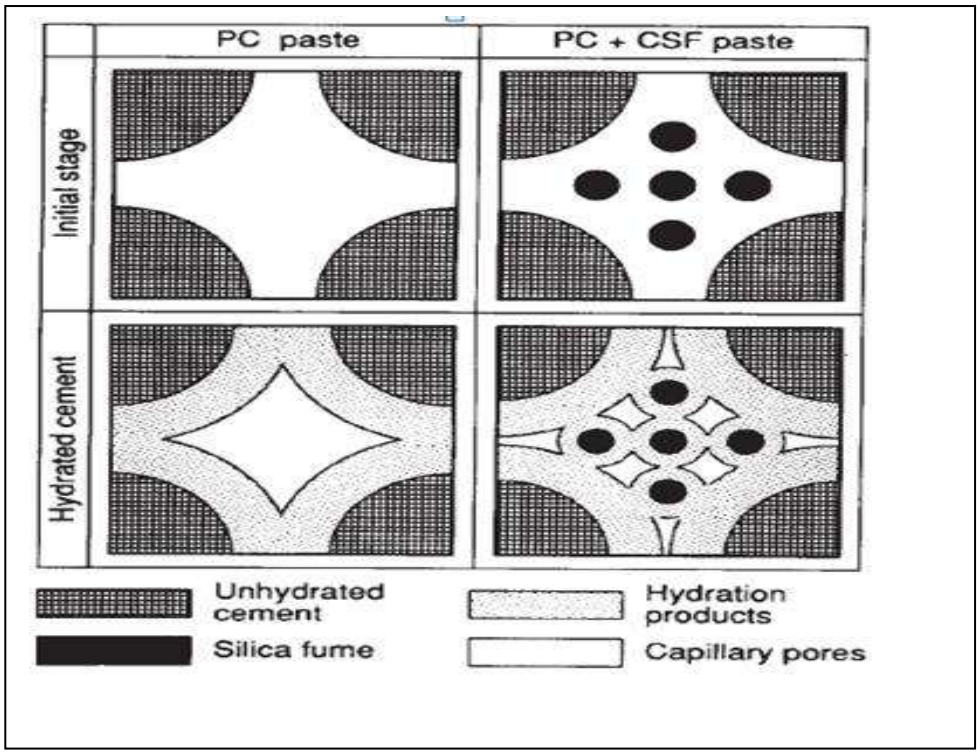


Figure. I.15 : Illustration de l'effet de remplissage de la fumée de silice sur la porosité de la pâte hydratée du ciment (Soroka, 2004).

I.6. CONCLUSION

Nous pouvons conclure que les laitiers, les pouzzolanes et en général les matériaux silico-alumino-calciques ne changent pas la nature des produits d'hydratation responsables de la prise et de durcissement. Par contre, ils modifient leurs proportions et leurs cinétiques de formation. Cependant l'utilisation des laitiers et des pouzzolanes comme ajouts minéraux dans l'industrie des ciments est très intéressante sur le plan économique d'une part, car ils ont un faible coût énergétique, et d'autre part, ils contribuent à la résistance des bétons aux agressions chimiques, ce qui améliore la durabilité.

CHAPITRE II

CARACTERISATION DES BETONS AUX AJOUTS MINERAUX

CHAPITRE II

CARACTERISATION DES BETONS AUX AJOUTS MINERAUX

II.1.INTRODUCTION

Dans le premier chapitre, nous avons précisé la terminologie spécifique à la thématique des matériaux cimentaires : le béton et le mortier en s'appuyant sur tout un recueil de travaux publiés. Plus encore, l'objectif était également l'identification et la spécification des ajouts que nous devons incorporer pour la production des deux matériaux précités ; ainsi que les mécanismes mis en jeu. Le chapitre présent est dédié à approfondir les réactions protéiformes qui en découlent. Nous mettons donc en exergue les différentes caractéristiques du béton et du mortier avec des hypothèses sur leurs milieux auxquels ils appartiennent.

II.2. AJOUTS MINERAUX ET POROSITE

La résistance à la compression à long terme de la pâte de ciment est simplement fonction de l'indice des vides de la pâte après mise en place. Elle augmente lorsque l'indice des vides diminue (Baron, 1993).

Le seul moyen pour diminuer l'indice des vides de la pâte c'est de réduire la porosité. Il suffit alors de mener les manipulations suivantes :

- Réduire le dosage en eau et compenser la perte de maniabilité par un apport d'adjuvant,
- Incorporer des ajouts plus fins que le ciment, qui en s'insérant entre les grains de ce dernier, ils réduisent sa porosité.

Les expériences avec un protocole adapté montrent qu'il existe un dosage en eau pour lequel la porosité est minimale. De plus, ce dosage dépend fortement des conditions de mise en œuvre (Baron, 1993).

La quantité d'eau qu'il est nécessaire d'ajouter pour le gâchage correct du ciment est supérieure à la quantité strictement nécessaire aux seules réactions chimiques ; on doit en effet distinguer :

- l'eau de cristallisation ou d'hydratation fixée chimiquement dans les nouveaux constituants hydratés et nécessaires à leur structure cristalline ; elle est en général de l'ordre de 25 à 30 % du poids de ciment.
- l'eau absorbée qui pénètre plus au moins à l'intérieur des granulats selon leur degré de porosité.
- l'eau libre existante dans de fins réseaux capillaires ; elle s'élimine plus ou moins par séchage. Elle n'est nécessaire que pour obtenir la viscosité, la plasticité et l'onctuosité indispensables au gâchage et à la mise en place correcte du béton dans les coffrages et l'embarras plus ou moins important des armatures (Dreux et Festa, 2007; Soroka, 2004).

II.3. PROPRIETES DES BETONS AUX AJOUTS MINERAUX

II.3.1. Propriétés du béton au laitier

II.3.1.1. Béton frais

A- Consistance et maniabilité

Plusieurs recherches confirment que la consistance et l'ouvrabilité des bétons et des mortiers au laitier sont plus grandes que celles des mortiers et des bétons ordinaires. Cette amélioration est due d'une part, à l'augmentation de la viscosité de la pâte des ciments au laitier en fonction de l'accroissement du pourcentage de substitution en laitier, et d'autre part à la surface caractéristique des particules du laitier. Ces particules sont en fait denses, lisses et n'absorbent pas beaucoup d'eau dans la phase initiale d'hydratation (Kriker, 1992 ; Soroka, 2004 ; Hadjsadok et al, 2012).

Tableau II.1: Effet de l'incorporation du laitier broyé d'El-Hadjar sur la maniabilité du béton (Hadjsadok et al, 2012).

Composition and properties of concrete used.

Concrete	W/B	Binder (kg/m³)		Aggregates (kg/m³)			SP[a] (%)	Slump (mm)
		Cement	Slag	Sand 0/5	G1 8/15	G2 15/25		
A0	0.65	365	0	734	468	655	–	75
A15		310	55	734	468	655	–	80
A30		205	110	734	468	655	–	97
A50		182.5	182.5	734	468	655	–	104
B0	0.42	365	0	734	468	655	1.8	55
B15		310	55	734	468	655	1.8	61
B30		205	110	734	468	655	1.8	58
B50		182.5	182.5	734	468	655	1.8	64

[a] SP: Superplasticiser per weight of cement.

B- Chaleur d'hydratation

En s'appuyant sur certains travaux, nous pouvons relever que les bétons contenant un pourcentage en laitier de 70 % ont une chaleur d'hydratation inférieure à celle des bétons ordinaires, (Figure II.1). Pour cette raison, les ciments à haute teneur en laitier peuvent être convenablement utilisés dans les bétons de masse (Kriker, 1992 ; Soroka, 2004).

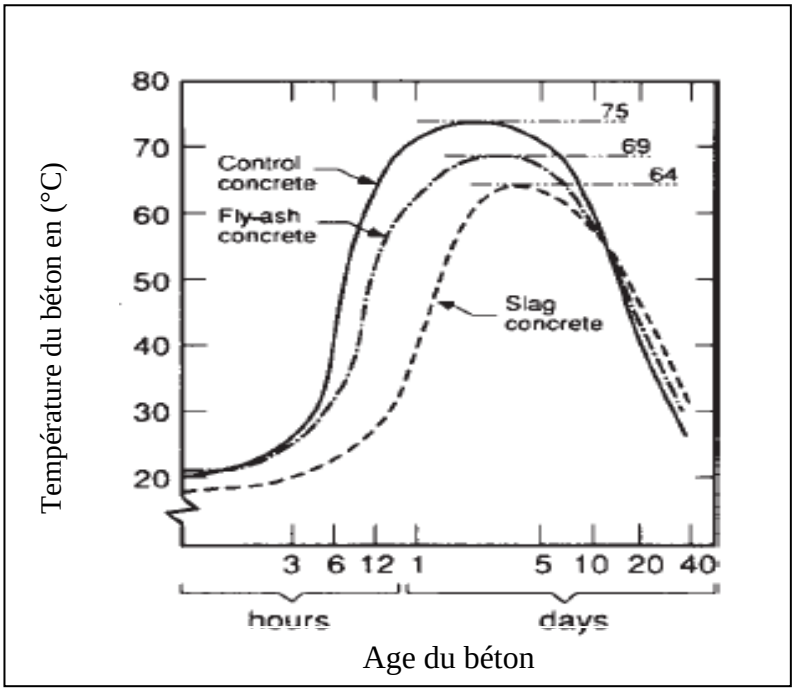


Figure II.1: Variation de la température des différents bétons de masse avec l'âge ;(béton ordinaire, béton au laitier, béton à cendre volante) (Soroka, 2004).

II.3.1.2. Béton durci

A- Résistance mécanique

Plusieurs études (Kriker, 1992 ; Behim, 1986 ;Guernouti, 2002), ont été entreprises afin de déterminer l'influence du laitier de haut fourneau sur la résistance mécanique du mortier et du béton durcis.

A.S Boldyrev, Z.b Entine et autres, rapportent qu'avec l'addition de laitier, la résistance du ciment diminue au début. Toutefois au bout de 28 jours et plus, les ciments contenant 15 % de laitier ne cèdent en rien aux ciments de contrôle sans constituants secondaires, (Boldyrev et Entine, 1980).

L'addition du laitier dans une proportion de 30 % abaisse la résistance de 10 % par rapport au ciment de contrôle, également à des délais avancés, mais même dans ce cas l'effet pouzzolanique de l'ajout (laitier) se manifeste de façon évidente, (Figure.II.2).

Le même résultat a été affirmé par M, Regourd et B, Mortureux. Après une analyse de trois laitiers différents, ils ont constaté qu'à partir du 90ème jour, le ciment de haut fourneau (CHF) contenant le laitier le plus réactif est aussi résistant que le ciment ordinair, (Regourd et Mortureux, 1980).

Enfin, un autre résultat est à mentionner, il concerne le béton conservé dans l'eau douce. Ce matériau, pris dans ces conditions, développe une résistance plus grande qu'un béton conservé à l'air libre (Behim, 1986).

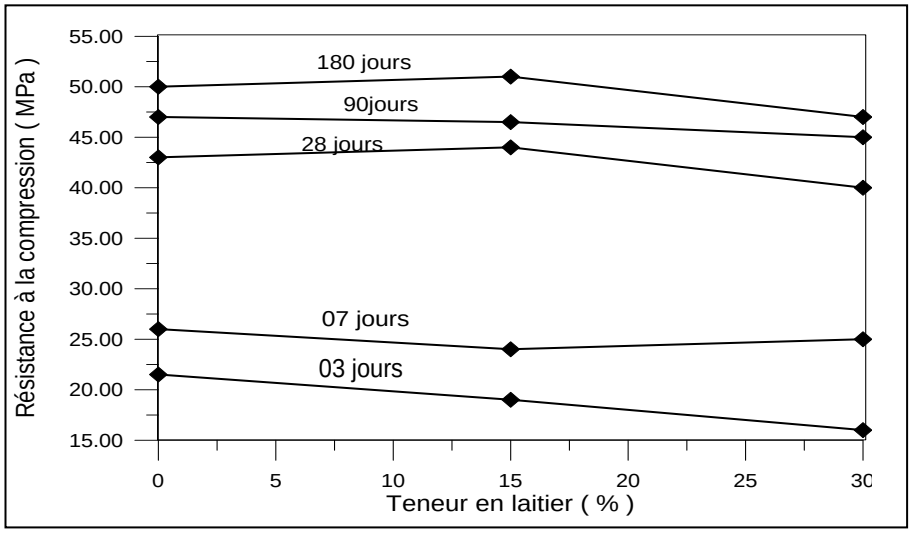


Figure II.2: Influence du laitier sur la résistance à la compression du ciment (Boldyrev et Entine,1980).

B- Retrait

Rappelons que le béton est l'objet de retrait ; en d'autres termes, il s'agit d'une réduction dimensionnelle, en l'absence de chargement, due essentiellement à l'évaporation de l'eau excédentaire interne. Plusieurs auteurs rapportent qu'à court terme, les bétons au laitier présentent un retrait inférieur à celui du béton ordinaire. Alors qu'à long terme l'inverse se produit (Figure II.3).

Ce phénomène a une relation directe avec la finesse du liant, le rapport (E/C), l'environnement, et la durée de la cure (Dreux et Festa, 2007 ; Soroka , 2004).

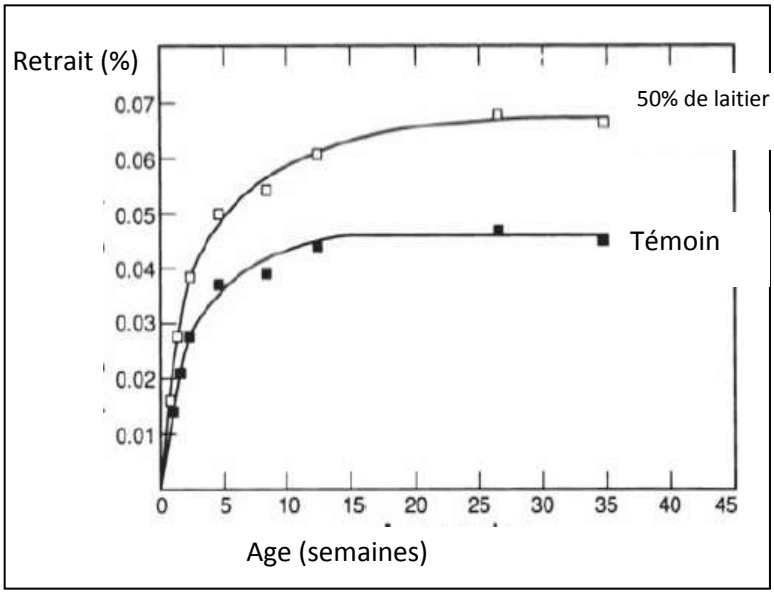


Figure II.3 : Effet du laitier sur le retrait du béton (Soroka , 2004).

II.3.2. Propriétés du béton à la pouzzolane

II.3.2.1. Béton frais

A- Consistance et maniabilité

D'après Soroka (2004), l'ajout pouzzolanique, réduit la perte de fluidité (maniabilité). Cette réduction est proportionnelle au pourcentage d'incorporation de l'ajout minéral (Figure II.4).

Nous remarquons qu'un béton ordinaire perd presque totalement son ouvrabilité après 90 mn de son gâchage, par contre le béton pouzzolanique, garde sa maniabilité avec le temps de malaxage (Soroka, 2004).

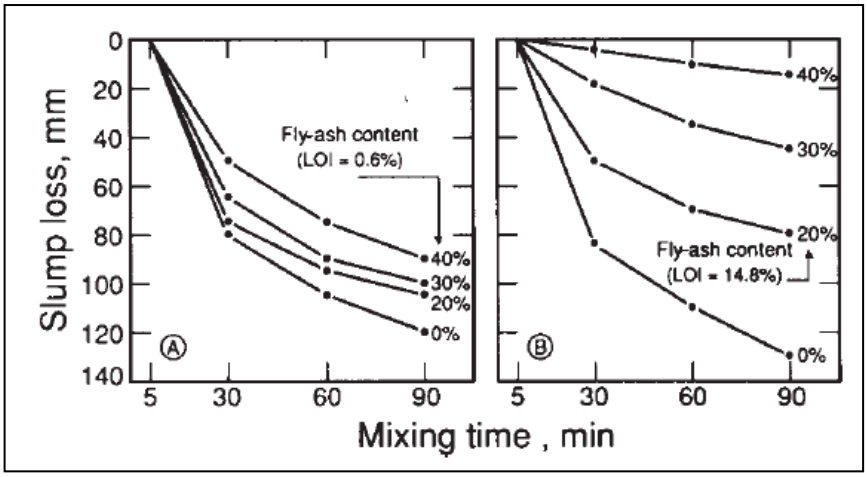
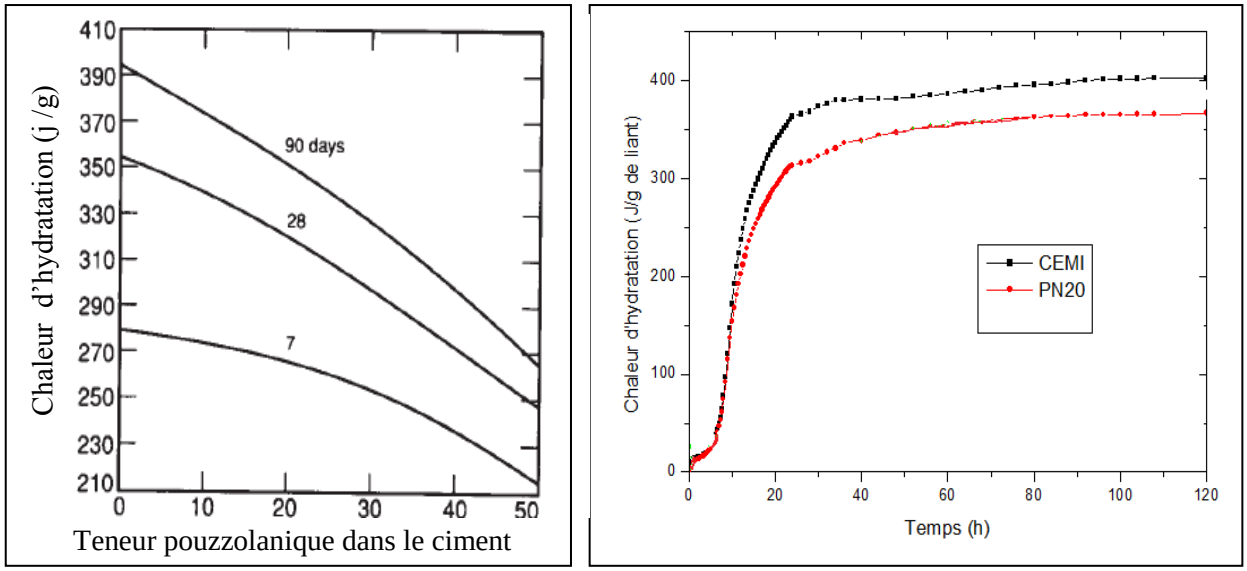


Figure II.4: Effet d'incorporation des deux types de cendres volantes (pouzzolaniques) dans les CPA sur la perte d'affaissement du béton frais (Soroka, 2004).

B- Chaleur d'hydratation

En parcourant les thématiques en question, il est intéressant de mentionner que les ciments contenant de la pouzzolane ont une chaleur d'hydratation moins élevée que celle d'un ciment ordinaire. La figure II.5 montre que la réduction de la chaleur d'hydratation est proportionnelle au pourcentage d'incorporation de la pouzzolane dans le ciment (Soroka , 2004 ; Senhadji et al, 2015).



(a) **(b)**

Figure II.5 : Effet de l'ajout pouzzolanique sur la chaleur d'hydratation du ciment, (a) Soroka , (b) Senhadji et al. (Soroka , 2004 ; Senhadji et al, 2015 **).**

En effet, l'exploitation de ces courbes nous permet d'affirmer que l'incorporation de l'ajout pouzzolanique au ciment ordinaire réduit sa chaleur d'hydratation et ce quel que soit le nombre de jour. Ce résultat doit être pris avec précaution lorsque la surface spécifique (la finesse) est très grande.

II.3.2.2. Béton durci

A- Résistance mécanique

Maintenant, intéressons-nous à d'autres caractéristiques aussi essentielles que la première, en l'occurrence la résistance à la compression. L'expérience considérée concerne le mortier durci conservé dans deux milieux différents :

- L'eau douce
- L'air libre.

Cette expérience a permis de relever les graphes suivants (Figure II.6) :

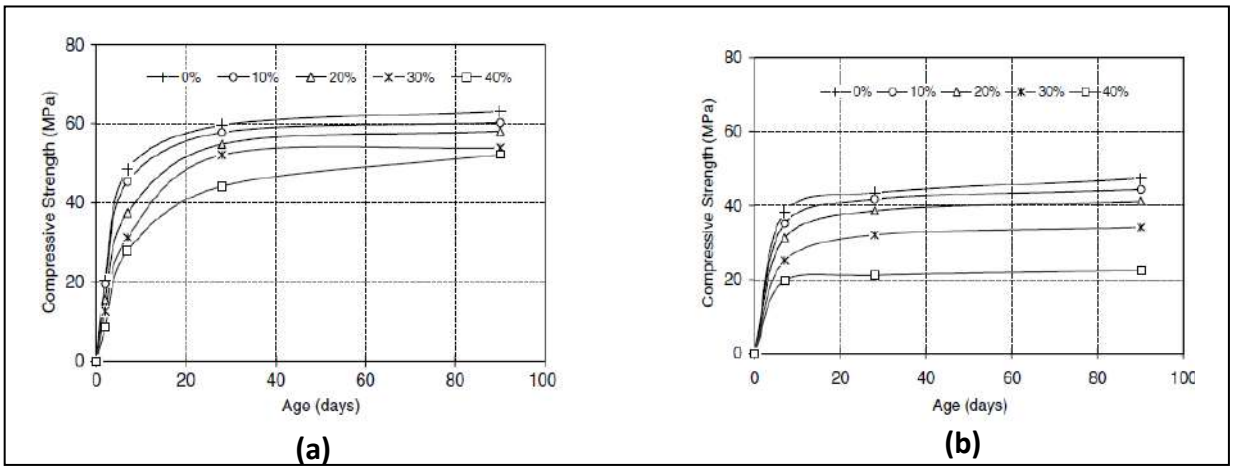


Figure II.6 : Effet de l'ajout pouzzolanique dans différentes cures sur la résistance mécanique du mortier ;(a) à l'eau douce. (b) à l'air libre (Ghrici et al., 2006).

La figure II.6 représente un faisceau de courbes qui nous montre la dépendance de la résistance à la compression en fonction de l'âge et de l'ajout pouzzolanique. Comme nous l'avons mentionné auparavant, cette dépendance tient compte du milieu dans lequel le mortier est conservé.

Le développement de la résistance mécanique avec l'âge du béton est proportionnel au développement du taux d'hydratation et de durcissement du ciment. Soroka (2004) rapporte que l'évolution de la résistance mécanique des bétons pouzzolaniques est plus lente que celle des bétons ordinaires ; car l'hydratation du ciment pouzzolanique est un peu plus lente par rapport à celle du ciment ordinaire.

La figure II.6, montre qu'un mortier pouzzolanique est moins résistant au jeune âge, toutefois au bout de 28 jours. Au-delà de cet âge, l'addition de 10% d'ajout pouzzolanique fait augmenter la résistance du mortier et réduit l'écart au maximum (Ghrici et al., 2006).

B- Retrait

Les ajouts pouzzolaniques ont un effet remarquable sur le phénomène de retrait des bétons. Ces ajouts minéraux agissent par leurs surfaces spécifiques (finesses) sur la structure poreuse de la pâte liante. En effet cette structure est plus fine que celle d'une pâte ordinaire (Soroka , 2004 ; Mehta, 1981).

La structure poreuse fine des bétons aux pouzzolanes est accompagnée par un retrait plus élevé pour des teneurs supérieures à 10 % en ajouts pouzzolaniques. Cette augmentation de retrait est plus remarquable à partir de la 4ème semaine (28 jours), (Figure II.7).

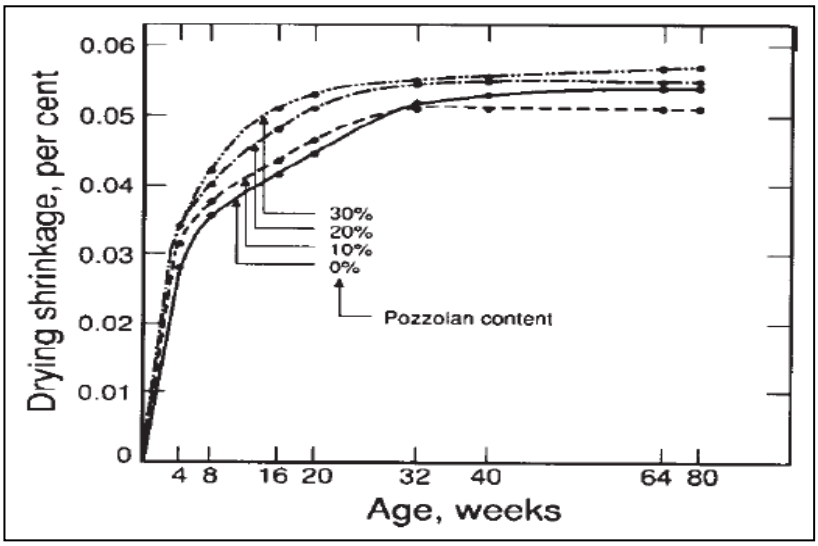


Figure II.7: Retrait du béton pour des différentes teneurs en pouzzolane, (Soroka , 2004).

II.3.3. Propriétés du béton aux fines calcaires

II.3.3.1. Béton frais

A- Consistance et maniabilité

Dans leurs travaux de recherche, L. Nouari, M. Touguy et A. Aziz, ont constaté que la maniabilité des ciments et des mortiers contenant des fines calcaires est affectée d'une manière très sensible. Elle passe de 55%, pour le témoin (0% d'ajout calcaire) à 45 %pour une teneur de 10 %, et atteint 36 % pour 20 % de fines, (Figure II.8) (Nouari et Touguy, 1997).

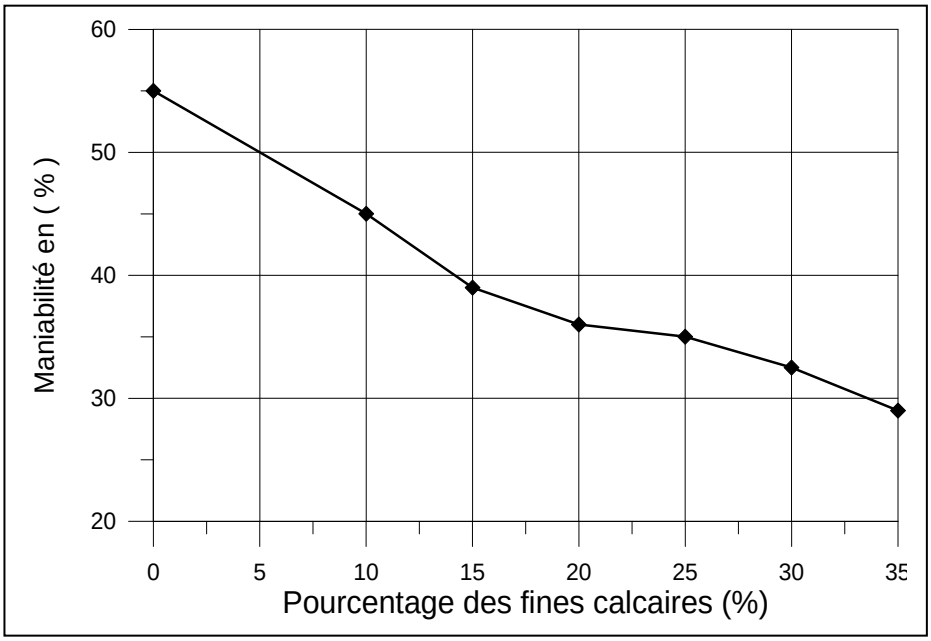


Figure II.8 : Variation de la maniabilité en fonction du pourcentage des fines calcaires (Nouari et Touguy, 1997).

A- ***Chaleur d'hydratation***

L'étude calorimétrique réalisée par Senhadji et al., (2015), leur permet de constater que le remplacement du ciment par les fillers calcaires diminue d'une façon significative la chaleur d'hydratation du ciment avec ajout, ce qui réduit l'effet du retrait de la pâte. En effet la chaleur d'hydratation ainsi que le flux de chaleur maximum diminuent avec la substitution des fines calcaires au CEM I (Figure II.9). Cela est dû -selon les auteurs- à la quantité de chaleur dégagée pendant l'hydratation du ciment contenant de l'ajout.

La chaleur dégagée par le CEM I est plus importante que les chaleurs dégagées par les mortiers à 10% de fines calcaires. Ceci s'explique par le fait que la proportion de ciment

contenue dans le CEM I est plus importante. Le remplacement de 10% du ciment par les fillers calcaires, diminue le second pic du flux d'hydratation (Senhadji et al., 2015).

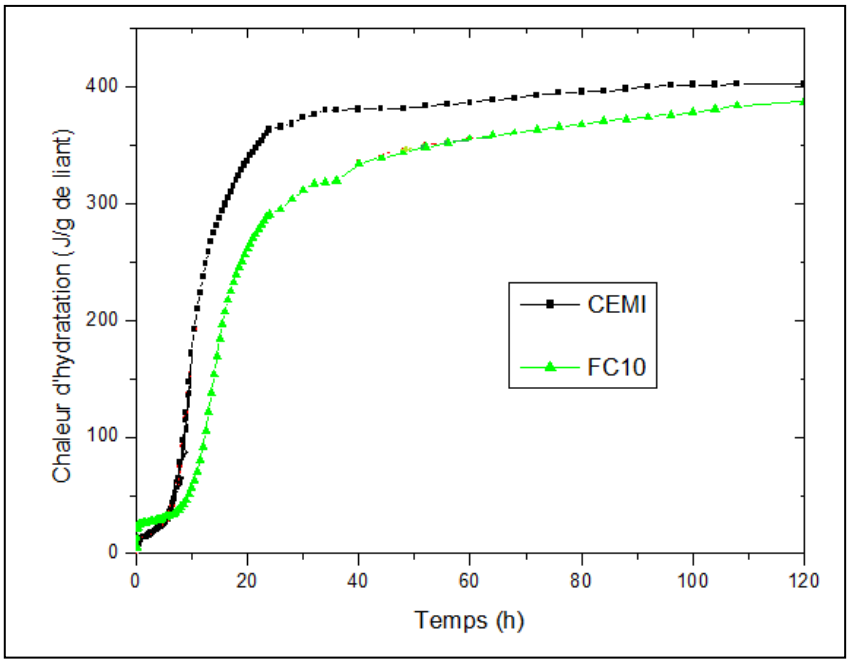


Figure II.9: Évolution de la chaleur d'hydratation d'un mortier avec 10% de fines calcaires (Senhadji et al, 2015).

II.3.3.2. Béton durci

A- Résistance mécanique

Plusieurs auteurs ont conclu que l'ajout des fines calcaires aux mortiers et aux bétons, engendre une chute des résistances qui n'est pas très importante lorsque la teneur en fines n'excède pas 20 %, (Figure II.10).

On note également que la cinétique d'évolution de la résistance à la flexion aux jeunes âges des ciments à l'ajout calcaire est plus élevée que celle du ciment témoin, avec une tendance asymptotique des ciments renfermant plus de 20 % des fines lorsqu'on approche de l'âge de 28 jours (Nouari et Touguy, 1997 ; Ramires et al., 1990 ; Paillère et Ravrdy ,1977). Rappelons que la SSB maximale des fines calcaires utilisées dans ces études est autour de 5000 cm^2/g. Ces résultats peuvent être améliorés avec des finesses plus grandes.

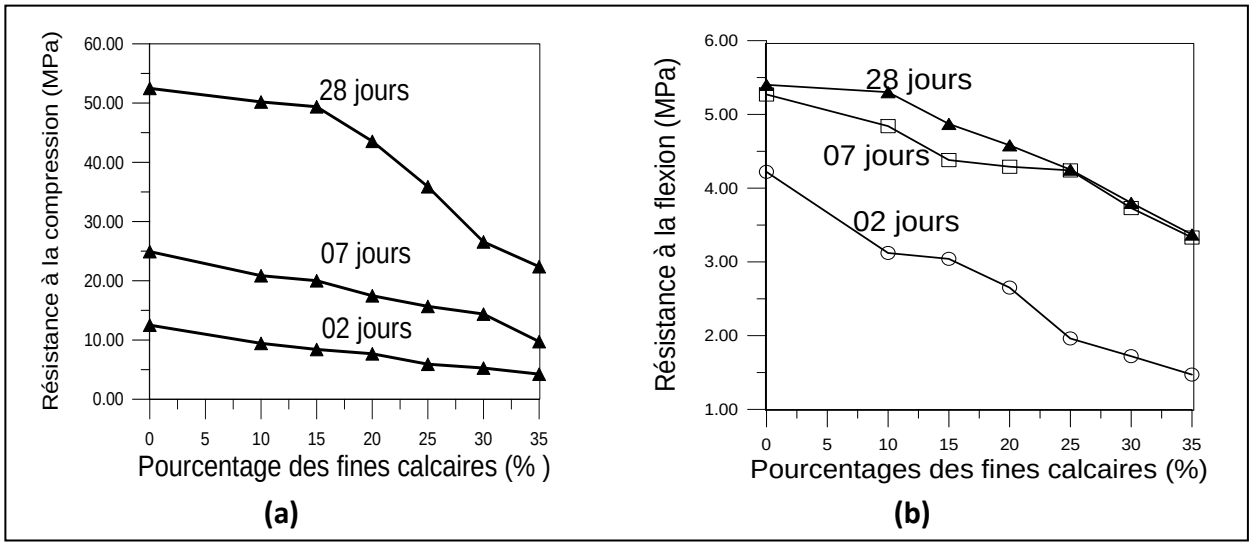


Figure II.10 : Résistance mécanique des ciments aux fines calcaires.
(a) Compression, (b) Traction par flexion, (Nouari et Touguy, 1997).

D'un autre coté Ramirez et al.(1987), Benna (1995) et Guernouti (2002), ont abouti à une amélioration de la résistance mécanique en substituant des fines argileuses des sables par des fines calcaires (Figures II.11 et II.12).

Selon l'étude effectuée par Ramirez et al. (1987), cette amélioration de résistance mécanique peut atteindre 57 % par rapport à celle du témoin,

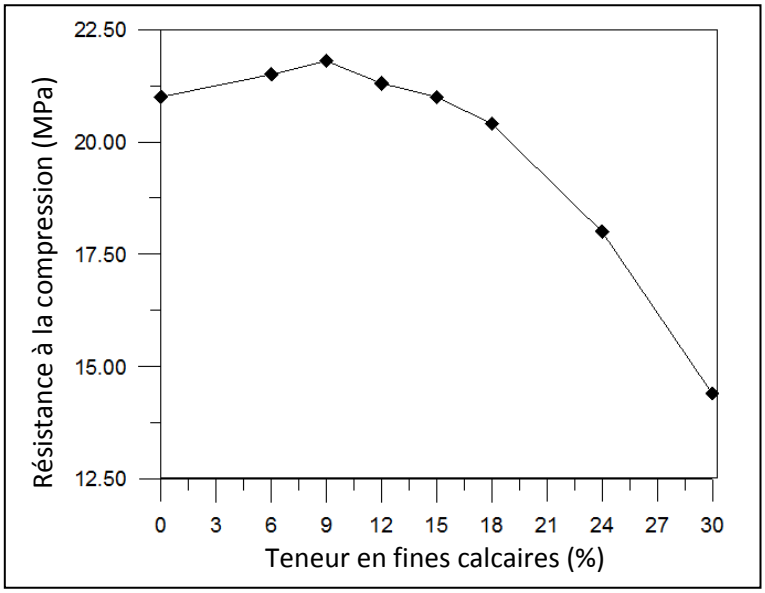


Figure II.11 : Résistance à la compression des mortiers en fonction de la teneur en fines calcaires (par rapport au sable) à l'âge de 28 jours, (Benna,1995).

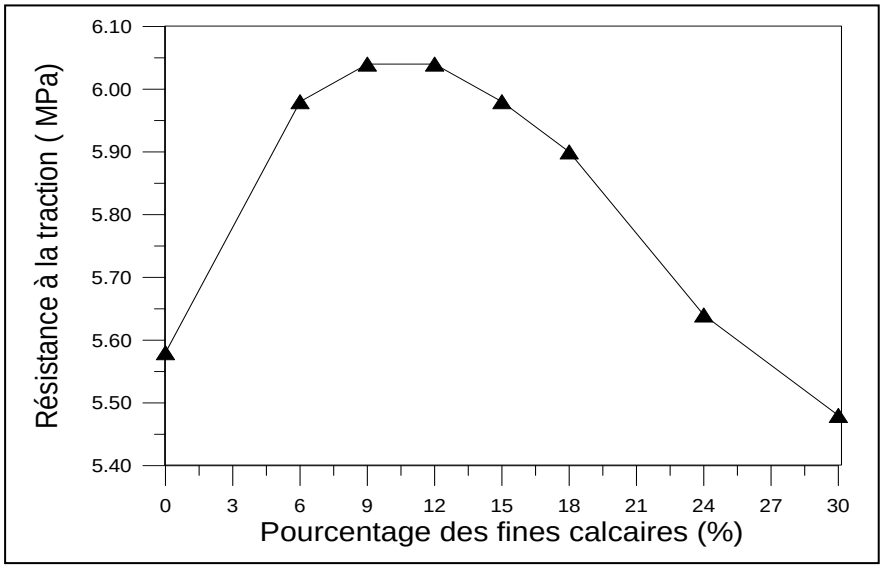


Figure II.12 : Résistance à la traction des mortiers en fonction de la teneur en fines calcaires (par rapport au sable) à l'âge de 28 jours (Benna,1995).

B- Retrait

Les retraits des mortiers et des bétons renfermant des fines calcaires sont fluctueux, (Figure II.13). Toutefois, la variation du retrait reste généralement faible et comparable pour toutes les teneurs jusqu'à 35%, (Benna,1995 ; Nouari et Touguy, 1997) .

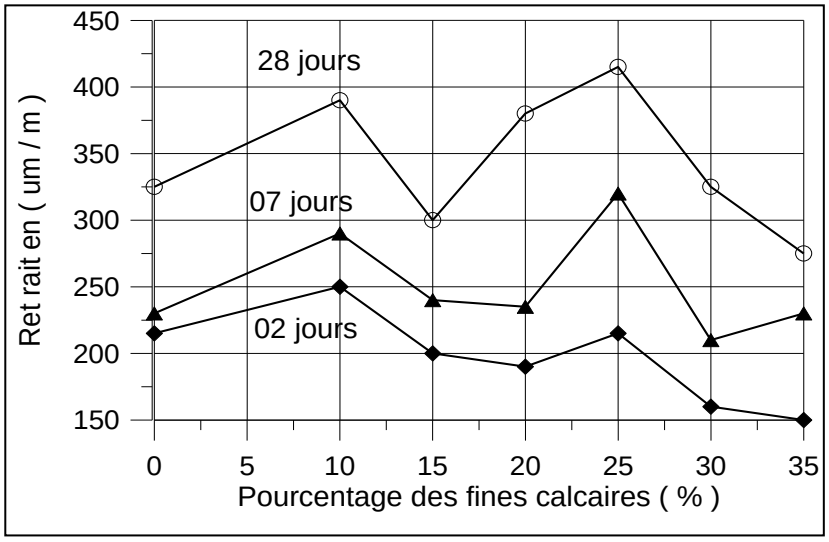


Figure II.13 : Retrait des ciments aux fines calcaires (Nouari et Touguy, 1997).

Tandis que Senhadji et al. (2015), confirment que 10% de fines calcaire diminue la chaleur d'hydratation et par conséquent, réduit l'effet du retrait de la pâte.

II.3.4. Propriétés du béton au sable de dunes

II.3.4.1. Béton durci

Selon des études entreprises par Guettala. S, (2012) et Mechti et al. (2013), sur l'effet de l'incorporation du sable de dunes broyé dans des pâtes pures de ciment; on constate que la résistance mécanique de la pâte du ciment combinée avec le sable de dune broyé à différente finesses et pourcentages, a été améliorée à partir de l'âge de 28 jour.

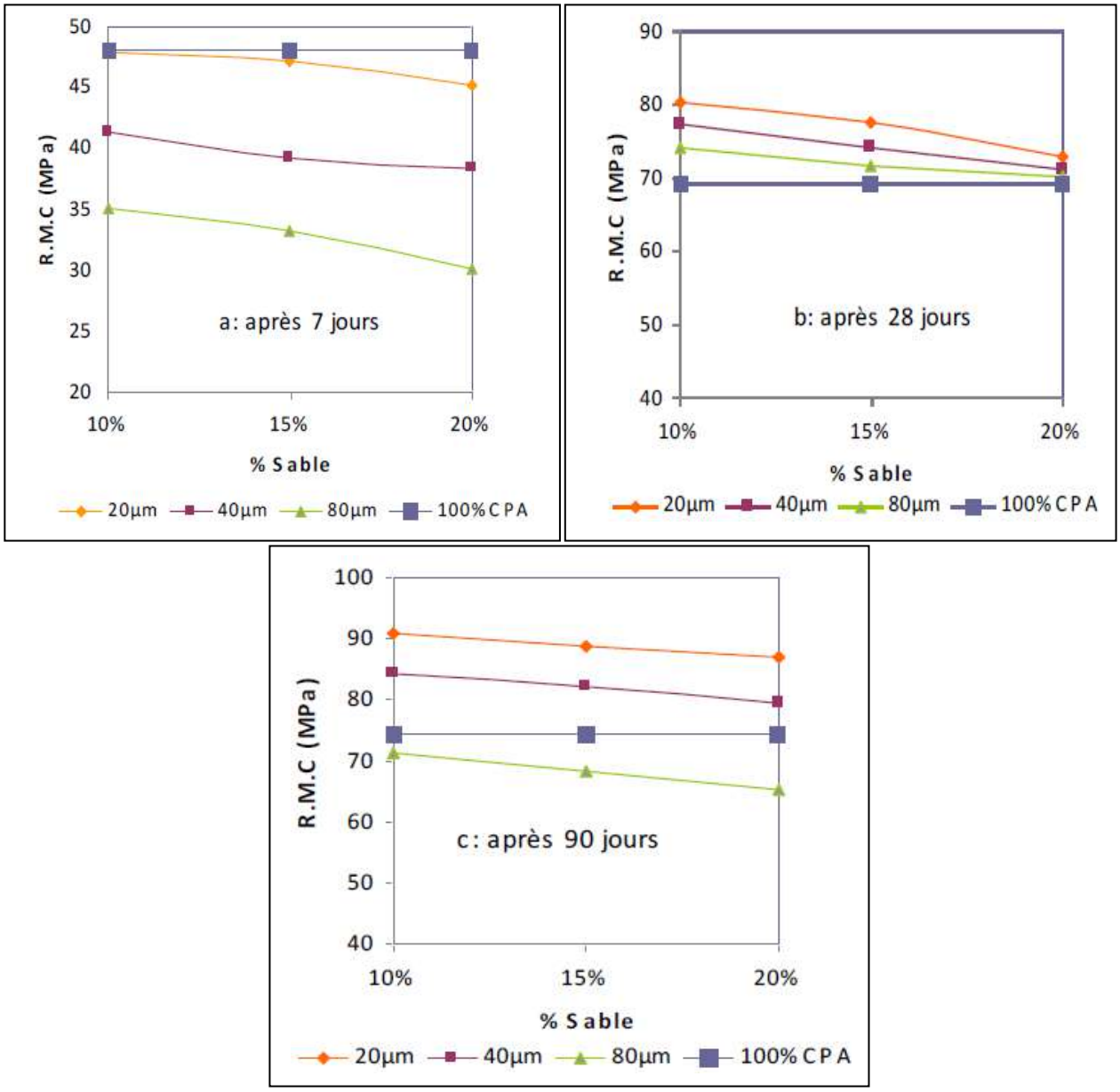


Figure II.14 : Effet de l'incorporation du sable de dunes broyé sur la résistance mécanique du ciment (Mechti et al, 2013).

En effet, à l'âge de 7 jours ils ont enregistré une baisse de résistance, puis, ils ont remarqué que l'effet pouzzolanique du sable broyé commence à se manifester et contribue à l'amélioration de la résistance ; notamment pour les grandes finesses, et un taux d'incorporation de 10%, (Figure II.14) (Guettala, 2012; Mechti et al, 2013).

II.4. AJOUTS MINERAUX ET DURABILITE

La durabilité d'un matériau peut être définie par son aptitude de durer dans le temps sans qu'il perde l'une de ces caractéristiques majeures.

La durabilité d'un ouvrage est caractérisée par sa capacité de conserver ces fonctions d'usage, pour lesquelles il a été conçu, et à maintenir son niveau de fiabilité, avec des frais de maintenance et d'entretien les plus réduits que possible (Salhi, 2014).

Le matériau et, sous entendu, l'ouvrage réalisé, doivent donc être adaptés à leur milieu.

II.4.1. Béton et durabilité

Le béton est un matériau durable qui offre une résistance aux agressions lorsqu'il est correctement dosé et judicieusement mis en œuvre.

Nous pouvons, alors dire, qu'un béton est durable si sa composition et son assemblage minéralogique sont choisis en fonction des caractéristiques de l'environnement de l'ouvrage.

Le climat, l'agressivité des eaux, des sols et de l'atmosphère sont donc des paramètres à prendre en compte dès la conception du béton afin que celui-ci présente au final les caractéristiques physico-chimiques adaptées à l'environnement dans lequel il s'insérera.

La durabilité d'un béton dépend alors, d'une manière directe de sa résistance aux agressions extérieures, qui, peut être fortement améliorée en réalisant un matériau compact qui s'oppose durablement à la pénétration des agents agressifs.

Pour un ouvrage, il doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations (physiques, mécaniques, chimiques…), c'est-à-dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant…tout en conservant ses performances.

La durabilité de l'ouvrage caractérise sa capacité à conserver les fonctions d'usage, pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers). Il est important de maintenir son niveau de fiabilité et son aspect esthétique dans son environnement moyennant des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible.

II.4.2.Durabilité et développement durable

Selon la norme française (NF X60-500), la durabilité est « l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction jusqu'à ce qu'un état limite soit atteint ».

Bien entendu, la durabilité est l'un des facteurs les plus importants dans le développement durable ; en effet, plus la durabilité de l'ouvrage est importante plus l'impact environnemental global diminue. On imagine mal d'envisager la démolition d'une construction en béton au bout d'une période courte.

Dans les codes et les contextes de constructions actuels, on doit prendre en considération, la résistance et la durabilité à la fois, lors de la formulation du matériau.

Le béton reste parmi les matériaux de construction les plus durables par son cycle de vie très long. Cette qualité principale limite son défaut principal ; qui est l'utilisation des ressources énergétiques et non énergétiques non renouvelables, (Ollivier et Vichot, 2008 ; Regourd, 1993).

L'incorporation des ajouts minéraux actifs et inertes dans les mortiers et les bétons a un impact direct sur l'environnement et le développement durable ; du fait que plusieurs ajouts (laitier, cendre, fumée de silice, ….) sont tous des co-produits industriels. Ils représentent une charge supplémentaire sur la pollution de l'environnement. D'autre part la valorisation de ces ajouts dans l'industrie cimentière réduit la consommation d'énergie et l'émission du gaz CO_2.

II.4.3. Facteurs de durabilité

II.4.3. 1.Compacité, porosité et perméabilité

Les facteurs inhérents à la perméabilité et à la diffusivité (transports des espèces) sont les paramètres principaux à évaluer pour connaître la durabilité du béton.

Les qualités intrinsèques du béton, notamment sa compacité et sa perméabilité conditionnent sa durabilité. Le béton résiste d'autant mieux aux actions agressives que sa porosité et sa perméabilité sont faibles.

Comme la résistance varie dans le même sens que la compacité, on peut dire, « de manière générale », que les bétons présentant les résistances mécaniques les plus élevées sont aussi les plus résistants aux agents agressifs, donc les plus durables ; ou encore qu'un béton est d'autant plus durable qu'il a une porosité plus faible.

Les principaux facteurs prépondérants au niveau de la formulation d'un béton pour obtenir une compacité élevée (donc une faible porosité) sont :

- un dosage en ciment adéquat ;
- une faible teneur en eau; (un rapport E/C plus faible) car l'étanchéité d'un béton dépend en premier lieu de sa compacité. Cette dernière est d'autant plus forte que le rapport E/C est plus faible.
- une granulométrie comportant des éléments fins, en quantité suffisante pour remplir les espaces entre les plus gros granulats.
- l'optimisation de la vibration, du traitement thermique éventuel et de la cure (Dupain et al., 2009).

Le problème est donc de concevoir un béton le plus compact possible, et aussi de faire en sorte que la conservation du béton permette de maintenir, voire d'améliorer cette compacité. C'est le but de ce qu'on appelle « la cure » du béton, (Dupain et al., 2009).

Toutes les études de recherche confirment que l'incorporation des additions minérales actifs ou inertes dans les mortiers ou les bétons, (avec des taux bien étudiés et bien optimisés), augmente la compacité et réduit la porosité et la perméabilité ; ce qui influe directement sur la durabilité.

II.4.3. 2.Effet du rapport E/C sur la porosité

Le rapport « eau sur liant » représente avec le degré d'hydratation de liant, les deux facteurs principaux influant sur la porosité de la pâte de liant après durcissement (Mehta et Monteiro, 2013).

Nous aurons, par conséquent, un impact sur la porosité et la résistance du béton, ainsi que sur d'autres caractéristiques que nous développons à présent.

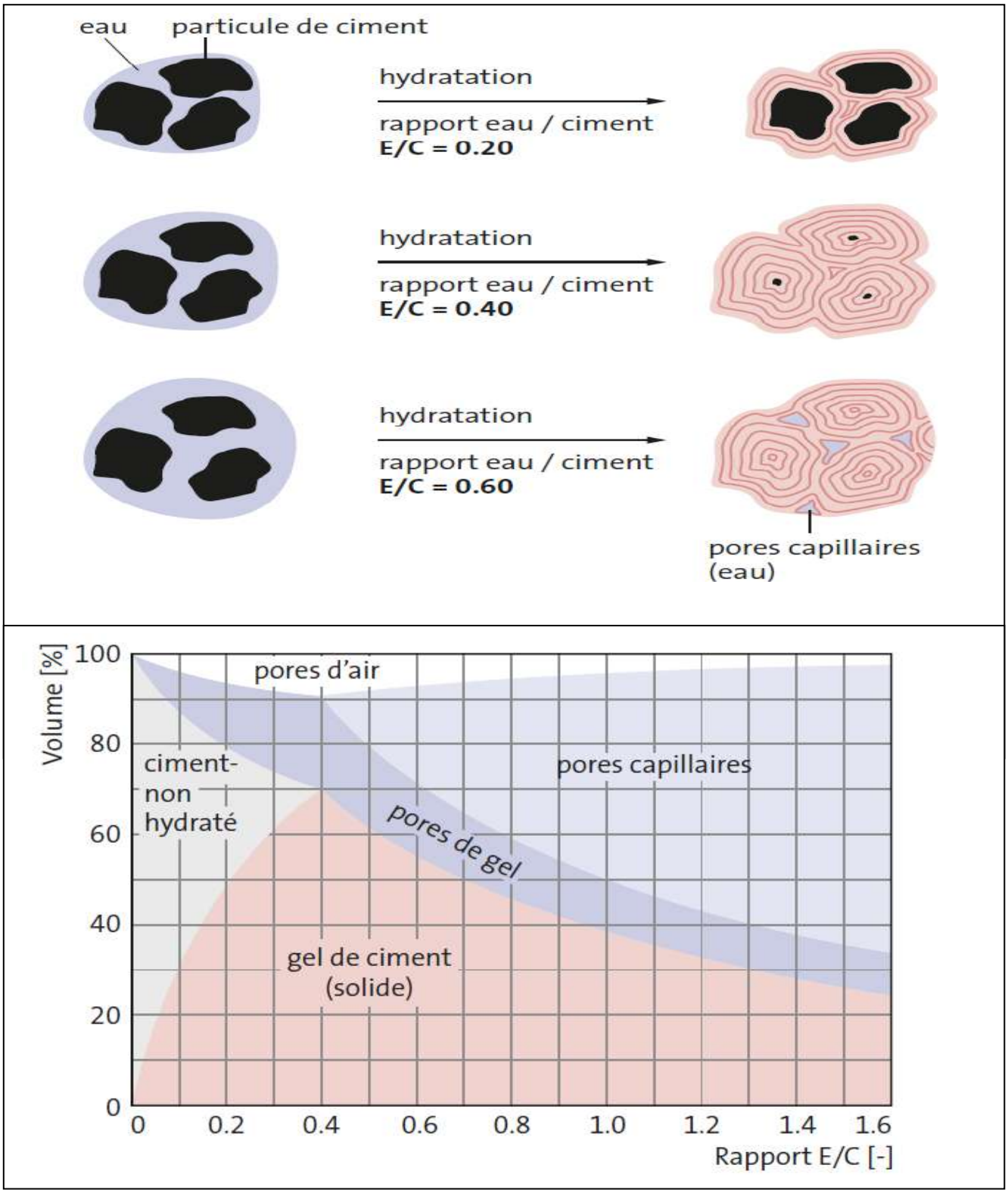


Figure II.15 : Représentation schématique de la création des pores capillaires (en haut) et la composition volumétrique de la pâte de ciment (en bas), en fonction du rapport E/C. (Holcim, 2015),

Le rapport E/C détermine la distance initiale entre les grains anhydres de ciment dans le mélange eau – ciment ; ce qui influe directement sur la porosité initiale et finale de ce mélange. Les figures II.15 et II.16 montrent cette relation croissante entre la porosité et le rapport E/C. Et puisque la compacité influence directement la porosité, alors il faut diminuer au maximum le rapport (E/C) pour avoir une structure plus compacte (Ollivier et Vichot, 2008 ; Holcim, 2015).

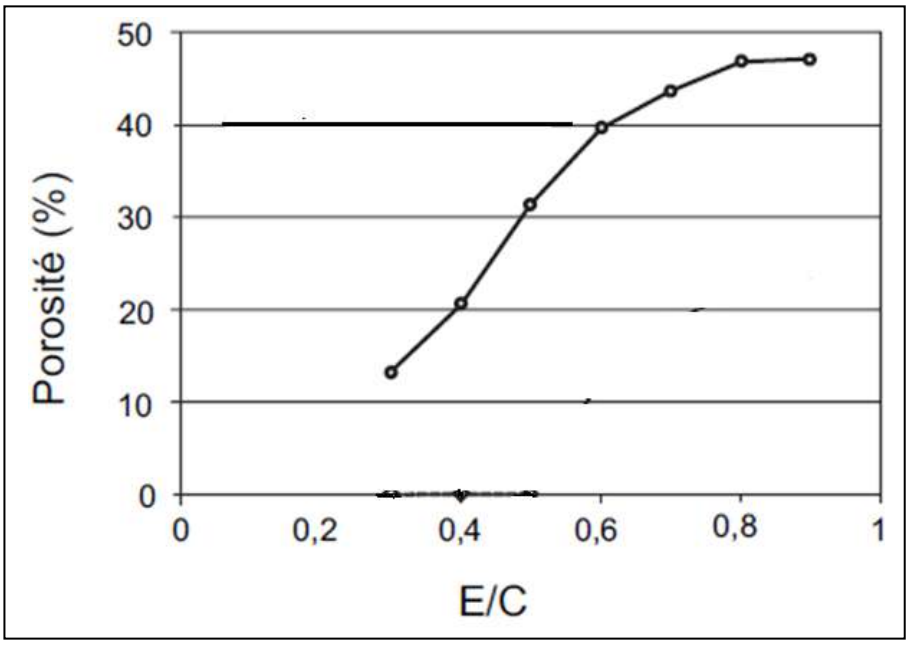


Figure II.16 : Variation de la porosité totale en fonction du rapport E/C dans une pâte de ciment à l'âge de 28 jours (Ollivier et Vichot, 2008).

II.4.4. Absorption capillaire

L'absorption capillaire (ou sorptivité) est la tendance du béton d'aspirer l'eau en l'absence d'une pression hydraulique externe ; est considérée seulement sous la pression atmosphérique. Ceci est censé se produire presque totalement dans les pores capillaires en dehors du gel.

L'eau liquide est tirée dans ces pores par la tension superficielle, juste comme l'eau se lèvera dans un capillaire de verre. L'absorption est le mécanisme principal par lequel le béton sec ou partiellement sec prenne l'eau. Si l'eau contient des produits chimiques nocifs, ceux-ci pénétreront également dans le béton. Cette aspiration est d'autant plus grande que les pores sont nombreux.

L'effet des ajouts minéraux sur la réduction des pores capillaires (tailles et nombres) est prouvé par nombreuses recherches (Kerbouche , 2009; Logbi, 1999 ; Kriker,1992).

II.4.5. Différents aspects d'agressivité

La pâte de ciment a un pH basique de l'ordre de 13. Cette basicité du béton protège les armatures du béton armé dont la corrosion est empêchée aussi longtemps que la peau du béton assure une étanchéité suffisante entre le milieu ambiant et les armatures. Lorsque cette condition est satisfaite alors la peau protège aussi l'ensemble du béton des agressions éventuelles du milieu.

II.4.5.1. Action des eaux agressives

Un ouvrage peut être soumis à de multiples agressions engendrées par l'action des sels ou des gaz en solution dans l'eau ; à l'instar des eaux souterraines, eaux de mer, pluie, etc.. Les eaux peuvent être chargées en sels minéraux les plus divers en fonction des sols traversés. Les milieux les plus agressifs sont soit acides, soit salins (chlorures, nitrates, et surtout sulfates de sodium, de calcium ou de magnésium).

II.4.5.2. Action des sulfates

La détérioration du béton par l'attaque de sulfate est un phénomène couramment observé lorsque les structures sont exposées à des solutions, ou des sols riches en sulfate. Tous les sulfates solubles dans l'eau sont nocifs sur le béton, mais les effets sont classés par ordre de nocivité selon le cation associé (Mg > Na > Ca); ils sont plus graves lorsqu'ils sont associés avec les cations Mg. (Regourd, 1993; Kerbouche, 2009; Jayant, 2013; Khelifa, 2009).

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

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

Les aluminates et la portlandite sont les deux produits les plus sensibles à l'attaque par les sulfates (Kerbouche , 2009 ; Regourd,1993).

L'action des eaux souterraines sulfatées offre le cas le plus simple d'une agression donnant naissance à des composés nouveaux expansifs à partir des constituants du ciment. La

réaction de base est la formation d'éttringite ou sel de Condlot : $C_3A.3CaSO_4.32H_2O$ (Regourd, 1993).

Comme les différents sulfates de calcium (gypse $CaSO_4.2H_2O$, anhydrite $CaSO_4$,), les sulfates de potassium, sodium, magnésium, et ammonium sont agressifs et peuvent donner naissance à un gypse secondaire.

La chaux et l'aluminate tricalcique sont donc, dans le ciment, les phases les plus vulnérables aux eaux sulfatées, l'action sera plus complexe, si elles sont en contact avec l'eau de mer.

L'eau de l'extérieur peut pénétrer dans le réseau de pores et de capillaires du béton ; elle peut également apporter des ions agressifs qui peuvent réagir avec les hydrates et changer leur structure.

II.4.6. Mécanismes d'attaques des sulfates

On distingue deux types d'attaques : les attaques par les sulfates externes présents dans l'environnement du béton et les attaques sulfatiques internes pour lesquelles les sulfates proviennent des composants du béton lui-même, (Figure II.17).

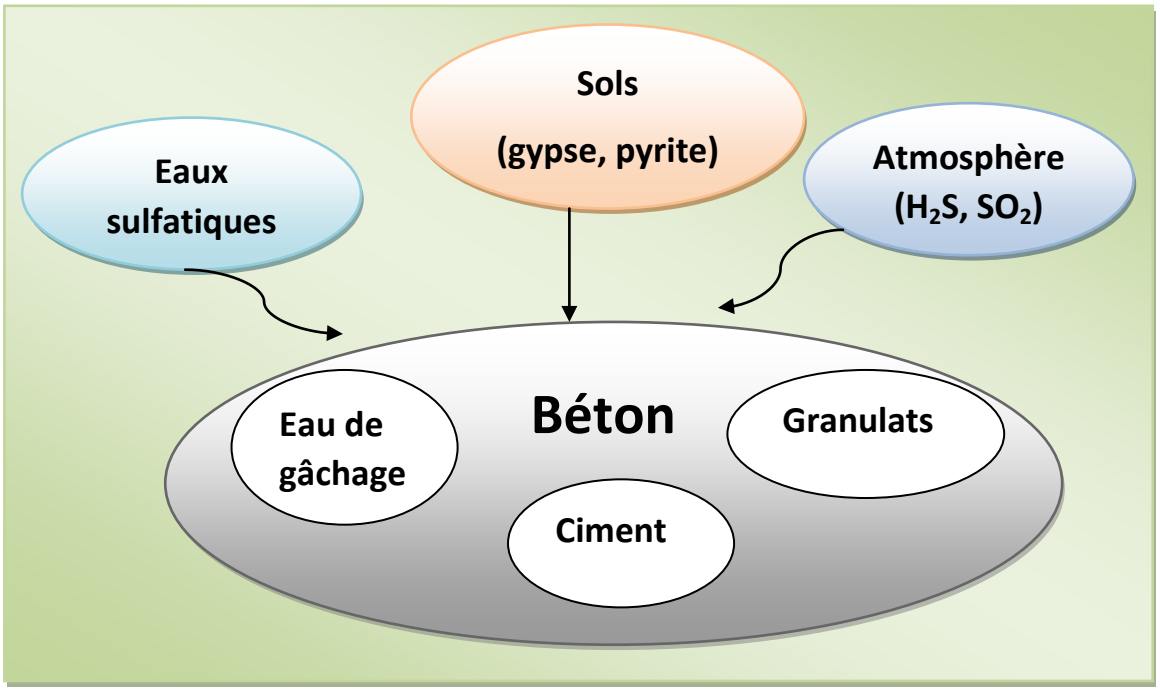


Figure II.17 : Différents types d'agression sulfatique sur le béton (Dierkens, 2011).

Lorsqu'il s'agit d'une attaque par les sulfates provenant de l'extérieur, il y a formation de couches de gypse et d'éttringite secondaire ainsi que la thaumasite à partir de la surface exposée aux sulfates. L'attaque par les sulfates externes est souvent combinée avec l'attaque par le cation correspondant, selon la provenance des sulfates, qui peuvent réagir avec certains granulats ou fillers, ou avec les C-S-H ou la portlandite. Ils peuvent aussi contribuer davantage à la dégradation du béton.

Lorsqu'il s'agit d'une attaque interne par les sulfates, ces derniers proviennent presque uniquement des sulfates de calcium qui se trouvent dans le béton dés sa confection. Par conséquent, ces sulfates sont uniformément répartis dans la pâte hydratée et le seul produit expansif de la réaction est l'éttringite.

L'éttringite secondaire qui est le résultat d'une attaque par les sulfates externes n'est pas seule à endommager le béton. C'est plutôt la formation du gypse qui contribue à la fissuration, la lixiviation et le délaminage des couches superficielles (Dreux et Vesta ; 2007 ; Jayant, 2013 ; Kerbouche, 2009 ; Dierkens, 2011 ; Ollivier et Vichot, 2008).

Dans ce qui suit on exposera les principaux mécanismes d'attaque des différents sulfates :

II.4.6.1.Cas de sulfate de sodium (Na_2SO_4)

A. Formation de gypse secondaire

Les équations ci-dessous nous permettent de comprendre le processus :

$$Ca(OH)_2 + Na_2SO_4 + 2H_2O \longrightarrow CaSO_4.2H_2O + 2NaOH \qquad (II.1)$$

NaOH : alcalinité élevée $\longrightarrow$ Stabilisation des C-S-H

$CaSO_4.2H_2O$: produit expansif mais qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydraté ; il s'agit de peu d'expansion ou de son absence (Kerbouche , 2009 ; Regourd, 1993 ; Ollivier et Vichot, 2008).

B. Formation d'éttringite secondaire

A partir du C_3A anhydre résiduel, nous avons :

$$C_3A + 3\,CaSO_4\,.2H_2O + 26H_2O \longrightarrow C_3A.3CaSO_4.32H_2O \qquad (\text{II.2})$$

A partir des aluminates hydratés (monosulfaluminates), nous avons :

$$C_3A.\,CaSO_4.\,18H_2O + 2Ca(OH)_2 + 2SO_4 + 12H_2O \longrightarrow C_3A.3CaSO_4.32H_2O \qquad (\text{II.3})$$

II.4.6.2.Cas de sulfate de magnésium Mg SO_4 (double action)

Dans l'hypothèse du sulfate de magnésium, nous aurons :

$$Ca\,(OH)_2 + MgSO_4 \longrightarrow CaSO_4 + Mg\,(OH)_2 \qquad (\text{II.4})$$

$Mg(OH)_2$: brucite caractérisée par une faible solubilité et un faible pH

$$C_3A{+}3CaSO_4.2H2O + 26H_2O \longrightarrow C_3A.3CaO_4.32H_2O\ (\text{expansive}) \qquad (\text{II.5})$$

Substitution des ions Ca^{2+} par les ions Mg^{2+} dans les C-S-H :

$$C\text{-}S\text{-}H + MgSO_4 \longrightarrow CaSO_4.2H_2O + (C,M)\text{-}S\text{-}H\ (\text{cohésion faible}) \qquad (\text{II.6})$$

Etant donné la très faible solubilité du Mg $(OH)_2$, cette réaction se poursuit jusqu'à ce qu'elle soit terminée de sorte que, dans certaines conditions, l'attaque par le sulfate de magnésium est plus sévère que celle des autres sulfates.

Une réaction ultérieure entre le $Mg(OH)_2$ et le gel de silice est possible ; elle peut aussi provoquer une détérioration des C-S-H, (Kerbouche , 2009 ; Regourd,1993 ; Ollivier et Vichot, 2008).

Le gypse formé occupe un volume plus grand que la portlandite, sa formation causant ainsi le gonflement et la fissuration de la pâte. Lorsque la concentration en sulfates est assez élevée, le gypse restera stable et de nouveaux cristaux de gypse continueront à se former. Cependant, lorsque l'apport des sulfates est faible, le gypse sera dissous en libérant des ions SO_4^{2-} qui, en réagissant avec des aluminates, formeront de l'éttringite. Cette dernière occupe plus de place que les composants solides à partir desquels elle se forme, causant ainsi l'expansion (Kerbouche, 2009 ; Regourd,1993 ; Ollivier et Vichot, 2008).

Lors d'une attaque du béton par des sulfates externes, sa dégradation se produit par la formation d'éttringite ou de gypse et par la pression et la fissuration conséquentes.

L'agressivité des milieux dans lesquels peuvent se trouver les ouvrages en béton est liée à la présence d'eau et à l'aptitude de celle-ci à réagir avec certains minéraux de la matrice cimentaire du béton. En effet, les agents agressifs dissous dans l'eau constituent une solution chimiquement agressive pour le béton qui peut provoquer plusieurs types de phénomènes lorsque la formulation du béton n'est pas optimisée.

II.4.7.Action des chlorures

L'action des chlorures est spécifique à certains environnements dans lesquels peut se trouver le béton comme les ouvrages soumis aux sels de déverglaçage ou situés en site maritime (zone de marnage, surfaces soumises aux embruns). Les ions chlorures peuvent pénétrer par diffusion ou migrer par capillarité à l'intérieur du béton, franchir la zone d'enrobage, atteindre les armatures, et provoquer des corrosions. Cela se fait par mécanisme de dissolution du métal suivant une réaction d'oxydoréduction:

$$\textbf{Métal} \longrightarrow \textbf{ions métal } M^{n+} \textbf{ + n électrons} \qquad \textbf{(II.7)}$$

Le mécanisme est d'abord ponctuel, corrosion par piqûres. Puis, il est généralisé à toute la surface de l'acier. La vitesse de pénétration des chlorures dépend aussi de la porosité du béton. Elle décroît lorsque le rapport eau/ciment diminue. La corrosion s'amorce dès que la teneur en chlorures au niveau des armatures atteint un certain seuil de dépassivation. Ce seuil est fonction du pH de la solution interstitielle et de la teneur en oxygène au niveau des armatures ; il est de l'ordre de 0,4 à 0,5 % par rapport au poids du ciment. Il est atteint plus rapidement si le béton est carbonaté (Kerbouche , 2009 ; Regourd,1993).

II.4.8. Carbonatation

La carbonatation du béton est due à l'action du dioxyde de carbone (CO_2) qui se trouve dans l'atmosphère (et parfois soluble dans l'eau (acide carbonique H_2CO_3)) sur la chaux libérée lors de l'hydratation des silicates bicalciques (C_2S) et tricalciques (C_3S) pour former le carbonate du calcium ($CaCO_3$) appelé aussi calcite (Dreux et Festa, 2007).

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \longrightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad \text{(II.8)}$$

Cette carbonatation qui progresse dans le béton à partir des faces en contact avec l'atmosphère fait baisser le pH initial compris entre 12 et 13 vers la neutralité (pH de l'ordre

de 9), neutralisant ainsi progressivement l'alcalinité du béton et son rôle passivant sur les armatures qui, n'étant pas plus protégées, se corrodent.

La vitesse de carbonatation dépend de divers facteurs, Elle est notamment fonction de :

- L'humidité ambiante
- La température
- La compacité du béton
- La pollution de l'environnement

Selon le plan pratique, il est donc impératif de:

- confectionner des bétons compacts avec un dosage suffisant en ciment ;
- rechercher un faible rapport E/C ;
- assurer la protection par une cure appliquée immédiatement après mise en œuvre (Dreux et Vesta, 2007 ; Ollivier et Vichot, 2008).

D'après la figure II.18, on remarque que la présence du liquide interstitiel, en quantité suffisante dans la porosité du béton, permet au CO_2 présent dans l'atmosphère sous forme gazeuse de se dissoudre pour former des ions CO_3^{2-} en entraînant une diminution de pH du milieu. Ces ions carbonate se combinent ensuite aux ions Ca^{2+} provenant de la dissolution de la portlandite pour former de la calcite $CaCO_3$ et de l'eau (Ollivier et Vichot, 2008).

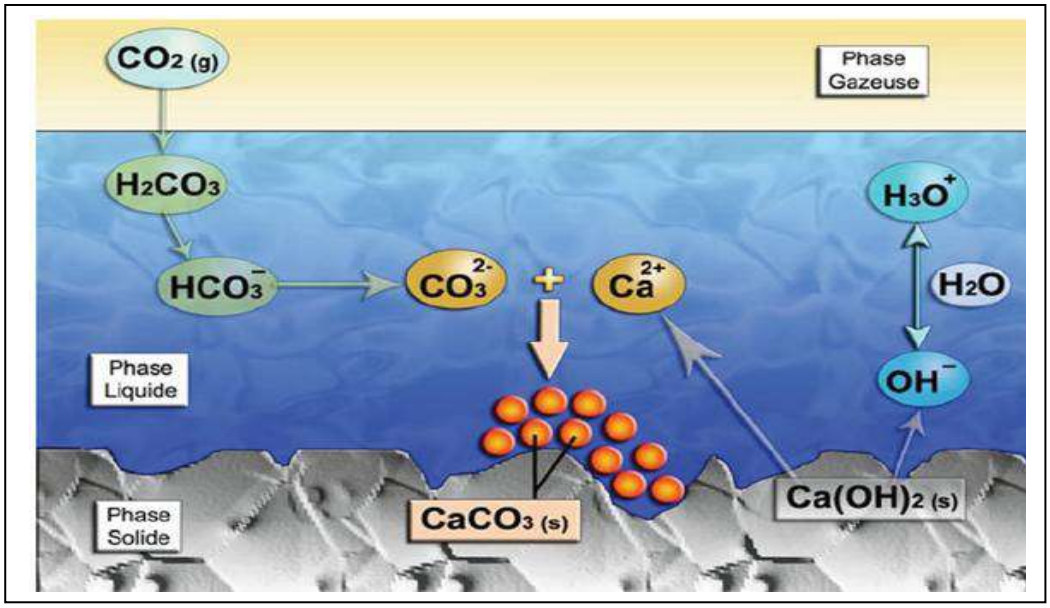


Figure II.18: Mécanisme de carbonatation de $Ca(OH)_2$ (Ollivier et Vichot, 2008).

II.4.9. Influence des ajouts minéraux sur la durabilité du béton

L'étude de l'effet des additions minérales sur la durabilité des bétons et toutes autres structures cimentaires devient un sujet de l'actualité pour les chercheurs. Toutes les études confirment que ces ajouts n'ont pas seulement un impact économique et écologique, mais elles ont aussi, un effet remarquable sur la durabilité du béton.

II.4.9.1. Effet du laitier de haut fourneau

Plusieurs chercheurs ont trouvé que le laitier de haut fourneau a un effet bénéfique sur la durabilité des bétons, notamment a long terme ;

D'autres travaux ont abordé la durabilité des mortiers et des bétons avec laitier. Ils ont conclu que les compacités (sorptivités) et les expansions des mortiers sont améliorées vis-à-vis de l'attaque sulfatique avec des taux de substitution jusqu'à 50%.

Ils ont remarqué aussi qu'au delà de 30% d'incorporation, les performance ne s'améliorent fortement, notamment la résistance mécanique (Hadjsadok et al., 2012).

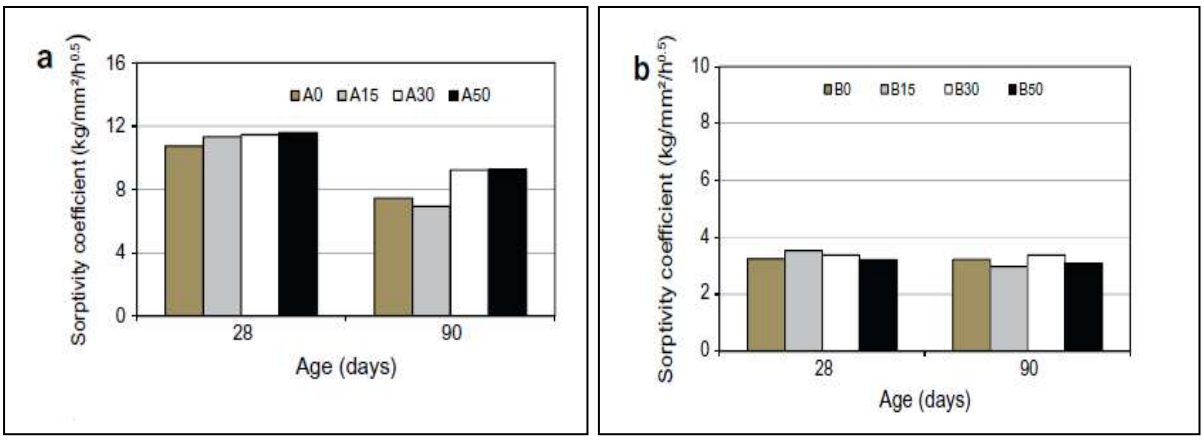


Figure II.19 : Coefficient d'absorption capillaire du béton avec 15, 30, 50% de laitier (a) E/Liant = 0.65 ; (b) E/Liant = 0.42, (Hadjsadok et al, 2012).

Parallèlement, d'autres travaux aboutissent aux mêmes constatations sur les ciments composés (avec laitier). Leurs résultats montrent que les ciments renfermant un taux de laitier autour de 20% (exactement 18,70), immergés dans des solutions sulfatiques (Na_2SO_4, et $MgSO_4$), sont plus performants que les ciment normaux, notamment, vis –à- vis de la perméabilité et la durabilité (Temiz et al., 2007).

D'autre part, Kriker (1992) mentionne que l'incorporation du laitier d'El-Hadjar dans le béton améliore sa compacité

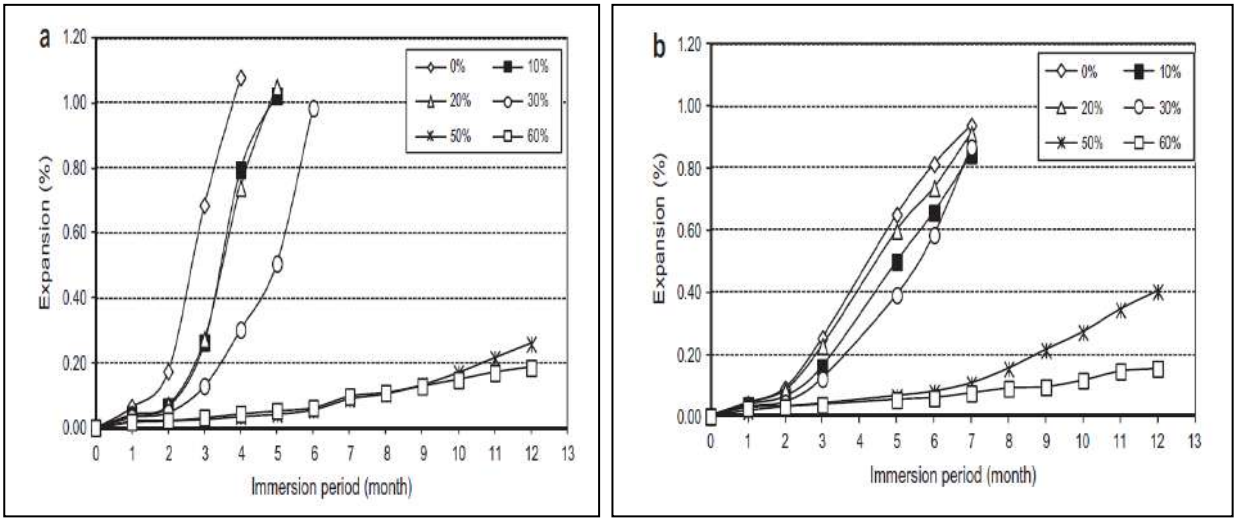


Figure II.20 : Expansion des mortiers immergés dans (a) 5% Na_2SO_4 et (b) 5% $MgSO_4$. (Hadjsadok et al., 2012).

II.4.9.2. Effet de la Pouzzolane naturelle

Dans leurs études sur l'effet de la pouzzolane naturelle sur la durabilité des mortiers, Laoufi et al., (2016), ont constaté que l'incorporation des taux entre (10 et 30%) de pouzzolane naturelle de Béni Saf apporte des gains de masse substantiels ; elle est donc bénéfique pour la résistance chimique du ciment vis-à-vis des ions SO_4^{2-} (Figure II.21).

Ils ont montré aussi que les éprouvettes immergées dans la solution sulfatique 5% Na_2SO_4 (sulfate de sodium) sont sans dégradation apparente ; ce qui peut prouver que les ions sulfate présents dans la solution, n'ont eu aucun effet négatif sur les mortiers pouzzolaniques (Laoufi et al., 2016).

Senhadji. Y. et al (2015) ont mis en évidence, à partir des essais mécaniques, chimiques et calorimétrique sur des mortiers, que l'incorporation de 15 à 25 % de la pouzzolane naturelle de Béni Saf, permet de diminuer d'une façon significative la chaleur d'hydratation du ciment, ce qui réduit l'effet du retrait de la pâte et améliore la durabilité, (Figure II.22) (Senhadji et al., 2015).

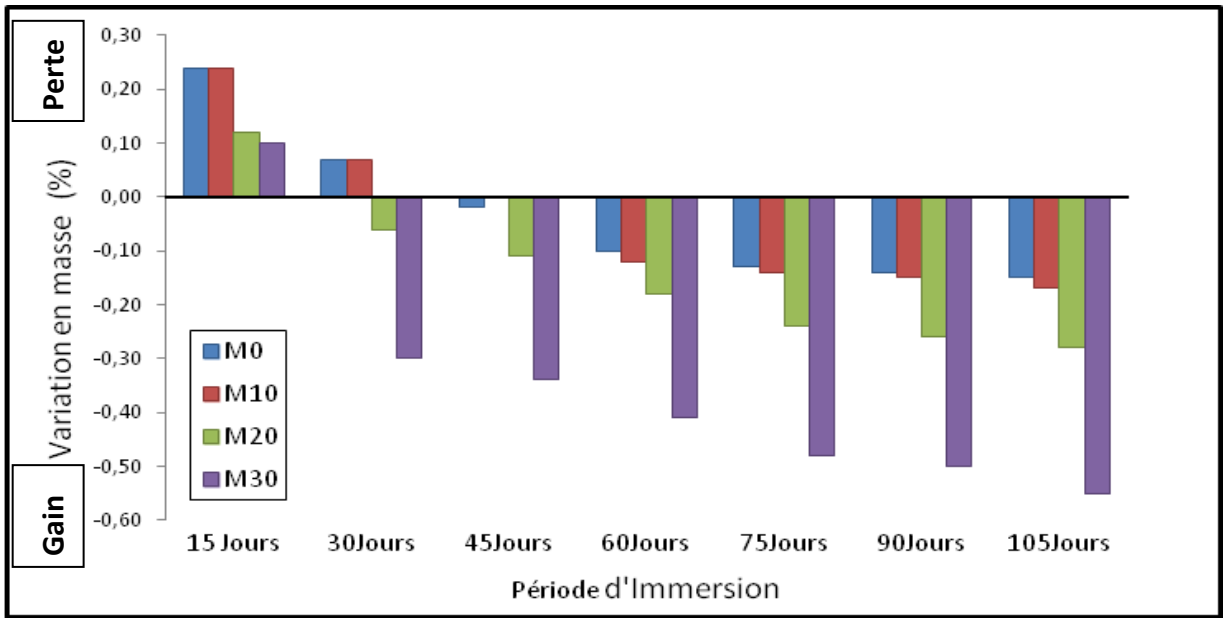


Figure II.21 : Evolution de la masse des mortiers à la pouzzolane naturelle en fonction de la période d'immersion dans une solution de 5% Na_2SO_4, (Laoufi et al., 2016).

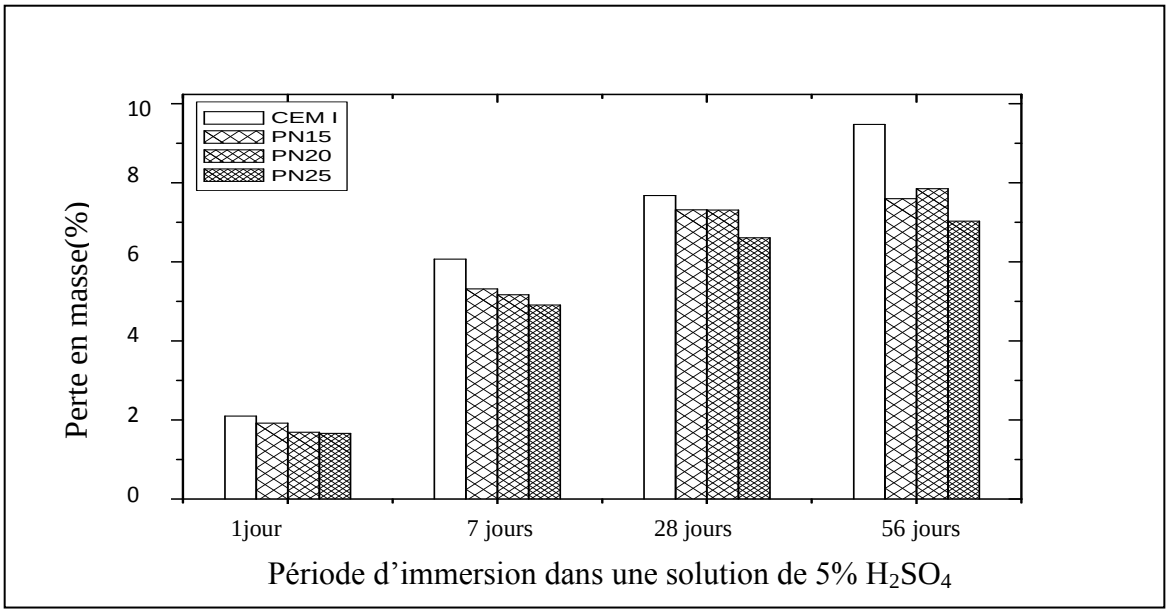


Figure II.22 : Evolution de la perte du poids des mortiers à la pouzzolane de Béni- Saf en fonction de la période d'immersion en 5% H_2SO_4 (Senhadji et al 2015).

Benkaddour et al. (2009) dans leur étude ont trouvé que :

- L'addition de la pouzzolane naturelle et la pouzzolane artificielle améliore le comportement des mortiers soumis aux attaques des acides HCl et H_2SO_4, et ils préconisent :

- 20 % de la pouzzolane artificielle ou de la pouzzolane naturelle pour les solutions d'attaque contenant l'acide chlorhydrique.
- 30 % de pouzzolane artificielle ou de la pouzzolane naturelle pour les solutions d'attaque contenant l'acide sulfurique (Benkaddour et al., 2009).

D'autres travaux sur les ciments composés, notamment avec pouzzolane, montrent que les ciments renfermant des taux de pouzzolane entre 15% et 18%, et qui sont immergés dans des solutions sulfatiques (Na_2SO_4, et $MgSO_4$), sont plus imperméables et plus résistants aux attaques sulfatiques (Temiz et al., 2007).

Les résultats trouvés par Ghrici et al. (2006), indiquent que la résistance aux attaques des acides et des sulfates, ainsi qu'à la pénétration du chlorure, sont largement remarquables pour des ciments à la pouzzolane de Béni Saf , notamment pour des taux d'incorporation de 10 à 30%, (Figure II.23) (Ghrici et al., 2006).

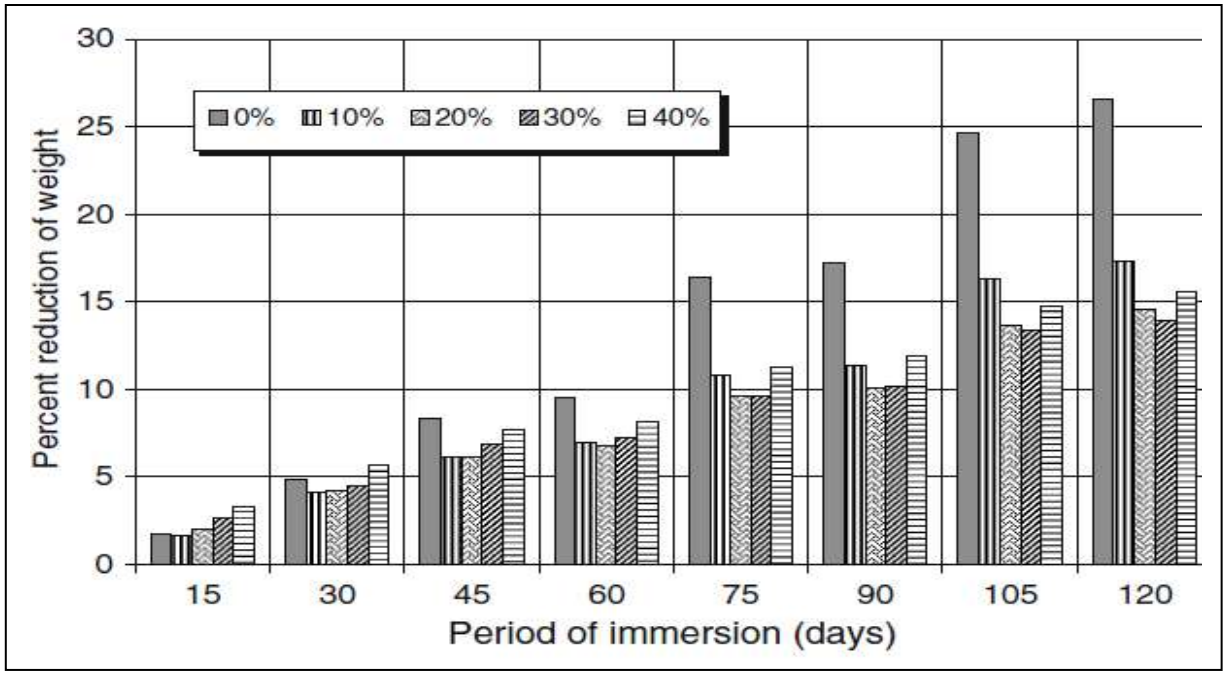


Figure II.23 : Evolution de la perte du poids des mortiers à la pouzzolane de Béni-Saf en fonction de la période d'immersion en 1% HCl, (Ghrici et al., 2006).

II.4.9.3. Effet des fillers calcaires

Dans son projet de recherche Guernouti. Y., a conclu que la substitution des fines argileuses du sable de construction par 10% de fillers calcaires, améliore les propriétés

physico-mécaniques du mortier, malgré que la stabilité chimique dans l'eau de mer et l'eau séléniteuse soit compromise (Guernouti, 2002).

Il est aussi intéressant de rapporter les résultats obtenus par Senhadji Y. et al. Ils ont mis en évidence, à partir des essais mécaniques, chimiques et calorimétrique sur les mortiers, que l'incorporation de 10% des fines calcaires, permet de diminuer d'une façon significative la chaleur d'hydratation du ciment, ce qui réduit l'effet du retrait de la pâte et améliore la durabilité, (figure II.24) (Senhadji et al., 2015).

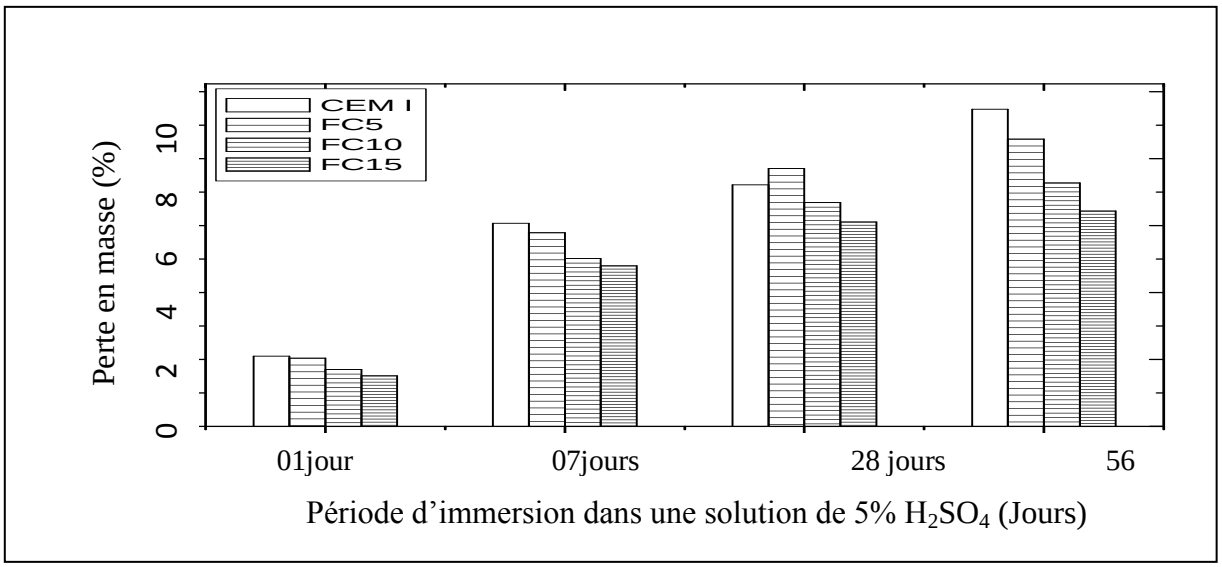


Figure II.24 : Evolution de la perte du poids des mortiers aux fines calcaires en fonction de la période d'immersion en 5% H_2SO_4 (Senhadji et al, 2015).

D'autres résultats édifiants sont à mentionner, cela concerne un projet de recherche dont les résultats confirment que le taux de 10% de calcaire améliore la résistance à l'agressivité des acides sulfuriques et nitriques (Kerbouche, 2009).

II.4.9.4. Effet du sable de dunes broyé

Cependant, pour l'impact du sable de dunes broyé, les travaux de recherche concernant la durabilité demeurent rares et ils sont tous destinés aux performances mécaniques. A partir de cet indice (résistance mécanique), nous pouvons avoir une idée sur la durabilité.

Guettala et Mezghiche (2011), ont constaté, qu'après 28 jours, les résistances à la compression des mortiers renfermant 5, 10 et 15 % du sable de dune finement broyé sont supérieures par rapport au ciment Portland. De surcroît, un effet optimal pour un pourcentage

de l'ordre de 5 à 10 % quel que soit le rapport eau/liant et la finesse de la poudre du sable de dune est rapporté (Figure II.25) (Guettala et Mezghiche, 2011).

Sur un autre registre, il est intéressant d'examiner les mélanges préparés à base des ingrédients suivants :

- 40% de sable de dunes
- 60% de sable alluvionnaire
- 1.0% de fibres métalliques résultant de déchets pneumatiques,

Cette association permet une diminution du retrait et une amélioration de la compression et de la flexion. Par contre la perte en poids est plus significative pour les bétons de sable fibrés par rapport aux bétons de sable sans fibres (Belferrag, 2016).

A partir de ces résultats, il est clair que le sable de dunes a un impact positif sur la durabilité des bétons.

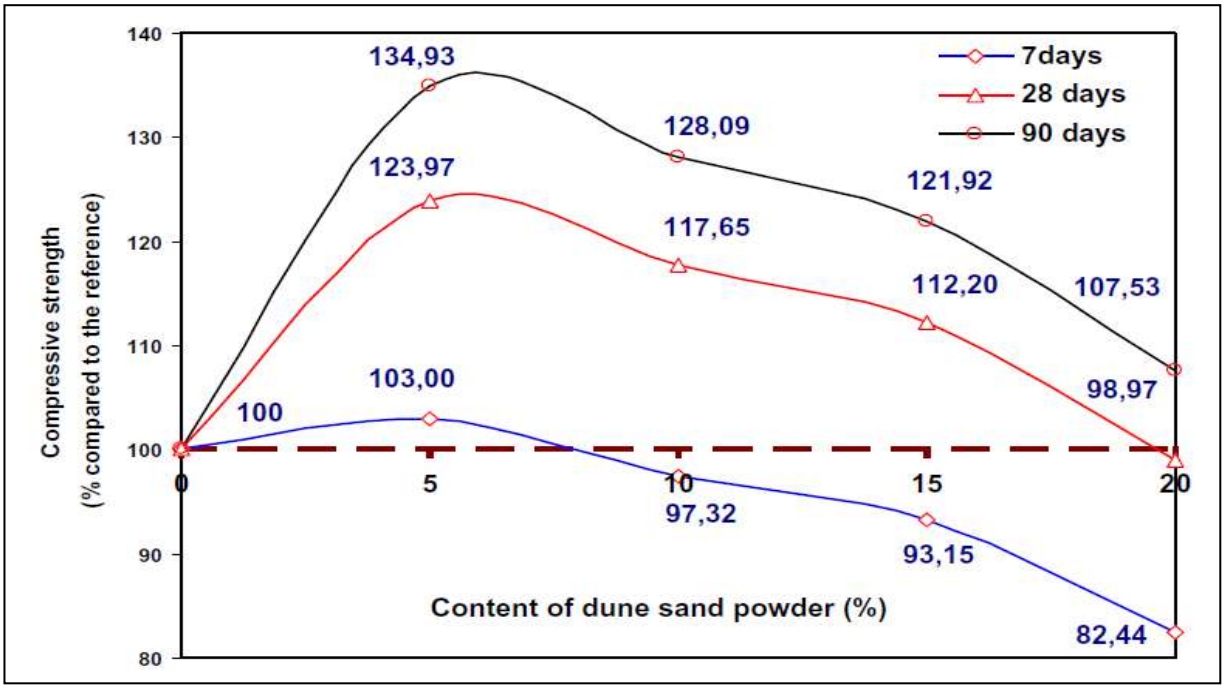
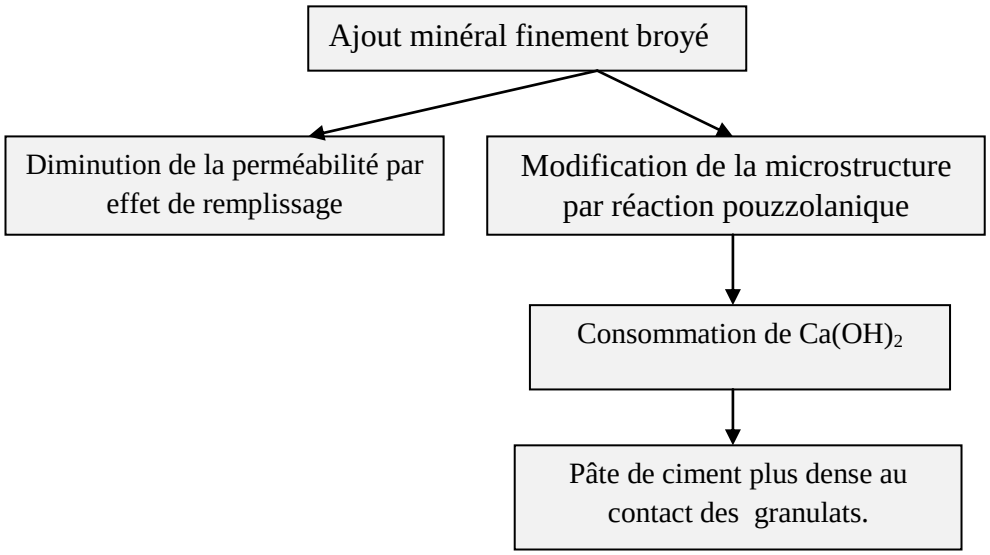


Figure II.25: Effet de la teneur en sable de dunes broyé sur la résistance à la compression du mortier (finesse du sable broyé = 4000 cm2/g, E/Liant = 0.25) (Guettala et Mezghiche, 2011).

II.5. CONCLUSION

L'incorporation des ajouts minéraux actifs et inertes dans les matériaux cimentaires, présente de bonnes caractéristiques du point de vue économique aussi bien que physico-mécanique et durabilité.

Sur le plan économique ces ajouts présentent un faible coût énergétique dans l'industrie du ciment. Sur le plan physico-mécanique ces matériaux réagissent par leur finesse et par leur activité pouzzolanique en engendrant un squelette plus compact et par conséquent un mortier ou béton plus résistant ; et une durabilité plus accrue. Cet effet peut être schématisé comme suit :



En balayant toute synthèse bibliographique, il ressort la pertinence et l'importance d'étudier convenablement l'effet de ces ajouts sur les performances de ces matériaux.
Notre présent travail s'inscrit dans la continuité des thématiques abordées. Plus précisément dans notre projet, nous nous focaliserons sur quatre ajouts minéraux locaux à savoir :

- le laitier d'El-Hadjar,
- la pouzzolane de Béni Saf,
- le calcaire de Hassi Messaoud
- le sable de dunes d'El-Oued

Ces additifs ont été broyés à une finesse relativement similaire à celle du ciment et incorporés à différentes teneurs dans le mortier afin d'améliorer ses caractéristiques physiques, mécaniques ainsi que sa durabilité.

CHAPITRE III

CARACTERISATION DES MATERIAUX ET METHODES D'ESSAIS

CHAPITRE III

CARACTERISATION DES MATERIAUX ET METHODES D'ESSAIS

III.1. INTRODUCTION

L'objet des deux précédents chapitres est consacré plutôt à une approche cognitive ; tandis que ce chapitre est dédié à une approche méthodologique. En effet, nous abordons toute la panoplie des outils qui nous permettent la caractérisation des matériaux et les méthodes d'essais.

La normalisation des modes d'essais et de confection du mortier dans un laboratoire de recherche est une condition nécessaire pour l'obtention d'un mortier « normal » ou tout autre matériau cimentaire. Ce matériau devrait satisfaire aux normes en vigueur. Pour répondre à cet impératif, il faut que nous puissions comparer ses qualités et ses caractéristiques avec des résultats obtenus ailleurs.

Cependant, dans un essai de recherche, nous pouvons affirmer que l'ensemble du processus est normalisé. En effet, la première étape de ce processus concerne indubitablement le choix des matériaux. Rappelons que lors des chapitres précédents, nous avons qualifié les

matériaux cimentaires sur le plan physico-chimique, granulométrique… Enfin, la dernière étape s'achève par l'examen et l'écrasement de l'éprouvette. Cette étape sera abordée au cours du dernier chapitre.

Nous nous focalisons à présent sur le type d'essais qui est évidemment normalisé. Dans les normes, notamment la norme AFNOR**,** nous distinguons des différents types d'essais (NF P18-102) :

1) Essais de recherche
2) Essais d'étude de convenance et de contrôle.
3) Essais d'information.
4) Essais de contrôle non destructif

L'essai de recherche est défini par les normes comme suit :
« C'est un essai exécuté entièrement en laboratoire destiné à étudier l'influence de certains paramètres sur les caractéristiques du béton. », (Dreux, 1985).

Pour les besoins de nos travaux, le programme d'essais de caractérisation physique, chimique et mécanique a été réalisé au sein des laboratoires et des établissements suivants :

- Laboratoire de génie civil de l'université de Ouargla.
- Laboratoire d'exploitation et de valorisation des ressources naturelles dans les zones arides (LEVRNZA- Ouargla).
- Laboratoire de génie civil de l'école nationale polytechnique (Alger).
- Laboratoire LTPS de Ouargla et El-Oued.
- Laboratoire du contrôle de qualité des cimenteries de Sour- El Ghouzlène- Bouira et Ain Lekbira -Sétif.
- L'analyse par DRX et l'examen sous MEB sont effectués au département des procédés technologiques avancés et gestion des projets du Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA, Alger).

Pour la fiabilité de nos résultats, nous nous imposons de réaliser tous les essais dans les conditions climatiques préconisées par les normes en vigueur, particulièrement la température et l'humidité.

III.2.MATERIAUX UTILISES

III.2.1. Le ciment Portland

Le ciment portland utilisé est un CEM I 42.5/N de la cimenterie (SOTACIB Kairouan-Tunisie), commercialisé et autorisé en Algérie. Ce ciment a pour caractéristiques :

- Surface spécifique de Blaine (finesse) SSB = 3600 cm²/g.
- Densité = 3 g/cm^3 .

Figure III.1 : Ciment Portland utilisé (CEMI).

II.2.1.1. Composition chimique et minéralogique du ciment utilisé

L'analyse chimique du ciment a été effectuée au laboratoire de contrôle de qualité de la cimenterie de Sour-El-ghouzlane (Bouira), et elle est vérifiée par l'étude effectuée par Khouadjia et al. sur le même ciment (Khouadjia et al., 2015).

Les résultats obtenus sont rapportés au tableau suivant :

Tableau III.1 : Composition chimique et minéralogique du ciment utilisé

Composition chimique								
Elément	**SiO_2**	**Al_2O_3**	**Fe_2O_3**	**CaO**	**MgO**	**SO_3**	**P.A.F.**	**CaO libre**
%	20,27	5,30	3,38	61.40	1.75	2,26	4,46	0,62
Composition minéralogique (selon Bogue)								
% C_3S		% C_2S		% C_3A		% C_4AF		
49,64		20,95		8,33		10,27		

La composition minéralogique du ciment a été déduite à partir des équations de BOGUE (1929), (Duriez et Arrambide, 1961 ; Signes-Frehe et al.1996):

- % C_3S = 4.07 CaO – 7.6 SiO_2 – 1.43 Fe_2O_3 – 6.72 Al_2O_3 – 2.55 SO_3
- % C_2S = 2.87 SiO_2 – 0.75 C_3S
- % C_3A = 2.65 Al_2O_3 – 1.69 Fe_2O_3
- % C_4AF = 3.04 Fe_2O_3

III.2.2. Les ajouts minéraux actifs et inertes

Rappelons que les ajouts minéraux actifs (hydrauliques) sont des substances naturelles ou artificielles, qui, finement broyées, mélangées avec la chaux, gâchées avec l'eau développent des propriétés hydrauliques. Lorsqu'ils sont mélangés à un ciment portland, ils améliorent sa résistance à l'eau.

Tandis que les ajouts sont dits inertes s'ils n'ont aucune action chimique sur les ciments en présence d'eau. Mais, en même temps, ils agissent principalement, grâce à leurs finesses, par leurs propriétés physiques sur certaines qualités du liant et du béton. Ces qualités sont principalement la maniabilité, la perméabilité (Soroka, 2004 ; Komar, 1978 ; Gorisse,1978).

III.2.2.1. Le laitier d'El-Hadjar

Le laitier granulé utilisé dans notre étude nous a été fourni par le complexe sidérurgique d'El-Hadjar (ANNABA). Nous pouvons le caractériser comme suit :

- Formé d'un sable de granulométrie 0-3 mm,
- Couleur claire,
- Masse volumique apparente 1g/cm^3,
- Masse volumique absolue 2.9 g/cm^3.

A- Composition chimique du laitier granulé d'El-Hadjar

L'analyse chimique des ajouts a été effectuée au laboratoire de contrôle de qualité de la cimenterie de Ain-Lekbira (Sétif). La composition chimique du laitier est donnée au tableau suivant:

Tableau III.2 : Composition chimique du laitier d'El-Hadjar

Elément	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	P.A.F
%	36,60	6,38	6,94	37,75	3,77	0,04	0,72

Dans leurs travaux de recherche sur le laitier de haut fourneau d'El-Hadjar, Hadjsadok et al (2012), et Kriker. A (1992), ont récapitulé les différents indices chimiques (d'hydraulicité et de basicité) appréciant la qualité du laitier dans le tableau suivant (Hadjsadok et al, 2012 ; Chabi et al, 2004 ; Kriker, 1992) :

Tableau III.3 : Exigence pour de bonnes performances de laitier (Hadjsadok et al., 2012 ; Chabi et al., 2004 ; Kriker, 1992)

Indices chimiques	Valeurs calculées	Exigence pour de bonnes performances
$I_1 = (CaO + Al_2O_3 + MgO)/SiO_2$ (Norme BS 6699, (1986))	**1.31**	1.3–1.4
$I_2 = (CaO + 0.56Al_2O_3 + 1.4MgO)/SiO_2$	1,27	>1.65
$I_3 = (CaO + MgO + 2/3Al_2O_3)/(SiO_2 + 1/3Al_2O_3)$	**1,18**	>1
$I_4 = CaO/SiO_2$ (Module d'activité)	**1,03**	Max. 1.4
$I_5 = (CaO + MgO)/(SiO_2 + Al_2O_3)$ (Module de basicité)	**0,97**	1.0–1.3
$I_6 = (CaO + MgO)/SiO_2$	1,13	>1.4
$I_7 = \frac{CaO + CaS + \frac{1}{2}MgO + Al_2O_3}{SiO_2 + MnO}$ (Module de Keil)	1,25	1,5-1,9

B- Traitement et broyage du laitier granulé

Avant le broyage, le laitier a subi un séchage dans l'étuve à 100°C pendant quelques heures. Puis on le broie pendant presque une heure pour obtenir la finesse désirée (SSB = 4000 cm^2/g) dans un broyeur semi-industriel à boulets.

III.2.2.2. La pouzzolane de Béni Saf

La pouzzolane utilisée est une pouzzolane naturelle de Béni Saf (Aïn Témouchent), il s'agit d'une roche volcanique effusive à composition surtout feldspathique (donc siliceuse), à structure alvéolaire. Elle nous a été fournie par la cimenterie de Ain-Lekbira (Sétif).

A- Composition chimique de la pouzzolane de Béni Saf

L'analyse chimique de la pouzzolane a donné les résultats suivants :

Tableau III.4: Composition chimique de la pouzzolane de Béni Saf

Elément	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	P.A.F
%	43,70	14,90	9,14	14,14	4,52	0,54	/

Selon ces résultats, nous pouvons affirmer que la pouzzolane de Béni Saf est peu calcique. En effet, sa teneur en chaux (CaO) est autour de 15 % , ce qui permet son utilisation normale comme ajout pouzzolanique au ciment.

Les teneurs en (SiO_2) et (Al_2O_3) sont elles aussi satisfaisantes et répondent (dans les limites) aux critères demandés pour une bonne pouzzolane (Dron et Voinovitch, 1993).

Ces critères sont :

- % (Al_2O_3) $\approx$ 15%. (dans les limites)
- 45% $\leq$ %(SiO_2) $\leq$ 70%. (dans les limites)
- % (SiO_2)- %(CaO) = 29,56% $<$ 34% . (la teneur en verre n'est pas appréciable mais elle reste proche des recommandations ; (Dron et Voinovitch, 1993)).

L'aptitude de cette pouzzolane à fixer la chaux, $Ca(OH)_2$ est d'environ 100mg/g, (Chabi et al, 2004).

B- traitement et Broyage de la pouzzolane de Béni Saf

Le traitement de la pouzzolane de Béni Saf utilisée comporte les étapes suivantes :

- Séchage dans l'étuve à 100°C pendant quelques heures.
- Broyage jusqu'à la finesse désirée.

Après le broyage nous avons obtenu une finesse de : SSB = 5380cm^2/g. Le broyage et le traitement des deux ajouts à savoir : le laitier et la pouzzolane ont été effectués au laboratoire de contrôle de qualité de la cimenterie de Ain - Lekbira de Sétif.

III.2.2.3. Le calcaire de Hassi Messaoud

Le calcaire utilisé nous a été fourni par des carrières de granulats pour béton de Hassi Messaoud (Ouargla). Ses caractéristiques se déclinent comme suit :

- Formé d'un sable de granulométrie 0-3 mm
- Couleur blanche
- Masse volumique absolue de 2.6 g/cm^3.

A- Composition chimique du calcaire de Hassi Messaoud

La composition chimique du calcaire de ***Hassi Messaoud***, est donnée au tableau suivant :

Tableau III.5 : Composition chimique du calcaire de Hassi Messaoud

Elément	**SiO2**	**Al_2O_3**	**Fe_2O_3**	**CaO**	**MgO**	**P.A.F**	**SO_3**
%	0,16	trace	trace	**55,94**	trace	**43.95**	/

Nous remarquons que ce calcaire a une teneur excellente en ($CaCO_3$).

B- Traitement et tamisage du calcaire

Le traitement du calcaire a été effectué en trois étapes :

1- La matière est séchée à 100°C dans l'étuve.

2- Broyage dans un broyeur à boulet jusqu'à la finesse désirée.

3- La matière est tamisée dans un tamis de 0,08mm (80 µm) afin d'obtenir une poudre de finesse acceptable proche de celle du ciment, pour l'utilisation comme filler.

III.2.2.4. Le sable de dunes d'El-Oued

Le sable de dune utilisé est celui de la région de Guémar (W. d'El-Oued). Les échantillons ont été prélevés de deux sites différents (Figure II.2), puis ils sont mélangés, homogénéisés et broyés avant d'être utilisés.

A- Composition chimique

L'analyse chimique du sable de dunes a été effectuée au laboratoire de contrôle de qualité de la cimenterie de Sour-El-ghouzlane (Bouira). Cette analyse a montré que le constituant majeur du sable de dune est l'oxyde de silicium (le silice ou le quartz ;SiO_2) .
Dans le tableau suivant on donne la composition chimique de ce sable :

Tableau III.6: Composition chimique du sable des dunes d'El-Oued

Elément	**SiO_2**	**Al_2O_3**	**Fe_2O_3**	**CaO**	**MgO**	**SO_3**	**P.A.F.**	**Na_2O**
%	77,95	0,92	Trace	10,54	1,15	0,23	6,91	0,62

B- Traitement et broyage

Avant le broyage, le sable de dune a subi un séchage dans l'étuve à 100°C pendant quelques heures. Puis on le broie dans un broyeur à boulets jusqu'à la finesse désirée. Après broyage, le sable de dune est tamisé dans un tamis de 0,08mm (80 µm) afin d'obtenir une poudre sableuse de finesse voisine à celle du ciment utilisé.

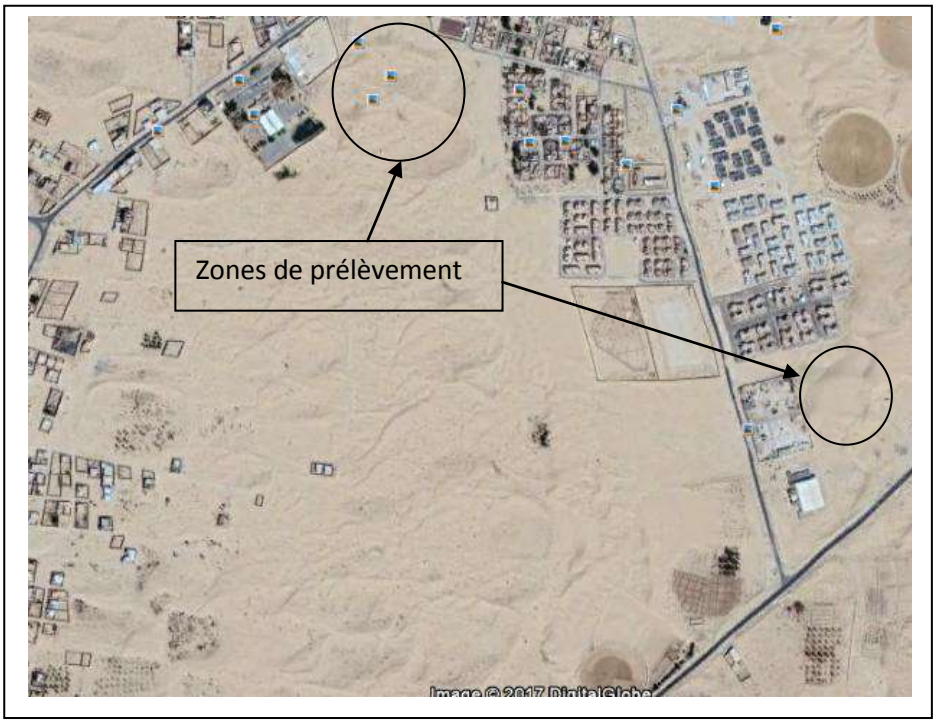


Figure III.2 : Zones de prélèvement du sable de dunes (Guémar- El-oued)

III.2.3. Le sable de construction

Le sable de construction utilisé est un sable alluvionnaire d'Assila (Sidi-Khlil, Wilaya d'El-Oued), dont l'analyse granulométrique est illustrée sur la figure III.3.

III.2.3.1. Caractérisation et choix du sable de construction

Le sable a une influence directe sur les caractéristiques physiques et mécaniques du mortier frais et durci. Pour avoir donc un mortier maniable, résistant et durable ; il est impératif de caractériser avec rigueur le sable.

La caractérisation et le choix du sable font l'objet d'une série d'essais sur plusieurs échantillons de différentes provenances. Ces essais nous servent à déterminer les

caractéristiques granulométriques et physiques du sable. Dans ce qui suit nous présentons quelques résultats des essais de caractérisation du sable choisi.

III.2.3.2. Essai d'équivalent de sable

Cet essai est régi par la norme NF P18 -598 ; l'équivalent de sable est d'autant plus élevé que la teneur en argile est plus faible. Nous avons trouvé les valeurs suivantes

- E.S à vue = 80
- E.S à piston = 77

} Le sable est propre et convient bien aux mortiers de qualité.

III.2.3.3. Masse volumique apparente et absolue du sable

Pour la déterminer il faut, après avoir pesé un échantillon de sable sec, déterminer son volume. Pour le sable utilisé, les résultats sont :

- $Mv_{apparente} = 1.585\ g/cm^3$
- $Mv_{absolue} = 2.488\ g/cm^3$

III.2.3.4.Analyse granulométrique

Quant à l'analyse granulométrique, elle est régie par la norme NF EN 933-1, et elle est résumée par le graphe ci-dessous :

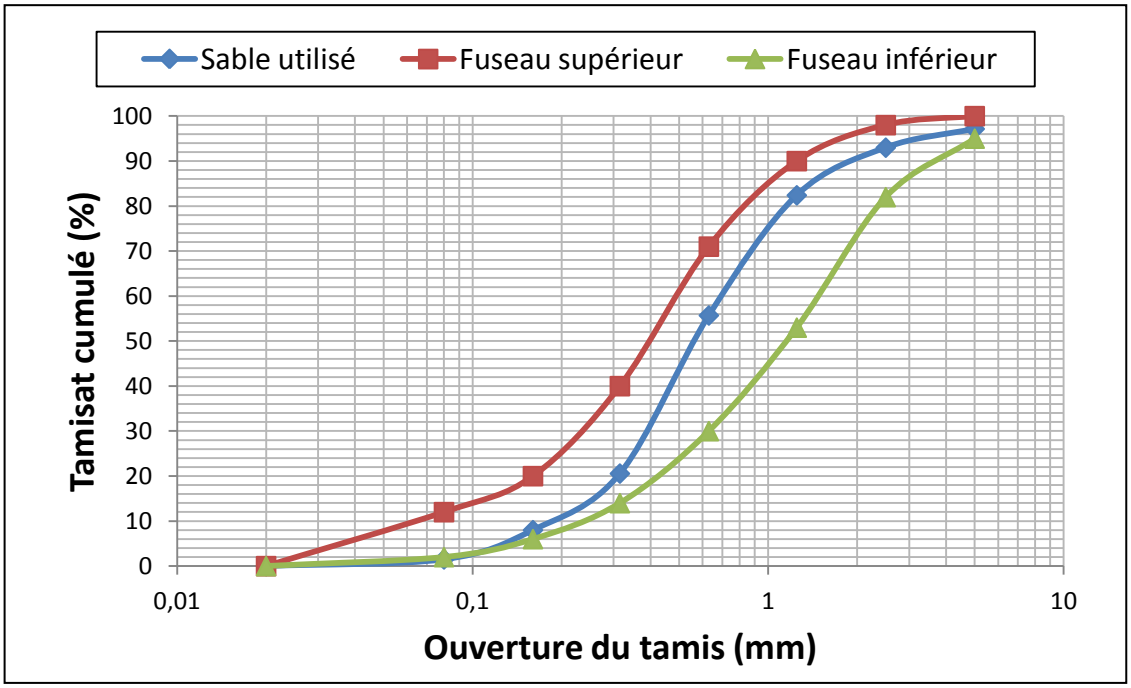


Figure III.3 : Analyse granulométrique du sable alluvionnaire utilisé

III.2.3.3.Module de finesse

Le module de finesse d'un sable est égale au 1/100e de la somme des refus exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série suivante (Norme NF P 18 -304 /EN 12620) :

0.16 – 0.315 – 0.63 – 1.25 – 2.5- 5 mm

Pour le sable utilisé dans nos travaux, nous avons trouvé : Mf = 2.43.

Selon les normes, nous constatons que ce sable convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités (Dreux et Festa,2007 ; Lesage,1993).

Tableau III.7 : Récapitulation des résultats des essais de caractérisation du sable alluvionnaire (de construction)

Caractéristique physique		**Valeurs**
Masse volumique absolue (g/cm^3)		2.488
Masse volumique apparente (g/cm^3)		1.585
Equivalent de Sable	**ES moyen (à vue) (%)**	80
	ES à Piston (%)	77
Module de finesse		2.43
Teneur en SO_3 (%)		0,37

III.3. METODES D'ANALYSE ET D'ESSAIS

III.3.1.Optimisation des taux d'incorporation des ajouts

Rappelons que les ajouts sont incorporés en pourcentage de masse par rapport au poids du ciment utilisé.

Cette optimisation se base sur l'effet des ajouts minéraux sur les deux critères suivants:

1. les performances mécaniques.
2. la durabilité et la résistance aux agressions chimiques.

- Concernant le premier point, nous avons entamé un projet de recherche (thèse de magister) sur l'effet des trois ajouts minéraux locaux ; actifs et inertes sur les caractéristiques physico-mécaniques du béton. Nous avons choisi deux ajouts actifs (le laitier d'El-Hadjar (Annaba) et le tuf de Zemmouri (Boumerdès)) et un ajout inerte (le calcaire de Meftah (Blida)). Ces trois ajouts sont broyés à différentes finesses (5000, 7000, 8500 cm^2/g), et incorporés dans le ciment avec des différentes teneurs (5%, 12,5% et 20%). Nous avons constaté que 5% de tuf ou de calcaire et 12,5% de laitier avec la finesse la plus élevée (8500 cm^2/g) ont donné des propriétés plus performantes que celles du témoin ; c'était le résultat le plus significatif du projet (Logbi, 1999).

- Concernant la durabilité, nous avons étudié l'effet des trois ajouts sur la résistance des mortiers à l'agressivité des différentes nappes phréatiques de la région de Ouargla. Dans cette étude nous avons changé le tuf de Zemmouri par la pouzzolane de Béni Saf. L'étude a été effectuée au sein du laboratoire de valorisation des ressources naturelles dans les zones arides (LVRNZA-Ouargla).

  Nous avons constaté que 20% de laitier, 15% de pouzzolane et 10% de fillers calcaires ont présenté de bonnes performances dans les deux volés ; résistance mécanique et durabilité (Logbi et al., 2017).

- De plus, une autre optimisation a été faite sur la lumière des études précédemment citées, en se basant sur les résultats des recherches récentes, notamment pour le sable de dunes broyé.

Dans ce qui suit nous exposons d'une manière synthétique quelques constatations et résultats trouvés par certains chercheurs afin d'aboutir à des taux d'incorporations optimales pour la réalisation de notre programme expérimental. Cela concerne le domaine des additions minérales actives et inertes ; notamment le laitier, la pouzzolane naturelle, les fillers calcaires et le sable de dune broyé.

III.3.1.1. Optimisation du taux d'incorporation du laitier de haut fourneau

Avec le protocole expérimental suivant, notamment des conditions autoclave et avec 20% de laitier de haut fourneau broyé ; la résistance mécanique est améliorée pour des mortiers contenant 30% sable de dune broyé (Alhozaimy et al, 2012).

Certains travaux relatifs à d'autres approches performantielles ont retenu notre attention, en l'occurrence la durabilité des mortiers et des bétons avec laitier. Il a été prouvé que les mortiers sont améliorés vis-à-vis de l'attaque sulfatique avec des taux de substitution jusqu'à 30%. En revanche, au delà de ce pourcentage les performances ne s'améliorent pas trop (Hadjsadok et al, 2012).

Une autre étude non moins intéressante sur les ciments composés avec un taux de laitier de 20% environ, plus précisément de 18.7%, immergés dans des solutions sulfuriques sulfatiques (Na_2SO_4, et $MgSO_4$), sont plus performants que les ciment normaux, notamment, vis –à- vis de la perméabilité et la durabilité (Temiz et al., 2007).

Sachant que les ajouts sont protéiformes et inhérents aux applications des matériaux cimentaires, une étude a montré que la substitution des fines argileuses du sable par 15% du laitier d'El-Hadjar donne un mortier plus performant que celle du témoin (Guernouti, 2002).

Dans le cadre d'un précédent travail, nous avons montré qu'un taux de 12,5 % de laitier, et ce par rapport au poids du ciment présentait un optimum pour l'amélioration de la résistance mécanique et les caractéristiques physico-chimiques du béton (Logbi, 1999).

Sur un autre registre, la limitation du taux d'incorporation du laitier d'El-Hadjar dans le béton à 30% vue sa moyenne hydraulicité (Kriker. A 1992).

Enfin, Bougara et al, (2009), ont conclu que l'incorporation de 30 à 50% avec des finesses différentes du laitier d'El-Hadjar améliore les performances du mortier. (Bougara et al, 2009).

III.3.1.2. Optimisation du taux d'incorporation de la pouzzolane naturelle

Une étude récente s'est penchée sur la pouzzolane naturelle de Béni-Saf comme additif, les auteurs ont constaté que l'incorporation des taux entre 10 et 30% de ce type de pouzzolane naturelle apporte des gains de masse substantiels ; par conséquent cette action est bénéfique pour la résistance chimique du ciment vis-à-vis des ions SO_4^{2-}. Ils ont montré aussi que les éprouvettes immergées dans la solution sulfatique 5% Na_2SO_4 (sulfate de sodium) sont sans dégradation apparente, ce qui peut prouver que les ions sulfate présents dans la solution, n'ont eu aucun effet négatif sur les mortiers pouzzolaniques (Laoufi et al, 2016).

En prenant le même genre d'ajout et en changeant son taux, il a été mis en évidence, à partir des essais mécaniques, chimiques et calorimétriques sur des mortiers, que l'incorporation de 20% de la pouzzolane naturelle de Béni Saf, permet de diminuer d'une façon significative la chaleur d'hydratation du ciment. Deux conséquences notoires résultent de cette situation, à savoir la réduction de l'effet du retrait de la pâte et l'amélioration de la durabilité (Senhadji et al 2015).

Il a été également établi que l'ajout de 30% de pouzzolane naturelle de Béni Saf donne des résistances très proches de celles du témoin à partir de l'âge de 28 jours. Les taux de 10 %, 20 % et 40% donnent des résultats légèrement différents à partir de l'âge 28 jours, en d'autres termes les résistances sont légèrement plus petites (Kerbouche et al, 2009).

D'autres travaux ont expérimenté l'ajout de 10 à 20% de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf ou la pouzzolane artificielle, à base de la vase calcinée du barrage de Ferrgoug situé à Mascara, pour améliorer la résistance à la compression à long terme. Cette modification donne naissance à un second C-S-H qui améliore le remplissage des pores, puis augmente la résistance mécanique.

L'addition de la pouzzolane naturelle et la pouzzolane artificielle améliore le comportement des mortiers soumis aux attaques des acides HCl et H_2SO_4, et ils préconisent :

- 20 % de la pouzzolane artificielle ou de la pouzzolane naturelle pour les solutions d'attaque contenant l'acide chlorhydrique.
- 30 % de pouzzolane artificielle ou de la pouzzolane naturelle pour les solutions d'attaque contenant l'acide sulfurique (Benkaddour et al. 2009).

En prenant des ciments composés avec des taux de pouzzolane entre 15% et 18% et qui sont immergés dans des solutions sulfatiques (Na_2SO_4, et $MgSO_4$), alors ils sont plus imperméables et plus résistants aux attaques sulfatiques (Temiz et al, 2007).

La résistance mécanique du ciment renfermant entre 10 et 20% de la pouzzolane de Béni saf reste inférieure à celle du témoin à court terme. Mais à long terme elle peut atteindre le même ordre. L'amélioration de la résistance aux attaques des acides et des sulfates, ainsi qu'à la pénétration du chlorure sont largement remarquables pour les ciments pouzzolaniques ; notamment pour un taux d'incorporation de 10à 30% (Ghrici et al 2006).

Pour étayer les résultats précédents, une autre étude permet de confirmer que le taux de 30% de pouzzolane naturelle de Béni Saf contribue positivement à la résistance mécanique des mortiers à long terme. Tandis que l'effet de 10 à 20% est nettement remarquable pour l'attaque de ces mortiers à des solutions acides sulfuriques et nitriques (Kerbouche, 2009).

Enfin, il est intéressant de mentionner une méthode d'optimisation du taux d'incorporation de pouzzolane naturelle dans les ciments pour une résistance mécanique maximale du béton. Ce rapport optimal, pouzzolane/ciment, est de l'ordre de 0.28, (Pekmezci B.Y., Akyuz S., 2004).

De notre part, nous avons constaté qu'un taux d'incorporation de 5% d'un ajout pouzzolanique (tuf de Zemmouri (Boumerdès)), et ce pour une finesse de (8500 cm^2/g) présentait un optimum pour l'amélioration de la résistance mécanique et les caractéristiques physiques et chimiques du béton (Logbi, 1999).

III.3.1.3. Optimisation du taux d'incorporation des fillers calcaires

Les résultats obtenus ont mis en évidence, à partir des essais mécaniques, chimiques et calorimétrique sur des mortiers, que l'incorporation de 10% des fines calcaires, permet de diminuer d'une façon significative la chaleur d'hydratation du ciment ; ce qui réduit l'effet du retrait de la pâte et améliore la durabilité (Senhadji et al 2015).

Dans le même ordre d'idée, si le taux d'ajout des fillers calcaires est de 10% ; alors le matériau cimentaire se trouve doté d'une résistance presque similaire à celle du témoin à partir de l'âge de 28 jours.

D'autres résultats confirment que le taux de 10% de calcaire améliore la résistance des mortiers au jeune âge, ainsi que la résistance à l'agressivité des acides sulfuriques et nitriques (Kerbouche, 2009).

L'exploitation d'un système de modélisation, CEMHYD3D V. 2.0, montre que nous puissions aller jusqu'à 20 % de substitution du ciment par des fillers calcaires, ou d'autres produits de remplissage, sans altérer énormément les performances du ciment ; cependant le taux de 10% reste un taux convenable, (Bentz , 2006).

La substitution des fines argileuses du sable de construction par 10% de fillers calcaires améliore les propriétés physico-mécaniques du mortier, malgré que la stabilité chimique dans l'eau de mer et l'eau séléniteuse soit compromise (Guernouti , 2002).

Il a été également montré qu'à long terme, que l'introduction de 20% de fillers de calcaires donne des résistances à la compression très proches de celles du témoin (Heikal et al, 2000).

Pour ce type d'approche expérimental, nous nous sommes intéressés au calcaire comme ajout inerte. Nous avons constaté que la composition du béton avec 5 % de fillers calcaires (finesse de 8500 cm^2/g) présentait des caractéristiques mécaniques très poches de celles du béton témoin ; quoiqu'une légère augmentation a été remarquée à partir de 28 jours; ce qui confirme l'activité de cet ajout, même si elle est faible, avec le temps, (Logbi , 1999).

III.3.1.4. Optimisation du taux d'incorporation du sable de dunes broyé

En variant le type d'ajout et avec cette fois-ci le sable de dunes broyé, une étude montre que l'ajout d'un taux inférieur ou égal à 20% du sable de dune finement broyé au ciment (SSB=4000 cm^2/g) améliore les performances mécaniques des mortiers, notamment pour des faibles rapports (E/Liant). Selon les auteurs de cette étude, cette performance s'explique par un effet pouzzolanique du sable de dune broyé.

Ils ont constaté aussi, qu'après 28 jours, les résistances à la compression des mortiers renfermant 5, 10 et 15 % du sable de dune finement broyé sont supérieures par rapport au celles du ciment Portland ; avec un effet optimal pour un pourcentage de l'ordre de 5 à 10 % quels que soient le rapport (E/Liant) et la finesse de la poudre du sable de dune (Guettala et Mezghiche, 2011).

Lorsque les agrégats fins ont été remplacés partiellement par le sable de dune, une amélioration de l'ouvrabilité du béton a été observée. Une augmentation d'ouvrabilité a été remarquée avec l'augmentation de la teneur en sable de dune. Cependant, à une teneur en sable de dune, supérieure à 50 %, l'ouvrabilité commence à diminuer.

En général et concernant les autres performances, en l'occurrence la résistance mécanique, ses valeurs diminuent avec l'accroissement en teneur en sable de dune. La perte de résistance ne dépasse pas les 25 % lorsque les agrégats fins ont été entièrement remplacés par sable de dune (Al-Harthy et al., 2007).

D'autres travaux avec des conditions expérimentales différentes montrent que les mélanges préparés à base des éléments suivants :

- ✓ 40% du sable de dunes
- ✓ 60% du sable alluvionnaire
- ✓ 1.0% (par rapport au poids de ciment) de fibres métalliques résultant de déchets pneumatiques

Ces mélanges présentent une diminution du retrait et une amélioration de la compression et de la flexion. Par contre la perte en poids est plus significative pour les bétons de sable fibrés par rapport aux bétons de sable sans fibres (Belferrag, 2016).

D'autres chercheurs ont trouvé que le sable de dune finement broyé, joue un rôle bénéfique sur les propriétés mécaniques du ciment jusqu'à des teneurs de 20% avec un effet

optimum pour un pourcentage de 10% et une finesse de 20µm, (Guettala, 2012; Mechti et al, 2013).

Tenant compte de ce recueil de résultats et en adoptant un compromis avec les résultats déjà trouvés, nous adoptons les taux de substitution suivants :

- 20% de laitier
- 10% pour les fines calcaires et les fines sableuses, sable de dune broyé
- 15% de pouzzolane naturelle.

Plus précisément, nous fixons les teneurs en ajouts comme suit :

- 20% de laitier d'El-Hadjar ;
- 15% de pouzzolane naturelle de Béni Saf ;
- 10% de fillers calcaires de Hassi Messaoud;
- 10% de sable de dune broyé d'El-Oued.

Nous rappelons que la substitution sera faite par rapport au poids du ciment, et pour tout ce qui suit nous adopterons les abréviations suivantes :

- Mortier témoin avec 100% ciment portland (CEM I) ⟶ MT.
- Mortier avec 20% de laitier d'El-Hadjar ⟶ ML.
- Mortier avec 15% de pouzzolane naturelle ⟶ MPN.
- Mortier avec 10% de fillers calcaires ⟶ MC.
- Mortier avec 10% de sable de dunes broyé ⟶ MSDB.

III.3.2.Confection des mortiers

III.3.2.1. Composition des mortiers

Nous avons utilisé des compositions de mortiers normales, selon la norme (NFP 15-403) dont la composition est la suivante :

- Une partie (en masse) de liant (ciment seul, ou (ciment + ajout)). Les ajouts étant toujours introduits en substitution d'une partie de ciment.
- Trois parties (en masse) de sable. Ceci correspond donc à un rapport (sable/liant (S/Liant)) égal à 3.
- Une demi-partie d'eau ; E/Liant = 0,5.

Le rapport d'eau de gâchage par rapport au liant a été maintenu constant pour toutes les compositions des mortiers, et égal à 0.5 (E/Liant = 0,5), afin de neutraliser l'effet de l'eau sur les différentes caractéristiques des mortiers, frais ou durcis que nous avons étudiées. A condition que ce rapport (E/Liant =0,5) n'abaisse pas trop la maniabilité.

III.3.2.2 Malaxage et confection des éprouvettes

La préparation et le malaxage des mortiers ainsi que la confection des éprouvettes sont régies par les normes NF P15-402 et NF P18-403.

Dans notre travail expérimental nous avons choisi la méthode citée par plusieurs chercheurs, où l'ordre d'introduction des composants et les séquences de malaxage sont les suivants (Amouri, 2009 ; Logbi, 1999) :

- Mélanger -à part- le ciment avec l'ajout jusqu'à l'homogénéisation du liant (ciment + ajout).
- Introduction des éléments secs (sable, liant (ciment + ajout déjà mélangés et homogénéisé)) et malaxage jusqu'à l'homogénéisation du mélange (sable + liant).
- Introduction de l'eau et poursuite de malaxage pendant 5 min.
- Remuer le mortier à l'aide d'une truelle pour éviter le phénomène de ségrégation.
- Directement après le malaxage, passer aux essais sur le mortier frais (maniabilité et masse volumique).
- Puis remplir les moules à raison de deux couches, la vibration du mortier moulé a été effectuée sur une table vibrante à raison de 30 secondes la couche.
- Enfin, araser et lisser la surface du mortier à l'aide d'une truelle.
- Les éprouvettes sont ensuite maintenues dans le laboratoire pendant 24 heures, puis conservées dans l'eau potable douce à 20 ± 2°c jusqu'à la date de l'essai.

III.3.3.Type d'éprouvettes

Les éprouvettes utilisées sont toutes de type (4x4x16 cm) et (7x7x28cm) :

- 4x4x16 cm^3, destinées pour tous les essais de caractérisation mécanique et les essais de durabilité.
- 7x7x28 cm^3 destinées pour l'essai de sorptivité (absorption capillaire).

III.4. ESSAIS PHYSICO-MECANIQUES

III.4.1 Essais sur ajouts et ciment

Tous les résultats concernant les caractéristiques chimiques et physiques des ajouts et du ciment utilisés sont déjà exposés dans la section III.2.

III.4.2. Essais sur mortier frais

III.4.2.1. Essai de maniabilité (écoulement au maniabilimètre LCL- B)

Cet essai permet d'apprécier la fluidité d'un mortier, il est régi par les normes (NF P 18-452 et NF P15-437).

Figure III.4 : Maniabilimètre LCL-B

- **Principe de l'essai :**

Dans cet essai, la consistance est caractérisée par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet d'une vibration.

- **L'appareil utilisé :**

L'appareil utilisé est appelé maniabilimètre LCL (Laboratoire Central Lesage) B, il consiste en un boîtier parallélépipédique métallique (7.5cm x 7.5cm x 15cm), posé sur des supports en caoutchouc, équipé d'un vibreur et muni d'une cloison amovible.

Le temps (t) mis par le mortier pour s'écouler caractérise sa consistance. Ce temps sera d'autant plus court que le mortier sera plus fluide ou plus maniable, d'où le nom de l'appareil, (Dupain et al., 2009) .

Tableau III.8 : Classes de consistance selon la durée d'écoulement (Tafraoui A, 2009 ; Dreux et Festa, 2007).

Classe de consistance	Durée (sec)
Ferme et maniabilité défectueuse	t≥40
Plastique et bonne maniabilité	20<t≤30
Très plastique	10<t≤20
Mou et très fluide	t≤10

III.4.2.2 Masse volumique du mortier frais

Cet essai consiste à :

- Remplir un récipient de volume V en (cm^3) et de masse Mr en (g) d'un échantillon de béton frais, en deux couches tassées par vibration, à raison de 30 secondes par couche.
- Araser et lisser la surface du mortier à l'aide d'une truelle ;
- Peser le récipient rempli, soit de masse totale Mt en (g).

La masse volumique du mortier frais sera alors :

$$\rho_{mf} = \frac{Mt - Mr}{V} \quad (g / cm^3) \qquad \text{(III.3)}$$

III.4.3. Essais sur mortier durci

III.4.3.1. Détermination de la masse volumique du mortier durci

Avant d'entamer les essais mécaniques sur le mortier durci, une mesure de la masse volumique a été effectuée. La détermination de cette caractéristique est simple :

- Peser l'éprouvette après nettoyage ; soit de masse M en (g),
- Déterminer son volume V en (cm^3) à partir des mesures précises des longueurs des trois cotés.

La masse volumique sera alors calculée par l'équation suivante :

$$\rho_{md} = \frac{M}{V} \quad (g/cm^3) \qquad (III.4)$$

Les mesures sont effectuées au minimum sur trois éprouvettes.

III.4.3.2. Essais de résistance mécanique

Les essais mécaniques (compression et traction par flexion) sont régis par la norme (EN 196-1). Ils sont effectués sur des éprouvettes de types prismatiques 40x40x160 mm.
L'essai consiste à étudier les résistances à la traction et à la compression des éprouvettes des différentes compositions du mortier. Dans un tel mortier, la seule variable est la nature du liant (avec ou sans ajout) utilisé. La résistance mécanique reflète alors la résistance de ce dernier.

A- Résistance à la traction par flexion

La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément au dispositif décrit sur la figure III.5. La presse utilisée est de type (MATEST) (Figure III.6):

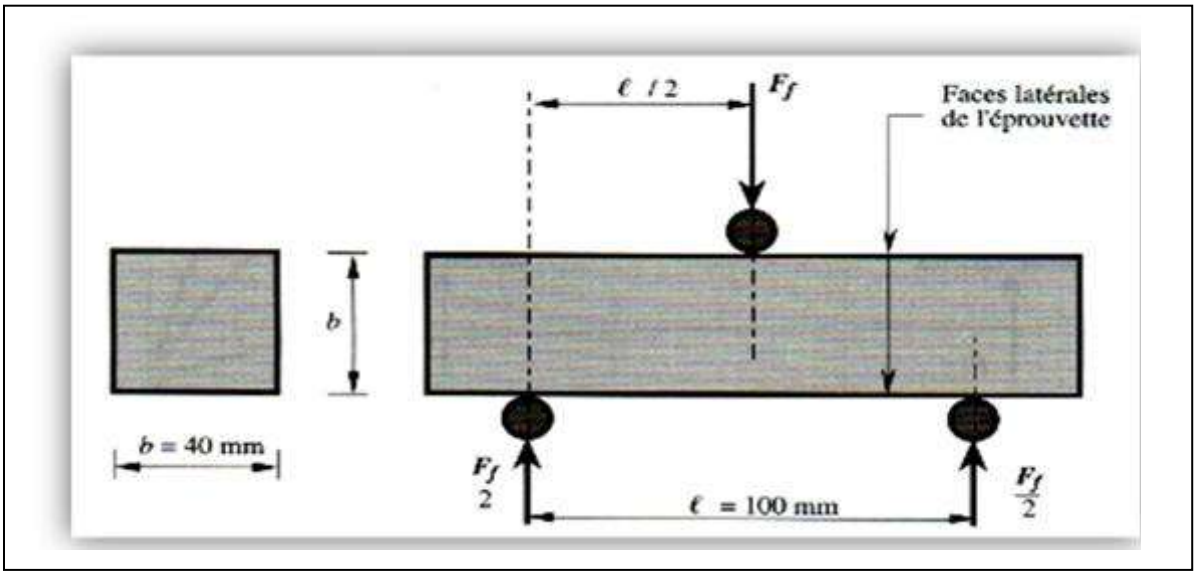


Figure III.5: Dispositif pour l'essai de traction par flexion **(**3 points) (Dupain et al.,2009) .

La résistance à la flexion est calculée selon l'équation suivante (III.5) :

$$R_f = \frac{1.5 \cdot F_f \cdot l}{b^3} \qquad (III.5)$$

R_f **:** Résistance à la flexion en (MPa),

F_f**:** Charge de rupture de l'éprouvette en flexion en (N),

l**:** Longueur qui sépare les deux appuis (l = 100mm),

b**:** Côte de l'éprouvette, elle est égale à (40mm).

Figure III.6: Presses utilisées dans l'essai de résistance mécanique (compression type (OHELGASS), traction par flexion type (MATEST)).

B- Résistance à la compression

Pour effectuer cet essai, on profite de la rupture en deux parties de l'éprouvette testée en flexion pour les soumettre à un essai de compression axiale. L'appareillage utilisé est de type (OHELGASS), (Figure III.6), il permet d'effectuer les essais de compression simple sur une surface à comprimer de (1600 mm^2), à l'aide de deux plaquettes rigides carrées d'acier de 10 mm d'épaisseur et de 40 mm de largeur.

Si F_C est la charge de rupture, la contrainte de rupture vaudra :

$$R_C = \frac{F_C}{b^2} \qquad \text{(III.6)}$$

R_C**:** Résistance à la compression en (MPa);

F_c **:** Charge de rupture en (N);

b **:** Côte de l'éprouvette en mm, (b=40mm).

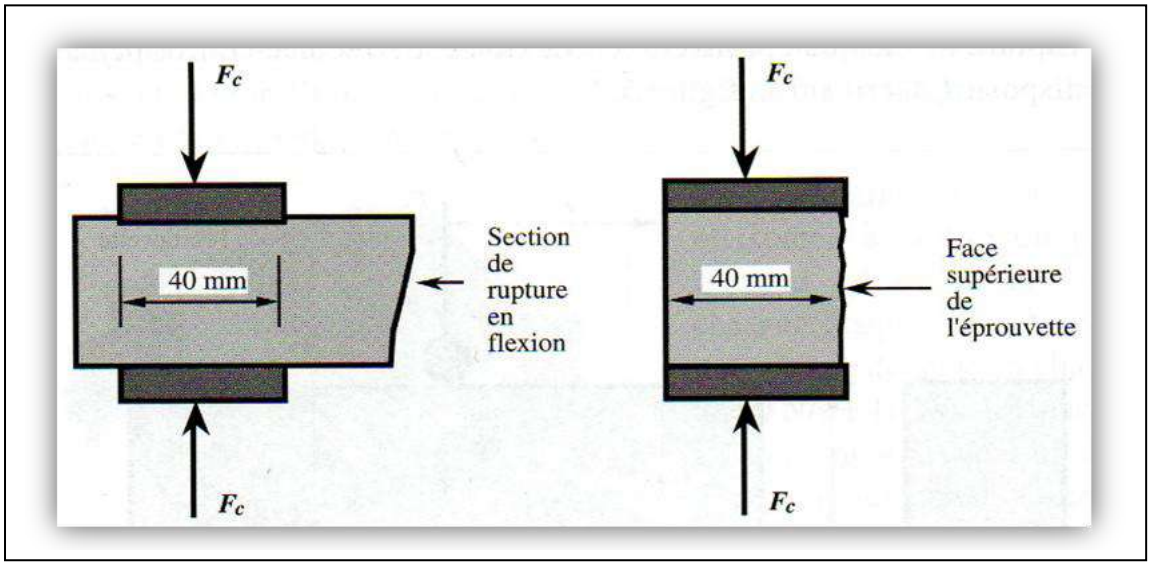


Figure III.7: Dispositif pour l'essai de compression simple (Dupain et al.,2009) .

III.4.3.3. Essai ultrasonique

C'est un essai non destructif très important qui nous permet de détecter simultanément plusieurs caractéristiques du mortier durci telles que : le degré de compacité, le taux de fissuration, les dommages causés par le gel ou l'écart de température…etc.

Cet essai, qui est régi par la norme (NF EN 12504-4, 2005), consiste à mesurer la vitesse longitudinale du son dans le mortier à l'aide d'un appareil comportant une boite de mesure et deux têtes ; l'une émettrice et l'autre réceptrice.

Deux méthodes peuvent être utilisées pour mesurer la vitesse du son :

- *Mesure en surface ;*
- *Mesure en transparence.*

Cette dernière présente la meilleure méthode. Elle consiste à presser les deux têtes de mesure sur les deux faces de l'éprouvette, (soit dans le sens longitudinal ou transversal), en utilisant une pâte de contact qui facilite la transmission du son. La surface du mortier doit être raisonnablement plane et bien nettoyée (figure III.8).

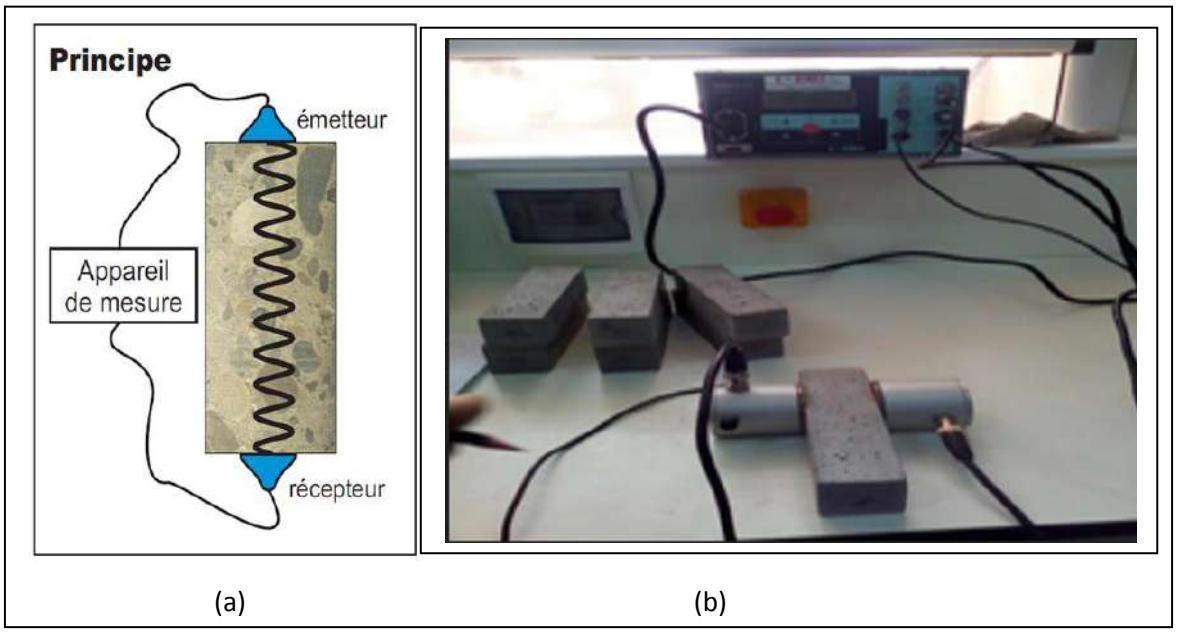


Figure III.8 : Essai ultra-sonique (a) Principe de l'essai, (b) Appareil utilisé.

Une fois l'appareil mis en marche, nous pouvons lire le temps de propagation en microseconde. La vitesse de propagation est donnée alors par l'équation suivante :

$$V = \frac{S}{t} 10^6 \qquad (\text{III.7})$$

- V : vitesse de propagation en m /sec.
- S : distance entre les têtes en (mètre) mesurée avec une précision de 1%.
- t : temps en microseconde.

Les essais ultrasoniques ont été effectués sur des éprouvettes prismatiques (4x4x16 cm).

III.4.3.4. Essai de l'absorption d'eau (Sorptivité)

Cet essai mesure le taux d'absorption de l'eau par succions capillaires des éprouvettes de mortier non saturées, mises en contact avec l'eau sans pression hydraulique, en ayant uniquement la pression atmosphérique (figure III.9).

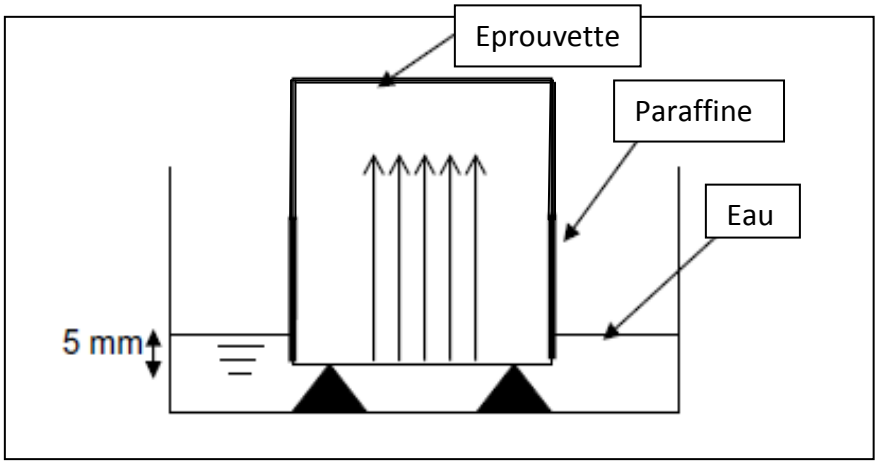


Figure III.9 : Présentation schématique de l'essai d'absorption capillaire.

La mesure de la sorptivité est un moyen simple et facile qui permet de caractériser la cinétique d'absorption des matériaux. Plus la sorptivité est élevée, plus le matériau est susceptible à être rapidement envahi par le liquide en contact. C'est aussi une propriété qui caractérise la disposition des pores du matériau qui absorbent et transmettent l'eau par capillarité.

Avant les mesures de la sorptivité, les éprouvettes sont pré-conditionnées dans l'étuve à environ 105°C jusqu'à une masse constante.

L'essai de sorptivité détermine le taux ou la vitesse d'absorption par remontée capillaire d'une demi-éprouvette prismatique (7x7x28 cm) placée sur un bac contenant du sable saturé de l'eau suivant le schéma indiqué sur la figure (III.9) de sorte que l'eau ne touche l'éprouvette que d'une hauteur de 5mm de la profondeur du bac ; le reste de l'éprouvette est préalablement imperméabilisé par le paraffine sur toutes les autres faces.

Nous mesurons alors l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps (dans notre cas 72 heures) (Kerbouche, 2008; Kriker, 1992; Abdou, 2007 ; Sengun et al., 2014) .

L'équation suivante donne l'accroissement du poids en fonction du temps :

$$Ac = \frac{100P}{S\sqrt{t}} \qquad \text{(III.8)}$$

- P : Poids d'eau absorbée en (g).
- t : Le temps en heures (t = 72 heures pour notre cas).
- S : Surface de la face sciée en (cm^2) : ($S=49cm^2$).

III.5. ESSAIS DE DURABILITE

Cette partie expérimentale s'appuie sur une série d'essais d'investigation qui renseignent sur l'effet apparent et microstructural des différents milieux agressifs sur les différentes compositions de mortier.

III.5.1.Attaque des mortiers par les acides

III.5.1.1. Procédure de l'essai

Pour la caractérisation de la résistance chimique, des éprouvettes prismatiques (4x4x16 cm^3) de mortier ont été confectionnées ; démoulées à 24 heures, les éprouvettes ont été conservées dans l'eau à la température ambiante du laboratoire, jusqu'à 28 jours. Après 28 jours de cure sous l'eau douce, les éprouvettes sont pesées pour déterminer leurs masses avant l'attaque chimique puis elles sont immergées dans les différentes solutions suivantes :

- L'eau potable ; cure normale : (témoin),
- Une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4), trois (3) fois plus concentrée par rapport à la concentration la plus élevée de toutes les nappes phréatiques de la région de Oued - Souf; soit une concentration de 10500 mg/litre ; et un pH=1,42.
- Une solution d'acide chlorydrique (HCl) trois (3) fois plus concentrée par rapport à la concentration la plus élevée de toutes les nappes phréatiques de la région de Oued - Souf; soit une concentration de 5000 mg/litre ; et un pH=1,95,

Ces concentrations sont choisies pour accélérer la procédure d'attaque.

La résistance aux agressions chimiques des éprouvettes immergées dans ces solutions acides est évaluée par quatre (4) méthodes différentes :

- L'évaluation de la variation du poids des différentes éprouvettes (perte et (ou) gain du poids),
- L'évaluation de l'absorption capillaire,
- L'essai ultrasonique,

- L'observation sous le MEB et l'examen par DRX.

Tableau III.9 : Analyse chimique de toutes les eaux remontées des nappes de la Wilaya d'El-Oued

N° du	Ca ++	Mg ++	NH4 +	Cl -	SO4 --	HCO3-	NO3 -	NO2 -	F -	TUR	R s	pH
Point d'eau	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(NTU)	(mg/l)	/
G08	589.18	48.61	0.24	439.62	1600.00	34.16	16.70	0.32	1.35	0.21	7440	
G12	641.28	228.47	0.26	1418.12	1500.00	197.64	1.50	0.03	1.71	5.18	12120	8.12
G81	549.10	58.33	0.20	460.89	2100.00	32.94	15.80	0.08	1.64	0.15	7280	7.36
P17	224.45	58.33	0.15	496.34	1100.00	35.38	2.30	0.10	0.57	1.38	3620	8.20
H80	488.98	432.63	0.31	404.16	2300.00	48.80	28.10	0.01	1.56	0.08	7540	7.69
H90	617.23	274.65	0.29	1425.21	1500.00	69.54	16.30	0.01	1.40	0.49	12620	7.67
G37	561.12	170.14	0.16	850.87	2300.00	113.46	48.60	0.13	1.25	0.15	8580	7.76
D01	733.46	29.17	0.00	910.20	1876.00	52.46	16.46	0.01	1.61	0.80	4760	7.57
D03	641.28	97.22	0.04	398.03	1773.00	183.00	46.49	0.00	1.34	1.15	4020	7.71
D05	725.45	291.66	0.02	406.00	1746.00	158.60	57.56	0.02	0.67	0.54	3940	7.80
D09	625.25	167.70	0.01	355.98	1600.00	85.40	62.94	2.16	1.49	0.81	4280	7.42
D14	601.20	131.20	0.04	423.33	898.00	61.00	49.74	0.00	1.52	0.64	4040	7.71
D18	617.23	104.51	0.15	**1640.23**	**3363.00**	51.24	64.65	0.05	1.83	0.26	6980	**7.95**
D20	637.27	75.35	0.10	588.22	**3373.00**	420.00	47.81	0.01	1.51	0.21	5060	**7.43**
D37	440.88	267.36	0.00	863.00	1344.00	768.60	10.79	0.07	0.74	0.33	3700	7.31
D38	773.54	92.36	0.08	1013.00	1006.00	1305.40	56.79	0.02	1.65	0.31	5420	7.78
D39	641.28	99.65	0.06	366.32	869.00	402.60	49.15	0.02	1.49	0.49	4120	7.45
D51	757.51	38.89	0.07	344.06	1907.00	101.26	97.19	2.84	1.44	1.93	5760	7.70
D52	541.08	279.51	0.00	523.00	1055.00	512.40	18.70	0.01	1.57	0.89	3340	7.57
D56	464.93	155.55	0.22	400.00	1703.00	109.80	85.96	0.12	1.34	1.05	3620	7.65

La variation en masse est mesurée chaque 10 jours selon la procédure suivante :

- Les éprouvettes sont nettoyées avec l'eau douce pour éliminer le mortier altéré puis laissées sécher pendant 30mn. Ensuite on procède à la pesée des éprouvettes avec une balance de précision de 0.1g. Cette opération est effectuée chaque 10 jour pendant une

durée de 2 mois, puis on prend deux autres prélèvements à 3 mois et à 6 mois d'immersion dans la solution.

- Les solutions d'attaque sont renouvelées chaque 20 jours d'une façon à maintenir un pH constant.

Le degré de l'attaque est évalué par la formule de variation de masse suivante :

$$\text{Variation de masse (\%)} = ((M_2-M_1)/M_1) \times 100 \qquad \text{(III.9)}$$

Avec : M_1 : masse des éprouvettes avant immersion.

M_2 : masse des éprouvettes après immersion.

III.6. CONCLUSION

L'analyse chimique des trois ajouts minéraux ainsi que le sable de dune a montré que ces derniers présentent des caractéristiques satisfaisantes. Ces caractéristiques peuvent être améliorées par le broyage poussé des ajouts.

Le broyage des ajouts nous a permis d'atteindre une finesse acceptable, avoisinante à celle du ciment. Cette finesse relativement considérable présente un seuil acceptable pour que les ajouts réagissent comme étant des fillers actifs et inertes.

Les essais effectués sur le sable de construction ont confirmé la bonne qualité de ce dernier et leur conformité à l'élaboration d'un mortier de qualité.

Les trois précédents chapitres nous ont permis de présenter, dans un premier temps, les bases sur le plan cognitif. En effet, la définition des matériaux cimentaires et les différents additifs quelle que soit leur nature ont été abordés et ce en balayant la littérature spécialisée. Dans un deuxième temps, sur le plan méthodologique, nous avons fait l'état de l'art des méthodes de caractérisation et d'essais. La base de données ainsi constituée sera par conséquent exploitée lors du prochain chapitre.

CHAPITRE IV

RESULTATS ET DISCUSSIONS

CHAPITRE IV

RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1 INTRODUCTION

En s'appuyant sur les principaux résultats de caractérisation retenus au cours des chapitres précédents et sur ceux issus des différents protocoles expérimentaux, l'objectif du présent chapitre est d'exposer et de discuter tous les résultats des essais effectués sur les différentes compositions des mortiers avec ajouts, et de les faires comparer à la littérature.. Nous nous focaliserons sur les mortiers avec leurs deux variantes, frais et durcis.

Nous avons choisi les mortiers comme objet d'expérimentation au lieu des bétons, car de plus, l'économie en matériaux, tous les effets des additions minérales (actives ou inertes) observés sur les mortiers frais ou durcis, peuvent être généralisés et prolongés au béton. Bien que le béton reste toujours plus complexe que le mortier, vu que sa composition est plus hétérogène et ces échantillons sont plus grands.

Nous avons évoqué tous les facteurs qui contribuent justement à cette approche performantielle en jouant sur les éléments suivants :

- La nature de l'ajout,
- Le taux d'incorporation,
- Le processus de conservation du mortier.

Pour répondre à cet objectif, nous explicitons ce travail expérimental qui se décline selon la structure suivante :

- La première partie concerne le choix des matériaux et la caractérisation des différentes compositions des mortiers à l'état frais.
- La deuxième partie porte sur l'incorporation des ajouts minéraux dans la composition de référence, ainsi qu'à l'étude des performances physiques et mécaniques des mortiers durcis à différents âges.
- La troisième partie présente l'étude expérimentale de l'effet des ajouts sur la durabilité des mortiers.

Dans toutes les compagnes des essais de caractérisation, cinq (5) éprouvettes sont testées pour chaque essai.

Les différents mortiers étudiés dans cette thèse sont à base de CEMI (ciment sans ajout) et d'ajouts minéraux avec des taux d'incorporation déjà optimisés et déterminés au cours du chapitre III, paragraphe III.3.1. Ces compositions sont :

- MT : Mortier témoin avec 100% CEMI,
- ML : Mortier avec 20% de laitier,
- MPN : Mortier avec 15% d'ajout pouzzolanique naturel,
- MC : Mortier avec 10% de fillers calcaires,
- MSDB : Mortier avec 10% de sable de dune broyé.

Nous rappelons que :

- toutes les éprouvettes des mortiers sont conservées dans l'eau douce (ou dans le milieu acide) à la température ambiante du laboratoire jusqu'au l'âge de l'essai.
- Le taux d'incorporation de l'ajout est par rapport au poids du ciment.

IV.2. PROPRIETES DES MORTIERS FRAIS

IV.2.1.Masse volumique

La masse volumique des différentes compositions du mortier frais est présentée dans la figure IV.1. Nous remarquons que tous les ajouts ont, tous, un effet positif sur la densité des mortiers.

Le mortier témoin (MT) présente la plus faible densité ; soit 2,17 g/cm^3, tandis que le mortier au laitier (ML) présente la plus grande avec 2,26 g/cm^3, soit une amélioration de 4,15% (0,09 g/cm^3) par rapport au témoin, ce qui prouve l'effet densifiant du laitier dès le début de gâchage.

En deuxième position on trouve les autres compositions (MPN, MSDB et MC) avec des valeurs très proches ; 2,22 et 2 ,23 g/cm^3, soit une augmentation de 0,05 à 0,06 g/cm^3 (2,5%). La pouzzolane, le calcaire et le sable de dune broyé contribuent, eux aussi, à la densification du gâchée, mais moins que le laitier. Cela est dû à la nature vitreuse, et l'aspect lisse des grains de ce dernier, qui fait dégager l'air occlue dans la gâchée et la rend plus dense.

Ce sont les mêmes constatations de Guernouti (2002), Kriker (1992), qui ont prouvé l'effet bénéfique des ajouts minéraux sur la masse volumique du mortier et du béton frais, (Guernouti, 2002; Kriker, 1992).

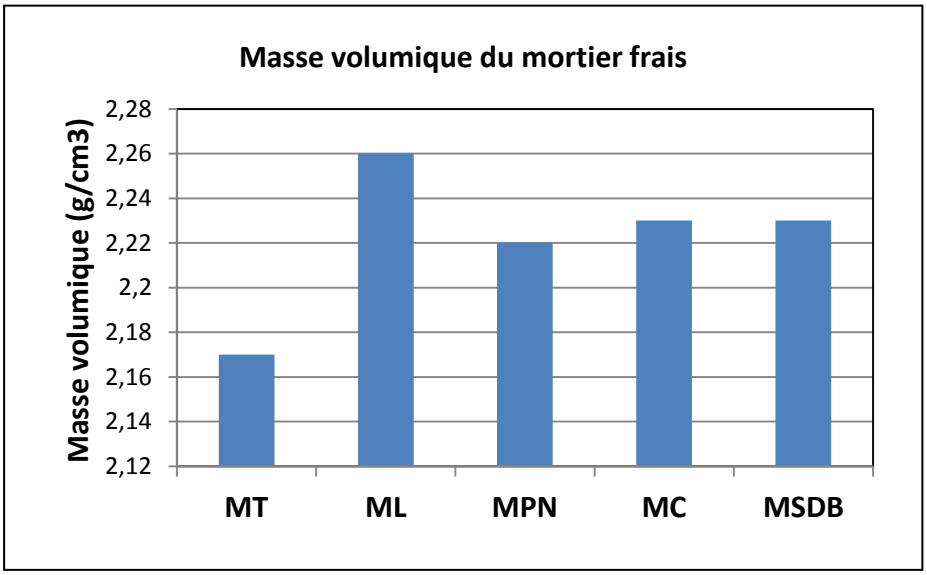


Figure IV.1 : Masse volumique des différentes compositions du mortier frais.

IV.2.2.Maniabilité

La maniabilité a été abordée sommairement dans le cadre des essais sur le mortier frais au chapitre précédent. Il est instructif de mentionner que ce paramètre a plusieurs définitions; parmi lesquelles celle qui permet de lier la facilité avec laquelle le mortier peut être malaxé, placé et compacté**.**

Plus concrètement, la maniabilité des différents mortiers est mesurée à l'aide de l'essai d'écoulement au maniabilimètre B. La figure IV.2 montre l'effet des quatre ajouts minéraux sur la maniabilité des différents mortiers. Nous remarquons que tous les ajouts ont diminué le temps d'écoulement ; autrement dit, l'impact de ces ajouts est une amélioration claire et nette de la maniabilité. En effet, les ajouts minéraux utilisés sont tous finement broyés ; ils remplissent donc les pores capillaires. Cette situation autorise la libération de l'eau emprisonnée et rend par conséquent le mélange plus fluide. Rappelons que toutes les compositions ont le même rapport E / liant = 0.5.

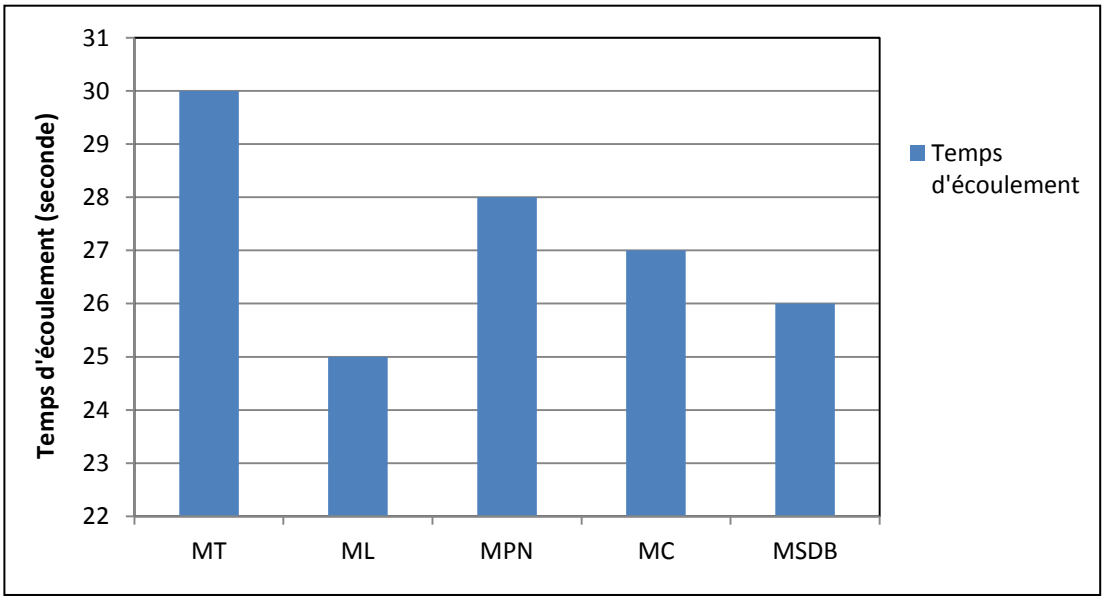


Figure IV.2 : Maniabilité (temps d'écoulement) au maniabilimètre B des différentes compositions de mortier.

IV.2. 2.1.Effet du laitier sur la maniabilité

Pour l'ajout laitier (ML) nous enregistrons un temps d'écoulement de 25 s. Notons qu'il reste le plus petit parmi les autres ; avec une réduction de 17% par rapport à celui du témoin (MT). Cette amélioration dans le temps d'écoulement, fonction de la maniabilité, est due d'une part, à l'augmentation de la viscosité de la pâte du ciment au laitier, et d'autre part, à la surface caractéristique des particules du laitier qui n'absorbent pas beaucoup d'eau dans la phase initiale d'hydratation. Les grains de laitier permettent un meilleur glissement inter-granulaire dans la pâte et se caractérisent par des surfaces vitreuses lisses à faible taux

d'absorption d'eau. Ceci peut être une cause de l'amélioration de la maniabilité, (Kriker, 1992).

Hadjsadok et al., ont trouvé, eux aussi, que l'addition du laitier broyé d'El-Hadjar a amélioré l'affaissement du béton au cône d'Abrams (Hadjsadok et al., 2012).

Nous pouvons aussi rapporter que l'addition du laitier algérien broyé au ciment retarde la prise du ciment et améliore sa fluidité (Bougara et al., 2009).

IV.2. 2.2.Effet de la pouzzolane naturelle de Béni Saf sur la maniabilité

Le mortier à la pouzzolane naturelle de Béni Saf (MPN), a un temps d'écoulement de 28 s, soit une légère amélioration de 7% par rapport à celui du témoin (MT). Ce résultat est cohérent avec les travaux de recherches, quoique nous ayons remarqué une diversité de constatations de ces derniers.

En effet, l'ajout de 10 à 20% de la pouzzolane de Béni Saf augmente le besoin en eau, de 1%. Cela influe inversement sur la maniabilité et accélère la prise ; le temps de fin de prise est diminué de presque 50 mn. Ces constations s'expliquent, selon Ghrici et al., (2006), par la structure floculante et la finesse de la pouzzolane, nécessitant de l'eau pour maintenir la cohérence (Ghrici et al., 2006).

Par contre les travaux de Voglis et al.,(2005) ont permis d'enregistrer des consistances plus élevées pour les ciments pouzzolaniques et des délais de prises plus réduits (Voglis et al.,2005).

Nous avons relevé aussi, que 5% de pouzzolane substitué par rapport aux fines argileuses du sable augmente la maniabilité ; cette association retarde le début et la fin de prise (Guernouti, 2002).

Nous avons noté que 15% de pouzzolane naturelle n'altérait pas l'ouvrabilité de béton ; elle restait égale à celle du témoin, 7 cm d'affaissement au cône d'Abrams, (Pekmezci et Akyuz , 2004).

IV.2.2.3.Effet des fillers calcaires sur la maniabilité

Pour le mortier aux fillers calcaires, le temps d'écoulement est de 27 s avec une amélioration de 10%. Les mêmes constatations peuvent être notées ; en effet, 5 à 10% de

fillers calcaires ajoutés au ciment pouzzolanique augmente la fluidité du ciment, et par conséquent le temps de prise est de plus de 20% par rapport au témoin (Heikal et al., 2000).

Parallèlement, le ciment aux fillers calcaires a presque la même consistance et le même délai de fin de prise que ceux du témoin (Voglis et al.,2005).

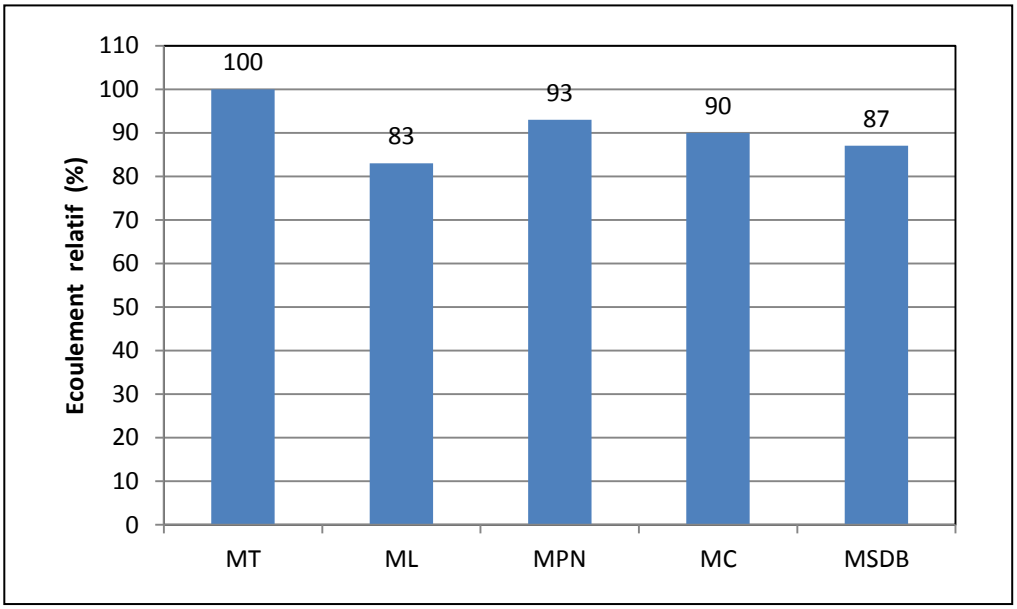


Figure IV.3 : Ecoulement relatif (par rapport au témoin) des différents mortiers.

VI.2. 2.4.Effet du sable de dunes broyé sur la maniabilité

Dans les conditions expérimentales de ce travail, le mortier au sable de dunes broyé (MSDB) donne un temps d'écoulement de 26 s, et l'amélioration de la maniabilité est de 13% par rapport au témoin (MT).

Par le biais d'une autre étude, nous notons que le sable de dunes broyé diminue considérablement la cohérence initiale de la pâte cimentaire, les pâtes deviennent donc plus fluides. Ce résultat est dû à la finesse de l'ajout qui permet de combler les pores inter-granulaires et diminue la demande en eau.

D'autre part, la poudre du sable de dunes broyé se manifeste comme un lubrifiant en réduisant le vide inter-granulaire, et de ce fait améliore la maniabilité (Guettala et Mezghiche, 2011).

IV.3.PROPRIETES DES MORTIERS DURCIS

IV.3.1.Masse volumique

L'évolution de la masse volumique des différentes compositions de mortiers durcis avec l'âge est illustrée dans la figure IV.4 :

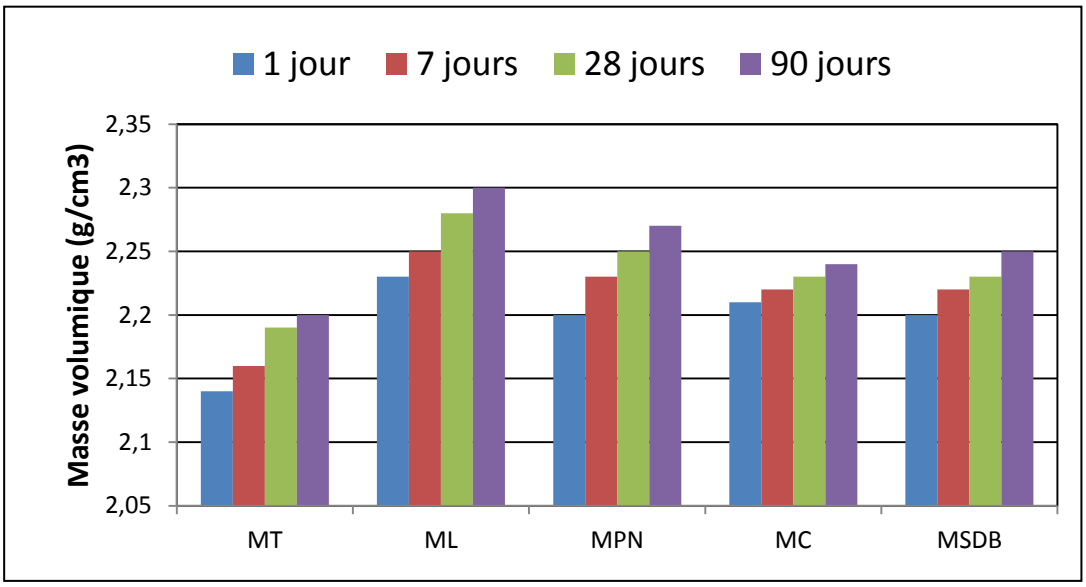


Figure IV.4 : Masse volumique des différentes compositions à différents âges.

Cette figure montre que la masse volumique de toutes les compositions y compris le mortier témoin, augmente avec l'âge. Cela est dû à l'effet de l'eau sur toutes les éprouvettes immergées. En effet ces dernières continuent à se saturer jusqu'à l'âge de 28 jours ; ou on aura une stabilisation pour toutes les compositions et l'augmentation de la masse s'arête.

Le mortier au laitier (ML) présente la plus grande masse volumique avec 2,30 g/cm^3 à 90 jours, (soit une augmentation de 4,55% par rapport au témoin) ; et 2 ,23 g/cm^3 au 1er jour, ce qui peut être expliqué par l'effet double du laitier :

- un filler de remplissage d'une part,
- et un ajout actif qui réagit avec la chaux libérée de l'hydratation du ciment d'une autre part. ce qui engendre des silicates supplémentaires (CSH), qui densifient la matrice cimentaire et augmentent, par conséquent, le poids.

Ce sont les mêmes constatations pour les deux autres ajouts actifs : pouzzolane et sable de dunes broyé (MPN, MSDB), mais dans une moindre mesure.

Pour l'ajout calcaire (MC) nous avons, aussi, enregistré une augmentation de la masse volumique par rapport au témoin ; mais elle reste plus basse que les trois autres ajouts dans tous les âges.

Ces constatations s'accordent avec plusieurs études, telles que celles de Guernouti (2002) qui a étudié l'effet des ajouts (laitier, calcaire et pouzzolane) sur les propriétés du béton (Guernouti, 2002).

IV.3.2.Résistance mécanique

Rappelons que toutes les éprouvettes des mortiers sont conservées dans l'eau douce à la température ambiante du laboratoire jusqu'au l'âge de l'essai.

Les essais sont réalisés parallèlement au sein des laboratoires de Génie civil de l'université de Ouargla et au LTPS (El-Oued et Ouargla).

Pour chaque essai, et pour chaque échéance, au moins 5 à 6 éprouvettes sont testées.

VI.3.2.1. Effet de la pouzzolane naturelle

A- Résistance à la compression

La figure IV.5 illustre l'évolution de la résistance à la compression en fonction d'âge des mortiers contenant 15% de la pouzzolane naturelle de Béni Saf ; la courbe représentative de ce phénomène est ascendante avec l'âge, et elle se stabilise à long terme (90 et 180 jours).

D'après cette figure, nous remarquons que ces mortiers développent des résistances qui restent inférieures à celles du mortier de contrôle à tout âge.

A court terme, 3 et 7 jours, les résistances de ce mortier sont faibles par rapport à celles du mortier de contrôle. En effet, à 3 et 7 jours, les résistances des mortiers contenant 15 % de pouzzolane représentent presque 80% de celles du mortier de contrôle ; c'est-à-dire 20 % de différence. A long terme, cet écart diminue, et les résistances développées par les mortiers contenant la pouzzolane de Béni Saf deviennent tangentes à celles du mortier de contrôle ; elles représentent plus de 95% de celles du mortier de contrôle à l'âge de six mois ;soit un écart qui est autours de (3%), avec une résistance enregistrée de 35 MPa. Ceci peut être attribué à l'activité pouzzolanique qui est lente aux jeunes âges et se développe à long terme. Ce sont les mêmes constatations qui sont mentionnées dans d'autres travaux, (Kerbouche et al., 2009; Benkaddour et al. 2009; Ghrici et al 2006).

Dans la littérature spécialisée, nous relevons que 10 à 20% de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf améliore la résistance à la compression à long terme mais tout en restant toujours légèrement inférieure à celle du témoin. Ce phénomène pourrait être attribué à l'activité pouzzolanique qui est lente aux jeunes âges et se développe à long terme, en fixant la portlandite $Ca(OH)_2$ libérée par l'hydratation du ciment Portland selon les équations chimiques (I.9- I.12 du chapitre I). Ces réactions donnant naissance à des seconds C-S-H supplémentaires qui améliorent à la fois, le remplissage des pores et la caractéristique liante de la matrice cimentaire ; ces effets contribuent ainsi au développement de la résistance mécanique (Benkaddour et al., 2009 ; Kerbouche et al., 2009 ; Ghrici et al., 2006).

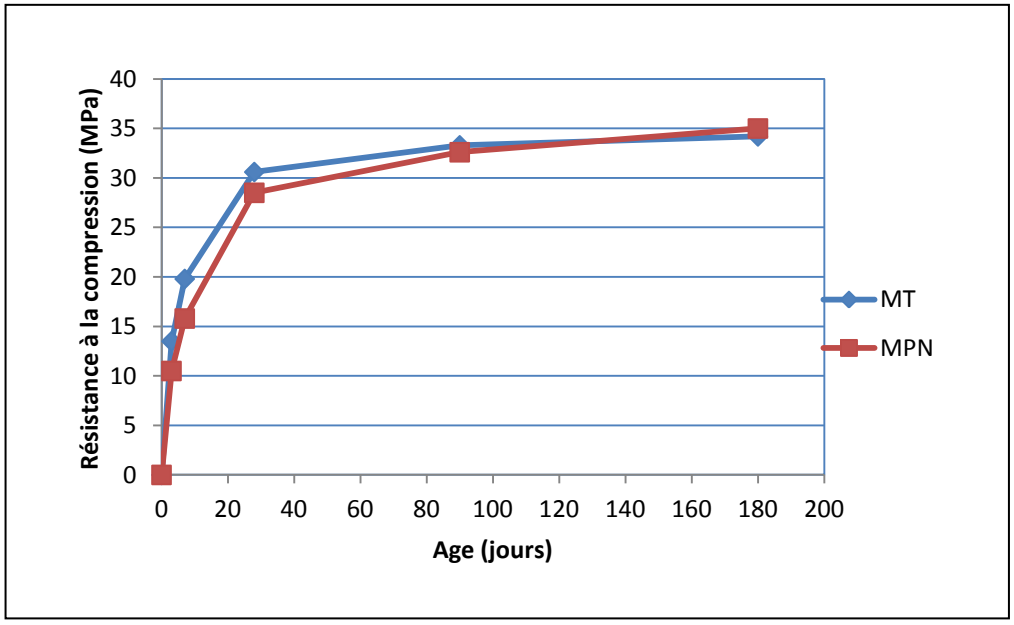


Figure IV.5 : Résistance à la compression du mortier à la pouzzolane en fonction d'âge

La diminution de la résistance au jeune âge est attribuée principalement à l'activité lente de la pouzzolane naturelle. Ce phénomène s'explique par l'interaction entre la silice réactive de la pouzzolane naturelle et le $Ca(OH)_2$ libéré par l'hydratation du ciment CEM I ce qui donne à la pouzzolane la propriété de fixer la chaux. La réaction pouzzolanique n'est pas prédominante au jeune âge, ceci mène à une hydratation moins intense aux jeunes âges en induisant de faibles résistances, retardateur de prise, (Senhadji et al 2015 ; Senhadji et al., 2014).

Il est aussi instructif de noter que des résistances des bétons dépassant celles du témoin de 22% à 90 jours avec une teneur en pouzzolane de 5%, à condition qu'on n'altère pas le dosage en ciment ; la substitution sera par rapport aux fines argileuses dans le sable utilisé.

Nous voyons clairement que l'effet de la pouzzolane sera bénéfique sur la résistance si nous ne modifions pas la quantité ou le dosage du ciment (Guernouti , 2002).

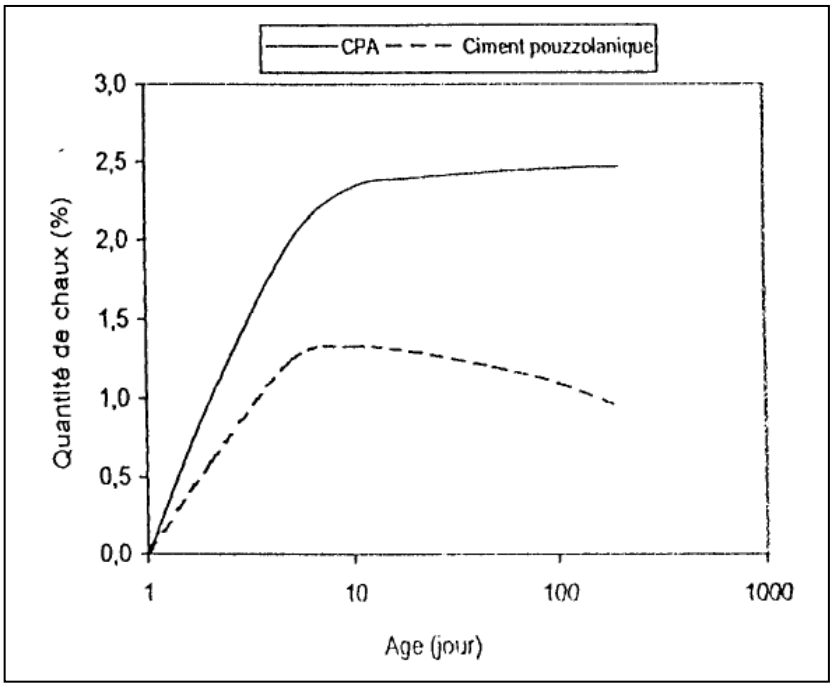


Figure IV.6 : Changement de la quantité de chaux d'un ciment pouzzolanique hydraté en fonction d'âge (Kerbouche 2009; Shi et Day , 2000**)**

B- Résistance à la flexion

L'évolution de la résistance à la traction par flexion a la même allure que la résistance à la compression (Figure IV. 7).

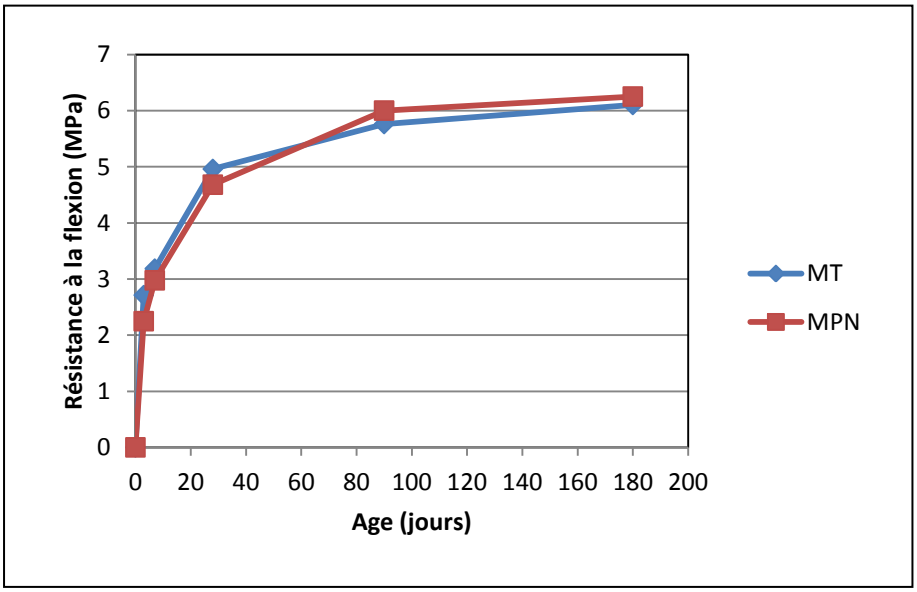


Figure IV.7: Résistance à la flexion du mortier à la pouzzolane en fonction d'âge.

On remarque que le mortier avec l'ajout pouzzolanique (MPN) développe des résistances inférieures à celles du témoin aux jeunes âges (3 et 7 jours). A cet âge la différence est de 17 et 6,5% respectivement. A 28 jours, la différence devient 5.6% puis la résistance se stabilise ; elle devient très proche de celle du témoin à l'âge de six mois. Nous enregistrons une résistance à la flexion de 6,25 MPa avec une légère amélioration de 2,5%. Ce résultat est sensiblement proche de ce qui a été trouvé par d'autres chercheurs. (Ghrici et al., 2006; Senhadji et al., 2015).

VI.3.2.2. Effet du laitier de haut fourneau

A- Résistance à la compression

La figure IV.8 illustre l'évolution de la résistance à la compression en fonction d'âge des mortiers contenant 20 % du laitier broyé d'El-Hadjar. Cette évolution est représentée par une courbe ascendante avec l'âge et elle se stabilise à long terme, 90 et 180 jours.

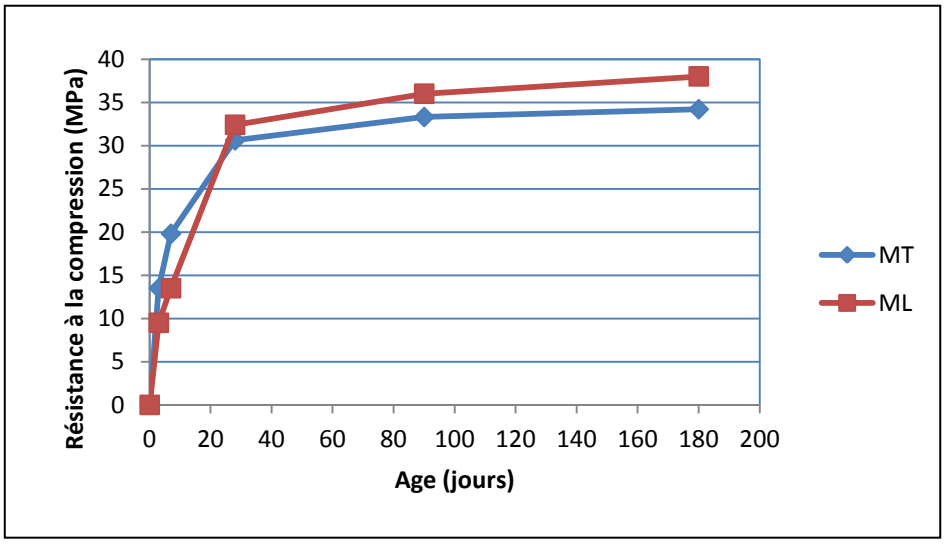


Figure IV.8 : Résistance à la compression du mortier au laitier en fonction d'âge.

D'après cette figure, nous remarquons que ces mortiers développent des résistances qui sont inférieures à celles du mortier de contrôle à court terme puis elles les dépassent après 28jours.

A court terme, 3 et 7 jours, les résistances de ce mortier sont faibles par rapport à celles du mortier de contrôle. En effet, à 3 et à 7 jours les résistances des mortiers contenant 20 % du laitier broyé d'El-Hadjar (ML) représentent presque 70% de celles du mortier

témoin (MT) ; c'est-à-dire presque les deux tiers (2/3). A partir de cet âge la résistance du mortier (ML) commence à augmenter d'une manière plus rapide que celle du témoin (MT) ; à 28 jours, elle devient légèrement plus grande, avec un gain de résistance de 6%.

A long terme, cet écart devient plus important jusqu'à la stabilisation. A 90 jours le gain de résistance est de 8 % et à 6 mois nous observons une résistance à la compression de 34MPa pour le mortier (MT) et 38MPa pour le mortier au laitier (ML) ; soit un gain de 11%. Ce comportement mécanique de (ML) peut être expliqué par l'effet du laitier qui a une activité lente aux jeunes âges puis elle se développe à long terme.

Pour étayer nos résultats, nous rapportons d'autres travaux qui mentionnent les mêmes constations. Ainsi, les auteurs de ces travaux ont trouvé que le développement de la résistance des mortiers au laitier était lent au jeune âge, mais après une période initiale de 3 jours la résistance commence à se développer d'une manière plus rapide. A 90 jours, la résistance à la compression était de 42MPa et dépassait celle du témoin de 23% ; pour 30% de laitier, qui a une finesse de 3600 à 4200 cm^2 /g. (Bougara et al., 2009).

Egalement, l'incorporation de moins de 30% de laitier donne les mêmes résultats que précédemment, à condition que le rapport E/Liant ne dépasse pas 0,65% (Hadjsadok A. et al).

Dans une autre étude sur les bétons à base de laitier, il a été constaté que l'activité de l'ajout se déclenche à partir du 7ème jour ; où la résistance mécanique commence à augmenter d'une manière accélérée, et elle dépasse celle du témoin. Dans l'eau douce et à la température ambiante, la résistance à la compression est de 37MPa pour le béton avec 15 à 30% de laitier contre 32 MPa pour le témoin (Kriker A).

Par contre, nous avons relevé que la résistance mécanique commence à s'améliorer à partir du 28ème jour. Cet effet peut être expliqué par l'activité du laitier qui commence à se manifester après cet âge, et rend la microstructure du béton plus dense et plus résistante (Yeau et Kim, 2005).

B- Résistance à la flexion

La résistance à la traction par flexion du mortier au laitier croît avec l'âge. Nous constatons qu'elle a la même tendance que celle de la compression (Figure IV.9).

En effet le mortier contenant 20 % du laitier broyé d'El-Hadjar (ML) se caractérise par des résistances inférieures à celles du témoin aux jeunes âges, 3 et 7 jours. A ces deux âges les résistances à la flexion du (ML) ne représentent respectivement que 70% et 77% de celles du témoin (MT).

Il est aisé de noter déjà une amélioration entre le 3ème et le 7ème jour ; l'effet positif du laitier sur la cinétique de l'hydratation du ciment au jeune âge est pleinement justifié. Cette amélioration commence à réduire l'écart entre les résistances jusqu'au 28ème jour. A cet âge, nous remarquons que la résistance du (ML) dépasse celle du (MT) de plus de 5%. De surcroît et à long terme, la résistance commence à s'amplifier et reste supérieure à celle du témoin, où nous enregistrons une résistance à la flexion de 6,6 MPa pour (ML) ; soit une amélioration de plus de 8 %.

Comparativement avec nos propres expériences, nous pouvons noter les résultats sur des bétons avec un taux variant entre 15 et 30% du laitier broyé d'El-Hadjar mais avec deux modes d'incorporation différents (Kriker,1992 ; Guernouti, 2002).

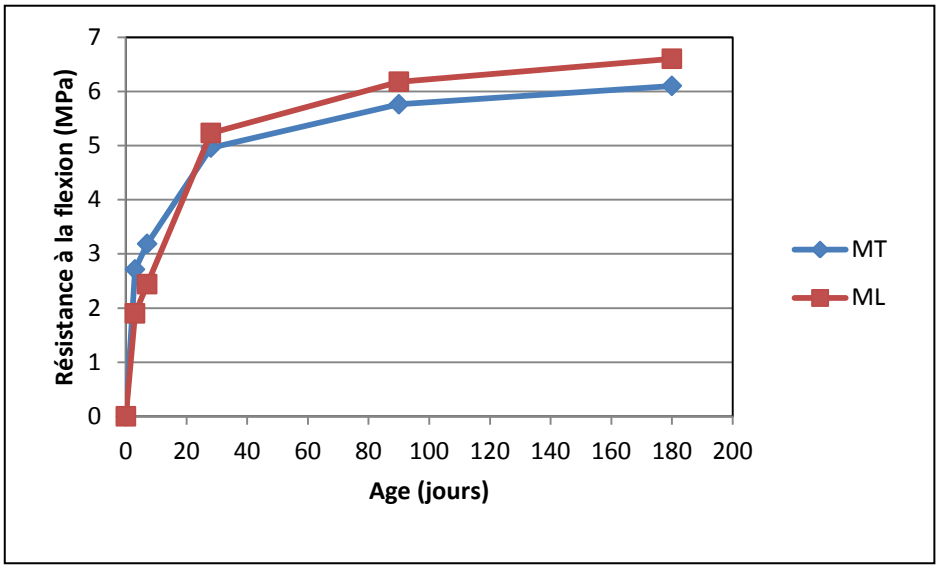


Figure IV.9 : Résistance à la flexion du mortier au laitier en fonction d'âge.

VI.3.2.3. Effet des fillers calcaires

A- Résistance à la compression

La figure IV.10 montre l'évolution de la résistance à la compression des mortiers contenant 10 % de fillers calcaire en fonction de l'âge. Il est aisé de remarquer que la

résistance du mortier au calcaire (MC) est inférieure à celle du mortier de contrôle (MT). Aux jeunes âges (3 et 7 jours); la différence entre les deux résistances est autours de 15%.

Cette approche des résistances entre le mortier de contrôle et celle contenant 10% de fillers calcaires (qui s'avère dés les premiers jours), peut être attribuée à l'accélération de l'hydratation des C_3S en présence des particules de calcaire d'une part et à la réaction qui se produit entre les C_3A du ciment portland (CEMI) et les particules de calcaire formant ainsi des carboaluminates de calcium hydratés qui se précipitent dans les pores d'autre part.

La perte de résistance due à la diminution du poids du ciment portland, sera -par conséquent- rattrapée par l'effet positif de ces fillers, à condition que la teneur soit optimisée à 10% de fillers calcaires. Dans le cas contraire, nous aurons une chute de résistance.

A 28 jours la résistance du mortier (MC) s'approche de plus en plus de celle du témoin (MT) et l'écart entre les deux devient seulement 12%.

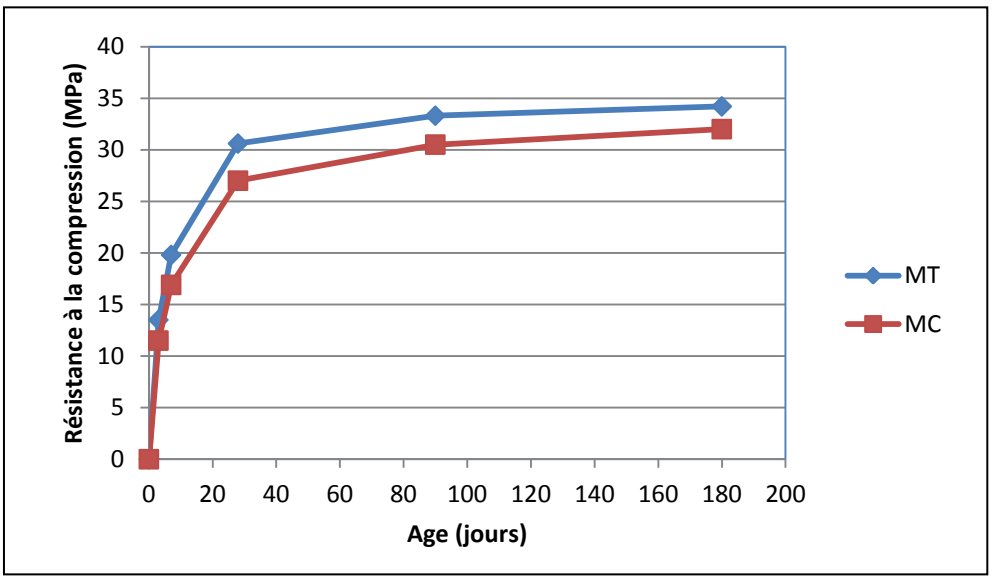


Figure IV.10 : Résistance à la compression du mortier au calcaire en fonction d'âge

A long terme, 90 et 180 jours, nous remarquons que les résistances ont la même allure que celles du témoin et restent très proches; ce qui confirme l'effet bénéfique des fillers calcaires sur la résistance et par conséquent sur l'économie du ciment.

A six mois nous enregistrons une résistance de 32 MPa, soit une différence de 6,5% par rapport au témoin.

D'autres travaux et notamment ceux de (Kerbouche et al., 2009) , nous permettent de corroborer nos propres résultats. En effet, ils ont trouvé qu'au jeune âge, 2 jours, la résistance

des mortiers contenant 10% de fillers calcaire est très comparable à celle du mortier témoin et elle représente 92% de celle du témoin. A long terme, 90 jours, le rapport devient presque de 95%.

En substituant 10% des fines argileuses dans le sable utilisé par les fines calcaires, les résistances dépassent légèrement celles du béton témoin. A 90 jours il a enregistré un gain de résistance de 6% (Guernouti, 2002).

En revanche, nous aurons les mêmes résultats aux jeunes âges, mais à long terme l'écart entre les résistances des mortiers (MT) et (MC) s'élargit et atteint une perte de 23% à 90 jours (Senhadji et al., 2015).

Nous pouvons conclure en affirmant qu'en plus de leur rôle physique de remplissage (inerte), les fillers calcaires peuvent jouer un rôle actif dans l'hydratation du ciment.

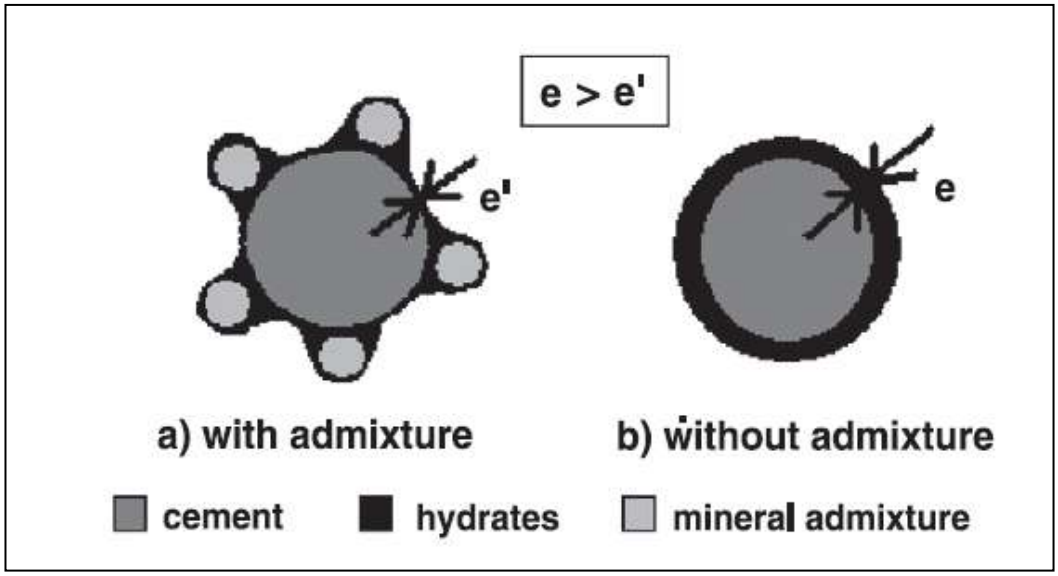


Figure IV.11 : Représentation schématique d'une approche expliquant l'amélioration de l'hydratation du ciment avec et sans ajout inerte selon (Lawrence et al.,2003).

B- Résistance à la flexion

La résistance à la traction par flexion a la même allure que la résistance à la compression (figure IV. 12). En effet, le mortier avec fillers calcaires (MC) développe des résistances inférieures à celles du témoin aux jeunes âges, 3 et 7 jours ; à cet âge la différence est de 15% à 12 % respectivement. A 28 jours la différence devient plus petite (8%) et les

résistances sont plus proches, soit 5,76 MPa pour le mortier (MT) et 5,4 MPa pour la composition (MC).

Après, la résistance augmente lentement et reste tangente à celle du témoin. A l'âge de six mois, nous obtenons une résistance à la flexion de 5,78 MPa ; soit une différence de 5,25% par rapport à celle du mortier témoin (MT).

Il est à signaler que se sont les mêmes constations de Kerbouche et al., (2009), si nous prenons 10% de calcaire.

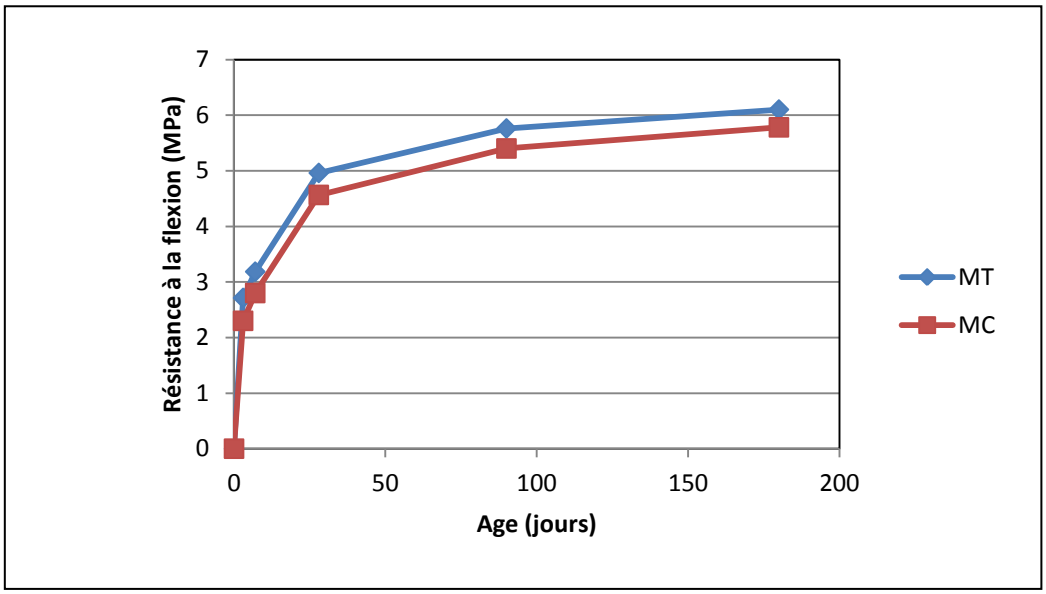


Figure IV.12:Résistance à la flexion du mortier au calcaire en fonction d'âge

VI.3.2.4. Effet du sable de dunes broyé

A- Résistance à la compression

Dans cette partie du travail, nous nous focalisons sur l'effet du sable de dunes broyé et nous étudions son impact sur la résistance à la compression. Les résultats sont synthétisés graphiquement par la figure IV. 13. A cet effet, nous voyons que la résistance à la compression du mortier avec 10% du sable de dunes broyé (MSDB) est proportionnelle avec l'âge.

Aux jeunes âges 3 et 7 jours, le mortier (MSDB) développe des résistances qui restent inférieures à celles du mortier témoin (MT) ; elles représentent presque 80% de celles du témoin. A partir de cet âge (7 jours), l'écart entre les deux tendances commence à se réduire.

Cette situation s'explique par la cinétique de la réaction d'hydratation du ciment et de la réaction de poudre du sable de dune avec la portlandite en fonction du temps.

A 28 jours, la résistance du mortier (MSDB) devient légèrement plus proche de celle du témoin avec une différence de 9 %, ce qui prouve l'effet bénéfique du sable de dunes broyé sur la résistance. A partir de cet âge la résistance continue à s'améliorer et l'écart devient plus petit par rapport à celle du témoin.

A 90 jours, la différence de résistance décroit encore et elle est autour de 6 %. Et à 180 jours ; la résistance continue à se converger vers celle du témoin, et la différence devient négligeable (3,5%). De cette tranche temporelle, une tendance de la résistance vers la stabilisation se profile.

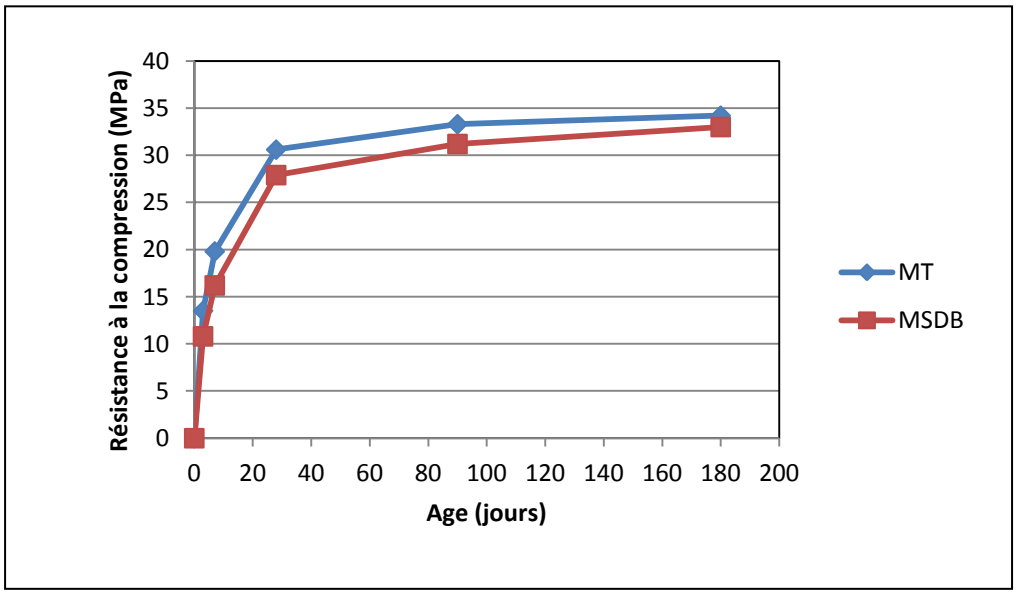


Figure IV.13 : Résistance à la compression du mortier au sable de dunes broyé en fonction d'âge

Ces résultats peuvent être expliqués par la conjugaison de deux effets entrant en concurrence dans le processus. D'abord, nous notons l'effet chimique, particulièrement, pouzzolanique, du sable de dunes broyé ; ensuite, la cinétique de la réaction d'hydratation du ciment et de la réaction du sable de dune broyé avec la portlandite en fonction du temps.

D'autres travaux se sont penchés sur l'effet de l'incorporation du sable de dunes broyé au ciment portland. Sachant que la poudre du sable est une poudre siliceuse, elle peut avoir

les mêmes avantages physiques et pouzzolaniques que d'autres ajouts, malgré sa nature cristalline.

La substitution d'une partie de ciment portland par une teneur inférieure ou égale à 20 % de poudre de sable de dunes, avec une finesse de 4000 cm^2/g, n'aura seulement aucun effet négatif sur la résistance mécanique de la pâte durcie mais elle l'altère aussi d'une manière positive. De plus, il est enregistré un gain de résistance à partir du 7ème jour. Cette amélioration augmente avec l'âge par l'effet pouzzolanique du sable de dune broyé d'une part, et par son effet physique de remplissage d'autre part, jusqu'à 90 jours. A cet âge, un gain de résistance de 16% est obtenu (Guettala et Mezghiche, 2011).

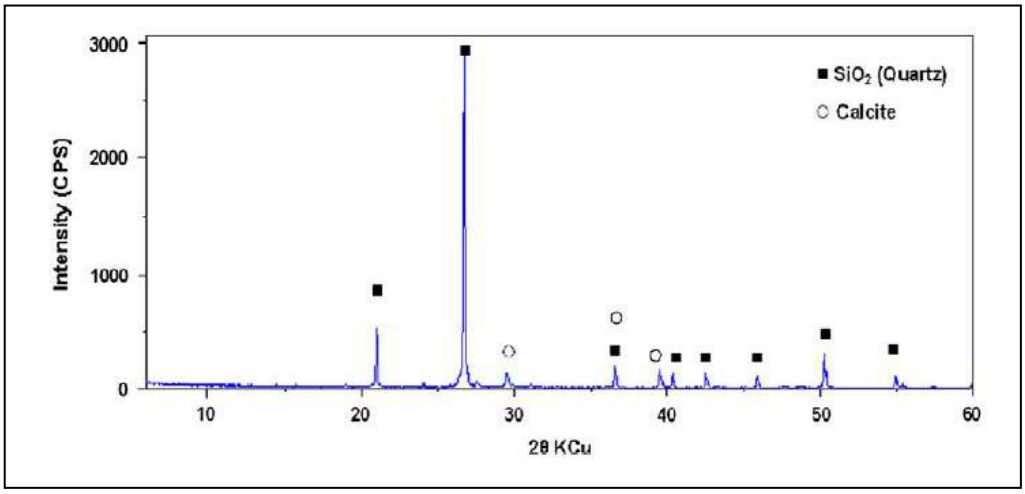


Figure IV.14 : Diffractogramme de rayons X du sable de dunes broyé (de Biskra) utilisé par S. Guettala, et B. Mezghiche, (Guettala et Mezghiche, 2011).

Les résultats obtenus dans ces conditions expérimentales sont dus à trois effets combinés du sable de dunes broyé. Nous explicitons ces effets qui sont de nature physique, physico-chimique et chimique, sur la caractéristique liante du ciment Portland (Guettala et Mezghiche, 2011; Mechti et al., 2013) :

- Le rôle physique se manifeste par l'effet de remplissage des fines sableuses ; par conséquent le nombre et le volume des pores deviennent réduits, et le squelette plus dense et plus résistant.

- L'effet physico-chimique peut être expliqué par l'effet de la finesse de la poudre sableuse qui fait accélérer l'hydratation et améliore la résistance aux jeunes âges, même en réduisant le dosage en ciment.
- L'effet chimique, notamment pouzzolanique, du sable de dune broyé. Par sa composition siliceuse, il réagit avec la chaux libre résultant de l'hydratation du ciment et donne des silicates hydratés C-S-H supplémentaires qui contribuent à la résistance mécanique des pâtes de ciment à moyen et surtout à long terme.

Ce sont les mêmes constatations de Mechti et al. (2013), qui ont travaillé sur l'effet de l'incorporation du sable de dunes broyé dans des pâtes pures de ciment. Ils ont trouvé qu'au bout de 28 jours, les résistances à la compression des pates de ciment durcies renfermant 10%, 15% et 20% du sable sont supérieures à celles du ciment de référence. Ils ont conclu aussi, après une analyse en DRX, qu'il y a une fixation de chaux par les fines siliceuses d'origine sableuse, et une formation de silicate de calcium hydraté supplémentaires (C-S-H) ; ce qui prouve la réactivité pouzzolanique du sable de dunes broyé, malgré sa structure cristalline.

B- Résistance à la flexion

La résistance à la traction par flexion du mortier au sable de dunes broyé évolue avec l'âge et elle a la même allure que celle de la compression (Figure IV. 15).

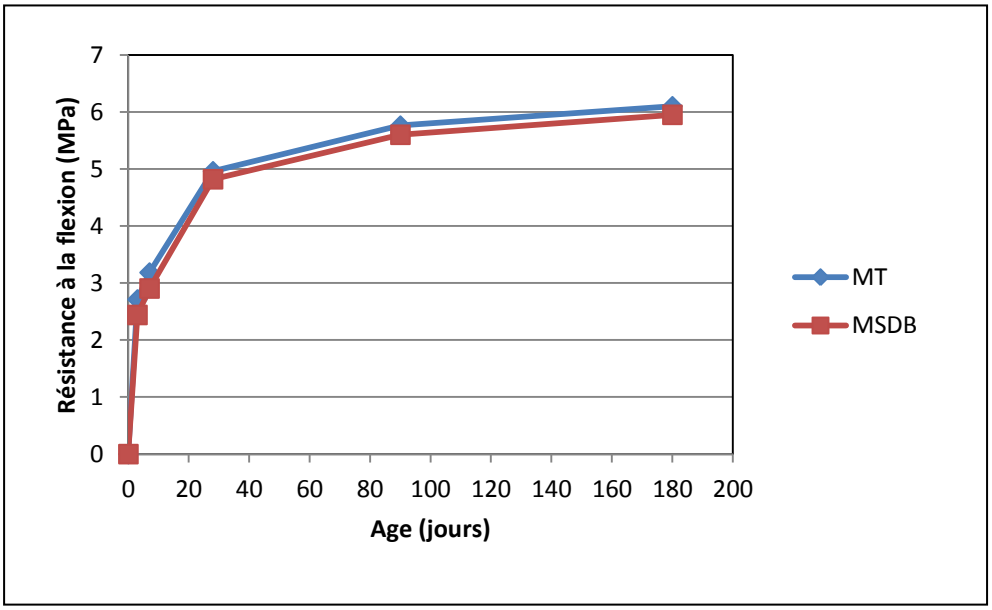


Figure IV.15: Résistance à la flexion du mortier au sable de dunes broyé en fonction d'âge

En effet, dans cette expérience, nous prenons un mortier contenant 10 % du sable de dunes broyé (MSDB) ; nous constatons que ce type de mortier développe des résistances inférieures à celles du témoin aux jeunes âges, 3 et 7 jours. A ces deux âges les résistances à la flexion du (MSDB) ne représentent que presque 90% de celle du témoin (MT) ; toutefois, avec une légère amélioration à l'âge du 7ème jour se profile.

L'impact du sable de dunes broyé sur la cinétique de l'hydratation du ciment au jeune âge est clairement prouvé. Cette amélioration commence à réduire l'écart entre les résistances à la flexion jusqu'au 28ème jour. A cet âge, nous remarquons que l'écart entre les résistances se décroit, et nous avons enregistré une différence de 3%.
A long terme les résistances tendent à se coïncider et la différence devient presque négligeable à 90 et à 180 jours. A ce moment, le mortier (MSDB) présente une résistance à la flexion maximale de 5,95 MPa ; qui est presque similaire à celle du mortier témoin (MT) ; avec un écart inférieur à 3 %.

En considérant un autre matériau cimentaire, plus précisément le béton à ultra hautes performances ou BUHP, et dans le cadre de la valorisation du sable de dune ; des études ont été réalisées sur l'association des ces deux ingrédients et il est intéressant de faire le parallèle. Il a été constaté que l'introduction du quartz broyé dans les BUHP ne conduit pas globalement à une augmentation importante des résistances à la flexion, soit +2,6 %. En revanche, une performance par rapport à la résistance en compression est démontrée. Ainsi, l'ajout influe favorablement sur les résistances en compression, soit +8,2 % (Tafraoui, 2009).

VI.3.2.5. Comparaison entre l'effet des quatre ajouts sur la résistance mécanique

Les figures IV.16 et IV.17 illustrent le comportement mécanique des différentes compositions des mortiers avec en fonction de l'âge.

La remarque prégnante qui se dégage de ces graphiques est la tendance quasiment croissante de la résistance mécanique, dans ces deux versions : compression et flexion en fonction du temps et ce pour tous les mortiers.

Pour les additions considérées comme actives : le laitier d'El-Hadjar, la pouzzolane de Béni-Saf, le sable de dunes broyé et même l'ajout considéré comme inerte (les fines calcaires), nous remarquons qu'ils ont toutes altéré la résistance, à court et à long terme.

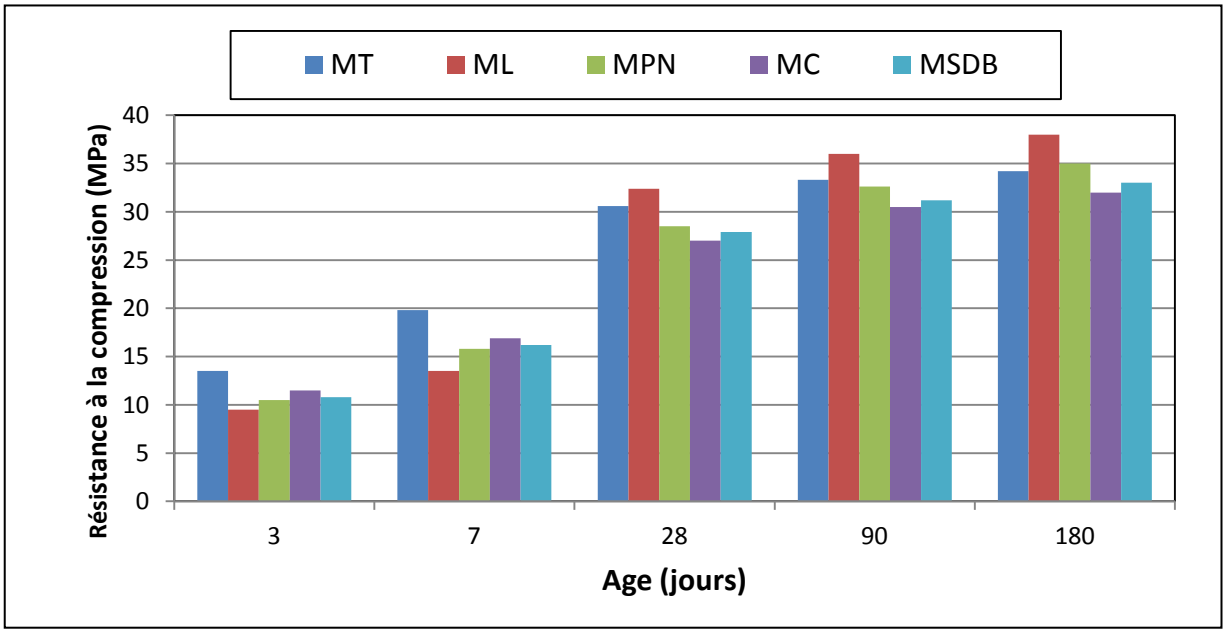


Figure IV.16: Résistance à la compression des différents mortiers avec ajouts en fonction d'âge.

A court terme, 3 et 7 jours, et avant l'âge de 28 jours, le mortier témoin (MT) dépasse tous les mortiers en résistance ; cela est dû à l'activité lente des ajouts.

A partir de 28 jours, l'évolution des contraintes commence à changer ; en effet, à cet âge le mortier au laitier (ML), a dépassé toutes les autres compositions y compris le mortier témoin ; ce qui peut être expliqué par l'activité importante du laitier par rapport aux autres, qui commence à se manifester après cet âge. Elle rend la matrice plus dense et par conséquent plus résistante.

Concernant l'ajout pouzzolane, et le sable de dunes broyé (MPN, MSDB) les résistances restent toujours inférieures quoi qu'elles convergent à long terme vers celle du mortier témoin ; cela peut être expliqué par l'activité lente et relativement faible de ces deux ajouts par rapport au laitier (ML).

Pour les fillers calcaires (MC), ils ont développé des résistances à cours terme (3 et 7 jours) mieux que les autres ajouts qui ne sont pas actifs au début, quoi qu'elles restent toujours plus faibles que celle du témoin. A 28 jours elle commence à se stabiliser par rapport aux autres et elle donne la résistance la plus faible de tous les ajouts à long terme. Cela peut être expliqué par la nature des fillers calcaires qui sont considérés comme inertes ou à une très faible activité. Ce caractère a un effet physique et physico-chimique sur la cinétique d'hydratation.

Au début, les fillers calcaires jouent un rôle de remplissage des pores structurales ; ils sont considérés comme inertes, puis ils accélèrent l'hydratation du ciment ce qui densifie la microstructure et rend le mortier plus résistant.

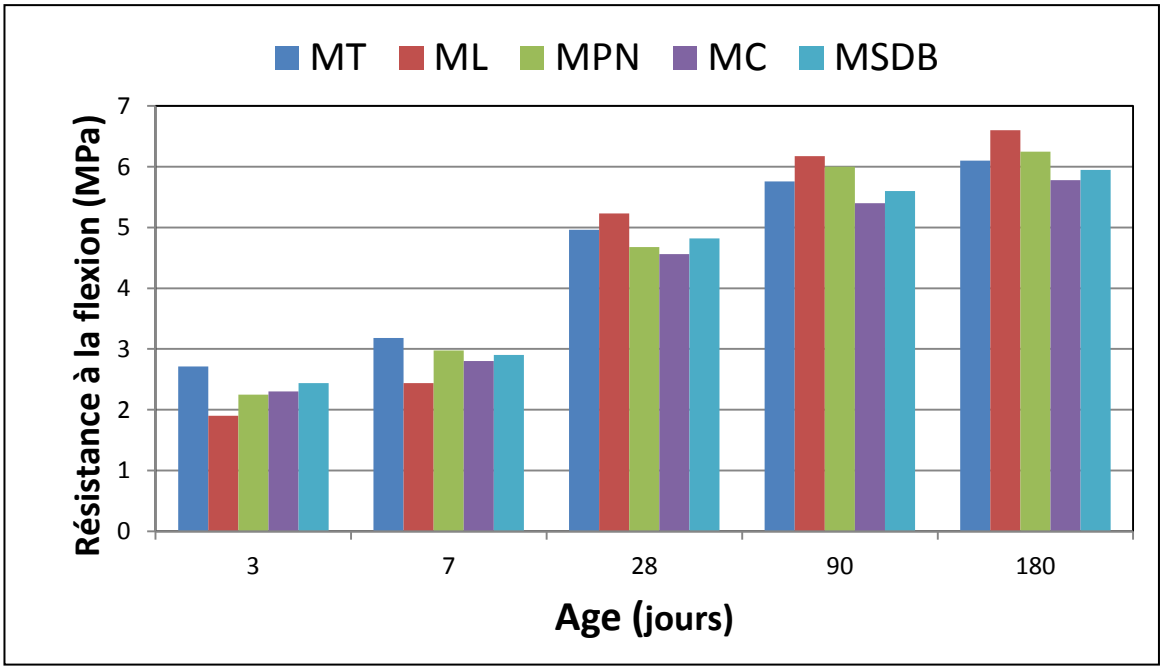


Figure IV.17: Résistance à la flexion des différents mortiers avec ajouts en fonction d'âge.

Enfin nous pouvons constater que l'effet des ajouts se diffère d'un ajout à un autre à court et à long terme.

A court terme tous les ajouts se manifestent par leur effet physique (remplissage ou filler). A moyen et à long terme c'est l'activité chimique (pouzzolanique) qui commence à se manifester avec des différents degrés et aspects. Cela peut faire la différence entre les quatre ajouts.

IV.4.ESSAIS DE DURABILITE

Comme dans tous les travaux inhérents à la recherche performantielle des matériaux cimentaires, les essais de durabilité demeurent un outil incontournable pour leurs caractérisations.

L'appréciation de la durabilité s'appuie sur les essais suivants :

- Absorption capillaire,
- Résistance à l'attaque des acides,
- Essai ultrasonique,

IV.4.1.Absorption capillaire (sorptivité)

Nous rappelons que l'essai a été réalisé sur des demis éprouvette (7x7x28 (cm)) suivant le mode opératoire décrit dans le paragraphe III.4.3.4.

Figure IV.18. : Essai d'absorption capillaire

La figure IV.19 présente l'influence des ajouts minéraux sur l'absorption d'eau des mortiers à l'âge de 90 jours. Les mesures sont prises après 72 heures d'immersion.

La première remarque qui s'impose réside dans le fait que tous les ajouts ont un effet positif, ils ont tous réduit l'absorption capillaire; c'était la même constatation de plusieurs

études entreprises pour cette raison, telles que celles de Kriker (1992), Temiz et al, (2007) et Kerbouche, (2009), Hadjsadok et al (2012).

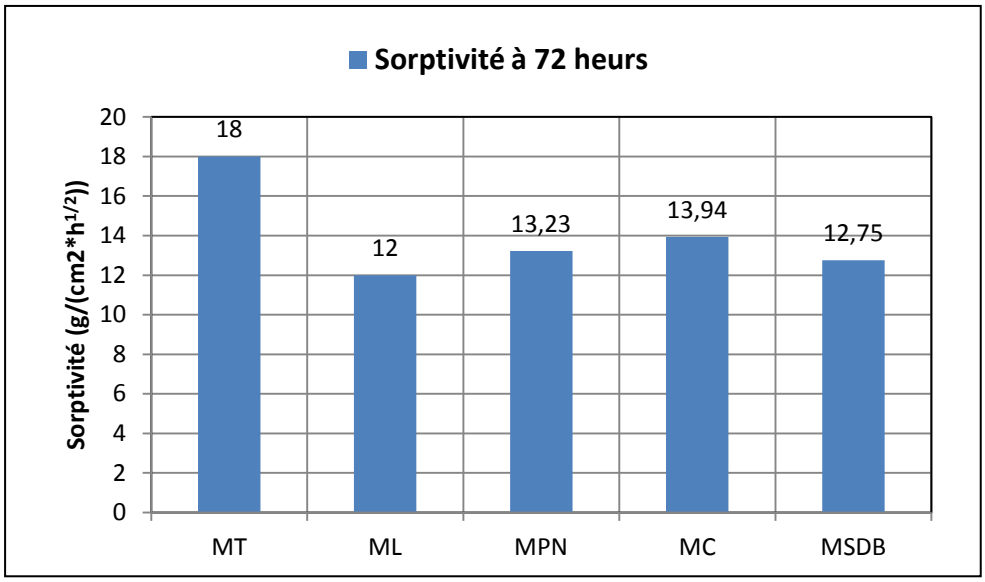


Figure IV.19 : Absorption capillaire des différents mortiers conservés dans l'eau douce à l'âge de 90jours (après 72 heures d'immersion).

Comme nous voyons sur ce graphique ; pour les cinq compositions à savoir MT, ML, MPN, MC, et MSDB, les valeurs de la sorptivité capillaire prennent respectivement les valeurs suivantes : 18, 12, 13.23, 13.94 et 12.75 ($g/cm^2.h^{1/2}$). Ces caractéristiques des mortiers pris dans les conditions expérimentales décrites précédemment peuvent s'expliquer par deux actions principales ; d'une part, l'effet physique par finesse : le remplissage. D'autre part, l'activité hydraulique et pouzzolanique des ajouts qui se manifeste.

Selon les résultats cités ci-dessus, le laitier d'El-Hadjar se classe en première position par son effet positif ; l'incorporation de 20% de ce dernier est très avantageuse, il a réduit l'absorption de 33% par rapport au témoin(MT). Dans une étude antérieure Kriker (1992), a trouvé que 15% de laitier diminue l'absorption de 28%, (Kriker, 1992).

C'était la même constatation de Hadjsadok et al., qui ont utilisé le laitier d'El-Hadjar à différents pourcentages (15, 30 et 50%) dans la formulation du béton (figure IV.20), (Hadjsadok et al., 2011; Hadjsadok et al, 2012).

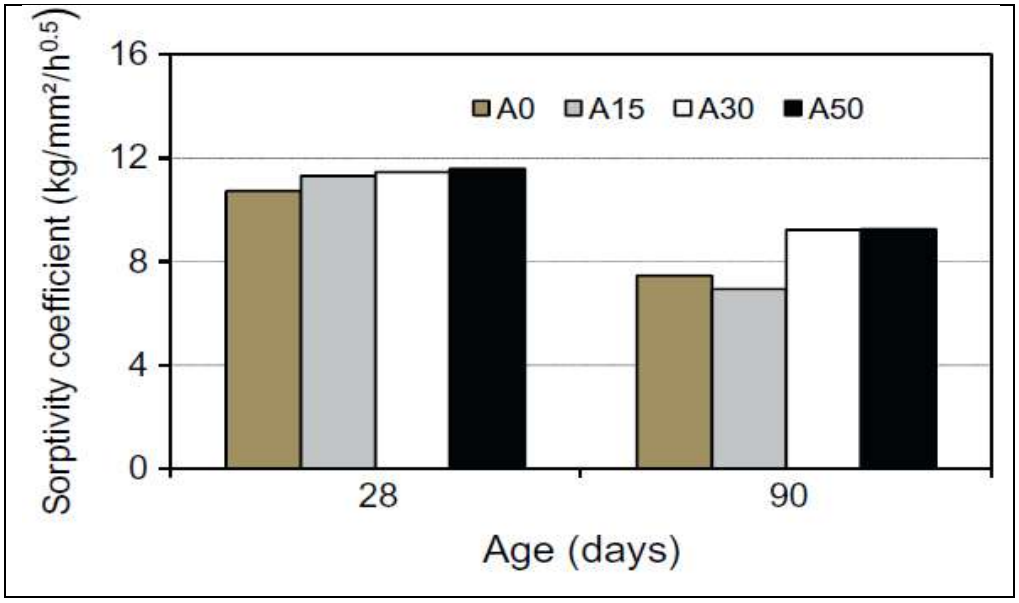


Figure IV.20 : Effet de l'incorporation du laitier (15, 30, 50%) sur l'absorption capillaire de béton aux différents âges, selon Hadjsadok et al, (Hadjsadok et al, 2012).

En deuxième position, nous trouvons le sable de dune broyé, cet ajout a réduit l'absorption de 29% par rapport au témoin (MT) ; son effet est très proche à celui du laitier.

La pouzzolane de Béni-Saf se situe en troisième classe ; pour le mortier (MPN), nous avons une réduction d'absorption capillaire de 26.5% par rapport au témoin (MT), ce résultat a été établit par Ghrici et autres à l'âge de 28 et 90 jours avec des différents rapports (E/Liant), (Ghrici et al, 2007).

En dernière classe, arrive le mortier aux fillers calcaires (MC) qui n'est pas trop loin de la pouzzolane (MPN) avec une réduction de 22.5%. L'explication vient de l'influence des fillers qui se limite à l'effet physique seulement, effet inerte de remplissage. Ce type d'ajout n'est pas trop actif comme les trois autres. C'est la même constatation de Tsivilis et autres qui ont constaté que le béton contenant le ciment au calcaire a donné des valeurs de sorptivité légèrement plus basses, comparées au béton contenant le ciment sans ajout, (Tsivilis et al, 2003, Ghrici et al, 2007). .

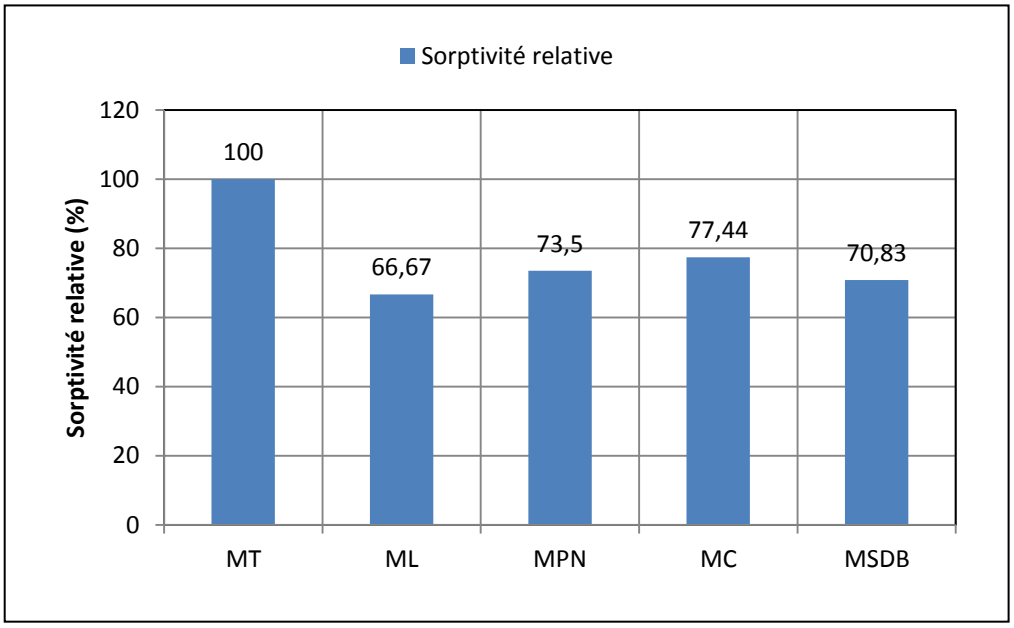


Figure IV.21 : Absorption capillaire relative (par rapport au témoin) des différents mortiers conservés dans l'eau douce à l'âge de 90 jours après 72 heures d'immersion.

IV.4.2.Attaque par les acides

Les acides choisis sont l'acide chlorydrique (HCl) et l'acide sulfurique (H_2SO_4), ce sont les acides les plus agressifs dans la nappe de la région. Les solutions sont préparées avec des concentrations trois (3) fois supérieures à celle de l'eau la plus saturée des différentes nappes de la région d'Oued-Souf.

Tableau IV. : Analyse chimique des eaux remontées des deux nappes les plus saturées de la Wilaya d'El-Oued

N° du Point d'eau	Ca ++ (mg/l)	Mg ++ (mg/l)	NH4 + (mg/l)	Cl - (mg/l)	SO4 -- (mg/l)	HCO3- (mg/l)	NO3 - (mg/l)	NO2 - (mg/l)	F - (mg/l)	TUR (NTU)	R s (mg/l)	pH /
D18	617،23	104،51	0،15	**1640،23**	**3363،00**	51،24	64،65	0،05	1،83	0،26	6980	**7،95**
D20	637،27	75،35	0،10	588،22	**3373،00**	420،00	47،81	0،01	1،51	0،21	5060	**7،43**

Nous avons simulé une concentration des acides provenant de la nappe la plus saturée; les solutions sont les suivantes:

- Pour l'acide chlorydrique (HCl), la concentration est de 5000 mg/litre ; soit un pH=1,95,
- tandis que pour l'acide sulfurique (H_2SO_4) nous avons pris une concentration de 10500 mg/litre ; soit un pH=1,42.

Les échantillons sont de type (4x4x16 cm), elles sont toutes conservées dans l'eau potable pendant 28 jours, puis elles sont immergées dans les solutions acides.

La mesure de la masse se fait chaque dix (10) jours dans les trois premiers mois, puis on a pris un prélèvement à l'âge de six mois.

L'appréciation de l'essai a été évaluée par:

- L'observation visuelle des éprouvettes après l'attaque des deux acides.
- La mesure de la variation de la masse des éprouvettes durant le temps.
- La mesure de la vitesse des ondes ultrasoniques à travers les éprouvettes attaquées.
- L'observation par le MEB.
- L'analyse DRX.

IV.4.2.1. Observations visuelles

L'inspection visuelle des mortiers immergés dans les solutions acides (H_2SO_4 et HCl) sert à une évaluation préliminaire de l'aspect extérieur des éprouvettes, et elle nous permet d'examiner toute sorte d'endommagement ou de dégradation superficielle des échantillons.

C- Attaque par l'acide sulfurique (H_2SO_4)

Après six mois de conservation dans la solution d'acide sulfurique, les échantillons ont un aspect plus ou moins dégradé comparativement aux échantillons conservés dans l'eau douce (Figure IV.22).

En effet la surface des mortiers de toutes les compostions est un peu décapée et recouverte d'une couche blanchâtre-jaunâtre plus tapissant (formation gypseuse) résulte de la réaction de l'acide sulfurique avec la portlandite libérée (la chaux libre $Ca(OH)_2$) lors de l'hydratation du ciment selon la réaction suivante :

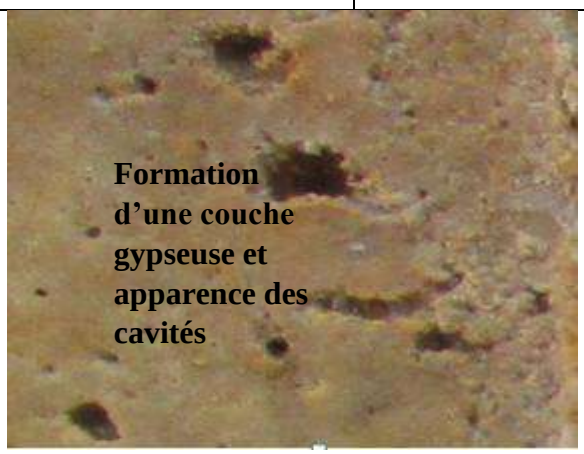
$$H_2SO_4 + Ca(OH)_2 \longrightarrow CaSO_4.2H_2O \quad \text{(Gypse: G)} \qquad (IV.1)$$

Et avec l'existence des C_3A (du ciment), on aura de l'éttringite selon la réaction suivante :

$$3(CaSO_4.2H_2O)+3CaO.Al_2O_3 + 26H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O \text{ (Ettringite : E)}. \quad (IV.2)$$

Ces deux substances sont nettement apparues dans les analyses DRX ; (Figures IV.40-49).

ML (Laitier)	MPN (Pouzzolane)



MT (Témoin)

MC (Calcaire)	MSDB (Sable de dunes)

Figure IV.22 : Etat des éprouvettes immergés dans la solution de (H_2SO_4) pendant 180 jours (Formation d'une couche gypseuse et apparence des cavités)

Nous remarquons aussi que les grains de sable sont un peu déchaussés. Cela est dû à la dissolution du liant (ou l'un de ses constituants) au niveau superficiel de l'éprouvette, ce qui provoque la chute des grains du sable et l'apparence des cavités à cause de la perte d'adhérence.

Le degré de cette dégradation se diffère d'une composition à une autre. En effet la surface du mortier témoin (MT) est le plus détériorée, tandis que le mortier au sable de dune broyé (MSDB) est le moins affecté. Les trois autres compositions (MPN, ML, MC) sont moyennement altérées.

D- Attaque par l'acide chlorhydrique HCl

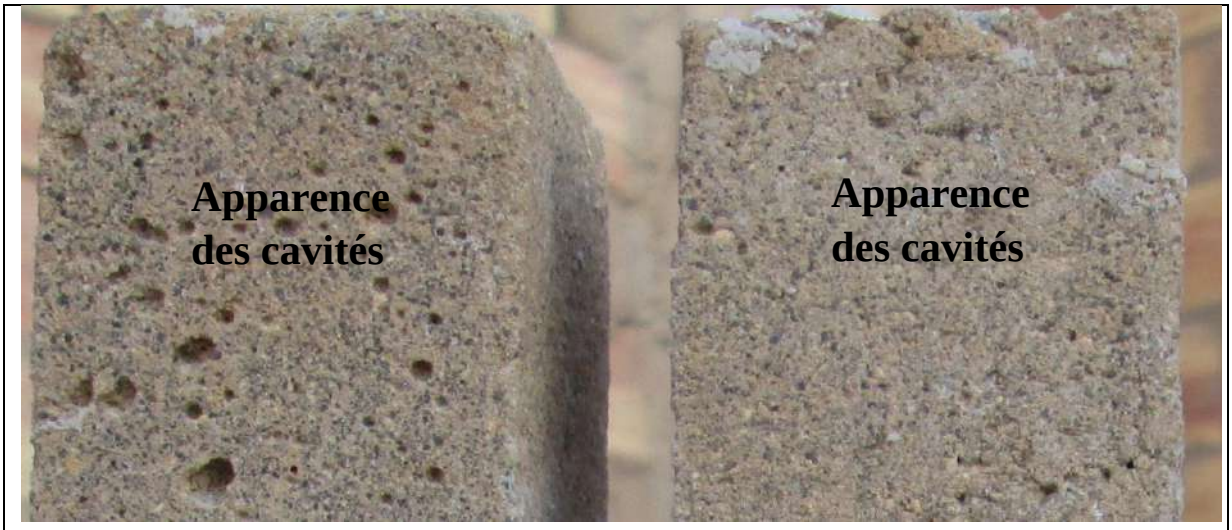
Comparativement aux échantillons conservés dans la solution d'acide sulfurique, les mortiers conservés dans la solution d'acide chlorhydrique HCl n'ont pas formé une couche superficielle au niveau de la surface. Au point de vue dégradation, ce sont tous altérés par la solution acide.

Dans la solution d'acide chlorhydrique, et après 180 jours de conservation, les échantillons ont un aspect légèrement dégradé (figure IV.23).

La surface des mortiers est légèrement décapée par la formation de très petites cavités (alvéoles), ceci peut être du à la solubilité du sel formé (chlorure de calcium) après réaction de l'acide chlorhydrique avec la portlandite libérée lors de l'hydratation du ciment et à sa grande lixiviation à l'extérieur. Cette formation est gérée par la réaction suivante :

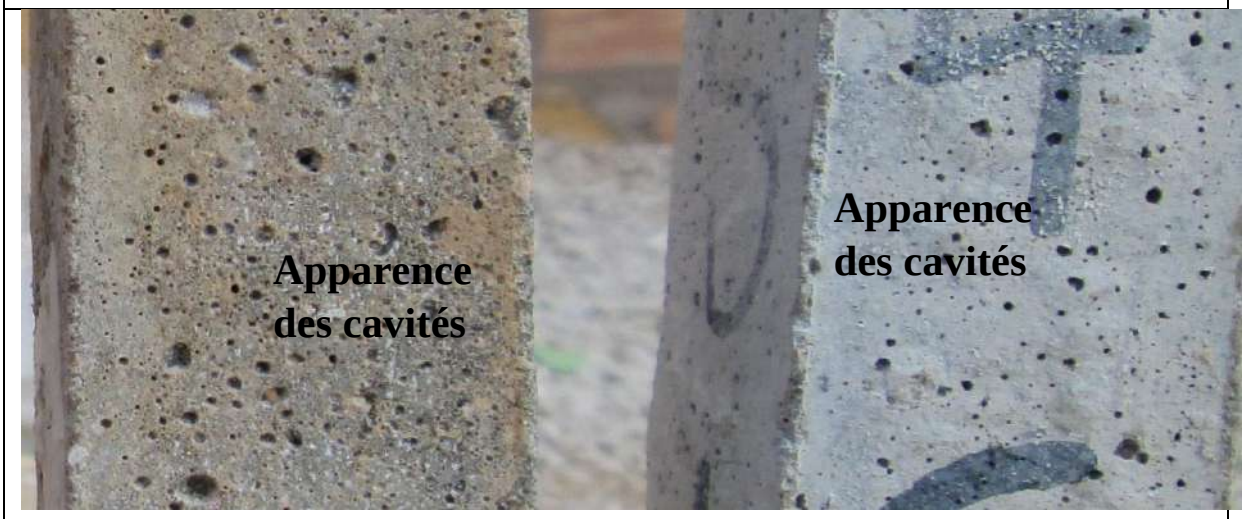
$$HCl + Ca(OH)_2 \longrightarrow H_2O + Ca(Cl)_2 \quad \text{(chlorures de calcium)} \qquad (IV.3)$$

Ce qui a été apparu sur les analyses de la microstructure notamment celle du DRX, (Figures IV.40-49).



ML (Laitier)	MPN (Pouzzolane)

MT (Témoin)



MC (Calcaire)	MSDB (Sable de dunes)

Figure IV.23 : Etat des éprouvettes immergés dans une solution de (HCl) pendant 180 jours (Apparence des cavités sans formation de la couche superficielle).

IV.4.2.2. Variation de masse

Pendant la conservation des éprouvettes dans les solutions acides nous avons examiné la variation de la masse des éprouvettes tous les dix jours, jusqu'au six mois.

C- Attaque par l'acide sulfurique (H_2SO_4)

Pour le cas de l'acide sulfurique nous avons remarqué une précipitation d'une couche superficielle sur toutes les éprouvettes, et un gain de masse croissant tout au long la période d'essai (180 jours). Donc nous avons tout d'abord évalué ce gain de masse (figure IV.24), et à la fin nous avons éliminé complètement cette couche précipitée et nous avons calculé la perte de masse (figure IV.30).

A-1. Evaluation du gain de masse

La figure (IV.4) montre l'évolution de la masse des différentes compositions de mortier avec ajouts immergés dans une solution de H_2SO_4 pendant 180 jours (après une cure normale de 28 jours dans l'eau potable).

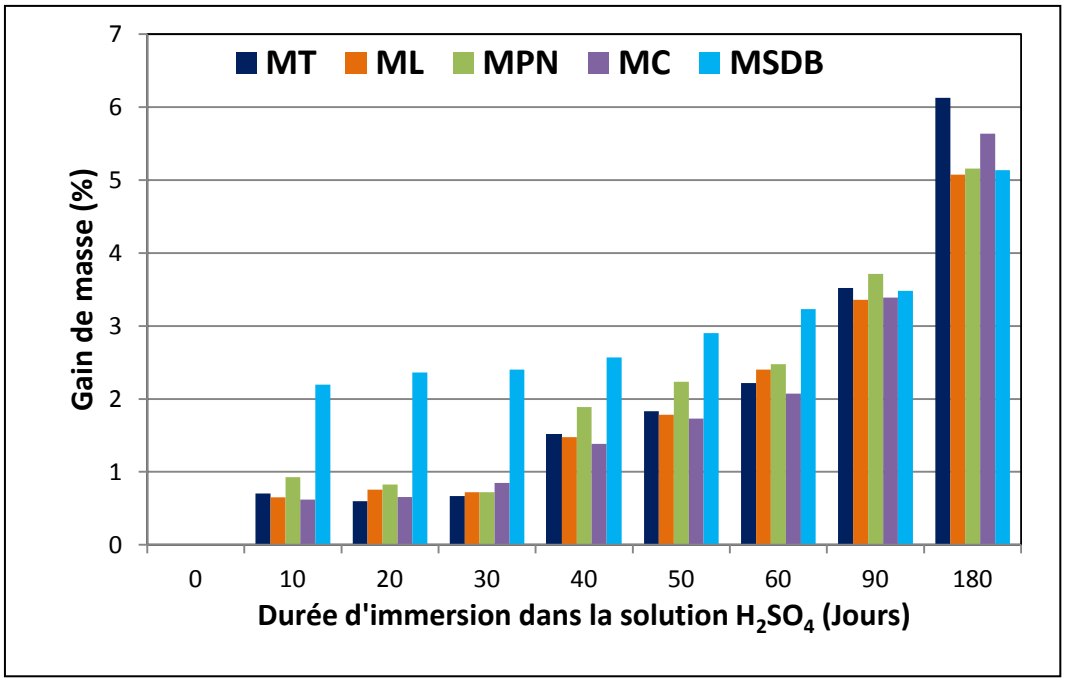


Figure IV.24 : Evolution de la masse des différentes compositions de mortier immergées dans l'acide sulfurique (H_2SO_4)

Nous remarquons une augmentation permanente de la masse de toutes les compositions au cours du temps, cette augmentation est due à la précipitation d'une couche gypseuse sur toutes les éprouvettes ; ce qui a été prouvé par plusieurs travaux de recherche effectués sur la résistance chimiques des mortiers avec et sans ajouts à l'attaque des différents types d'acides, (Ghrici et al, 2006; Benkaddour et al,2009; Laoufi al,2016).

Laoufi et al., (2016), et Ghrici et al., (2006), ont trouvé tous, que les éprouvettes contenant de la pouzzolane de Béni- Saf, immergés dans l'acide sulfurique ou l'acide (Na_2SO_4) marquent une augmentation (gain) de masse dans les premières semaines (jusqu'au 75 jours) d'immersion (Ghrici et al,2006; Laoufi al,2016).

La précipitation de la couche est due à la réaction de l'acide sulfurique avec les différentes composantes des mortiers (ciment et sable), notamment la chaux ($Ca(OH)_2$) libérée au cours de l'hydratation du ciment.

La réaction de l'acide sulfurique (H_2SO_4) et de l'hydroxyde de calcium ($Ca(OH)_2$) produit un sel de calcium, qui est le sulfate de calcium ($Ca(SO_4)$), qui est déposé comme gypse. Ce dernier composant cause une dégradation de la structure cimentaire et granulaire des différents mortiers. Ce processus est illustré ci-dessous:

$$H_2SO_4 + Ca(OH)_2 \longrightarrow Ca(SO_4) + 2H_2O \qquad \text{(IV.4)}$$

acide sulfurique + hydroxyde de calcium ⟶ sulfate de calcium + eau.

Les figure IV.24 et IV.25 montrent que l'apport de masse est maximal pour le mortier témoin (MT); ce qui pourra être expliqué par le fait que ce mortier libère d'une façon proportionnelle avec l'âge, le maximum de chaux ($Ca(OH)_2$) lors de son durcissement. Cette chaux libre réagit avec l'acide sulfurique, et nous donne la plus grande précipitation en comparant avec les autres compositions avec ajouts. Le gain de masse pour le mortier témoin est estimé à 6,12%, après six mois d'immersion.

Nous remarquons aussi que cette augmentation de masse est presque doublée entre l'âge de 3 et 6 mois d'immersion ; cela est due à la continuité des processus des réactions d'hydratation de ciment jusqu'au cet âge avancé. Au dessous de 30 jours d'immersion le gain de masse n'excède pas le 1%.

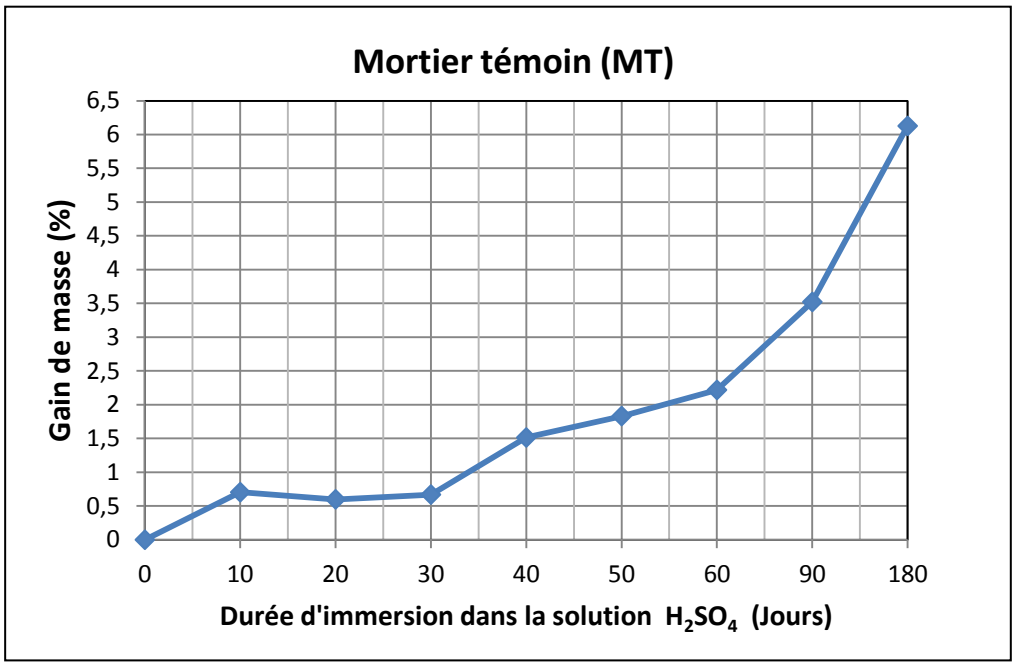


Figure IV.25 : Evolution de la masse du mortier témoin immergé dans l'acide sulfurique (H_2SO_4)

Pour les compositions avec ajouts nous remarquons que :

- Toutes les compositions (ML, MPN, MC, MSDB) ont un gain de masse plus petit par rapport au témoin (MT) à six mois d'immersion ; car ces mortier libèrent moins de chaux lors de leur durcissement grâce à la fixation de l'hydroxyde de calcium (la portlandite ou la chaux libre $Ca(OH)_2$) par l'ajout actif.

  Selon Laoufi et al., cette augmentation peut être interprétée par la formation de produits avec une faible solubilité et qui sont bloqués à l'intérieur de la matrice, ce qui explique le gain de poids. Les produits qui résultent de ces réactions sont l'éttringite et le gypse, (Laoufi et al., 2016).

  Selon Senhadji et al., (2015), la réaction des pouzzolanes avec la chaux libre donne plus de silicate de calcium hydraté (C-S-H) avec un rapport faible de CaO/SiO_2, ce qui mène à une décalcification progressive pour former d'autres hydrates tels que l'ettringite et le monosulfoaluminate, alors que la décalcification des C-S-H, avec un CaO/SiO_2 élevé (cas des C-S-H issus de l'hydratation du ciment Portland), produit une structure vulnérable dans la solution d'acide sulfurique, (Senhadji et al., 2015).

- Les compositions aux ajouts actifs, ML, MPN, MSDB sont très proches à long terme (6 mois), les trois compositions ont augmenté de 5 % ; soit une réduction de gain de 15%, par rapport au témoin.

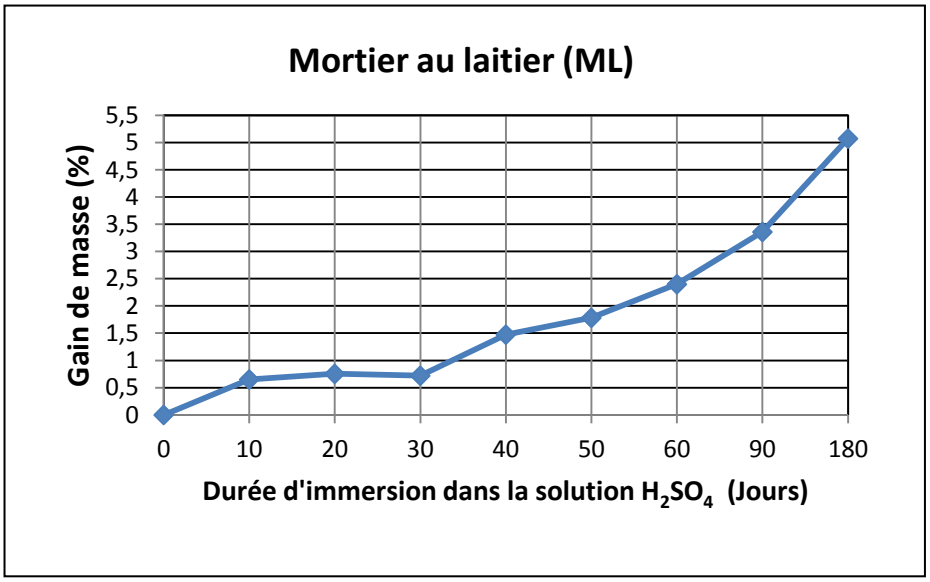


Figure IV.26 : Evolution de la masse du mortier au laitier immergé dans l'acide sulfurique (H_2SO_4)

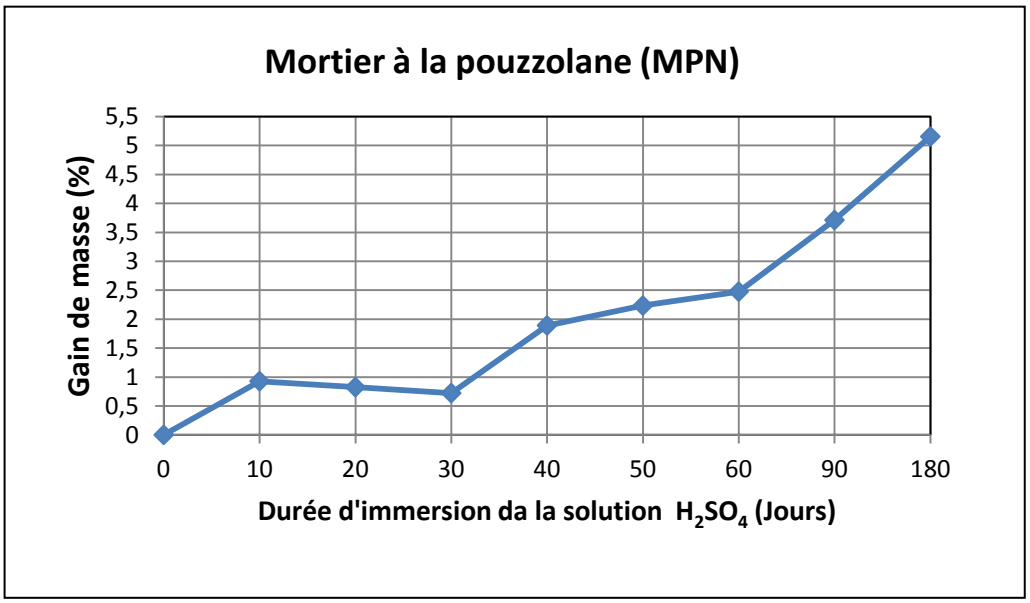


Figure IV.27 : Evolution de la masse du mortier à la pouzzolane immergé dans l'acide sulfurique (H_2SO_4)

- Pour l'ajout calcaire (MC) on a enregistré (à six mois d'immersion) une augmentation de masse de 5,63% (figure IV.28); c'est une augmentation relativement plus grande que celles des autres ajouts à cause de la teneur considérable en chaux qui la contient par rapport aux autres.

  D'une autre part le calcaire est toujours considéré comme un ajout inerte (même s'il présente une légère activité à long terme), donc il consomme peu de la portlandite, ce qui engendre plus de chaux libre dans la composition lors de l'hydratation du ciment.

- Pour le sable de dune l'augmentation est considérable dès les premiers jours d'immersion, puis elle se stabilise (figure IV.29), ce qui peut être expliqué par l'activité, un peu lente, du sable de dunes par rapport au laitier et à la pouzzolane.

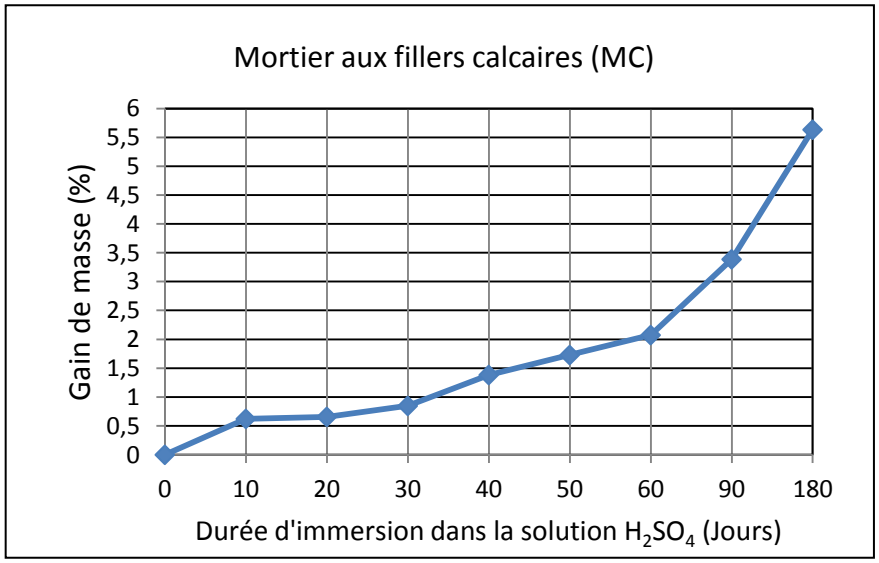


Figure IV.28 : Evolution de la masse du mortier aux fillers calcaires immergé dans l'acide sulfurique (H_2SO_4)

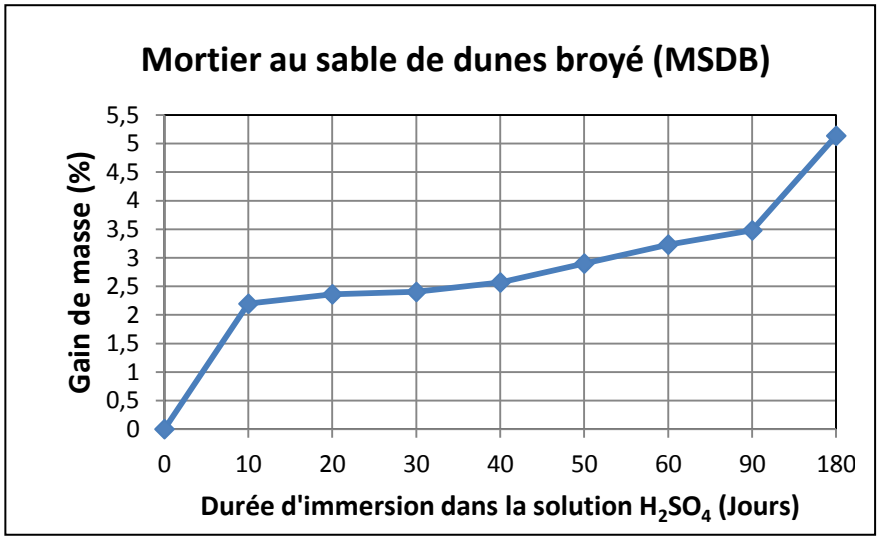


Figure IV.29 : Evolution de la masse du mortier au sable de dunes broyé immergé dans l'acide sulfurique (H_2SO_4)

A-2.Evaluation de la perte de masse

Cette étape d'essai a été effectuée après la première étape, qui est la mesure du gain de masse.

Les éprouvettes sont sorties de la solution et rincées avec de l'eau de robinet, puis elles sont essuyées à l'aide d'une lingette. Après, nous avons gratté finement la couche superficielle précipitée sur les éprouvettes jusqu'à l'élimination totale de cette couche et l'apparition de la couche originaire du mortier.

On pèse les éprouvettes et on mesure la perte du poids. On note que la couche grattée comporte aussi l'apport de masse déjà calculé et interprété. La perte sera calculée, alors, par rapport au poids initial de l'éprouvette avant l'immersion dans la solution acide.

La perte de masse est illustrée sur la figure IV.30. Nous remarquons que le mortier témoin (MT) présente la plus grande perte (3,5%), et que tous les quatre mortiers avec ajouts (ML, MPN, MC et MSDB) ont présenté des pertes plus petites que celle du témoin et très proches entres elles, ce qui prouve l'effet bénéfique des ajouts contre l'attaque de l'acide sulfurique.

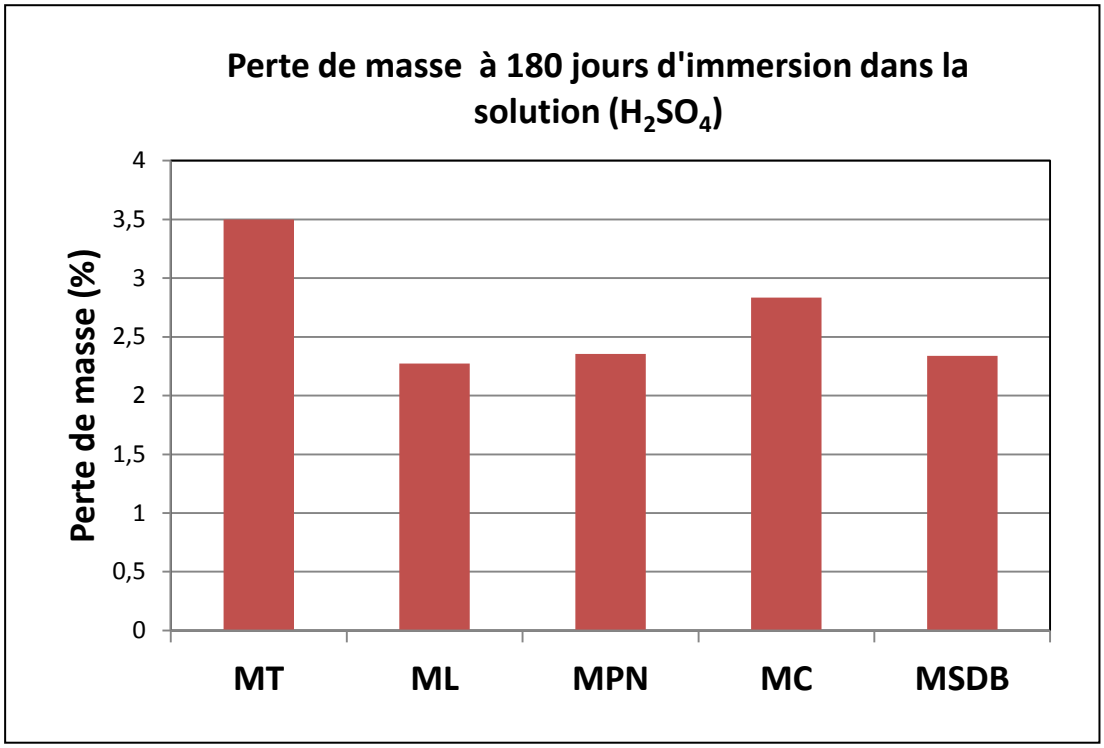


Figure IV.30 : Perte de masse (après rinçage et grattage) des différentes compositions à 180 jours d'immersion dans la solution (H_2SO_4).

La plus grande perte après celle du témoin c'est celle du mortier au calcaire (MC) avec 2,83% soit une baisse en perte de 19% par rapport au témoin. Ce résultat a été prouvé par Ghrici et al. (2007), qui ont utilisé 15% de fillers calcaires et il ont remarqué que ces derniers diminuent la perte de masse par rapport au témoin à presque 20% de baisse, (Ghrici et al., 2007).

Ils ont constaté aussi que les fines calcaires présentent un effet plus résistant à l'attaque d'acide sulfurique que d'autres ajouts tels que la pouzzolane naturelle de Béni Saf, ce que nous n'avons pas trouvé, (Ghrici et al., 2007).

Tandis que Kerbouche (2009) et Senhadji et al., (2015), ont confirmé notre résultat. Senhadji et al. ont constaté que (15%) de pouzzolane et plus bénéfique que (5%) de calcaire, à la résistance contre l'attaque de (5% d'acide sulfurique) ; quoi que leurs effets sont très proches et ils présentent une perte autours de 8% à 56jours, (Senhadji et al., 2015).

Les trois autres mortiers avec ajouts (ML, MPN, et MSDB) ont présenté des pertes très proches entre elles de 2,27%, 2,35% et 2,34%, soit une baisse en perte par rapport au témoin de 35% et 32,75% et 33,23% respectivement.

C'était la même constatation de Ghrici et al. (2006), qui ont trouvé la même chose avec une concentration de 1% de H_2SO_4 ; l'ajout pouzzolanique naturel de Béni Saf a diminué la perte de masse à partir de 75 jours d'immersion. A 120 jours la perte a été diminuée avec plus de 60% par rapport au témoin, pour 10 à 20% de pouzzolane, (Ghrici et al., 2006).
Pour une concentration plus grande en acide (3% H_2SO_4), et 30% de pouzzolane, ils ont trouvé une perte de 75% à 180 jours d'immersion, c'est presque la dissolution totale des éprouvettes immergées, (Ghrici et al., 2007).

Benkaddour et al, ont prouvé les mêmes résultats avec une concentration en acide plus grande (5% H_2SO_4), ils ont trouvé une diminution de perte avec des taux d'incorporation de pouzzolane de 10 à 30%, cette baisse en perte atteint 70% à 28 jours pour 30% de pouzzolane naturelle, (Benkaddour et al, 2009).

Le mortier au sable de dune broyé (MSDB) s'est comporté comme le mortier à la pouzzolane (MPN), ils donnent tous les deux des pertes de masses similaires (~ 2,35%) ; cela est dû au comportement pouzzolanique du sable de dunes broyé à long terme (90 jours et plus), ce qui a été prouvé par plusieurs travaux de recherche, (Guettala, 2012; Guettala et Mezghiche, 2011; Mechti et al., 2013; Benezet et Benhassaine,1999).

Le mortier au laitier (ML) a présenté une perte de 2,27% soit une baisse de 35% par rapport au témoin. Cette perte est légèrement plus petite que les autres ajouts vue que sa résistance aux agressions des sulfates notamment les ions (SO_4^{-2}), est plus importante ; Ce qui a été confirmé par l'étude Guernouti, (2002), qui a constaté que l'ajout de laitier au mortier améliore sa résistance aux agressions des eaux de mer notamment aux ions sulfatiques, (Guernouti, 2002).

D- Attaque par l'acide chlorydrique (HCl)

La figure IV.30 montre la variation de la masse des différentes compositions de mortier avec ajouts immergés dans une solution de HCl pendant 180 jours (après une cure normale de 28 jours dans l'eau potable).

Nous remarquons une perte permanente du poids de toutes les compositions au cours du temps, cette perte est due à lixiviation de quelques composantes de la matrice cimentaire des éprouvettes par l'acide chlorydrique.

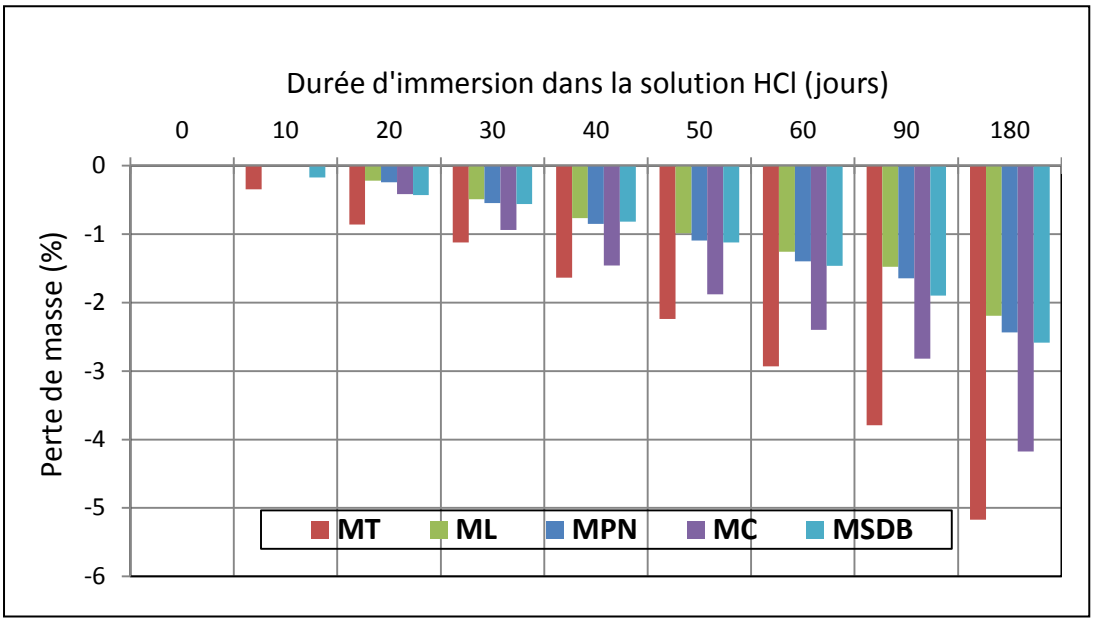


Figure IV.31 : Perte de masse des différentes compositions de mortier immergées dans l'acide chlorydrique (HCl).

Toutes les compositions (avec et sans ajouts) perdent de leur poids dès les premières semaines de leur immersion dans la solution HCl, mais avec des valeurs qui restent très faibles jusqu'aux 40 jours. A partir du 2ème mois la perte devient légèrement considérable. C'était la même constatation de plusieurs travaux de recherche effectués sur la résistance chimiques des mortiers avec et sans ajouts à l'attaque de l'acide (HCl), (Ghrici et al., 2006 ; Ghrici et al., 2007).

Ghrici et al., ont trouvé une perte de masse qui est autours de 30% pour tous les mortiers (avec et sans ajouts) qui sont immergés dans une solution de 1% HCl, avec une légère diminution de la perte pour les mortiers pouzzolaniques et avec calcaire, (Ghrici et al., 2006). Pour notre cas nous rappelons que la concentration de la solution de l'acide est autours de 0,5% (avec un pH=1,95) ; c'est pour cette raison que les pertes sont un peu faible.

Pour le mortier témoin MT (sans ajout), nous avons trouvé des petites pertes qui sont autours de 1% à cours termes, (un mois d'immersion), puis cette perte croît avec le temps, et elle atteint 5,2% à 6 mois ; (figure IV.31).

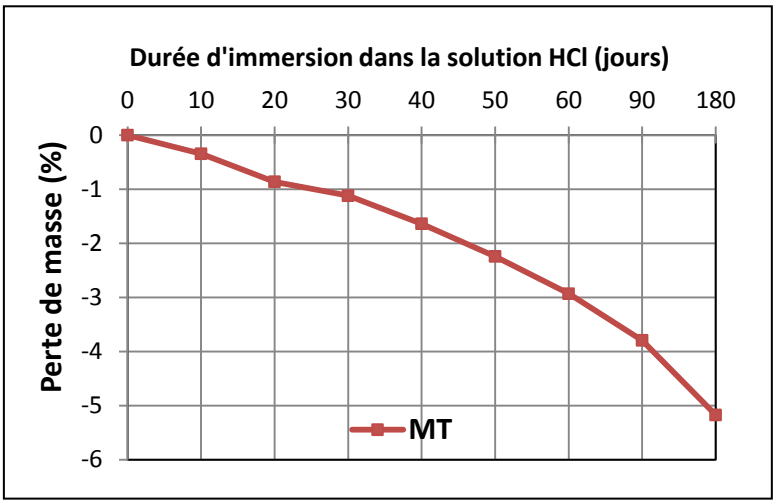


Figure IV.32 : Perte de masse du mortier témoin immergé dans l'acide chlorydrique (HCl).

L'attaque de l'acide se produit dès les premiers jours d'immersion. En effet, l'acide se réagit avec la chaux libre (portlandite) issue de l'hydratation du ciment en composant le chlorure de calcium dissous dans la solution. Le mécanisme d'attaque est régi par l'équation suivante :

$$2HCl + Ca(OH)_2 \longrightarrow CaCl_2 + 2H_2O \qquad (IV.5)$$

Acide chlorhydrique	Hydroxyde de calcium	Chlorure de calcium	Eau	

Pour les mortiers aux ajouts, nous remarquons une diminution considérable de perte pour toutes les compositions par rapport au mortier témoin, notamment pour les mortiers ML, MPN, MSDB, cette baisse en perte (par rapport au témoin), vaut presque 50% à 180 jours d'immersion.

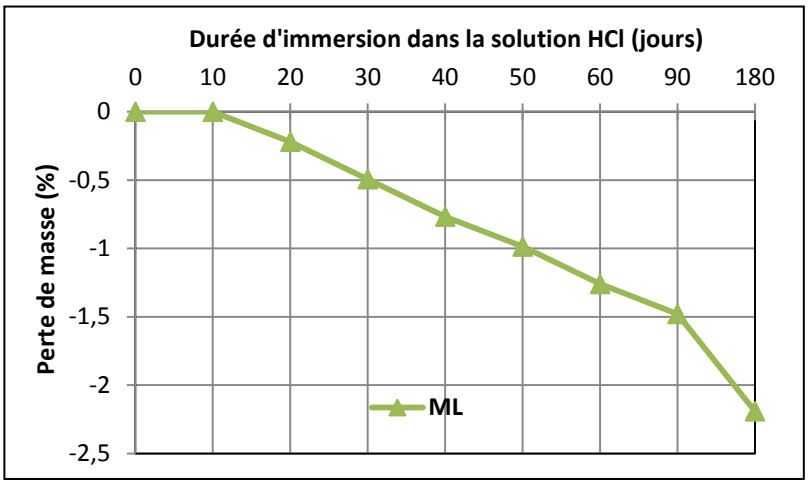


Figure IV.33 : Perte de masse du mortier au laitier immergé dans l'acide chlorydrique (HCl).

Pour la composition au fillers calcaire (MC), la perte enregistrée, était plus considérable par rapport aux premiers, et la diminution en perte, par rapport au témoin, vaut 20%.

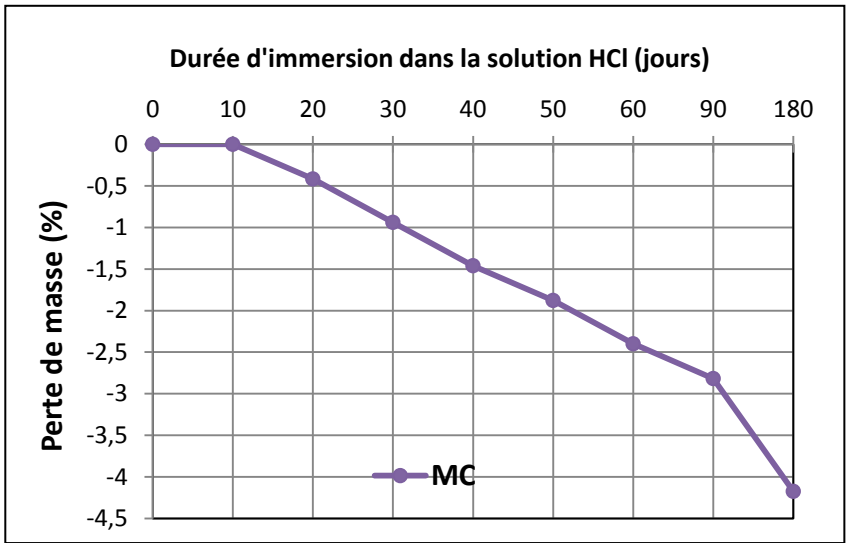


Figure IV.34 : Perte de masse du mortier aux fillers calcaires immergé dans l'acide chlorydrique (HCl).

Pour les compositions aux laitier, pouzzolane et sable de dunes broyé ; (ML, MPN, MSDB), les pertes sont très proche, du fait que le processus d'attaque est similaire pour les

trois ajouts, cette perte atteint 2,5% à l'âge de six mois d'immersion (figures IV.32, IV.34, et IV.35). Tandis que pour le mortier au calcaire nous avons enregistré 4,2%, (figure IV.33). Cela est dû à la faible résistance chimique à l'acide chlorydrique (HCl) du calcaire par rapport aux autres ajouts (considérés actifs), (Ghrici et al, 2006).

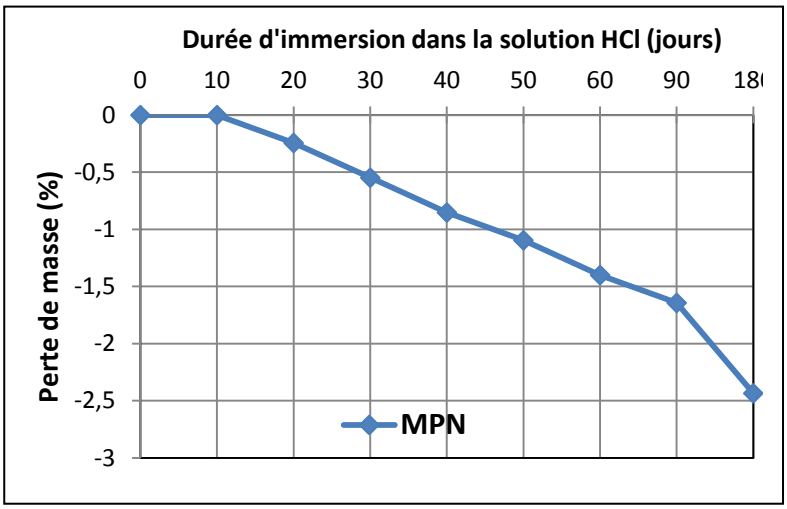


Figure IV.35 : Perte de masse du mortier à la pouzzolane immergé dans l'acide chlorydrique (HCl).

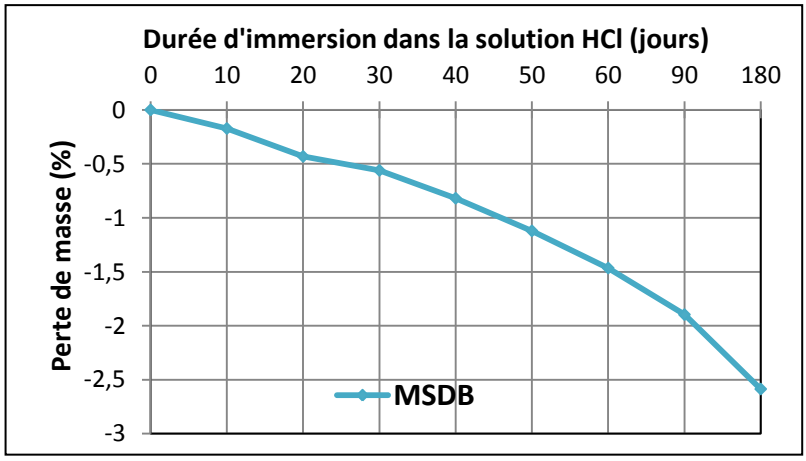


Figure IV.36: Evolution de la masse du mortier au sable de dunes broyé immergé dans l'acide chlorydrique (HCl).

IV.4.3. Essai ultrasonique

Les essais sont effectués sur des éprouvettes (4x4x16cm). La méthode et le mode opératoire sont développés au paragraphe (III.4.3.3). La vitesse est déterminée à partir du temps de propagation pris par des ondes ultrasonique émises par l'émetteur de l'appareil ; il est en micro seconde (µ.s).

Les essais sont effectués au laboratoire EVRNZA - Ouargla, sur des éprouvettes conservées dans différentes cures suivantes :

1. 120 jours (1mois +3mois) à l'eau douce.
2. 28jours à l'eau douce +90jours à la solution acide (H_2SO_4).
3. 28jours à l'eau douce +90jours à la solution acide (HCl).

IV.4.3.1. Conservation dans l'eau douce (cure normale)

Les vitesses du son à travers les différentes compositions de mortier conservées dans l'eau normale sont présentées dans la figure suivante :

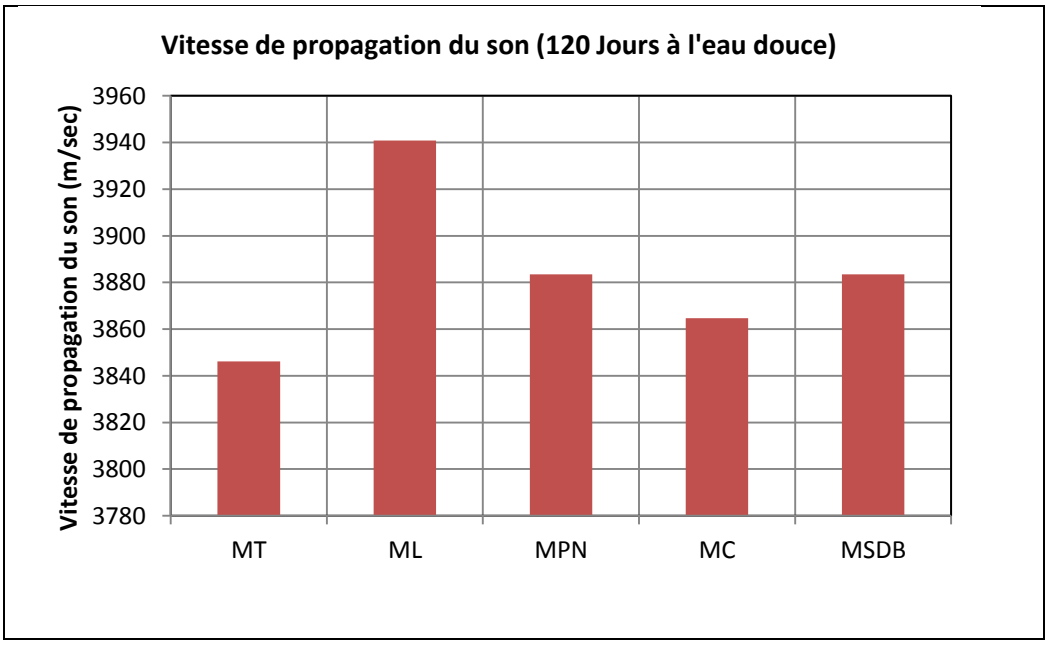


Figure IV.37: Vitesse de propagation du son dans les différentes compositions de mortier conservées dans l'eau douce à l'âge de 120 jours.

D'après cette figure on remarque que les mortiers renfermant les ajouts présentent tous, des vitesses plus grandes que celle du témoin. Cela est dû à l'effet performant des additions sur la compacité des mortiers. En effet les ajouts minéraux se manifestent tous, par leur finesse, et par leur activité hydraulique, en diminuant la porosité des squelettes

cimentaires. Notamment le laitier la pouzzolane et le sable de dunes broyé (ML, MPN, MSDB) qui dépassent tous les trois le mortier avec calcaire (MC), car ce dernier se manifeste uniquement par sa finesse, (Guernouti, 2002).

Le mortier témoin (MT) a présenté une vitesse de propagation du son de 3845 m/sec ; c'est une vitesse qui est dans les normes pour une composition normale de mortier.

Pour le mortier avec le laitier (ML) on a enregistré un temps de propagation de 10,15 micros secondes (µ.s), soit une vitesse de 3941 m/sec et une augmentation de 2,44%, c'était la meilleure amélioration de toutes les compositions. Cela est dû à l'effet combiné du laitier sur la structure du mortier. En effet le laitier agit, d'une part, come filler de remplissage par sa finesse, et par son activité pouzzolanique et hydraulique d'une autre part.
Ce sont les mêmes constations pour les compositions, MPN, et MSDB, mais avec une activité légèrement plus faible par rapport au laitier, où on a enregistré des vitesses plus grandes que celle du témoin de 1%, (Guernouti, 2002).

Le mortier au fillers calcaire vient en dernière classe avec une vitesse de3865 m/s car il est considéré comme un ajout inerte, et ne se manifeste seulement, que par sa finesse.

Le remplacement d'une partie de ciment par l'ajout minéral finement broyé permet d'augmenter la compacité, et particulièrement dans la zone de transition entre la pâte durcie et les granulats (sable) car il comble les vides d'empilements laissés entre les composantes granulométriques du mélange, c'est le remplissage. D'une autre part les additions minérales ont un effet pouzzolanique qui est dû à leur réaction avec $Ca(OH)_2$, (Grandet, 1990; Guernouti, 2002).

IV.4.3.2. Conservation dans les solutions acides (HCl et H_2SO_4)

Les éprouvettes (4x4x16 cm) sont conservées 90 jours dans les solutions agressives (acides), (H_2SO_4) et (HCl), après une cure normale de 28 jours dans l'eau douce.

Les résultats sont présentés sur les figures IV.37 et IV.38 :

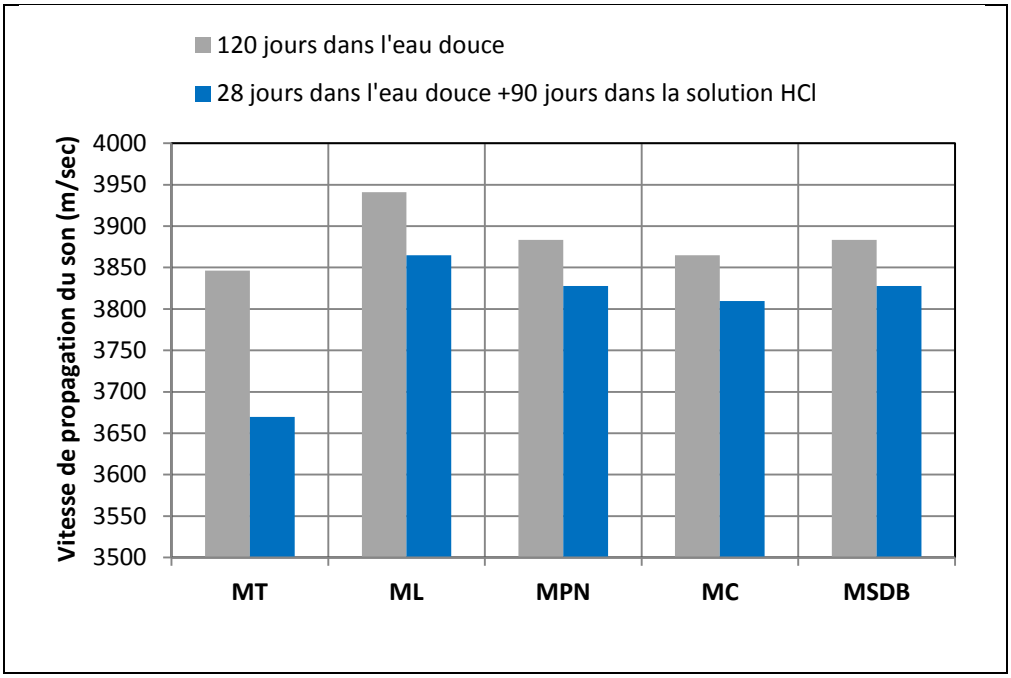


Figure IV.38: Vitesse de propagation du son dans les différentes compositions de mortier immergées (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution HCl).

D'après ces figures on remarque l'effet négatif des deux solutions sur la vitesse du son pour toutes les compositions ; les vitesses de toutes les compositions sont diminuées. Cela peut être expliqué par la dégradation du squelette cimentaire à cause de l'effet des acides. Ces derniers altèrent la couche supérieure des éprouvettes et tentent de pénétrer à l'intérieur en détruisant la pate liante (durcie) en augmentant la porosité du squelette.

Mais malgré cette dégradation de vitesse, cette dernière reste toujours plus grande que celle du témoin ; ce qui explique l'effet performant de tous les ajouts sur la résistance aux agressions acides.

Les quatre ajouts présentent alors une protection contre l'effet des acides (H_2SO_4) et HCl) sur les squelettes des mortiers. Ces additions minérales se manifestent par leur finesse et par leur activité en déduisant les pores et les vides et en augmentant la compacité des mortiers. Ce sont mêmes les constatations reportées par plusieurs chercheurs tels que celui de Kerbouche et Ghrici et al., (Ghrici et al., 2006; Ghrici et al., 2007; Kerbouche,2009).

La composition témoin sans ajout (MT) enregistre toujours la baisse en vitesse la plus considérable par rapport aux autres compositions ; ce qui prouve l'effet bénéfique des différents ajouts contre l'agression des deux acides.

Nous remarquons que la diminution de la vitesse provoquée par cette agression acide reste toujours relativement petite et elle ne dépasse pas le 6 % dans les pires des cas (cas de l'ajout calcaire (MC) où on a enregistré pour cette composition une baisse de 5,5% dans la solution d'acide sulfurique (H_2SO_4), et 1,42% dans la solution d'acide chlorydrique (HCl).

Nous constatons aussi que l'effet de l'acide sulfurique (H_2SO_4) et plus nocif que celui de l'acide chlorydrique (HCl), car la diminution de la vitesse et plus remarquable pour les éprouvettes immergées dans la première solution que celles dans la deuxième (Figure IV.37 et IV.38).

Les baisses en vitesse enregistrées dans la solution (HCl), pour les cinq compositions (MT, ML, MPN, MC et MSDB), sont respectivement : 1,44 ; 1,92 ; 1,44 ; 1,43 et 1,44% tandis que pour l'acide sulfurique (H_2SO_4) nous avons trouvé respectivement : 4,6 ; 2,3 ; 4,6 ; 5,5 et 1%.

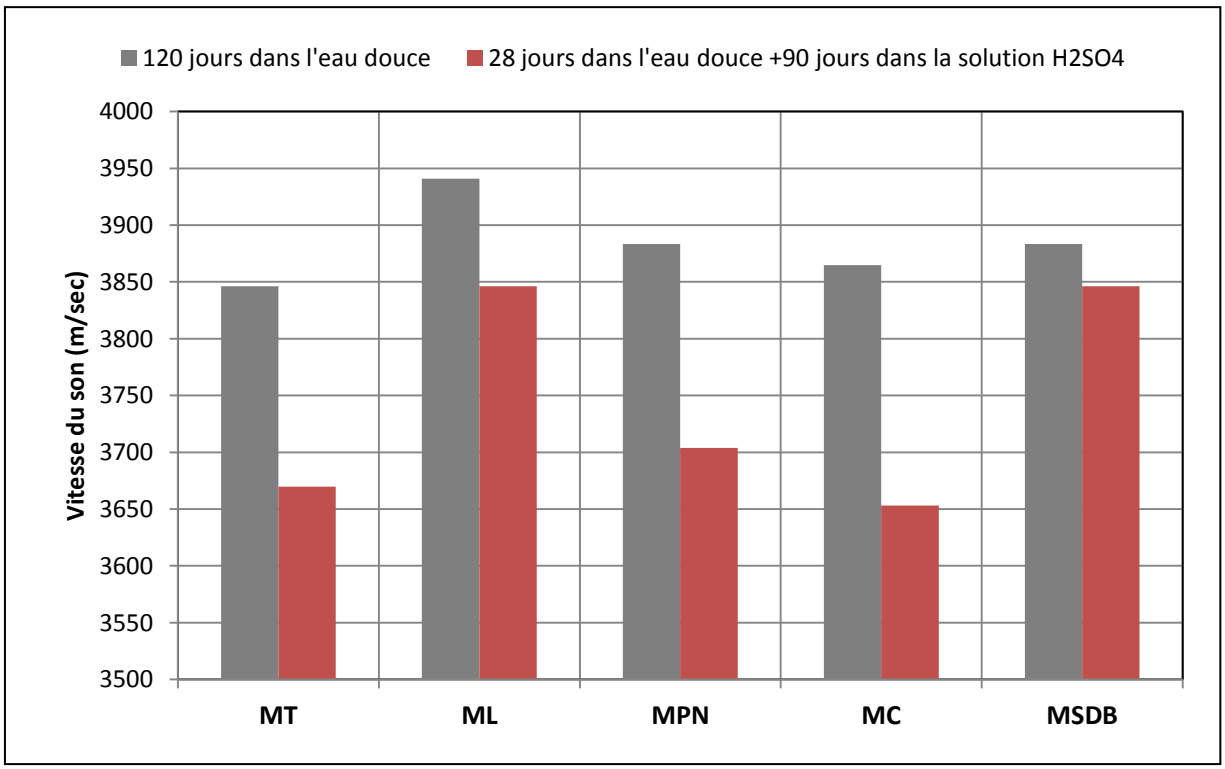


Figure IV.39: Vitesse de propagation du son dans les différentes compositions de mortier immergées (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution H_2SO_4)

IV.4.4. Analyse de la microstructure

Dans les sections précédentes nous avons trouvé que les quatre ajouts ont globalement amélioré les caractéristiques physiques et mécaniques des différentes compositions de mortiers. Nous avons constaté aussi que les ajouts étaient bénéfiques contre l'attaque des acides sulfurique et chlorydrique; ce qui prouve l'effet performant des additions sur la microstructure des différents mortiers.

Dans ce qui suit nous allons essayer d'examiner cette microstructure à l'aide de la diffraction des rayons X (DRX) et l'observation des différentes compositions par le microscope électronique à balayage (MEB). Les résultats obtenus sont présentés ci-après.

IV.4.4. 1. Analyse par DRX

La Diffraction des Rayons X (DRX) est une technique d'analyse qui permet d'étudier et d'identifier les différentes phases cristallines présentes dans un échantillon. Pour tous les différents types de mortiers, on a prélevé des échantillons en poudre des éprouvettes ayant immergées 90 jours dans les solutions acides (H_2SO_4 et HCl), après une conservation normale de 28 jours dans l'eau potable.

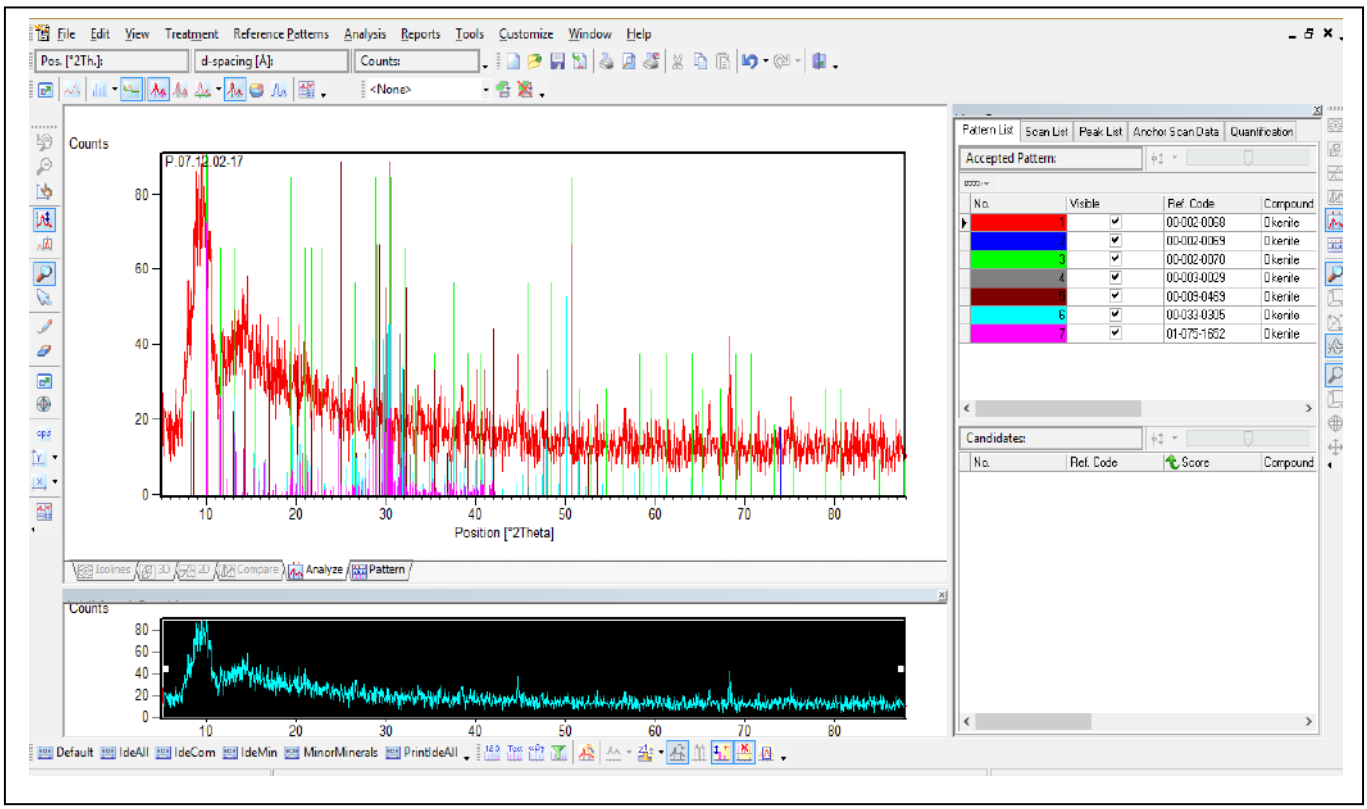


Figure IV.40: Interface du logiciel de traitement des analyses DRX (X'Pert HighScore).

L'analyse par diffraction des rayons X, est effectuée au sein du Département des Procédés Technologiques Avancés et Gestion des Projets du Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA**,** Alger), par un diffractomètre aux rayons X couplé à un système de traitement informatique (logiciel : X'Pert HighScore).

Cette analyse a été effectuée sur les différentes compositions de mortiers conservées dans les solutions acides, afin d'examiner les différents composants chimiques et minéralogiques de ces derniers après l'attaque acide. Cette analyse permet de renseigner sur la nouvelle structure et ses constituants après l'agression acide.

Dans ce qui suit on expose les différents diffractogrammes DRX pour les cinq compostions conservés dans les solutions acides (H_2SO_4 et HCl)

A- Mortier témoin (MT)

➢ ***Conservation dans l'acide (H_2SO_4)***

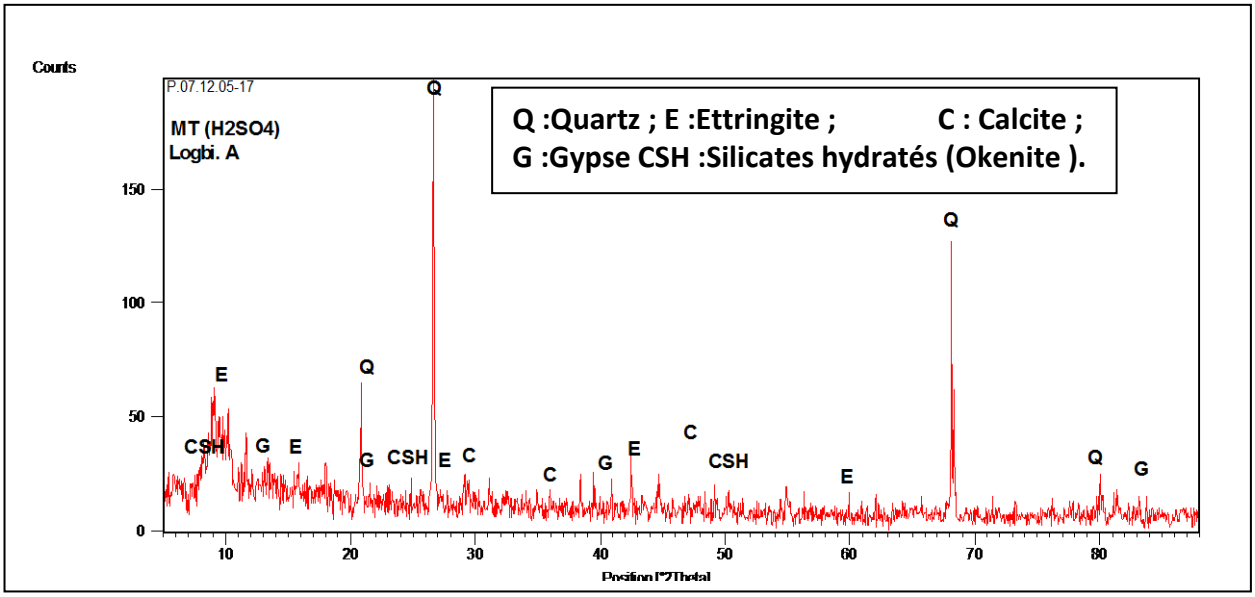


Figure IV.41 : Diffractogramme en R- X du mortier témoin (MT) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (H_2SO_4)).

➢ ***Conservation dans l'acide (HCl)***

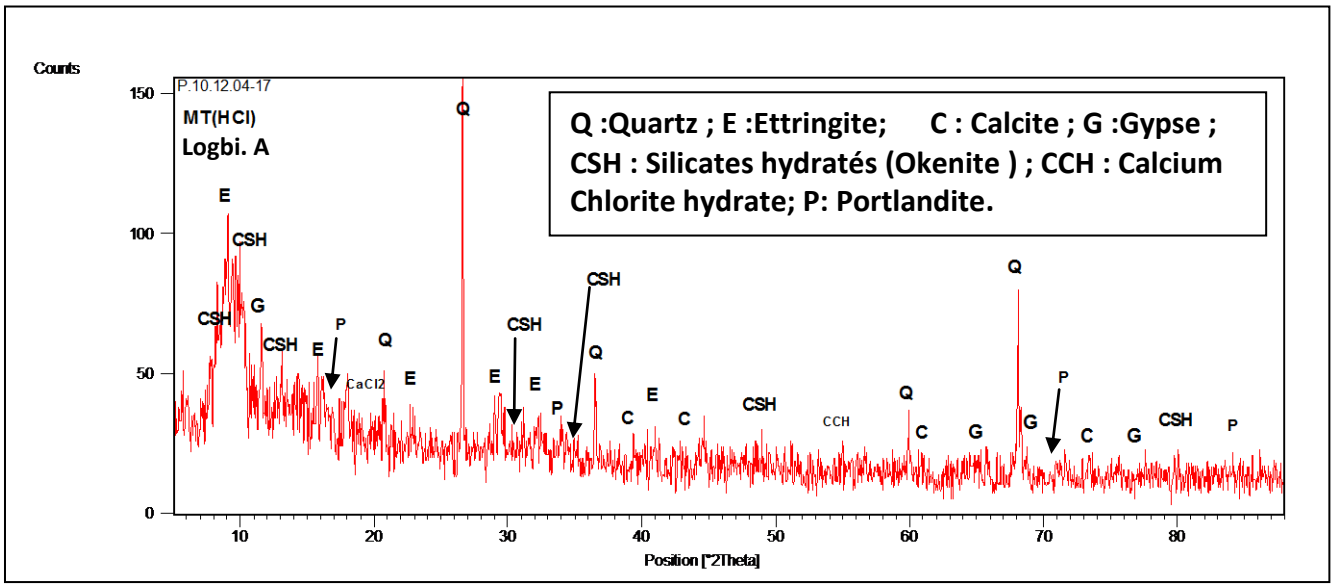


Figure IV.42 : Diffractogramme en R- X du mortier témoin (MT) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (HCl)).

B- Mortier au laitier (ML)

➢ ***Conservation dans l'acide (H_2SO_4)***

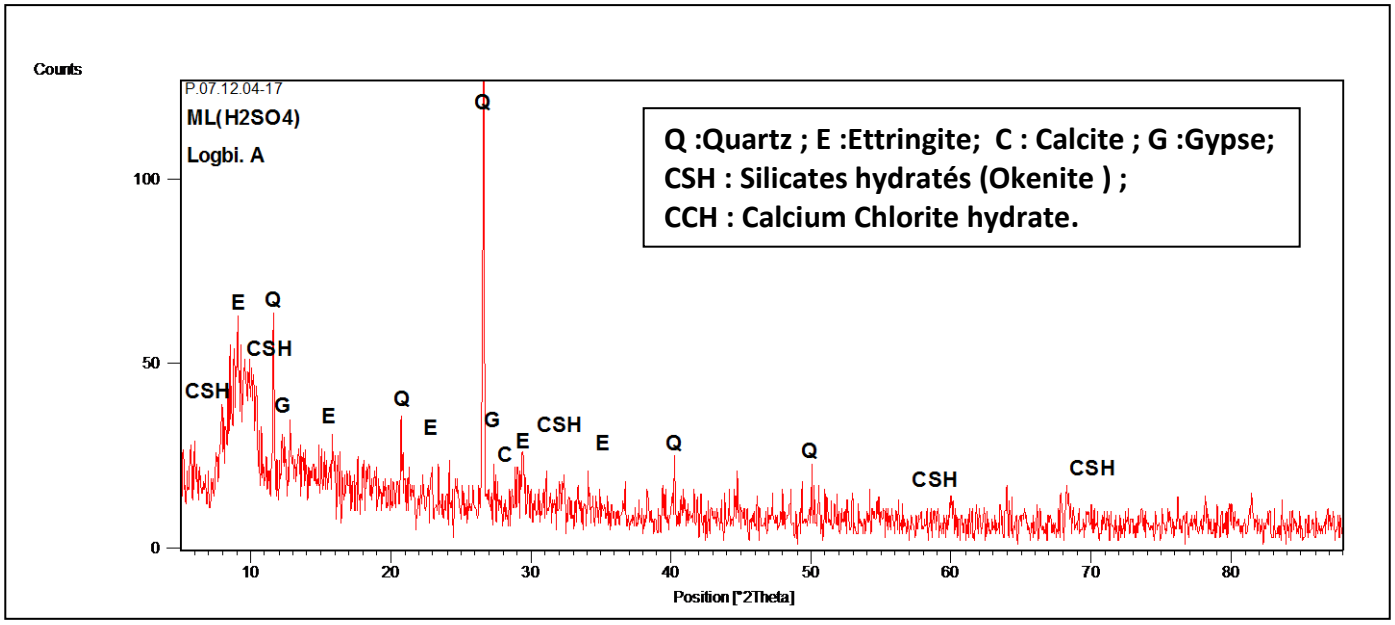


Figure IV.43 : Diffractogramme en R- X du mortier au laitier (ML) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (H_2SO_4)).

➢ ***Conservation dans l'acide (HCl)***

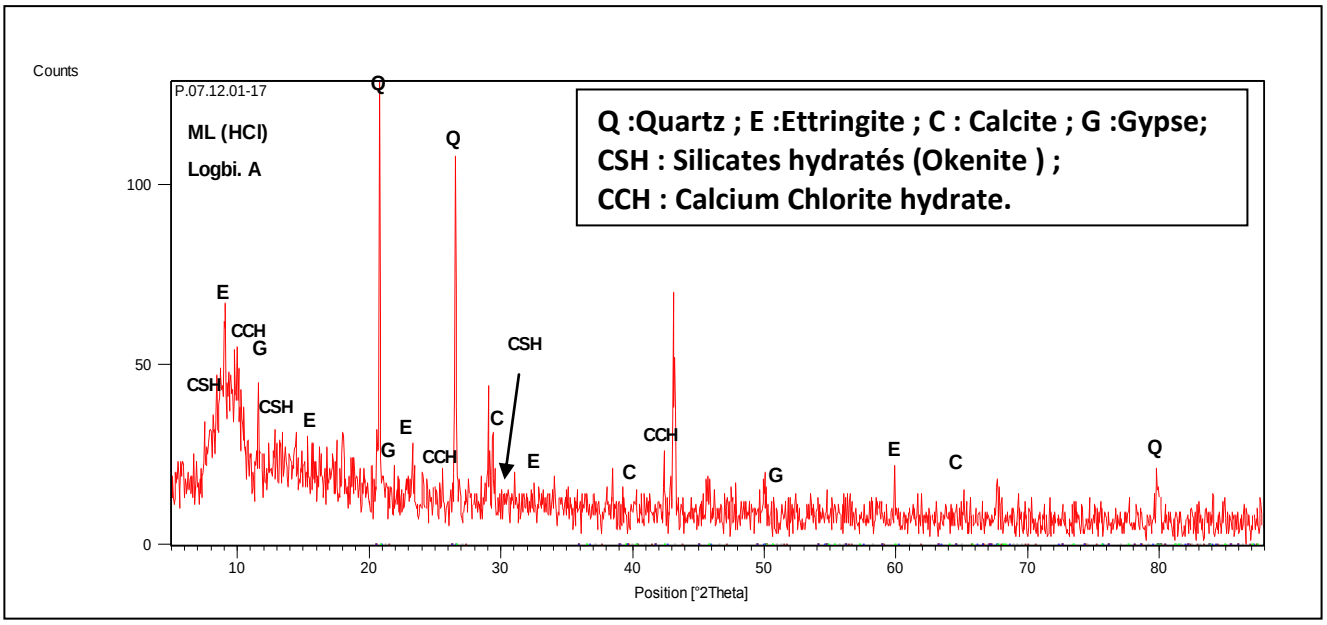


Figure IV.44: Diffractogramme en R- X du mortier au laitier (ML) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (HCl)).

C- Mortier à la pouzzolane (MPN)

➢ ***Conservation dans l'acide (H_2SO_4)***

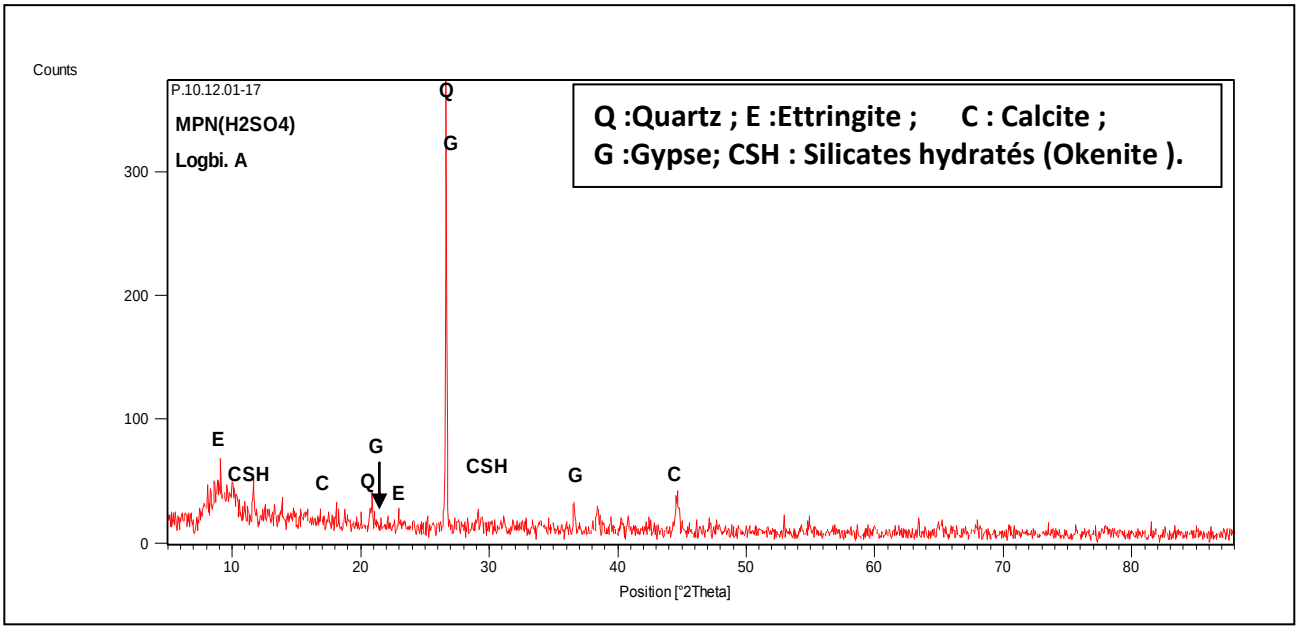


Figure IV.45: Diffractogramme en R- X du mortier à la pouzzolane (MPN) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (H_2SO_4)).

➢ ***Conservation dans l'acide (HCl)***

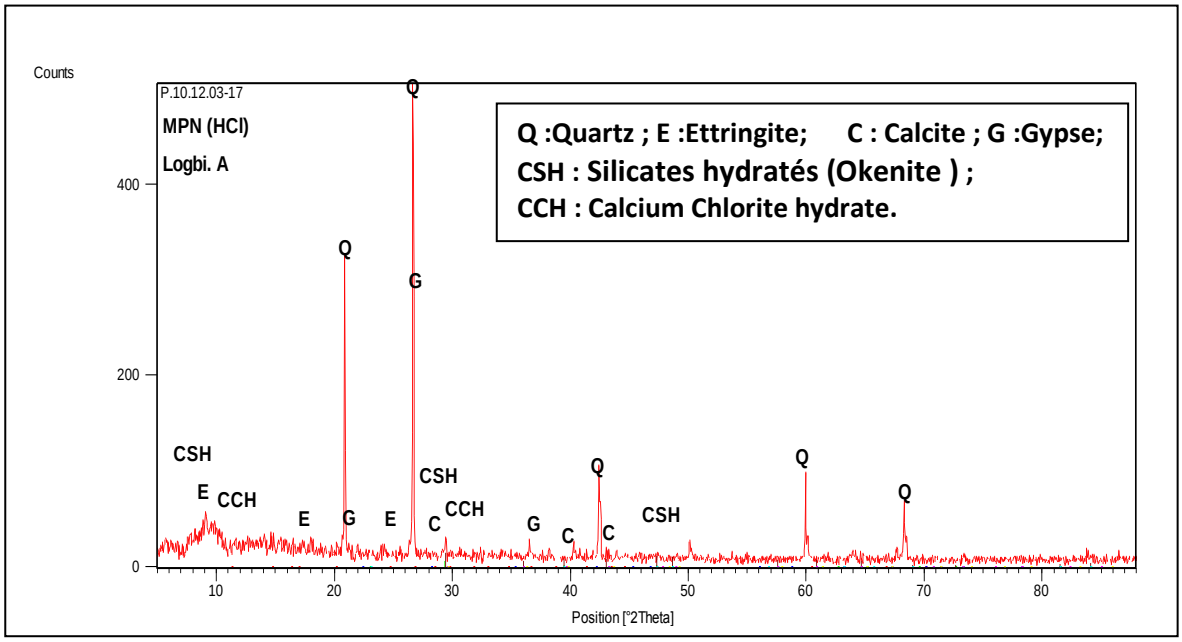


Figure IV.46: Diffractogramme en R- X du mortier à la pouzzolane (MPN) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (HCl)).

D- Mortier aux fillers calcaires (MC)

➢ ***Conservation dans l'acide (H_2SO_4)***

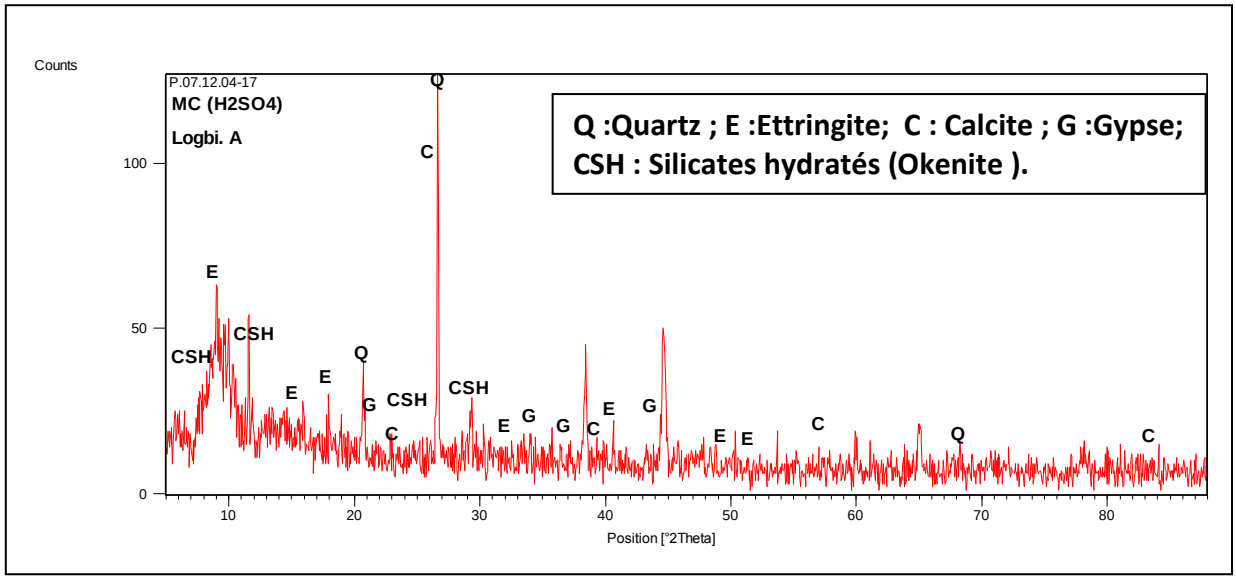


Figure IV.47 : Diffractogramme en R- X aux fillers calcaires (MC) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (H_2SO_4)).

➢ ***Conservation dans l'acide (HCl)***

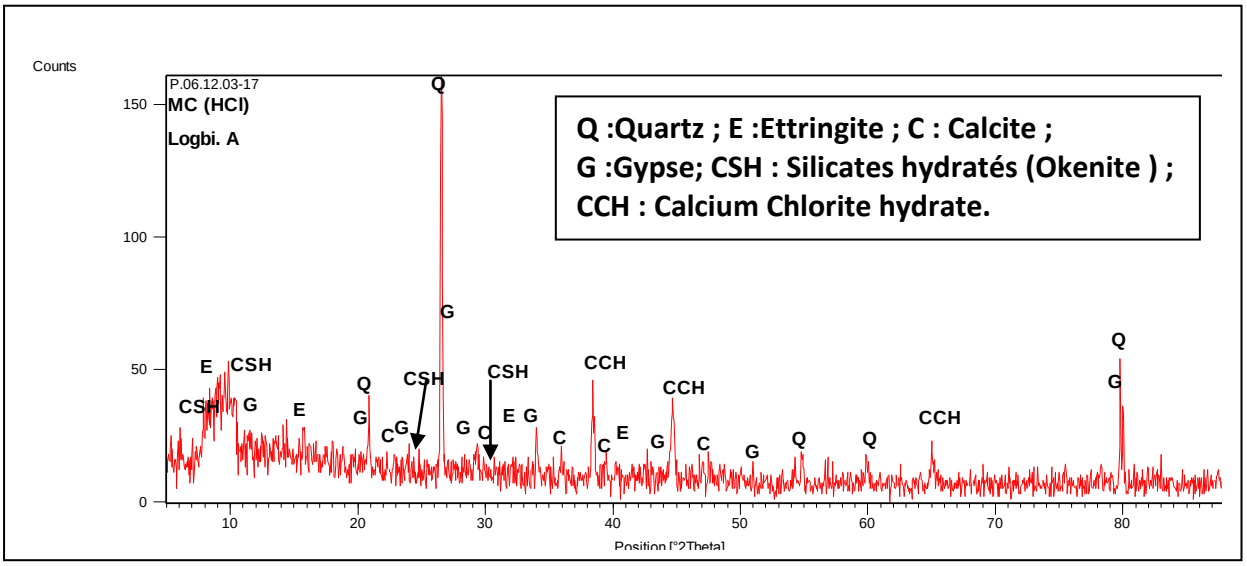


Figure IV.48 : Diffractogramme en R- X aux fillers calcaires (MC) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (HCl)).

E- Mortier au sable de dunes broyé (MSDB)

➢ ***Conservation dans l'acide (H_2SO_4)***

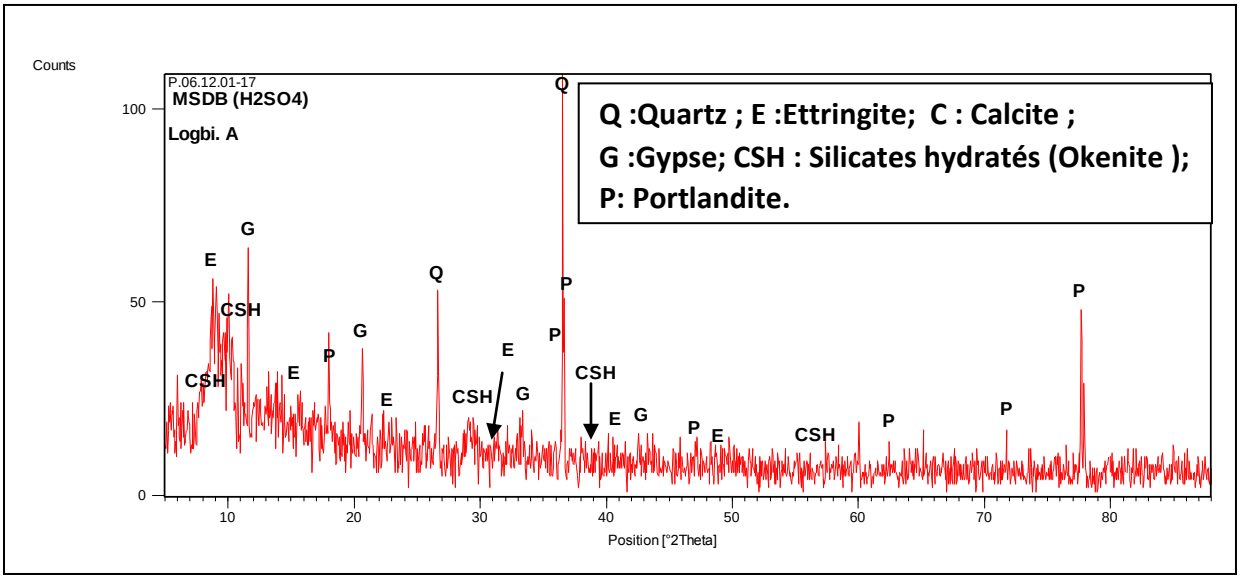


Figure IV.49: Diffractogramme en R- X au sable de dunes broyé (MSDB) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (H_2SO_4)).

➢ ***Conservation dans l'acide (HCl)***

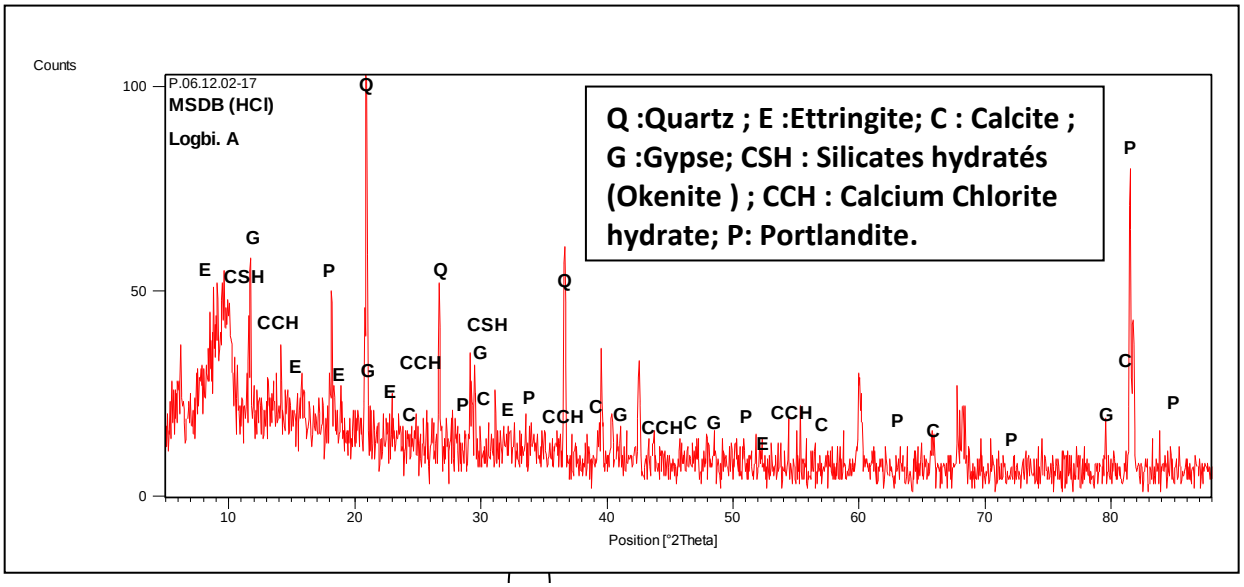


Figure IV.50: Diffractogramme en R- X au sable de dunes broyé (MSDB) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (HCl)).

L'analyse des spectres des figures IV.41-50, permet de signaler les constatations suivantes:

1. Toutes les compositions contiennent les éléments minéraux suivants avec des différentes proportions :
   - Le silice SiO_2 (Quartz) (Q),
   - Les silicates de calcium hydratés (CSH),
   - L'ettringite (E),
   - Le gypse (G),
   - La portlandite ($Ca(OH)_2$) ; (P),
   - La calcite (CaCO3) ; (C),
   - Le chlorure de calcium hydraté (CCH).

2. Tous les diffractogrammes se ressemblent dans la première et la deuxième phase, ou on trouve des pics d'ettringite (E) et de quartz (Q).
3. Il y'on a d'autres minéraux qui se trouvent en petites proportions (traces).
4. Le silice (SiO2) (ou le quartz (Q)) apparent dans toutes les compositions, vient du granulat (sable de construction), ou de l'ajout même ; les pics maximaux sont tous ceux du silice du sable.

5. Quelques petits pics présentant du quartz (SiO_2) dans les diagrammes des mortiers aux ajouts viennent des ajouts qui sont très riche en silice.
6. Les silicates de calcium hydratés (CSH) se présentent dans toutes les compositions avec une formule chimique dominantes qui est : $CaO.2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ($CaSi_2O_5 \cdot 2H_2O$), et avec d'autres formules moins dominantes telles que : $Ca_{10}Si_{18}O_{46}$ (H_2O)$_{18}$. Ce qui confirme l'hydratation presque totale de liant à cet âge (28 jours dans l'eau douce +90 jours dans l'acide).

   Ces CSH, sont dus à l'interaction des minéraux principaux du ciment (C_3S, C_2S) avec l'eau.

7. Les mortiers avec ajouts présentent d'autres silicates hydratés (CSH) qui se différent à ceux du témoins ; ces derniers viennent de l'interaction des ajouts avec la chaux libre ($Ca(OH)_2$) résultant de l'hydratation du ciment seul. Ces hydrates sont très claires

dans les compositions (ML, MPN et MSDB) et peu remarquable pour la composition au calcaire (MC).

8. La présence de l'ettringite (E) dans toutes les compositions ; (MT, ML, MPN, MC et MSDB) ; dans la même raie et presque de même intensité des pics, à l'exception du mortier témoin (MT), qui a présenté un pic d'intensité plus considérable que les mortiers aux ajouts, notamment pour les échantillons exposés à l'acide chlorydrique (HCl). Ce qui explique l'effet bénéfique des ajouts sur la diminution de ce composant qui peut être nuisible sur la durabilité des bétons.

   Ce composant résultant essentiellement de la réaction des aluminates (C_3A) avec le gypse. En effet l'hydratation des aluminates est considérablement influencée par la présence du gypse ($CaSO_4\ 2H_2O$).

   Les C_3A réagissent d'abord pour former l'ettringite qui se cristallise en aiguilles. On distingue deux types d'ettringite :

- L'ettringite primaire qui se forme dans les premiers moments de l'hydratation du ciment lorsque la pâte est fluide, par réaction du gypse avec le C_3A, Cette ettringite n'est pas nuisible pour le béton. Sa formation est régie par la réaction chimique suivante :

$$C_3A + 3(CaSO_4\ 2H_2O) + 32\ H_2O \longrightarrow C_3A.\ 3(CaSO_4.\ 2H_2O).32H_2O \qquad (IV.6)$$

(Ettringite qui n'est pas nuisible)

- L'ettringite dite secondaire se forme une fois que la prise du ciment est réalisée, entraînant des désordres macroscopiques irréversibles (gonflement, fissurations, ruine du matériau,…). Cette ettringite qui correspond à une attaque sulfatique externe se forme si l'environnement autour du béton présente des sulfates et de l'eau.

L'ettringite secondaire peut se former :

- soit à partir de l'aluminate tricalcique (C3A) présent dans la composition du clinker selon l'équation chimique suivante :

$$C_3A + 3CaSO_4.2H_2O + 26H_2O \longrightarrow C_3A.3CaSO_4.32H_2O \text{ (Ettringite).} \qquad (IV.7)$$

- soit du monosulfoaluminate de calcium hydraté ($C_3A.CaSO_4.18H_2O$) qui est un constituant de la pâte de ciment durci obtenu après l'hydratation du ciment.

$$C_3A.CaSO_4.18H_2O + 2Ca(OH)_2 + 2SO_4 + 12H_2O \longrightarrow C_3A.3CaSO_4.32H_2O \quad (IV.8).$$

9. Les compositions exposées à l'acide sulfurique (H_2SO_4) ou celles exposées à l'acide chlorydrique (HCl) ont toutes présenté des phases d'ettringite ; cela est dû, d'une part à l'effet des sulfates sur les mortiers et d'une autre part, à la réaction des C_3A.

10. Toutes les compositions conservées dans l'acide chlorydrique (HCl) présentent une nouvelle phase, qui est le Chlorure de calcium hydraté (CCH). Ces hydrates viennent de la réaction du (HCl) avec la chaux libre ($Ca(OH)_2$) et les silicates de calcium hydratés (CSH) ; la formule chimique dominante des ces hydrates c'était : $Ca(ClO)_2 \cdot 4H_2O$ (ou $CaCl_2H_8O_6$), et en deuxième position nous avons eu $Ca(OCl)_2 \cdot 3H_2O$ (ou $CaCl_2H_6O_5$). Ces chlorures se présentent plus dans les compositions MT et MC que dans les trois autres compositions (ML, MPN et MSDB), du fait que les additions actives (laitier, pouzzolane et sable de dunes broyé), ont un effet plus significatif que le calcaire sur la résistance à l'acide chlorydrique.

11. Le gypse hydraté (G) : (Sulfate de calcium hydraté : $CaSO_4 \cdot 2H_2O$; (CaH_4O_6S)), se présente dans toutes les compositions conservées dans l'acide sulfurique (H_2SO_4), ce composant résulte de la réaction de l'acide avec la chaux libre ($Ca(OH)_2$) résultant de l'hydratation du ciment, ainsi qu'avec d'autres constituant contenant l'élément (CaO) ; tels que les CSH.

    Ce gypse se présente comme une couche blanchâtre précipitée sur toutes les éprouvettes.

    La présence du gypse hydraté est plus remarquable dans la composition témoin (sans ajout), et celles du calcaire et du sable de dunes broyé (MT, MC, MSDB), car le taux de l'hydroxyde de calcium ($Ca(OH)_2$) résultant dans cette dernière, et le (CaO), déjà existants, sont plus considérables par rapport à celui des mortiers avec les deux autres ajouts (ML et MPN).

12. Le gypse hydraté (G) se présente aussi dans les compositions conservées dans l'acide chlorydrique (HCl); notamment dans les mortiers (MT, MC et MSDB), vue l'importante teneur en CaO de ces trois compostions. Cette phase de gypse hydraté résulte de l'interaction entre les sulfates et la chaux déjà existant dans les différentes compositions.

13. La calcite (C) ou le calcaire ou les carbonates de calcium ($CaCO_3$ou $CCaO_3$) figurent dans tous les diffractogrammes de toutes les compositions conservées dans le (H_2SO_4) ou le (HCl).

    Ces carbonates sont parmi les composants principaux des granulats (sable de construction) ou des ajouts (calcaire), ou bien ils sont obtenus par la carbonatation de chaux déjà existant, ou résultant de l'hydratation du ciment avec le CO_2 de périphérique.

14. La disparition de la portlandite ($CaOH_2$) ou la chaux libre, de toutes les compositions ; sauf des traces dans MT, et MSDB. Cette portlandite résultant essentiellement de l'hydratation du ciment selon les réactions suivantes:

    $$2C_3S+6H_2O \longrightarrow C_3S_2H_3+3Ca(OH)_2 \quad \text{(IV.9)}$$

    $$2C_2S+4H_2O \longrightarrow C_3S_2H_3+Ca(OH)_2 \quad \text{(IV.10)}$$

    Les traces de portlandite existant dans le mortier témoin (MT) sont dues à la continuité du processus d'hydratation jusqu'à des âges avancées (120 jours) ; tandis que la portlandite de la composition (MSDB) est due à la teneur importante de chaux (CaO), dans le sable de dune.

    L'absence de la portlandite due à deux principales causes :

    - La réaction des différents ajouts avec la portlandite ce qui résulte la consommation de l'apport de $Ca(OH)_2$ et l'apparition des silicates (CSH) supplémentaires selon les réaction suivantes :

    $$SiO_2+X\ Ca(OH)_2+Y\ H_2O \longrightarrow XCaO.SiO_2.YH_2O \quad \text{(IV.11)}$$

    - L'attaque par les deux acides, ce qui résulte du gypse hydraté.

IV.4.4.2. Observations par le MEB

L'analyse microstructurale à travers l'observation sous le microscope électronique à balayage (MEB), a été effectuée au sein du Département des Procédés Technologiques Avancés et Gestion des Projets du Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA**,** Alger).

Cette analyse a été effectuée sur les différentes compositions de mortiers conservées dans les solutions acides, afin d'examiner la microstructure de ces derniers. Cette observation permet de renseigner sur la nouvelle structure et ses constituants après l'attaque acide.

Nous avons constaté d'une manière générale que cette analyse est conforme à l'analyse par DRX déjà réalisé, et elle confirme la formation et l'apparition des mêmes constituants chimiques et minéralogiques.

Dans les images suivantes (Figures IV .51-61) nous exposons les différentes prises de toutes les compositions conservées pendant 90 jours dans les solutions acides (H_2SO_4 et HCl), après une conservation normale de 28 jours dans l'eau potable.

L'examen de ces images microstructurales fait apparaitre la présence de la structure suivante avec des proportions différentes selon l'ajout et le milieu de conservation:

1. La présence des silicates de calcium hydratés (CSH) dans toutes les structures des différentes compositions (MT, ML, MPN, MC, MSDB).
2. La présence de portlandite (P) ($Ca(OH)_2$).
3. La présence de l'ettringite : (E).
4. La présence du gypse hydraté (G) : $CaSO_4.2H_2O$; obtenues par l'interaction de l'acide sulfurique avec la chaux libre ($Ca(OH)_2$).
5. La présence des chlorures de calcium hydratés : (CCH) obtenues par l'interaction de l'acide chlorydrique avec les différents mortiers.
6. La présence de Calcite (C) : $CaCO_3$, obtenue du sable ou des ajouts ou bien de la carbonatation de la chaux .
7. La présence du quartz (Q) : SiO2, provient du sable ou des ajouts.

A- Mortier témoin (MT)

- ***Conservation dans l'eau douce***

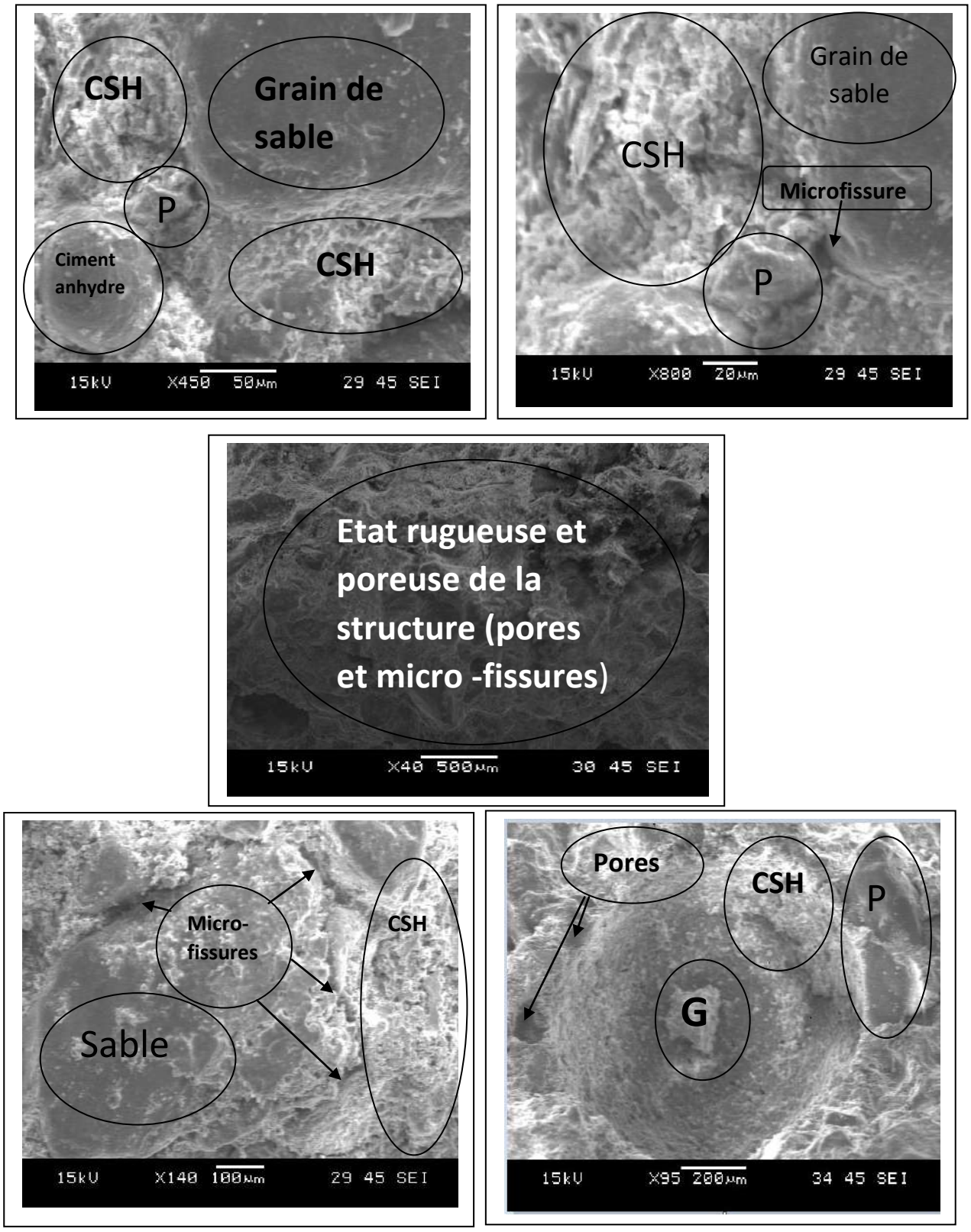


Figure IV.51 : Observation sous MEB du mortier témoin (MT) après 120 jours d'immersion dans l'eau douce.

- ***Conservation dans l'acide (H_2SO_4)***

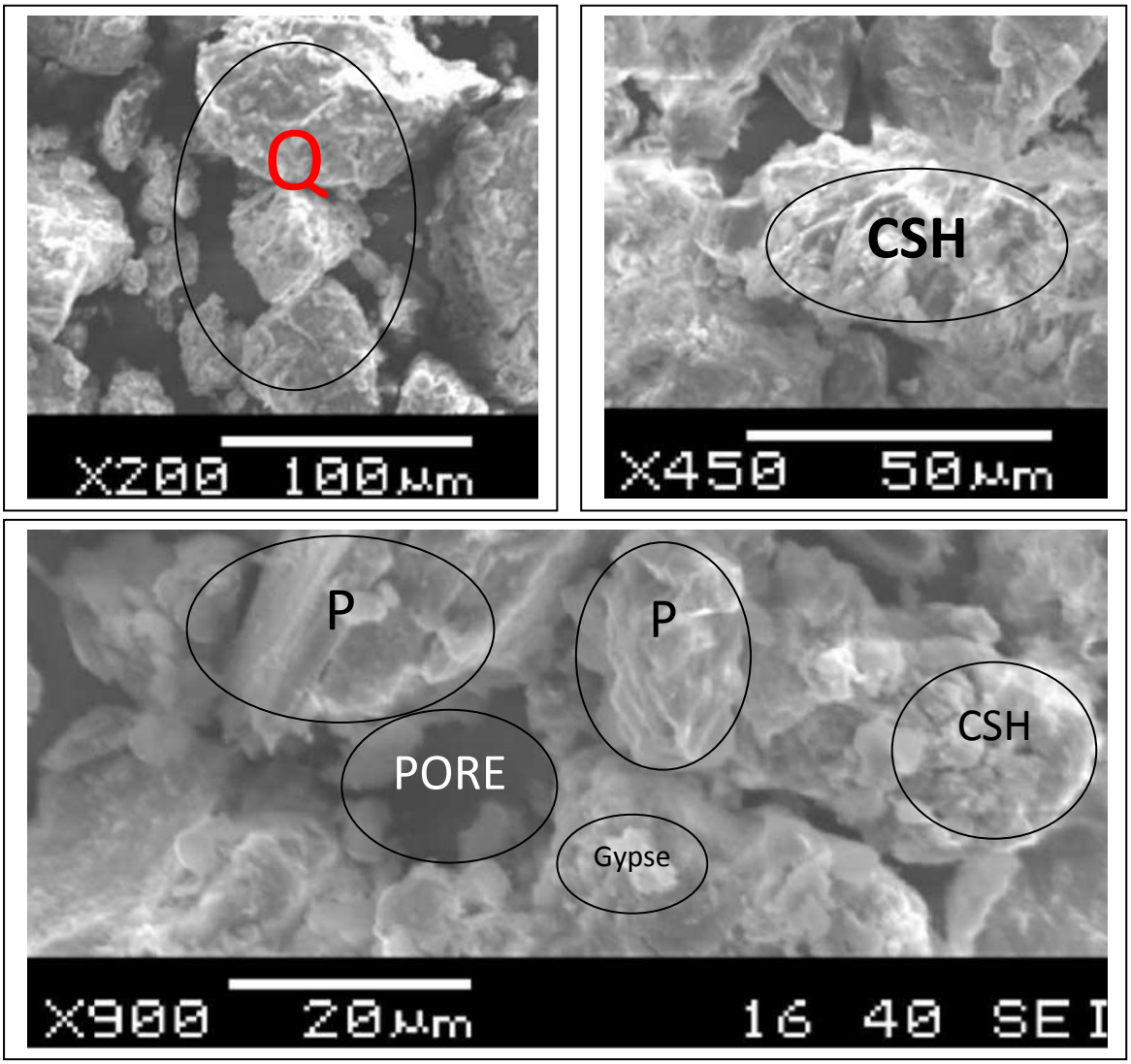


Figure IV.52: Observation sous MEB du mortier témoin (MT) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (H_2SO_4)).

- ***Conservation dans l'acide (HCl)***

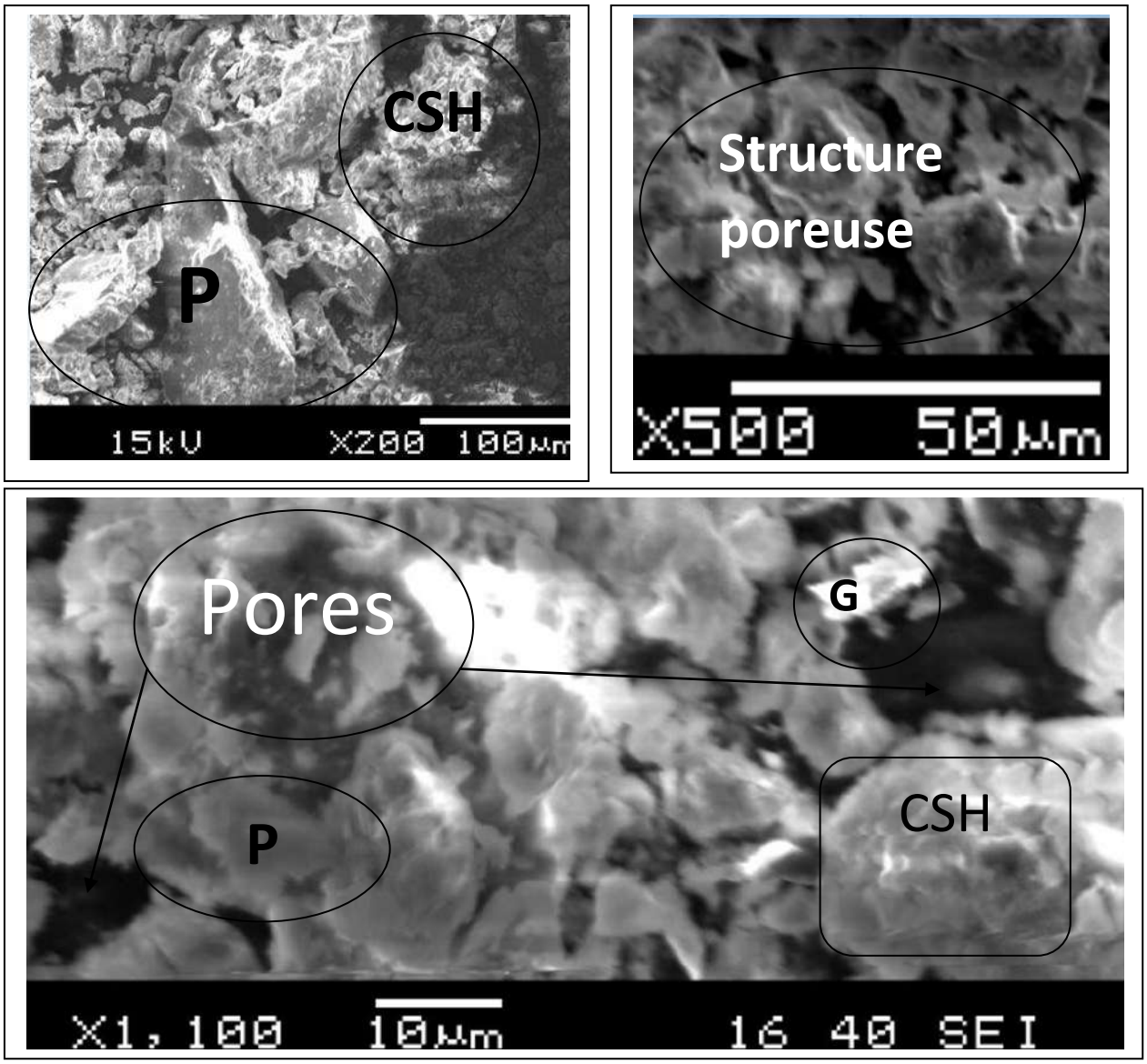


Figure IV.53: Observation sous MEB du mortier témoin (MT) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (HCl)).

B- Mortier au laitier (ML)

- ***Conservation dans l'acide (H_2SO_4)***

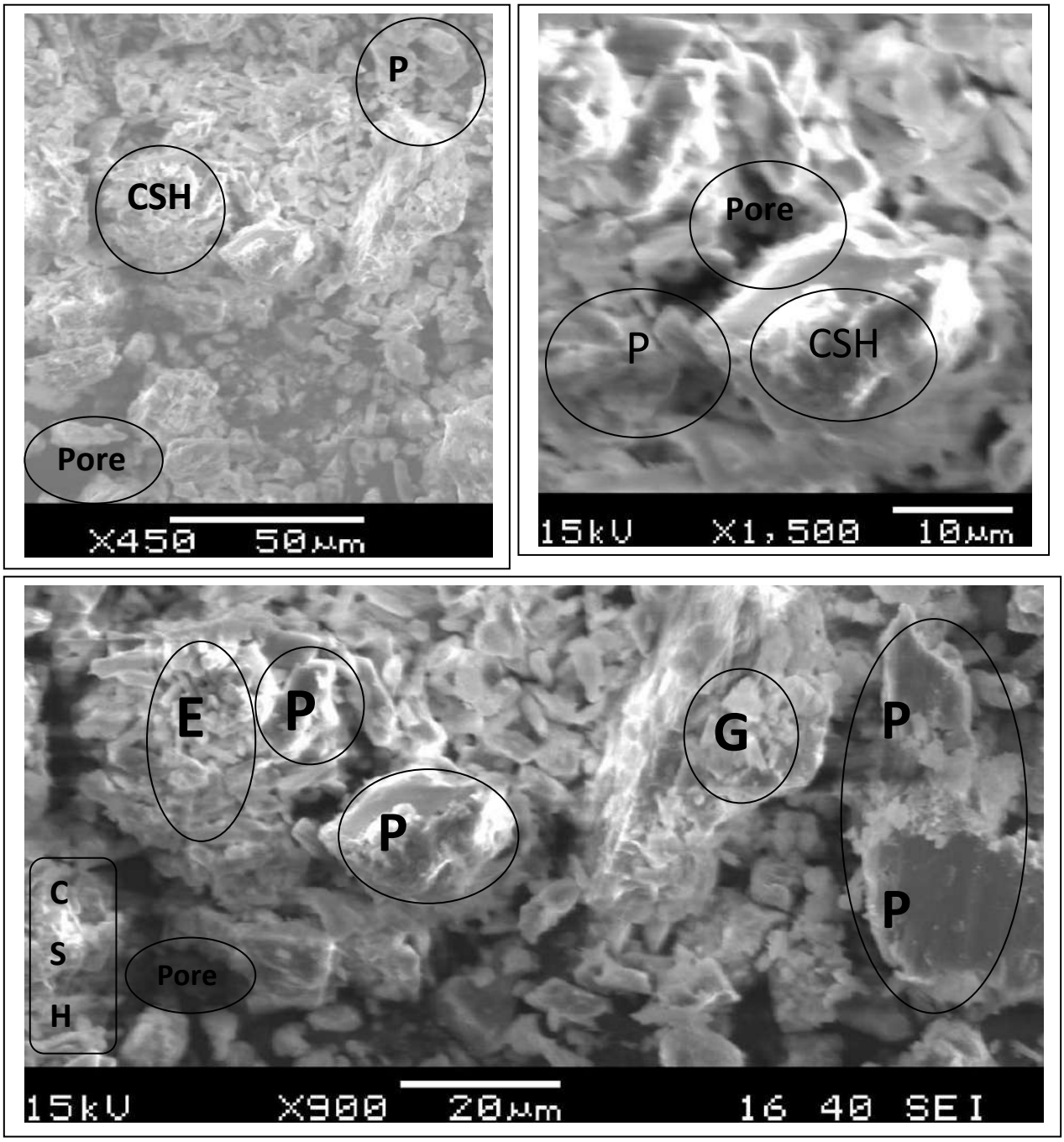


Figure IV.54: Observation sous MEB du mortier au laitier (ML) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (H_2SO_4)).

➢ ***Conservation dans l'acide (HCl)***

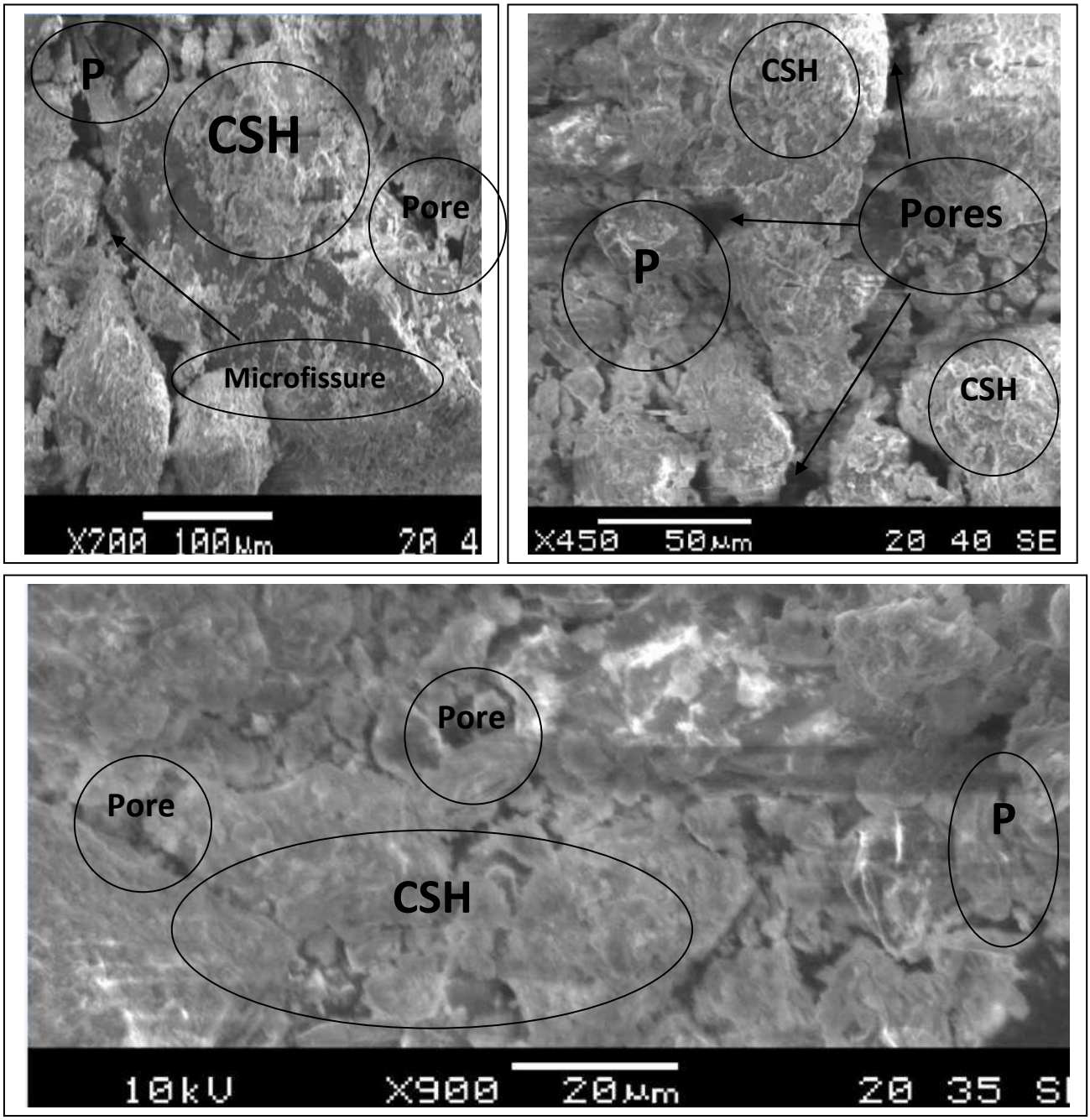


Figure IV.55: Observation sous MEB du mortier au laitier (ML) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (HCl)).

C- Mortier à la pouzzolane (MPN)

- ***Conservation dans l'acide (H_2SO_4)***

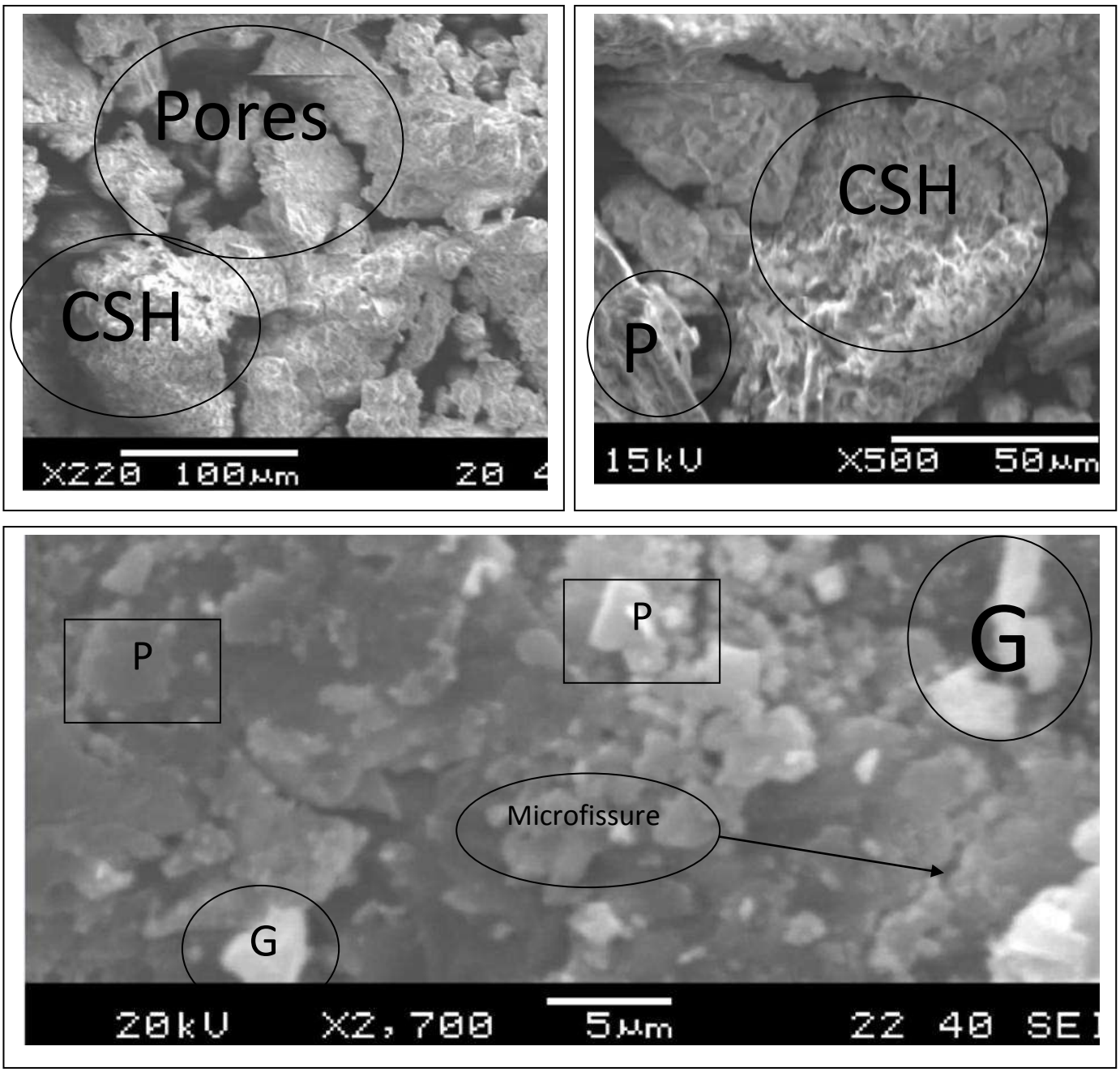
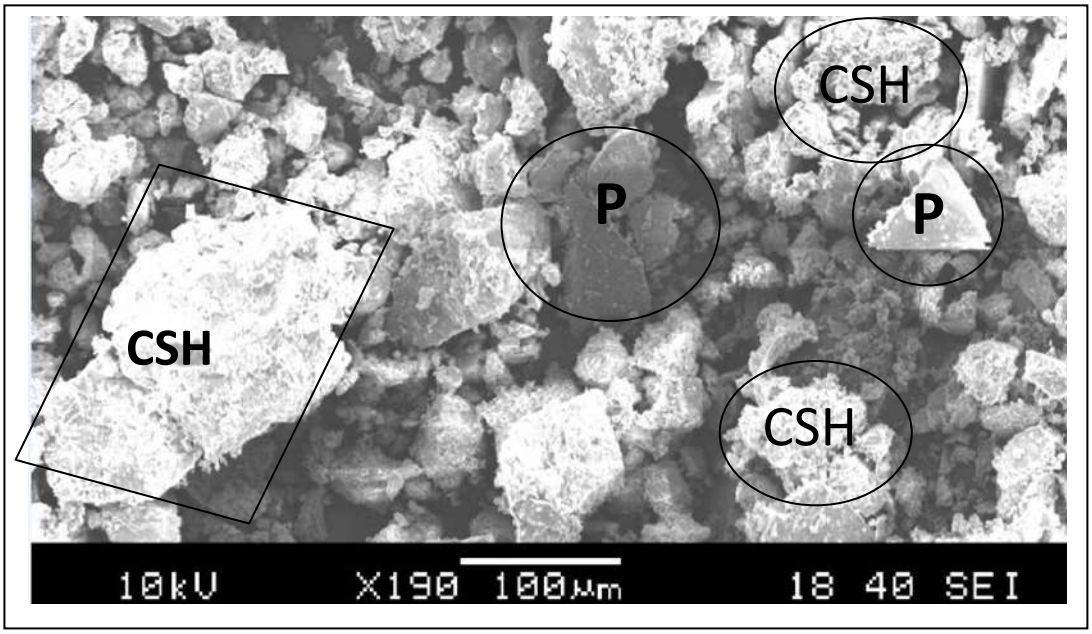


Figure IV.56: Observation sous MEB du mortier à la pouzzolane (MPN) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (H_2SO_4)).

- ***Conservation dans l'acide (HCl)***



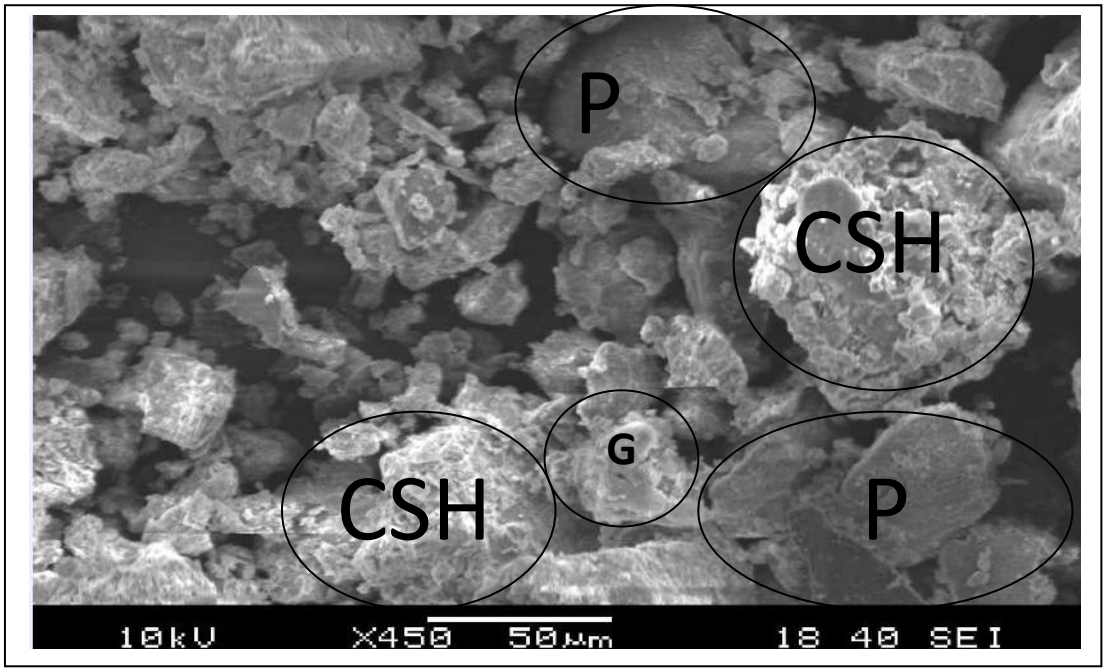


Figure IV.57: Observation sous MEB du mortier à la pouzzolane (MPN) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (HCl)).

D- Mortier aux fillers calcaires (MC)

- ***Conservation dans l'acide (H_2SO_4)***

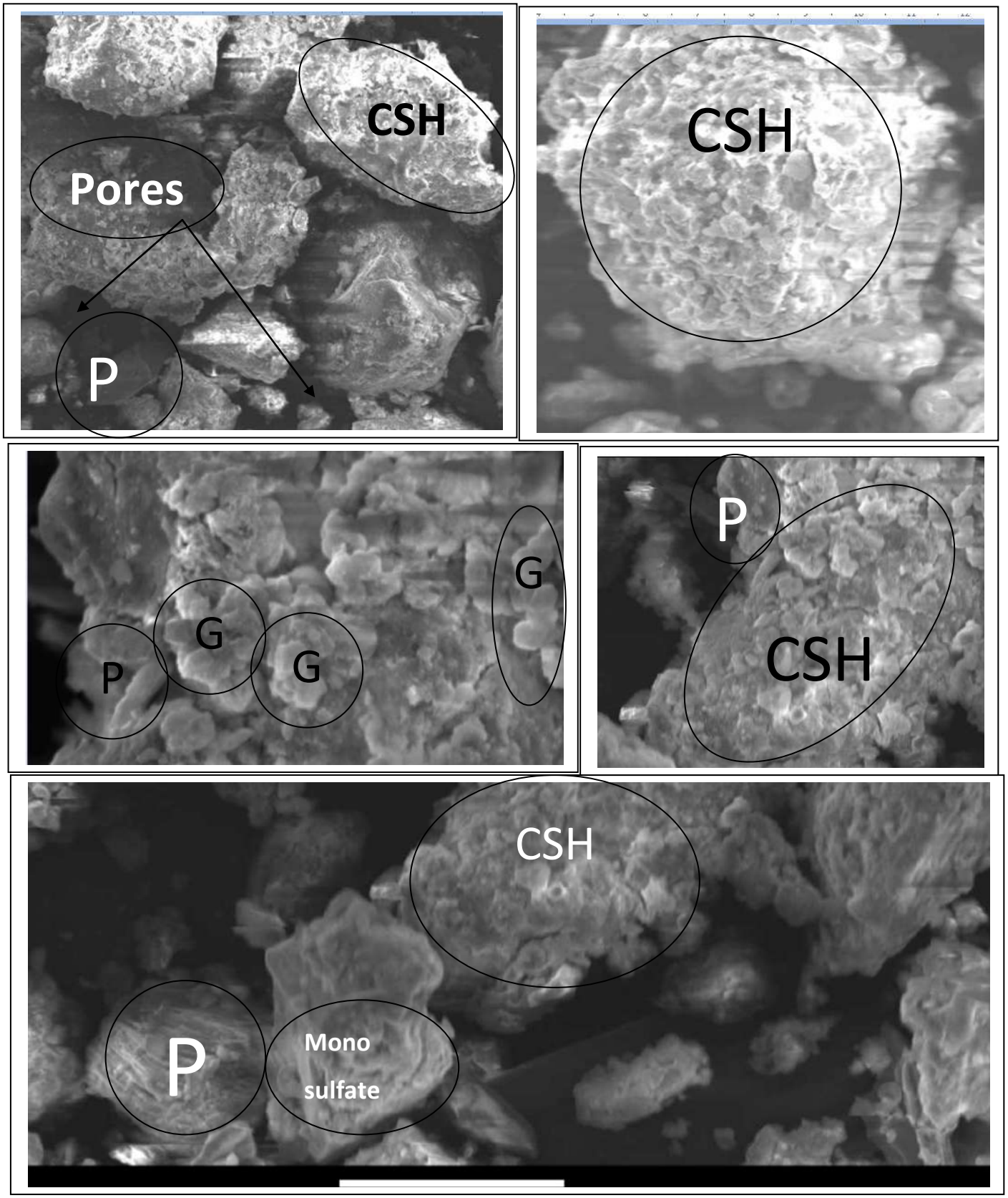


Figure IV.58: Observation sous MEB du mortier aux fillers calcaires (MC) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (H_2SO_4)).

- ***Conservation dans l'acide (HCl)***

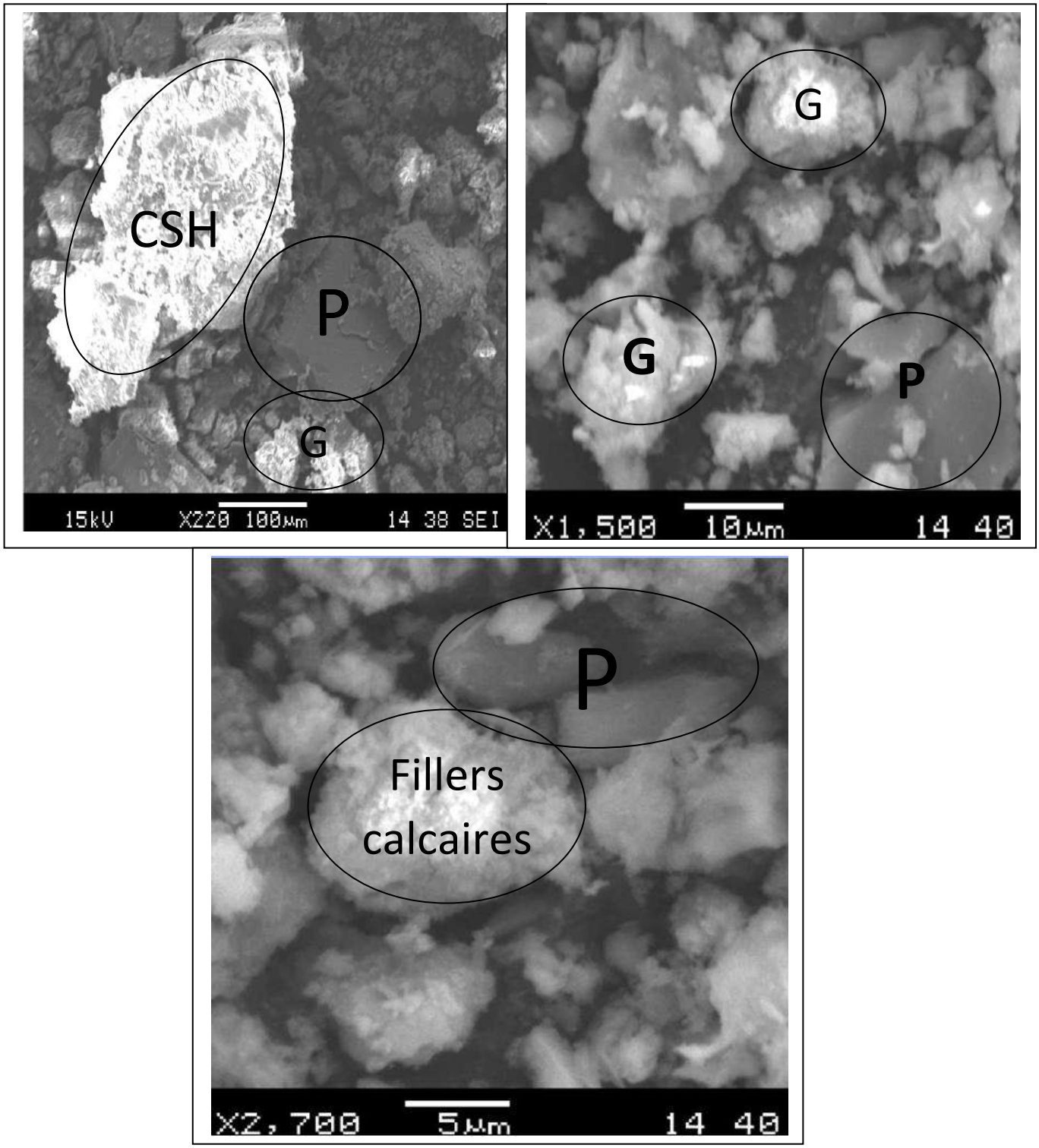


Figure IV.59: Observation sous MEB du mortier aux fillers calcaires (MC) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (HCl)).

E- Mortier au sable de dunes broyé (MSDB)

- ***Conservation dans l'acide (H_2SO_4)***

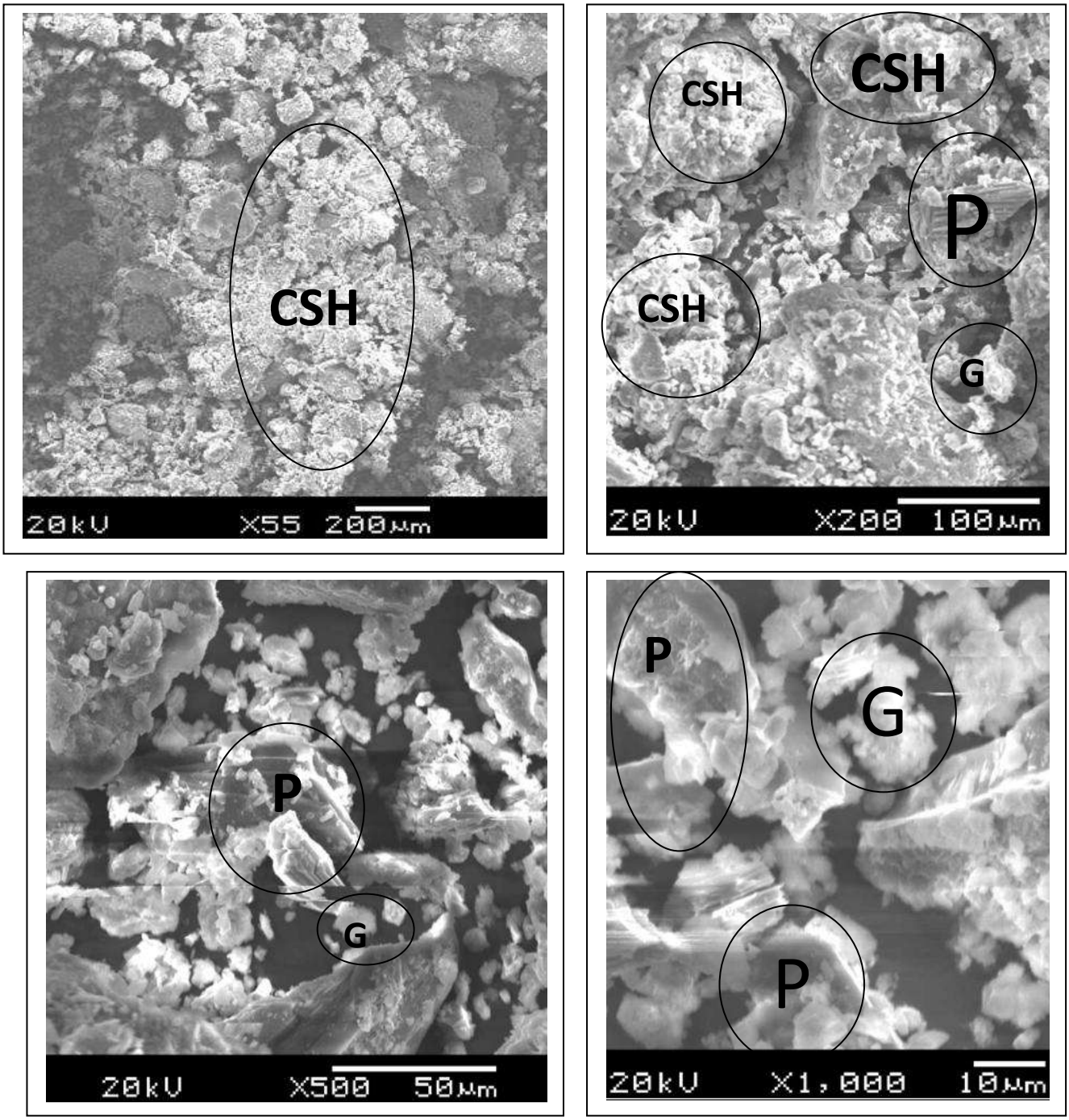


Figure IV.60: Observation sous MEB du mortier au sable de dunes broyé (MSDB) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution H_2SO_4).

- ***Conservation dans l'acide (HCl)***

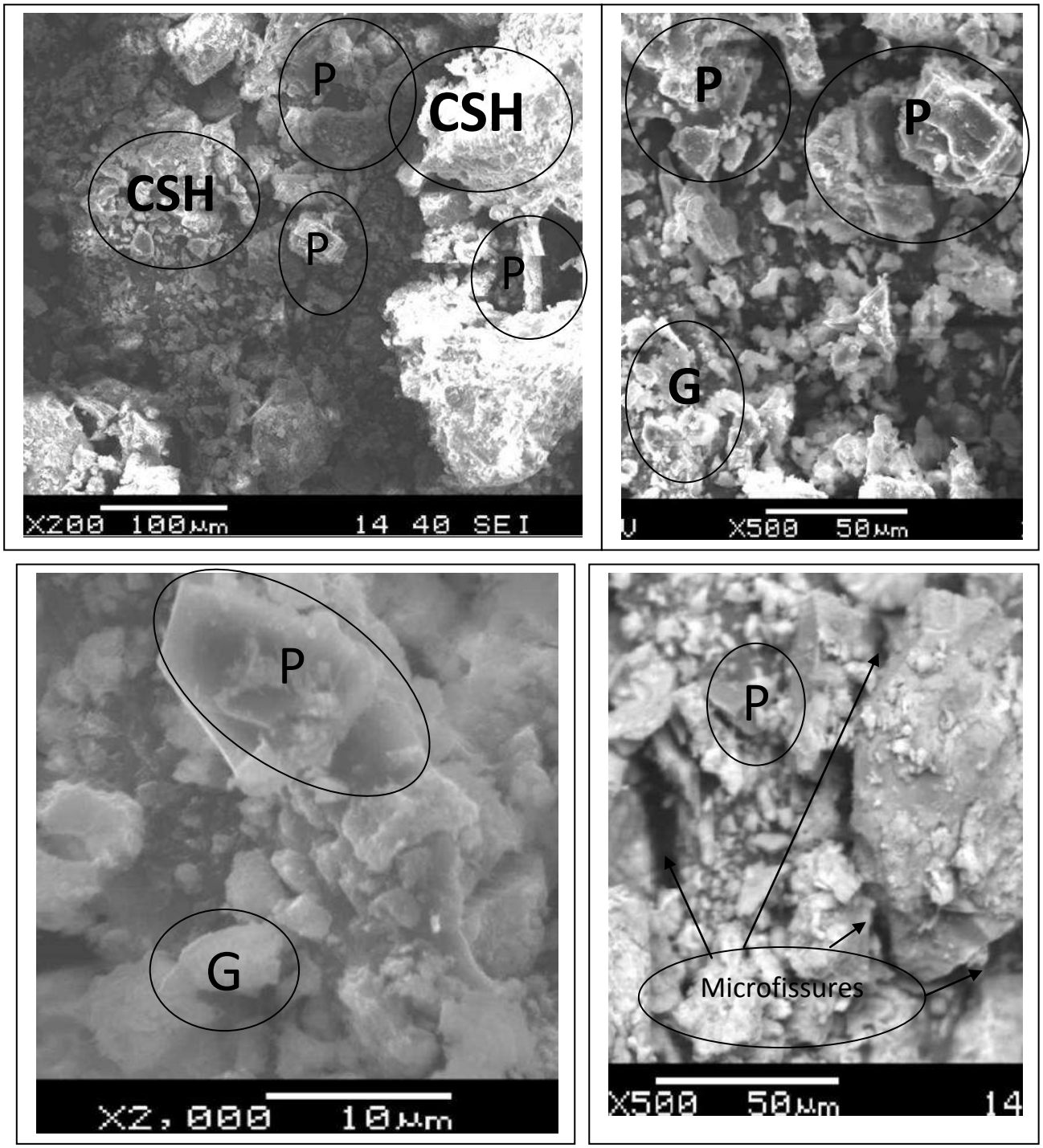


Figure IV.61: Observation sous MEB du mortier au sable de dunes broyé (MSDB) immergé (28 jours dans l'eau douce + 90 jours dans la solution (HCl)).

IV.5. CONCLUSION

L'étude des caractéristiques physiques et mécaniques du mortier frais et durci a permis d'éclaircir l'effet positif et performant des quatre ajouts (laitier d'El-Hadjar, pouzzolane de Béni-Saf, calcaire de Hassi Messaoud et le sable de dune broyé d'El-Oued) sur les mortiers.

L'incorporation de 20% de laitier, 15% de pouzzolane, 10% de calcaire ou de sable de dunes broyé (par rapport au poids de ciment) au mortier, a présenté un bon alternatif économique et écologique; sans l'altération de la résistance mécanique.

Ces ajouts qui sont -énergétiquement- moins couteux, et écologiquement moins polluants, n'altèrent pas les caractéristiques mécaniques des mortiers, si nous les utilisons avec des taux optimaux.

A partir de l'étude approfondie de la microstructure à l'aide du MEB et de DRX, nous pouvons constater que les quatre ajouts utilisés dans notre projet sont tous bénéfiques pour la densification de la matrice cimentaire.

Cette analyse a montré l'effet filler des ajouts par le remplissage des pores, et l'effet pouzzolanique (actif) par l'apparition des CSH supplémentaires et la consommation de l'apport du gypse additionnelle. Ces CSH rendent les mortiers plus denses et par conséquent plus résistants.

Les quatre ajouts ont présenté un bon comportement envers l'attaque des acides (HCl et H_2SO_4), et confèrent aux mortiers une excellente résistance contre la dégradation, par leurs deux effets combinés :

- Actif (pouzzolanique), en consommant le gypse issu de l'hydratation du ciment, et en densifiant la matrice.
- Physique (de remplissage); en infiltrant dans les pores et les capillaire, ce qui rend la structure plus dense et plus imperméables aux acides.

Ces effets ont un impact direct sur les caractéristiques physiques telles que, la densité, l'absorption capillaire et la vitesse de propagation des ondes, et par conséquent sur les caractéristiques mécaniques; notamment la résistance à la compression et la flexion.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'utilisation des ajouts minéraux actifs et inertes devient une alternative et même un impératif inéluctable pour la confection de matériaux cimentaires dotés de performances optimales afin de répondre à des exigences très diverses telles que :

1. La bonne résistance mécanique,
2. La bonne résistance chimique,
3. L'économie,
4. Et la protection de l'environnement.

C'est dans ce contexte là, que rentre ce travail de recherche dont l'objectif est l'étude expérimentale de l'effet de quatre ajouts minéraux locaux ; à savoir, le laitier d'El-Hadjar, la pouzzolane de Béni-Saf, le calcaire de Hassi Messaoud et le sable de dune d'El-oued. Nous avons visé deux objectifs principaux :

- L'identification et la caractérisation rigoureuses de ces ajouts
- L'impact de ces ajouts sur les performances physico-mécaniques et la durabilité du mortier.

Toutes les observations effectuées dans ce présent travail, nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

1- La composition de référence de tous les mortiers est par définition la composition massique d'un mortier normal (01 part de ciment, 03 parts de sable et une demi-part d'eau, (E/Liant=0.5 et S /liant=3)). Cette composition a été maintenue durant tous les essais de caractérisation et le rapport (E/Liant) a été pris constant et égal à 0.5 afin de

neutraliser (écarter) l'effet de l'eau sur toutes les caractéristiques étudiées notamment la maniabilité, la résistance mécaniques et la durabilité.

2- La composition témoin (MT) a présenté des caractéristiques acceptables, bien que le sable et le ciment utilisés sont un sable alluvionnaire local et un ciment CPA-CEM I-42,5. Cette composition a présenté une résistance mécanique à l'âge de 28 jours de 30,6 MPa en compression et 5 MPa en traction par flexion. A long terme (6 mois) l'amélioration est légère, elle a offert 34 MPa en compression et 6 MPa en flexion.

3- les quatre ajouts minéraux ont diminué le temps d'écoulement et amélioré la maniabilité. Nous avons constaté que tous les ajouts minéraux utilisés contribuent à la libération de l'eau emprisonnée en rendant le mélange plus fluide. D'autre part, ces ajouts broyés se manifestent comme un lubrifiant, en réduisant les vides inter-granulaire, et diminuent la demande en eau, en améliorant la maniabilité.

4- Les quatre ajouts ont augmenté sensiblement la densité du mortier frais et durci. Les ajouts se manifestent comme des fillers, et rendent le squelette granulaire plus compact et plus dense. D'autre part, ces ajouts qui réagissent par leur activité, engendrent de nouveaux constituants additionnels et contribuent à la compacité des mortiers.

5- Aux jeunes âges, le mortier témoin (MT) présente toujours des caractéristiques mécaniques plus performantes que celles des mortiers avec ajouts. Au-delà de 28 jours, les résistances mécaniques se convergent, et même dépassent celle du témoin (MT) notamment les compositions (ML) et (MPN). Cela peut être expliqué par la propriété latente des ajouts, qui influe sur la cinétique d'hydratation, mais avec des manières différentes.

6- Une remarque intéressante concerne les mortiers contenant 20 % du laitier broyé d'El-Hadjar ; ils développent des résistances inférieures à celles du mortier de contrôle à court terme. A 3 et 7 jours, les résistances du mortier (ML) représentent presque 70% de celles du mortier témoin (MT). A partir du 7ème jour, l'activité de l'ajout se déclenche ; la résistance mécanique commence à augmenter d'une manière remarquable et elle dépasse celle du témoin. A six mois, la résistance à la compression est de 38 MPa le mortier (ML), soit un gain de résistance de 11%, par rapport au témoin (MT).

7- Le mortier à 15% de pouzzolane de Béni Saf développe des résistances inférieures ou tangentes à celles du mortier de contrôle à tout âge. A 3 et à 7 jours, les résistances des mortiers (MPN) représentent presque 80 % de celles du mortier de contrôle. A long terme, les résistances deviennent tangentes à celles du mortier de contrôle ; à l'âge de six mois, la résistance à la compression est de 35 MPa, elle dépasse légèrement (MT). Ceci peut être attribué à l'activité pouzzolanique qui est lente aux jeunes âges et se développe à long terme.

8- Le calcaire s'est comporté comme un ajout inerte et un peu actif à la fois. Le mortier (MC), à 10% de fines calcaires, présente des caractéristiques mécaniques moindres que celles du mortier témoin (MT), quoi que la différence entre les deux résistances n'est pas trop significatif. Cet écart continue à décroitre avec l'âge ; il atteint 6,5% à six mois. A cet âge nous avons enregistré une résistance de 32 MPa. Cela est dû au rôle combiné des fillers calcaires :

- Effet physique de remplissage et densification (effet filler).
- Accélération d'hydratation des C_3S du ciment portland (CEMI) aux jeunes âges.
- la réaction avec les C_3A du ciment portland (CEMI), en formant des carboaluminates de calcium hydratés, qui se précipitent dans les pores et augmentent, par conséquent, la compacité et la résistance mécanique.

9- Aux jeunes âges les résistances développées par le mortier à 10% de sable de dunes broyé (MSDB), sont inférieures à celles du mortier témoin (MT) ; elles ont représenté 80% de la contrainte de contrôle. Aux premiers âges les fines sableuses se manifestent par leur effet fillers (inerte), elles sont similaires aux ajouts pouzzolaniques.

Au delà de cet âge, l'écart des contraintes entre les deux commence à se réduire. Cela est dû à la cinétique de la réaction d'hydratation du ciment et de la réaction de poudre du sable de dune avec la portlandite en fonction du temps (effet pouzzolanique). Les contraintes s'approchent à celles du témoin. A six mois l'écart devient négligeable (3,5%).

Cette amélioration dans les résistances mécanique est similaire à celle de l'ajout pouzzolane, quoi que les taux d'incorporation des deux ajouts sont différents (10 et 15%).

10- L'addition des ajouts minéraux (20% de laitier granulé broyé d'El-Hadjar,15% de la pouzzolane naturelle de Béni Saf, 10% des fillers calcaires de Hassi Messaoud, et 10% du

sable de dunes broyé d'El-Oued) améliore le comportement des mortiers soumis aux attaques des acides HCl et H_2SO_4.

11- Toutes les additions utilisées ont un effet performant sur l'absorption capillaire ; elles ont toutes réduit ce paramètre. Ce qui prouve les deux effets principaux des ajouts :

- l'effet physique par finesse : le remplissage.
- l'activité pouzzolanique et hydraulique: la pouzzolanicité ou l'hydraulicité peuvent réduire la porosité à long terme si le mortier est conservé humide.

12- L'essai ultrasonique a montré que les mortiers avec ajouts ont présenté, tous, des vitesses plus grandes que celle du témoin. Ce qui montre l'effet positif des additions sur la compacité des mortiers. Nous avons remarqué que les mortiers aux laitier, pouzzolane et sable de dunes broyé (ML, MPN, MSDB) ont tous les trois, des vitesses de propagation dépassant celle du mortier au calcaire (MC), car ce dernier se manifeste seulement par sa finesse, or que les autres ont un effet pouzzolanique supplémentaire.

13- malgré la dégradation de la vitesse du son à travers les mortiers exposés aux attaques des acides (H_2SO_4 et HCl), cette vitesse reste toujours plus grande que celle du témoin ; ce qui explique l'effet avantageux de tous les ajouts sur la résistance aux agressions acides.
Les quatre ajouts présentent alors une protection contre l'effet des acides (H_2SO_4 et HCl) sur les squelettes des mortiers, en contribuant à l'amélioration de la compacité des mortiers.

14- l'effet de l'acide sulfurique (H_2SO_4) est plus nocif que celui de l'acide chlorydrique (HCl), car la diminution de la vitesse du son est plus remarquable pour les éprouvettes immergées dans la première solution que celles dans la deuxième. Cela est dû, d'une part, au faible dosage de l'acide chlorydrique par rapport à l'acide sulfurique, et à la différence du mécanisme d'attaque des deux acides d'une autre part.

15- Les éprouvettes immergées dans la solution d'acide sulfuriques (H_2SO_4) sont toutes augmentées en poids, à cause de la précipitation d'une couche gypseuse et de la formation de nouveaux constituants dans la structure du mortier.

16- Les éprouvettes immergées dans la solution d'acide chlorydrique (HCl) ont toutes perdu de leur poids, à cause de la lixiviation des constituants des différentes compositions de mortier.

17- L'effet des différents ajouts sur la réduction de la perte en masse est remarquable pour toutes les compositions ; notamment pour les additions considérés actives (ML, MPN, MSDB) ; où on a enregistré une diminution de perte de 50% à 180 jours d'immersion dans l'acide chlorydrique (HCl).

18- D'une façon générale la résistance chimique des mortiers avec ajouts minéraux sont supérieures à celles du mortier témoin. Les ajouts considérés actifs (laitier, pouzzolane et sable de dunes broyé) et même l'ajout considéré inerte (calcaire), ont tous freiné la dégradation des mortiers exposés aux acides sulfurique et chlorydrique (H_2SO_4 et HCl).

19- La dégradation du béton par les acides est due principalement à l'action combinée des ions de sulfate ou de chlorure avec la chaux libre (portlandite) libérée au cours de l'hydratation du ciment. En plus les acides réagissent avec les aluminates du ciment et donnent des composés expansifs tels que l'éttringite, ce qui provoque l'expansion et la fissuration du mortier.

20- Les quatre ajouts (actifs et inertes) ont le pouvoir de réduire l'action chimique et physique de ces acides, ce qui conduit à une amélioration des caractéristiques physico-mécaniques et chimiques (durabilité) des différents mortiers par rapport au témoin.

21- L'analyse de la microstructure par DRX ou par le MEB, a confirmé toutes les observations précédentes, notamment l'effet des ajouts sur la densification et la protection de la structure cimentaire contre la dégradation et la microfissuration (pores, capillaires, et microfissures), ce qui a conféré aux mortiers un bon comportement envers les attaques acides, en assurant, par conséquent, une bonne durabilité.

RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

1) Les mortiers renfermant 20% de laitier, ou bien 15% de pouzzolane naturelle ou 10% de calcaire ou 10% de sable de dunes broyé, présentent de meilleures performances physico-mécaniques et chimiques (durabilité). En outre, il est recommandé d'utiliser ces compositions afin d'élaborer des mortiers et des bétons de performance à destinations particulières, notamment aux milieux agressifs.

2) Ces compositions doivent être examinées pour élaborer des bétons et des mortiers de bonne performance, notamment à long terme, sans avoir utilisé des additions minérales de provenance étrangère telles que la fumée de silices ou les cendres volantes.

3) Le sable de dune broyé représente un bon ajout minéral, qui peut être amélioré par un broyage avancé, et par conséquent, il peut trouver sa place parmi tous les autres ajouts minéraux déjà existants et utilisés en Algérie.

En perspective, nous proposons les axes de recherches suivants et il serait intéressant d'engager des travaux sur la même thématique avec les points suivants :

1) L'étude des compositions ternaires ; deux ajouts à la fois, notamment celles renfermant le sable de dune broyé.
2) L'étude de la durabilité de ces compositions à différentes cures.
3) L'étude de l'évolution des caractéristiques physico-mécaniques et chimiques de ces mortiers à très long terme, plus d'un an (12 mois).
4) L'amélioration des caractéristiques physico-mécaniques et chimique par un broyage plus poussé des ajouts minéraux.
5) L'étude de la substitution des fines argileuses du sable de construction (granulat) -sans toucher le dosage en ciment réel- par des fillers minéraux actifs et inertes.
6) La généralisation de l'étude pour le béton.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

1. Abdou. K. « Influence des fibres métalliques sur les variations dimensionnelles et pondérales d'une matrice cimentaire », Thèse de doctorat ; université de Constantine, (2007).
2. AFPC-AFREM. « Compte-rendu des journées techniques de l' AFPC-AFREM, [Groupe de travail] Durabilité des bétons : méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité » :, Toulouse,11 et 12 décembre, (1997).
3. Aichouba. A., « Effets des pouzzolanes naturelles sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire » Thèse de magister, IGCM ORAN – (2005).
4. Aitcin.P.C. « L'emploi des fluidifiants dans les bétons à hautes performances » . Les bétons à hautes performances du matériau à l'ouvrage , pp.31-50, Presse de l'ENPC. Paris (1990).
5. Aitcin.P.C. « La technologie des bétons à très haute résistance en Amérique du Nord ». Material and structures., N° : 20, pp.180-189, (1987).
6. Al-Harthy A.S., Abdel Halim M., Taha R., Al-Jabri K.S., « The properties of concrete made with fine dune sand » , Construction and Building Materials, -21- 1803–1808, (2007).
7. Alhozaimy, A. , AL-Negheimish A. , Alawad. O.A. , Jaafar. M.S., , Noorzaei. J. «Binary and ternary effects of ground dune sand and blast furnace slagon the compressive strength of mortar», Cement & Concrete Composites 34, 734–738, 2012.
8. Amouri.C. « Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité) », Thèse de doctorat ; université de Constantine, 2009.
9. APS, cite officiel de l'Algérie Presse Service « Ciment: le Groupe GICA réalise sa première opération d'exportation vers l'Europe », http://www.aps.dz/economie , 2018.

10. Aubert J.E., Segui P., Husson B., Measson M.,. «A method developed to quantify lime and gypsum consumed by mineral additions », Cement & Concrete Composites 34 , 874–880, (2012).

B

11. Baron, J., Ollivier, J. P., « Les bétons, bases et données pour leur formulation ». Edition Eyrolles, Paris., 1996.
12. Baron. J. , Sauterey. R. , « Le béton hydraulique Connaissance et pratique », Presses de l'ENPC, Paris, 1993.
13. Baron. J. « Le béton hydraulique ; connaissance et pratique ». Presse de l' ENPC, Paris, (1993).
14. Baron. J., « la nécessité d'une démarche pragmatique :l'idée de maniabilité, et sa mise en pratique », Le béton hydraulique, connaissance et pratique, pp, 131-142, Presse de l'ENPC, Paris, (1993).
15. Baron. J., « Les principes de compositions du béton de porosité minimale », Le béton hydraulique, connaissance et pratique, pp, 143-160, Presse de l'ENPC, Paris, (1993).
16. Behim, M., « Utilisation du laitier granulé d'El-Hadjar pour la fabrication des ciments ». Thèse de Magister, Université de Annaba, (1987).
17. Behim. M., « Utilisation du laitier granulé d'El-Hadjar pour la fabrication des divers types de ciments » ; Premier séminaire international sur la valorisation des déchets industriels ; Université de Annaba, Octobre (1986).
18. Belferrag A, « Contribution à l'amélioration des propriétés mécaniques et rhéologiques des bétons de sable de dunes », Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra (2016).
19. Benchaa. B., Azzouz L, Kadri A, Belaidi S E, Soualhi H. ,« Propriétés physico-mécaniques et durabilité des mortiers à base du sable de dunes », XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie, 6 au 8 juin 2012.
20. Benezet J.C., Benhassaine A. «The influence of particle size on the pozzolanic reactivity of quartz powder» , Powder Technology: 103 -. pp.26–29,1999.
21. Benkaddour M , Kazi aoual F, Semcha A, « Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle », Revue Nature et Technologie. n° 01/. Pages 63 à 73, Juin 2009.
22. Benna.Y. « Valorisation des sables concassés fillérisés ». CNERIB.Alger (1995).

23. Bentz D.P. «modeling the influence of limestone filler on cement hydration using CEMHYD3D» , Cement & Concrete Composites, 28, 124–129, (2006) .
24. Bernard F, « Quelques propriétés mécaniques des BHP », Les bétons à hautes performances du matériau à l'ouvrage. pp,93-106, Presse de l'ENPC.Paris (1990).
25. Bertrandy.R . « Etude de l'influence des fillers calcaires sur le facteur durabilité des bétons hydrauliques » . Revue TRAVAUX ; Mai, (1977).
26. Bessa, A « Evaluation de la contribution des additions minérales à l.activité liante du ciment dans les mortiers », XXIèmes Rencontres universitaires de génie civil, Prix « RENE HOUPERT », (2003).
27. Boldyrev. A.S.et Entine. Z.B., « Expériences et fondements physico-chimiques de l'utilisation des sous-produits dans l'industrie du ciment », 7ème Congrès international de chimie des ciments,Vol II,pp :III83-88, Paris, (1980).
28. Bouaziz. A., Hamzaoui R., Rezigue S., Bennabi A. , « Valorisation du sable de dune dans les formulations des mortiers et des bétons », 31èmes Rencontres de l'AUGC, E.N.S. Cachan, 29 au 31 mai 2013.
29. Bouchouika A., Ooudjit M.N., « Influence du sable de dune finement broyé sur les propriétés physico-chimique et mécaniques des bétons ». 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, ENSET, Oran, (Algeria) - October 12-14, 2009.
30. Bougara A., Lynsdale C., Ezziane K. «Activation of Algerian slag in mortars» , Construction and Building Materials 23 542–547, (2009).
31. Bouhmid. M, « Elaboration d'un éco-ciment pouzzolanique à base de vase de barrage hydraulique traitée et déchet de brique de construction », thèse de magister université des sciences et de la technologie Mohamed Boudiaf –Oran- juin 2011.

C

32. Cembureau, site internet de l'Association européenne du ciment ; https://cembureau.eu; , (2017).
33. Chabi. S.,. Mezghiche. B,. Guettala. H , « étude de l'influence des additions minérales actives sur le comportement mécanique des ciments et mortiers », courrier du savoir – N°05, juin 2004, pp. 03-08, Université Mohamed Khider Biskra, Algérie, 2004.
34. Chapon.J. « A propos des projets nationaux ; recherche, développement » . Les bétons à hautes performances du matériau à l'ouvrage , pp ;9-14, Presse de l'ENPC. Paris (1990).

D

35. De Larrard, F. « Structures granulaires et formulation des bétons », Edition LCPC Paris / France ,2000.
36. Dierkens M, « Principales agressions et attaques du béton», Centre d'études techniques de l'équipement (CETE) de LYON -DLL-exposé le15 novembre (2011).
37. Dreux G. et Festa. J, . "Nouveau guide du béton et de ses constituants" Edition, Eyrolles- Paris- 8ème édition, 3 ème tirage, 2007.
38. Dreux. G. « Nouveau guide du béton ». Ed, Eyrolles, Paris, (1985).
39. Dron.R et Voinovitch.I.A., « L'activation hydraulique des laitiers, pouzzolanes et cendres volantes », Le béton hydraulique, connaissance et pratique, pp,237-246, Presse de l'ENPC, Paris, (1993).
40. Dupain R , Saint-Arroman J-C, Lanchon R , « Granulats, sols, ciments et bétons: Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire », Edition Casteilla, 4e édition, 2009.
41. Duriez.M et Arrambide.J. « Nouveau traité de matériaux de construction ». Edition, Dunod, Paris, (1961).
42. Dussart.J. « Le laitier de hauts fourneaux et laitier d'aciérie (L.D) ».Colloque international sur l'utilisation des sous-produits et déchets industriels dans le génie civil, Vol II. pp.279-295, Paris, (1978).

E

43. EN 196-1, Règles « Méthodes d'essais des ciments ». (2006).
44. EN 197-1, Ciment -Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants, (remplace ENV 197-1 ; 1992), Mai 2000.

F

45. Folliot.A et Buil. M., « La structuration progressive de la pierre de ciment », Le béton hydraulique connaissance et pratique, pp, 223-236. Presse de l'ENPC, Paris, (1993).

G

46. Ghrici M. , Kenai S et Meziane. E. « Mechanical and durability properties of cement mortar with Algerian natural pozzolana» . J Mater Sci 41:pp 6965–6972. (2006).
47. Ghrici M., Kenai S., Said-Mansour M., «Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements», Cement & Concrete Composites 29 pp.542–549, (2007).

48. GICA, « GICA réalise un troisième record consécutif de production », site officiel du Groupe Industriel des Ciments d'Algérie ; http://gica.dz , (2018).
49. Gorisse.F « Essais et contrôle des bétons ». Ed, Eyrolles, Paris, (1978).
50. Grandet.J.P « Durabilité du béton à hautes performances, vis-à-vis des attaques chimiques externes ». Les bétons à hautes performances du matériau à l'ouvrage. pp.223-229, Presse de l'ENPC. Paris (1990).
51. Grandet.J.P. « Durabilité du béton à hautes performances, vis-à-vis des attaques chimiques externes ». Les bétons à hautes performances du matériau à l'ouvrage , pp.223-229, Presse de l'ENPC. Paris (1990).
52. Granju. J.L, et Maso. J.C., « Résistance à la compression simple des pâtes pures de ciments durcis, temps de durcissement supérieur à quatre ans », Cement and concrete research, 8 ;pp ;7-14 ; (1978).
53. Guernouti Y , « Effet des ajouts cimentaires ultrafines sur la durabilité et les propriétés pysico-mécaniques des bétons ». Thèse de magister université M'hammed Bouguerra, Boumerdes , 2002.
54. Guettala S., « Contribution à l'étude de l'influence de l'ajout du sable de dune finement broyé au ciment, sur les performances physico-mécaniques, la déformabilité et la durabilité du béton », Thèse de Doctorat de l' Université Mohamed Khider – Biskra, (2012).
55. Guettala S., Mezghiche B. «Compressive strength and hydration with age of cement pastes containing dune sand powder» , Construction and Building Materials 25 , pp.1263–1269, (2011).

H

56. Hadjsadok A, Kenai. S, Courard. L, Darimont. A. «Microstructure and durability of mortars modified with medium active blast furnace slag» Construction and Building Materials 25 pp.1018–1025, (2011).
57. Hadjsadok A, Kenai. S, Courard. L, Michel. F, Khatib. J. " Durability of mortar and concretes containing slag with low hydraulic activity» Cement & Concrete Composites 34 pp. 671–677, (2012).
58. Heikal M. El-Didamony, H, Morsy M.S, « Limestone-filled pozzolanic cement» Cement and Concrete Research 30, pp.1827-1834(2000).

59. Hoghn.F.J et Meusel.J.W. «Evolution for durability and strength development of ground granulated blast furnace slag» . Cement, concrete, and aggregates, Vol III, N°1, pp.40-52. Summer, (1981).
60. Holcim (Suisse), « Guide pratique du béton ; concevoir et mettre en œuvre des bétons durables», Editeur: Holcim (Suisse) SA , 6ème édition (édition Suisse), janvier 2015.

J

61. Jayant D- Bapat. « Mineral admixture in cement and concrete» ; Edition CRC Press , Taylor & Francis Group, NY-USA- (2013).
62. Jiang. S.P et Grandet. J., « Evolution comparée des porosités des mortiers de ciments au laitier et mortiers des ciments portland », Cement and concrete research. Vol. 19 ; pp ;487-496, (1989).

K

63. Kerbouche A, « Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques et la durabilité des mortier » Thèse de Magister, l'ENSET d'Oran- 2009.
64. Kerbouche A., Mouli M., Laoufi L., Senhadji Y. et Benosmane S.; « Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécniques des mortiers ». SBEIDCO -1st International Conference on sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries- ENSET Oran (Algeria) – (October 12-14, 2009).
65. Kessal. M et Edward-Ladjnef. M., « L'optimisation de la résistance à court terme des bétons fa briqués avec de ciment de type 20M », Canadian Journal of Civil Engineering;Vol 23. pp, 614-620, (1996).
66. Khelifa Med R, « Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants » Thèse de Doctorat, Universités d'Orléans et de Constantine, 2009.
67. Khouadjia M.L.K, Mezghiche B, et Drissi M , « étude du comportement mécanique des bétons à base des sables de carrière modifiés avec sable de dune et sable d'oued : expérimentation et numérisation ». the 3rd international workshop on waste management and sustainable development , tanger, maroc, octobre, 2015.
68. Khudhair, M., Elyoubi H.R, Elharfi M. S A., «Formulation and characterization of a new ecological cementitious material at base of different percentage of limestone fillers: Study of physical-chemical and mechanical properties» Journal of Materials and Environmental Science, (JMES), Volume 8, Issue 11, pp 3973-3985, July 2017.
69. Komar.A. « Matériaux et éléments de construction » . Ed, Mir, Moscou, (1978).

70. Kriker. A., « Durabilité du béton à base de laitie », Thèse de Magister, ENP, Alger, (1992).

L

71. Laoufi L. senhadji Y., benazzouk A., langlet T., mouli M.et Laoufi I. «durability of natural pozzolan-based mortar exposed to sulfate attack» journal of fundamental and applied sciences, 2016.
72. Lawrence P, Martin Cyr, et Erick Ringot. «Mineral admixtures in mortars Effect of inert materials on short-term hydration» , Cement and Concrete Research. 33 pp1939–1947 (2003).
73. Lesage.R. « Les granulats », Le béton hydraulique connaissance et pratique, pp,39-58, Presses de l'ENPC, Paris, 1993.
74. Logbi A., Kriker A. et Snisna Z. «Effects of Mineral Additions on Durability and Physico- Mechanical Properties of Mortar» . Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability (TMREES), American Institute of Physics (AIP) Conf. Proc. 1814, pp: 020032-1–020032-8 (2017).
75. Logbi, A., « Effet de l'incorporation des ajouts minéraux sur les propriétés physico-mécaniques du béton », Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique , Alger, (1999).
76. Longuet. P., Les ajouts au clinker de ciment , Revue de Matériaux de construction ; pp, 113-116. N°693, Mars-Avril, (1975).

M

77. Mechti.W. , Rouis. M.J. and Mnif. T. «Compressive strength and hydration with age of cement pastes containing finely ground sand» . Chemistry and Materials Research, Vol.4 2013 ; Special Issue for International Congress on Materials & Structural Stability, Rabat, Morocco, 27-30 November 2013.
78. Mehta P. K and Monteiro P. J. M. «Concrete: Microstructure, Properties, and Materials» , McGraw-Hill Education: USA, Fourth Edition, 2013.
79. Mehta, P.K.. «Reducing the environmental impact of concrete» . Concrete International, 23(10) : 61–66. 2001.
80. Mehta.P.K., « Studies on blended Portland cements containing santorin earth », Cement and concrete research ;N°11 ; pp :507-518 ;(1981).

81. Melais F-Z , « Durabilité des bétons de sable fibrés dans les différents milieux agressifs « effets de la nature des fines d'ajouts et fibres » » ; Thèse de Doctorat , Université de Annaba, 2016.
82. Mladenka S-C et Aïtcin P-C**.** « Bétons à haute performance à base de ciments composés contenant du laitier et de la fumée de silice ». Canadian Journal of Civil Engineering. 30: 414–428, (2003).
83. Mortureux. B et Horain. H., « Comparaison de la réactivité de différentes pouzzolanes », 7ème Congrès international de chimie des ciments, Vol.III, pp :IV110-115 Paris, (1980).

N

84. NF EN 12504-4 *:* Essais pour béton dans les structures - Partie 4 : Détermination de la vitesse de propagation du son, Norme AFNOR, Mai 2005.
85. NF P18-102 :Norme AFNOR :Détermination des caractéristiques mécaniques des béton. Définitions relatives aux essais des bétons (E). Février 1969.
86. NF P18-103 : Norme AFNOR NF P18-103 : « Adjuvant pour béton ;définition, classification et marquage », Décembre 1989.
87. NF P18-501 : Norme AFNOR ;Mars : (1992).
88. NF EN 196-1 .Méthodes d'essais des ciments. Détermination des résistances mécaniques, Mars 1994.
89. NF P 15 – 403 " Sable normal et mortier normal " AFNOR – Paris – 1996.
90. NF P 15 – 411 " Malaxeur " AFNOR – Paris – 1996.
91. NF P 18-452. Bétons-Mesure du temps d'écoulement des bétons et des mortiers aux maniabilimètres (Indice de classement : P18-452). Mai 1988.
92. NF P15-301 : « Liants hydrauliques - Ciments courants - Composition, spécifications et critères de conformité » ; Juin 1994 .
93. Nouari. L. et Touguy. M., « Le filler calcaire utilisé comme constituant secondaire dans la production du ciment composé », Revue Marocaine du génie civil ;pp 35-39. N°67 ; Février, (1997).

O

94. Ollivier J-P, et Vichot A, « La Durabilité des Bétons », Presses de l'École nationale des ponts et chaussées, nouvelle édition, 2008.

95. Olombier.G. « Utilisation des laitiers en techniques routières ». Colloque international sur l'utilisation des sous-produits et déchets industriels dans le génie civil,Vol II. pp .289-295. Paris, (1978).
96. Onder K , Ozgur Y , and Mustafa T , « Compressive strength development of calcium aluminate cement–GGBFS blends» , Cement & Concrete Composites 35 pp163–170, (2013).

P

97. Paillère. A.M et Ravrdy. M., «L'influence d'ajouts inertes ou actifs sur les propriétés des ciments », Bulletin de liaison ; pp :49-60. Juin-Aout, (1977).
98. Pekmezci B.Y., et Akyu¨z S., «Optimum usage of a natural pozzolan for the maximum compressive strength of concrete» , Cement and Concrete Research 34 2175–2179, (2004).

R

99. Ramires. J.L., Barcena.J.M. and Urreta.J.I., « Sables calcaires à fines calcaires et argileuses ;influence et nocivité dans les mortiers de ciment», Materials and structures, 20, pp202-213, (1987).
100. Ramires. J.L., Barcena.J.M. and Urreta.J.I., « Proposal for limitation and control of fines in calcareous sands based upon their influence in some concrete properties », Materials and structures , 23, pp 277-288, (1990).
101. Rashad A.M., Bai Y., Basheer P.A.M., Milestone N.B., and Collier N.C. «Hydration and properties of sodium sulfate activated slag» , Cement & Concrete Composites 37 pp. 20–29, (2013) .
102. Regourd M., «la résistance du béton aux altérations physiques et chimiques», Le béton hydraulique connaissance et pratique, pp513-530, Presses de l'ENPC, Paris, 1993.
103. Regourd. M. et Mortureux. B., « Caractérisation et activation thermique des ciments au laitier » 7ème congrès international de chimie des ciments, Vol II, pp :III.105-111. Paris, (1980).
104. Roskovic, R. et Bjegovic´,D. «Role of mineral additions in reducing CO2 emission» , Cement and Concrete Research 35 pp 974– 978, (2005).

S

105. Salhi I. « diagnostic de la dégradation de la galerie d'évacuation de Touggourt », Thèse de Magister, université Kasdi Merbah de Ouargla, 2014.

106. Sengun, N., Demirdag S., Akbay D., Ugur I., and Altindag R.; «Investigation of The Relationships Between Capillary Water Absorption Coefficients And Other Rock Properties of Some Natural Stones» Site Web: ResearchGate ;https://www.researchgate.net/publication/267416489 (2014).

107. Senhadji .Y., Benosman A.S., Escadeillas G., Mouli M., Laoufi L. and Khelafi H «Mortar incorporating supplementary cementitious materials: strength, isothermal calorimetry and acids attack», Journal of Fundamental and Applied Sciences 15 January 2015.

108. Senhadji Y, Escadeillas G, Mouli M, Khelafi H, and Benosman S, «Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar» . J. Powder Technology, V254, 314-323, (2014).

109. Shi C. et Day R.L., «Pouzzolanic reaction in the presence of chemical activators» . Part 2 –Reaction Products and Mechanism – Cement and Concrete Research – Vol 30 — pp 607-617- 2000.

110. Signes-Frehel.M., Maes P., et Haehnel C. : « Etude des phases d'un clinker par diffractométrie des rayons X: vers la quantification ». Journal de Physique IV Colloque, 06 (C4), pp.C4-135-C4-142, 1996.

111. Smolczyk, M.T., « Structure et caractérisation des laitiers », 7ème congrès international de chimie des ciments, Vol.I, Paris, (1980).

112. Soroka I., Concrete in hot environment, Edition Taylor & Francis e-Library, 2004.

113. Statista , Le portail de statistiques, site d'internet ; https://www.statista.com/ (2017).

114. Swamy.R.N and Bouikni.A.,« Some engineering properties of slag concrete as influenced by mix proportioning and curing », ACI, Materials journal ; pp :210-220. May-june, (1990).

T

115. Tafraoui A, « Contribution à la valorisation du sable de dune de l'erg occidental (Algérie). Application aux nouveaux bétons » , Thèse de doctorat, université de Toulouse, France, 2009.

116. Temiz H, Cose MM, and Koksal S;. «Effects of prtland composite and composite cenents on durability of mortar and permeability of concrete», construction and building materials,21, pp.1170-1176, (2007).

117. Tennis Paul D et Jennings Hamlin M. «A Model for Two Types of Calcium Silicate Hydrate in the Microstructure of Portland Cement Pastes» .Cement and Concrete Research, Volume 30, Pages 855-863; (Juin 2000).

118. TSA :Tout sur l'Algérie, site d'internet .« Comment l'Algérie est passée du statut de pays importateur à celui d'exportateur de ciment » https://www.tsa-algerie.com/ (2018).

119. Tsivilis. S, Tsantilas.J., Kakali G., Chaniotakis E. and Sakellariou A. « The permeability of Portland limestone cement concrete» , Cement and Concrete Research – Vol 33 , N°9 , pp. 1465-1471-Sep 2003.

V

120. Vénuat M, « La pratique des ciments, mortiers et bétons » T1 – Edition MONITEUR, 2ème édition, 1989.

121. Vernet. C et Demoulian. E. « Cinétique de l'hydratation des ciments au laitier » 7ème Congrès international de chimie des ciments ,Vol II, pp :III.128-133, Paris, (1980).

122. Voglis, N. , Kakali G., Chaniotakis E., Tsivilis S.. «Portland-limestone cements. Their properties and hydration compared to those of other composite cements» , Cement & Concrete Composites 27 pp.191–196, (2005).

Y

123. Ye. G. , Liu X. , De Schutter G.,. Poppe A.-M et Taerwe L.. « Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes» , Cement & Concrete Composites 29 pp. 94–102, (2007).

124. Yeau K.Y., and Kim E.K. «An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast-furnace slag», Cement and Concrete Research 35 pp. 1391–1399, (2005).