

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



Numéro de série :

Numéro d'inscription :

Thèse

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT SCIENCES

Spécialité : Matériaux

Option : Matériaux

THEME

**Etude de la durabilité des matériaux cimentaires à
base de la poudre de verre**

Présenté par

Elbahi Boubakeur Seddik

Soutenue le :

.../.../.....

Devant le jury composé de :

- | | | |
|-----------------------------|----------------------|------------|
| - Pr Titoum Messaoud | Université de M'sila | Président |
| - Pr Zeghichi Leila | Université de Biskra | Rapporteur |
| - Dr Baali Laid | Université de Msila | Examineur |
| - Dr Bouglada Mohamed salah | Université de Batna | Examineur |
| - Pr Belagraa Larbi | Université de Msila | Invité |

ملخص:

الهدف من هذا العمل هو إجراء تقييم تجريبي لتأثير مسحوق الزجاج بنعومتين مختلفتين بالاشتراك مع خبث الافران والبوزولان الطبيعي ، على الديمومة والسلوك الميكانيكي للملاط.

تم فحص الخواص الميكانيكية من خلال اختبارات مقاومة الانضغاط و الانحناء ، اما جوانب الديمومة ، فتم فحصها من خلال اختبار الامتصاص الشعري والمسامية ، الضياع في الكتلة والكربنة المتسارعة.

تم تحديد الحد الأقصى لمعدل استبدال الإسمنت عند 30٪ ، وتتراوح نسبة مسحوق الزجاج بين 10٪ و 20٪ ، اما نسبة الخبث والبوزولان الطبيعي فقد تم ضبطها عند 10٪.

تم استخدام تقنيات مختلفة لدراسة التركيب البنيوي والكيميائي لمركبات الإسمنت البورتلاندي مع وبدون إضافات. تشمل التقنيات المستخدمة المسح المجهرى الإلكتروني (SEM) ، التحليل الطيفي للأشعة السينية المشتتة للطاقة (EDS) ، و انكسار الأشعة السينية على المساحيق (XRD).

بينت النتائج التي تم الحصول عليها أن الاستبدال الجزئي للإسمنت بمسحوق الزجاج (PV45) بنسبة من (10٪ إلى 20٪) يعتبر مفيدا للملاط الثنائي . كما أن إضافة 10٪ من خبث الافران في حالة الإسمنت الثلاثي مناسب لتكوين ملاط ثلاثي ذو خصائص محسنة مقارنةً بملاط الإسمنت.

الكلمات المفتاحية : الملاط ، مسحوق الزجاج ، خبث الافران ، البوزولان الطبيعي ، الثنائي ، الثلاثي ، الرباعي ، المقاومة الميكانيكية ، الامتصاص الشعري ، الضياع في الكتلة ، الديمومة.

Résumé :

L'objectif de ce travail est d'évaluer expérimentalement l'influence de la poudre de verre avec deux surfaces spécifiques différentes en combinaison avec le laitier et pouzzolane naturelle, sur le comportement mécanique et la durabilité du mortier.

Les propriétés mécaniques ont été examinées par les tests de résistance à la compression, et la flexion, Les aspects de durabilité, ont été examinés par le test de l'absorption capillaire, la porosité ouverte, la perte de masse et la carbonatation accélérée.

Le taux de remplacement maximal de ciment est fixé à 30%, Le pourcentage de la poudre de verre varie entre 10% à 20%, et le pourcentage de laitier et pouzzolane naturelle était fixée à 10%.

Diverses techniques ont été utilisées pour étudier la structure, la composition et la distribution des phases des composés de ciment Portland avec et sans ajouts. Les techniques utilisées comprennent la microscopie électronique à balayage (MEB), la spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie (EDS), et la diffraction des rayons X sur poudre (DRX).

Les résultats obtenus montrent qu'une substitution partielle de (10% à 20%) de poudre de verre (PV45) pour les mortiers à base des ciments binaires est bénéfique ; l'incorporation de 10% de laitier pour les mortiers à base des ciments ternaires semble favorable pour formuler des ciments ternaires ayant des propriétés améliorées par rapport aux mortiers à base de ciment seul.

Mots clés : mortier, poudre de verre, laitier, pouzzolane naturelle, binaire, ternaire, quaternaire, résistance mécanique, absorption capillaire, perte de masse, durabilité.

Abstract:

The objective of this work is to experimentally evaluate the influence of glass powder with two different specific surfaces in combination with slag and natural pozzolan, on the mechanical behavior and the durability of the mortar.

The mechanical properties were examined by the compressive and flexural strength tests, Durability aspects, were examined by the capillary absorption and open porosity tests, weight loss and accelerated carbonation.

The maximum cement replacement rate is set at 30%, the percentage of glass powder varies between 10% and 20%, and the percentage of slag and natural pozzolan was set at 10%.

Different techniques have been used to study the structure, composition and phase distribution of Portland cement compounds with and without additions. Techniques used include scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX), and X-ray powder diffraction (XRD).

The results obtained show that a partial substitution of (10% to 20%) glass powder (PV45) for mortars based on binary cements is beneficial; the incorporation of 10% slag for mortars based on ternary cements seems favorable for formulating ternary cements having improved properties compared to mortars based on cement alone.

Keywords: mortar, glass powder, slag, natural pozzolan, binary, ternary, quaternary, mechanical strength, capillary absorption, weight loss, durability.

Remerciements

Dans la préparation de ce document et des travaux qui y sont présentés, j'ai grandement bénéficié de l'aide de nombreuses personnes. Je tiens à les remercier très chaleureusement.

Je tiens tout d'abord à remercier mon directrice de thèse, **Zeghichi Leila**, professeur de l'Université de Biskra, pour m'avoir guidé tout au long de ce travail de recherche. Ses conseils, ses encouragements et son soutien constant m'ont été d'une aide précieuse.

Je tiens également à remercier tous les membres du jury de m'avoir honoré en acceptant de juger ce travail.

Je tiens également à remercier mes collègues du Département de Génie Civil de l'Université de Djelfa, sans oublier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toute ma famille, en particulier ma mère, ma femme, mes frères et sœurs pour leurs encouragements et leur soutien tout au long de ce travail.

A tous, je dis merci

Table Des Matières

Les résumés

Remerciements

Sommaire I

Liste Des Figures VIII

Liste Des Tableaux XII

Introduction Générale 1

I. Notion Sur La Durabilité Des Matériaux Cimentaires 3

I.1 Notion De Durabilité 3

I.1.1 Introduction 3

I.2 Structure Des Matériaux Cimentaires 3

I.3 Rappel Sur Le Ciment Hydraté 3

I.3.1 Hydratation du ciment 4

I.3.1.1 Introduction 4

I.3.1.2 Hydratation des composants du ciment Portland 4

I.3.1.3 Réactions d'hydratation 5

I.3.1.3.1 Hydratation des silicates (C_2S , C_3S) 5

I.3.1.3.2 Hydratation des aluminates C_3A et C_4AF 6

I.3.2 Formation et microstructure des hydrates 7

I.3.2.1 Formation des CSH 7

I.4 Etats De L'eau Dans La Pâte De Ciment Durcie 10

I.5 La Porosité, Conséquence Structurale De L'hydratation 11

I.6 Le Role Des Sulfates Dans L'hydratation Du Ciment 13

I.7 Les Processus D'hydratation 13

I.8	<u>Interface Pate-Granulat (Ou Auréole De Transition)</u>	15
I.9	<u>Description Du Réseau Poreux</u>	15
I.10	<u>La Structure De La Pâte De Ciment Durcie</u>	16
I.11	<u>Dégradation Des Bétons</u>	17
I.11.1	<u>Principaux Processus De Dégradation Chimique</u>	18
I.11.1.1	<u>La Lixiviation Ou L'hydrolyse (Dissolution) Des Hydrates</u>	18
I.11.1.2	<u>les échanges ioniques entre les hydrates et le milieu agressif</u>	18
I.11.1.3	<u>Formation de produits expansifs</u>	18
I.11.2	<u>Cinétique de dégradation des matériaux</u>	19
I.11.3	<u>Principales attaques chimiques</u>	20
I.11.3.1	<u>Attaque par la carbonatation</u>	20
I.11.3.2	<u>Attaque par les sulfates</u>	21
I.11.3.3	<u>Attaque par les chlorures</u>	22
I.11.3.4	<u>Attaque par les eaux (lixiviation)</u>	22
I.11.4	<u>Réaction alcali-granulats</u>	23
I.12	<u>Les Indicateurs De Durabilité Généraux</u>	23
I.12.1	<u>La porosité accessible à l'eau (AFPC-AFREM, 1998)</u>	24
I.12.2	<u>La perméabilité aux gaz (AFPC-AFREM, 1998)</u>	24
I.12.3	<u>Le coefficient de diffusion des Cl⁻ (NTBuild492)</u>	25
I.12.4	<u>La teneur en Ca(OH)₂ (LCPC M48)</u>	25
I.12.5	<u>L'absorption d'eau par capillarité (AFPC, 1997)</u>	26
I.13	<u>Les Indicateurs De Durabilité Spécifiques</u>	26
II	<u>Les Ajouts Dans Les Matériaux Cimentaires</u>	27
II.1	<u>Introduction</u>	27

II.2 Types D'Additions Minérales	27
II.2.1 Laitier De Haut Fourneau	28
II.2.2 Les Cendres Volantes	28
II.2.3 Additions Calcaires	28
II.2.4 Fumée De Silice	29
II.2.5 Les Pouzzolanes	29
II.2.6 Les Poudres De Verre	29
II.2.7 L'utilisation Simultanée De Verre Et De Pouzzolanes	30
II.3 Action Des Additions Minérales Sur Les Matériaux Cimentaires	30
II.4 Notion De Liant Equivalent	30
II.5 Caractérisation De L'activité D'une Addition Minérale	31
II.5.1 Indice D'activité	31
II.6 les matériaux cimentaires à base de la poudre de verre	31
II.6.1 composition-structure	31
II.6.2 Types de Verre	33
II.6.2.1 Verre sodocalcique	33
II.6.2.2 Verre au plomb	34
II.6.2.3 Verre Borosilicaté (Pyrex)	34
II.6.2.4 Verre Alumino-silicaté	34
II.6.2.5 Verre de Silice	35
II.6.3 Composition De Verre	35
II.6.4 Classification Du Verre Dans Le Diagramme Ternaire	35
II.6.5 Le Verre Dans Les Bétons	36
II.7 Le Comportement A L'état Frais Du Béton	36
II.7.1 Effet De La Poudre De Verre Sur La Densité	36

II.7.2	<u>Effet De La Poudre De Verre Sur La Consistance Normale</u>	37
II.7.3	<u>Effet De La Poudre De Verre Sur Les Délais De Prise</u>	38
II.7.4	<u>Effet De La Poudre De Verre Sur La Chaleur D'hydratation</u>	38
II.7.5	<u>Effet De La Poudre De Verre Sur L'ouvrabilité</u>	39
II.7.6	<u>Influence De La Finesse De La Poudre De Verre</u>	40
II.8	<u>Le Comportement A L'état Durcis Du Béton</u>	40
II.8.1	<u>Effet De La Poudre De Verre Sur La Résistance</u>	40
II.8.2	<u>Effet De La Poudre De Verre Sur La Perméabilité</u>	41
II.8.3	<u>Effet De La Poudre De Verre Sur ASR Expansion</u>	42
II.8.4	<u>effet de la poudre de verre sur l'absorption, la porosité et la densité</u>	43
II.8.5	<u>Effet de la poudre de verre sur la résistance aux attaques sulfatiques</u>	45
II.8.6	<u>Effet de la poudre de verre sur la résistance au gel-dégel</u>	46
II.8.7	<u>Effet de la poudre de verre sur le retrait de séchage</u>	47
II.9	<u>Le Laitier Dans Le Béton</u>	49
II.10	<u>La Pouzzolane Naturelle Dans Le Béton</u>	50
III.	<u>Caractérisation Des Matériaux Et Méthodes D'essais</u>	51
III.1	<u>Introduction</u>	51
III.2	<u>Justification Du Choix Des Matériaux De Base</u>	51
III.2.1	<u>Pourquoi Etudier Les Mortiers ?</u>	51
III.3	<u>Matériaux Utilisés</u>	52
III.3.1	<u>Ciment</u>	52
III.3.2	<u>Eau</u>	52
III.3.3	<u>Sable</u>	52
III.3.3.1	<u>Essai D'équivalent De Sable</u>	53

III.3.3.2	Analyse Granulométrique	53
III.3.3.3	Module De Finesse	54
III.3.4	Les Ajouts Cimentaires	54
III.3.4.1	Poudre De Verre	54
III.3.4.2	Laitier De Haut Fournaux	55
III.3.4.3	Pouzzolane Naturelle	55
III.4	Méthodes D'essais	56
III.4.1	Essais Sur La Pâte De Ciment	56
III.4.1.1	Formulation Des Pâtes	56
III.4.1.2	La Consistance Normale Et Temps De Prise	57
a)-	La Consistance	57
b)-	Les temps de prise	57
III.4.1.3.	Etude de la microstructure	57
III.4.1.3.1.	La Microscopie Electronique à Balayage (MEB)	57
III.4.1.3.2.	Préparations des échantillons (MEB)	58
III.4.1.4.	La résistance à la compression	58
III.4.2	Essais Sur Mortier	59
III.4.2.1	Formulation Et Confection Des Mortiers	59
III.4.2.2	Malaxage Et Confection Des Eprouvettes	59
III.4.2.3	Essais Sur Mortier à L'état Frais	60
A-	Masse Volumique Du Mortier à L'état Frais	60
III.4.2.4	Essais Sur Mortier à L'état Durci	60
III.4.2.4.1	Essais De Résistance à la compression	60
III.4.2.4.2	Essais De Résistance à La Flexion	61
III.4.2.4.3	Absorption Capillaire Et Sorptivité	61

III.4.2.4.4	<u>La Porosité Accessible à L'eau</u>	62
III.4.2.4.5	<u>Essai De Carbonatation Accélérée</u>	62
III.4.2.4.5.1	<u>L'indicateur Coloré (phénolphtaléine) de Ph</u>	64
III.4.2.4.6	<u>Attaque Des Mortiers Par Les Acides</u>	64
A)-	<u>Procédure De L'essai</u>	64
IV.	<u>Discussions Des Résultats</u>	66
IV.1	<u>Introduction</u>	66
IV.2	<u>Essais Sur La Pâte De Ciment</u>	66
IV.2.1	<u>La Consistance Normale Et Temps De Prise</u>	66
A-	<u>Les Ciments Binaires</u>	66
B-	<u>Les Ciments Ternaires</u>	68
C-	<u>Les ciments quaternaires</u>	69
IV.2.2	<u>La Résistance à la compression</u>	70
A-	<u>Les Ciments Binaires</u>	70
B-	<u>Les Ciments Ternaires</u>	71
IV.2.3	<u>La microstructure de la pâte de ciment</u>	71
IV.3	<u>Essais Sur Mortiers</u>	81
IV.3.1	<u>La Masse Volumique à L'état Frais</u>	81
A-	<u>Les Mortiers Binaires</u>	81
B-	<u>Les Mortiers Ternaires Et Quaternaires</u>	82
IV.3.2	<u>Absorption Capillaire Et Sorptivité</u>	83
IV.3.3	<u>La Sorptivité</u>	85
IV.3.4	<u>La Porosité Accessible à L'eau</u>	86
IV.3.5	<u>La Résistance à La Compression: (Norme NF P15-471)</u>	88
IV.3.6	<u>La Résistance à La Flexion (Norme NF P15-471)</u>	89

IV.3.7 <u>Indice D'activité Pouzzolanique</u>	91
IV.3.8 <u>Relation Entre Porosité, Sorptivité, Absorption Capillaire Et Résistance à La Compression</u>	92
IV.3.8.1 <u>Corrélation Entre La Sorptivité Et La Résistance à La Compression</u>	92
IV.3.8.2 <u>Corrélation Entre La Porosité Ouverte Et Résistance à La Compression</u>	93
IV.3.8.3 <u>Corrélation entre la porosité ouverte et l'absorption Capillaire</u>	94
IV.3.8.4 <u>Corrélation entre la sorptivité et la porosité accessible à l'eau</u>	95
IV.4 <u>Solution Agressive</u>	96
IV.4.1 <u>Introduction</u>	96
IV.4.2 <u>Observations Visuelles</u>	96
IV.4.3 <u>La Perte De Masse</u>	97
IV.5 <u>Essai De Carbonatation Accélérée</u>	99
V. <u>Conclusion</u>	103
<u>Conclusion Générale</u>	105
<u>Références Bibliographiques</u>	107

Liste Des Figures

Chapitre I : Notion Sue La Durabilité Des Matériaux Cimentaires

Figure I.1: Hydroxylation superficielle de C3S (Damidot, and Nonat, 1992)	6
Figure I.2: Mécanisme d'hydratation de C3S (Dent-Glasser, 1978).	6
Figure I.3: Processus de développement des hydrates autour d'un grain de ciment anhydre (Alliche, 2003)	8
Figure I.4: CSH fibreux avec Cristal de Portlandite (X) entre des CSH (#), La porositéest repérée par (O), (a) (Regourd, 1975) et les CSH forment un réseau réticulé (b) (Regourd, 1982).	9
Figure I.5: Formation et croissance des hydrates au cours de l'hydratation d'une pâte de ciment, d'après F.W. Locher (Locher, 1976)	10
Figure I.6: Microstructure et configuration de l'eau dans le CSH, (Sur l'image de gauche d'après (Feldman et Sereda, 1968) et Sur l'image de droite d'après (Sierra, 1980).	11
Figure I.7: Distribution de la taille des pores dans la pâte de ciment. (Verbeck et Helmuth, 1968)	11
Figure I.8: Classification de taille des pores proposée par Mehta, (1986).	12
Figure I.9: Courbe de dégagement de chaleur au cours du temps d'hydratation (BENSTED, 1991)	14
Figure I.10: Influence du rapport E/C sur l'évolution porosimétrique de pâtes de ciment Portland âgées de 28jours (Mehta et Manmohan, 1980).	16
Figure I.11: Composition volumique d'une pâte de ciment hydratée sans apport d'eau externe pour un temps de durcissement très long, selon le modèle de Powers d'après (Hansen, 1986).	17
Figure I.12: Mécanisme de carbonatation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Ollivier et Vichot, 2008).	21
Figure I.13: Concept de la perméabilité d'un milieu poreux	25

Chapitre II : Les Ajouts Dans Les Matériaux Cimentaires

Figure II.1: (a) Hydratation d'un ciment sans ajout cimentaire	27
--	----

Figure II.2: Evolution du volume d'un échantillon de silice lors d'un changement d'état	32
Figure II.3: Représentation schématique bidimensionnelle de silice (a) structure cristalline, réseau ordonné (cristobalite) (b) structure vitreuse, réseau amorphe.	32
Figure II.4: Diagramme ternaire de verre et des autres ajouts cimentaires [60] (Mekti 2018)	36
Figure II.5: Densité fraîche des bétons en fonction de la poudre de verre.	37
Figure II.6: Consistance normale des mélanges de différents pourcentages de GP	37
Figure II.7: Temps de prise en fonction de variation des pourcentages WGP	38
Figure II.8: Taux d'évolution de la chaleur d'hydratation du ciment avec GP.	39
Figure II.9: Variation de l'affaissement du béton avec remplacement du ciment par la poudre de verre	39
Figure II.10: Influence du diamètre des particules de verre sur l'expansion et le développement de la résistance en compression (Idir et al. 2010) [68].	40
Figure II.11: Variation de la résistance en fonction de l'âge	41
Figure II.12: Résultats de pénétration rapide des chlorures (RCPT) à 28 et 56 j.	42
Figure II.13: Taux d'expansion à 14 jours des mortiers	43
Figure II.14: absorption, porosité et densité des mortiers à 28j	45
Figure II.15: pourcentage de réduction de la résistance à la compression exposée à 10 % de MgSO ₄	46
Figure II.16: Facteur de durabilité du béton WG face à l'action gel-dégel	47
Figure II.17: Propriétés de retrait des bétons de ciment et géopolymères avec WG	48

Chapitre III : Caractérisation Des Matériaux Et Méthodes D'essais

Figure III.1: Courbe granulométrique du sable utilisé	53
Figure III.2: diffraction au rayon X de la poudre de verre	54
Figure III.3: diffraction au rayon X du laitier	55
Figure III.4: diffraction au rayon X du pouzzolane naturelle	56
Figure III.6: Appareil de compression	60

Figure III.7: Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.	61
Figure III.8: Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire.	62
Figure III.9: photographie de l'enceinte de carbonatation accélérée montée au laboratoire de l'université de laghouat.	63
Figure III.10: éprouvettes prismatiques immergées dans une solution de 5% HCl	64

Chapitre IV : Discussions Des Résultats

Figure V.1: la consistance et les temps de prise des ciment binaires contenant de la poudre de verre	67
Figure IV.2: la consistance et délais de prise des ciments ternaires	68
Figure IV.3: la consistance et délais de prise des ciments quaternaires	69
Figure IV.4: La résistance à la compression des ciments binaires	70
Figure IV.5: La résistance à la compression des ciments Ternaires	71
Figure IV.6: Observation au MEB/EDS de la pâte préparée avec ciment control	72
Figure IV.7: Observation au MEB de la pâte préparée avec ciment control	73
Figure IV.8: Observation au MEB/EDS de la pâte préparée avec (20% PV30)	74
Figure IV.9: Observation au MEB de la pâte préparée avec (20% PV30)	75
Figure IV.10: Observation au MEB/EDS de la pâte préparée avec (20% PV45)	76
Figure IV.11: Observation au MEB de la pâte préparée avec (20% PV45)	77
Figure IV.12: Observation au MEB/EDS de la pâte avec (20% PV45+10% L)	78
Figure IV.13: Observation au MEB de la pâte avec (20% PV45+10% L)	79
Figure IV.14: Observation au MEB/EDS de la pâte avec (20% PV45+10% PZ)	80
Figure IV.15: Observation au MEB de la pâte avec (20% PV45+10% PZ)	81
Figure IV.16: Densité des mortiers binaire à l'état frais à base de la poudre de verre	82
Figure IV.17: Densité des mortiers ternaires et quaternaires à l'état frais	83
Figure IV.18: variation de l'absorption capillaire des mortiers binaires et ternaires en fonction de la racine carrée de temps ($\sqrt{t}$)	84

<u>Figure IV.19: variation de la sorptivité des mortiers en fonction du pourcentage des additions</u>	<u>85</u>
<u>Figure IV.20: la porosité accessible à l'eau des mortiers à 28 j et 90 j</u>	<u>87</u>
<u>Figure IV.21: Evolution de la résistance à la compression des mortiers binaires et ternaires en fonction de pourcentage des additions</u>	<u>88</u>
<u>Figure IV.22: Evolution de la résistance à la flexion des mortiers binaires et ternaires en fonction de pourcentage des additions</u>	<u>90</u>
<u>Figure IV.23: Indice d'activité pouzzolanique à 7 j et 28 j</u>	<u>91</u>
<u>Figure IV.24: Corrélation entre la sorptivité et la résistance à la compression</u>	<u>93</u>
<u>Figure IV.25: Corrélation entre la porosité et la résistance à la compression</u>	<u>94</u>
<u>Figure IV.26: Corrélation entre la porosité et l'absorption capillaire</u>	<u>95</u>
<u>Figure IV.27: Corrélation entre la porosité ouverte et la sorptivité</u>	<u>96</u>
<u>Figure IV.28: éprouvettes après 7j et 28 j d'immersion</u>	<u>97</u>
<u>Figure IV.29: évolution de la perte de masse des mortiers binaires immergées dans une solution de 5% HCl en fonction du temps d'immersion</u>	<u>98</u>
<u>Figure IV.30: évolution de la perte de masse des mortiers ternaires et quaternaires immergées dans une solution de 5% HCl en fonction du temps d'immersion</u>	<u>98</u>
<u>Figure IV.31: Eprouvettes de mortiers après 28 jours de carbonatation</u>	<u>100</u>
<u>Figure IV.32: Profondeur de carbonatation des mortiers binaires en fonction du temps</u>	<u>100</u>
<u>Figure IV.33: Profondeur de carbonatation des mortiers ternaires et quaternaires en fonction du temps</u>	<u>101</u>

Liste Des Tableaux

Chapitre II : Les Ajouts Dans Les Matériaux Cimentaires

<u>Tableau II.1: Composition typique des verres creux (Idir et al. 2010; Maraghechi et al. 2012).</u>	33
<u>Tableau II.2: Composition du verre sodocalcique</u>	33
<u>Tableau II.3: Composition du verre au plomb</u>	34
<u>Tableau II.4: Composition chimique du verre borosilicaté.</u>	34
<u>Tableau II.5: Composition chimique du verre d'aluminosilicate.</u>	34

Chapitre III : Caractérisation Des Matériaux Et Méthodes D'essais

<u>Tableau III.1: Composition chimique du ciment (%)</u>	52
<u>Tableau III.2: Composition minéralogique du ciment (%)</u>	52
<u>Tableau III.3: propriétés physiques du ciment</u>	52
<u>Tableau III.4: Composition chimique du sable (%)</u>	53
<u>Tableau III.5: Composition chimique de la poudre de verre (%)</u>	54
<u>Tableau III.6: Composition chimique du laitier (%)</u>	55
<u>Tableau III.7: Composition chimique du Pouzzolane naturelle (%)</u>	55
<u>Tableau III.8: Mélange des ciments binaires.</u>	56
<u>Tableau III.9: Mélange des ciments ternaires.</u>	56
<u>Tableau III.10: Mélange des ciments quaternaires</u>	57
<u>Tableau III.11: Mélange des ciments binaires.</u>	59
<u>Tableau III.12: Mélange des ciments ternaires.</u>	59
<u>Tableau III.13: Mélange des ciments quaternaires</u>	59

Introduction générale :

Le matériaux le plus couramment utilisé dans le monde est bien le béton. Cependant, c'est aussi l'un des matériaux dont l'impact environnemental est le plus élevé, d'autant plus que le ciment est utilisé dans sa production. Si le ciment ne représente que 15% de sa composition, le ciment est responsable de 96% des émissions de CO₂ du béton, et 1 ton de ciment équivaut à 1 ton de CO₂.

la recherche de liants à moindre coût, dans l'industrie cimentière, utilisant des additifs minéraux issus de sous-produits industriels ou de sources naturelles est devenue une préoccupation majeure, d'une part, pour combler les déficits de production du ciment Portland, d'autre part. Réduire l'impact environnemental associé à l'utilisation intensive du ciment. Malgré, les avantages avérés de l'utilisation des ciments avec ajouts (composés), ceux-ci présentent encore des inconvénients.

Par conséquent, il est important de savoir si les ciments composés, ternaires et quaternaires peuvent agir en synergie afin que les composants puissent compenser les faiblesses des autres.

Le contexte de l'étude vise au développement et à la caractérisation des liants composés (binaires, ternaires et quaternaires) afin d'explorer une voie d'optimisation des propriétés de ces derniers en combinant le ciment portland avec des ajouts minéraux locaux (poudre de verre , pouzzolane naturelle , laitier du haut fourneau) afin de bénéficier de la synergie pouvant exister entre ces ajouts de différentes natures.

Dans ce contexte nous proposons notre contribution sur « l'étude de la durabilité des matériaux cimentaires à base de la poudre de verre ».

Trois (3) ajouts minéraux locaux sont choisis : la poudre de verre, le laitier de haut fourneau d'El-Hadjar, et la pouzzolane naturelle de Béni-Saf, finement broyés et incorporés au ciment avec des taux prédéterminés pour examiner leurs effets sur les mortiers.

La thèse se compose de deux grandes parties. La première est la recherche bibliographique, c'est l'objet d'une étude repartie selon deux chapitres (I et II), permettant une connaissance détaillée des différents éléments de cette étude. Les

chapitres (III et IV) résument le but de cette étude en présentant la méthodologie expérimentale, les résultats et les conclusions tirées.

Le premier chapitre porte sur la microstructure et l'hydratation des matériaux cimentaires ainsi que sur les indicateurs de durabilité et les processus de dégradation des bétons.

Le deuxième chapitre décrit l'état de l'art des divers ajouts cimentaires, notamment la poudre de verre, le laitier de haut fourneau et les pouzzolanes naturelles.

Le troisième chapitre est consacré à l'identification et à la caractérisation des différents matériaux utilisés et à la présentation des différentes techniques et essais expérimentaux utilisés dans ce travail.

Le dernier chapitre s'appuie logiquement sur les trois premiers chapitres. Il est consacré à la présentation des résultats d'essais obtenus. Plusieurs variantes de mortier ont été étudiées. Frais et durci, avec ou sans additifs. Une section suit qui compare nos résultats avec ceux déjà publiés, suivies de commentaires, d'interprétations et de conclusions.

Une conclusion générale achèvera cette thèse.

CHAPITRE I

NOTION SUR LA DURABILITE DES MATERIAUX CIMENTAIRES

I.1. NOTION DE DURABILITE

I.1.1. Introduction

les indicateurs de durabilité correspondent à trois mécanismes de transfert de masse très différents. La perméabilité décrit le flux (tel que l'eau ou le gaz) qui se produit sous un gradient de pression et dépend de la taille de l'espace poreux avec lequel le liquide s'écoule à partir de l'enchevêtrement. La diffusivité désigne le mouvement d'espèces chimiques au niveau moléculaire sous l'action d'un gradient de concentration. Elle ne dépend pas de la taille des pores, mais de leur connectivité (Buil et al, 1992). L'absorption est le résultat de différentes tensions de surface dans les capillaires et dépend de l'ouverture des pores du béton à l'environnement.

Le transport de masse par perméabilité ou diffusivité caractérise l'utilité du béton. Plus le béton résiste aux phénomènes de transport, plus sa durabilité est meilleure. Pour cette raison, la compréhension du mécanisme de transport dans les milieux poreux est d'une grande importance.

I.2. STRUCTURE DES MATERIAUX CIMENTAIRES

Généralement, les granulats ont comportement stable avec le temps. Le comportement du mortier ou du béton dépend de la structure physique et du développement de la pâte de ciment.

I.3. RAPPEL SUR LE CIMENT HYDRATE

Le ciment hydraulique est un produit résultant de broyage du clinker, en ajoutant environ 5 % de sulfate de calcium pour régulariser la prise. Les quatre phases principales de clinker sont obtenues par la cuisson d'un mélange de 80% de calcaire et 20% d'argile à une température de 1450°C. Ces quatre phases principales sont :

-  le silicate tricalcique Ca_3SiO_5 (C_3S) qui représente 50 à 70 % du clinker.
-  le silicate bicalcique Ca_2SiO_4 (C_2S) qui représente 10 à 20 %.
-  l'aluminate tricalcique $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ (C_3A) qui représente 8 à 10 %.
-  l'aluminoferrite tétracalcique $\text{Ca}_4\text{AlFeO}_5$ (C_4AF) qui représente 5 à 15 %.

Lorsque de l'eau est ajoutée au ciment anhydre, des réactions d'hydratation sont initiées entre eux, formant et développant divers composés hydratés autour des agrégats.

La proportion de chaque composant dépend du rapport des matériaux utilisés pour fabriquer le clinker. Les composés obtenus les plus importants sont ::

- Les silicates de calcium hydratés (50 à 70%) : CSH
- La chaux hydraté (la portlandite) (25 à 27%) : $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- Les aluminates de calcium et sulfo-aluminate de calcium (étringite) (7 à 10%).

I.3.1- Hydratation du ciment

I.3.1.1- Introduction

Le ciment se combine avec de l'eau pour former des composées stables qui sont responsable au développement de la résistance mécanique. Par conséquent, la réaction chimique d'hydratation du ciment forme une pâte qui durcit progressivement à l'air ou dans l'eau après durcissement. Le mécanisme de base de l'hydratation du ciment a été mis en évidence par Henri Le Chatelier depuis la fin du XXe siècle. Il a notamment décrit trois facteurs concomitants contribuant au phénomène de prise (L. PLISKIN 1993).

- dissolution des composants du ciment dans l'eau.
- formation de solutions sursaturées pour divers hydrates.
- précipitation et cristallisation de ces composés dans les pores inter-granulaires.

I.3.1.2- Hydratation des composants du ciment Portland

une réaction immédiate se produit lorsque le ciment entre en contact avec de l'eau, avec un dégagement de chaleur. Ce temps court est dit pré-induction environ de 10 à 20 minutes. Ceci est suivi d'une période d'inactivité relative appelée la période dormante. Pendant cette période, le dégagement de chaleur est faible mais jamais nul. Cette période est de 2 à 8 heures.

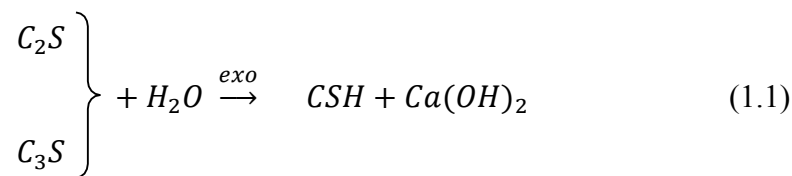
Le temps d'induction est très important pour l'ouvrabilité du béton et du mortier. En effet, le durcissement du ciment commence par un fort dégagement de chaleur. Cela correspond au temps d'initiation du durcissement et à l'accélération liée au durcissement du ciment.

I.3.1.3. Réactions d'hydratation

La composition minéralogique des ciments peuvent être divisés en deux familles : les silicates (C_2S , C_3S) et les aluminates (C_3A , C_4AF). Lors de l'hydratation de chacune de ces familles, des hydrates similaires ou identiques se forment. C'est Pour cette raison, l'hydratation du ciment est regroupée en deux familles, l'hydratation des silicates et l'hydratation des aluminates..

a. Hydratation des silicates (C_2S , C_3S)

L'hydratation des silicates forme des silicates de calcium hydraté ou CSH et de la portlandite [$Ca(OH)_2$]. Les produits d'hydratation étant qualitativement les mêmes (Ahmed Sofiane BENOSMAN 2011), l'équation d'équilibre (1.1) pour les espèces apparentées peut être fixée synthétiquement.



Les CSH forme une phase très désordonnée et est parfois considéré comme amorphe, d'où l'appellation de « gel de CSH » (T.C. Powers, 1958), désigne l'agrégation de feuillets de CSH (G.J. Verbeck et R.H. Helmuth, 1968). La formation du gel CSH ne consomme qu'une partie du calcium en solution, et l'excès de calcium précipite sous forme de Portlandite.

La dissolution du C_2S fournit moins d'ions calcium que le C_3S . Par conséquent, moins de portlandite est produite par son hydratation, ce qui augmente la résistance mécanique de la pâte de ciment (M. Regourd, 1982). La cinétique d'hydratation du C_3S est environ dix fois plus rapide que celle du C_2S (M. Regourd, 1982., Y. Older, 1998).

Le C_3S est le composant principal du ciment Portland artificiel et joue un rôle important dans l'hydratation et la résistance mécanique.

D'après (D. Damidot, and A. Nonat, 1992), Les quatre étapes du mécanisme d'hydratation sont schématisées dans la figure I.1.

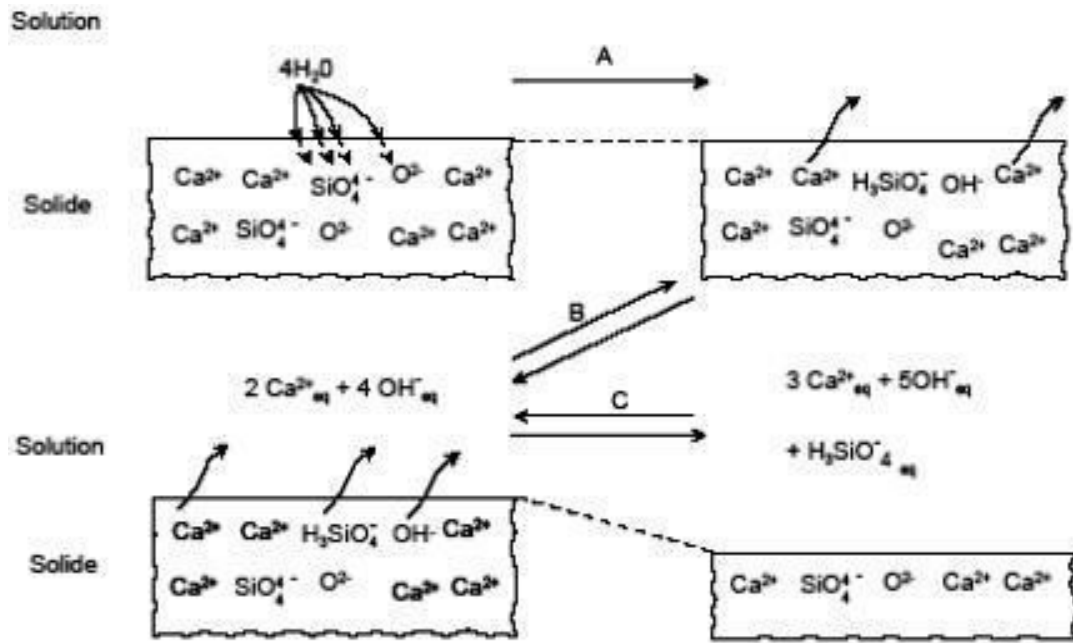


Figure I.1- Hydroxylation superficielle de C_3S (Damidot, and Nonat, 1992)

Dent-Glasser (1978) a observé une croissance en forme d'oursin de CSH de type I ($C/S \approx 1$) au microscope électronique à balayage. Parallèlement, des cristaux de portlandite apparaissent en fin de période d'intrusion (Fig. I.2).

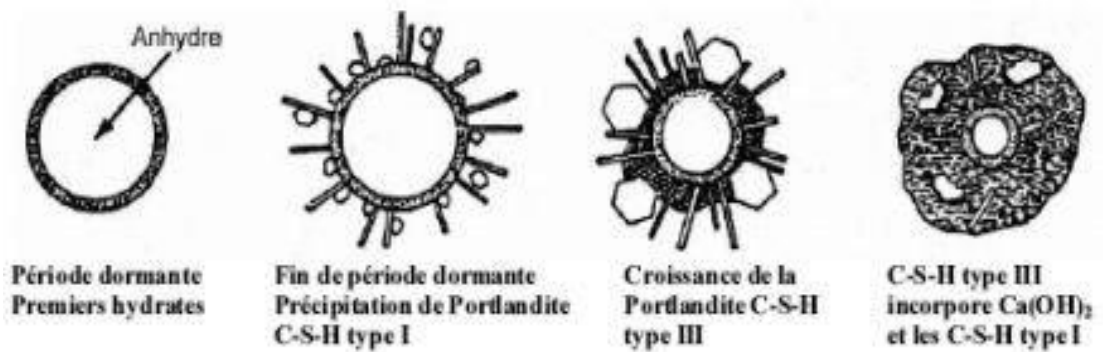


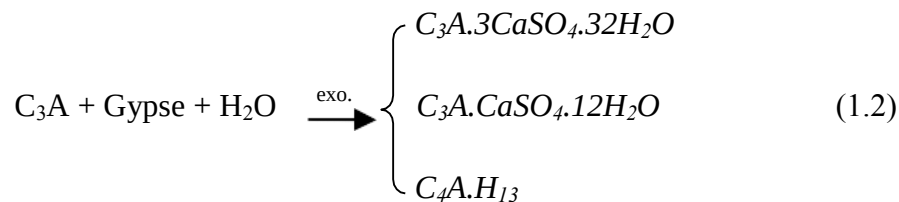
Figure I.2- Mécanisme d'hydratation de C_3S (Dent-Glasser, 1978).

b. Hydratation des aluminates C_3A et C_4AF

Les produits d'hydratation de C_4AF est dérivé de celui de C_3A en remplaçant l'alumine (Al_2O_3) dans la formule par l'aluminoferrite ($Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$). Par conséquent, nous montrons l'hydratation de C_3A uniquement.

C_3A est très réactif avec l'eau. Quelques pourcent de gypse sont ajoutés au ciment pour réguler l'hydratation. Cela forme initialement du trisulfoaluminate de

calcium hydraté ou de l'étringite (A_{ft}) ($C_6A.S_3.H_{32}$ avec $S=SO_3$). Au fur et à mesure que la décomposition du gypse progresse, l'étringite lie le C_3A résiduel pour former du monosulfoaluminate de calcium hydraté (A_{fm}) ($C_4A.S.H_{12}$) (Y vieux, 1998). Il peut également former de l'aluminate de calcium hydraté (C_4AH_{13}) après avoir consommé une partie de l'étringite (M. Regourd, 1982). Ces différentes réactions sont résumées par l'équation d'équilibre 1.2.



Tout d'abord, C_3A est recouvert d'une couche protectrice d'étringite très finement cristallisée. Il est ensuite dissous et recristallisé en aiguilles prismatiques (M. Regourd, 1982). Comme la portlandite, sa présence fragilise les liants cimentaires (Vernet et Cadoret, 1992).

l'aluminate de calcium hydraté (C_4AH_{13}) et le monosulfoaluminate de calcium ($C_4A.S.H_{12}$) et cristallisent sous forme de plaquettes hexagonales. Ce dernier peut se trouver en solution solide au sein du monosulfoaluminate ou sous forme de cristaux séparés (Older, 1998).

La réactivité du C_3A est très forte, avec une dissipation thermique importante dont il faut tenir compte lors de la mise en œuvre. Sa dynamique est plus rapide que celle du C_4AF .

I.3.2. Formation et microstructure des hydrates

a. formation des CSH

Les particules de ciment anhydre se caractérisent morphologiquement par leur petite taille (quelques dizaines de microns en moyenne) et leur état de surface perturbé par le broyage. Ce dernier expose des charges qui restent largement insaturées en cassant les liaisons interatomiques du matériau autour de la particule (Legrand, D.C., 1982).

Lorsque ces granulés se retrouvent dans des milieux aqueux, il se produit une dissolution rapide de certains composants. Il y a une attraction entre la charge à la surface de la particule et les ions de signe opposé sur la molécule d'eau.

L'hydratation des silicates conduit à la formation de cristaux de portlandite Ca(OH)_2 , et de silicate de calcium hydraté ou de CSH l'équation d'équilibre (1.1).

Le CSH ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) est structuré comme une phase désordonnée et c'est pour cela qu'il est considéré comme amorphe (T.C. Powers, 1961). Au microscope, ils apparaissent sous forme de couches minces, de 3 nm d'épaisseur et espacées d'environ 1,7 nm, qui s'enroulent en tubes.

Le processus de formation des hydrates (CSH et Ca(OH)_2) dans la pâte de ciment est très compliqué. A cette échelle, il est difficile d'appréhender les phénomènes physiques. Souvent il faut se contenter plus ou moins de modèles confirmés par l'expérience. A noter qu'en chimie du ciment les particules hydratées sont définies comme des particules anhydres entourées d'hydrates (Fig. I.3). Le processus d'hydratation conduit à la formation de plusieurs couches d'hydrates. Ensuite, nous distinguons les produits scalaires et croisés. En d'autres termes, le volume de ciment anhydre crée initialement la première couche d'hydrates en cassant le ciment anhydre. Au fur et à mesure que la réaction progresse, de nouvelles couches se forment en sédimentant des particules (Benosman, 2011).

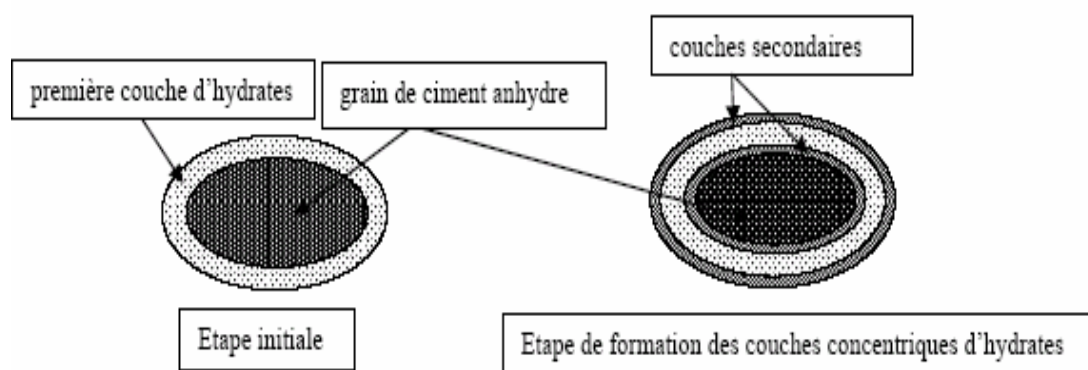


Figure I.3- Processus de développement des hydrates autour d'un grain de ciment anhydre (Alliche, 2003)

Les produits d'hydratation, notamment les gels de CSH (Fig. I-2), comblent progressivement les espaces entre les particules anhydres initialement occupés par les molécules d'eau. Les particules hydratées fusionnent finalement pour former une phase continue avec des discontinuités à différentes échelles. Cette étape d'hydratation se traduit par une augmentation de la cohésion de la pâte et une solidification du matériau. Cela améliore considérablement la résistance mécanique (Mindness et al, 1978., Torrenti, 1992).

Les « cristaux de silicates de calcium hydratés » s'assemblent pour former une structure amorphe que certains nomment de fait : gel CSH. La morphologie de cette structure évolue au cours de l'hydratation. (Diamond, (1976) propose une classification des différents « type de CSH ».

- Type I : CSH fibreux que l'on observe aux jeunes âges ou dans des pâtes fortement diluées sur les grains de C_3S ;
- Type II : CSH en réseaux réticulé ;
- Type III : CSH en grains ou en lattes de quelques centaines de micromètres ;
- Type IV : les produits internes ou « inter-produits », dont la formation débute aux tous premiers stades de l'hydratation du C_3S .

Ils semblerait en définitive que ces différentes « morphologies » correspondent à des conditions particulières de gâchage (CSH fibreux favorisés par un E/C important) ou à divers degrés de maturité de la pâte, le gel se structurant de façon à être de plus en plus dense au cours de l'hydratation. La figure I.4 illustre les deux premiers types de CSH.

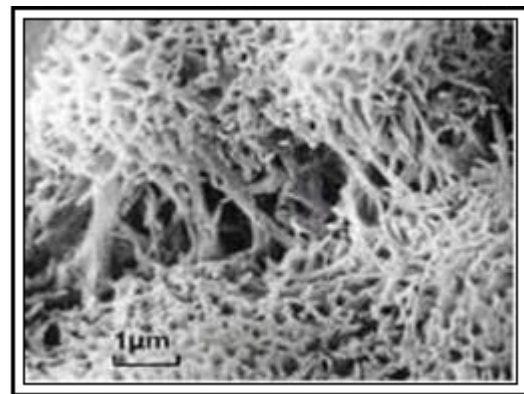
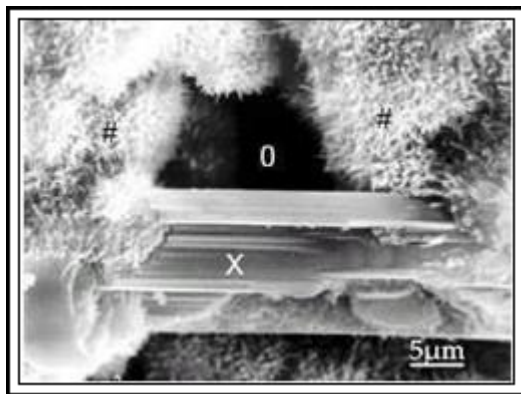


Figure I.4- CSH fibreux avec Cristal de Portlandite (X) entre des CSH (#), La porosité est repérée par (O), (a) (Regourd, 1975) et les CSH forment un réseau réticulé (b) (Regourd, 1982)

Il semblerait en particulier que la résistance en compression est tributaire du développement de ces hydrates et de leur degré de connexion dans l'espace qui leur est imparti. Un point clé de la cinétique d'hydratation du ciment est le passage du comportement liquide au comportement solide de la pâte, ce moment est appelé « prise ». (Figs I.4 et I.5).

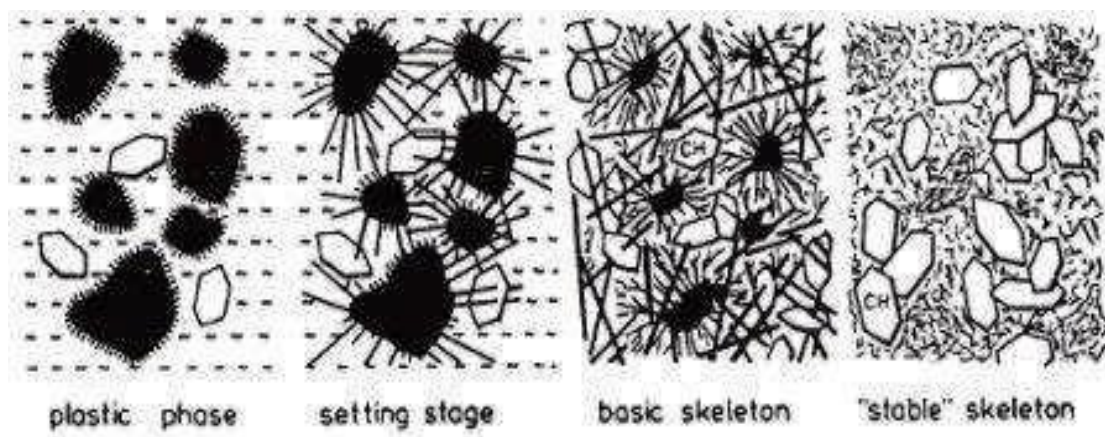


Figure I.5– Formation et croissance des hydrates au cours de l'hydratation d'une pâte de ciment, d'après (Locher, 1976)

I.4. Etats de l'eau dans la pâte de ciment durcie

Plusieurs modèles traitant de la structure de la pâte de ciment durci décrivent l'état de l'eau dans la structure du CSH sous trois formes (Fig. I-6). (Benosman, 2011) :

- ☒ l'eau hydroxylique : ce sont les hydroxyles $-OH$ liés soit à des atomes Si soit à des atomes Ca.
- ☒ l'eau inter feuillets : elle est fixée avec les hydroxyles par des ponts hydrogènes
- ☒ l'eau adsorbée inter lamellaire : c'est l'eau située entre les lamelles.
- ☒ l'eau libre : Cette eau échappe aux forces de surface de la phase solide.

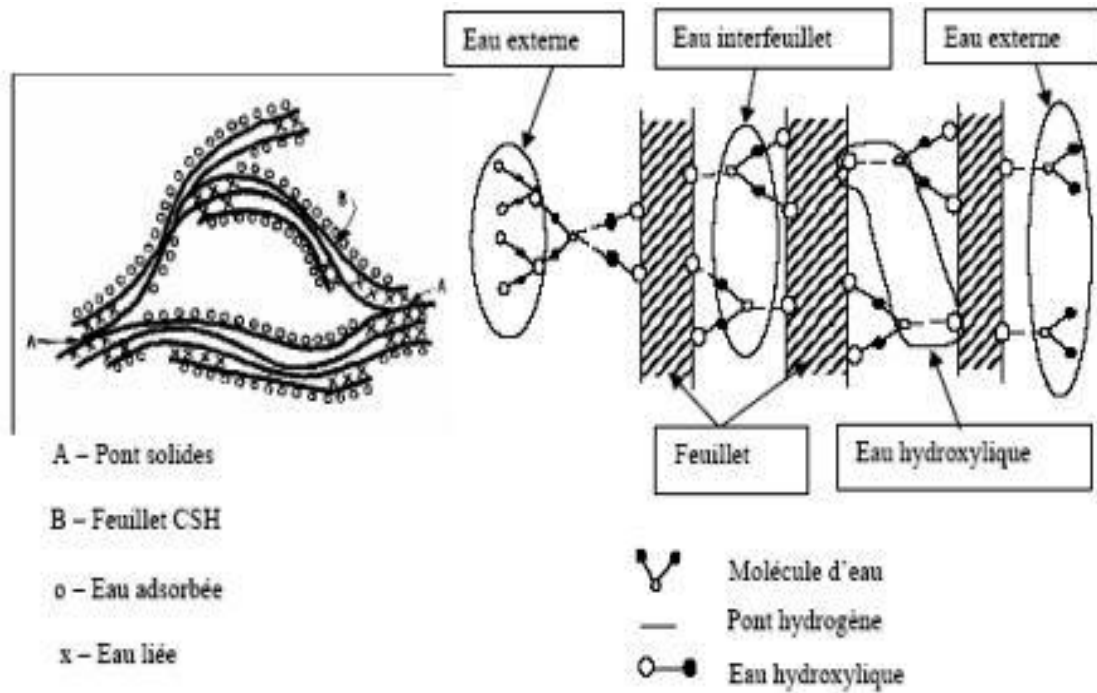


Figure I.6- Microstructure et configuration de l'eau dans le CSH

I.5. La porosité, conséquence structurelle de l'hydratation

La progression structurale des pâtes de ciment au cours de l'hydratation s'accompagne de la formation de porosité à différentes échelles. Son volume dépend principalement du rapport Eau/Ciment.

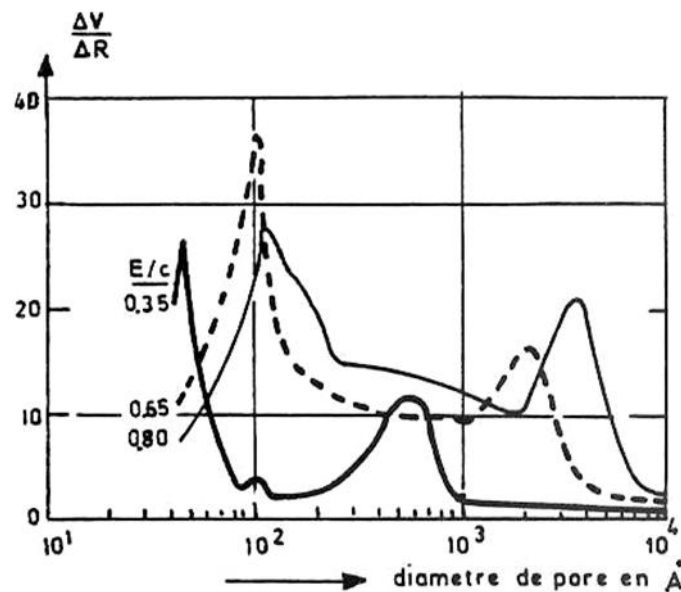


Figure I.7- Distribution de la taille des pores dans la pâte de ciment. (Verbeck et Helmuth, 1968)

La courbe de distribution des pores de la pâte de ciment (figure I.7) (Moudilou, 2000) laisse apparaître l'existence de deux pics correspondant à des dimensions de pores bien distinctes et dont la position peut varier avec le rapport E/C :

a. Les pores des hydrates : ou nano pores sont associés au premier pic. Ce sont les espaces inter feuillets dans le CSH. Leur diamètre est de l'ordre de quelques nanomètres (environ 1.7 nm) (figure I.8). Ces espaces contiennent des molécules d'eau adsorbées.

b. Les pores capillaires : Le deuxième pic de la Figure I.7 est associé à des pores capillaires (de l'ordre de centaines de nanomètres). Ces pores sont les espaces inter granulaires restants qui se remplissent progressivement d'hydrates. Ces pores peuvent être totalement ou partiellement remplis de molécules d'eau appartenant à la catégorie des eaux libres. Cette eau peut être déplacée si l'équilibre hydrique est perturbé ou si une charge mécanique externe est appliquée..

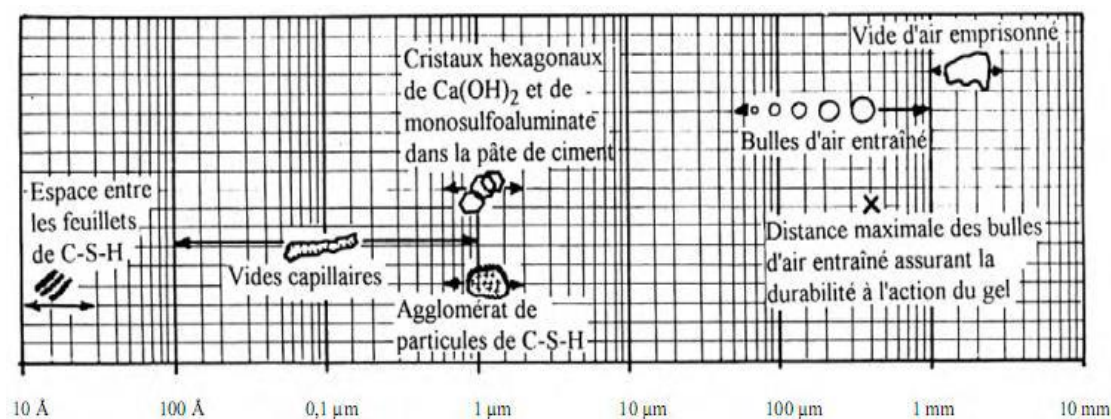


Figure 1.8 : Classification de taille des pores proposée par Mehta, (1986).

selon la taille des pores, plusieurs classifications ont été proposées, à titre d'exemple, d'après Mehta (1986), les pores C-S-H formés par l'espace inter feuillets sont de 1 à 3 nm, suivis des pores capillaires, de 10 à 50 nm pour une faible rapport E/C et de 3 000 à 5 000 nm pour un rapport élevé de E/C. viennent ensuite, les bulles d'air emprisonnées. La taille des bulles varie de $5 \cdot 10^4$ à 10^6 nm (Fig. 1.8).

selon Mindes et al. (2002), les pores de C-S-H sont inférieurs à 10 nm et sont composés de distances inter-feuillets n'excédant pas 0,5 nm, entre autres. Les pores capillaires sont divisés en deux catégories : les capillaires fins de 2,5 à 10 nm et les capillaires épais de 10 à 50 nm, avec des bulles d'air entraînées de 105 à 106 nm.

D'après Aligizaki (2006), les bulles représentent des cavités sphériques remplies d'air qui ont peu d'importance pour le mouvement hydrique.

I.6. Le rôle des sulfates dans l'hydratation du ciment

Les cimentiers incorporent une source de sulfate à travers le gypse pour régulariser la prise de ciment. Lorsqu'il est correctement dosé, ce gypse réagit avec les aluminates pour former des hydrates de sulfoaluminate de calcium : le trisulfoaluminate de calcium, également appelé étringite, et le monosulfoaluminate de calcium. La précipitation de l'étringite plus tard dans le processus d'hydratation sacrifie l'hydrate de C_4AH_n de sorte que les silicates se hydratent librement. L'équation d'équilibre pour l'hydratation de l'aluminate tricalcique en présence de gypse est:



L'étringite formée, après quelques jours, se dissout pour donner des monosulfoaluminates de calcium.

I.7. Les processus d'hydratation

L'hydratation du ciment Portland implique plusieurs réactions chimiques entre ces composants et l'eau. Le développement microstructural se produit en plusieurs étapes :

La première étape, est la dissolution du silicate, augmentant la teneur en ions silicate dans la solution. La réaction s'accompagne d'un dégagement rapide de chaleur.

L'évolution de la courbe de dégagement de chaleur en fonction du temps est caractéristique de l'hydratation du ciment Portland représentée sur la figure 1-9.

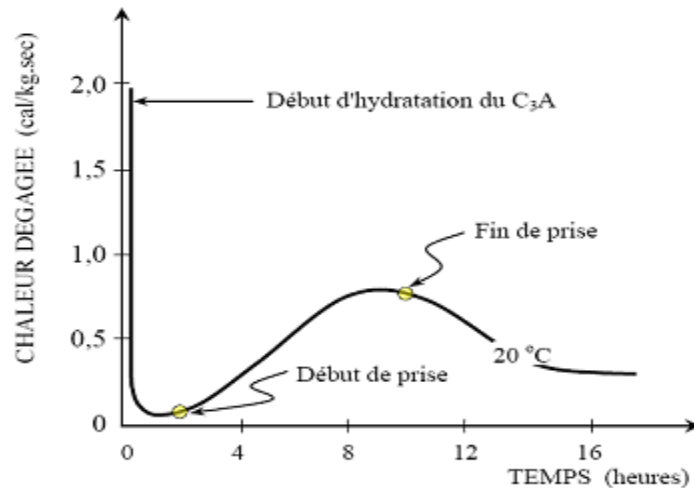


Figure I.9 : Courbe de dégagement de chaleur au cours du temps d'hydratation (BENSTED, 1991)

Selon, Olfa, (2011), l'activité chimique après quelques minutes de gâchage, chute significativement pendant 1 à 2 heures. Cette période d'activité est très lente s'appelle la période d'intrusion. La consommation d'eau et la quantité d'hydrates formés sont très faibles. (Baron, 1992).

La deuxième étape est la phase d'accélération qui commence après quelques heures de gâchage, entre 4 à 12 heures après le début du gâchage. Au cours de cette période, les granulés de silicate sont entourés d'une couche de gel qui facilite la formation d'une membrane semi-perméable. Le contact des deux côtés de cette membrane facilite la précipitation de C-S-H sur les aiguilles d'étringite trouvées dans la solution poreuse. Le C-S-H se présente sous la forme de tubes creux qui agissent comme des ponts d'hydrates de ciment (Guillon, 2004).

La troisième étape de processus d'hydratation correspond à l'étape de durcissement, la présence de ciment anhydre et d'eau dans les pores capillaires formera des CSH, remplissant progressivement les espaces entre les particules de ciment. A noter que dans le même temps, des aiguilles d'étringite (1–2 μm , allant jusqu'à 10 μm) se forment autour de la coque hydratée et celle-ci durcit. Ceci conduit à une amélioration des propriétés mécaniques (Baron et Ollivier, 1992). Un état stable est atteint après des mois ou des années. Une pâte très dense et durcie montre une augmentation significative de la résistance.

I.8. Interface Pâte-Granulat (Ou Auréole De Transition)

Pour une composition typique, l'ajout de granulats à une pâte de ciment crée une nouvelle zone à l'interface pâte/granulats. D'après Ismail Yurtdas, (2003), Cela est dû aux changements des conditions locales d'hydratation causés par l'excès d'eau dans cette zone. D'autre part, Le matériau n'est plus bi-phasique (Baroghel-Bouny 1994). Par conséquent, la structure de la pâte de ciment change sur une distance de plusieurs dizaines de micromètres. Celle-ci augmente avec la taille des granulats et le rapport E/C, mais reste toujours inférieure à 50 μm . Cette zone a une porosité plus élevée que la pâte (un point de départ qui a conduit à des bétons performants, haute performants et ultra haute performants. En réduisant le rapport de E/C et en introduisant de la fumée de silice et des fluidifiants, précisément réduire la porosité de cette zone), (Loukili 1996). Cette zone de faible résistance est le point faible du béton conventionnel lorsqu'il soumis à une action mécanique, chimique ou physique.

I.9. Description du réseau poreux

Lors de l'hydratation du ciment, le volume d'hydrate augmente aux dépens de la phase anhydre. L'hydratation s'accompagne d'une contraction importante du volume absolu, entraînant la formation de vides gazeux. Cette contraction chimique est connue sous le nom Contraction Le Chatelier.

La figure I-10 ci-dessous montre l'effet de rapport E/C sur la structure porosimétrique. Après 28 jours de cure, seuls, les pâtes avec des rapports E/C supérieurs à 0,5, qui ont des gros capillaires de dimensions supérieures à 100 nm (Baron et Ollivier, 1992).

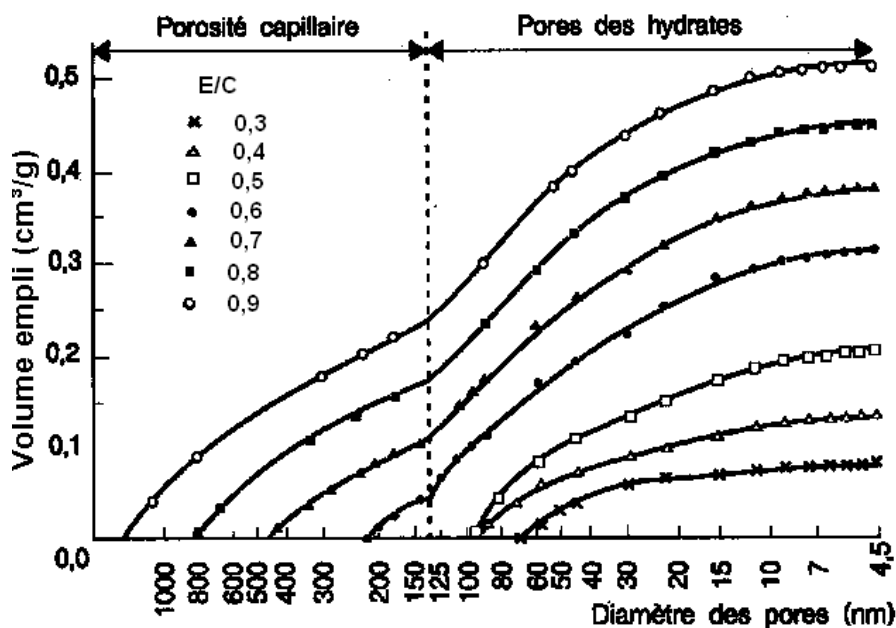


Figure I-10 : Influence du rapport E/C sur l'évolution porosimétrique de pâtes de ciment Portland âgées de 28 jours (Mehta et Manmohan, 1980).

La figure I-10 montre qu'il existe deux classes de porosité dans les pâtes de ciment hydraté.

I.10. La structure de la pâte de ciment durcie

Les pâtes de ciment hydratées créent des structures poreuses et hétérogènes composées des hydrates tel que CSH, étringite, portlandite, etc..., de particules de ciment anhydres, et d'espaces capillaires pouvant être remplis d'eau et des bulles d'air. La porosité de tous les hydrates représente à peu près 28 % du volume total d'hydrates [Delagrave, 1996].

Le gel CSH occupe le plus grand volume de la pâte de ciment (environ 70%). Les particules C-S-H se présentent sous la forme de tubes creux avec 2 ou 3 feuilles enroulées autour d'eux. Les particules C-S-H sont maintenues ensemble par des forces de surface (Van der Waals) (Baron, 1992).

Powers, (1959) a démontré que pour un ciment ordinaire, il existe un rapport Eau/Ciment critique, au-delà duquel le réseau capillaire reste toujours connecté même après que le ciment est complètement hydraté. Ce rapport E/C est voisin de 0,70, ce dernier dépend des propriétés du ciment parce que la quantité d'hydrates formés dépend des propriétés chimiques du ciment anhydre.

La figure I-11 ci-dessous montre la composition volumique de la pâte de ciment hydraté. Selon HANSEN, (1986). lorsque le rapport Eau/Ciment dépasse 0,42, le volume capillaire est augmenté et l'hydratation sera complète.

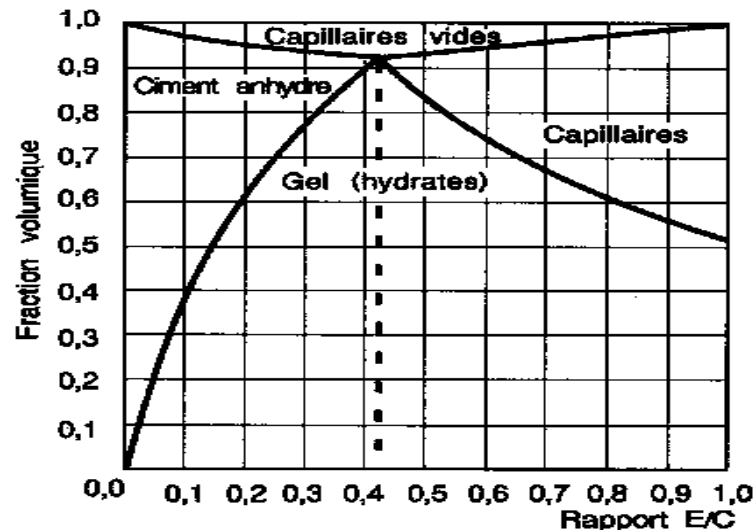


Figure I- 11 : Composition volumique d'une pâte de ciment hydratée sans apport d'eau externe pour un temps de durcissement très long, selon le modèle de Powers d'après (Hansen, 1986).

L'analyse porosimétrique de pâtes de ciment avec des rapports Eau/Ciment supérieurs à 0,42 a mis en évidence deux familles de pores : les pores capillaires compris entre 0,1 μm et 3 μm de diamètre, Certains atteignent environ de 50 μm de diamètre, et les pores d'hydrates ne dépassent pas quelques nanomètres de diamètre.

Si le béton est exposé à des sources d'eau non agressive pendant de longues périodes de temps et qu'une étanchéité élevée est requise, le rapport Eau/Ciment doit être réduit en dessous du troisième valeur critique de $E/C = 0,36$ (Baron, 1992).

I.11. Dégradation des bétons

La faible durabilité des matériaux cimentaires se traduit par une détérioration due à l'action simultanée de phénomènes internes au matériau (réactions physicochimiques) et externes (conditions d'exposition) (Kahina Haddad, 2018). Ces phénomènes peuvent être classés en plusieurs catégories :

- Les effets physiques : les incendies, la température, les cycles de gel dégel.

- Actions mécaniques : sollicitations dues à la fatigue, chargement dynamiques, et à l'usure.
- Les effets chimiques : dues aux environnements agressifs qui peuvent être solides (sols gypseux), liquides (eau de mer), gazeux (gaz carbonique).
- Effets biologiques : sous forme de bactéries (conduites d'égouts).

I.11.1. Principaux processus de dégradation chimique

Le milieu interne du ciment est fortement alcalin, avec un pH proche de 13. En conséquence, tous les environnements sont agressifs envers lui. Sa structure poreuse le rend plus vulnérable à la présence de liquides et de gaz qui passent. Le processus de percolation qui le détermine est la perméabilité et la diffusion (Kahina Haddad, 2018).

a. La lixiviation des hydrates

Certains produits à base de calcium ont tendance à se dissoudre au contact de l'eau avec les pâtes de ciment, Le processus de dissolution augmente la porosité et réduit les performances mécaniques de la pâte de ciment. Selon Baron, (1992), la chaux formée par hydratation étant la plus sensible à ce processus.

b. Les échanges ioniques entre les hydrates et le milieu agressif :

L'eau agressive est un environnement principalement acide par rapport aux solutions interstitielles. Cela accélère la réaction avec la pâte de ciment, formant un nouveau produit qui peut se dissoudre et diffuser vers l'extérieur..

c. Formation de produits expansifs

Selon Kahina Haddad (2018), deux paramètres qui influencent la formation de produits expansifs sont le type de matériau utilisé ou le type d'exposition produite, à titre d'exemple :

- L'attaque des sulfates de sodium produisent un gel gonflant.
- Réactions alcali-silice ; la silice provient des granulés réagissent avec les alcalins de la solution interstitielle pour former du gel silico-alcalin fortement expansif .
- Corrosion des armatures produit des dioxydes de fer très expansifs au tour des barres qui provoque l'écaillage du béton.

Ces produits expansifs créent des pressions internes très élevées qui fissurent la matrice cimentaire.

I.11.2. Cinétique de dégradation des matériaux

La durabilité d'un matériau dépend de sa capacité à être pénétré par des liquides et des gaz. Dans les matériaux cimentaires il y a trois modes de transfert:

Transport de liquide par perméation : Ce mode de transport est basé sur la différence de pression entre deux milieux, de la zone haute pression vers la zone basse pression. Ce type est négligeable dans les matériaux cimentaires.

Transport par migration: c'est le transport des ions sous l'effet d'une application d'un champ électrique.

Transfert par diffusion : Ce type de transport le plus couramment observé dans les matériaux cimentaires. La diffusion se déclenche lorsque les matériaux cimentaires entre en contact avec des solutions agressives. La différence de concentration entre l'intérieur et l'extérieur crée le transport de la matière, suivie d'une réaction chimique entre les solutions interstitielles et les hydrates.

Le transport des ions agressifs se produit par diffusion en phase gazeuse ou en solution aqueuse, et la perméation de gaz se produit dans l'air contenu dans la porosité du matériau (perméation du dioxyde de carbone). Les variations de concentration induites par la diffusion dans l'eau interstitielle de la pâte de ciment provoquent une sursaturation/sous-saturation par rapport aux différentes phases solides, perturbant l'équilibre thermodynamique et provoquant des phénomènes de dissolution ou de précipitation.

Les pores peuvent être classés en :

- Pores interconnectés formant la porosité ouverte, qui participent au transport de matière.
- Les pores aveugles : ne participent pas au transport de matière.
- Pores isolés : qui ne sont pas connectés à l'extérieur.

Pour le béton, la porosité totale est considérée égale à la porosité accessible.

I.11.3. Principales attaques chimiques

I.11.3.1. Attaque par la carbonatation

En présence d'humidité, le dioxyde de carbone de l'air entre en contact avec le ciment pour former un nouveau produit (CaCO_3). La carbonisation modifie la composition chimique de la microstructure des hydrates et modifie les propriétés de liaison et mécaniques du matériau. Selon Neville, (2000), L'effet du gaz carbonique sur les matériaux est déjà évident à de très faibles concentrations (environ 0,03 en volume d'air). Plusieurs facteurs peuvent influencer La carbonatation :

- La porosité, en particulier la tortuosité, a un impact significatif sur la diffusion.
- Le degré d'humidité dans les pores. Si les pores sont saturés, la vitesse de diffusion du CO_2 est très faible, et si les pores sont secs, le gaz carbonique reste gazeux et ne peut pas attaquer les hydrates. Les taux d'humidité qui favorisent la carbonatation se situe entre 50 % et 75 % (Neville, 2000).
- Les changements de température (entre 20°, 30° et 50°) accélèrent légèrement la carbonisation, mais au-delà de 60°, 70°, l'eau s'évapore des pores, libérant du dioxyde de carbone qui ne pourra pas trouver d'eau avec laquelle réagir. Le phénomène de carbonisation est réduit.
- Le taux de gaz carbonique dans l'air : plus la concentration de dioxyde de carbone à l'extérieur est élevée, plus le différentiel de concentration est grand, et plus la diffusion est élevée, ce qui rend la carbonisation plus importante.

Selon la figure I.12, la présence d'une quantité suffisante de fluide interstitiel dans les pores du béton peut décomposer le CO_2 présent sous forme gazeuse dans l'atmosphère, abaisser le pH du béton et former des ions CO_3^{2-} . Ce dernier, se combine avec les ions Ca^{2+} issus de la dissolution de la portlandite formant de CaCO_3 (la calcite) et de l'eau (Ollivier et Vichot, 2008).

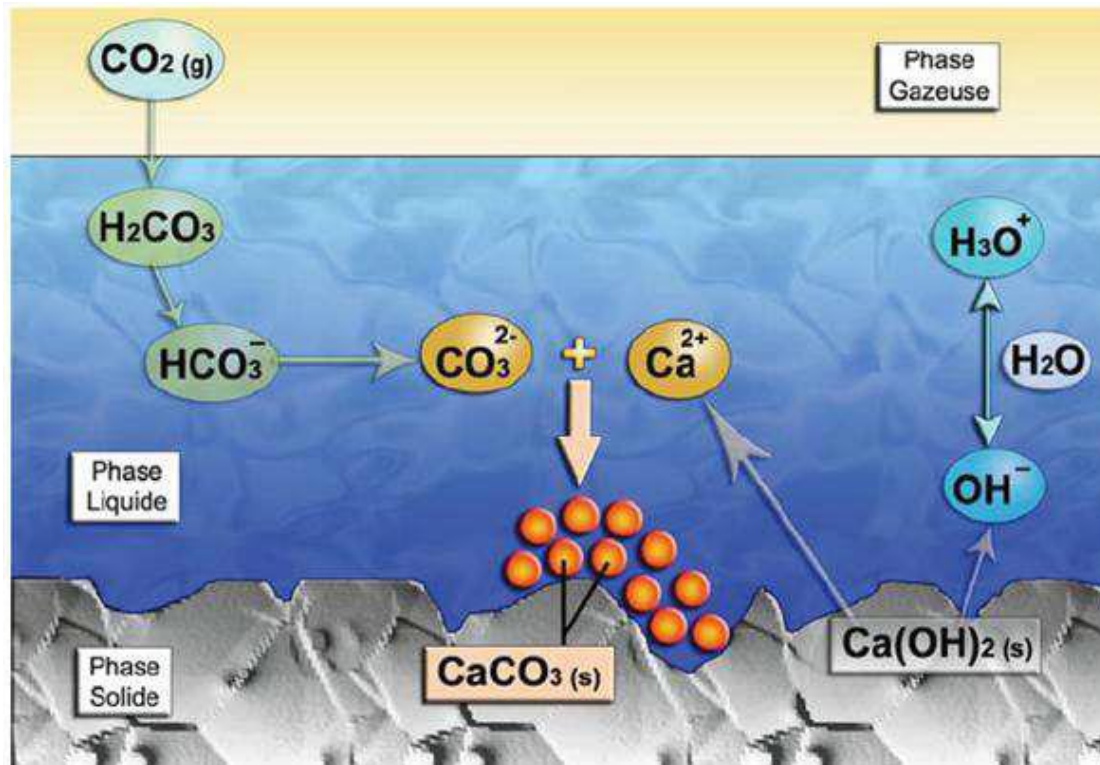


Figure I.12: Mécanisme de carbonatation de Ca(OH)_2 (Ollivier et Vichot, 2008).

I.11.3.2. Attaque par les sulfates

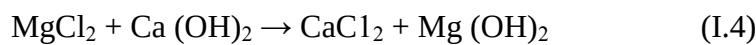
La présence de sulfates de sodium, de calcium, d'ammonium et de magnésium dans les milieux en pâte de ciment représente un risque majeur de dégradation qui ne peut être ignoré. Lors de la dissolution, le sulfate réagit avec l'hydrate de la pâte de ciment durcie, mais aussi avec le produit anhydre (aluminat tricalcique C_3A , qui reste dans la pâte durcie). Ces réactions produisent un nouveau composant en expansion, "l'ettringite". Ces produits génèrent des contraintes internes importantes qui, au-delà de certaines limites, fissurent les pâtes durcies et réduisent leurs propriétés mécaniques (Baron et Ollivier 1992., Neville, 2000). Les sulfates proviennent non seulement de sources naturelles dans le sol ou les déchets industriels, mais également de divers processus de transformation chimique et biologique.

L'agressivité des sulfates est directement liée à la porosité de la pâte de ciment, et la teneur en C_3A du mélange. Parce que C_3A réagit avec les sulfates.

I.11.3.3. Attaque par les chlorures

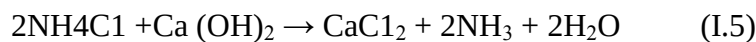
Contrairement à la corrosion de l'acier, les fortes concentrations de chlorure (eau de mer) affectent les hydrates. Une partie des chlorures est fixée par du silicate de calcium hydraté, une autre partie par de l'hydroxyde de calcium, pour former des composés expansifs tels que l'oxychlorure de calcium $\text{CaC}_2\text{H}_3\text{O}_6$, du monochloroaluminate $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaC}_2\text{H}_3\text{O}_6 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ et de la chloroétringite $\text{CaC}_2\text{H}_3\text{O}_6 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$.

Selon l'équation I.4, Le chlorure de magnésium réagit avec la portlandite.



Le $\text{Mg}(\text{OH})_2$ formé, nommé "brucite", précipite dans les pores à la surface du béton et forme une couche superficielle protectrice qui empêche la poursuite de la réaction.

Selon la formule I.5, la réaction de chlorure d'ammonium avec la portlandite donne des chlorures d'ammoniac et de calcium, très solubles dans l'eau.



I.11.3.4. Attaque par les eaux (lixiviation)

L'eau est le facteur commun à toutes les attaques, sa présence accélère ou déclenche le mécanisme d'attaque. L'eau pure peut endommager la pâte de ciment. La lixiviation est affectée par deux catégories de facteurs, du fait que l'eau en contact avec les solutions interstitielles caractérisées par une basicité (pH près de 13), produisant un changement de phase des hydrates. Deux catégories de facteur peuvent influencer la lixiviation :

- Ceux liés aux solutions agressives : leur pH, qui reflète le caractère basique ou acide de la solution.
- ceux liés à la pâte de ciment : le rapport Eau/Ciment, la porosité, le type de ciment.

Les eaux de mer : Selon, Baron, (1992) et Neville, (2000), l'attaque chimique se produit par des réactions simultanées entre les chlorures et les sulfates dans les constituants du ciment et l'eau (Baron et Ollivier 1992, Neville 2000).

Les eaux de pluies : Selon Neville, (2000), le pH d'une pluie propre est généralement compris entre 5 et 7. La pluie provoque une dégradation des surfaces par un processus plus ou moins complexe d'expansion par cristallisation des sels et dissolution par les acides (acide nitrique, acide sulfurique, acide carbonique).

Attaque par les eaux usées : d'après Baron, (1992) et Neville, (2000), l'activité bactérienne provoque la libération de sulfure d'hydrogène par la conversion des produits soufrés. Ce sulfure d'hydrogène se combine avec l'humidité atmosphérique, se condense sur les murs en béton sous forme d'acide sulfurique et réagit avec les hydrates, provoquant la détérioration du béton. En outre, l'eau riche en minéraux provenant de zones industrielles. Ils attaquent le béton avec lequel ils entrent en contact, selon le type de minéraux qu'ils transportent.

I.11.4. Réaction alcali-granulats

Le béton peut être perturbé par des réactions chimiques qui se produisent entre des solutions interstitielles fortement basiques et alcalines et certaines phases minérales présentes dans le granulats. Les réactions alcali-granulat produisent des produits expansifs qui conduisent à la fissuration de béton. Selon la pétrographie des granulats, deux types de réactions peuvent être distingués (Baron et Ollivier 1992) :

- ❖ Réaction alcali-silice : cette réaction se produit entre les granulats réactives siliceuses, et la pâte de ciment
- ❖ Réaction alcali-carbonate : Cela se produit entre le calcaire dolomitique et les alcalins du ciment.

Plusieurs conditions doivent être réunies pour que la réaction alcali-agrégat se développe dans le béton ; humidité supérieure à 85%, concentration très élevée en alcalins, présence de granulats réactifs, E/C et le type de ciment.

I.12. LES INDICATEURS DE DURABILITE GENERAUX

D'après Ilgar, (2016), les indicateurs généraux de durabilité peuvent évaluer la durabilité de n'importe quel type de béton. Cinq indicateurs communs de durabilité ont été identifiés dans le Guide de l'AFGC (AFGC, 2004).

I.12.1. La porosité accessible à l'eau :

La porosité est un facteur clé dans la caractérisation du béton. Il est indispensable de diminuer la porosité parce qu'elle affecte les performances mécaniques et la durabilité de la structure. La porosité totale ϕ , est définie selon la formule suivante :

$$\phi = \frac{\text{Volume des vider } (V_v)}{\text{Volume total } (V_T)} \times 100$$

La porosité diminue avec le temps au fur et à mesure de l'hydratation du ciment. Les paramètres de transmission tels que la perméabilité et diffusivité dépendent fortement de la porosité. Cependant, d'après Ilgar, (2016), deux bétons de même porosité peuvent avoir des degrés de perméabilité ou de diffusivité différents. En effet, pour caractériser les propriétés de transfert du béton. Deux autres paramètres doivent être considérés :

- la distribution des pores
- la tortuosité et la connectivité des réseaux poreux.

I.12.2. La perméabilité aux gaz :

Selon Care et Derkx, (2011), La perméabilité aux gaz est un critère de durabilité général très important qui évalue le taux de pénétration des agents agressifs à travers un matériau donné.

La perméabilité reflète la capacité d'un matériau à laisser passer des fluides liquides ou gazeux sous l'action d'un différentiel de pression. Darcy a défini le coefficient de perméabilité k d'un matériau donné par l'équation (Eq I.6).

$$Q = \frac{K}{\mu} \times A \times \frac{dp}{dx} \quad (I.6)$$

D'où :

Q : débit volumétrique d'un fluide

μ : la viscosité du fluide

dx : l'épaisseur du matériau

A : section apparente du matériau

dp : gradient de pression

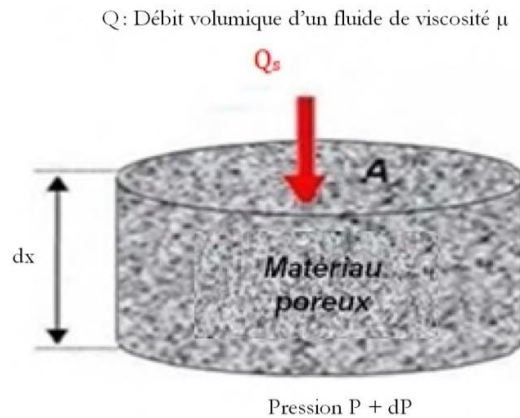


Figure 1.13 : Concept de la perméabilité d'un milieu poreux

I.12.3. Le coefficient de diffusion des Cl^- :

La diffusion fait référence au processus de transport de composants liquides ou gazeux au sein d'un matériau sous l'action d'un mouvement aléatoire au niveau moléculaire sous un gradient de concentration.

Dans les bétons, on peut observer deux formes de transport :

- Phase Liquide : Il s'agit du transport d'espèces en solution (ex : chlorures).
- Phase gazeuse : le transport des gaz dans les fissures et les pores des matériaux. Ceci est particulièrement pour le CO_2 .

le coefficient de diffusion effectif d'une espèce ionique (comme le chlorure) qui diffuse dans la solution interstitielle et sature le matériau poreux est défini par la loi de fick :

$$\vec{J} = -D \overrightarrow{\text{grad}c}$$

D'Où :

J ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) : représente le flux massique de fluide

D ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$) : représente le taux de diffusion,

c (kg.m^{-3}) : représente la concentration.

I.12.4. La teneur en Ca(OH)_2 :

Selon Baroghel-Bouny, (2004-a), plus la teneur en portlandite dans le béton est élevée, plus la dissolution de Ca(OH)_2 est élevée, formant des carbonates de calcium.

En plus, la quantité de Ca(OH)_2 dans les pâtes de ciment est un facteur important pour définir le mécanisme de carbonatation.

I.12.5. L'absorption d'eau par capillarité :

L'absorption capillaire reflète la capacité des matériaux à transporter et à absorber des liquides par le phénomène d'ascension capillaire. Le liquide impliqué est généralement de l'eau.

Selon la loi de Jurin, la capillarité dépend de la connectivité et la taille des pores. Ensuite, selon Martys, (1995), le taux d'absorption S (dû à la remontée capillaire) est défini par l'équation suivante :

$$M(t) = S \cdot t^{1/2}$$

D'Où :

$M(t) [\text{kg/m}^2]$: masse d'eau absorbée par unité de surface

$S [\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{-1/2}]$: la sorptivité

$t [\text{s}]$: temps

I.13. Les indicateurs de durabilité spécifiques

Selon AFGC, (2004), des indicateurs spécifiques de durabilité peuvent devoir être ajoutés au panel d'indicateurs généraux afin de pouvoir évaluer correctement la durabilité des ouvrages.

Les indicateurs de durabilité spécifiques sont définis en fonction de la classe d'exposition structurelle (pénétration des chlorures XS, carbonatation du béton XC, attaque sulfatique XA). le plus souvent, il correspond au test de vieillissement accéléré. Par exemple, les essais de carbonatation accélérée permettent la mesure de profondeur de carbonatation lors de la prévention de la dégradation par la carbonatation [AFGC, 2004].

CHAPITRE II

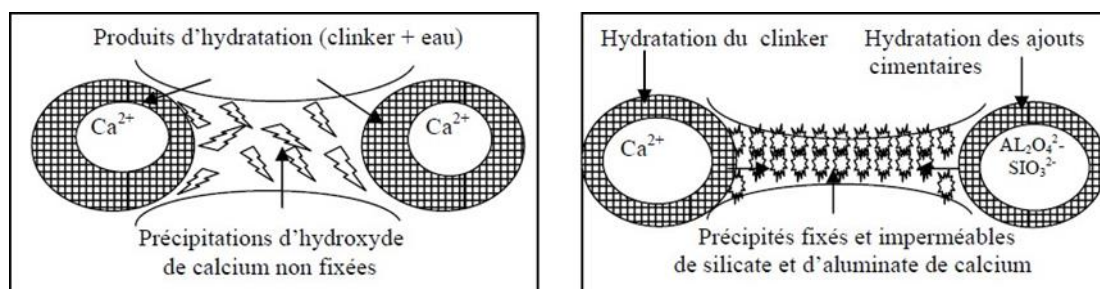
LES AJOUTS DANS LES MATERIAUX CIMENTAIRES

II. LES AJOUTS CIMENTAIRES

II.1. Introduction :

Actuellement, plusieurs additions minérales sont utilisés comme matériaux cimentaire dans le béton, en alternative à une partie du ciment ou en addition. Leur utilisation donne une structure plus dense et plus résistante aux substances agressives., les propriétés cimentaires de ces ajouts sont régies par la composition chimique, La finesse, la structure, la solubilité en milieu alcalin. Le facteur le plus important déduisant la réactivité des additions, c'est bien la teneur en phase amorphe. (Tagnit et P-C, 2002).

L'utilisation des minéraux dans les matériaux cimentaires segmente des larges pores capillaires, précipite les produits d'hydratation, (Fig. II.1), accéléré l'hydratation du ciment et lui permettant de diminuer les cristaux de chaux (Chaid, 2006).



II.2. TYPES D'ADDITIONS MINÉRALES

Les additions minérales sont définis par la norme européenne EN 206-1 comme des matériaux minéraux finement broyés incorporés dans le béton, pour lui confèrent certaines propriétés ou pour les améliorer. Ces ajouts peuvent être incorporés en addition ou en alternative à une partie du ciment de type CEM I formant un liant équivalent conforme les exigences de la norme. (Bouglada, 2019).

Les additions peuvent être artificiels ou naturels, actifs ou inertes. Ces ajouts peuvent réagir sous forme de matériaux pouzzolaniques, fillers, hydrauliques latents ou sous forme des matériaux hydrauliques, Parmi ces ajouts, on peut citer:

- laitiers vitrifiés moulus granulé de haut fourneau

- cendres volantes
- additions calcaires
- fumées de silice
- pouzzolanes
- poudres de verre

II.2.1. Laitier de haut fourneau :

Les laitiers vitrifiés sont obtenus à partir du broyage des laitiers vitrifiés sous forme des granulats, ce sont des sous-produits de fabrication de la fonte, obtenus par trempage du laitier de haut fourneau en fusion. Tous les laitiers des métaux non ferreux qui contiennent des élément nocifs aux bétons comme les sels métalliques, et les laitier de fonte non trempés et non vitrifiés Sont exclues de la norme. [Boudchicha, 2007 ; Harbi radhia, 2018).

La norme NF P18-506 classe deux types de laitiers, A et B. Ce dernier est le plus réactif du fait de sa finesse et sa réactivité plus élevée. selon la norme EN 206-1, les laitiers sont des ajouts de type II, mais seul les laitiers de classe B peuvent substituer le ciment.

II.2.2. Les cendres volantes :

La cendre volante est obtenue en brûlant du charbon pulvérisé avec ou sans combustible CO, c'est une poudre fine de particules vitreuses et sphériques, la cendre volante a des propriétés pouzzolaniques et est composée principalement de la silice et d'alumine. Le taux de la silice réactif représente plus de 25 % de la masse. Selon la norme EN 206-1, ce sont des ajouts de type II et peuvent substituer le ciment selon cette norme. (Harbi R, 2018).

II.2.3. Additions calcaires :

Les fillers calcaires (ajouts) sont des produits secs finement broyés obtenus par broyage ou sélection.

Les fillers calcaires selon la norme EN 206-1 sont de type I et peuvent remplacer le ciment au sens et dans les conditions de cette norme.

II.2.4. Fumée de silice :

Les fumées de silice sont des poudres amorphes finement broyées, obtenues lors de la fabrication de silicium. Selon la norme, il y a deux classes, A et B. La première (classe A) est la plus riche en silice et la plus fine. Selon la norme EN 206-1 les deux classes de fumée de silice A et B sont des additions de type II, et peuvent remplacer le ciment selon cette norme.

Tenant compte de leur réactivité très élevée avec la portlandite et leur grande finesse, leur taux de remplacement est limitée à 10%, et leur utilisation est réservé aux bétons contenant un superplastifiant.

II.2.5. Les pouzzolanes :

Le terme Pouzzolane est nommé d'après Pouzzole, un endroit près de Naples en Italie riche en terres volcaniques. Les pouzzolanes sont des matériaux artificiel ou naturel, riches en silice et en alumine, réagissent avec la chaux en présence d'eau pour former des produits ayant des propriétés liantes.

Les matériaux pouzzolaniques finement broyés dissous en présence d'eau et réagissent avec la portlandite formant des silicates de calcium et d'aluminates de calcium, ces composées sont similaires à ceux formés lors de durcissement du ciment, et participent au développement de la résistance.

II.2.6. Les poudres de verre :

le verre pseudo-calcique est principalement composé de silice amorphe. Selon sa composition chimique, le taux des alcalins compris entre 10 et 20% par masse.

Les études sur la possibilité de remplacement partiel des granulats fins par les granulats du verre ont donné des résultats insatisfaisantes en raison de la réaction alcali-silice.

Pour contourner ce problème, le verre peut être broyé très finement et utilisé comme matériau pouzzolanique. En effet, les verres à grande finesse peuvent réagir selon les réactions pouzzolaniques, réduisant le risque de réactions alcali-silice à long terme.

L'ASTM a établi une nouvelle norme pour les pouzzolanes de verre, ASTM C1866 / C1866M-20, qui couvre deux types, de verre sodocalcique (utilisé pour les fenêtres, les bouteilles et les bouches) et du verre de type E.

II.2.7. L'utilisation simultanée de verre et de pouzzolanes :

Des études antérieures ont été menées en laboratoire sur l'utilisation simultanée du verre et des pouzzolanes, en particulier, les métakaolin, les cendres volantes, en substitution partielle du ciment, ce qui peuvent conduire à des synergies très intéressantes. Il serait donc plus intéressant d'utiliser le verre avec des pouzzolanes que de l'utiliser tout seul. (Idir R., 2009).

II.3. Action des additions minérales sur les matériaux cimentaires

Les ajouts minéraux, du fait de la finesse et de la réactivité plus ou moins forte avec le ciment, modifient considérablement les propriétés des matériaux à l'état frais et durci. (Harbi et al., 2017).

Les effets principaux des additions dans les matériaux cimentaires sont :

- ✓ Effet granulaire : affecte la structure granulaire et les propriétés rhéologiques du matériau.
- ✓ Effet physico-chimique : affecte l'hydratation du ciment.
- ✓ Effet chimique : concerne beaucoup plus, les additions de type II, selon la norme EN 206-1.

II.4. Notion de liant équivalent

Selon la norme EN 206-1, l'utilisation des additions en substitution du ciment, dans les formulations des bétons, doit tenir compte en considération la notion de liant équivalent de coefficient **k**, (fonction de l'activité de l'addition), défini par la formule suivante :

$$L_{eq} = C + k.F$$

C : dosage de ciment dans 1m³ de béton (kg/m³),

F : dosage d'addition dans 1m³ de béton (kg/m³),

K : coefficient de liant équivalent.

II.5. Caractérisation de l'activité d'une addition minérale

II.5.1. Indice d'activité :

Le mortier 1/3 ou mortier normalisé, est composé selon la norme NF EN 196-1, d'une quantité de ciment, et de trois quantités de sable et d'une demi quantité d'eau.

Les mortiers avec ajouts doivent être préparés dans les mêmes conditions de préparation des mortiers témoins, en respectant la même composition, en substituant le ciment par une fraction massique **r** (taux de remplacement)

On définit l'indice d'activité, noté « *i* », comme étant :

$$i(p) = \frac{f_p(t)}{f_o(t)}$$

D'Où :

$f_p(t)$: résistance du mortier avec ajouts à l'âge *t*

$f_o(t)$: résistance du mortier témoin à l'âge *t*.

II.6. La poudre de verre dans les matériaux cimentaires

II.6.1. Structure et composition :

On définit le verre sous plusieurs façons :

Courante : Généralement, on définit le verre comme étant un solide formé par la solidification d'un liquide (figeage). C'est-à-dire, la viscosité augmente lorsque la température diminue.

Structure : les verres sont des solides amorphes (non cristallin).

Thermodynamique : C'est un matériau structurellement déséquilibré, et son énergie est supérieure à celle de produits cristallisés similaires. Son cristallisation ne peut se produire qu'après certains temps. (Aladdine, 2009)

La majorité des verres sont de type sodocalcique, destinés aux applications d'émaillage ou d'emballage, dont le constituant principal est la silice.

Lorsque le verre fondu refroidit, il cristallise à une certaine valeur de température appelée température de cristallisation. D'autre part, au fur et à mesure que

le verre refroidit, il passe par différents états de viscosité, de l'état liquide à l'état vitreux.

Selon la figure II.2, T_f représente la température de fusion (transition), et T_g représente la température de cristallisation. Entre les deux températures, T_f et T_g les verres se comportent comme un liquide surfondu.

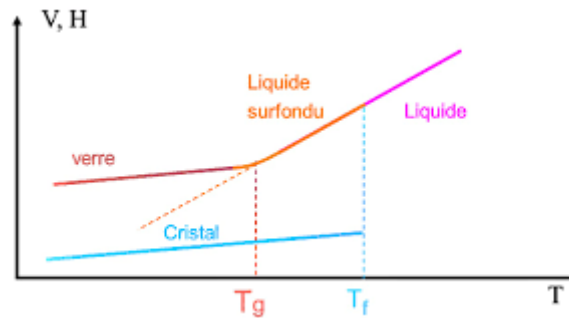


Figure II.2 : Evolution du volume d'un échantillon de silice lors d'un changement d'état

D'une manière générale, Le verre est supposé comme un solide, mais il peut aussi être considéré comme un liquide surfondu, résultant du refroidissement brusque et de la vitrification des liquides. En raison de leur structure désordonnée, le verre est souvent comparé à un liquide, (Harbi R., 2018), voir la figure II.3.

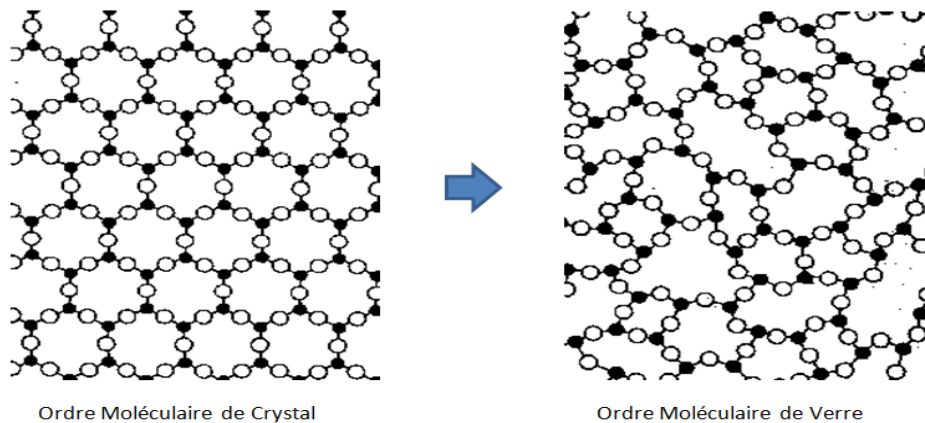


Figure II.3 : Représentation schématique bidimensionnelle de silice (a) structure cristalline, réseau ordonné (cristobalite) (b) structure vitreuse, réseau amorphe.

Il existe divers oxydes de métaux sous forme de traces tels que, le chrome, le cobalt et le fer. Ces traces sont à l'origine des impuretés, ou des additions pour obtenir

la couleur du produit. le tableau II.1 présente la composition typique du verre creux destiné à la fabrication des bouteilles, selon Idir., (2010).

Tableau II.1. : Composition typique des verres creux (Idir et al. 2010; Maraghechi et al. 2012).

Elément	Min	Max	Typique
SiO ₂	68,9	75	74
CaO	4,9	13	10,5
Al ₂ O ₃	1,2	3,0	1,3
Fe ₂ O ₃	0,1	0,9	0,4
P ₂ O ₅	-	-	-
MgO	0,3	1,1	0,5
SO ₃	0,07	0,21	0,2
Na ₂ O	10	16	13
K ₂ O	0,2	0,7	0,2

II.6.2. Types de verre :

Selon la composition chimique, presque tous les verres commerciaux tombent dans l'un des types suivants:

a. Verre sodocalcique :

Le verre sodocalcique est le type de verre le plus couramment utilisé et le moins cher qui couvre quatre-vingt-dix % du verre fabriqué dans l'industrie. Il est résistant aux produits chimiques corrosifs et à haute température et est utilisé pour fabriquer des bouteilles, des ampoules, des bouchons et des fenêtres.

Il est également perméable à la lumière et possède une surface lisse à pores fins facilitant le nettoyage surface. Cependant, il se dilate très rapidement sous l'influence de la chaleur, de sorte qu'un entretien approprié a à prendre en mettant de l'eau chaude dans une bouteille ou un récipient en verre sodocalcique. Il résiste à une température de 200 °C mais ont très peu de résistance aux chocs thermiques. Le tableau II.2 montre la composition chimique du verre sodocalcique.

Tableau II.2 : Composition du verre sodocalcique

Type	Composition chimique
sodocalcique	73% Silice – 14% Soude – 9% Chaux – 4% Magnésium – 0.1% Alumine

b. Verre au plomb :

Ce type de verre est composé d'un pourcentage élevé d'oxyde de plomb, Il est relativement mou, préférable pour les applications électriques en raison de ses excellentes propriétés d'isolation électrique. Le verre au plomb est généralement utilisé pour produire du verre d'art, des tubes de thermomètre et de la vaisselle en cristal au plomb. Cependant, il résiste mal aux changements brusques de température. Le tableau II.3. montre la composition chimique du verre au plomb

Tableau II.3 : Composition du verre au plomb

Type	Composition chimique
Plomb	57% Silice – 31% Oxyde de Plomb – 12% Oxyde de Potassium

c. Verre borosilicaté (Pyrex) :

Ce type de verre est très résistant aux variations de température et aux attaques chimiques. Par conséquent, il est principalement utilisé pour les équipements de laboratoire, les ustensiles de cuisine résistants à la chaleur et les couvercles de lampes durables. Il résiste jusqu'à une température de 170 °C. Le tableau II.4. montre les compositions chimiques du verre borosilicaté.

Tableau II.4. Composition chimique du verre borosilicaté.

Type	Composition chimique
Boro-Silicate	81% Silice – 13% Oxyde de Bore – 4% Soude – 2% Alumine

d. Verre alumino-silicaté :

Ce type de verre est composé d'oxyde d'aluminium. Il résiste aux températures élevées et aux chocs thermiques et est généralement utilisé dans les tubes de combustion, le verre de jauge pour les chaudières à vapeur à haute pression et dans les lampes halogènes au tungstène capables de fonctionner jusqu'à une température de 750 °C. Le tableau II.5 suivant montre la composition chimique du verre d'aluminosilicate.

Tableau II.5. Composition chimique du verre d'aluminosilicate.

Type	Composition chimique
alumino-silicaté	64,5% Silice – 24,5% Alumine – 10,5% Magnésie – 0,5% Soude

e. Verre de silice :

C'est un verre borosilicaté qui est fondu pour éliminer presque tous les éléments non-silicates en des moyens conventionnels pour former un verre résistant aux chocs thermiques jusqu'à 900 °C. Les pores résultants de ce verre est consolidé par réchauffage jusqu'à une température de 1200 °C.

II.6.3. Composition de verre :

Selon leurs rôles dans l'élaboration du verre, Les composants du verre sont classés, en :

- **Les vitrifiant:** dans la fabrication du verre, l'agent vitrifiant le plus couramment utilisé est le sable, il représente la base du verre. Le verre de quartz pur existe, mais sa fabrication est très compliquée car sa fusion se fait aux alentours de 2000°C. Il nécessite l'utilisation de matériaux réfractaires spéciaux, de grandes quantités de combustible et des techniques de moulage spéciales.

- **Les fondants :** Ce sont les oxydes de sodium et de potassium, leurs présence permettent d'abaisser la température de fusion du sable, et augmenter la plasticité du mélange à l'état chaud.

- **Les stabilisants :** l'agent stabilisant est bien la chaux, le verre sans la chaux se dissout dans l'eau et peut être altéré par les influences atmosphériques. La chaux (CaO), introduite dans la masse de verre sous forme de craie, est le plus souvent utilisée. Cette chaux agit comme un stabilisant et empêche la cristallisation lors du refroidissement.

Théoriquement, un verre peut être fabriqué en mélangeant simplement ces trois composants dans les bonnes proportions. Mais pratiquement, on ajoute d'autres éléments dépend du produit qu'on souhaite obtenir. (Facial Aladdin, 2009)

II.6.4. Classification du verre dans le diagramme ternaire

Le diagramme de phase $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ est basé sur une représentation triangulaire, plusieurs ajouts cimentaires peuvent être classés dans le diagramme triangulaire, en se basant sur le taux de CaO, SiO_2 , et Al_2O_3 .

La figure II.4 présente le classement du verre dans le diagramme ternaire par rapport au ciment Portland et par rapport aux autres ajouts cimentaires.

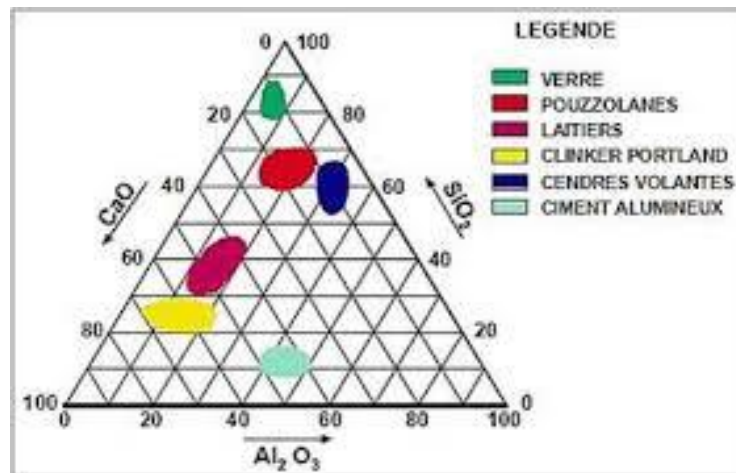


Figure II.4 : Diagramme ternaire de verre et des autres ajouts cimentaires (Mekti, 2018)

II.6.5. Le verre dans les bétons

L'incorporation du verre dans le béton peut se faire suivant deux manières ; Sous forme de granulats ou sous forme de poudre. Incorporer le verre comme granulats présente l'avantage d'utiliser une grande quantité de matériau sans broyage préalable. Cependant, cette technique présente le risque de réaction alcali-granulats. Par contre, lorsqu'on utilise le verre sous forme de poudre finement broyé, ce dernier présente une activité pouzzolanique et limiter la consommation de ciment.

II.7. Le comportement à l'état frais du béton :

II.7.1. Effet de la poudre de verre sur la densité :

La valeur de la densité dépend principalement du poids spécifique de l'agrégat. Par conséquent, la substitution du ciment peut ne pas modifier nettement le poids unitaire du béton (Beltran et coll., 2014)

Les travaux effectués par Ibrahim., (2020) (voir figure II.5) montrent que la densité fraîche de tous les mélanges de béton avec la poudre de verre, diminue par rapport aux bétons témoins. Cette réduction peut être liée à la densité du WGP qui est inférieure à celle du ciment.

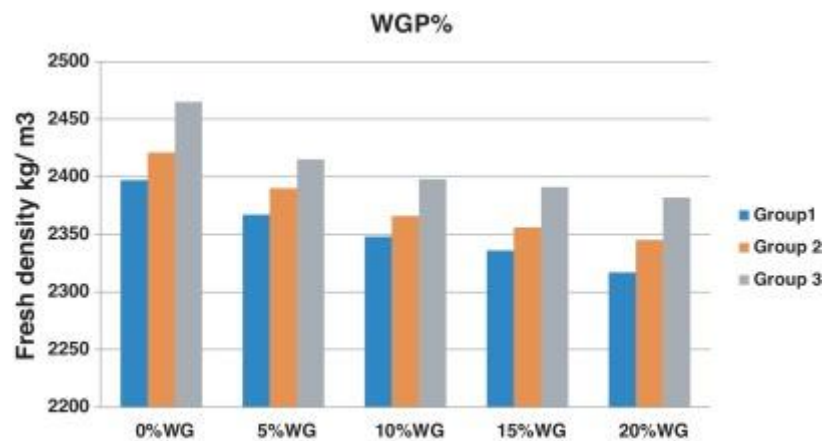


Figure II.5 : Densité fraîche des bétons en fonction de la poudre de verre.

II.7.2. Effet de la poudre de verre sur la consistance normale :

Les travaux menés par Fasih Ahmed Khan et coll., (2020) sur des mélanges de différents taux de remplacement de ciment par la poudre de verre, et de finesse inférieure à 45 μm , (voir figure II.6) montrent une diminution de l'affaissement en fonction de taux de remplacement. L'incorporation de poudre WGP jusqu'à 10 % n'affecte pas la consistance de la pâte de ciment. Avec l'augmentation de l'incorporation de WGP de 15 %, la demande en eau augmente de 1 % pour atteindre la consistance normale de la pâte. Pour les mélanges du WGP de 20% à 35%, les besoins en eau pour une consistance normale augmentent de 2, 2,5, 3,5 et 5 % respectivement.

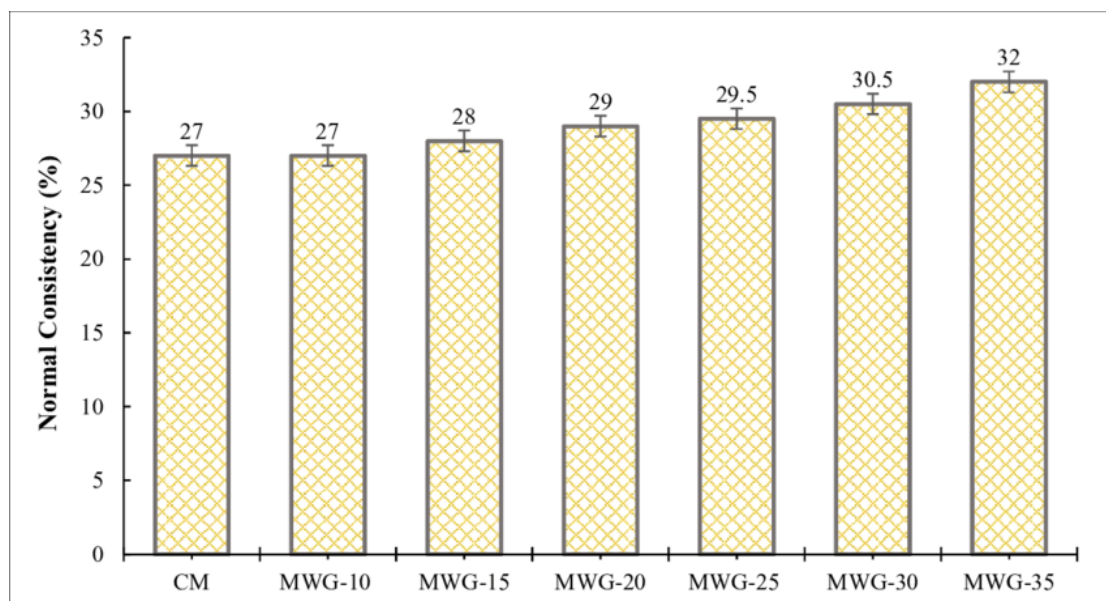


Figure II.6 : Consistance normale des mélanges de différents pourcentages de WGP

II.7.3. Effet de la poudre de verre sur les délais de prise :

Les résultats de Ahmed facih khan et coll. (2020) ont montré une tendance de retard des délais de prise proportionnelle au taux de remplacement de ciment par la poudre de verre (voir figure II.7)

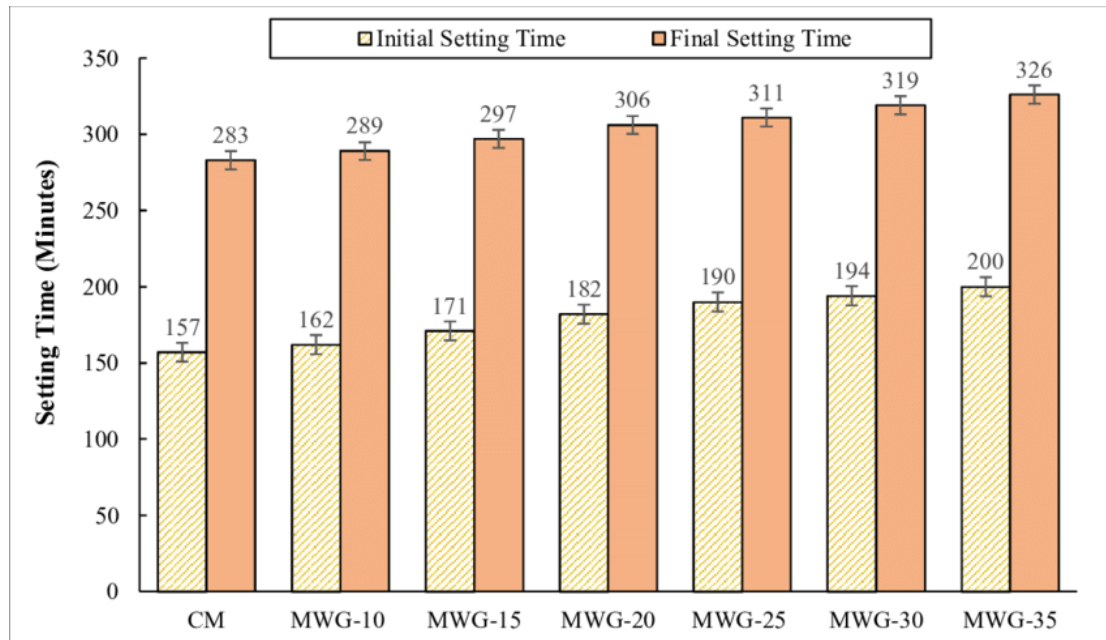


Figure II.7 Temps de prise en fonction de variation des pourcentages WGP

II.7.4. Effet de la poudre de verre broyé sur la chaleur d'hydratation :

Au cours de l'hydratation du ciment, un dégagement de chaleur commence dès que l'eau et le ciment entrent en contact. La chaleur qui en résulte peut être nocive pour les bétons de grande masse. Xiaolin Chang et al. (2015) ont montré que la chaleur totale d'hydratation des échantillons diminuait avec l'augmentation de la teneur en poudre de verre GP. (voir Fig. II.8).

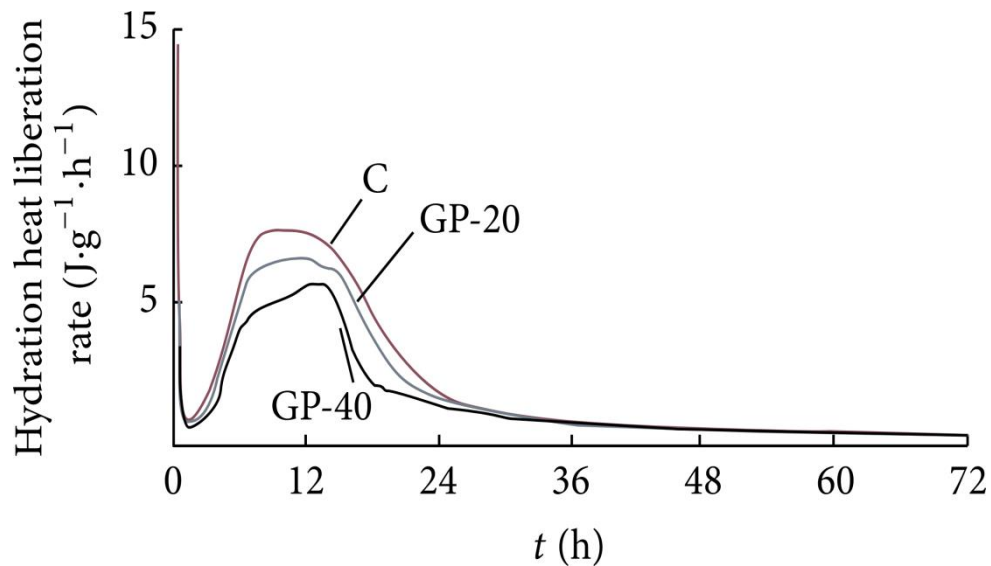


Figure II.8 : Taux d'évolution de la chaleur d'hydratation du ciment avec et sans GP.

II.7.5. Effet de la poudre de verre sur l'ouvrabilité :

Les travaux de Shilpa Raju et coll., (2014) ont montrés que, plus le taux de remplacement du ciment par la poudre de verre est élevé, plus la maniabilité est faible (voir figure II.9), ce qui peut être dû à la forme des particules et à la réduction du module de finesse. (Fabien, 2014).

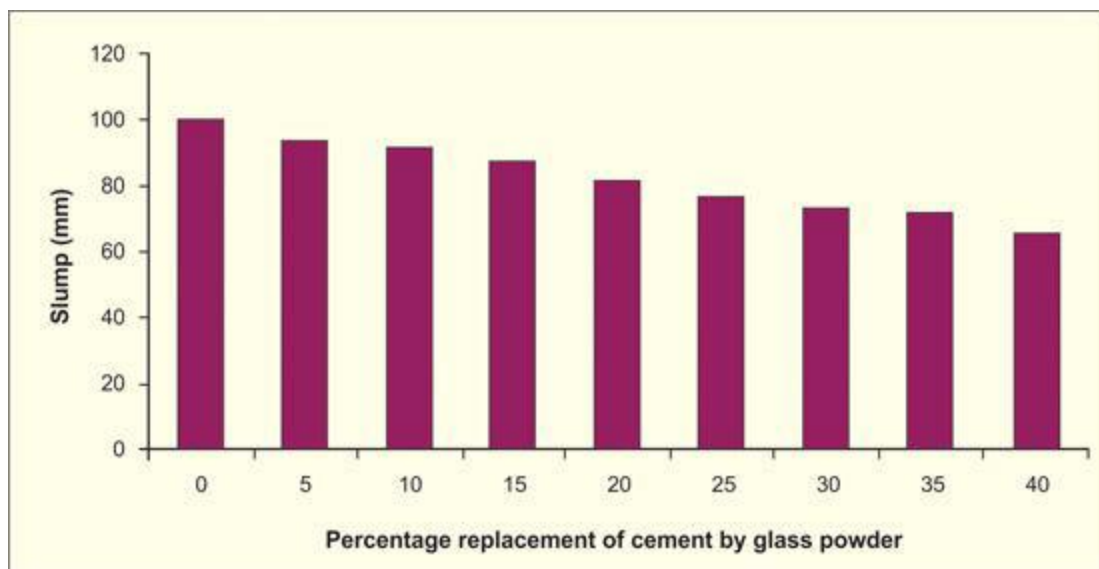


Fig II.9. Variation de l'affaissement du béton avec remplacement du ciment par la poudre de verre

II.7.6. Influence de la finesse de la poudre de verre :

La finesse est un paramètre clé dans l'activité pouzzolanique du verre. Cette activité contribue à améliorer les performances du béton, cependant, des réactions alcali-silices peuvent se produire lorsque le verre est utilisé sous forme de granulats. La figure II.10 présente l'effet du diamètre des particules de verre sur l'expansion des mortiers.

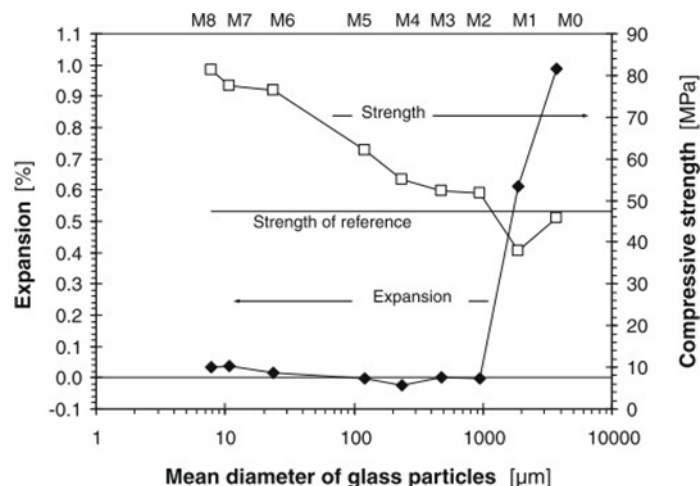


Figure II.10 : Influence du diamètre des particules de verre sur l'expansion et le développement de la résistance en compression (Idir et al. 2010).

Selon Shao et al., (2000), les poudres de verre avec des diamètres inférieures à 75 μm, développent des réactions pouzzolaniques.

II.8. Le comportement à l'état durcis du béton :

II.8.1. Effet de la poudre de verre sur la résistance :

Les travaux de SHAO, (2000), ont montrés que la substitution de ciment par la poudre de verre a amélioré significativement les performances mécaniques du béton, cette amélioration est due à la réaction pouzzolanique de la poudre de verre.

Selon SHAO., (2000), Aliabdo et coll., (2016), Matos et coll., (2012), les poudres de verre avec un taux de remplacement 30 % de ciment et diamètre inférieur à 38 μm, ont présentés une activité pouzzolanique.

Ortega et coll., (2018) de son côté, a montré une montée progressive de résistance à long terme, atteignant des valeurs similaires aux mortiers de référence (voir figure II.11), ce qui coïncide avec les résultats trouvés par Lu et coll., (2017).

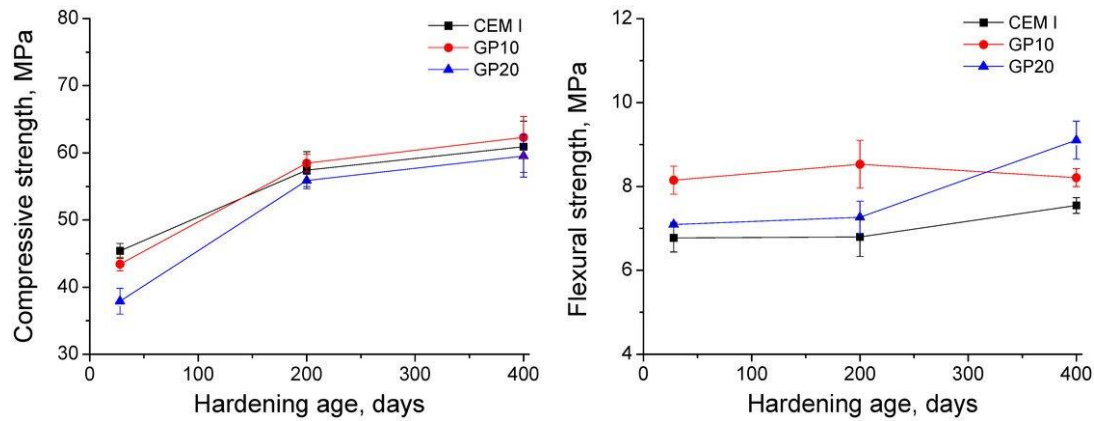


Figure II.11 : Variation de la résistance en fonction de l'âge

II.8.2. Effet de la poudre de verre sur la perméabilité :

La mesure de la résistance à la pénétration des ions chlorure donne une évaluation rapide de la durabilité du béton (Omran et coll., 2016). Elle s'exprime en termes de charges électriques (en coulombs) dues à la diffusion d'un ion chlorure à travers l'échantillon de béton. Il s'agit du test de pénétration rapide des chlorures (RCP)

Tamanna et coll., (2020) ont utilisé le GP dans des mélanges de béton comme remplacement partiel du ciment. Ces études ont révélé des effets bénéfiques, notamment une perméabilité réduite au chlorure par rapport au béton témoin (voir figure II.12), lors de l'utilisation du GP. Il a été également démontré que la résistance augmente avec le taux de GP dans les mélanges.

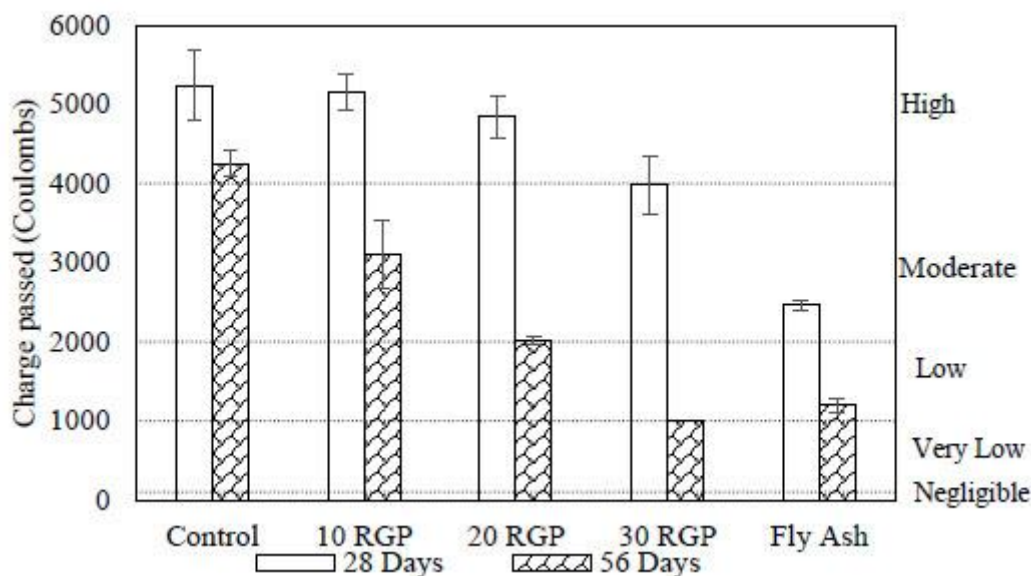


Figure II.12 : Résultats de pénétration rapide des chlorures (RCPT) à 28 jours et 56 jours.

II.8.3. Effet de la poudre de verre sur ASR expansion :

Un grand nombre de chercheurs se sont principalement consacrés à l'étude des déchets de verre sous forme des granulats de béton (silva et coll., 2014 , Nodehi et coll., 2021). En raison de l'alcali dans le ciment et d'une grande quantité de silice active dans le verre, ce qui entraîne une réaction alcali-agrégat considérable et des dommages de dilatation du béton (Naganna et coll., 2021), et a donc fait stagner la recherche. Bien que les chercheurs aient proposé plusieurs méthodes pour réduire l'expansion de l'ASR, telles que le remplacement du ciment d'origine par du ciment pouzzolanique, l'ajout de matériaux fibreux aux déchets de béton de verre, l'ajout de composés de lithium, etc. (Mohajerani et coll., 2017), le résultat n'est pas toujours satisfaisant. Certains chercheurs ont également utilisé le verre comme matière première pour la production de ciment. Cependant, les expériences ont montré que l'augmentation de la teneur en alcali dans le ciment après l'ajout de verre provoque facilement une réaction alcali-agrégat, ce qui n'est pas bénéfique pour les performances du béton (jayakumar et coll., 2021). Mohajerani et coll., (2017) ont prouvé que lorsque la poudre de verre est broyée dans une certaine mesure, elle ne provoque pas de RAS, et elle a également une activité pouzzolanique, ce qui peut améliorer les performances du béton .

Cependant, une étude antérieure a révélé (Zheng et coll., 2016, Liu et coll., 2015) que la poudre de verre broyé elle-même est un inhibiteur d'expansion ASR efficace. En tant que matériau cimentaire auxiliaire pour le béton, le broyage du verre peut stimuler l'activité des cendres volcaniques, contribuant à améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité du béton et à réduire les risques ASR du béton de verre

Huang et coll., (2021) ont montré (voir figure II.13) que la poudre de verre produit un gel CSH dense par réaction pouzzolanique, et la consommation d'une grande quantité d' OH^- , requise par l'ASR, a un bon effet inhibiteur sur l'expansion ASR du béton, et l'effet inhibiteur devient plus évident lorsque la finesse de la poudre de verre augmente.

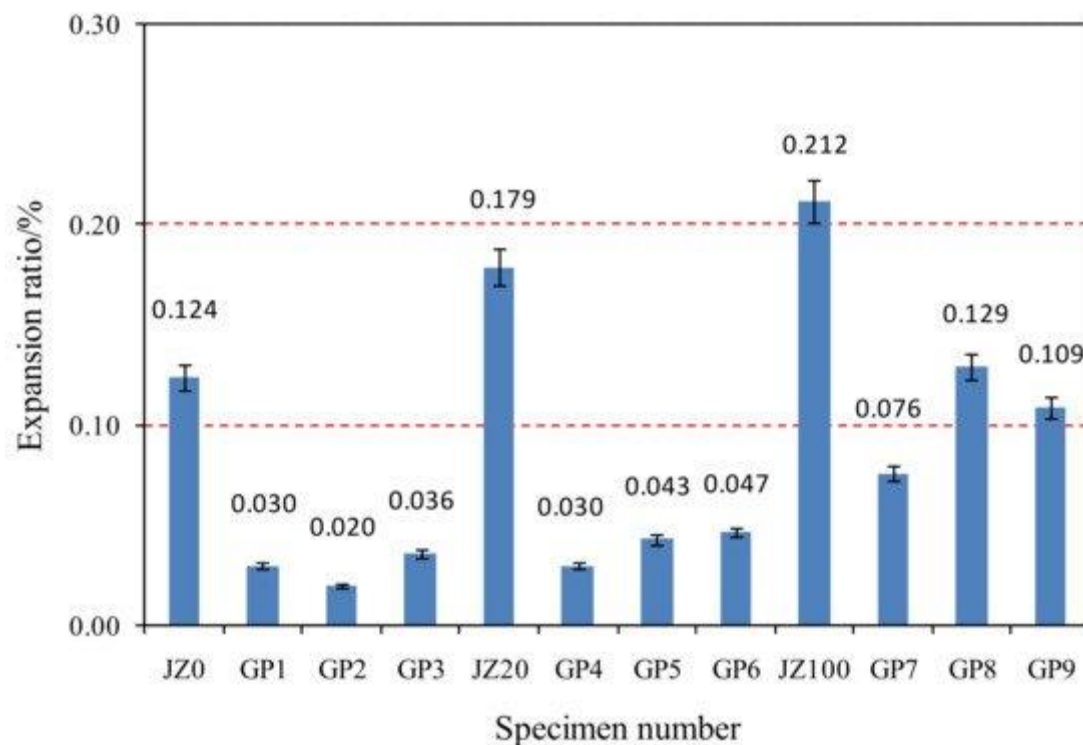


Figure II.13: Taux d'expansion à 14 jours des mortiers

II.8.4. Effet de la poudre de verre sur l'absorption, la porosité et la densité :

La poudre de verre (GP) semble être une solution car elle contient de la silice (SiO_2) en quantités supérieures à 70 %, a une surface spécifique élevée et est de nature amorphe, ce qui lui permet de réagir avec la portlandite (Omrane et coll., 2016).

Il a été démontré que la poudre de verre de tailles spécifiques et dans certaines proportions n'affecte pas les propriétés mécaniques du béton (Omrane et coll., 2016). Il a été prouvé que plus la taille des particules est petite, plus l'activité pouzzolanique est élevée (Jani et coll., 2014, Khmiri et coll., 2012), et la taille optimale se situe entre 45 et 75 μm (Pereira et coll., 2012). L'influence de la quantité de GP a été largement étudiée (Kamali et coll., 2015, Sobolev et coll., 2007), mais il a été déterminé que des résultats optimaux sont obtenus entre 10 et 30% (Jani et coll., 2014, Omrane et coll., 2016). L'hydratation du ciment est également améliorée du fait de la granulométrie et du comportement pouzzolanique du GP (Kamali et coll., 2016).

Les propriétés de durabilité ont également été étudiées. L'absorption d'eau (Aliabdo et coll., 2016, Harbi et coll., 2017), la porosité (Harbi et coll., 2017, Lu et coll., 2017) et la maniabilité (Lu et coll., 2017, Wang et coll., 2017) sont également influencées par la taille et la quantité des particules de GP.

Viviana et coll., (2019) ont montré qu'à 28 jours, (voir figure II.14), les densités des mortiers avec GP sont inférieures au mortier témoin, du fait principalement de la densité plus faible du GP par rapport au ciment Portland. Par conséquent, à mesure que le pourcentage de remplacement du GP augmente, la densité du mortier diminue. Cependant, la densité augmente légèrement avec la diminution de la taille maximale du GP, principalement en raison de l'effet de remplissage des particules plus fines qui permettent de remplir les espaces vides au sein de la matrice de mortier. Les petites particules de GP produisent une densité élevée de la structure de la pâte de ciment, ce qui entraîne une réduction de la porosité et de l'absorption (Kim et coll., 2015).

De plus, les résultats d'absorption et de porosité montrent une tendance à la baisse, à mesure que la taille des particules et le pourcentage de remplacement sont réduits (voir fig. II.14), ce qui pourrait être justifié par rapport à la taille des particules GP utilisées. Dans le cas de 75 μm , ces particules de GP ont probablement remplacé les pourcentages de ciment par une taille moyenne de particules plus petite, produisant une matrice moins compacte avec une porosité plus élevée et donc conduisant à un réseau de pores qui permet une absorption plus élevée. D'autre part, lorsque des particules GP de 45 microns ou moins sont utilisées, des mortiers peuvent

être obtenus avec des absorptions et des porosités similaires ou inférieures au mortier témoin

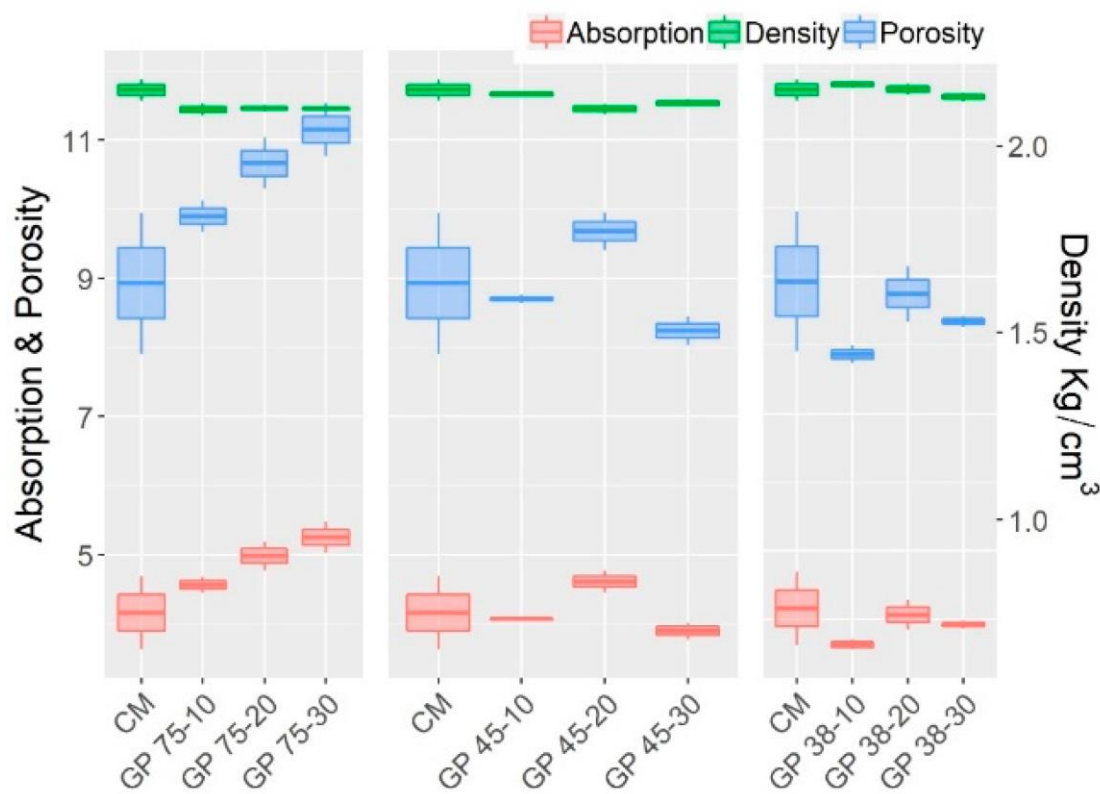


Figure II.14: absorption, porosité et densité des mortiers à 28j

II.8.5. Effet de la poudre de verre sur la résistance aux attaques sulfatiques :

L'attaque des sulfates sur le béton est un problème important de durabilité du béton. Cette condition peut entraîner une dilatation, une fissuration, un écaillage et une perte de résistance (Chabrelie., 2010). L'attaque au sulfate est généralement classée comme attaque au sulfate interne ou externe par rapport à la source de sulfate. L'attaque interne au sulfate fait référence au cas où les constituants nécessaires à l'expansion et à la fissuration, tels que ceux des granulats riches en sulfate ou de l'excès de gypse dans le ciment, sont incorporés dans le béton au moment du malaxage. L'attaque externe des sulfates se produit lorsqu'une ou plusieurs des espèces participant à l'attaque pénètrent dans le béton à partir d'une source externe, telle que le sol, les eaux naturelles (Ramezani pour., 2012).

Compte tenu de l'effet de remplissage et de la réactivité pouzzolanique de la poudre de verre, la densité du béton à base de poudre de verre augmente et la porosité

et la connectivité des pores diminuent. Ainsi, l'absorption et la pénétration d'eau et de produits chimiques dans le béton à base de poudre de verre sont généralement inférieures à celles du Ciment portland jusqu'à un niveau de remplacement optimal du ciment

Hilton et coll., (2019) ont également rapporté une bonne résistance à l'attaque des sulfates dans le béton avec 15% de WG. Les travaux effectués par Tayeh et coll., (2019), (voir fig. II.15) ont révélé une résistance aux sulfates fiable du mortier cimentaire avec 10 % de poudre de verre WG ($\phi < 200 \mu\text{m}$) par rapport au mortier conventionnel. Cependant, le béton peut être vulnérable à l'attaque des sulfates, car il dégrade les produits d'hydratation, décalcifie les produits C-S-H et provoque une lixiviation, qui est plus vulnérable à l'attaque du sulfate de magnésium que du sodium (Mostofinejad et coll., 2020). L'ajout de poudre WG hautement pouzzolanique transfère les produits CH en produits C-S-H, ce qui améliore la durabilité contre l'attaque des sulfates.

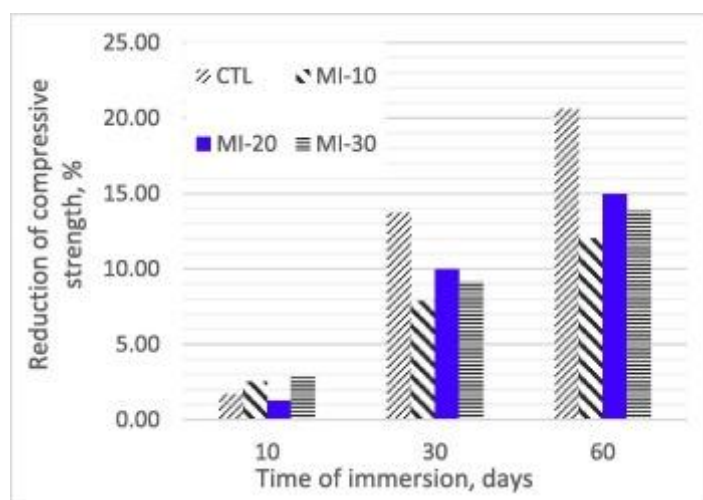


Figure II.15 : pourcentage de réduction de la résistance à la compression exposée à 10 % de MgSO_4

II.8.6. Effet de la poudre de verre sur la résistance au gel-dégel :

Le béton poreux est plus sensible lorsqu'il est exposé aux cycles de gel-dégel. La contrainte est générée en raison des cycles de gel qui provoquent des microfissures internes dans le béton et créent une voie supplémentaire pour pénétrer les produits chimiques et l'eau dans le béton. Ainsi, une matrice dense et des agrégats moins sensibles sont préférables. Une résistance élevée aux cycles de gel-dégel du béton de

ciment à base de la poudre de verre (WG) a été rapportée dans des recherches antérieures (Al-akhras et coll., 2012, Abendeh et coll., 2015).

La résistance au gel-dégel du béton avec la poudre de verre (WG) a été testée par Lee et coll., (2018), (voir figure II.16), ils ont observé une meilleure résistance d'environ 24 % avec 20 % de poudre de verre (WG) par rapport au béton témoin.

Comme représenté sur la fig. II.16, le facteur de durabilité du béton WG est beaucoup plus élevé que celui du PC pour une action gel-dégel jusqu'à 300 cycles.

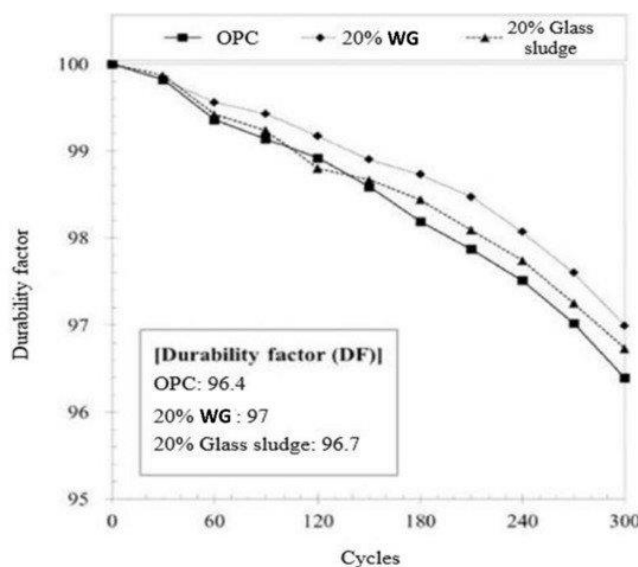


Figure II.16: Facteur de durabilité du béton WG face à l'action gel-dégel

II.8.7. Effet de la poudre de verre sur le retrait de séchage :

Le retrait du béton dépend du type d'agréats, des vides et de la disponibilité de l'eau interne dans le béton. Le retrait de séchage du béton avec poudre de verre (WG) est inférieur à celui du béton ordinaire (PC). Comme indiqué dans l'étude de Lu et coll., (2019), un bloc de béton avec 70 % d'agréats WG et 20 % de poudre WG possédait 50 % moins de retrait de séchage que les blocs PC. Cela est dû à la nature rigide de l'agréat WG et à sa surface rugueuse, qui est fortement imbriquée avec la pâte de ciment ; ainsi, la résistance au rétrécissement est améliorée. Cependant, l'espace vide interne dans le béton peut accélérer le retrait à haute température. Ainsi, un WG plus fin est préférable car la poudre WG fine montre un effet de remplissage et réduit les vides dans le béton. Ainsi, la réduction du retrait de séchage par l'ajout de poudre WG était supérieure à celle du béton avec du calcin WG de taille plus

grossière (Fig. II.17-a). Cependant, les agrégats gradués et les particules WG seront plus efficaces pour produire une microstructure dense et fournir la dissolution de silice requise tout au long de l'étape d'hydratation complète et entraîneront un retrait réduit (Siddika et coll., 2021).

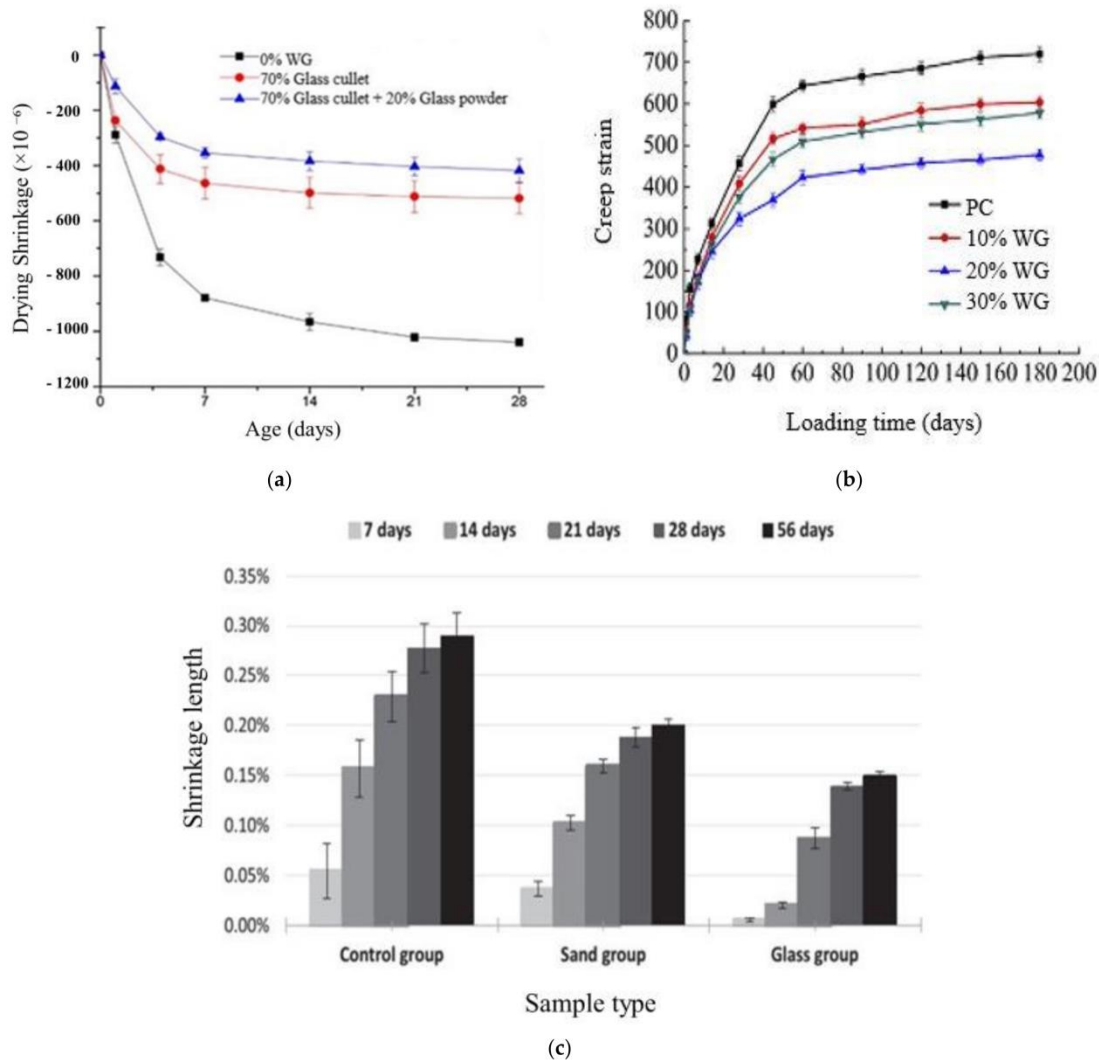


Figure II.17 : Propriétés de retrait des bétons de ciment et géopolymères avec WG.

(a) Retrait de séchage du béton avec WG (Lu et coll., 2019). (b) Déformation de fluage du béton avec de la poudre WG (He et coll., 2019). (c) Retrait de séchage des bétons géopolymères expansés avec et sans granulats fins WG (Hajimohammadi et coll., 2018).

II.9. Le laitier dans le béton :

Le laitier de haut fourneau granulé broyé est un matériau cimentaire supplémentaire qui est utilisé dans le béton, pour réduire l'utilisation de ciment Portland. Ce dernier, a un impact négatif sur l'environnement lors de sa production (sheikibrahim et coll., 2018). Le laitier d'une finesse d'environ $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ a été largement utilisé dans l'industrie du béton. Lorsqu'il est ajouté au béton, il améliore les propriétés telles que la maniabilité, la durabilité et l'étanchéité à l'eau. (Zulu et coll., 2019). Il améliore également la résistance du béton aux dommages causés par le sel, la réaction alcali-silice restreinte, etc. (Ashish et coll., 2016, Suresh et coll., 2015).

D'après les résultats antérieures, Majhi et al., (2020), Rashad., (2018), Jiang et al., (2018) et Haha et al., (2012) ont montré que le béton à base de laitier broyé améliore les propriétés rhéologiques en raison d'une fluidité et d'une chaleur d'hydratation réduite, augmentant la durabilité de la réaction pouzzolanique et améliorant la résistance à long terme par auto-hydratation.

De plus, Duży et al., (2021), et Shi et al., (2020) ont montré que le laitier de haut fourneau granulé présente une excellente maniabilité et une résistance élevée à la pénétration chimique par les acides, l'eau de mer et les eaux usées.

Özbay et al., (2016) et Kim et al., (2014) ont rapporté que l'utilisation de laitier granulé de haut fourneau broyé en remplacement du ciment a un impact très important sur l'environnement, car l'émission de dioxyde de carbone impliquée dans la production de ciment peut être réduite et le coût de la production de béton peut être économisé.

De nombreuses recherches expérimentales ont été menées sur le développement de la résistance du béton mélangé au laitier. Le développement de la résistance du béton à base de laitier est étroitement lié au rapport eau/liant, au taux de remplacement du laitier et aux conditions de durcissement.

Beushausen et coll., (2012) ont constaté que, dans des conditions de cure humides et lorsque le taux de remplacement du laitier est inférieur à 50 %, la résistance au jeune âge à 1 jour du béton diminue presque linéairement avec l'augmentation du taux de remplacement du laitier. Aux âges de 28 et 56 jours, en

raison de la formation de silicate de calcium hydraté (CSH) à partir de la réaction du laitier, la résistance à la compression du béton mélangé au laitier peut dépasser celle du béton témoin.

II.10. La pouzzolane naturelle dans le béton :

Les pouzzolanes sont divisées en deux catégories, à savoir les naturelles et les artificielles, sous forme de métakaolin et de fumée de silice (SF). Ces dernières années, l'industrie s'est tournée vers l'utilisation de pouzzolanes naturelles en raison de leur faible coût et de leur accessibilité. Une pouzzolane est un matériau siliceux qui peut être utilisé comme substitut peu coûteux du ciment dans les mélanges de mortier. Les pouzzolanes participent à une réaction cimentaire avec l'hydroxyde de calcium (c'est-à-dire la chaux) et d'autres alcalis. Les pouzzolanes sont efficaces pour abaisser la chaleur d'hydratation du mortier, ce qui améliore sa maniabilité et sa durabilité. Ils peuvent également améliorer la résistance du béton et du mortier à la fois à l'attaque des sulfates et à la réaction alcali-silice (ASR) (Ghassan et coll., 2013).

La pouzzolane naturelle de Beni-Saf est utilisée en Algérie, dans les cimenteries comme ajout actif à des pourcentages de 15 à 20%, pour produire des ciments composés. Les travaux menés par Ghassan et coll., (2013), khudhair et coll., (2017), ont trouvé que la pouzzolane naturelle à des taux de 10 à 30 %, augmente la consistance normale, diminue les temps de prise, et diminue les performances mécaniques à jeunes âges.

Selon Colak., (2003), la pouzzolane naturelle augmente la demande en eau et la porosité des pâtes de ciment. Il a trouvé pour un taux de remplacement de 20% , des résistances en compression similaires à celles du ciment témoin.

CHAPITRE III

CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET METHODES D'ESSAIS

III.1 Introduction :

Actuellement, l'utilisation des ajouts cimentaires est une technique très intéressante pour améliorer certaines caractéristiques des mortiers et bétons. Ces ajouts ont une influence significative sur les performances mécaniques, la rhéologie, et la durabilité des matériaux cimentaires.

La compatibilité entre les différents composants du mortier doit tenir compte de tous les paramètres pouvant affecter leur comportement. Comme cela nécessiterait trop de tests pour les étudier tous, en même temps, nous nous sommes limités aux paramètres d'investigation suivants :

- Influence du taux des additions sur les performances des mortiers binaires.
- Influence du taux des additions sur les performances des mortiers ternaires.
- Influence du taux des additions sur les performances des mortiers quaternaires.

Dans un premier temps nous allons présenter les caractéristiques et les propriétés des constituants utilisés pour la préparation des mortiers confectionnés conformément aux normes recommandées, il s'agit du ciment (C), de la poudre de verre avec deux finesses différentes (PV30 et PV45), de la pouzzolane naturelle (PZ), des laitiers (L), de sable (S) et de l'eau (E).

Nous présentons ensuite les modes expérimentaux et les équipements utilisés pour caractériser les mortiers à l'état frais et durci, suivi des résultats obtenus.

III.2. Justification du choix des matériaux de base :

III.2.1. Pourquoi étudier les mortiers ?

L'impact de différents ajouts et adjuvants sur les caractéristiques des mortiers permet aux chercheurs de prédire le comportement du béton dans les différentes conditions. (Amour., 2009)

Bien que cette étude ait été menée sur des systèmes de mortier, il est raisonnable de supposer que les tendances observées peuvent être étendues au béton.

III.3. Matériaux utilisés

III.3.1. Ciment :

Le ciment utilisé pour notre étude expérimentale est un ciment de type CEM I 42,5. Ce ciment provient de la cimenterie de M'sila, qui ne comporte aucune addition. Nous avons choisi ce type de ciment pour déterminer l'influence exacte de chaque addition. Les compositions chimiques et minéralogiques du ciment utilisé sont présentées dans les tableaux III.1 et III.2, respectivement. Les propriétés physiques des ciments sont présentées dans le tableau III.3.

Tableau III.1: Composition chimique du ciment (%)

%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
CEM I 42.5	21.83	4.82	4.75	61.60	1.83	2.48	0.70	0.12	2.84

LOI: Loss on ignition

Tableau III.2: Composition minéralogique du ciment (%)

Type de ciment	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
CEM I 42.5	61.54	14.83	7.04	11.05

Tableau III.3: propriétés physiques du ciment

Type de ciment	CEM I 42.5
Densité apparente (kg/m ³)	1130
Densité absolue (kg/m ³)	3100
Finesse (cm ² /g)	3400

III.3.2. Eau :

Dans cette étude, L'eau utilisé pour la confection des éprouvettes et malaxage est de l'eau potable.

III.3.3. Sable :

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.

Le sable utilisé (0/5 mm) est un sable modifié de la région de Boussaâda. Sa composition chimique est représentée dans le tableau III.4.

Tableau III.4: Composition chimique du sable (%)

%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
Sable	89.67	0.90	0.91	5.96	0.2	0.05	0.3	0.3	-

III.3.3.1. Essai d'équivalent de sable

Ce test est conforme à la norme NF P18-598. Plus la teneur en argile est faible, plus le sable est propre, et plus l'équivalent sable est élevé. Nous avons trouvé les valeurs suivantes

- ES_V = 85% }
 - ES_P = 80%

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

III.3.3.2. Analyse granulométrique

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

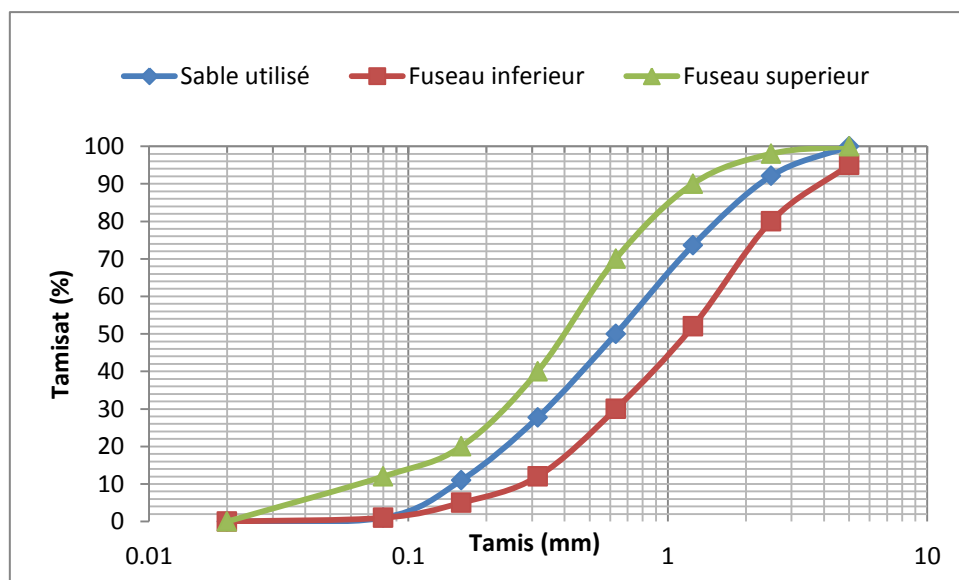


Fig. III.1 : Courbe granulométrique du sable utilisé

III.3.3.3. Module de finesse

Par définition, et selon la norme (Norme NF P 18 -304 /EN 12620), Le module de finesse est la somme des pourcentages des refus cumulés des tamis suivants :

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

Pour le sable utilisé, nous avons trouvé : $M_f = 2.56$.

Selon la norme, nous constatons que ce sable est un sable préférentiel.

III.3.4. Les ajouts cimentaires :

En plus du ciment Portland, d'autres ajouts cimentaires tels que le verre broyé, le laitier et la pouzzolane naturelle ont servi pour confectionner des mélanges binaires, ternaires et quaternaires.

III.3.4.1. Poudre de verre :

il s'agit des déchets de verre de vitrage brisés broyé à deux finesses de 3000 cm^2/g (PV30) et 4500 cm^2/g (PV45). Le broyage du verre a été effectué au niveau du laboratoire de CETIM de Boumerdes. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques sont illustrées respectivement dans le tableau III.5 et figure III.2.

Tableau III.5: Composition chimique de la poudre de verre (%)

%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
Poudre de verre	70.26	2.03	0.85	8.92	1.71	0.18	0.58	13.27	0.62

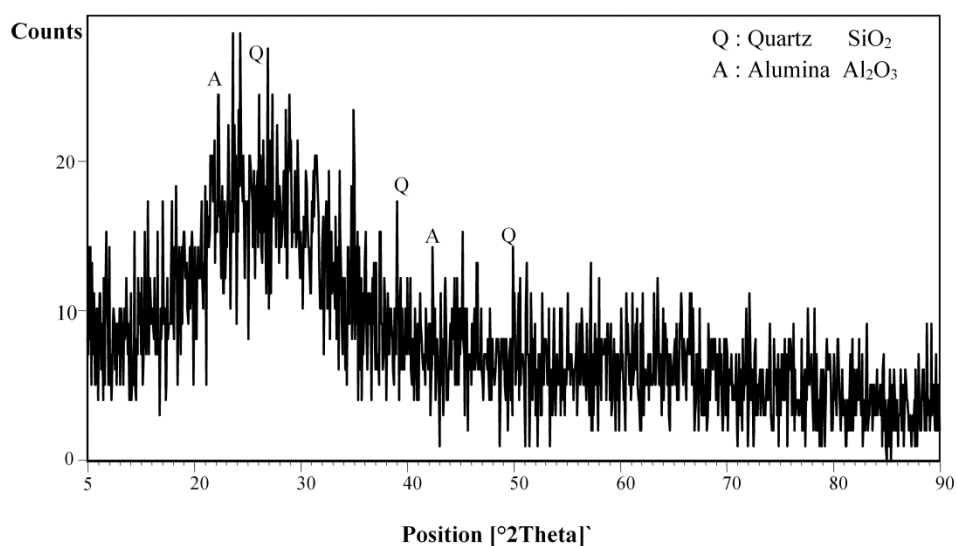


Fig. III.2 : diffraction au rayon X de la poudre de verre

III.3.4.2. Laitier de haut Fournaux :

Le laitier utilisé est un sous-produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi d'El-Hadjar (Annaba, Algérie), d'une surface spécifique de 4000 cm²/g (L). les caractéristiques chimiques et minéralogiques sont représentées respectivement aux tableau III.6 et figure III.3.

Tableau III.6: Composition chimique du laitier (%)

%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
Laitier	40.02	7.11	1.44	41.65	4.98	1.65	0.60	0.12	0.00

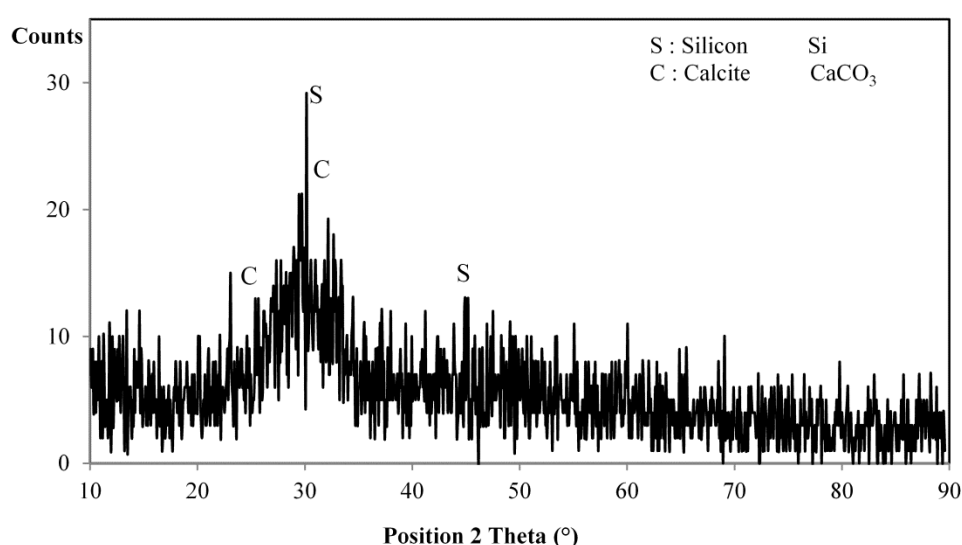


Fig. III.3 : diffraction au rayon X du laitier

III.3.4.3. Pouzzolane naturelle :

Les pouzzolanes utilisées sont des pouzzolanes naturelles proviennent de gisement de beni-saf, de surface spécifique égale à 4200 cm²/g. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques sont illustrées respectivement au tableau III.7 et figure III.4

Tableau III.7: Composition chimique du Pouzzolane naturelle (%)

%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
Pouzzolane	43.15	15.93	8.41	12	4.51	0.54	1.25	5.41	9.12

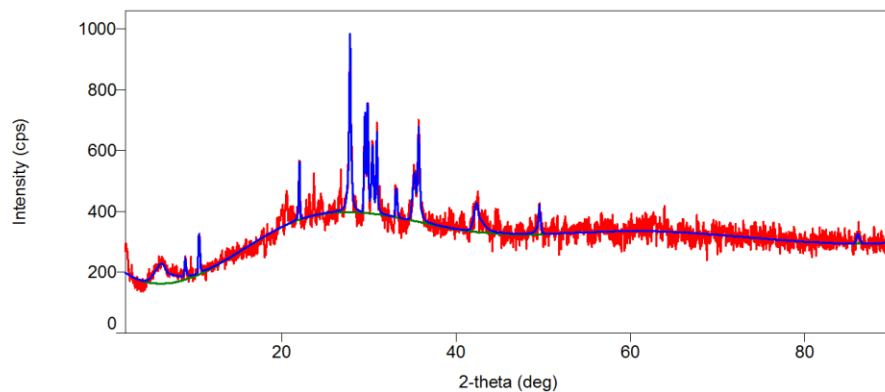


Fig. III.4 : diffraction au rayon X du pouzzolane naturelle

III.4. METHODES D'ESSAIS

III.4.1. ESSAIS SUR LA PATE DE CIMENT :

III.4.1.1. Formulation des pâtes :

Les pâtes de ciment préparées avec un E/L égal à 0.3, sont coulées dans des moules cubiques $2 \times 2 \times 2 \text{ cm}^3$. Il est à noter que les formulations qui présentent de bonnes performances mécaniques seront retenues pour l'étude des mortiers.

Les additions sont substituées du ciment selon les formulations suivantes :

Tableau III.8.: Mélange des ciments binaires.

Liant	Verre (PV)	Laitier (L)	Pouzzolane (PZ)
95% CEM I+5% PV30	5%	-	-
90% CEM I+10% PV30	10%	-	-
85% CEM I+15% PV30	15%	-	-
80% CEM I+20% PV30	20%	-	-
95% CEM I+5% PV45	5%	-	-
90% CEM I+10% PV45	10%	-	-
85% CEM I+15% PV45	15%	-	-
80% CEM I+20% PV45	20%	-	-

Tableau III.9.: Mélange des ciments ternaires.

Liant	Verre (PV)	Laitier (L)	Pouzzolane (PZ)
80% CEM I+10% PV30+10% L	10%	10%	-
70% CEM I+20% PV30+10% L	20%	10%	-
80% CEM I+10% PV45+10% L	10%	10%	-
70% CEM I+20% PV45+10% L	20%	10%	-
80% CEM I+10% PV30+10% PZ	10%	-	10%
70% CEM I+20% PV30+10% PZ	20%	-	10%
80% CEM I+10% PV45+10% PZ	10%	-	10%
70% CEM I+20% PV45+10% PZ	20%	-	10%

Tableau III.10. Mélange des ciments quaternaires

Liant	Verre (PV)	Laitier (L)	Pouzzolane (PZ)
70% CEM I+10% PV30+10% L+10% PZ	10%	10%	10%
70% CEM I+10% PV45+10% L+10% PZ	10%	10%	10%

III.4.1.2. la consistance normale et temps de prise :

a)- La consistance :

La consistance normalisée des pâtes de ciment contenant ou pas des ajouts, a été déterminée par l'appareil de Vicat, dont la distance **d** caractérise la consistance de la pâte étudiée.

- Si $d = 6\text{mm} \pm 1\text{mm}$, la consistance est dite 'normalisée'.
- Si $d > 7\text{ mm}$ ou $d < 5\text{mm}$), refaire l'essai avec une quantité d'eau différente, jusqu'au l'obtention d'une consistance de $d = 6\text{mm} \pm 1\text{mm}$.

b)- Les temps de prise :

Pour déterminer les temps de début et fin de prise, on remplace la sonde de 10 mm de diamètre par une aiguille de 1,13 mm de diamètre. Le temps de début de prise est dit atteint lorsque l'aiguille s'arrête de s'enfoncer sous une charge de 300g à une distance $d = 4\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$, mesuré à partir du fond du moule. Ce moment mesuré depuis le début du malaxage appelé "temps de début de prise". Le temps de fin de prise est le moment où l'aiguille ne s'enfonce que de 0,5 mm à partir du haut du moule.

III.4.1.3. Etude de la microstructure

III.4.1.3.1. La Microscopie Electronique à Balayage (MEB)

MEB est une technique utilisée non seulement en médecine et en biologie, mais également dans divers domaines tels que les céramiques, les métallurgies ...

La microscope électronique à balayage nous permet de caractériser les matériaux, de faire une topographie des minéraux et matières, de visualiser les fissures, et la forme des particules.

Cette technique est basée sur le principe de bombardement d'une surface d'un solide par un ensemble d'électrons, et l'utilisation des émissions des électrons par la surface du solide à inspecter. De multiples rayons sont émis au point d'impact, mais seuls les électrons secondaires et rétrodiffusés contribuent à former une image de la topographie de l'échantillon [Benosman., 2010].

Chaque interaction électron-matière donne un signal unique qui fournit des informations sur l'objet étudié.

En collectant et en analysant les photons X, les systèmes EDS permettent une microanalyse de la surface des échantillons de manière qualitative et semi-quantitative. De cette manière, il est possible de déterminer les éléments présents dans l'échantillon et la composition chimique et par conséquent, d'identifier des échantillons inconnus.

III.4.1.3.2. Préparations des échantillons (MEB)

Les fragments des échantillons analysés par la microscopie électronique à balayage nécessite une métallisation afin que la charge négative acquise lors de l'observation puisse être évacuée. Cette métallisation couvre la surface étudiée par un film métallique mince d'épaisseur de 100 à 200 Å par évaporation sous vide.

Les échantillons à métalliser sont des fractions, de très faibles dimensions. Chaque échantillon est ensuite fixé sur un porte-objet avec une colle conductrice (d'argent). Les échantillons sont analysés par un microscope électronique à balayage, disponible à l'Université de Biskra.

III.4.1.4. la résistance à la compression :

Les éprouvettes utilisées sont des éprouvettes cubiques de $2 \times 2 \times 2 \text{ cm}^3$ confectionnées pour estimer la résistance à la compression de la pâte.

Les essais de compression ont été effectués après 28 jours de durcissement dans l'eau. Ces valeurs représentent la moyenne de trois essais.

III.4.2. ESSAIS SUR MORTIER :

III.4.2.1. Formulation et confection des mortiers

Un mortier de control, de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, est composé, d'une quantité de ciment, de 3 quantités de sable et d'une demi quantité d'eau.

Les mortiers avec ajouts sont préparés dans les mêmes conditions de préparation du mortier control en respectant la même composition, en substituant le ciment par une fraction massique (taux de remplacement), les quantités de sable et d'eau sont fixe.

Les tableaux III.11. III.12 et III.13. présentent la composition des ciments binaires, ternaires et quaternaires.

Tableau III.11.: Mélange des ciments binaires.

Liant	Verre (PV)	Laitier (L)	Pouzzolane (PZ)
90% CEM+10% PV30	10%	-	-
80% CEM+20% PV30	20%	-	-
90% CEM+10% PV45	10%	-	-
80% CEM+20% PV45	20%	-	-
90% CEM+10% L	-	10	-
90% CEM+10% PZ	-	-	10

Tableau III.12.: Mélange des ciments ternaires.

Liant	Verre (PV)	Laitier (L)	Pouzzolane (PZ)
80% CEM+10% PV30+10% L	10%	10%	-
70% CEM+20% PV30+10% L	20%	10%	-
80% CEM+10% PV45+10% L	10%	10%	-
70% CEM+20% PV45+10% L	20%	10%	-
80% CEM+10% PV30+10% PZ	10%	-	10%
70% CEM+20% PV30+10% PZ	20%	-	10%
80% CEM+10% PV45+10% PZ	10%	-	10%
70% CEM+20% PV45+10% PZ	20%	-	10%

Tableau III.13. Mélange des ciments quaternaires

Liant	Verre (PV)	Laitier (L)	Pouzzolane (PZ)
70% CEM+10% PV30+10% L+10% PZ	10%	10%	10%
70% CEM+10% PV45+10% L+10% PZ	10%	10%	10%

III.4.2.2. Malaxage et confection des éprouvettes

La préparation et le malaxage des mortiers 1/3 ainsi que la confection des éprouvettes sont régies par les normes NF P15-402 et NF P18-403. Directement après le malaxage, passer aux essais sur le mortier frais.

III.4.2.3. Essais sur mortier à l'état frais

A- Masse volumique du mortier à l'état frais

immédiatement après le malaxage. Le récipient est rempli en utilisant la même méthode de vibration utilisée pour les éprouvettes. La masse volumique du mortier

sera alors :

$$\rho = \frac{M}{V} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

III.4.2.4. Essais sur mortier à l'état durci

III.4.2.4.1. La résistance à la compression

Les essais mécaniques (compression et flexion) sont régis par la norme (NF EN 196-1). Ils sont effectués sur des éprouvettes de 40x40x160 mm³.

La résistance à la compression des mortiers a été évaluée sur les six demi prismes issues de l'essais de flexion. (voir figure III.5).



Figure. III.5 : Appareil de compression

III.4.2.4.2. Résistance à la flexion

L'essai de résistance à la flexion a été réalisé au niveau de laboratoire LNHC de Djelfa, à l'aide d'un appareil de flexion trois points (Figure III.6).

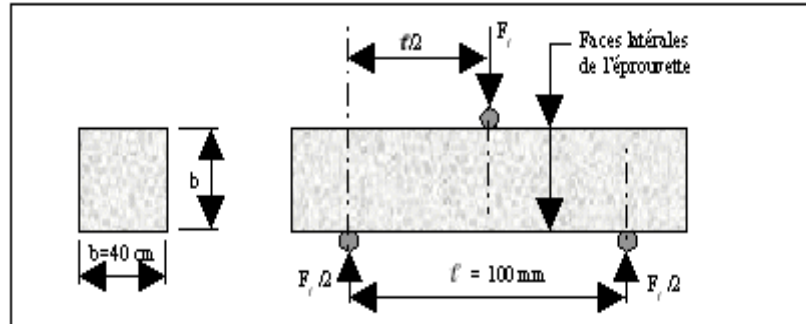


Figure. III.6: Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.

$$R_f = \frac{1,5 F_f l}{b^3}$$

III.4.2.4.3. Absorption capillaire et sorptivité

L'essai d'absorption d'eau consiste à suivre, par pesée, la quantité d'eau absorbée par une éprouvette préalablement séchée en étuve à 105°C pendant 24 h puis refroidie dans un dessiccateur pendant 24 h pour atteindre un taux d'humidité constant. Les Quatre côtés des spécimens de mortier ont ensuite été scellés par de la paraffine pour éviter l'effet d'évaporation ainsi que pour maintenir un écoulement d'eau uniaxial pendant l'essai, cela permet également une caractérisation indirecte de la porosité capillaire. Plusieurs procédures sont proposées dans la littérature. Une variante de la démarche proposée par l'Association française de la construction a été suivie dans cette étude (AFPC-AFREM., 1997). Afin d'étudier l'absorption d'eau des mortiers après 28 jours de cure sous l'eau. Chaque formulation était composée de trois échantillons de dimensions $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$. Cet essai a permis de mesurer le taux d'absorption d'eau (sorptivité) par aspiration capillaire d'éprouvettes de mortier insaturé mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique (voir figure III.7), en utilisant la formule suivante :

$$S = (Q/A)/\sqrt{t}$$

Où : S est la sorptivité ($\text{mm}/\sqrt{\text{s}}$),

Q est le volume d'eau absorbé (mm^3),

A est la section (mm^2) et t est le temps (s).

La sorptivité S est la pente de la relation entre Q/A et $\sqrt{t}$

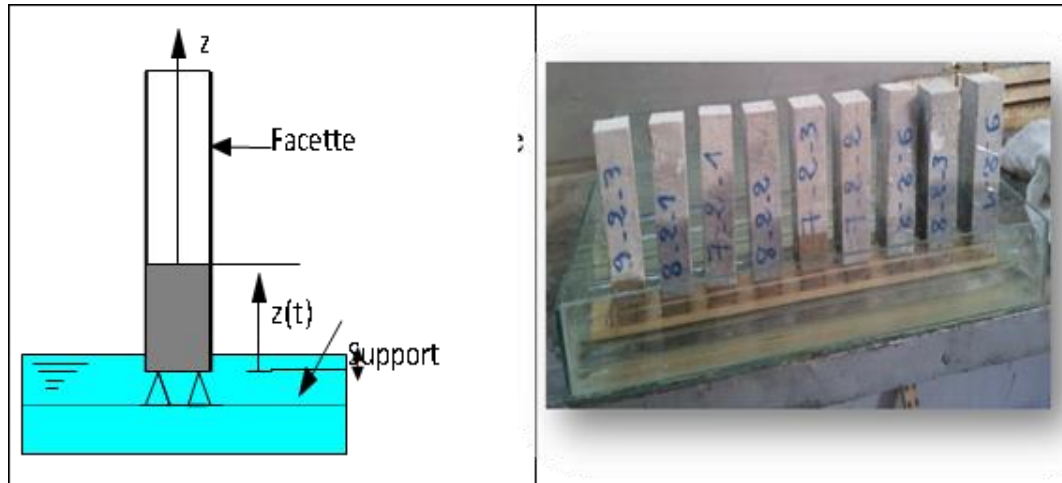


Figure III.7: Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire.

III.4.2.4.4. La Porosité accessible à l'eau

L'essai de la porosité ouverte est réalisé sur trois échantillons de chaque type de mortier après 28 et 90 jours, selon la procédure AFREM (AFPC-AFREM., 1997).

$$P_{eau}(\%) = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100$$

Avec :

M_{air} : masse de l'éprouvette à l'air

M_{sec} : masse de l'éprouvette sèche à l'air

M_{eau} : Pesée hydrostatique

III.4.2.4.5. Essai de carbonatation accélérée

Cet essai a pour but de caractériser le comportement des échantillons de mortier face au carbonatation. Le principe d'essai consiste à suivre la progression d'épaisseur de carbonatation des échantillons conservées dans un milieu riche en CO_2 .

Les échantillons testés sont des mortiers de forme prismatique (40x40x160 mm). Les dimensions des éprouvettes choisies respectent les recommandations françaises AFPC-AFREM (AFPC-AFREM, 97).

- Après démoulage, les éprouvettes à tester sont conservées pendant 45 jours dans une ambiance d'humidité supérieure à $95 \pm 5\%$.
- Placer les échantillons dans une étuve ventilée à 40 ± 2 °C pendant 48 heures avant de commencer le test de carbonatation accélérée. Les échantillons sont ensuite pesés et placés dans une chambre de carbonatation.

La chambre de carbonatation accélérée conçue (voir figure III.8), est réglée en humidité relative ($65 \pm 5\%$) et en dioxyde de carbone (50% volumique). Les profondeurs de carbonatation ont été mesurées à 7, 14, et 28 jours.



Fig. III.8 : photographie de l'enceinte de carbonatation accélérée montée au laboratoire de l'université de Laghouat.

Les profondeurs de carbonatation ont été mesurées après mouillage de la surface et pulvérisation de la solution de phénolphtaléine.

la solution de phénolphthaléine marque la limite entre la zone carbonatée et la zone saine. La mesure de profondeur de carbonatation correspond à la distance (mm) entre la surface extérieure du mortier et la limite de coloration.

III.4.2.4.5. 1. L'indicateur coloré (phénolphthaléine) de pH :

La solution phénolphthaléine est préparée comme suit : en dissoudre 1g de phénolphthaléine en poudre dans 100 ml d'éthanol et on obtient une solution incolore.

La solution de phénolphthaléine est incolore dans un milieu acide et rose dans un milieu basique.

III.4.2.4.6. Attaque des mortiers par les acides

A)- Procédure de l'essai

Des échantillons de mortier de forme prismatique ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$) ont été préparés pour caractériser la résistance chimique. Après durcissement dans l'eau pendant 28 jours, les échantillons sont pesés, puis immergés dans une solution de 5% HCl pendant 180 jours.

Avant chaque prélèvement, les échantillons sont rincés à l'eau douce, puis séchés pendant 30 minutes. Ensuite on procède à la pesée des éprouvettes. Cette opération est effectuée pour les échéances 7, 28, 90, et 180 jours.



Fig. III.9 : éprouvettes prismatiques immergées dans une solution de 5% HCl

Cette opération est effectuée périodiquement. La solution d'attaque est renouvelée chaque mois. La résistance chimique est calculée selon l'expression suivante :

$$M_L = \left[\frac{M_t - M_i}{M_i} \right] \times 100$$

Où : M_t : la masse à l'instant t

M_i : la masse avant l'attaque d'acide chlorhydrique.

CHAPITRE IV

DISCUSSIONS DES RESULTATS ET INTERPRETATIONS

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 pâtes et mortiers avec ajouts, et de les faire comparer à la littérature.

Nous nous focaliserons sur les pâtes et 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 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.

IV.2. ESSAIS SUR LA PATE DE CIMENT :

IV.2.1. La consistance normale et temps de prise :

Cet essai a été réalisé sur des pâtes de ciment avec et sans ajouts. L'objectif est de déterminer les besoins en eau pour déterminer la consistance normalisée et les temps de début et fin de prise, à l'aide de l'appareil de Vicat, selon la norme (NF EN 196-3). Trois tests à l'appareil de Vicat ont été effectués simultanément pour chaque formulation.

- Les ciments binaires :

Afin d'étudier l'effet de la poudre de verre sur la consistance et les temps de prise du ciment, La poudre de verre est ajoutée avec un taux de remplacement de 5, 10, 15 et 20%, pour les deux surfaces spécifiques (PV30 et PV45). La figure IV.1 illustre les résultats obtenus :

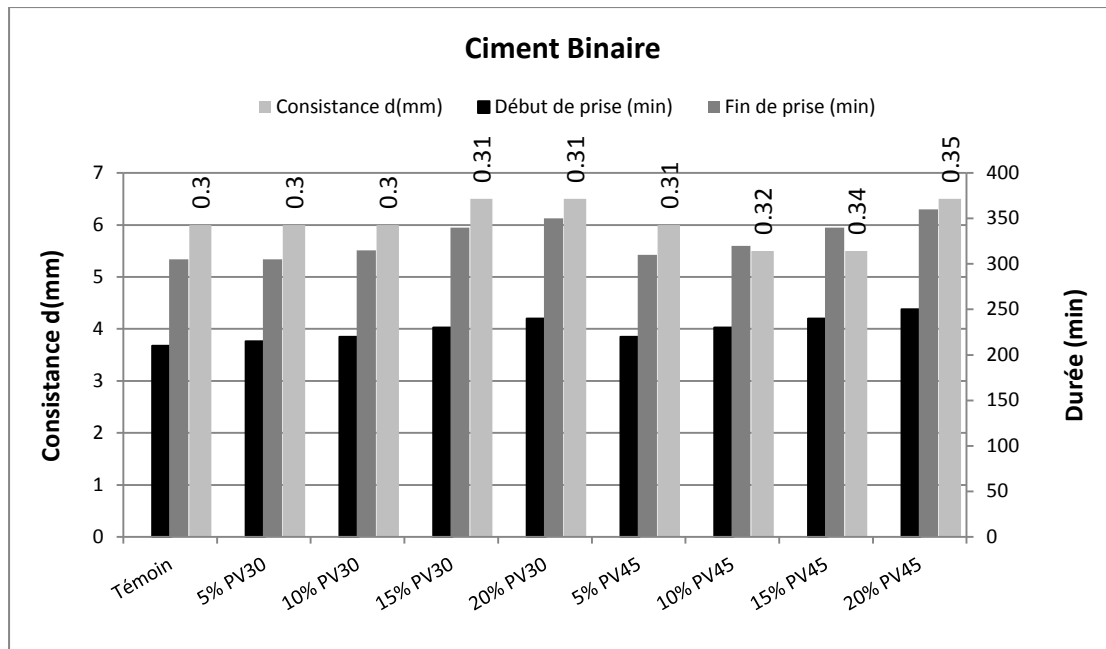


Figure IV.1 : la consistance et les temps de prise des ciment binaires contenant de la poudre de verre

D'après cette figure, il est remarqué que le besoin d'eau des pâtes de ciment contenant la poudre de verre (PV30) est comparable à celle de la pâte de ciment ($E/L=0.30$), par contre, dans le cas du ciment contenant du (PV45), la demande en eau augmente, jusqu'à ($E/L=0.35$) pour le cas des pâtes de ciment contenant 20% PV45, ce qui est peut être dû à la finesse élevée de la poudre de verre (PV45), Ces résultats coïncident avec ceux obtenus par Shayan et coll., (2006), et Yamamoto et coll., (2007).

En plus, les ciments substitués de la poudre de verre finement broyées ont des temps de prise prolongés par rapport à celle du témoin. Cette prolongation est proportionnelle à la finesse de la poudre de verre et le taux de remplacement. En plus, la quantité élevée d'eau a été un effet supplémentaire qui a également augmenté le temps de prise (maryam salgolzahi 2005). La poudre de verre comme d'autres ajouts cimentaires tels que le laitier semble retarder légèrement la prise.

- Les ciments ternaires :

Pour les ciments ternaires, nous avons incorporés la poudre de verre avec deux surfaces spécifiques (PV30 et PV45) à des taux de remplacement de 10 et 20%, la substitution de ciment par le laitier et pouzzolane est fixé à 10% . les résultats sont illustrés dans la figure IV.2.

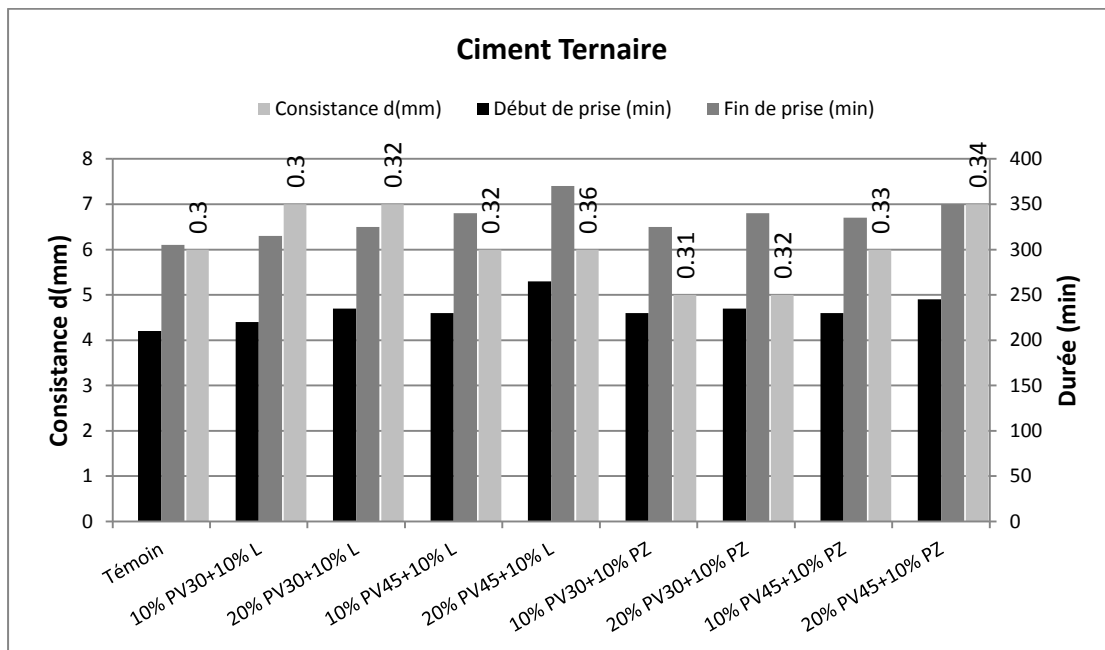


Figure IV.2 : la consistance et délais de prise des ciments ternaires

D'après cette figure, On constate que la demande en eau de tous les mélanges à base de (PV30) est comparable à celle du ciment témoin, à l'exception du couple (20% PV30+10%L) qui demande une quantité d'eau assez grande (0.34).

La figure IV.2 montre que les temps de prise des ciments ternaires sont prolongés par rapport à celui du témoin, ainsi que la demande en eau pour une substitution de 30% a augmenté par rapport à une substitution de 20%.

En comparant les mélanges ternaires entre eux, on remarque que pour une substitution de poudre de verre et laitier, la demande en eau et les délais de prise sont légèrement augmentés par rapport à une substitution de la poudre de verre et la pouzzolane

- **Les ciments quaternaires :**

Une étude de la consistance normalisée des pâtes, visant à déterminer la quantité d'eau optimale, et les temps de prise en fonction du taux de remplacement du ciment par la poudre de verre, le laitier de haut fourneau et les pouzzolanes naturelles est présentée à la figure IV.3.

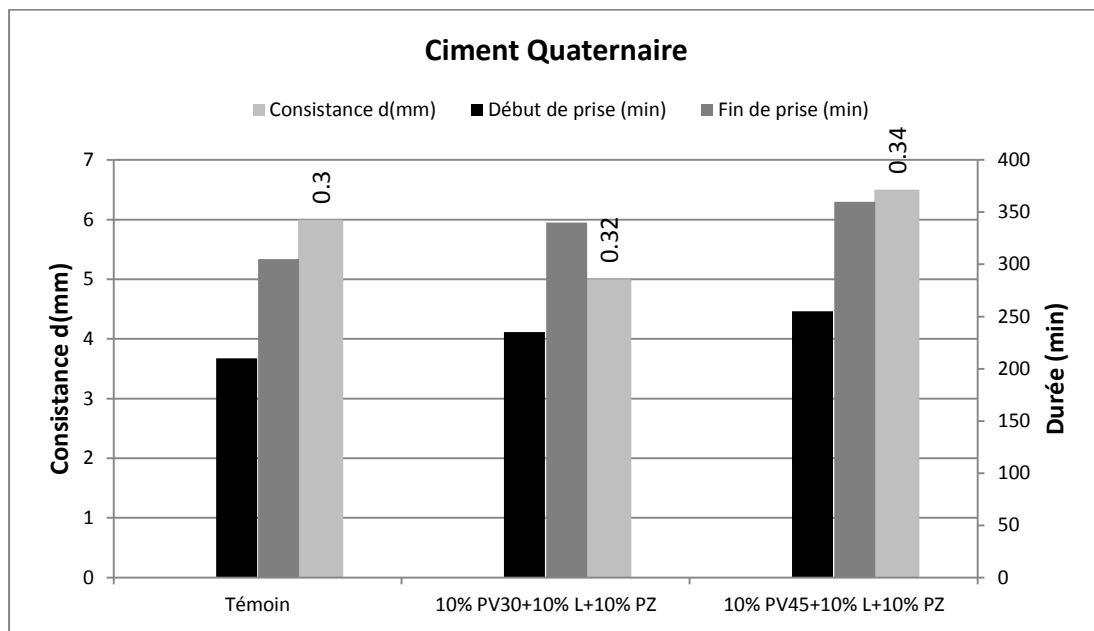


Figure IV.3 : la consistance et délais de prise des ciments quaternaires

D'après cette figure, il est constaté que presque le même phénomène qui se produit par rapport aux ciments binaires et ternaires, et la demande en eau pour obtenir une consistance normale des mélanges à base de la poudre de verre (PV45) est légèrement augmentée par rapport aux mélanges à bases de la poudre de verre (PV30), ainsi que, les délais de prise sont augmentés, ceci est due probablement à la finesse élevée de (PV45) par rapport à celle de (PV30), qui demande une quantité d'eau supplémentaire.

IV.2.2. La Résistance à la compression :

Pour les pâtes de ciment, des éprouvettes cubiques de $20 \times 20 \times 20 \text{ mm}^3$ ont été préparées pour l'essai de résistance à la compression, aux échéances 7j et 28 jours de durcissement dans l'eau.

Les résultats obtenus des ciments binaires et ternaires sont illustrés dans les figures IV.4 et IV.5

- Les ciments binaires :

Afin d'étudier l'effet de la poudre de verre sur la résistance à la compression de la pâte de ciment, La poudre de verre est ajoutée avec un taux de remplacement de 5, 10, 15 et 20%, pour les deux surfaces spécifiques (PV30 et PV45). La figure IV.4 présente les résultats obtenus.

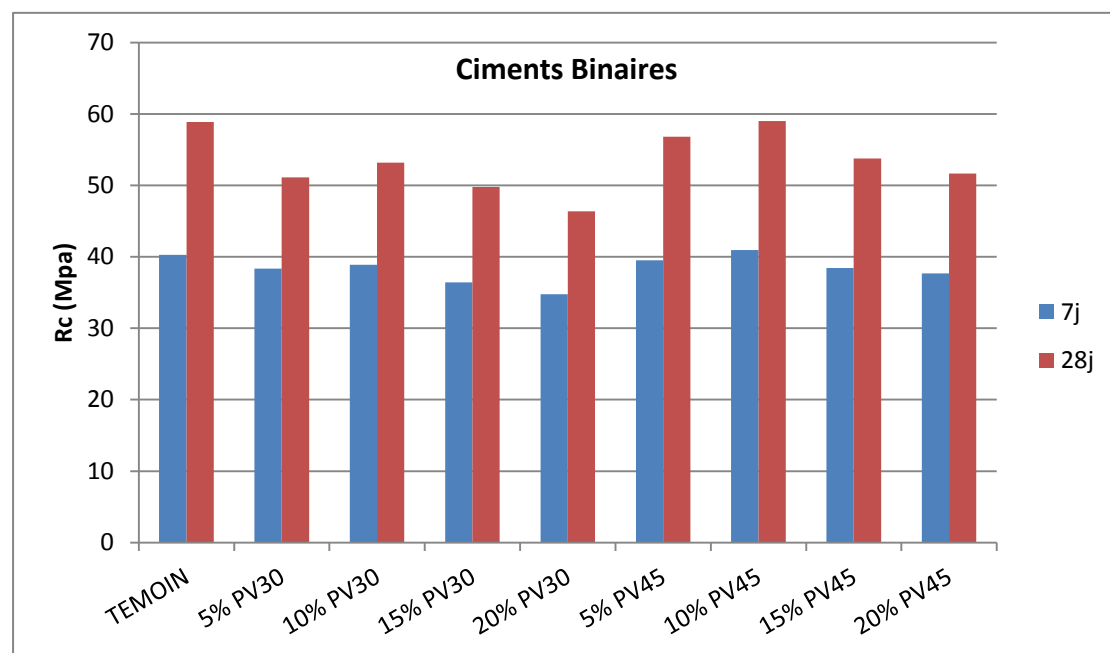


Figure IV. 4. La résistance à la compression des ciments binaires

D'après cette figure, il est noté que Les pâtes à base de poudre de verre (PV30) et (PV45) développent des résistances qui restent toujours inférieures à celle du mortier contrôle de 7 à 28 jours, Cette réduction est proportionnelle au dosage de poudre de verre.

- Les ciments ternaires :

Pour les ciments ternaires, nous avons incorporés la poudre de verre avec deux finesses (PV30 et PV45) à des taux de remplacement de 10 et 20%, la substitution de ciment par le laitier de haut fourneau et pouzzolane naturelle est fixé à 10% pour chacun . La figure IV.5 montre les résultats obtenus.

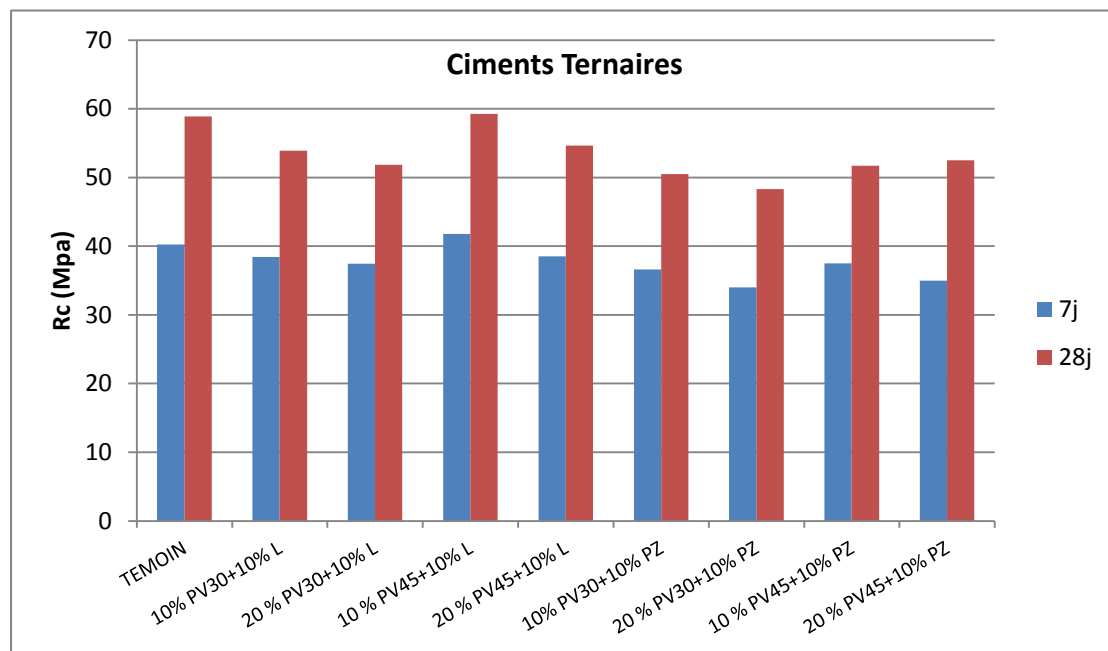


Figure IV. 5. La résistance à la compression des ciments ternaires

Selon cette figure, il est à noter que l'incorporation du couple (PV45 /Laitier) dans les ciments ternaires s'avère efficace, car il permet d'augmenter la résistance à la compression par rapport au ciment control.

IV.2.3. La microstructure de la pâte de ciment

Des images microscopiques ont été prises pour des échantillons de pâte de ciment contenant ou pas des ajouts de poudre de verre, de laitier et de pouzzolane naturelle, âgées de 28 jours.

L'objet de cette étude, est d'analyser la microstructure, la morphologie des hydrates composés, (CSH, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, l'étringite...), les microfissures ...

La microscopie électronique à balayage (MEB) est utilisée pour analyser la structure interne des différents échantillons de pâte de ciment à base de poudre de

verre, laitier et pouzzolane naturelle, après 28 jours de durcissement, des points EDS ont été marqués à l'intérieur du carrée jaune, et une analyse EDS a été effectuée sur chaque point de détection.

La position marquée et les résultats de détection ont été montrés sur les figures IV. 6, 8, 10, 12 et 14.

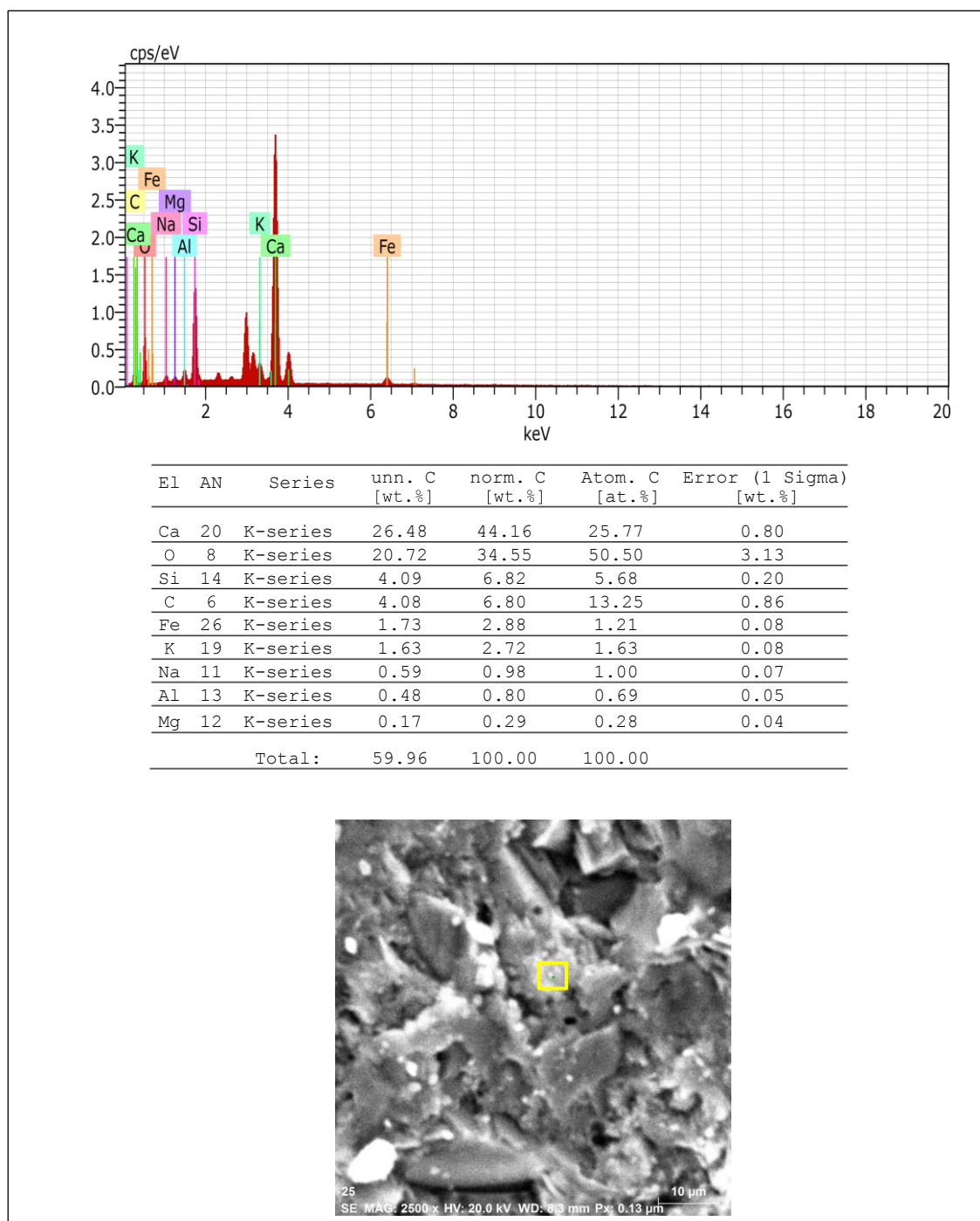


Figure IV.6. Observation au MEB/EDS de la pâte préparée avec ciment control

Le spectre EDS de la zone indiquée par le point de couleur vert à l'intérieur du carré jaune contient principalement de calcium (Ca), silicium (Si), fer (Fe), carbone (C), potassium (K) et oxydes (O), qui sont les principaux constituants que l'on peut trouver dans une pâte de ciment ordinaire.

Les photos MEB présentées par la figure IV.7, montrent Une structure relativement lâche avec de nombreux vides, après 28 jours de durcissement et de quantités de C-S-H et Ca(OH)_2 ont été observées.

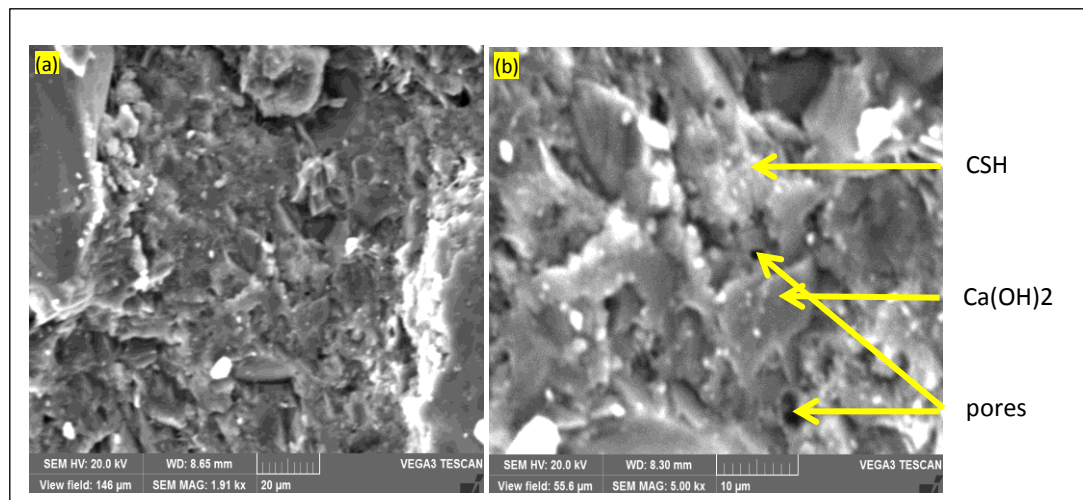


Figure IV.7. Observation au MEB de la pâte préparée avec ciment control
(a et b) Image de fragment

La figure IV.6 illustre l'observation au MEB/EDS de la pâte préparée avec 20% de poudre de verre (PV30).

Le spectre EDS de la zone indiquée par le carré jaune (Figure IV.6) a identifié principalement O, Ca, C, Mg, K, Si et Sodium (Na). Dans cette zone, le spectre EDS a indiqué une quantité de sodium (Na) en raison de la présence de la poudre de verre. Le silicium (Si), Sodium (Na) et les Oxydes (O), Ces trois éléments sont les principaux constituants de la poudre de verre, ainsi, on peut en déduire que la réaction dans cette zone n'était pas complète.

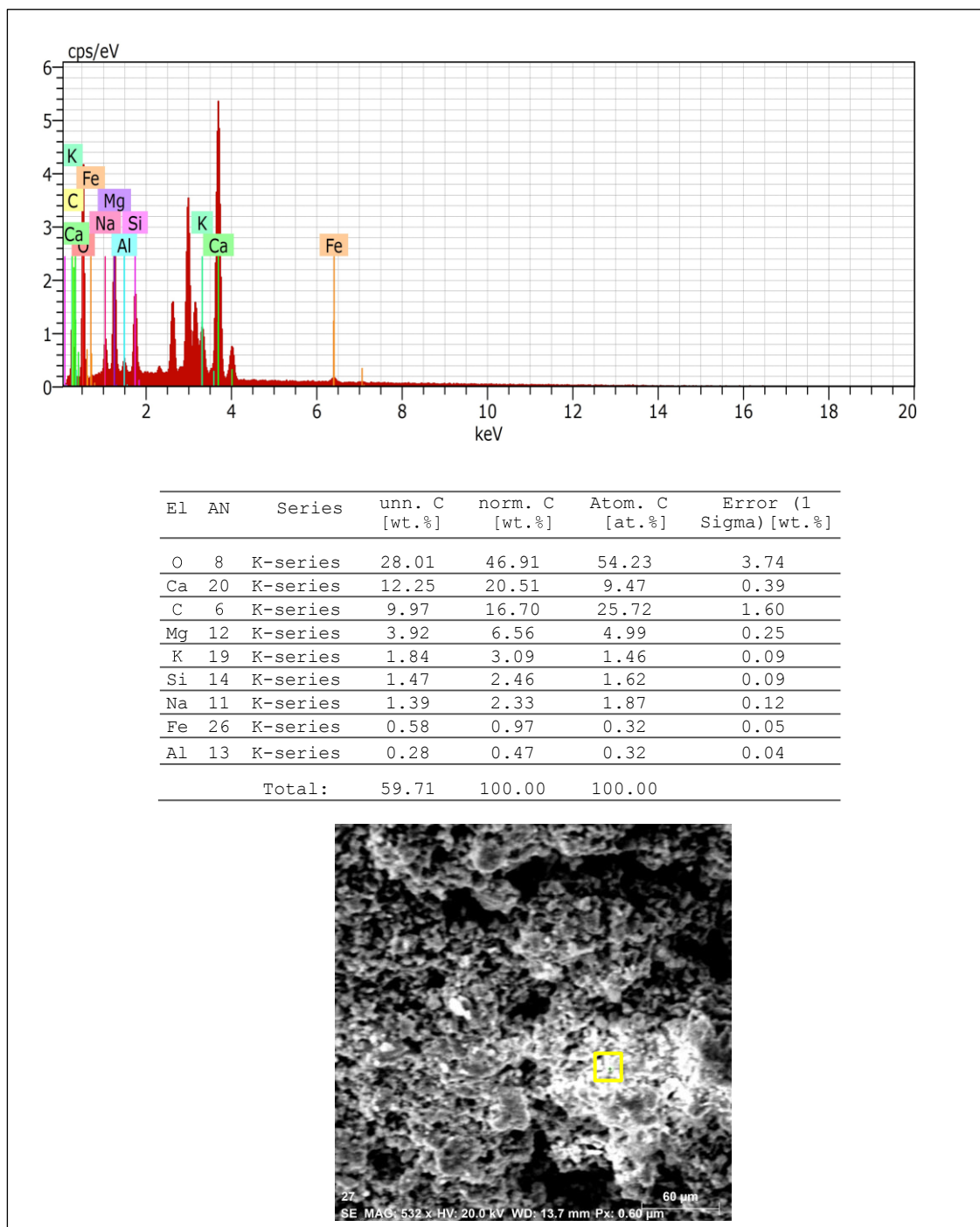


Figure IV.8. Observation au MEB/EDS de la pâte préparée avec ciment binaire (20% PV30)

Pour les pâtes de ciment préparées avec 20% de poudre de verre (PV30), (voir figure 1V.9). On remarque bien une structure très lâche, avec nombreux vides, ainsi que l'absence des cristaux de CSH et de portlandite.

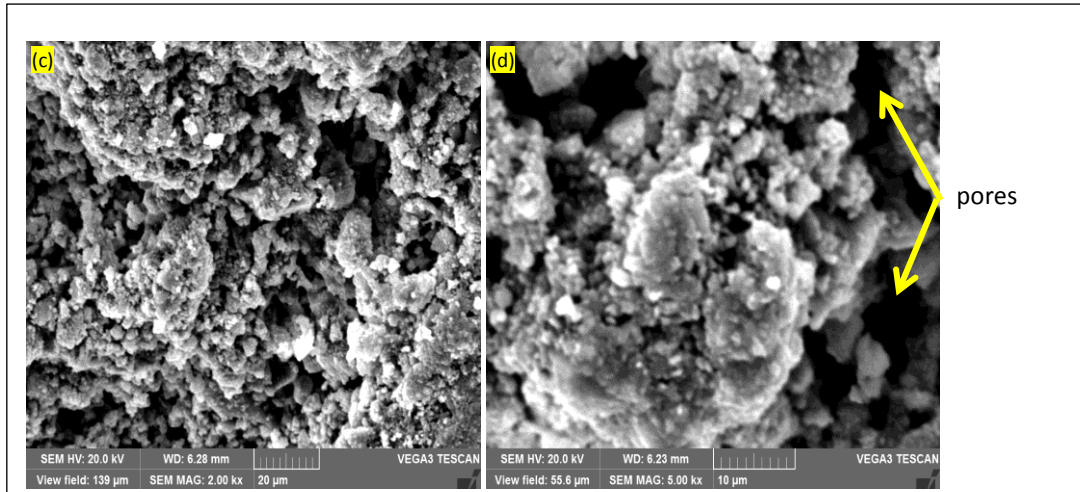


Figure IV.9. Observation au MEB de la pâte préparée avec ciment binaire (20% PV30) (c et d) Image de fragment

La figure IV.10 montre l'observation MEB/EDS de la pâte de ciment préparée avec 20% de poudre de verre (PV45).

Le spectre EDS de la zone indiquée par le point de couleur vert à l'intérieur du carré jaune (Figure IV.8) a identifié principalement O, Ca, C, Mg, K, Si et des traces de Sodium (Na). Dans cette zone, le spectre EDS a indiqué une trace de sodium (Na) en raison de la présence de la poudre de verre.

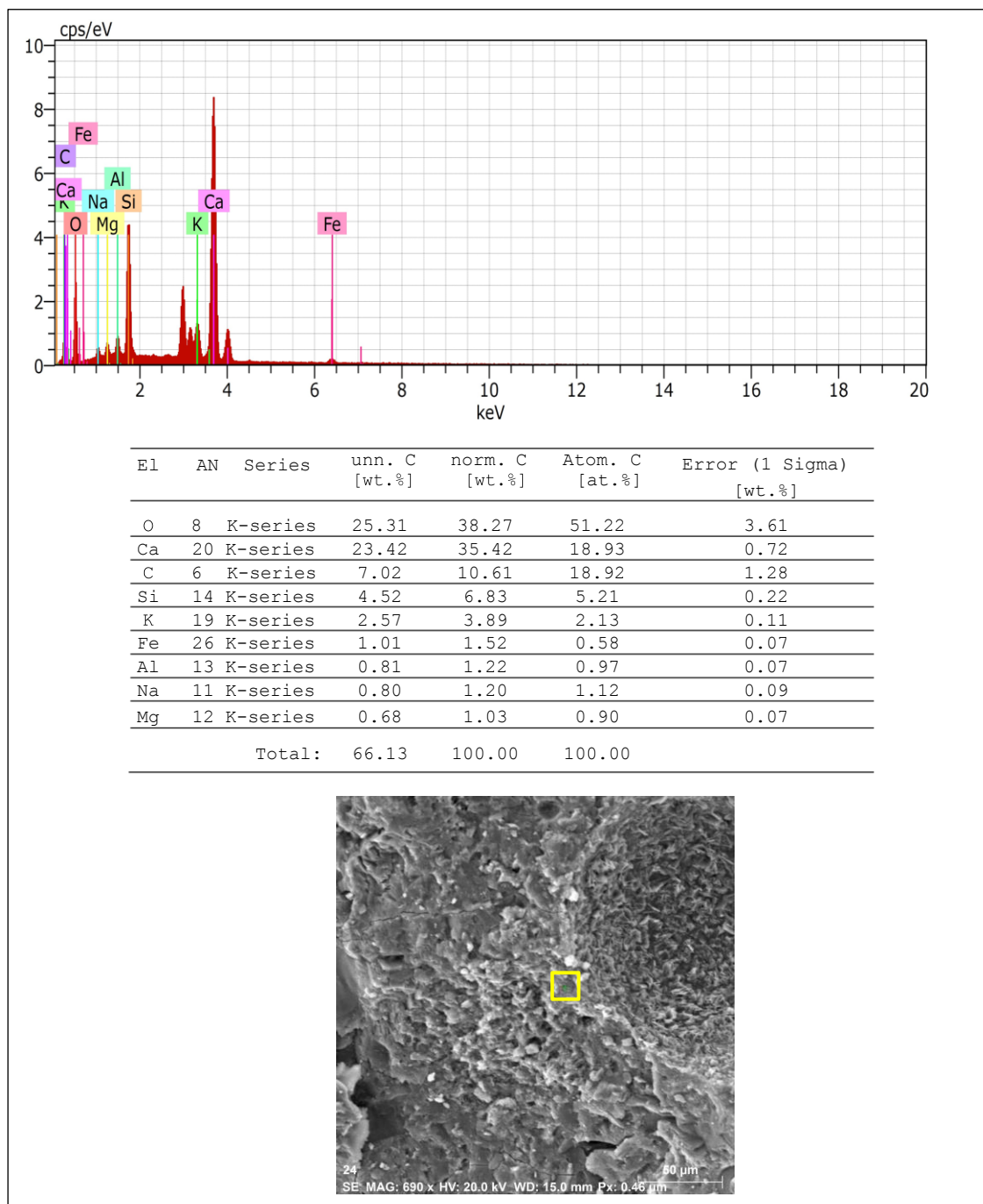


Figure IV.10. Observation au MEB/EDS de la pâte préparée avec ciment binaire (20% PV45)

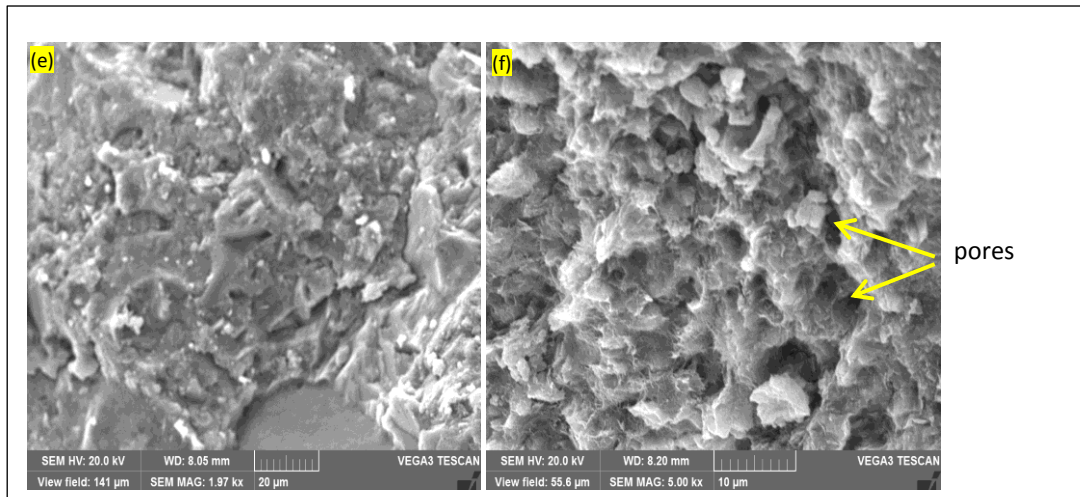


Figure IV.11. Observation au MEB de la pâte préparée avec ciment binaire (20% PV45) (e et f) Image de fragment

La Figure. IV.11 montre la microstructure de l'échantillon de la pâte de ciment avec 20% de poudre de verre (PV45), âgée de 28 jours de durcissement.

D'après cette figure, on remarque bien que L'ajout de la poudre de verre en remplacement du ciment dans la pâte traduit la génération d'une matrice dense. Des particules de déchets de verre ont été réparties de manière appropriée dans toute la matrice de liant. Ce qui est peut être due au micro-remplissage et à la réaction pouzzolanique du SiO_2 dans la poudre de verre avec l'hydrate de calcium (CH) du ciment donnant un gel de liaison supplémentaire (Baboo et al., 2011). Le liant supplémentaire produit par les déchets de verre en raison de la réaction avec la chaux disponible lui permet de continuer à gagner en résistance au fil du temps. Les déchets de verre présentent une propriété pouzzolanique en convertissant le CH (hydrate de calcium) qui est une forme de sous-produit lors du processus d'hydratation du ciment en gel de CSH (hydrate de silicate de calcium). (jawad ahmed et al., 2022). De plus, du fait du micro remplissage, les effets des déchets de verre donnent un béton plus dense, comme le montre la Figure. IV.11.

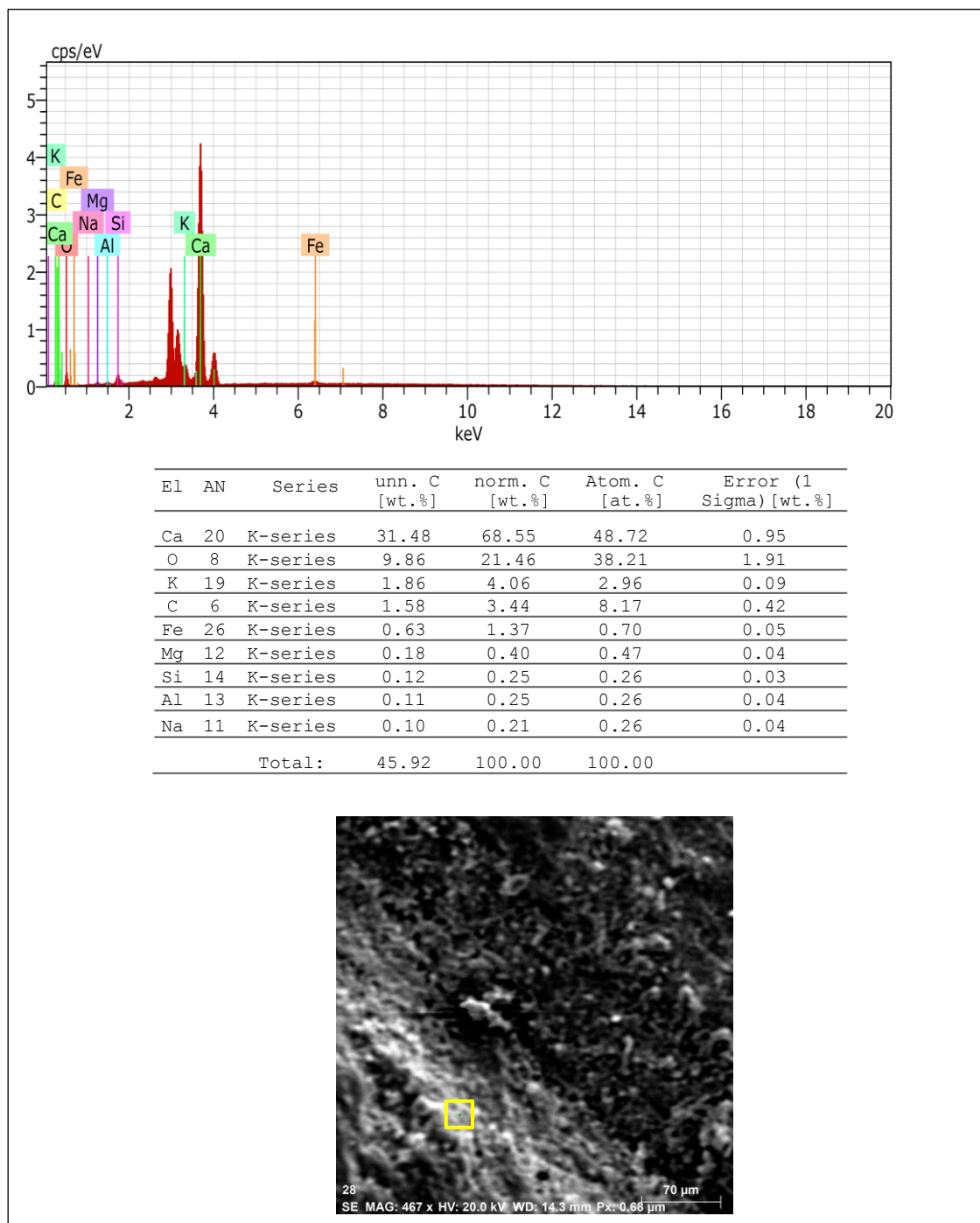


Figure IV.12. Observation au MEB/EDS de la pâte préparée avec ciment Ternaire (20% PV45+10% L)

Le spectre EDS de la zone indiquée par le point de couleur vert à l'intérieur du carré jaune (Figure IV.12) a identifié principalement Calcium (Ca), Oxydes (O), Potassium (K), Carbone (C), et le fer (Fe). Dans cette zone, le spectre a identifié l'absence de sodium (Na).

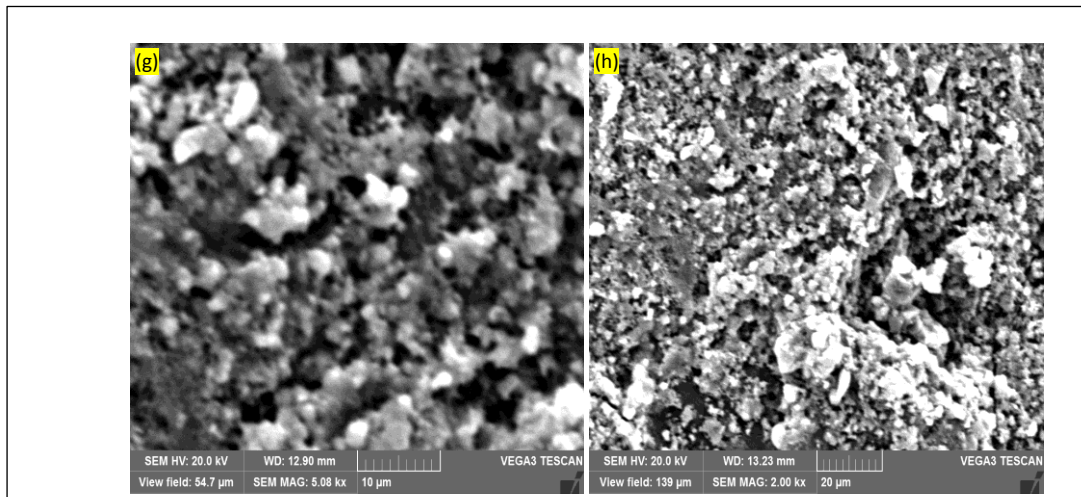


Figure IV.13. Observation au MEB de la pâte préparée avec ciment Ternaire (20% PV45+10% L) (g et h) Image de fragment

La Figure. IV.13. présente la microstructure de l'échantillon de la pâte de ciment avec 20% de poudre de verre (PV45), et 10% de laitier âgée de 28 jours de durcissement.

D'après cette figure, on remarque bien que L'ajout combiné de la poudre de verre et laitier en remplacement du ciment dans la pâte traduit la génération d'une structure relativement dense

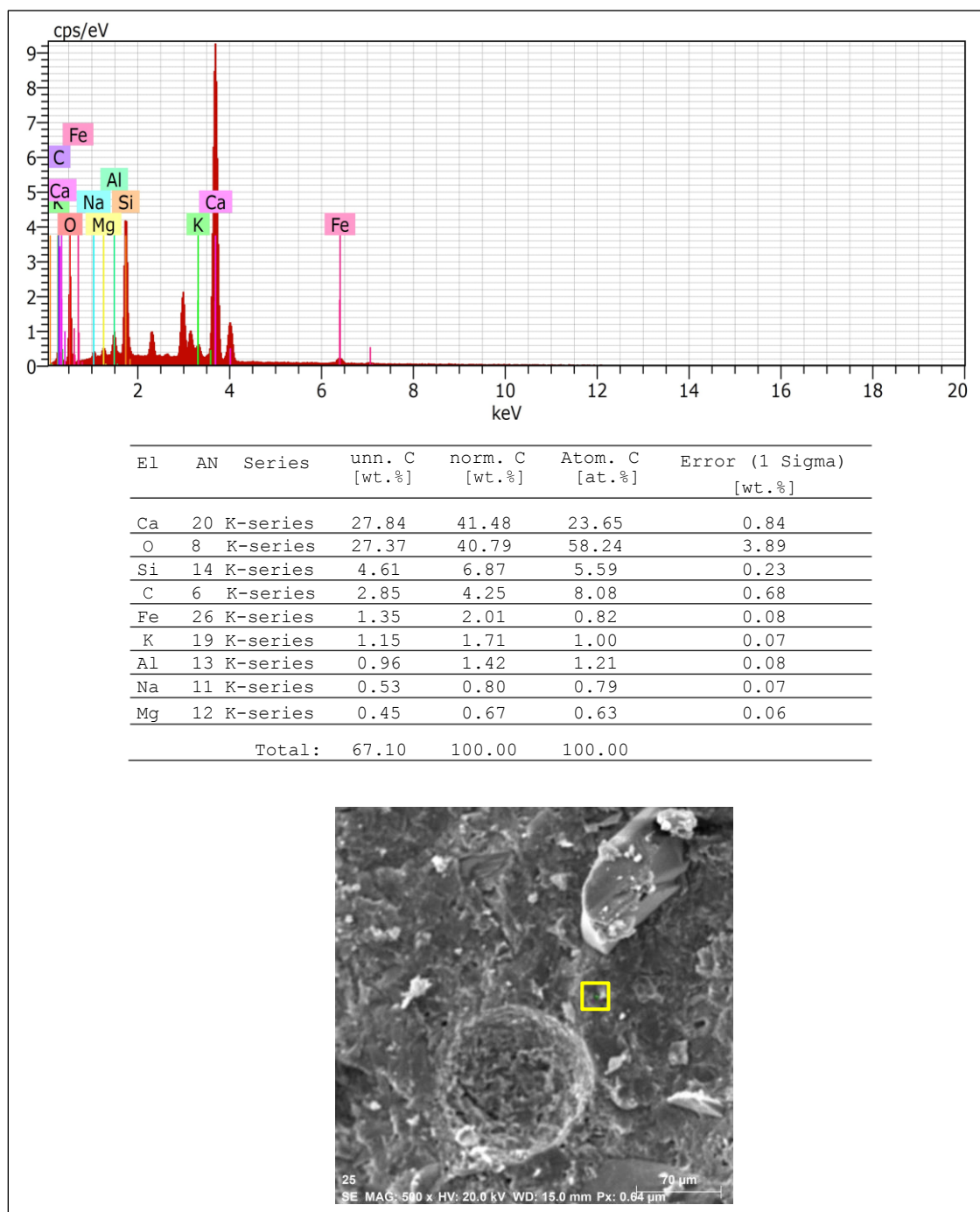


Figure IV.14. Observation au MEB/EDS de la pâte préparée avec ciment Ternaire (20% PV45+10% PZ)

Le spectre EDS de la zone indiquée par le point de couleur vert à l'intérieur du carré jaune (Figure IV.14) a identifié principalement Calcium (Ca), Oxydes (O), Silice (Si), Carbone (C), fer (Fe), Potassium (K) et l'aluminium (Al), ce qui laisse à penser que l'hydratation n'est pas encore terminée à ce stade.

La Fig. IV.15 montre la microstructure de l'échantillon préparé avec 20% de poudre de verre (PV45) et 10% de pouzzolane naturelle qui présente des grandes quantités de gypse. Des pores et des fissures capillaires sont également observés.

Il est également observé à l'intérieur de ces pores, des cristaux qui peuvent être des (CSH), silicates de calcium hydratés. La faible taille de ces cristaux ne permet pas de confirmer cette hypothèse.

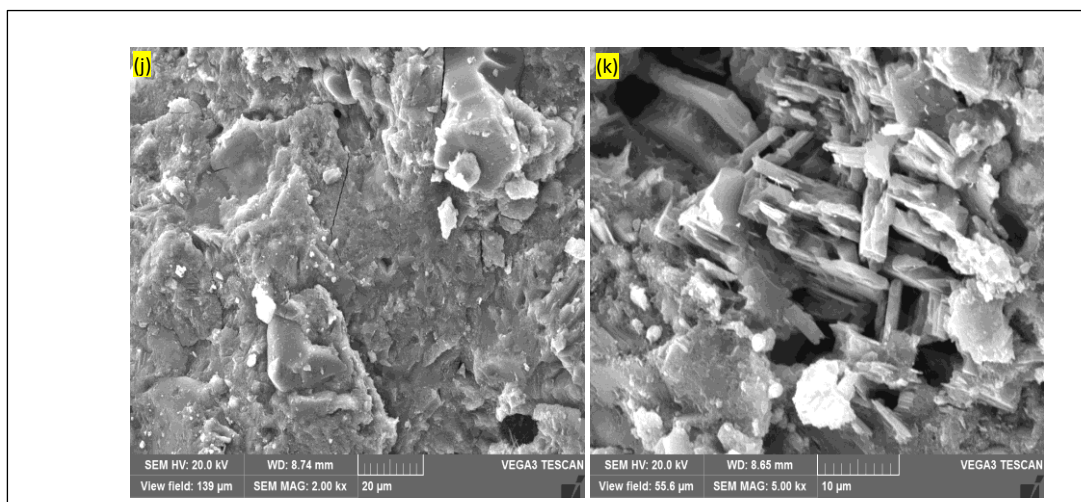


Figure IV.15. Observation au MEB de la pâte préparée avec ciment Ternaire (20% PV45+10% PZ) (j et k) Image de fragment

IV.3. Essais sur mortiers

IV.3.1. La masse volumique à l'état frais:

Immédiatement après le malaxage, et pour chaque formulation, un récipient de masse et volume connus, a été remplis manuellement suivant le même mode de vibration des éprouvettes, afin de mesurer la masse volumique du mortier à l'état frais.

- a- Les mortiers binaires :

Afin d'étudier l'effet de la poudre de verre sur la densité fraîche du mortier binaire, La poudre de verre est incorporée avec un taux de remplacement de 10, et 20%, pour les deux surfaces spécifiques (PV30 et PV45). Les résultats sont illustrés sur la figure IV.16

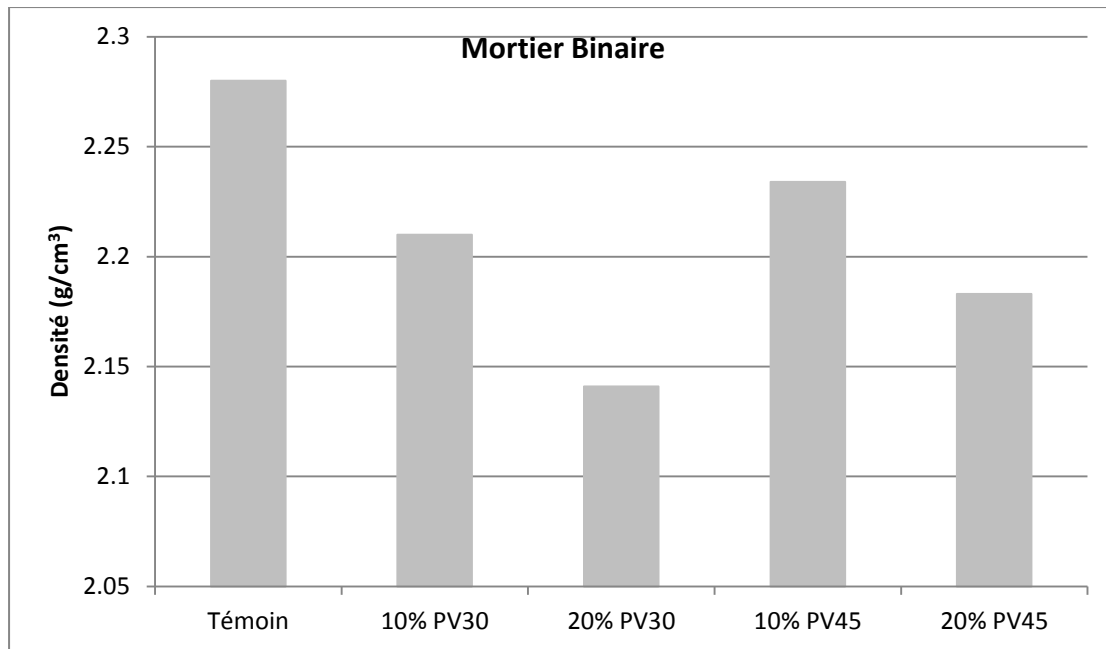


Figure IV. 16. Densité des mortiers binaire à l'état frais à base de la poudre de verre

D'après cette figure, il est à noter que la densité du mortier témoin à l'état frais était de 2.280 g/cm^3 . Une légère réduction de la densité a été observée avec l'ajout de la poudre de verre. Cette réduction est proportionnelle au pourcentage de remplacement de ciment. Ceci est due peut être à la densité plus faible du verre par rapport à celle du ciment, ce qui confirme les résultats trouvés par Yusuf M.O et al., (2022).

Le verre avait une densité de $2,54 \text{ g/cm}^3$ alors que le ciment avait une densité de $3,1 \text{ g/cm}^3$. Le mortier de poudre de verre (PV45) avait une densité de 2.410 légèrement supérieure au mortier avec la poudre de verre (PV30).

- **b- Les mortiers ternaires et quaternaires :**

Pour les mortiers ternaires et quaternaires, nous avons incorporés la poudre de verre avec deux finesses (PV30 et PV45) à des taux de remplacement de 10 et 20%, le taux de substitution de ciment par le laitier et pouzzolane est fixé à 10% pour chacun.

les résultats de la densité fraîche des différents mélanges à l'état frais sont illustrés dans la figure IV.17.

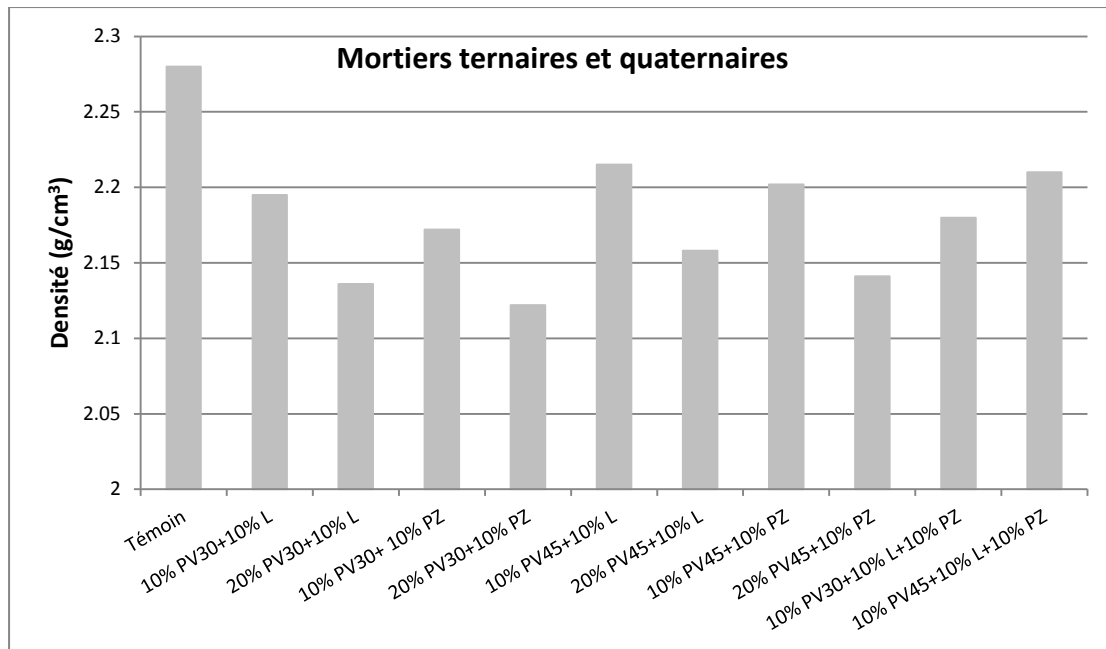


Figure IV. 17 : Densité des mortiers ternaires et quaternaires à l'état frais

La densité du poudre de verre (PV), du laitier (L) et du pouzzolane naturelle (PZ) était inférieure à celle de ciment, donc la combinaison de ces derniers a généré un mortier plus léger par rapport au mortier témoin. Par ailleurs, L'ajout de la pouzzolane naturelle et laitier dans les mélanges ternaires a augmenté la densité par rapport aux mélanges binaires mais reste inférieure à la densité du mortier témoin.

La densité la plus élevée a été observée pour la combinaison ternaire (10% PV45+10%L), avec une substitution de 20% de ciment, puis suivie par la combinaison quaternaire (10% PV45+10% L+10% PZ), tandis que la plus faible était pour la combinaison ternaire (20% PV30+10% PZ) avec une substitution de 30%.

IV.3.2. Absorption capillaire et sorptivité

Cette section porte sur la variation de la masse d'eau absorbée en fonction de la racine carrée du temps, afin de déterminer la sorptivité des différents mortiers. L'absorption a été déterminée par pesées des éprouvettes aux délais de 0, 10, 30 minutes, 1h, 3h et 24 heures (voir figure IV.18).

La figure IV.18 présente les résultats de la masse d'eau absorbée en fonction de la racine carrée du temps. La sorptivité caractérise la capacité d'absorption des éprouvettes à différents instants. Plus le réseau poreux de l'éprouvette est fin, plus la cinétique d'absorption est faible, et par conséquent plus la sorptivité est faible.

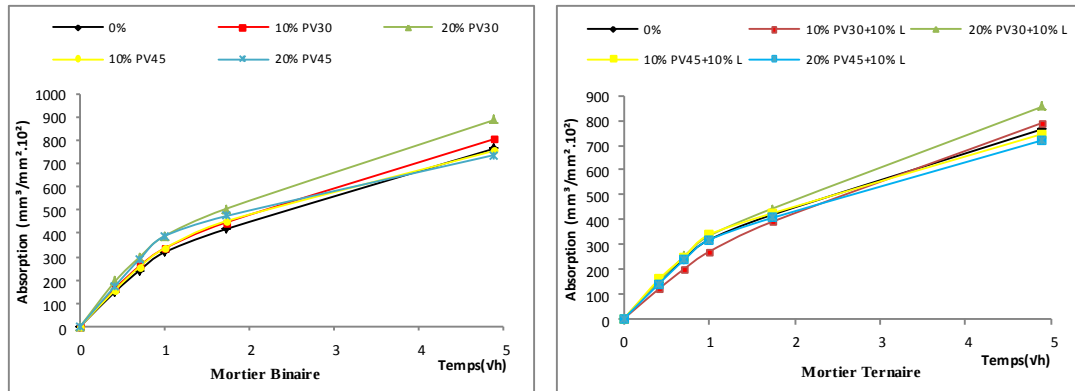


Figure IV.18. : variation de l'absorption capillaire des mortiers binaires et ternaires en fonction de la racine carrée de temps ($\sqrt{t}$)

La figure IV.18. illustre l'évolution de l'absorption capillaire des mortiers de ciment binaire et ternaire à l'âge de 28 jours. Il est constaté globalement que l'absorption des mortiers augmente avec la racine carrée du temps. Toutefois, deux parties de tendance ont été distinguées sur le graphique :

- La première partie de la courbe caractérisée par une pente très élevée traduit le remplissage des plus gros capillaires c'est l'absorption initiale.
- La seconde correspond au remplissage des capillaires plus fins. Elle se caractérise par une pente plus ou moins faible ; c'est la sorptivité.

D'après cette figure, il est remarqué que la substitution de ciment par la poudre de verre (PV45) à des taux de 10% et 20%, est très bénéfique, puisqu'elle permet une réduction de l'absorption capillaire par rapport au mortier témoin, ce qui peut être due à la finesse élevée du (PV45), cette finesse a amélioré la structure des pores et aussi la zone de transition Interface pâte-granulats grossiers de sable.

L'incorporation du couple (PV45 /Laitier) a diminuer nettement le coefficient d'absorption par rapport au mortier contrôle. Ce qui est dû probablement à l'interaction potentielle entre la poudre de verre et le laitier (l'effet de synergie). (K. Ramakrishnan & all 2017), (Kaveh Afshinnia & all 2015), ce dernier a amélioré la structure des pores et a favorisé la réaction pouzzolanique et la formation des $\text{Ca}(\text{OH})_2$ à court terme.

En revanche, l'incorporation de (PV30) a augmenté nettement l'absorption d'eau par rapport au mortier témoin, cette augmentation est proportionnelle au pourcentage de (PV30), ceci est due probablement à la finesse de (PV30) qui est quasiment faible par rapport à celle du ciment.

IV.3.3. La Sorptivité

Pour caractériser l'influence de la poudre de verre et laitier sur la structure du réseau poreux, le paramètre adapté est la sorptivité, calculée entre 1 et 24 heures.

La fig.IV.19. Présente les résultats de la sorptivité des éprouvettes de mortier en fonction de pourcentage des additions.

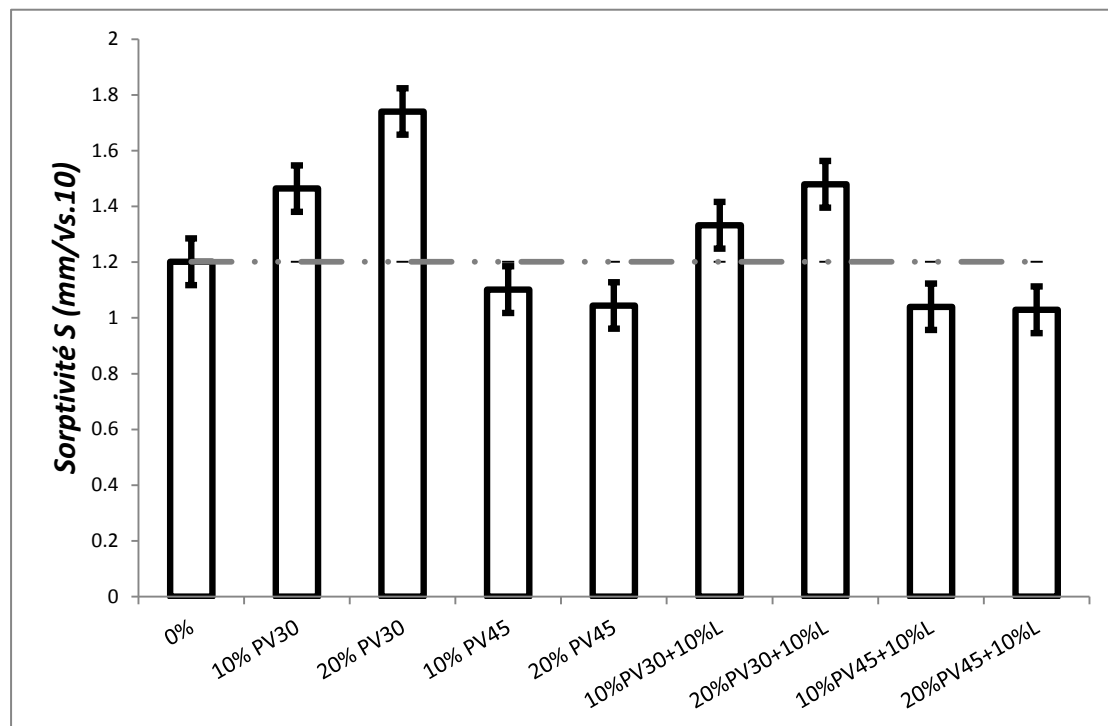


Figure IV.19. : variation de la sorptivité des mortiers en fonction du pourcentage des additions

D'après cette figure, il est clair que l'addition de (10 - 20%) de poudre de verre (PV30) a augmenté la sorptivité respectivement de l'ordre de 21.85% à 44.87% par rapport au mortier témoin, ceci est dû probablement à la finesse de (PV30) qui est quasiment faible par rapport à celle du ciment. D'autres auteurs, tels que sunny.o & all (2013), Taha et Nounu, (2008), Matos et coll (2012) ont également utilisés une poudre de verre de finesse similaire à celle du ciment, et les valeurs de la sorptivité trouvés

étaient comparables à celle du mortier control. Dont, les résultats de la présente étude pour une finesse de poudre de verre inférieure à celle du ciment semblent être en concordance.

Par conséquent, les résultats trouvés par ces auteurs concernant la sorptivité et ceux de la présente étude sont en accord.

Par contre, les mortiers contenant de (10- 20%) de poudre de verre (PV45) ont diminué la sorptivité respectivement de l'ordre de 8.32% et 13.06% par rapport au mortier control. Ce qui est probablement dû à la finesse très élevée de la poudre de verre (PV45) par rapport à celle du ciment, les particules très fines de (PV45) remplissent physiquement les pores capillaires (Zeghichi et al., 2012), réduisant ainsi l'absorption capillaire et la sorptivité.

La contribution du couple (10% PV45,10% Laitier) et (20% PV45,10% Laitier) dans les ciments ternaires a un effet bénéfique sur l'absorptivité des mortiers, car il permet de réduire l'absorptivité respectivement de l'ordre de 13.42% à 14.31%. Cette réduction est due peut être à l'interaction potentielle entre la poudre de verre et le laitier (l'effet de synergie) (Kaveh Afshinnia & all, 2015), ce dernier a amélioré la structure des pores de la pâte de ciment et de la zone de transition entre la pâte de ciment et les gros granulats. Cette zone est responsable des propriétés mécaniques et de transport du béton. (Ramakrishnan et al., 2017).

IV.3.4. La Porosité accessible à l'eau

La fig. IV.20 présente les valeurs de la porosité ouverte des mortiers contenant différentes substitutions de poudre de verre et laitier à 28j et 90 j.

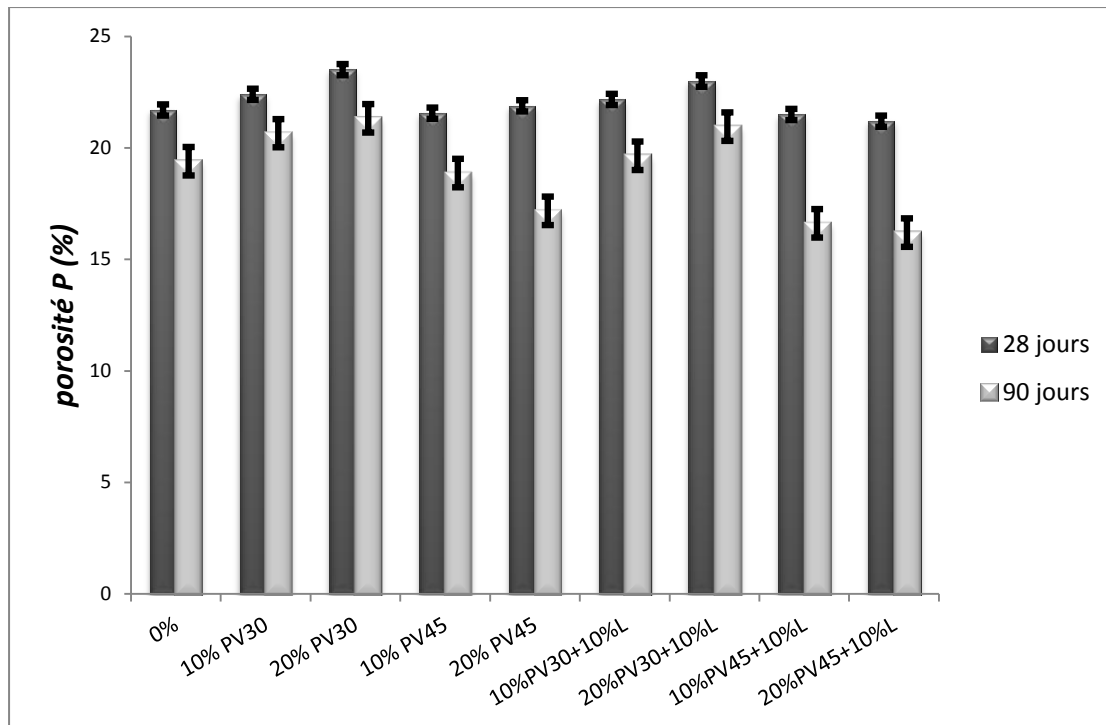


Figure IV.20. : la porosité accessible à l'eau des mortiers à 28 j et 90 j

il est constaté globalement, que le taux de diminution de la porosité ouverte entre 28j et 90 jours, est beaucoup plus élevée pour les mortiers avec (20% PV45+10% L) par rapport au mortier de control.

L'incorporation de la poudre de verre (PV45) à des taux de 10% et 20% respectivement au ciment a montré une porosité presque similaires à celle du mortier témoin à 28 Jours, par contre, à 90 jours, on remarque une diminution de la porosité qui peuvent atteindre jusqu'au 11.44%. Cette réduction peut être due à la réaction pouzzolanique du (PV45), qui a amélioré la structure des pores par la formation des C-S-H supplémentaire à long terme.

L'incorporation du couple (PV45 /Laitier) a diminuer nettement la porosité par rapport au mortier contrôle, et le couple (20% PV45/Laitier) a indiqué la porosité la plus faible à 90 jours avec un pourcentage de diminution de 16.44% par rapport au mortier témoin. Ce qui est dû probablement à l'interaction potentielle entre la poudre de verre et le laitier (l'effet de synergie), ce dernier a amélioré la structure des pores et a favorisé la réaction pouzzolanique et la formation des Ca(OH)_2 à long terme. Ces résultats sont confortés par les essais de la sorptivité et l'absorption capillaire dans la section précédente.

Trezza et Rahhal, (2019), ont trouvé une consommation complète de CH à 90 jours, générée par l'hydratation du ciment par l'action combinée de la poudre de verre et du laitier, qui peut être due à une stimulation supplémentaire de la poudre de verre sur le laitier comme naturel. l'activation alcaline et sa synergie. La présence de poudre de verre améliore la résistance à la compression du ciment de laitier et elle est attribuée à l'alcali libéré par la poudre de verre. Les résultats trouvés par ces auteurs et ceux de la présente étude sont en accord.

IV.3.5. La résistance à la compression: (Norme NF P15-471)

Les essais de la résistance à la compression ont été effectués aux échéances 7j, 28j et 90 jours de cure à l'eau.

La fig. IV.21 représente l'évolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction des différents pourcentages de poudre de verre et laitier.

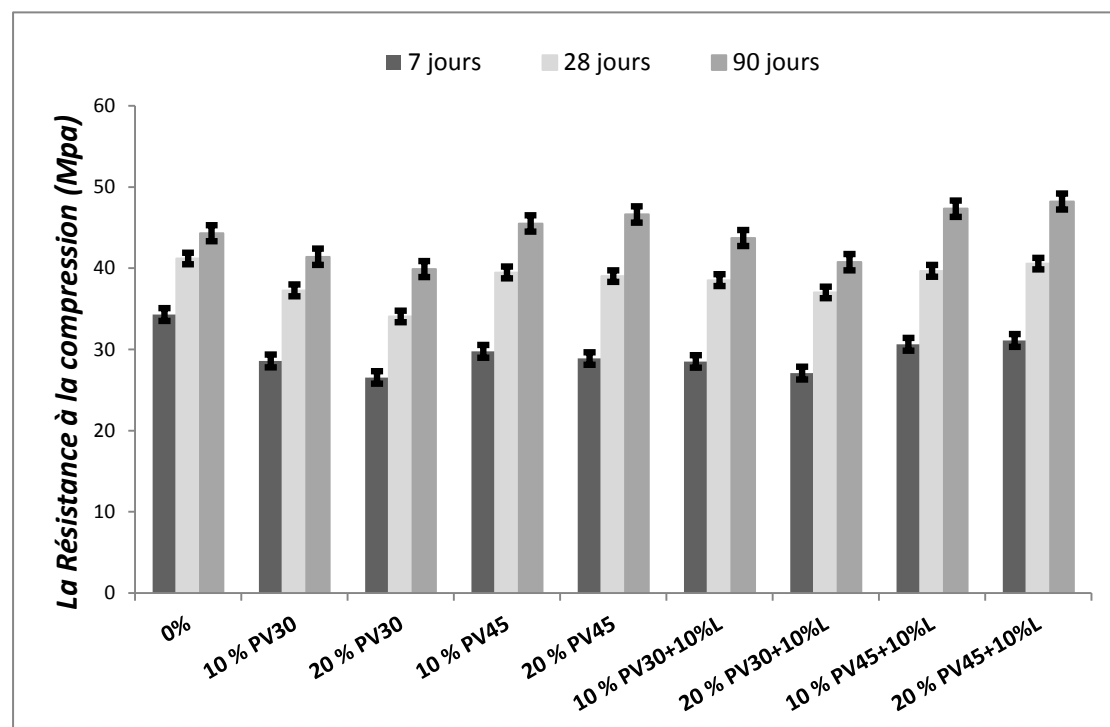


Figure IV.21. : Evolution de la résistance à la compression des mortiers binaires et ternaires en fonction de pourcentage des additions

D'après cette figure, il est noté que Les mortiers à base de poudre de verre (PV30) et (PV45) développent des résistances inférieures à celle du mortier témoin, à 7j et 28 jours, Cette réduction est proportionnelle au dosage de poudre de verre. Par

contre, entre 28 et 90 jours, la poudre de verre commence à déclencher sa réaction pouzzolanique pour atteindre des valeurs de résistance à la compression relativement élevées, mais restent toujours inférieures à celles du mortier témoin, (le cas du PV30) ce qui confirme les résultats trouvés par (Ana Mafalda M & all 2012), (Shao, Y & all 2000), (Idir R & all 2011).

D'autre part, les mortiers à base de poudre de verre (PV45) présente des résistances supérieures à celle du mortier control à 90 jours. Cette augmentation peut atteindre jusqu'au 5.21% pour une substitution de 20%. Ce qui confirme les résultats trouvés par (Hyeonggi Lee & all 2018), (Matos et al 2012) et (Khmiri et al. 2013), (Mahsa Kamali, Ali G, 2015).

La substitution de 20% de poudre de verre (PV45) s'est avérée la plus efficace (Kalakada et al., 2019, Manoj Kumar et al., 2016). à cause de l'activité pouzzolanique de (PV45). Ce dernier a réagi avec la portlandite pour générer un supplément de silicate de calcium hydraté, qui contribue au développement de la résistance. (Mahsa K, Ali, 2015) et (Kaveh Afshinnia & all, 2015).

L'incorporation du couple (PV45 /Laitier) dans les ciments ternaires s'avère efficace, car il permet d'augmenter la résistance à la compression à long terme par rapport au mortier control. Cette augmentation peuvent atteindre jusqu'à 8.80%. Ce qui est peut-être dû à l'interaction potentielle entre la poudre de verre et le laitier (l'effet de synergie) (Kaveh Afshinnia & all., 2015), ce dernier a amélioré la structure des pores et favoriser la réaction pouzzolanique et la formation des Ca(OH)_2 .

IV.3.6. La résistance à la flexion (Norme NF P15-471)

La mesure de la résistance à la flexion a été effectuée conformément à la norme NF P15-471, sur des éprouvettes prismatiques de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$.

La fig. IV.22 montre l'évolution de la résistance à la flexion des mortiers en fonction de différents ajouts.

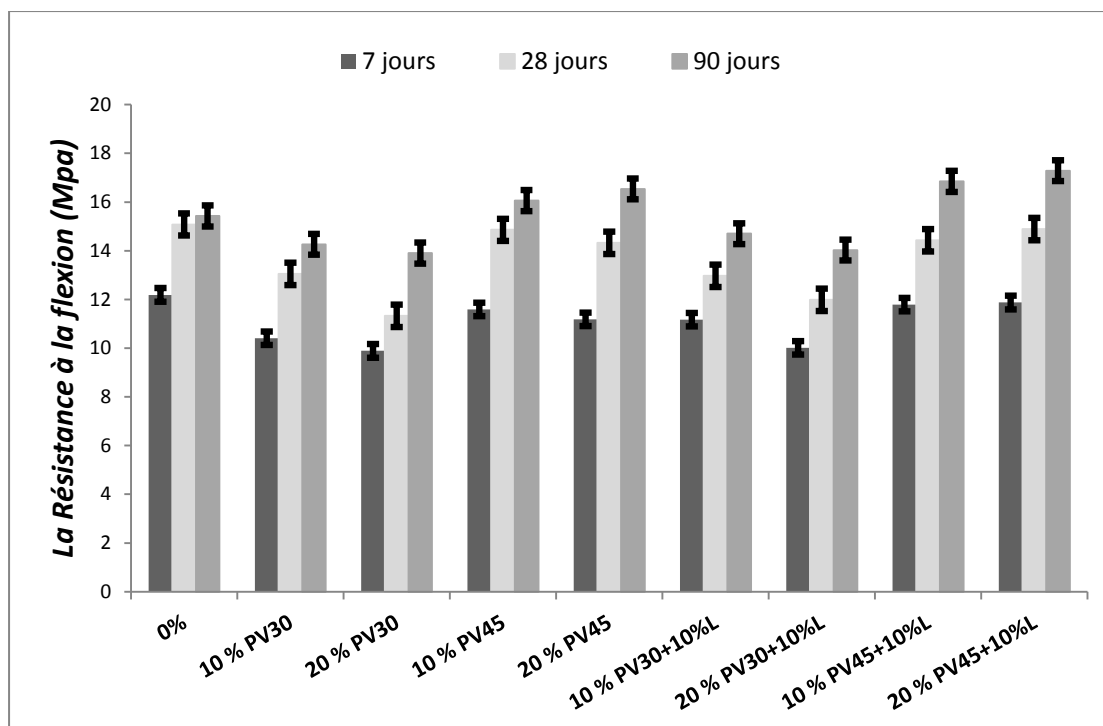


Figure IV.22. : Evolution de la résistance à la flexion des mortiers binaires et ternaires en fonction de pourcentage des additions

Il est constaté globalement, que les valeurs de résistance à la flexion des mortiers ont augmentées avec l'âge pour tous les échantillons. En plus, les résistances à la flexion des mortiers suivent la même tendance que les résistances à la compression à tous les âges.

La fig. IV.22 montre qu'à 28 jours, les mortiers à base de (PV30) et (PV45) développent des résistances qui restent inférieures à celle du mortier témoin. Cette réduction est proportionnelle à la quantité de poudre de verre. Des résultats similaires ont également été obtenus par Matos et Sousa, (2012).

En revanche, à 90 jours, les mortiers à base de poudre de verre (PV45) présentent des résistances à la flexion plus élevées que celle du mortier control. Cette augmentation peut atteindre jusqu'à 7% pour un taux de remplacement de 20%. Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par Idir et al. (2010).

Par ailleurs, pour un taux de substitution de 30%, l'incorporation du couple (PV45 / laitier) dans les ciments ternaires augmente la résistance en flexion à 90 jours par rapport à celle du mortier témoin. Cette augmentation peut atteindre jusqu'à 12 %,

ce qui peut être dû à l'interaction potentielle entre la poudre de verre et le laitier (effet synergique).

IV.3.7. Indice d'activité pouzzolanique :

La réactivité pouzzolanique de la poudre de verre et du laitier a été évalué par l'indice d'activité pouzzolanique, qui est le rapport entre la résistance de chaque combinaison et la résistance du mortier de control équivalent à 7j et 28 jours de durcissement, selon la norme ASTM C311, Voir figure IV.23

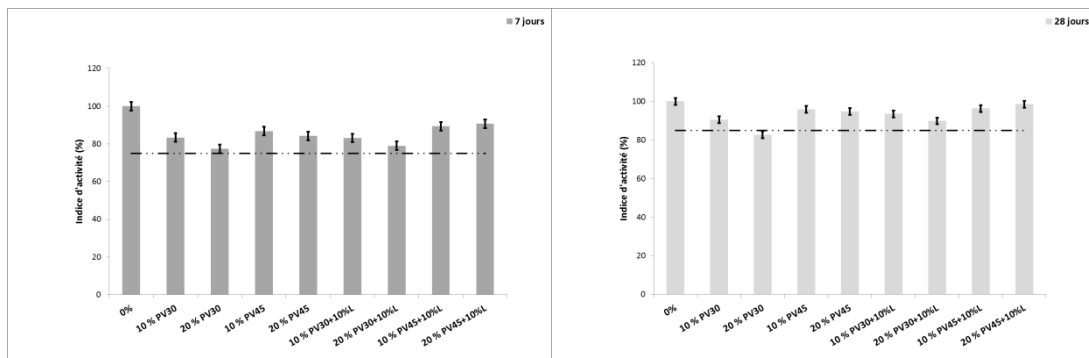


Figure IV.23. : Indice d'activité pouzzolanique à 7 j et 28 j

La fig. IV.23, montre que l'indice d'activité à 7j et 28 jours de tous les mortiers est respectivement supérieure de 75 % et 85 % , (les valeurs recommandés par la norme ASTM C618 concernant les matériaux pouzzolaniques). A l'exception du mortier binaire (20 % PV30) semble légèrement inférieur à 85 % à 28 jours, ce qui peut être dû à la faible finesse du (GP30). Il est à noter que la nouvelle norme ASTM (C 1866 / C 1866M-20) pour les pouzzolanes préconise un indice d'activité pouzzolanique de 75 % de témoin à 7 jours et de 85 % de témoin à 28 jours.

A titre d'exemple, pour les ciments binaires, les indices d'activité de résistance des mortiers contenant 10 % et 20 % de PV45 étaient respectivement 86,8 % et 84,2 % à 7 jours et 95,8 % et 94,7 % à 28 jours.

Shi et al., (2005) ont trouvé que les poudres de verre finement broyées ayant une finesse de Blaine de 262 m²/kg, 467 m²/kg et 582 m²/kg présentent un indice d'activité pouzzolanique très élevé et le comportement pouzzolanique de la poudre de verre est proportionnel à la finesse.

De même, Jihwan kim & all., (2015), ont trouvé que la poudre de verre ayant une finesse élevée développe des résistances à la compression à court terme relativement élevée.

IV.3.8. Relation entre porosité, sorptivité, absorption capillaire et résistance à la compression:

Afin de mieux comprendre l'effet des ajouts minéraux sur les propriétés de transfert de la matrice cimentaire, une variation de la porosité des mortiers a été étudiée en fonction de la résistance à la compression et la sorptivité.

IV.3.8.1. Corrélation entre la sorptivité et la résistance à la compression :

La figure IV.24. Montre une bonne corrélation ($R^2 = 0,9252$) entre la sorptivité et la résistance à la compression indépendamment du pourcentage des additions de poudre de verre et de laitier, Cela montre que plus la résistance est élevée, plus la sorptivité est faible (KazimTurk, et all, 2013).

A titre d'exemple, lorsque la sorptivité du mortier passe de $1.029 \text{ kg/m}^2/\sqrt{\text{h}}$ pour le couple (20% PV45, 10% L) à $1.74 \text{ kg/m}^2/\sqrt{\text{h}}$ pour la substitution (20% PV30), la résistance à la compression a été réduite de 15,47%.

certain auteurs, Thokchom et coll, (2009), Jena et al, (2018), Yang et al, (2019), décrivent la sorptivité comme étant un facteur de durabilité. Des études antérieures sur le béton ont montré que les spécimens ayant une sorptivité plus élevée ont enregistré une durabilité moindre.

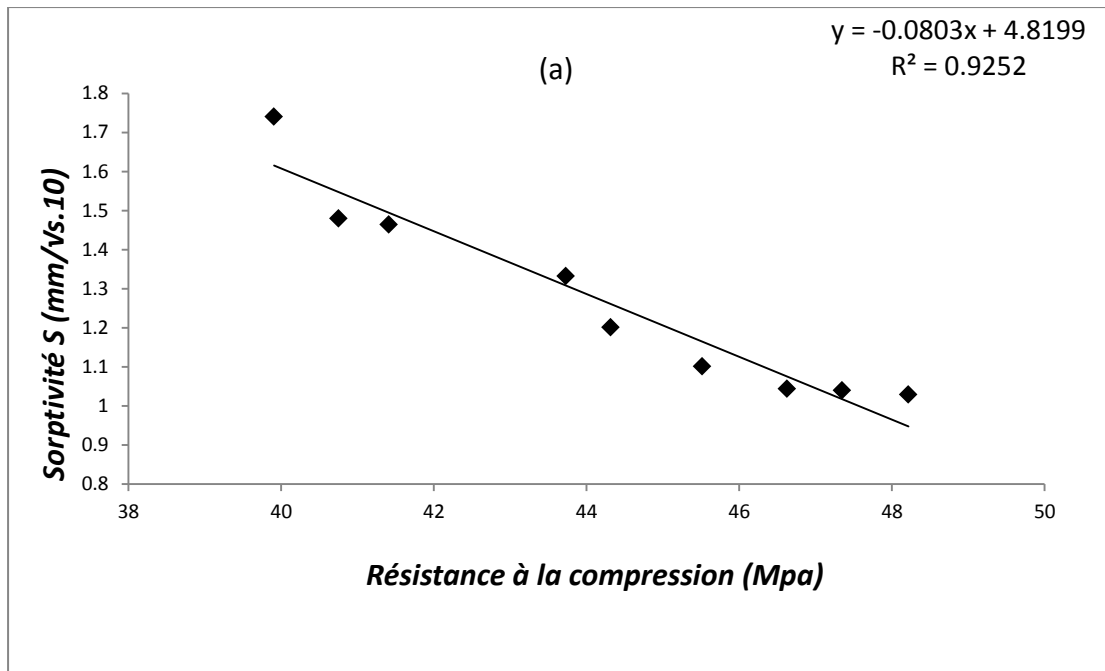


Figure IV.24 : Corrélation entre la sorptivité et la résistance à la compression

IV.3.8.2. Corrélation entre la porosité ouverte et résistance à la compression :

La fig. IV.25. représente la variation de la porosité ouverte des différents mortiers étudiés en fonction de la résistance à la compression à 28 jours.

D'après cette figure, il est remarqué une bonne corrélation entre la porosité ouverte et la résistance à la compression ($R^2 = 0,8759$), ce qui confirme la tendance suscitée par les études de (Boucetta., 2014) et (Jaya et al., 2011).

A titre d'exemple, lorsque la porosité du mortier passe de 21.2% pour le couple (20%PV45, 10%L) à 23.5% pour la substitution (20% PV30), la résistance à la compression a été réduite de 16,04%.

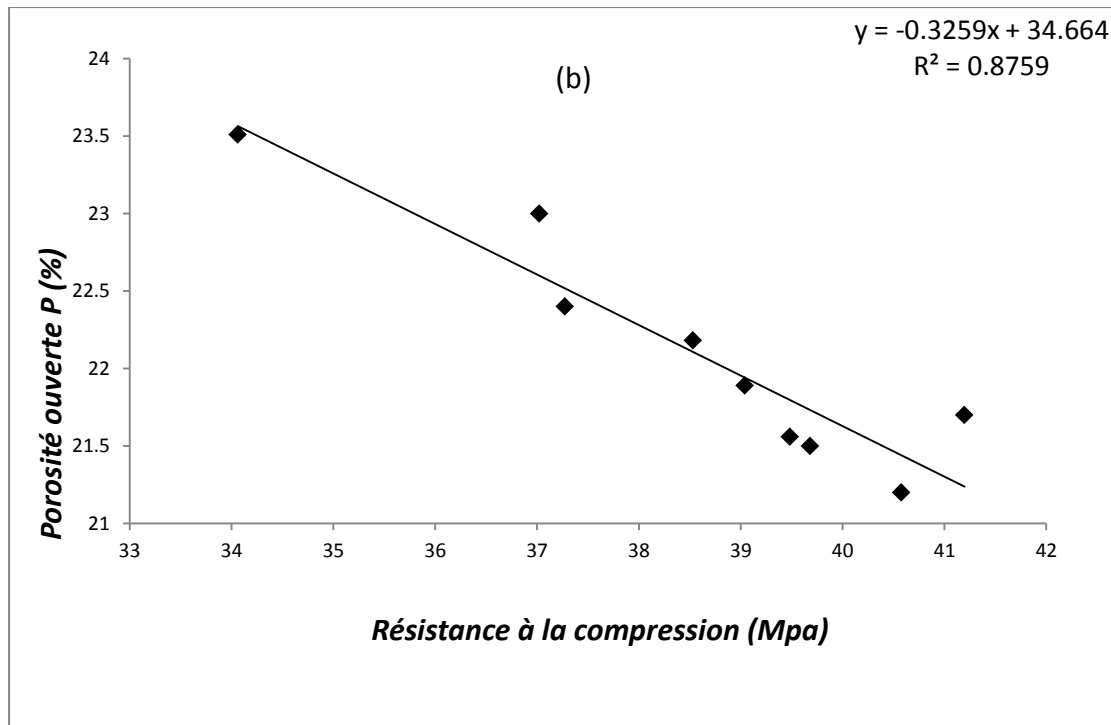


Figure IV.25 : Corrélation entre la porosité et la résistance à la compression

IV.3.8.3. Corrélation entre la porosité ouverte et l'absorption capillaire :

La figure IV.26 montre une très bonne corrélation entre la porosité ouverte et l'absorption capillaire ($R^2 = 0,9502$). Seul le point représentant le mortier binaire (20% GP45) semble plus excentré. Des études antérieures ont indiqué que plus la porosité est élevée, plus l'absorption capillaire est importante (Barnat-Hunek et al., 2019).

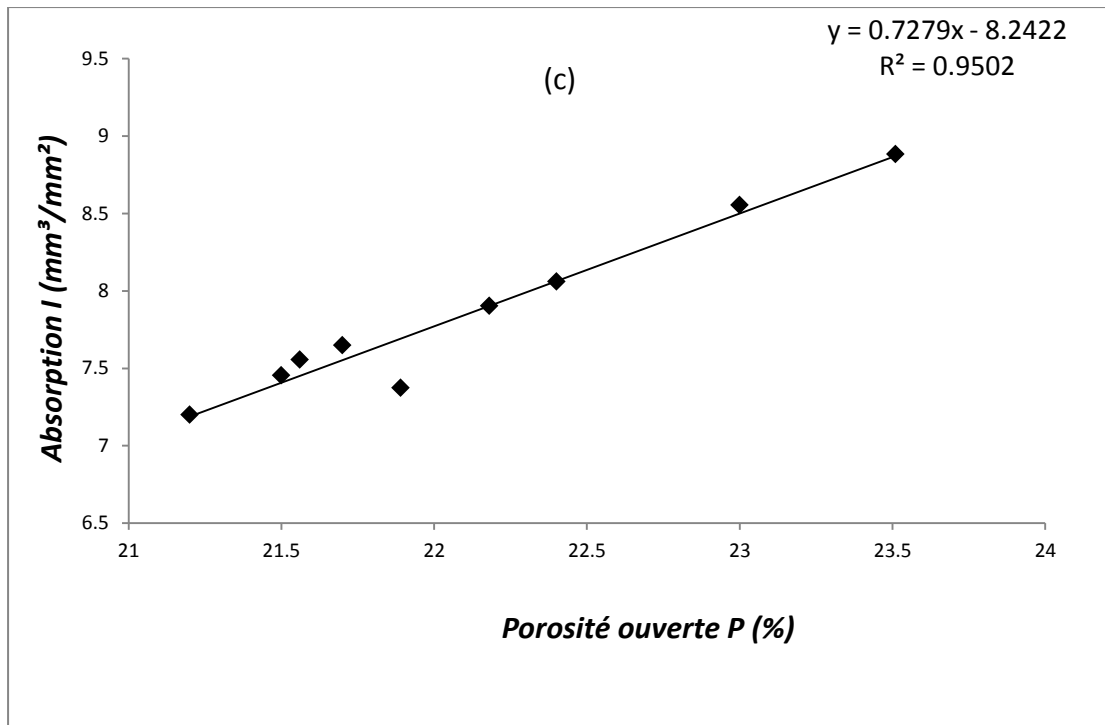


Figure IV.26 : Corrélation entre la porosité et l'absorption capillaire

IV.3.8.4. Corrélation entre la sorptivité et la porosité accessible à l'eau :

La fig. IV.27 montre la relation entre la sorptivité et la porosité ouverte des mortiers contenant différents pourcentages de poudre de verre et de laitier, d'après cette figure, on peut conclure qu'il existe une forte corrélation entre la sorptivité et la porosité ouverte ($R^2 = 0,9009$).

Comme la sorptivité du mortier passe de 1,74 kg/m²/√h pour la substitution (20% GP30) à 1,029 kg/m²/√h pour le couple (20% GP45, 10% L), la porosité a été réduite de 9,82 %. Ces résultats confirment les études antérieures de (Lopez-Uceda et al., 2016).

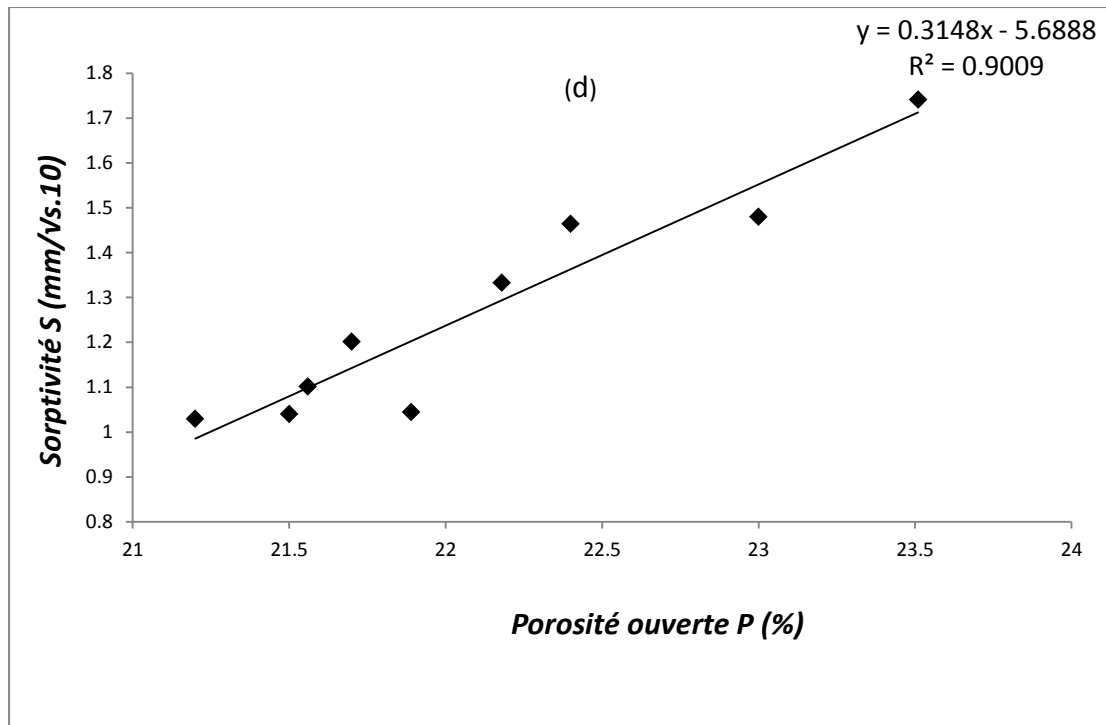


Figure IV.27 : Corrélation entre la porosité ouverte et la sorptivité

IV.4 Solution agressive :

IV.4.1. Introduction :

Compte tenu des résultats de l'étude sur pâtes, nous avons retenu certaines formulations, présentant de bonnes résistances mécaniques, qui seront utilisés pour les mortiers.

Le principe de cet essai, est d'immerger des éprouvettes de mortier dans une solution agressive d'acide chlorhydrique de 5% HCl, pendant 180 jours. La solution agressive est renouvelée chaque mois afin de garder un pH constant, les critères de durabilité explorés sont les pertes de masses.

IV.4.2. Observations visuelles

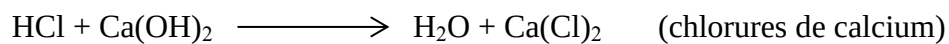
l'évaluation préliminaire de l'aspect extérieur des éprouvettes immergés dans une solution d'acide chlorhydrique (HCl), par une inspection visuelle nous permet d'observer toute sorte de dégradation ou d'endommagement superficielle.

Dans la solution d'acide chlorhydrique, et après 7 et 28 jours d'immersion, les échantillons ont un aspect (figure IV.28).



Figure IV.28 : éprouvettes de mortier après 7j (à gauche) et 28 j (à droite)
d'immersion dans 5% HCl

La fig. IV.28 nous permet d'observer un décapage de la surface des échantillons et formation des cavités superficielles, ce qui est du probablement à la solubilité du sel formé (chlorure de calcium) par la réaction de l'acide chlorhydrique et la portlandite, et à sa grande lixiviation à l'extérieur. (Logbi A., 2019). Cette réaction est gérée par l'équation suivante :



IV.4.3. La Perte de masse

Des échantillons de mortier de forme prismatique (4x4x16 cm³) ont été préparés pour caractériser la résistance chimique. Après durcissement dans l'eau pendant 28 jours, les échantillons sont pesés, puis immergés dans une solution de 5% HCl pendant 180 jours.

Avant chaque prélèvement, les échantillons sont rincés à l'eau douce, puis séchés pendant 30 minutes. Ensuite on procède à la pesée des éprouvettes. Cette opération est effectuée pour les échéances 7, 28, 90, et 180 jours.

L'évolution de la perte des masses des différents mortiers immergés dans la solution agressive est présentée dans les figures. IV.29 et IV.30

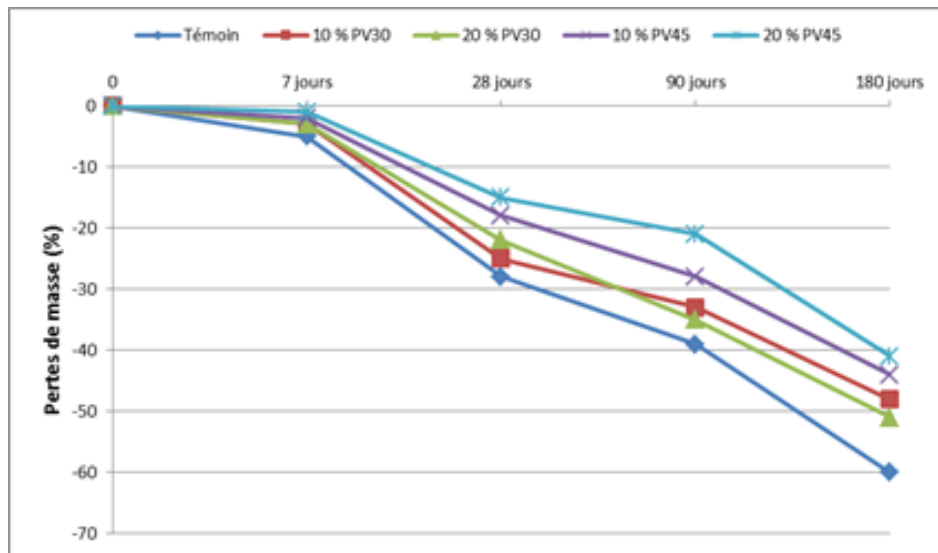


Figure IV.29 : évolution de la perte de masse des mortiers binaires immergées dans une solution de 5% HCl en fonction du temps d'immersion

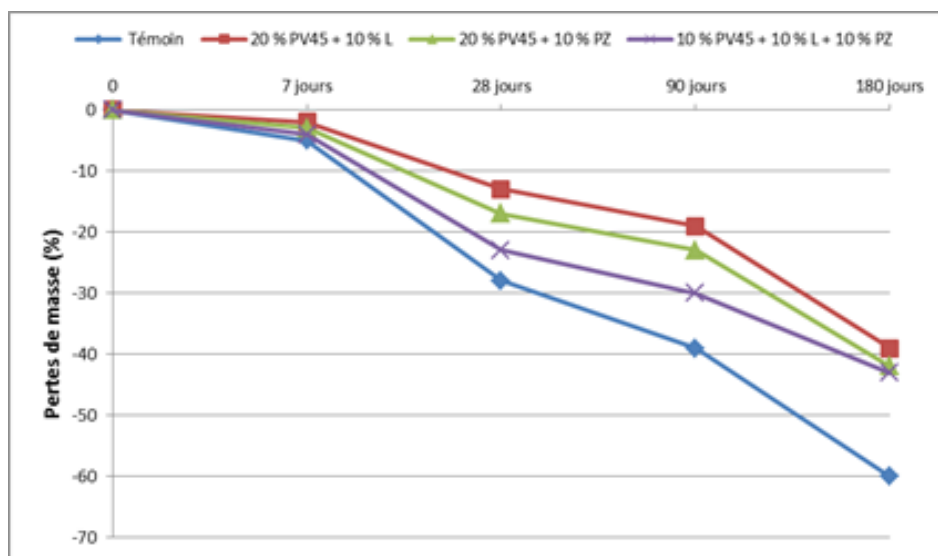


Figure IV.30 : évolution de la perte de masse des mortiers ternaires et quaternaires immergées dans une solution de 5% HCl en fonction du temps d'immersion

Les Figures. IV.29 et IV.30 montrent que les pertes de poids les plus importantes sont obtenues pour le mortier de control. En plus, les mortiers contenant 20% de (PV45) ont présentés des améliorations nettes par rapport au mortier control.

Toutes les compositions (avec et sans ajouts) perdent de leur poids dès la première semaine de leur immersion dans la solution HCl, mais avec des valeurs qui restent faibles jusqu'aux 28 jours. A partir du 2^{ème} 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 ; Logbi.A., 2019).

En plus, d'après la figure IV.29, les valeurs les plus faibles de la perte de masses pour les ciments binaires sont obtenues pour la substitution de (20% PV45), ceci est due probablement à l'effet de remplissage des pores du (PV45) qui limite la pénétration de la solution acide dans la matrice pendant la période d'exposition. Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par (Khan et al., 2022).

La contribution de la substitution (20% PV45, 10% Laitier) pour les ciments ternaires et (10% PV45, 10% Laitier, 10% PZ) pour les ciments quaternaires (Fig. IV.30), a un effet bénéfique sur la perte de masse des mortiers, car elle permet de réduire la perte de masse à 180 jours d'immersion dans HCl respectivement de l'ordre de 35% à 28.3% par rapport au mortier témoin. Cette réduction est due peut être à l'effet de remplissage des pores par les ajouts, qui a amélioré la structure des pores et limiter la pénétration de la solution acide dans la matrice pendant la période d'exposition.

IV.5. Essai de carbonatation accélérée :

L'objectif de cet essai est la caractérisation du comportement des échantillons de mortier face au carbonatation. Le principe d'essai consiste à suivre la progression d'épaisseur de carbonatation des échantillons conservées dans un milieu riche en CO_2 .

Les échantillons testés sont des mortiers de forme prismatique (40x40x160 mm). Les dimensions des éprouvettes choisies respectent les recommandations françaises AFPC-AFREM (AFPC-AFREM, 97)

Les profondeurs de carbonatation ont été mesurées après mouillage de la surface et pulvérisation de la solution de phénolphtaléine.

la solution de phénolphtaléine marque la limite entre la zone carbonatée et la zone saine. La mesure de profondeur de carbonatation correspond à la distance (mm) entre la surface extérieure du mortier et la limite de coloration. (voir fig. IV.31).



Figure IV.31 : Eprouvettes de mortiers après 28 jours de carbonatation

La comparaison de la carbonatation du mortier control (sans ajout) et celle des mortiers contenant différents pourcentages de poudre de verre, laitier et pouzzolane naturelle s'effectue sur les valeurs moyennes de profondeur carbonatée.

Les figures IV.32 et IV.33 illustrent l'évolution des profondeurs carbonatées des mortiers binaires, ternaires et quaternaires.

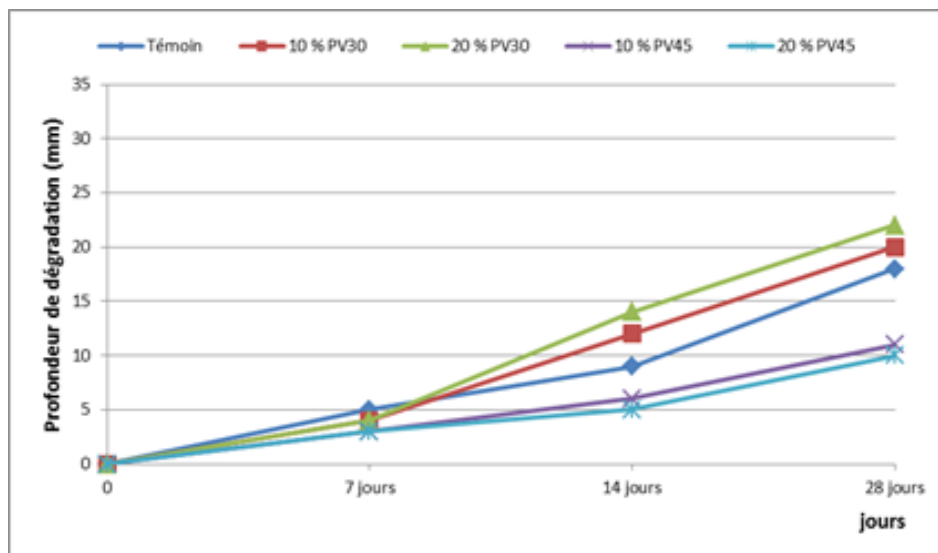


Figure.IV.32. Profondeur de carbonatation des mortiers binaires en fonction du temps

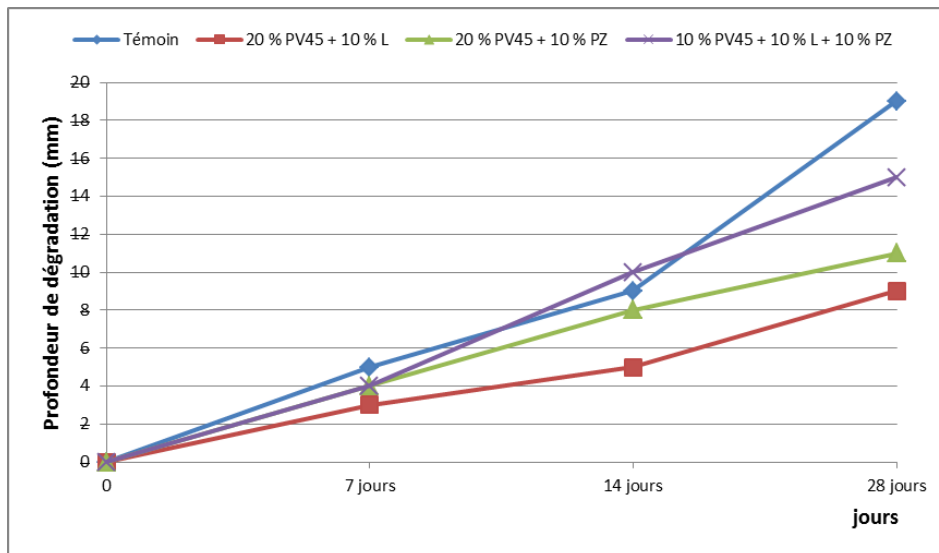


Figure.IV.33. Profondeur de carbonatation des mortiers ternaires et quaternaires en fonction du temps

Les figures (IV.32 et IV.33) présentent l'influence des ajouts minéraux sur la profondeur de carbonatation des mortiers à l'âge de 7, 14 et 28 jours. On remarque : que l'incorporation de la poudre de verre (PV45), à des taux de 10% au ciment est très avantageuse puisqu'elle permet une réduction importante de la profondeur carbonatée à 28 jours.

Il est remarqué que, pour une substitution de 30% de ciment, l'incorporation du couple (Poudre de verre / Laitier) est très bénéfique par rapport au substitution (poudre de verre / pouzzolane/Laitier) à tous les âges.

La littérature rapporte des données contradictoires sur l'influence des ajouts sur la profondeur de carbonatation des mortiers et bétons, ou plusieurs chercheurs tels que Khunthongkeaw J. et al., (2006); Sulapha P, et al., (2003); Sisomphon K et al., (2007), ont rapportés l'effet négatif de remplacement du ciment par la cendre volante. Selon ces chercheurs, la profondeur de carbonatation est augmentée par la consommation d'une partie de portlandite suite à une réaction pouzzolanique (Belaribi Omar., 2015).

D'autres chercheurs tels que Siad H., (2010), ont rapportés l'effet positif des additions pouzzolaniques tels que la cendre volante et la pouzzolane naturelle. Selon ces recherches, cet effet positif est dû probablement à la grande densification de la

structure poreuse en présence des additions pouzzolaniques qui rend l'effet de la consommation de la portlandite un effet secondaire.

V. Conclusion :

Cette étude était pour objet d'élaborer des ciments binaires, ternaires et quaternaires, présentent des caractéristiques meilleurs que le ciment, en valorisant la poudre de verre en combinaison avec le laitier et la pouzzolane naturelle,

Cette approche consistait initialement à déterminer les propriétés physico-chimiques des verres, puis à étudier les effets des poudres de verre avec deux finesses différentes, (une finesse qui est comparable à celle du ciment, et l'autre est supérieure), en combinaison avec le laitier de haut fourneau et pouzzolane naturelle sur les caractéristiques physiques et mécaniques de la pâte de ciment, à l'état frais et durcis, notamment, la consistance, les temps de début et fin de prise, la résistance à la compression à 28 jours, et la microstructure par la technique de MEB/EDS, et ceci dans un système binaire, ternaire et quaternaire, en combinant le verre finement broyé avec le laitier de haut fourneau et la pouzzolane naturelle de beni-saf.

Par la suite, à étudier l'influence du verre finement broyé, avec deux finesses différentes (PV30 et PV45), en combinaison avec le laitier de haut fourneau (L) et pouzzolane naturelle de beni-saf (PZ), sur les propriétés physiques et mécaniques, ainsi que les paramètres de durabilité des mortiers tels que, la porosité ouverte, l'absorption capillaire, la sorptivité, la résistance à la compression, la résistance à la flexion, la carbonatation accélérée, et la résistance chimique vis-à-vis de l'acide chlorhydrique, dans un système binaire, ternaire et quaternaire avec un rapport $E/L = 0.5$. Le contexte de cette étude visait au développement et à la caractérisation des liants composés, ou des éco-ciments, (binaires, ternaires et quaternaires) afin d'explorer une voie d'optimisation des propriétés de ces derniers en combinant le ciment portland avec des ajouts minéraux locaux (poudre de verre, pouzzolane naturelle, laitier du haut fourneau) afin de bénéficier de la synergie pouvant exister entre ces ajouts de différentes natures.

Les propriétés des mélanges étudiés de la pâte de ciment à base de la poudre de verre (PV30), ont montrés que la demande en eau est comparable à celle de la pâte de ciment de control ($E/L=0.30$), cependant, pour le cas des ciments contenant du (PV45), la demande en eau augmente.

Les temps de début et fin de prise de la pâte contenant la poudre de verre est plus ou moins long que celui du ciment. Ces valeurs augmentent en fonction du taux de substitution et de la finesse.

Les propriétés mécaniques des mortiers binaires et ternaires à base de la poudre de verre, ont été améliorées par rapport au mortier témoin. Cette amélioration est beaucoup plus significative pour les mortiers ternaires.

De point vu durabilité, les mortiers binaires et ternaires à base de (PV45), ont présentés des améliorations par rapport à ceux du mortier de control. La substitution de ciment par la poudre de verre (PV45), affine la porosité et diminue la sorptivité et l'absorption capillaire des mortiers.

Les mortiers binaires et ternaires à base de (PV45), ont présentés une réduction des pertes de masse provoquées par l'attaque d'acide chlorhydrique, et une augmentation de résistance vis-à-vis de la carbonatation accélérée.

L'amélioration des paramètres de durabilité des mortiers ternaires à base de (PV45/Laitier) est plus significative par rapport à celui du mortier binaire à base de (PV45).

CONCLUSION GENERALE :

Cette étude vise à évaluer l'effet de la poudre de verre avec deux finesses (PV30 et PV45), en combinaison avec le laitier et pouzzolane naturelle, sur le comportement mécanique, la microstructure et la durabilité du mortier. Les performances mécaniques ont été examinées par les tests de résistance à la compression, et la flexion, la microstructure de la pâte a été étudiée par la technique de MEB/EDS, et Les aspects de durabilité, ont été examinés par les tests de l'absorption capillaire, la porosité ouverte et la sorptivité, la résistance chimique vis-à-vis de l'acide chlorhydrique et la résistance à la carbonatation accélérée.

Cette étude nous amène à conclure les suivants :

- la demande en eau de la pâte de ciment à base de (PV30) est comparable à celle de la pâte de ciment de control, par contre, pour les ciments contenant du (PV45), la demande en eau augmente.
- Le verre finement broyé semble retarder légèrement la prise.
- La poudre de verre en combinaison avec le laitier et pouzzolane naturelle a généré un mortier plus léger par rapport au mortier de control.
- L'incorporation du verre finement broyé (PV45) à des taux de 10% et 20% respectivement dans les ciments binaires est très avantageuse puisqu'elle permet une réduction du coefficient d'absorption capillaire et de la sorptivité et permet au mortier de développer une résistance supérieure à celle du mortier témoin à 90 jours.
- Les diminutions de la porosité ouverte entre 28j et 90 jours sont plus significatives dans les mortiers ternaires à base de (PV45/Laitier).
- Le verre finement broyé (PV45) à des taux de 10% et 20% au ciment a montré une porosité presque similaires à celle du mortier témoin à 28 Jours, par contre, à 90 jours, on a remarqué une diminution de la porosité qui peuvent atteindre jusqu'au 11.44%.
- Le couple (20% PV45/Laitier) a indiqué la porosité la plus faible à 90 jours avec un pourcentage de diminution de 16.44% par rapport au mortier témoin.
- Le comportement pouzzolanique de poudres de verre (PV45) s'est avéré meilleur que celui du (PV30)
- La finesse de verre est un paramètre clé pour caractériser sa réactivité pouzzolanique. Elle doit être supérieure à celle du ciment pour qu'elle devienne évidente.

- Le verre finement broyé peut améliorer les propriétés du mortier si elle est utilisée au bon niveau de remplacement et avec une finesse adéquate
- En termes d'indice de résistance, la verre finement broyé peut être considérée comme matériau pouzzolanique conformément aux exigences de ASTM C 618.
- Les mélanges ternaires à base de (PV45/Laitier) à un niveau de remplacement de 30%, ont montré de meilleures performances par rapport aux mélanges binaires.
- La présente étude montre une bonne corrélation :
 - La porosité ouverte et le coefficient d'absorption ($R^2 = 0,9502$)
 - La porosité ouverte et la sorptivité ($R^2 = 0,9009$)
 - La résistance à la compression et la sorptivité ($R^2 = 0,9252$)
 - La résistance à la compression et la porosité ouverte ($R^2 = 0,8759$).
- les valeurs les plus faibles de la perte de masses pour les ciments binaires sont obtenues pour la substitution de (20% PV45), ceci est due probablement à l'effet de remplissage des pores du (PV45) qui limite la pénétration de la solution acide dans la matrice pendant la période d'exposition.
- La contribution de la substitution (20% PV45, 10% Laitier) pour les ciments ternaires et (10% PV45, 10% Laitier, 10% PZ) pour les ciments quaternaires a un effet bénéfique sur la perte de masse des mortiers, car elle permet de réduire la perte de masse à 180 jours d'immersion dans HCl respectivement de l'ordre de 35% à 28.3% par rapport au mortier témoin.

References Bibliographies:

1. Abendeh, R.; Baker, M.B.; Salem, Z.A.; Ahmad, H. The Feasibility of Using Milled Glass Wastes in Concrete to Resist Freezing-Thawing Action. *Int. J. Civ. Environ. Eng.* (2015), 9, 1026–1029.
2. AFPC-AFREM Durabilité des bétons, « méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité », Toulouse, pp 153-158. 11 et 12 décembre (1997).
3. Ahmed Soufiane Benosman., Performances Mécaniques et Durabilité des Matériaux Cimentaires Modifiés par Ajout de Polymère (PET), thèse de doctorat de l'université d'Oran, (2011).
4. Al-Akhras, N.M. Performance of Glass Concrete Subjected to Freeze-Thaw Cycling. *Open Constr. Build. Technol. J.* (2012), 6, 392–397.
5. Aliabdo, A.A.; Abd Elmoaty, A.E.M.; Aboshama, A.Y. Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete. *Constr. Build. Mater.* (2016), 124, 866–877.
6. Aligizaki K, Pore structure of cement based materials, testing, interpretation and requirements , *Modern Concrete Technology* 12, (2006).
7. Alliche, « Contribution à l'Étude du Comportement Mécanique des Matériaux à Matrice Cimentaire », Dossier d'Habilitation à Diriger Des Recherches de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris 6), Nov. 2003.
8. Amouri chahinez., Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité), these de doctorat d'état de l'université de Constantine (2009)
9. Ashish, D.K.; Singh, B.; Verma, S.K. The effect of attack of chloride and sulphate on ground granulated blast furnace slag concrete. *Adv. Concr. Constr.* (2016), 4, 107–121.
10. ASTM C1866 / C1866M, (2020) Standard Specification for Ground-Glass Pozzolan for Use in Concrete, DOI: 10.1520/C1866_C1866M-20
11. Baroghel– Bouny V., « Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances », Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées Paris, (1994).
12. Baroghel-Bouny V, Gawsewitch V.J, Ounoughi K., Arnaud S, Olivier G, Belin P. Vieillissement des bétons en milieu naturel: une expérimentation pour le XXIe

- siècle. IV Résultats issus des prélèvements effectués sur les corps d'épreuve de différents sites aux premières échéances de mesure. Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, n° 249, mars-avril 2004, p. 49-100. (2004).
13. Baroghel-Bouny V. et al., AFGC, Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages, Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction, Etat de l'art et Guide pour la mise en oeuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité, Association Française de Génie Civil. (2004).
 14. BARON J., Ollivier J.P., La durabilité des Bétons, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, (1992)
 15. Baron, J., and Ollivier, J. P. Les bétons- bases et données pour leur formulation. Editions Eyrolles, Paris. (1996).
 16. Barret P., « Mécanismes d'hydratation des silicates de calcium (C3S, C2S) constituants des ciments vus à travers les concepts de la réactivité des solides », in Proceeding of 7th symp., Chemistry of cement Paris I, pp 86-92, (1980).
 17. Belaribi Omar, Durabilité des bétons autoplaçants à base de VASE ET DE pouzzolane, thèse en cotutelle pour obtenir le diplôme de docteur en sciences de l'université de Mostaganem et de l'université Cergy-pontoise (2015)
 18. Beltran M.G., A. Barbudo, F. Agrela, A.P. Galvn, J.R. Jimenez Effect of cement addition on the properties of recycled concretes to reach control concretes strengths J. Clean. Prod., 79, pp. 124-133 (2014).
 19. Bensted J., The hydration of Portland cement, World Cement, Aout, , p.27-32. (1991).
 20. Beushausen, H.; Alexander, M.; Ballim, Y. Early-age properties, strength development and heat of hydration of concrete containing various South African slags at different replacement ratios. Constr. Build. Mater. 29, 533–540. (2012).
 21. Boudchicha Abdelaziz. Utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons, thèse de doctorat d'état en génie civil, Université Mentouri Constantine, Décembre (2007)
 22. Bouglada Mohammed Salah. Caractérisation physico-chimique et microstructurale des ajouts minéraux. Thèse de doctorat d'état en génie civil, option Matériaux, Université de Batna 2, Avril (2019).

23. Buil M. et Ollivier J-P., conception des bétons : la structure poreuse, Durabilité des bétons, sous la direction de J. Barron, J-P. Ollivier, presses de l'ENPC, chap.3 pp.57-99, (1992)
24. Caré S, Derkx F. Determination of relevant parameters influencing gas permeability of mortars. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.09.028. Construction and Building Materials, 25 (3)- 1248-1256. (2011).
25. Céline PERLOT., Influence de la décalcification de matériaux cimentaires sur les propriétés de transfert : application au stockage profond de déchets radioactifs these en cotutelle entre l'université de Paul Sabatier de Toulouse et la faculté de génie de l'université de Sherbrooke (2005)
26. Chabrelie, Aude. Mechanisms of degradation of concrete by external sulfate ions under laboratory and field conditions. No. THESIS. EPFL, (2010).
27. Chaid R. Formulation, caractérisation et durabilité des BHP aux ajouts cimentaires locaux. Thèse de doctorat d'état en génie civil ENP décembre (2006)
28. Colak A., Characteristics of pastes from a Portland cement containing different amounts of natural pouzzolan, Cement and Concrete Research, Vol 33, 585–593, (2003).
29. Dakhmouche chabil F.Z «Carbonatation de bétons adjuvantés a base de ressources locales algériennes » Thèse en cotutelle (2009).
30. Damidot, and A. Nonat, « Investigations of the C3S hydration process during the first hours of hydration, Hydration and setting of cements », Edited by A. Nonat and J. C Mutin RILEM, pp 23-34, (1992).
31. Delagrave A., Étude des mécanismes de pénétration des ions chlore dans les bétons conventionnels et a haute performance, Thèse de Doctorat, spécialité Génie Civil, Université Laval, Québec, Canada, (1996).
32. Dent-Glasser L., E. Lachoski, K. Mohan, H. Taylor, « A multi- method study of C3S hydration», Cement Concrete Research, Vol. 8, No. 6, pp 733-740, (1978).
33. Diamond. S, « Cement paste microstructure: an overview of several levels », Conference on hydraulic cement paste- Their structures and Properties, Sheffield, p. 2-30, (1976)
34. Douaissia, Z., Merzoud, M., Habita, M. F., & Benazzouk, A. Effets du laitier granulé et de la pouzzolane naturelle sur les propriétés physico-mécaniques et sur la réaction alcali silice des mortiers à base de verre recyclé. Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie, 26(1), 78-91. (2021).

35. Dreux, G., and Festa, J. Nouveau guide du béton et de ses constituants. 8^e édition Eyrolles. (1998).
36. Duży, P.; Sitarz, M.; Adamczyk, M.; Choińska, M.; Hager, I. Chloride ions' penetration of fly ash and ground granulated blast furnace slags-based alkali-activated mortars. *Materials* 14, 6583. (2021).
37. Fabien Frohard, Durabilité des éco-bétons : Impact des additions cimentaires alternatives sur la corrosion des armatures dans les bétons armés, these de doctorat de l'université Paris-Est, option structures et matériaux. Université de Sherbrooke, décembre (2014).
38. Fayçal Aladdine, Propriétés à l'état frais, à l'état durci et durabilité des bétons incorporant du verre finement broyé, Mémoire de maîtrise en sciences appliquées Spécialité : génie civil, Sherbrooke, Canada, Février (2009)
39. Feldman R. F., P. J. Sereda, « A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption length change and mechanical properties», *Materials and Structures*, vol.1, pp509-520, (1968).
40. Ghassan K. Al-Chaar, Mouin Alkadi and Panagiotis G. Asteris,. Natural Pozzolan as a Partial Substitute for Cement in Concrete. *The Open Construction and Building Technology Journal*, vol 7, 33–42. (2013)
41. 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).
42. 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)
43. Guillon E., Durabilité des matériaux cimentaires : Modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles, Thèse de Doctorat, École Normale de Cachan, (2004)
44. Haha, M.B.; Lothenbach, B.; Le Saout, G.; Winnefeld, F. Influence of slag chemistry on the hydration of alkali-activated blast-furnace slag-Part II: Effect of Al₂O₃. *Cem. Concr. Res* 42, 4274–4283. (2012).
45. Hajimohammadi, A.; Ngo, T.; Kashani, A. Sustainable one-part geopolymer foams with glass fines versus sand as aggregates. *Constr. Build. Mater.* 171, 223–231. (2018).

46. Hansen T.C., Physical structure of hardened cement paste. A classical approach, Matériaux de construction, RILEM, p.423-436. (1986).
47. Harbi Radhia , Propriétés physico-mécaniques et durabilité des Mortiers avec additions minérales, Thèse de doctorat d'état en science option matériaux et structure. Université Guelma. (2018)
48. Harbi, R.; Derabla, R.; Nafa, Z. Improvement of the properties of a mortar with 5% of kaolin fillers in sand combined with métakaolin, brick waste and glass powder in cement. Constr. Build. Mater. 152, 632–641, (2017).
49. He, Z.; Zhan, P.; Du, S.; Liu, B.; Yuan, W. Creep behavior of concrete containing glass powder. Compos. Part B Eng. 166, 13–20. (2019).
50. Hilton, B.; Bawden, K.; Winnebeck, K.; Chandrasiri, C.; Ariyachandra, E.; Peethamparan, S. The functional and environmental performance of mixed cathode ray tubes and recycled glass as partial replacement for cement in concrete. Resour. Conserv. Recycl. 151, 104451. (2019).
51. Houst Y.F « Diffusion de gaz, carbonatation et retrait de la pâte de ciment durcie ». Thèse de Doctorat, Université de Lausanne (1992).
52. Huang D, Sun P, Gao P, Liu G, Wang Y, Chen X. Study on the Effect and Mechanism of Alkali–Silica Reaction Expansion in Glass Concrete. Sustainability 13(19):10618. (2021).
53. Ibrahim K.I.M., Recycled waste glass powder as a partial replacement of cement in concrete containing silica fume and fly ash, Case Stud. Constr. Mater. 15, e00630(2021).
54. Idir, R. Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique. INSA, Toulouse. (2009).
55. Idir, R., Cyr, M. & Tagnit-Hamou, A., Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet. Cement and Concrete Composites, 33(1), 19–29. (2011).
56. Idir, R., Cyr, M. & Tagnit-Hamou, A., Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars. Construction and Building Materials, 24(7), 1309–1312. (2010).
57. Ilgar Allahyari Approche performantielle des bétons : Vers une meilleure caractérisation des indicateurs de durabilité, thèse de doctorat de l'université de Toulouse (2016)
58. Ismail Yurtdas, Couplage Comportement Mécanique Et Dessiccation Des Matériaux A Matrice Cimentaire : Etude Expérimentale Sur Mortiers Thèse

- Doctorat De L'université Des Sciences Et Technologies De Lille Et De L'école Centrale De Lille (2003)
59. Jani, Y.; Hogland, W. Waste glass in the production of cement and concrete—A review. *J. Environ. Chem. Eng.* 2, 1767–1775. (2014).
 60. Jayakumar, G.; Mathews, M.E.; Kiran, T.; Yadav, B.S.K.; Kanagaraj, B.; Anand, N. Development and strength assessment of sustainable high strength fiber reinforced concrete. *Mater. Today Proc.* (2021).
 61. Jiang, Y.; Ling, T.-C.; Shi, C.; Pan, S.-Y. Characteristics of steel slags and their use in cement and concrete-A review. *Resour. Conserv. Recycl.* 136, 187–197. (2018).
 62. Kahina haddad, Caractérisation des paramètres influençant la durabilité des matériaux cimentaires à base de matériaux de recyclages, Thèse de Doctorat 3ème Cycle L.M.D, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, (2018)
 63. Kamali, M.; Ghahremaninezhad, A. An investigation into the hydration and microstructure of cement pastes modified with glass powders. *Constr. Build. Mater.* 112, 915–924. (2016).
 64. Kamali, M.; Ghahremaninezhad, A. Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials. *Constr. Build. Mater* 98, 407–416. . (2015).
 65. Kantrot. D.L, S. Brunauer, C.H. Weise, « Advances in Chemistry », N°33, pp 199-219, (1962).
 66. khan, Fasih Ahmed & Shahzada, Khan & Qazi, Samiullah & Fahim, Muhammad & Khan, Sajjad & Badrashi, Yasir. Development of Environment-Friendly Concrete through Partial Addition of Waste Glass Powder (WGP) as Cement Replacement. *Civil Engineering Journal.* 6. 2332-2343. 10.28991/cej-2020-03091620. (2020).
 67. khan, Md Nabi Newaz, KURI, Jhutan Chandra, et SARKER, Prabir Kumar. Sustainable use of waste glass in alkali activated materials against H₂SO₄ and HCl acid attacks. *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 6, p. 100354. (2022),
 68. Khmiri, A.; Samet, B.; Chaabouni, M. A cross mixture design to optimise the formulation of a ground waste glass blended cement. *Constr. Build. Mater.* 28, 680–686. (2012).
 69. Khudhair M. H.R., Elyoubi M. S. and Elharfi A., Development of a new hydraulic binder (composite cement) based on a mixture of natural Pozzolan active 'PN' and

- Pure Limestone 'P,Lime': Study of the physical-chemical and mechanical properties- Journal of Materials and Environmental Sciences- JMESVol 8 (3), 902–910, (2017).
70. Khunthongkeaw, J., TANGTERMSIRIKUL S. and LEELAWAT, T., «A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete», Construction and Building Materials, Vol. 20, No. 9, pp. 744-753, (2006).
 71. Kim, J.; Yi, C.; Zi, G. Waste glass sludge as a partial cement replacement in mortar. Constr. Build. Mater. 75, 242–246. (2015).
 72. Kim, S.-W.; Lee, Y.-J.; Lee, J.-Y.; Kim, K.-H. Application of electric arc furnace oxidizing slag for environmental load reduction. Asian J. Chem. 26, 5867–5870. (2014).
 73. LCPC M48 Méthodes de caractérisation microstructurale Analyse thermogravimétrique.
 74. Lee, H.; Hanif, A.; Usman, M.; Sim, J.; Oh, H. Performance evaluation of concrete incorporating glass powder and glass sludge wastes as supplementary cementing material. J. Clean. Prod170, 683–693. . (2018).
 75. Legrand. D.C, « La structure des suspensions de ciment », In Le Béton Hydraulique, Ed. BARON J., Paris, Presse de l'ENPC, (1982).
 76. Letelier V, Henríquez-Jara BI, Manosalva M, Parodi C, Ortega JM. Use of Waste Glass as A Replacement for Raw Materials in Mortars with a Lower Environmental Impact. Energies. 12(10):1974. (2019).
 77. Liu, S.; Wang, S.; Tang, W.; Hu, N.; Wei, J. Inhibitory Effect of Waste Glass Powder on ASR Expansion Induced by Waste Glass Aggregate. Materials 8, 6849–6862. (2015).
 78. Logbi Abdelaziz, effet des ajouts minéraux actifs et inertes sur les propriétés physiques, mécaniques et chimiques du mortier, thèse de doctorat en sciences en génie civil, université d'Ouargla (2019).
 79. Loukili A., « Etude du retrait et du fluage des bétons à ultra-hautes performances », Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes, Nantes, (1996).
 80. Lu, J.-X.; Duan, Z.-H.; Poon, C.S. Combined use of waste glass powder and cullet in architectural mortar. Cem. Concr. Compos. (2017), 82, 34–44.
 81. Lu, J.-X.; Zhan, B.-J.; Duan, Z.-H.; Poon, C.S. Using glass powder to improve the durability of architectural mortar prepared with glass aggregates. Mater. Des. 135, 102–111. (2017).

82. Lu, J.-X.; Zheng, H.; Yang, S.; He, P.; Poon, C.S. Co-utilization of waste glass cullet and glass powder in precast concrete products. *Constr. Build. Mater.*, 223, 210–220. (2019).
83. Majhi, R.K.; Nayak, A.N.; Mukharjee, B.B. Characterization of lime activated recycled aggregate concrete with high-volume ground granulated blast furnace slag. *Constr. Build. Mater.*, 259, 119882. (2020).
84. Maraghechi, H., Shafaatian, S. M. H., Fischer, G. & Rajabipour, Farshad, The role of residual cracks on alkali silica reactivity of recycled glass aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 34(1), 41–47. (2012).
85. Martys N.S. Survey of concrete transport properties and their measurement. National institute of standards and Technology .NISTIR 5592,30 pages - Feb (1995).
86. Matos, A.M.; Sousa-Coutinho, J. Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. *Constr. Build. Mater.* 36, 205–215. (2012).
87. Mehta P.K, *Concrete Structure Properties and Materials*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, (1986).
88. MEHTA P.K., Manmohan D., Pore size distribution and permeability of hardened cement paste, 7e Congres International de la Chimie des Ciments, Paris, p.1-11. (1980).
89. Mekti Zohir, Comportement du laitier de l'usine sidérurgique d'El-Hadjar sur le mélange clinker : Cas ERCE Hadjar-Soud, Skikda, Thèse de doctorat en génie minier, Université d'Annaba, octobre (2018).
90. Mindess S, Young J.F, Darwin D, *Concrete*, 2nd Edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, (2002).
91. Mindness S., J.F. Young, F.V. Lawrence, « Creep and drying shrinkage of calcium silicate pastes », *Cement and Concrete Research*, vol.8, pp 591-600, (1978).
92. Mohajerani, A.; Vajna, J.; Cheung, T.H.H.; Kurmus, H.; Arulrajah, A Horpibulsuk, S. Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: A review. *Constr. Build. Mater.* 156, 443–467. (2017).
93. Mostofinejad, D.; Hosseini, S.M.; Nosouhian, F.; Ozbakkaloglu, T.; Tehrani, B.N. Durability of concrete containing recycled concrete coarse and fine aggregates and milled waste glass in magnesium sulfate environment. *J. Build. Eng.* 29, 101182. (2020).

94. Naganna, S.R.; Ibrahim, H.A.; Yap, S.P.; Tan, C.G.; Mo, K.H.; El-Shafie, A. Insights into the Multifaceted Applications of Architectural Concrete: A State-of-the-Art Review. *Arab. J. Sci. Eng.* 46, 4213–4223. (2021).
95. Neville, A. M. Propriétés des bétons. Paris: Edition Eyrolles (2000).
96. NF EN 206-1, "Spécification, performances, production et conformité", Béton partie I, 77p. , (2002).
97. NF EN 450, "Cendres volantes pour béton- définition, exigences et contrôle de qualité", (1995)
98. NF P18-506, "Additions pour béton hydraulique-laitier vitrifié moulu de haut fourneau", (1992).
99. NF P18-508, "Additions pour béton hydraulique- additions calcaires-spécification et critères de qualité", (1994).
100. Nodehi, M.; Taghvaei, V.M. Sustainable concrete for circular economy: A review on use of waste glass. *Glass Struct. Eng.* 1–20. (2021).
101. Older Y., « Hydration, setting and hardening of Portland cement », dans Lea's - Chemistry of Cement and Concrete, chap.6, Arnold, 4th éd., (1998).
102. Olfa Oueslati, Durabilité Des Matériaux Cimentaires Soumis Aux Acides Organiques Résistance Chimique, Mécanique Et De Corrosion, Thèse Présentée A La Faculté Des Etudes Supérieures De L'université Laval Dans Le Cadre Du Programme De Doctorat En Sciences De La Terre Pour L'obtention Du Grade De Philosophie Doctoral (Ph.D.) (2003)
103. Ollivier J-P, et Vichot A, « La Durabilité des Bétons », Presses de l'École nationale des ponts et chaussées, nouvelle édition, (2008).
104. Omran, A. and Tagnit-Hamou, A., Performance of glass-powder concrete in field applications. *Construction and Building Materials*, 109, pp.84-95. (2016).
105. Ortega, J.M.; Letelier, V.; Solas, C.; Miró, M.; Moriconi, G.; Climent, M.Á.; Sánchez, I. Influence of Waste Glass Powder Addition on the Pore Structure and Service Properties of Cement Mortars. *Sustainability* 10, 842. (2018).
106. Özbay, E.; Erdemir, M.; Durmus, H.I. Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties-A review. *Constr. Build. Mater.* 105, 423–434. (2016).
107. Pereira-De-Oliveira, L.A.; Castro-Gomes, J.P.; Santos, P.M.S. The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components. *Constr. Build. Mater.* 31, 197–203. (2012).

108. PLISKIN L. « La fabrication du ciment » - Edition Eyrolles – 217p- Paris (1993).
109. Powers T.C., « Structure and physical properties of hardened Portland cement paste », American Ceramic Society, vol. 41, n°1, p. 1-6, (1958).
110. Powers T.C., «Some physical aspects of the hydration of Portland cement», Portland Cement Association Bulletin N°125, pp 47-56, (1961).
111. Powers T.C., Capillary continuity or discontinuity in cement pastes, Journal of the PCA Research and Development Laboratories, p.38-48. (1959).
112. Raju, S., & Kumar, P. Effect of Using Glass Powder in Concrete. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, (2014).
113. Ramezaniapour, Amir Mohammad. Sulfate Resistance and Properties of Portland-Limestone Cements. University of Toronto (Canada), (2012).
114. Rashad, A.M. An overview on rheology, mechanical properties and durability of high-volume slag used as a cement replacement in paste, mortar and concrete. Constr. Build. Mater. 187, 89–117. (2018).
115. Regourd M., « L'hydratation de ciment Portland », Dans Le béton hydraulique : connaissance et pratique, chap. 11, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, (1982).
116. Regourd M., H. Hornain, « Applications de la microscopie électronique à balayage », Revue des matériaux de construction, 693 : 73–87, (1975)
117. Schwarz, N. & Neithalath, N., Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration. Cement and Concrete Research, 38(4), 429–436. (2008).
118. Schwarz, N., Cam, H. & Neithalath, N., Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. Cement and Concrete Composites, 30(6), 486–496. (2008).
119. Shao, Y., Lefort, T., Moras, S., Rodriguez, D., Studies on concrete containing ground waste glass. Cement and Concrete Research, 30(1), 91–100. (2000).
120. Sheikibrahim, K.; Sathish, S.; Mohammed Fahad, A.S.; Sathish Sharma, A.; Karthika, H.; Shanmuganathan, N. Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS or GGBFS) and Fly ash in Concrete. Int. Res. J. Eng. Technol. 5, 266–270. (2018).
121. Shi C, Wu Y, Riefler C and Wang H Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. Cement and Concrete Research, 35(5), pp.987–993 (2005).

122. Shi, D.; Ye, J.; Zhang, W. Effects of activator content on properties, mineralogy, hydration and microstructure of alkali-activated materials synthesized from calcium silicate slag and ground granulated blast furnace slag. *J. Build. Eng.* 32, 101791. (2020).
123. SIAD H., «La durabilité des bétons autoplaçants à base des additions pouzzolaniques et fillers calcaires», Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, (2010).
124. Siddika, Ayesha, Ailar Hajimohammadi, Md. A.A. Mamun, Rayed Alyousef, and Wahid Ferdous. "Waste Glass in Cement and Geopolymer Concretes: A Review on Durability and Challenges" *Polymers* 13, no. 13: 2071. (2021).
125. Sierra R., « Contribution à l'étude de l'hydratation des silicates calciques hydrauliques », Rapport de recherche n° 39, Laboratoire des Ponts et Chaussées, (1974).
126. Sierra. R, « Répartition des différentes formes d'eau dans la structure des pâtes pures de C3S et de ciment Portland », Actes du 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, p. 201-206, (1980).
127. Silva, R.V.; De Brito, J.; Dhir, R.K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Constr. Build. Mater.* 65, 201–217. (2014).
128. Sisomphon K., Franke L., «Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials», *Cement and Concrete Research*, pp. 1647–1653, (2007).
129. Sobolev, K.; Türker, P.; Soboleva, S.; Iscioglu, G. Utilization of waste glass in ECO-cement: Strength properties and microstructural observations. *Waste Manag.* 27, 971–976. . (2007).
130. Sulapha P., Wong S.F., Wee T.H., Swaddiwudhipong S., «Carbonation of concrete containing mineral admixtures». *J. Mater. Civil Eng.*; 134–43, (2003).
131. Suresh, D.; Nagaraju, K. Ground Granulated Blast Slag (GGBS) in Concrete—A review. *IOSR J. Mech. Civ. Eng.* 12, 76–82. (2015).
132. Tagnit. A et P-C Nkinamubanzib. Les ajouts cimentaires et le développement durable. Département de génie civil, Université de Sherbrooke. (2002).
133. Tamanna, Nafisa & Tuladhar, Rabin. Sustainable Use of Recycled Glass Powder as Cement Replacement in Concrete. *The Open Waste Management Journal.* 13. 1-13. (2020).

134. Tayeh, B.A.; Al Saffar, D.M.; Aadi, A.S.; Almeshal, I. Sulphate resistance of cement mortar contains glass powder. *J. King Saud Univ. Eng. Sci.* 32, 495–500. (2019).
135. Torrenti J.M. « La résistance du béton au très jeune âge », *Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées*, N°179, pp 31-41, Paris, (1992).
136. Verbeck G.J. et R.H. Helmuth, « Structures and physical properties of cement paste », *The Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement*, Tokyo, p.1-32, (1968).
137. Vernet et G. Cadoret , « Suivi en continu de l'évolution chimique et mécanique des BHP pendant les premiers jours », dans *Les bétons à hautes performances*, chap. 6, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, (1992).
138. Wang, C.-C.; Wang, H.-Y.; Chen, B.-T.; Peng, Y.-C. Study on the engineering properties and prediction models of an alkali-activated mortar material containing recycled waste glass. *Constr. Build. Mater.* 132, 130–141. (2017).
139. Xiaolin Chang, Xinping Yang, Wei Zhou, Guoshuai Xie, Shuhua Liu, "Influence of Glass Powder on Hydration Kinetics of Composite Cementitious Materials", *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2015, Article ID 713415, 7 pages, (2015)
140. Yusuf, M. O., Al-Sodani, K. A. A., AlAteah, A. H., Al-Tholaia, M. M., Adewumi, Bakare, A. A., Momohjimoh, I. Performances of the synergy of silica fume and waste glass powder in ternary blended concrete. *Applied Sciences*, 12(13), 6637. (2022).
141. Zeroub Hamid, valorisation du verre dans l'élaboration de béton durable, mémoire de magister de l'université de Boumerdes. (2012).
142. Zheng, K.R.; Chen, L.; Zhou, J. Pozzolanic Reaction of Soda-lime Glass and Its Influences on Composition of Calcium Silicate Hydrate. *J. Chin. Ceram. Soc.* 44, 202–210. (2016).
143. Zidol, A., Optimisation de la finesse de la poudre de verre dans les systèmes cimentaires binaires. *Mémoire de maitrise*, université de Sherbrooke. (2009).
144. Zidol, A., Pavoine, A. & Tagnit-Hamou, A., Effect of glass powder on concrete permeability. In *International Congress on Durability of Concrete*, 1-15. (2012).
145. Zulu, Bernard A., Shingo Miyazawa, and Nobukazu Nito. "Properties of blast-furnace slag cement concrete subjected to accelerated curing." *Infrastructures* 4.4: 69. (2019).