

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## Mémoire de master

Présenté à l'Université 8 mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Présenté par :

**SAYOUD ACHRAF**

---

---

**Thème : Caractérisation physico-mécanique d'un  
liant hydraulique à base de poudre de verre**

---

---

Sous la direction de : Dr. Nigri Ghania

---

juillet 2021

---

# Remerciements

*Nous remercions Allah, le tout puissant, le miséricordieux, qui nous a appris ce que nous l'ignorions, de nous avoir donné la santé et tout ce dont nous avons besoin pour réaliser le travail demandé et rédiger ce mémoire.*

*Mes remerciements s'adressent A: Madame Nigri Ghania, docteur à l'Université de Guelma, mon directrice de mémoire d'avoir accepté mon encadrement, pour la confiance qu'elle m'a accordée tout au long de ce travail, pour son soutien et son aide à la recherche des solutions adaptées aux difficultés que nous avons rencontré au cours de la réalisation de ce mémoire, mais aussi et surtout pour sa qualité humaine.*

*Je remercie l'ensemble du corps des enseignants et administratifs et surtout les techniciennes du laboratoire : Mme Samira Kannat et Mme Sihem Mahboubi du département de génie civil et d'hydraulique, faculté des sciences et de la technologie de l'Université 8 mai 1945 de Guelma.*

*Mes remerciements à toute l'équipe du laboratoire de la cimenterie de Hadjar-soud, qui ont contribué à la réalisation de ce travail durant la période de mon stage.*

*Enfin, Mes remerciements les plus profonds à ma chère famille pour leur soutien moral indéfectible et leurs encouragements.*

# Dédicaces

*Je dédie ce travail à mes parents*

*Mon gratitude pour leur soutien tout le long de mes études*

*À ma deuxième mère Nigri Ghania*

*À mes frères et à mes sœurs*

*À mes amis et à toute la famille*

*Merci à TOUS !*

**RESUMES**

## Résumé

Notre travail de recherche vise à étudier la possibilité de fabriquer un nouveau ciment composé, dans lequel une quantité de clinker est substituée par la poudre de verre. Une fois les échantillons de ciment sont préparés (taux de substitution varie de 0 à 30 %), nous avons procédé à partir d'un protocole expérimental détaillé, la recherche des différentes performances physiques, mécaniques et de durabilité du nouveau liant.

Les résultats trouvés montrent que; de point de vue composition chimique, retrait et résistance mécanique, le nouveau liant contenant jusqu' à 20% de la poudre de verre répond aux exigences de la norme en vigueur en Algérie NA 442. Toutefois il faut signaler qu'une étude approfondie des autres performances ainsi qu'une étude microscopique sont nécessaires pour mieux comprendre le comportement de cet ajout dans la matrice cimentaire.

**Mots clés:** Liant hydraulique, Poudre de verre, Ajouts cimentaires, Comportement mécanique, Réaction pouzzolanique.

## ملخص

يهدف عملنا البحثي إلى دراسة إمكانية تصنيع اسمنت مركب جديد ، حيث قمنا باستبدال كمية من الكلنكر بمسحوق الزجاج. بمجرد تحضير عينات الاسمنت (يتراوح معدل الاستبدال من 0 إلى 30٪) انطلقنا من بروتوكول تجريبي مفصل لبحث مختلف الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والمتانة للمركب الجديد. تظهر النتائج أنه؛ من حيث التركيبة الكيميائية، التقلص والمقاومة الميكانيكية ، فإن الاسمنت المركب الجديد الذي يحتوي على ما يصل إلى 20 ٪ من مسحوق الزجاج تفي بمتطلبات المعيار المعمول بيه في الجزائر NA442

ومع ذلك ، تجدر الإشارة إلى أن الدراسة المعمقة لبقية الخصائص الأخرى بالإضافة إلى الفحص المجهرى ضروريين لفهم سلوك هذه الإضافات بشكل أفضل داخل مصفوفة الاسمنت.

**الكلمات المفتاحية :** رابط هيدروليكي ، مسحوق زجاج ، إضافات أسمنتية ، سلوك ميكانيكي ، تفاعل بوزولاني.

# Abstract

Our research work aims to study the possibility of manufacturing a new blended cement, in which, a quantity of clinker is substituted by the glass powder. Once the cement samples are prepared (substitution rate varies from 0 to 30%), we proceeded from a detailed experimental protocol to research the different physical, mechanical and durability performances of the new binder.

The results found, show that; from chemical composition, shrinkage and mechanical resistance, the new binder containing up to 20% of the glass powder meets the requirements of the Algerian standard NA 442. However, it should be noted that; an in-depth study of the other performances as well as microscopy study are necessary to better understand the behavior of these additions in the cement matrix.

**Keywords:** Hydraulic binder Glass powder, Cements additions, Mechanical behavior, Pozzolanic reaction.

# **SOMMAIRE**



# SOMMAIRE

Remerciements

Dédicace

Résumés..... i-iii

Sommaire..... S1-S4

Liste des tableaux..... I

Liste des figures..... II-III

---

	Page
Introduction générale.....	1-2
<b>Chapitre 1 : Généralités sur les ciments et la valorisation du verre</b>	
<b>Partie 01 : Généralités sur les ciments</b>	
<b>1.1. Introduction.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2. Constituants du ciment.....</b>	<b>3</b>
1.2.1. Clinker portland.....	3
1.2.2. Laitier de haut fourneau.....	4
1.2.3. Fumé de silice.....	4
1.2.4. Sulfate de calcium.....	4
1.2.5. Cendres volantes.....	5
1.2.6. Fillers.....	5
1.2.7. Schistes calcinés.....	6
1.2.8. Calcaire.....	6
1.2.9. Constituants mineurs du ciment.....	6
<b>1.3. Classification du ciment.....</b>	<b>7</b>
1.3.1. En fonction de leur composition.....	7
1.3.2. En fonction de leur résistance normale.....	7
1.3.3. Ciment adaptés à des usages spécifique.....	8
a) Ciment alumineux fondu CA.....	8
b) Ciment prompt naturel CNP.....	8
c) Ciments a maçonner CM.....	8
d) Ciments Naturels CN.....	9
e) Ciment de laitier à la chaux C LX.....	9
<b>1.4. Procédé de fabrication du ciment portland.....</b>	<b>9</b>
1.4.1. Extraction et concassage.....	9
1.4.2. Préparation des matières premières.....	10
a) Trompe par voie humide.....	10
b) Trompe par voie semi-humide.....	10
c) Trompe par voie sèche.....	10
d) Trompe par voie semi-sèche.....	11
1.4.3. Cuisson de cru.....	11
1.4.4. Broyage du clinker et élaboration de ciment.....	11

1.4.5. Broyage du clinker et élaboration de ciment.....11

<b>1.5. Hydratation du ciment portland</b> .....	12
1.5.1. Hydratation des silicates C3S etC2S.....	12
1.5.2. Hydratation des phases aluminates.....	14
1.5.3. L'aspect cinétique.....	15
<b>1.6. Evolution des propriétés du ciment portland</b> .....	16

## **Chapitre 1 : Généralités sur les ciments et la valorisation du verre**

### **Partie 02: Valorisation de verre dans le domaine du génie civil**

<b>1.7. Introduction</b> .....	17
<b>1.8. Définition des déchets</b> .....	17
<b>1.9. Classification des déchets</b> .....	17
<b>1.10. Gestion des déchets</b> .....	18
<b>1.11. Valorisation des déchets de verre dans le domaine de génie civil</b> ....	19
<b>1.12. Structure du verre</b> .....	19
1.12.1. Composition chimique du verre.....	19
1.12.2. Structure vitreuse du verre.....	19
<b>1.13. Valorisations de poudre de verre en génie civil</b> .....	20
1.13.1. Utilisation de la poudre de verre comme substituant du ciment.....	21
1.13.2. Réaction pouzzolanique (ciment-verre).....	22
1.13.3. Facteurs influençant la réaction pouzzolanique.....	22
1.13.4. La réaction alcali-silice (ciment –verre).....	23
1.13.5. Rôle des pouzzolanes dans la réduction des expansions dues a la réaction alcali-silice (ciment -verre).....	24
1.13.6. Resistance à la compression des mortiers formulés à base de la poudre de verre.....	24

## **Chapitre 2 : Matériaux et procédures expérimentales**

<b>2.1. Introduction</b> .....	28
<b>2.2. Préparation des nouveaux ciments</b> .....	28
<b>2.3. Essais effectués</b> .....	29
<b>2.3.1. Préparation des mortiers normalisés</b> .....	29

<b>2.3.2. Essais de caractérisation chimique</b> .....	30
2.3.2.1. Perte au feu (PAF).....	30
2.3.2.2. Composition chimiques par Fluorescence X.....	31
<b>2.3.3. Caractérisation physique</b> .....	32
2.3.3.1. Masse volumique absolue des ciments anhydre.....	32
2.3.3.2. Masse volumique à l'état frais.....	32
2.3.3.3. Mesure de la Surface Spécifique de Blaine (SSB) des ciments.....	33
2.3.3.4. Absorption d'eau par immersion totale.....	33
2.3.3.5. Essai de porosité accessible à l'eau.....	34
2.3.3.6. Essais de retrait .....	35
<b>2.3.4. Caractérisation mécanique</b> .....	36
<b>2.3.5. Essai de durabilité des ciments élaborés</b> .....	38

## **Chapitre 3 : Caractérisation des ciments élaborés**

<b>3.1. Introduction</b> .....	39
<b>3.2. Résultats des essais réalisés</b> .....	39
<b>3.2.1. Caractérisation des ciments élaborés</b> .....	39
<b>3.2.1.1. Caractérisation chimique</b> .....	39
<b>3.2.1.2. Caractérisation physique des ciments</b> .....	41
a) Masses volumiques des ciments et des mortiers normalisés.....	41
b) Surface spécifique de Blaine (SSB) des ciments élaborés.....	41
c) Absorption d'eau par immersion totale.....	41
d) Porosité accessible à l'eau (Mesure hydrostatique) .....	43
e) Retrait libre des ciments.....	44

<b>3.2.3.3. Caractérisation mécanique des ciments</b> .....	45
a) Résistance mécanique à la compression.....	45
b) Résistance à la traction par flexion.....	46
<b>3.2.4. Evaluation de la durabilité des ciments</b> .....	47
<b>CONCLUSIONS ENERALES</b> .....	51-52
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	53-55
<b>ANNEX</b> .....	1-7

# LISTE DES TABLEAUX

Réf tableau	Titre	Page
Tableau 1.1	Types de ciments avec leurs compositions correspondantes	7
Tableau 1.2	Valeurs des limites caractéristiques des classes de ciments	8
Tableau 1.3	Classification des déchets en Polynésie française 2018	18
Tableau 1.4	Composition chimique du verre	19
Tableau 1.5	Mélange des ciments étudiés	25
Tableau 1.6	Résistances mécaniques des mortiers en fonction du taux de verre	26
Tableau 1.7	L'évolution de la résistance à la compression et à la flexion en fonction du temps à court terme des mortiers M0, M10, M20, M35	27
Tableau 2.1	Désignation et dosage des ciments élaborés	28
Tableau 2.2	Malaxage d'un mortier normal	30
Tableau 2.3	Limite de temps	37
Tableau 3.1	Teneur en oxyde des ciments anhydres (teneur moyenne en masse)	39
Tableau 3.2	Indices hydrauliques des ciments élaborés	40
Tableau 3.3	Masses volumiques des ciments élaborés et des mortiers normalisés	41
Tableau 3.4	Surface spécifique de Blaine (SSB) des ciments élaborés	41
Tableau 3.5	Résultats d'absorption d'eau par immersion totale	42
Tableau 3.6	Porosité accessible à l'eau des ciments élaborés	43
Tableau 3.7	Retrait des ciments élaborés	44
Tableau 3.8	Résistance à la compression des mortiers de ciments élaborés	45
Tableau 3.9	Résistance à la flexion des mortiers de ciments élaborés	46
Tableau 3.10	Variation des masses des éprouvettes conservées sous l'eau	47
Tableau 3.11	Variation des masses des éprouvettes conservées à l'air ambiant	48
Tableau 3.12	Variation des masses des éprouvettes dans l'acide sulfurique	49

# LISTE DES FIGURES

Réf figure	Titre	Page
<b>Figure 1.1</b>	Procédé de fabrication du ciment	12
<b>Figure 1.2</b>	C-S-H en fibre	13
<b>Figure 1.3</b>	Gel de C-S-H	13
<b>Figure 1.4</b>	Ca(OH) <sub>2</sub> et C-S-H	13
<b>Figure 1.5</b>	Cristaux de Portlandite	13
<b>Figure 1.6</b>	Aiguilles d'ettringite	15
<b>Figure 1.7</b>	Monosulfoaluminate hydraté	15
<b>Figure 1.8</b>	Les différentes périodes de la courbe calorimétrique lors de l'hydratation des silicates tricalciques C <sub>3</sub> S en pâte	16
<b>Figure 1.9</b>	Diffractogramme des rayons «X» du verre (Laboratoire de Matériaux Cimentaires Alternatifs, Université de Sherbrooke)	20
<b>Figure 1.10</b>	Position du verre dans le système CaO-SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20
<b>Figure 1.11</b>	Verre recyclé (la poudre et agrégats) dans le béton non structural	21
<b>Figure 1.12</b>	Activité pouzzolanique de la poudre de verre	23
<b>Figure 1.13</b>	Expansion due à la RAG (réaction alcali-granulats) sur des mortiers contenant des particules de verre de différentes tailles	23
<b>Figure 1.14</b>	Expansion due a la RAG a 23°C	24
<b>Figure 1.15</b>	Resistance à la compression des mortiers incorporant la poudre de verre	25
<b>Figure 2.1</b>	Matériaux utilisés	29
<b>Figure 2.2</b>	Broyage des déchets de verre	29
<b>Figure 2.3</b>	Malaxeur pour la préparation du mortier normalisé	30
<b>Figure 2.4</b>	Four de calcination pour PAF	31

<b>Figure 2.5</b>	Spectromètre à Fluorescence X	31
<b>Figure 2.6</b>	Masse volumique absolue des ciments	32
<b>Figure 2.7</b>	Appareil de Blaine (SSB)	33
<b>Figure 2.8</b>	Etuve utilisée	34
<b>Figure 2.9</b>	Balance hydrostatique	35
<b>Figure 2.10</b>	Mesure du retrait libre par un rétractomètre digital	36
<b>Figure 2.11</b>	Appareil flexion-compression	37
<b>Figure 2.12</b>	Conservation des éprouvettes (A. Eau potable ; B Acide sulfurique)	38
<b>Figure 2.13</b>	Éprouvettes confectionnées et conservées dans l'acide sulfurique (5%) et l'eau potable	38
<b>Figure 3.1</b>	Résultats d'absorption d'eau par immersion totale	42
<b>Figure 3.2</b>	Porosité accessible à l'eau des ciments élaborés	43
<b>Figure 3.3</b>	Retrait des mortiers de ciments élaborés en fonction du (%) de verre et en fonction du temps	44
<b>Figure 3.4</b>	Résistance à la compression en fonction du taux de verre et en fonction du temps	46
<b>Figure 3.5</b>	variation de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en verre	47
<b>Figure 3.6</b>	Variation des masses des éprouvettes conservées sous l'eau	48
<b>Figure 3.7</b>	Variation des masses des éprouvettes conservées à l'air ambiant	49
<b>Figure 3.8</b>	Variation des masses des éprouvettes conservées dans l'acide sulfurique (5%)	50



# **INTRODUCTION GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

La croissance régulière de la population et le changement des modes de production et de consommation entraînent de nos jours l'utilisation intensive des ressources et le rejet des quantités énormes de déchets dans l'environnement. Ces derniers contribuent à détériorer notre milieu. Ce changement a un impact négatif sur la société, la santé humaine, l'économie, les espèces vivantes, la production alimentaire, le tourisme et l'écologie. La création de nouveaux matériaux à base des déchets dans le domaine de la construction contribue à résoudre les problèmes liés à la fabrication du ciment et du béton (émission de CO<sub>2</sub> à effet de serre, poussière, consommation d'énergie...). L'utilisation de ces matériaux moins coûteux et adaptés aux usages de leurs utilisations est devenue une avenue très intéressante.

Ce travail de recherche s'inscrit dans le contexte d'une étude sur la valorisation des déchets de l'industrie dans la fabrication du ciment et la formulation du béton. Il consiste à étudier la possibilité de valoriser les chutes des verres broyées dans l'industrie cimentaire.

Plusieurs travaux de recherche ont confirmé la possibilité de l'utilisation des déchets de verres broyés dans l'industrie du ciment du fait que le verre est un matériau amorphe avec une composition chimique proche des autres ajouts connus (Fumée de silice, Laitier, Cendre volante). Le broyage du verre à une plus grande finesse laisse envisager une utilisation de ce matériau en tant que liant. Dans ce cas, la silice du verre réagit avec la chaux produite par la réaction d'hydratation du ciment (réaction pouzzolanique), créant ainsi des composés dotés de propriétés liantes.

La poudre de verre utilisée dans le présent travail est issue du broyage des déchets de verre transparent (déchet des vitres de construction) collectés auprès du laboratoire pédagogique du département de Génie Civil et Hydraulique de notre université (8 mai 1945 de Guelma).

Le mémoire est construit en trois chapitres, le premier chapitre est une analyse de la bibliographie et sera divisée en deux parties : la première est consacrée à l'industrie du produit ciment (composition, classification, normes, fabrication et hydratation), la deuxième partie est consacrée à une synthèse bibliographique dans laquelle, on expose les résultats des travaux de recherches qui traitent la valorisation du déchet du verre dans la fabrication du ciment. Dans le deuxième chapitre, on expose la procédure expérimentale utilisée (Préparation des échantillons et le mode opératoire). Dans le troisième chapitre, nous exposons l'ensemble des résultats des

# Introduction Générale

---

essais de caractérisation réalisés au laboratoire à savoir la caractérisation chimique, physique et mécanique.

En fin le manuscrit sera clôturé par des conclusions générales qui résument les résultats des essais effectués ; ainsi que les perspectives envisagées.

# **CHAPITRE 1**

**GENERALITES SUR LES  
CIMENTS ET LA VALORISATION  
DU VERRE**

## **PARTIE 01:**

**GENERALITES SUR LES  
CIMENTS**

# **CHAPITRE 1**

## **GENERALITES SUR LES CIMENTS ET LA VALORISATION DU VERRE**

### **PARTIE 01: GENERALITES SUR LES CIMENTS**

#### **1.1. INTRODUCTION**

Le mot ciment vient du Latin (caementum), qui signifie mortier, liant des maçonneries. Ce sens d'origine a été conservé en s'appliquant aux seuls liants hydrauliques, c'est-à-dire capables de durcir au contact de l'eau [1].

Le ciment est un liant hydraulique, qui entre dans la fabrication des bétons et mortiers. Il agit comme une colle entre les grains du sable et des granulats [2]. Il est aussi au même titre que la chaux : mélangé à de l'eau, il durcit et prend en masse. Après durcissement, les liants hydrauliques conservent leur résistance, ainsi que leur stabilité, même exposés à l'eau [3].

#### **1.2. CONSTITUANTS DU CIMENT**

Le ciment résulte du broyage et de l'homogénéisation des composants suivants :

##### **1.2.1. Clinker portland (k)**

Le clinker portland est le constituant principal hydraulique des ciments courants, il est obtenu par calcination (1450 °C) d'un mélange de matières premières, composé d'environ 80% de calcaire et 20% d'argile [4]. Le clinker se présente sous la forme de nodules durs et cristallisés, de teinte gris foncé pour les ciments habituels et verte pour le clinker du ciment blanc. La composition des clinkers gris est représentée par quatre grandes phases cristallines caractéristiques de la chimie du ciment. Elles sont en moyenne les suivantes :

$C_3S$  : Silicate tricalcique ( $SiO_2 - 3 CaO$ ) : 50 à 65% (Alite)

$C_2S$  : Silicate bicalcique ( $SiO_2 - 2 CaO$ ) : 15 à 20% (Belite)

$C_3A$  : Aluminate tricalcique ( $Al_2O_3 - 3CaO$ ) : 5 à 15% (Aluminate)

$C_4AF$  : Ferro-aluminate tétra calcique ( $Al_2O_3 Fe_2O_3 - 4 CaO$ ) : 5 à 10% (Ferrite)

## **Chapitre 1 : Généralités sur les ciments et la valorisation du verre**

---

La composition minéralogique du clinker obtenu après cuisson des matières crues dépend de la composition du mélange, de la température, du combustible utilisé, du temps de cuisson et des conditions de refroidissement (trempe à l'air) [5].

### **1.2.2. Laitier de haut fourneau (S)**

Le laitier de haut fourneau, ou le laitier broyé est un sous produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, c'est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé. Il se présente sous forme de nodules dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans des proportions de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 à 35%, de l'alumine entre 12 à 30% ainsi que la magnésie et d'autres oxydes en très faibles quantités, tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker [4].

### **1.2.3. Fumée de silice (D)**

La fumée de silice est un sous-produit de l'industrie du silicium et des alliages de Ferro silicium. Ces produits sont fabriqués dans un four à arc, en réduisant le quartz par un apport approprié de carbone, à une température d'environ 2 000 °C. La fumée de silice est extraite en surface du four de réduction par des ventilateurs principaux et résulte de la condensation du gaz SiO, intermédiaire réactionnel du procédé de carbo-réduction.

Elle est ensuite récupérée et filtrée dans un filtre à manches, avant d'être densifiée pour en faciliter la manipulation. La fumée de silice est initialement produite sous forme de poudre grise, non-densifiée et principalement composée de particules ultrafines. Ces particules contiennent au moins 85 à 98% de silice SiO<sub>2</sub> amorphe et se présentent sous la forme de microsphères vitreuses dont le diamètre moyen se situe entre 0.1 et 0.2 µm, Leur surface spécifique varie entre 13 000 et 30000 m<sup>2</sup>/kg , et leur densité se situe entre 2.00 et 2.25 [4].

Grâce à sa très grande finesse, sa forte teneur en silice et sa structure essentiellement vitreuse, la fumée de silice constitue un produit hautement pouzzolanique, fréquemment utilisé pour la fabrication des bétons à ultra hautes performances.

### **1.2.4. Sulfate de calcium**

Le gypse est une roche sédimentaire dissoute à l'origine dans l'eau de mer. Le sulfate de calcium est ajouté en faible quantité aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication pour retarder suffisamment la prise et assurer ainsi la mise en place convenable du mortier ou du béton [6].

## Chapitre 1 : Généralités sur les ciments et la valorisation du verre

---

Le sulfate de calcium peut être du gypse sulfate de calcium déshydraté ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), de l'hémihydrate ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ), de l'anhydrite (sulfate de calcium anhydre ( $\text{CaSO}_4$ ) ou un mélange de ceux-ci. Il est composé de 92 à 94% de ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), 2 à 3% de ( $\text{CaCO}_3$ ), et 2 à 4% d'autres éléments tels que les ( $\text{SiO}_2, \text{MgO}, \text{R}_2\text{O}$ )

Ces formes de sulfate de calcium présentent toutes la même solubilité finale quand elles se trouvent dissoutes dans l'eau, mais leur vitesse de dissolution peut être différente.

Le pourcentage optimal de gypse croit en fonction :

- de la teneur en alcalis, car l'addition du gypse neutralise l'action des alcalis.
- de la teneur en  $\text{C}_3\text{A}$  et de sa réactivité.
- de la finesse de mouture [7].

Au-dessus de  $1450^\circ\text{C}$ , se décompose en oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ , ou "chaux vive") et en dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ) [8].

### 1.2.5. Cendres volantes

Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées par les systèmes de dépoussiérages des gaz des chaudières des centrales thermiques. Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et différentes compositions de phase parce que celles-ci sont reliées exclusivement au type d'impuretés qui sont contenues dans le charbon que l'on brûle dans la centrale thermique. Des charbons provenant de la même source et utilisés dans la même centrale thermique produisent des cendres volantes très semblables.

Les particules de cendres volantes peuvent avoir des formes très différentes les unes des autres. Elles peuvent avoir une forme sphérique, avec une distribution granulométrique semblable à celle du ciment portland, elles peuvent contenir des sphères creuses et même dans certains cas, elles peuvent contenir seulement des particules angulaires.

Les cendres volantes se divisent en trois catégories :

- Les cendres silico-alumineuses (cendre de houille).
- Les cendres sulfo-calciques (cendre de lignite).
- Des cendres non typifiées de composition irrégulière ou de propriétés assez incertaines [9].

### 1.2.6. Fillers

Matière minérale, finement divisée destinée à remplir les vides laissés par un empilement granulaire de graviers, gravillons et sables. Le terme filler se rapporte à la petite taille des

## **Chapitre 1 : Généralités sur les ciments et la valorisation du verre**

---

grains qui le constitue. La nature chimico-minéralogique du filler peut varier, il s'agit généralement de calcaire broyé mais les cendres volantes, la fumée de silice, ou une combinaison de ces matériaux peut être utilisée comme filler.

Selon la norme NF EN 12620 [10], les fillers sont des granulats de taille inférieure à 0.063mm. Synonyme: granulats filler ou addition minérale fine. L'utilisation des fillers dans des dosages appropriés dans la formulation des bétons permet d'améliorer les propriétés d'écoulement du béton frais et les résistances mécaniques du béton durcis [11].

### **1.2.7. Schistes calcinés (T)**

Schiste calciné est le terme de produit qui indique le résidu de la cuisson des schistes argileux. Ce matériau est produit dans un four spécial à une température d'environ 800°C.

En raison de la composition de la matière naturelle et le processus de production, le schiste calciné contient des étapes consistant à mâchefer, en particulier du silicate de dicalcium et de l'aluminate mon-ocalcique.

Il contient également des proportions plus élevées de pozzolaniquement oxydes réactifs, en particulier  $\text{SiO}_2$  et des pourcentages plus faibles d'autres composants tels que CaO libre et du sulfate de calcium. En conséquence, un schiste calciné broyé finement possède comme le ciment portland des propriétés hydrauliques ainsi qu'une réaction pouzzolanique [12].

### **1.2.8. Calcaire**

Le calcaire est une roche sédimentaire carbonatée, composée d'au moins 50% de calcite  $\text{CaCO}_3$  (ou carbonate de calcium) et pouvant contenir de la dolomite, de l'aragonite. Les calcaires se forment soit par accumulation de fragments de squelettes ou de coquilles calcaires (coraux, bivalves, foraminifères), soit par précipitation chimique ou biochimique de carbonates de calcium.

### **1.2.9. Constituants mineurs du ciment**

Les oxydes mineurs les plus importants dans le ciment sont:  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  et  $\text{SO}_3$ . L'oxyde de magnésium ( $\text{MgO}$ ) provient de la dolomite, souvent présente avec le calcaire. Les oxydes alcalins  $\text{K}_2\text{O}$  et  $\text{Na}_2\text{O}$  proviennent en général, de l'argile et des feldspaths. L'anhydride sulfurique ( $\text{SO}_3$ ) dans le clinker provient de la pyrite ( $\text{FeS}_2$ ), du calcaire ou de l'argile et surtout des combustibles utilisés tels que le charbon, le fuel ou de gaz naturel [4].



# Chapitre 1 : Généralités sur les ciments et la valorisation du verre

## 1.3. CLASSIFICATION DU CIMENT

### 1.3.1. En fonction de leur composition

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par la norme Algérienne NA442 [13].

Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres Romains dans leur notation Européenne (la notation Française est indiquée entre parenthèse) :

- CEM I : Ciment portland (CPA-dans la notation française).
- CEM II : Ciment portland composé (CPJ).
- CEM III : Ciment de haut fourneau (CHF).
- CEM IV : Ciment pouzzolanique (CPZ).
- CEM V : Ciment au laitier et aux cendres (CLC).

La proportion (en masse) des différents constituants est indiquée dans le tableau 1.1.

**Tableau 1.1 :** Types de ciments avec leurs compositions correspondantes [14].

Ciment % en masse	Notation	K	S	D	Z	Cendres volantes		T	L	C.S
						V	W			
Portland	CPA-CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	0 – 5
Portland compose	CPJ-CEM II/A	80 – 94	6 - 20							
	CPJ-CEM II/B	65-79	21 – 35							
De haut fourneau	CHF-CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	0 – 5
	CHF-CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	0 – 5
	CLK-CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	0 – 5
Pouzzolanique	CPZ-CEM IV/A	65-90	-	10 - 35		-	-	-	-	0 – 5
	CPZ-CEM IV/B	45-64	-	36-55		-	-	-	-	0 – 5
Au laitier et aux cendres	CLC-CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30		-	-	-	0 – 5
	CLC-CEM V/B	20-39	31-50	-	31-50		-	-	-	0 – 5

### 1.3.2. En fonction de leur résistance normale

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours; des sous classes “R” sont associées à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées. Ces classes sont notées, classe 32.5, classe 42.5, classe 52.5. Elles doivent respecter les spécifications et valeurs garanties du tableau 1.2. Les valeurs entre parenthèses sont les valeurs garanties lorsqu’elles peuvent être inférieures aux valeurs spécifiées [14].

**Tableau 1.2 :** Valeurs des limites caractéristiques des classes de ciments [14].

Classe	Résistance à la compression (MPa)				Retrait à 28 jours ( $\mu\text{m/m}$ )	Début de prise (min)	Stabilité (mm)
	Au jeune âge		à 28 jours				
	2 Jours	7 Jours	Min	Max			
32.5	-	-	$\geq 32.5$	$\leq 52.5$	$\leq 800$	$\geq 90$	$\leq 10$
32.5R	$\geq 13,5$	-					
42.5	$\geq 12.5$	-	$\geq 42.5$	$\leq 62.5$	$\leq 1000$	$\geq 60$	
42.5R	$\geq 20$	-					
52.5	$\geq 20$	-	$\geq 52.5$	-	-		
52.5R	$\geq 30$	-					

### 1.3.3. Ciment adaptés à des usages spécifiques

Il existe des ciments dont les références ne sont pas normalisées au niveau Européen. Ils sont cependant, répertoriés dans la norme NF P 15-301[15] ; ils sont cités ci- dessous avec leur symbolisation normalisée et le numéro de la norme qui les décrit.

#### a) Ciment alumineux fondu CA (NF P 15-315) [16]

Il est obtenu en remplaçant l'argile par de la bauxite et en portant la cuisson jusqu'à la fusion ; l'alumine représente au moins 30 % de sa masse. Ce ciment, à prise lente mais à durcissement rapide, résistant aux milieux agressifs. Ses utilisations sont nombreuses : bétons réfractaires, béton soumis à des chocs, à un fort trafic ou à la corrosion, canalisations, ouvrages d'assainissement, réparations, scellements [17].

#### b) Ciment prompt naturel CNP (NF P 15-314) [18]

Ce ciment est particulièrement fin et moulable. Techniquement, c'est un ciment obtenu par une cuisson entre 1 000 à 1 200 °C de calcaires contenant de 23 à 30% d'argile et dont la prise s'effectue en dix ou vingt minutes [19]. Ce ciment donne Une résistance mécanique élevée à très court terme mais dont la progression est ensuite limitée, et un retrait faible. Il est utilisé pour les scellements, les réparations, les bétons projetés [20].

#### c) Ciments a maçonner CM (NF P15-307) [21]

Ciment amaigri ne comportant pas plus de 50 % de fines inertes ; utilisé pour les mortiers de maçonnerie courante [22].

## **Chapitre 1 : Généralités sur les ciments et la valorisation du verre**

---

Ce ciment contient, en proportions moindres, les mêmes éléments actifs que le ciment portland artificiel ; ses propriétés et son comportement dans les milieux courants sont analogues à ceux du ciment portland, mais ses résistances sont moins élevées [23].

### **d) Ciments Naturels CN (NF P15-308)**

Le ciment naturel à prise rapide, également appelé improprement "ciment romain" à ses débuts, est le premier ciment au sens moderne du terme. Il a constitué en son temps une révolution technologique. Il était à la source de nombreuses constructions au XIXe siècle. Ces ciments étaient appréciés pour 4 raisons principales : leur rapidité de prise, la résistance des mortiers, leur esthétique et la durabilité des ouvrages [24].

Et il est obtenu à partir d'un calcaire marneux ayant naturellement les proportions d'argile et de calcaire nécessaires. Le manque de régularité des caractéristiques de ce produit en limite l'intérêt ; reste essentiellement utilisé pour la fabrication de ciment prompt [27].

### **e) Ciment de laitier à la chaux C LX (NF P15-307)**

Ciment obtenu à partir de chaux hydraulique (environ 30 %) et de laitier granulé de haut fourneau (70%) [26].

## **1.4. PROCEDE DE FABRICATION DU CIMENT PORTLAND**

Toute l'histoire de la fabrication du ciment, commence à la carrière. Pour fabriquer du ciment, il faut réunir quatre éléments principaux selon des dosages préétablis : la chaux (65%), la silice (20%), l'alumine (10%), l'oxyde de fer (5%). L'élément prépondérant étant le calcaire, La cimenterie est d'ailleurs implanté à proximité d'un important gisement de cette matière [27].

### **1.4.1. Extraction et concassage**

Le calcaire et l'argile sont extraits de carrières situées à proximité des cimenteries. Abattus à l'explosif, les rochers et blocs sont transportés par des tombereaux (gros camions) vers des concasseurs afin de réduire leur taille et d'obtenir des cailloux de moins de 10 cm de diamètre. Ces matières premières font l'objet d'une sélection rigoureuse. Leur composition doit comprendre de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer dans des proportions bien déterminées. [28].

### 1.4.2. Préparation des matières premières

Pour favoriser les réactions chimiques qui suivent, les matières premières doivent être séchées et broyées très finement (quelques microns) dans des broyeurs à boulets ou dans des broyeurs à meules verticaux. Ces derniers, plus récents, sont plus économiques en énergie et permettent un séchage plus efficace. Après avoir été finement broyée, la farine crue est très largement brassée dans des silos d'homogénéisation [29]. Il existe quatre procédés de fabrication du ciment :

#### a) Trompe par voie humide (la plus ancienne)

Les matériaux sont délayés avec de l'eau de façon à obtenir une pâte fluide (28 à 35% d'eau) ayant une composition chimique convenable et qui sert à alimenter des fours rotatifs. Un four moyen de 150 mètres de longueur, 4 mètres de diamètre permet une production de 1000 tonnes/jours. Les plus grands en service ont des diamètres de 6 à 7 mètres, des longueurs de 230 mètres et peuvent produire près de 4000 tonnes de clinker par jour. Le clinker est refroidi vers 100°C dans des appareils spéciaux et stocké dans des halls.

C'est le procédé le plus ancien mais il n'est pas économique car il consomme énormément d'énergie (de l'ordre de 1250 à 1400 kcal par kg de clinker produit). Ce procédé tend pratiquement à disparaître actuellement [30].

Ce procédé ancien est, d'une façon générale, remplacé par la voie sèche. Le remplacement est réalisé dans les pays industrialisés depuis vingt à trente ans sauf exception. Ce procédé est en effet parfois encore utilisé, dans les pays industrialisés, pour incinérer des déchets industriels et agricoles [31]. .

#### b) Trompe par voie semi-humide (en partant de la voie humide)

C'est une variante du procédé par voie humide, la pâte est essorée par des filtres presses, boudinée, décarbonatée, avant d'être cuite dans les fours rotatifs courts [30].

Ces technologies, utilisées il y a une trentaine d'années, présentaient l'avantage d'une consommation calorifique plus faible que la voie humide [31].

#### c) Trompe par voie sèche (la plus utilisée)

Les roches sont concassées, échantillonnées, déversées dans des halls de pré-homogénéisation de façon à reconstituer une carrière artificielle. Elles sont reprises afin d'être transformées en poudre sèche dans des broyeurs sécheurs puis parfaitement homogénéisées par le procédé de fluidification. La poudre obtenue passe ensuite dans des fours le plus souvent constitués de

## **Chapitre 1 : Généralités sur les ciments et la valorisation du verre**

---

deux parties : une partie verticale (préchauffer) où elle se décarbonate et arrive ainsi vers 1000°C dans un four rotatif court (60 à 80 mètres de longueur).

Un four de 4 mètres de diamètre et 70 mètres de longueur a une production de 2500 tonnes/jours. Il existe des fours capables de produire jusqu'à 8000 tonnes de clinker par jour [30].

Les fours à préchauffeurs avec ou sans précalcinateurs sont les seuls procédés actuellement installés [31].

### **d) Trompe par voie semi-sèche (en partant de la voie sèche)**

Il constitue une variante de la voie sèche. La poudre est agglomérée avec de l'eau pour former des granulats qui passent d'abord sur une grille de décarnisation. On peut, avec ce procédé, utiliser des fours droits. Ce procédé est économique et consomme de l'ordre de 800 à 900 kcal/kg de clinker : soit environ 40% de moins que le procédé par voie humide [30].

### **1.4.3. Cuisson de cru**

La farine, précédemment préchauffée à 850°C est ensuite chauffée à 1450°C sous une flamme à 2000°C dans un four rotatif garni de brique réfractaires, long cylindre tournant de 1,5 à 3 tour/minute et légèrement incliné [32]. Tout au long de la cuisson, un ensemble de réactions physico-chimiques conduit à l'obtention du clinker. La décarbonatation du carbonate de calcium (calcaire) donne du gypse, la marne se scinde en sa constituante silice et alumine qui se combinent à la chaux pour former des silicates et aluminates de chaux. Ce phénomène progressif constitue la clinkérisation [29].

### **1.4.4. Refroidissement rapide du clinker**

À la sortie du four, un refroidisseur à grille permet d'assurer la trempe des nodules incandescents et de les ramener à une température d'environ 100°C. Le mélange en fusion est trempé (c'est-à-dire refroidi rapidement) par soufflage d'air, afin d'obtenir la chimie cristalline appropriée pour les propriétés. Le clinker refroidi à 100°C est transporté et stocké dans un hall de plusieurs dizaines de milliers de tonnes [33].

### **1.4.5. Broyage du clinker et élaboration de ciment**

Le clinker doit être à son tour broyé très finement. Ce broyage s'effectue dans des broyeurs à boulets. Les corps broyant sont constitués de boulets d'acier qui, par choc, font éclater les grains de clinker et amènent progressivement le ciment à l'état de fine farine, ne comportant que très peu de grains supérieurs à 80 microns. À la sortie du broyeur, un cyclone sépare les

## Chapitre 1 : Généralités sur les ciments et la valorisation du verre

éléments suffisamment fins des autres qui sont renvoyés à l'entrée du broyeur, C'est également lors du broyage que l'on ajoute au clinker le gypse (3 à 5%) indispensable à la régulation de prise du ciment.

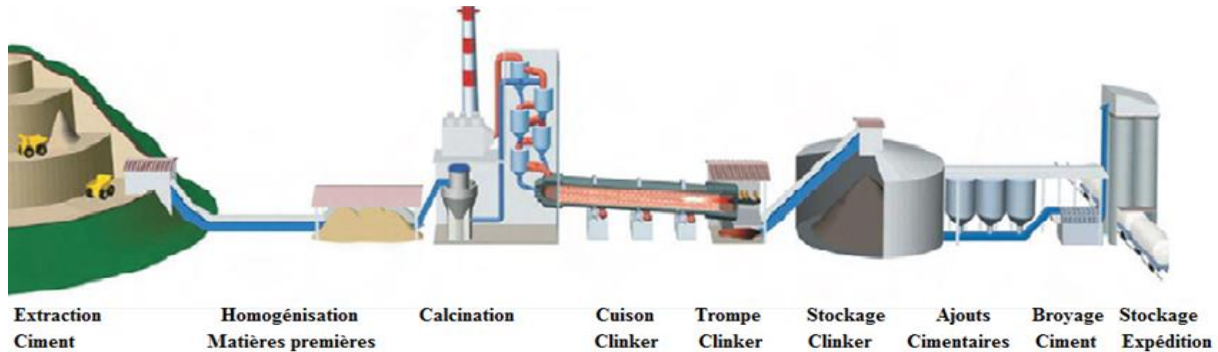


Figure 1.1 : Procédé de fabrication du ciment [34].

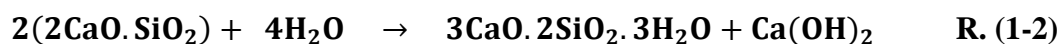
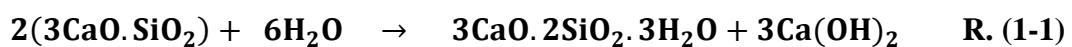
### 1.5. HYDRATATION DU CIMENT PORTLAND

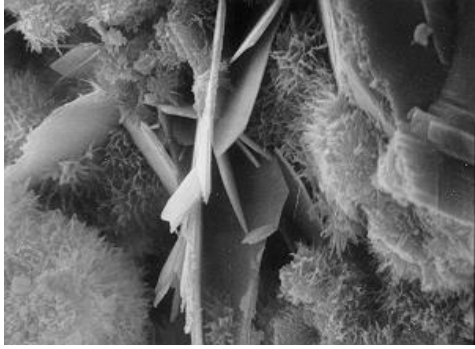
La plupart des propriétés du béton, et plusieurs aspects de sa durabilité dépendent des caractéristiques de la pâte de ciment durci. Il est donc important de comprendre la structure de la pâte de ciment hydraté. La prise du ciment n'est pas un séchage de la pâte après ajout de l'eau ; il s'agit d'un ensemble de réactions chimiques d'hydratation permettant le passage de la pâte de ciment (ciment additionné d'eau) de l'état liquide à l'état solide. L'hydratation du ciment met en jeu un nombre important de réactions chimiques complexes. Toutes ces réactions conduisent à la formation de silicates ou d'aluminates calciques hydratés qui font prise et qui donnent les propriétés mécaniques des pâtes de ciment (ciment + eau), des mortiers (ciment + eau + sable) et des bétons (ciment + eau + fins et gros granulats) [35].

#### 1.5.1. Hydratation des silicates $C_3S$ et $C_2S$

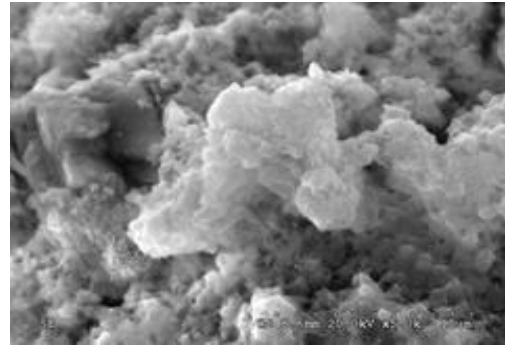
Les silicates  $C_3S$  et  $C_2S$  sont les phases majoritaires du ciment. L'alite est formée lorsque la bélite réagit avec la chaux à une température variant entre 1400 et 1500°C.

Lors de l'hydratation du ciment, la réaction chimique des deux silicates avec l'eau produit un gel de silice hydraté : l'hydroxyde de calcium C-S-H (Tobermorite) et portlandite  $Ca(OH)_2$  notée (CH) selon les réactions suivantes [36].

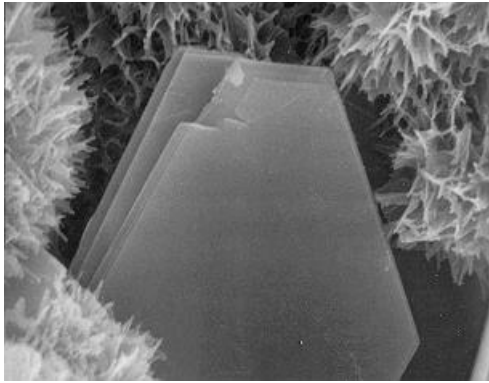




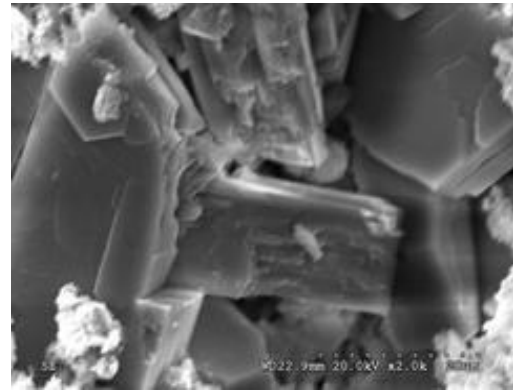
**Figure 1.2 :** C-S-H en fibre [37].



**Figure 1.3 :** Gel de C-S-H [38].



**Figure 1.4 :** Ca(OH)<sub>2</sub> et C-S-H [37].



**Figure 1.5 :** Cristaux de portlandite [38].

La majeure partie de l'hydratation du C<sub>3</sub>S se passe dans les vingt-huit premiers jours suivant le contact du ciment avec l'eau. Elle participe à la prise initiale et contribue aux résistances initiale et finale de la pâte. La réaction complète peut prendre jusqu'à une année voir plus [38].

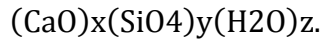
L'hydratation du C<sub>2</sub>S est beaucoup plus lente que celle du C<sub>3</sub>S. Il participe aux résistances au-delà d'une semaine après le contact avec l'eau. La quantité de portlandite produite est plus faible d'un tiers que dans le cas du C<sub>3</sub>S.

La portlandite est un composé défini et cristallisé (figure 1-4). Elle cristallise sous la forme de plaquettes hexagonales constituées d'un motif hexagonal en couche. Elle est précipitée à partir de la solution et représente 5 à 15% du ciment hydraté [38].

Le pourcentage de la portlandite est de 28% du poids du ciment complètement hydraté, et comme les réactions ne sont jamais achevées, les mêmes auteurs estiment que la quantité de la portlandite est entre 16 et 20% de la masse du ciment. Au cours de l'hydratation, elle est enrobée par les autres hydrates, c'est pourquoi sa croissance développe des contraintes internes qui pénalisent la résistance mécanique du matériau [38].

## Chapitre 1 : Généralités sur les ciments et la valorisation du verre

Le C-S-H est le composé majoritaire du ciment hydraté, il représente 50 à 70% de sa masse [38]. Il est non stoechiométrique, mal cristallisé et de structure intermédiaire entre les cristaux et les gels (figures 1.2 et 1.4). Plus de trente phases cristallines de cet hydrate sont connues. Elles sont toutes nommées sous le terme générique de C-S-H. Les tirets dans l'appellation traduisent un caractère non défini. Les (C-S-H) sont des composés non cristallins. Ils ont les caractéristiques d'un gel et possèdent une composition variable, leur formule générale est la suivante :

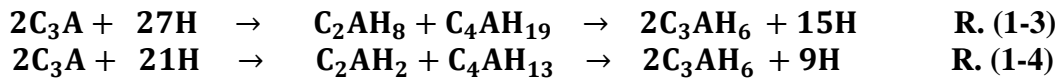


Avec :  $0.6 < \frac{x}{y} < 2$  et  $1 < z < 4$ .

Leur composition moyenne est proche de  $(\text{CaO})_{1.7}(\text{SiO}_4)(\text{H}_2\text{O})_4$ .

### 1.5.2 Hydratation de la phase aluminates

La phase aluminates composée de  $\text{C}_3\text{A}$  et  $\text{C}_4\text{AF}$  forme également des hydrates, mais elle ne contribue que peu à la résistance de la pâte du ciment, elle est le responsable du phénomène dit de «prise éclair». L'hydratation du  $\text{C}_3\text{A}$ ; qui conduit à la formation d'hydroaluminates métastables qui disparaissent au profit de l'hydrogénât  $\text{C}_3\text{AH}_6$ . Elle peut être représentée par les équations suivantes:



Pour éviter ce phénomène (dite prise éclair), la réaction d'hydratation de  $\text{C}_3\text{A}$  et  $\text{C}_4\text{AF}$  doit être contrôlée avec du gypse. Le  $\text{C}_3\text{A}$  et le gypse se dissolvent les premiers lors de l'hydratation du ciment. L'hydratation de  $\text{C}_3\text{A}$  conduit à la formation de trisulfoaluminate de calcium hydraté ou Ettringite ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ ) (figure 1.6). Le  $\text{C}_3\text{A}$  s'enrobe ensuite d'une couche protectrice d'Ettringite très finement cristallisée. Cette couche se dissout ensuite pour recristalliser sous la forme d'aiguilles prismatiques [38]. L'ettringite n'est un produit hydraté stable que lorsque le gypse est en quantité suffisante. Or, dans la majorité des cas, le  $\text{C}_3\text{A}$  est en excès par rapport au gypse. C'est pourquoi, quand le gypse est consommé et que le  $\text{C}_3\text{A}$  n'est pas complètement hydraté, l'Ettringite se transforme en Monosulfoaluminate tétracalcique hydratés (figure 1.7). Le Monosulfoaluminate cristallise sous la forme de plaquettes hexagonales. Sa structure est constituée d'une double couche d'hydroxyde avec une couche d'hydroxyde de calcium dans laquelle le tiers des ions calcium est remplacé par des ions  $\text{Al}^{+3}$  ou  $\text{Fe}^{+3}$  et des contre-ions sulfates entourés de molécules d'eau dans l'espace interfeuillet. L'ettringite et les Monosulfates représentent 20 à 30% du ciment hydraté. La

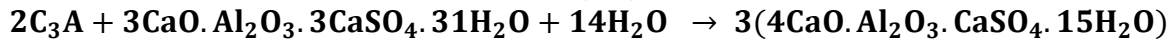


## Chapitre 1 : Généralités sur les ciments et la valorisation du verre

vitesse de recristallisation de l'ettringite est très faible. Cette particularité joue un rôle très important dans l'hydratation du ciment puisqu'elle permet de garder la maniabilité de la pâte dans les premières heures [38]. Les réactions d'hydratation sont comme suit :



R. (1-5)



R. (1-6)

De plus, si après la formation du Monosulfoaluminate tétracalcique il reste du  $\text{C}_3\text{A}$ , il se forme des composés de moins en moins riches en sulfate.

La phase ferrique  $\text{C}_4\text{AF}$  adopte le même mécanisme d'hydratation que la phase  $\text{C}_3\text{A}$ , les réactions sont cependant plus lentes, en présence d'eau et du gypse. L'hydratation de  $\text{C}_4\text{AF}$  est plus efficacement retardée que celle du  $\text{C}_3\text{A}$ .

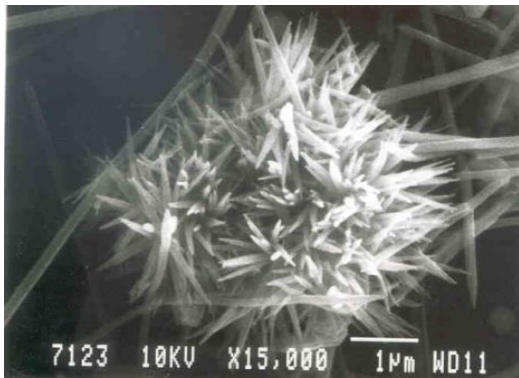


Figure 1.6 : Aiguilles d'ettringite [37].

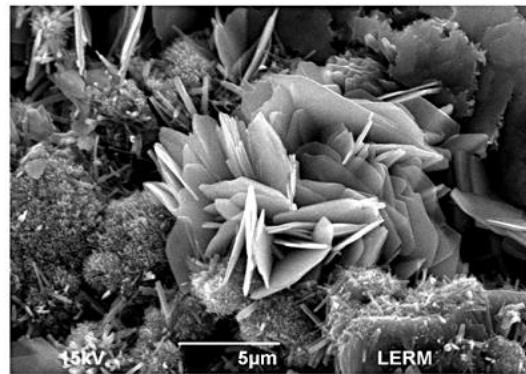
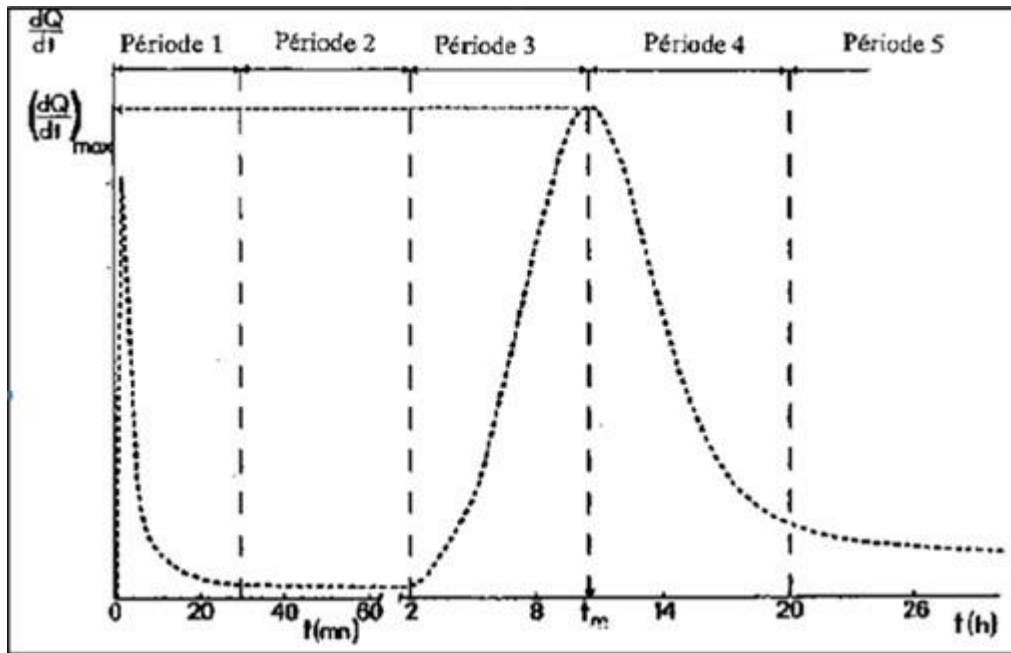


Figure 1.7 : Monosulfoaluminate hydraté [39].

### 1.5.3. L'aspect cinétique

La variation du flux thermique enregistrée lors de l'hydratation du silicate tricalcique en pâte (ou du ciment portland) est généralement décrite dans la bibliographie à l'aide de la nomenclature suivante figure 1.8 :

- 1- la période initiale qui concerne les premières minutes de la réaction, elle correspond au premier pic exothermique.
- 2- la période d'induction ou période dormante, de 2 à 6 heures selon la réactivité du  $\text{C}_3\text{S}$ , elle correspond à un très faible dégagement de chaleur traduisant une faible activité chimique.
- 3- la période d'accélération, correspondant à la partie ascendante du second pic exothermique.
- 4- la période de décélération, associée à la partie descendante du second pic exothermique.
- 5- la période finale, période de faible activité thermique pouvant s'étendre sur un an ou plus.



**Figures 1.8 :** Les différentes périodes de la courbe calorimétrique lors de l'hydratation des silicates tricalciques C<sub>3</sub>S en pâte.

Sans cette cinétique particulière, l'utilisation du ciment portland n'aurait pas connu le développement qu'elle a eu dans les bétons. C'est en effet l'existence de la période dormante, pendant laquelle le béton reste ouvrable, ce qui permet le transport et la mise en place du béton. La prise du ciment coïncide avec la fin de la période d'accélération; une accélération rapide permet donc de procéder plus vite au décoffrage.

### 1.6. EVOLUTION DES PROPRIETES DU CIMENT PORTLAND

Dans une même famille, l'hydratation des constituants conduit à des produits identiques. Seules les cinétiques des réactions diffèrent.

Ce sont ces différentes cinétiques qui sont à l'origine de l'évolution des propriétés mécaniques d'une pâte de ciment à l'échelle macroscopique. Elles permettent le maintien de la maniabilité, la prise puis le durcissement de cette pâte.

L'évolution des propriétés des liants hydrauliques résultent de la superposition de trois types de phénomènes; un phénomène chimique (l'hydratation), un phénomène physique (la précipitation des solides) et un phénomène mécanique (la prise et le durcissement) [7].

# **CHAPITRE 1**

## **GENERALITES SUR LES CIMENTS ET LA VALORISATION DU VERRE**

### **PARTIE 02:**

#### **VALORISATION DE VERRE DANS LE DOMAINE DU GENIE CIVIL**

# **CHAPITRE 1**

## **GENERALITES SUR LES CIMENTS ET LA VALORISATION DU VERRE**

### **PARTIE 02: VALORISATION DE VERRE DANS LE DOMAINE DU GENIE CIVIL**

#### **1.7. INTRODUCTION**

L'utilisation du verre comme ajout cimentaire dans le béton peut être une avenue très intéressante dans l'industrie du ciment et béton, du fait que le verre est un matériau amorphe présentant une composition chimique proche des autres ajouts connus (Fumée de silice, Laitier, Cendre volante) [39]. Dans ce qui suit, on expose d'abord les déchets (notion, classification, la gestion des déchets, puis on abordera les résultats des études scientifiques menées sur la valorisation des déchets de verre dans le génie civil et plus particulièrement dans l'industrie cimentaire.

#### **1.8. DEFINITION DES DECHETS**

La définition intuitive est généralement donnée par rapport à l'usage d'un produit, d'un matériau dont on ne sait plus quoi faire, et dont il faut se débarrasser, La notion de déchets est donc liée à la durée de vie d'un produit, et ce produit dont l'usage est terminé, peut être lui-même recyclé ou transformé en sous produits réutilisables.

#### **1.9. CLASSIFICATION DES DECHETS**

Les déchets sont généralement classés en fonction de leur provenance et de leur dangerosité. Le tableau 1.3 donne un exemple de chaque classe :

## Chapitre 1 : Généralités sur les ciments et la valorisation du verre

**Tableau 1.3.** Classification des déchets en Polynésie française 2018

		Déchets dangereux (I)	Déchets non dangereux (II)	Déchets inertes(III)	
<b>Déchets ménagers</b>	<b>Ordures ménagères (OM)</b>		Ordures ménagères résiduelles (OMR)	Verre	
			Déchets recyclables	Plastique non recyclable	
	<b>Déchets ménagers occasionnels</b>	Déchets ménagers spéciaux : Déchets toxiques et déchets toxiques en quantité dispersée		Déchets verts	Encombrants en métal et en plastique
				Textile (non souillé)	
				Encombrants en bois	
				Pneus	
	Carcasses de voitures				
<b>Déchets industriels</b>		Déchets industriels spéciaux : déchets des activités de soins à risques infectieux (DASRI), déchets d'amiante, déchets toxiques et déchets toxiques en quantité dispersée	Déchets assimilables aux déchets ménagers	Déchets du bâtiment et travaux publics	
			Déchets industriels banals		
			Boues d'assainissement		

### 1.10. GESTION DES DECHETS

La gestion des déchets consiste en la détermination du type de traitement à appliquer à telle ou telle autre catégorie des déchets. La question de la gestion des déchets constitue un défi majeur pour tous les pays, plus particulièrement ceux en voie de développement, car ses effets sont fortement visibles par tous. La priorité en matière de gestion des déchets est la réduction à la source : cela consiste à en produire le moins possible, voire pas du tout. Dès lors que le déchet est produit, une hiérarchie des modes de traitement s'impose, justifiée par la finalité suivante : valoriser tout ce qui peut l'être afin de réduire le gaspillage des ressources sans porter atteinte à l'environnement et à la santé. En respectant les principes généraux suivant :

- réduction à la source de la quantité et de la toxicité des déchets produits.
- recyclage ou valorisation des “ sous-produits ” de la fabrication.
- prétraitement ou traitement interne ou externe enfouissement.

Le recyclage est l'un des procédés de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. Le recyclage apporte une contribution importante à la baisse des quantités de déchets à éliminer par enfouissement, par incinération ou autre moyens. IL est défini comme la récupération de matériaux utiles, tels que le papier, le verre, le plastique et les

## Chapitre 1 : Généralités sur les ciments et la valorisation du verre

métaux, ainsi que la transformation des matériaux, pour fabriquer de nouveaux produits afin de réduire la quantité de matières premières vierges nécessaires pour répondre aux demandes des consommateurs [40].

### 1.11. VALORISATION DU VERRE DANS LE DOMAINE DE GENIE CIVIL

Dans le langage courant, le mot verre sert à désigner un matériau dur, fragile (cassant) et transparent. Dans le langage scientifique, le mot verre désigne un matériau amorphe, c'est-à-dire non cristallin [39].

Le verre existe déjà naturellement depuis plusieurs centaines de milliers d'années. L'homme l'utilisa pour la première fois il y a 100 000 ans sous forme d'obsidienne, (verre naturel d'origine éruptive) pour fabriquer des outils, des armes coupantes et des bijoux. L'origine des verres remonte à la plus haute Antiquité. Il y a six mille ans, des potiers Egyptiens ont fabriqué le premier verre tout à fait par accident en cuisant leurs poteries [41].

### 1.12. STRUCTURE DU VERRE

#### 1.12.1. Composition chimique du verre

La composition chimique du verre dépend de ces éléments et leurs caractéristiques. En générale sa composition est celle présentée sur le tableau 1.4.

**Tableau 1.4** : Composition chimique du verre [39].

Sable ( $\text{SiO}_2$ )	68 à 74 %
Oxyde de sodium ( $\text{Na}_2\text{O}$ )	12 à 16%
Chaux ( $\text{CaO}$ )	7 à 14 %
Potasse ( $\text{K}_2\text{O}$ )	1%
Alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	0,3 à 3 %
Oxyde d'antimoine ( $\text{SbO}$ )	0,3 à 3 %

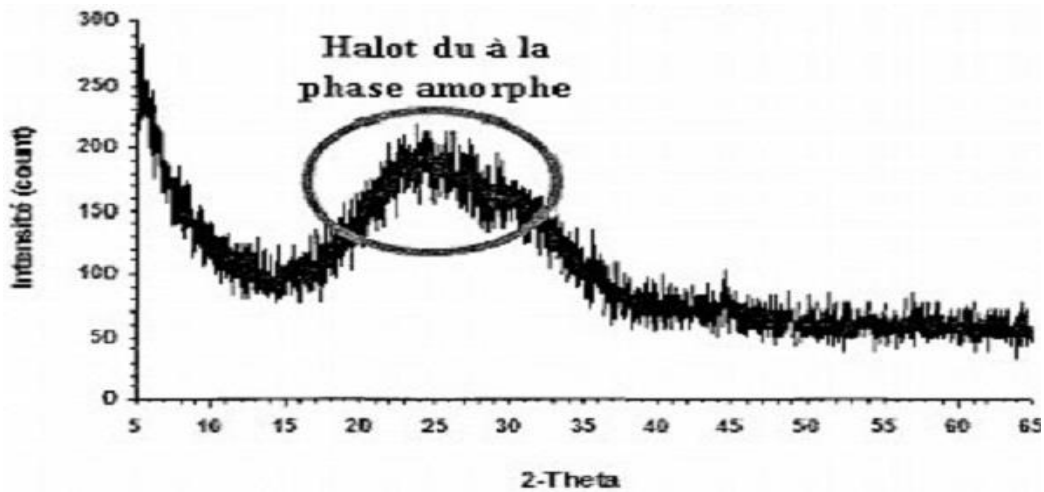
#### 1.12.2. Structure vitreuse du verre

La (figure 1.9). Présente un DRX sur une particule de verre qui présente un halot montrant la phase amorphe de ce matériau. [39].

Par verre, on désigne «un solide non cristallin, présentant le phénomène de transition vitreuse». Cette définition est plus générale, elle englobe les matériaux amorphes, c'est à dire

## Chapitre 1 : Généralités sur les ciments et la valorisation du verre

les matériaux obtenus par refroidissement, mais exclut les matériaux non cristallins qui n'ont pas la stabilité interne requise [42].

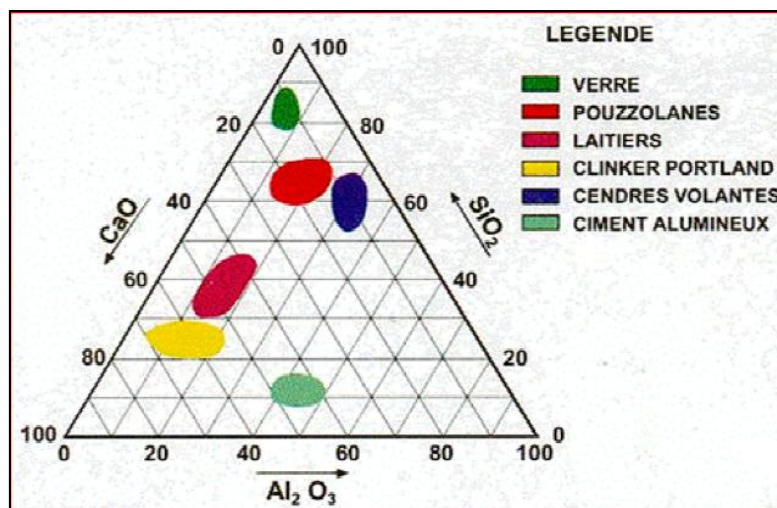


**Figure 1.9 :** Diffractogramme des rayons «X» du verre (Laboratoire des Matériaux Cimentaires Alternatifs, Université de Sherbrooke) [39].

En effet, l'état vitreux est un état solide métastable, qui peut présenter un ordre au niveau des liaisons interatomiques mais qui est désordonné, tout comme les liquides, à plus grande échelle [43].

### 1.13. VALORISATIONS DE POUDRE DE VERRE EN GENIE CIVIL

Les déchets de verre ont une grande valeur dans le domaine de construction. Ces derniers peuvent être valorisés de plusieurs façons dans le domaine de construction.



**Figure 1.10 :** Position du verre dans le système CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [44].

Un nombre important de recherches scientifiques sont publiées récemment étudiant la possibilité et la faisabilité de l'utilisation des déchets de verre comme substituant des

## Chapitre 1 : Généralités sur les ciments et la valorisation du verre

granulats naturels (sable et/ou gravier), du ciment ou du clinker dans le ciment. D'une manière générale [41] :

- La valorisation des déchets de verre est une alternative à l'extraction intensive de granulats coralliens qui a un impact négatif sur l'environnement destruction des récifs, mauvaise qualité de l'eau.
- Il peut être employé dans diverses applications comme la construction de massif drainant ou encore en tant que sous-couche pour les stationnements. Son incorporation dans les bétons auto-plaçant (BAP) offre une fluidité considérable.
- Il peut être utilisée dans le béton pour couler des murs porteurs du bâtiment ainsi que les dalles de plancher des bureaux.
- Il peut être utilisé dans les projets de construction des maisons, trottoirs et dans le pavé uni.
- Il peut être utilisé pour remplacer une partie du ciment dans les bétons binaires et ternaires qui sont recommandés pour les ouvrages d'art [41].



**Figure 1.11** : Verre recyclé (la poudre et agrégats) dans le béton non structural [41].

### 1.13.1. Utilisation de la poudre de verre comme substituant du ciment

Nous sommes intéressés dans le présent travail à l'utilisation de la poudre de verre comme ajout. Pour cette raison, nous allons exposer seulement les résultats des travaux traitant la valorisation de cette poudre dans le béton, le mortier, et ciment.



### 1.13.2. Réaction pouzzolanique (ciment-verre)

La réaction pouzzolanique de la poudre de verre dans une matrice cimentaire désigne donc la réaction en présence d'eau, de la silice amorphe du verre avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment [45]. Selon la réaction suivante [46] :



### 1.13.3. Facteurs influençant la réaction pouzzolanique

Ils existent plusieurs facteurs qui influent sur la réaction pouzzolanique de la poudre de verre : la finesse du verre, le taux du verre, la couleur du verre et la température de murissement.

(Shayan et al, 2004) [47]. Dans leur étude ont remarqué que :

- La poudre de verre de finesse Blaine relativement élevée de 800 m<sup>2</sup>/kg développe des réactions pouzzolaniques importantes.
- Le taux du verre : La résistance des mortiers et des bétons diminue en fonction de leur teneur en verre [48].

D'autres études sur le béton ordinaire réalisé par (Shayan et al, 2006) [49]. Montrent que :

- On peut incorporer jusqu'à 30 % de la poudre de verre en remplacement partiel du ciment.
- La couleur du verre : Le verre de couleur brune est le verre qui possède la plus faible activité pouzzolanique derrière le verre vert puis le verre blanc.
- La température : La température de cure élevée accélère l'activation de la réaction pouzzolanique du verre (Idir, 2009) [50].

Les résultats de l'étude de (SHI et al, 2005) [51] montrent que, la réaction pouzzolanique est d'autant plus importante que la finesse est élevée, ils ont également observé qu'une augmentation de la température de murissement des échantillons accélère l'activation de la réaction pouzzolanique de la poudre de verre et des cendres volantes. Les résultats de cette étude sont illustrés dans la (figure 1.12) [48].

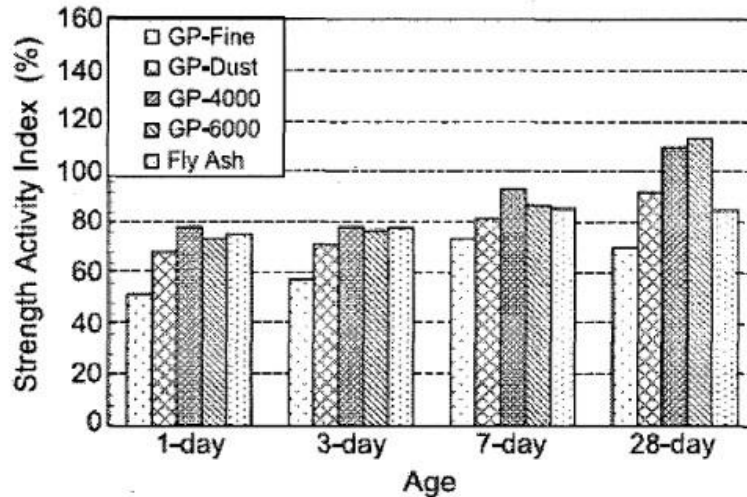


Figure 1.12 : Activité pouzzolanique de la poudre de verre (Shi et al, 2005) [51].

### 1.13.4. La réaction alcali-silice

La forte teneur en silice du verre laisse prévoir qu'il peut développer d'importante réaction alcali-silice lorsqu'il est utilise comme substituant partiel des granulats dans le béton. Par contre lorsqu'il est broyé et utilise comme ajout cimentaire, cette propriété est utilisée à l'avantage pour développer d'important effet pouzzolanique suite a la réaction pouzzolanique entre la silice et la portlandite. [48].

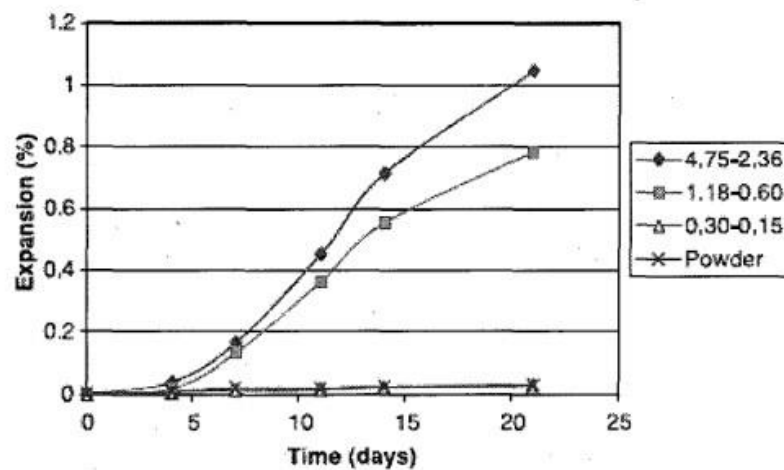


Figure 1.13 : Expansion due à la RAG (réaction alcali-granulats) sur des mortiers contenant des particules de verre de différentes tailles (Shayan et al, 2004) [47].

### 1.13.5. Rôle des pouzzolanes dans la réduction des expansions dues a la réaction alcali-silice (ciment -verre)

Dans sa thèse, (Idir, 2009) [50] mentionne que les fines de verre soit la poudre de verre peut servir à inhiber l'expansion. Cependant, il faut rester prudent, car la teneur élevée en alcalis du verre peut fournir une grande quantité d'alcalis à la solution interstitielle pouvant entraîner des expansions importantes. (Shi et al. 2005) [51] ont expérimentés sur des mortiers incorporant des cendres volantes (20%) ou de la poudre de verre (20%). Ces derniers ont développé des expansions beaucoup plus faibles que celle du témoin, mais les expansions développées sont supérieures à la limite de 0,10% à 14 jours. Le mortier avec cendres volantes a une expansion plus faible que celui avec poudre de verre. Ces derniers mentionnent qu'un remplacement de 30% du ciment par des cendres volantes est généralement recommandé afin de contrer l'expansion délétère due à la réaction alcalis-silice (R.A.S) [47].

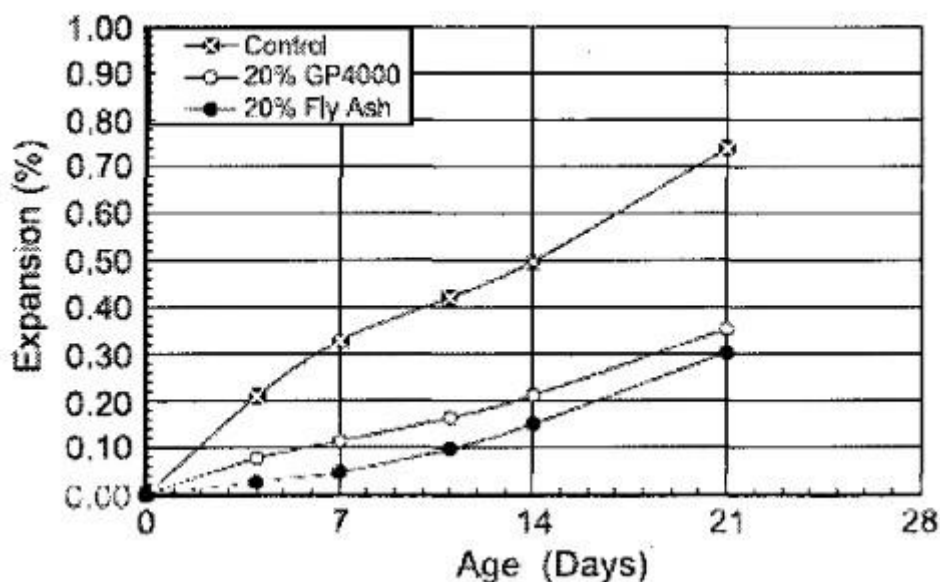
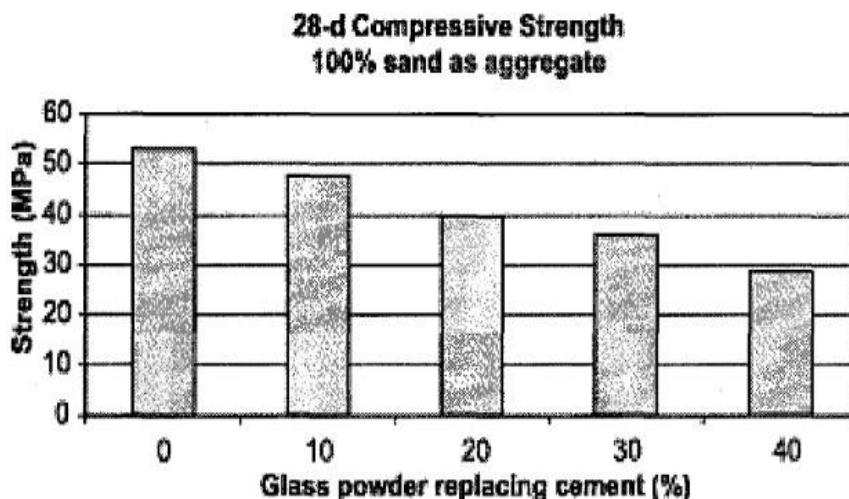


Figure 1.14 : Expansion due a la RAG a 23°C (SHI et al, 2005) [51].

### 1.13.6. Resistance à la compression des mortiers formulés à base de la poudre de verre

Shayan et al, 2004 [47]. ont étudié l'effet de la substitution partielle du ciment portland par la poudre de verre sur la résistance à la compression du mortier. Ils ont remarqué :

- une diminution de la résistance à la compression lorsque le taux de remplacement par la poudre de verre augmente.
- Les indices de pouzzolanicité à 28 jours respectifs des mélanges avec 10%, 20%, 30% et 40% de poudre de verre sont d'environ 92%, 77%, 71% et 58% [48].



**Figure 1.15 :** Resistance à la compression des mortiers incorporant la poudre de verre (Shayan et al, 2004) [47].

Dans sa recherche, (Nara.Y, Guenchouba.Dj) [9] ont substitué une partie de ciment CPA par l'ajout de la poudre de verre. Ils ont utilisés trois types de poudres de verre de finesse différentes PV30 (SSB=3000cm<sup>2</sup>/g), PV45 (SSB=4500cm<sup>2</sup>/g), et PV70 (SSB=7000cm<sup>2</sup>/g). Les mélanges des ciments étudiés sont représentés dans le tableau 1.5.

**Tableau 1.5 :** Mélanges des ciments étudiés [9].

Type de ciment	Verre (PV)
100%CEM	0%
90% CEM+10% PV30	10%
80 %CEM+20% PV30	20%
90 %CEM+10% PV45	10%
80 %CEM+20% PV45	20%
90 %CEM+10% PV70	10%
80 %CEM+20% PV70	20%

Les résultats de la mesure de la résistance mécanique à la compression et à la flexion aux échéances 2 jours et 28 jours des mortiers confectionnés sur des éprouvettes prismatiques de 4x4x16 cm<sup>3</sup> sont représentés dans le tableau 1.6 :

**Tableau 1.6** : Résistances mécaniques des mortiers en fonction du taux de verre [9].

Echantillons	Consistance	Résistance à la compression		Résistance à la flexion	
		2j	28j	2j	28j
0%	6.5	19.68	30.575	11.563	17.948
10 % PV30	7	18.475	31.42	15.521	18.646
20 % PV30	10	20.926	26.59	15.156	15.542
10 % PV45	8	19.268	31.07	12.968	17.635
20 % PV45	14	17.15	24.36	5.938	14.635
10 % PV70	8	22.336	33.036	7.687	18.521
20 % PV70	17	18.17	25.81	6.188	15.188

Ils ont conclu que :

- L'addition progressive de la poudre de verre dans le mortier jusqu'à 20%, a entraîné une légère diminution des résistances mécaniques par rapport à celle du témoin au jeune âge. Ces résistances sont comparables avec celle du mortier témoin.
- A' 28 jours, l'incorporation de la poudre de verre à des taux de 10 % augmente nettement la résistance à la flexion des mortiers.
- Les mortiers élaborés avec 10% de poudre de verre développent des résistances légèrement supérieures par rapport à celle du mortier témoin. Cette augmentation est en fonction de la finesse de la poudre de verre, et l'optimum s'obtient pour 10% de (PV70).
- Cette amélioration de la résistance peut être expliquée par l'effet physique : augmentation de la compacité de la pâte, par l'effet chimique: réaction pouzzolanique de la poudre de verre avec les produits d'hydratation du clinker pour former des C-S-H denses responsables du développement de la résistance.
- L'augmentation de la teneur en verre dans les ciments augmente la demande en eau. Lorsque la finesse de la poudre de verre augmente, la consistance diminue et la demande en eau augmente.

L'étude réalisée par (Nguyen.H) [52]. qui consiste à mesurer la résistance mécanique (à la compression et à la flexion) des mortiers préparés par le remplacement du ciment par la poudre de verre en raison de 0%, 10%, 20%, 35% a long terme a conduit à l'obtention des résultats suivants (tableau 1.7). Il a constaté que :

## Chapitre 1 : Généralités sur les ciments et la valorisation du verre

**Tableau 1.7 :** L'évolution de la résistance à la compression et la flexion en fonction du temps à long terme des mortiers M0, M10, M20, M35 [52].

Ciment préparés	C+ 0% verre	C+10% verre	C+20% verre	C+35% verre
R. à la compression 28j (MPa)	39	32	36	22
R. à la compression 55j (MPa)	47	45	43	24
R. à la compression 112j (MPa)	49	48	46	27
Résistance à la flexion 28j (MPa)	5.8	6	5.2	4.1
Résistance à la flexion 55j (MPa)	6.1	6.1	6	4.5
Résistance à la flexion 112j (MPa)	6.4	6.2	5.8	4.9

- Les mortiers M10 et M20 Développent une résistance comparable à celle du mortier de référence, résistance qui atteint plus de 90% de la valeur de M0 aux âges de 56 jours et 112 jours.
- Ce gain de résistance peut être attribué à un effet pouzzolanique des MV qui produisent, grâce à leur finesse, un effet filler entre les grains du ciment.

# **CHAPITRE 2**

**MATERIAUX ET PROCEDURES  
EXPERIMENTALES**

# CHAPITRE 2

## MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

### 2.1. INTRODUCTION

Dans ce deuxième chapitre, on présentera les essais de caractérisation effectués sur les ciments élaborés. Ces essais qui ont été conduits conformément aux différentes normes Algériennes et Européennes, sont réalisés majoritairement dans le laboratoire de contrôle continu de cimenterie de Hdjar-soud Wilaya de Skikda.

### 2.2. PREPARATION DES NOUVEAUX CIMENTS

Les nouveaux ciments sont obtenus par homogénéisation d'un ciment CEM I - CPA et la poudre de verre: Les déchets de verre utilisés proviennent des chutes de verres plats transparents des fenêtres collectés auprès du laboratoire pédagogique du département de Génie Civil et Hydraulique de notre université (8 mai 1945 de Guelma). Ces chutes, Après nettoyage, séchage, concassage ont fait l'objet d'un broyage et un tamisage (tamis 90 $\mu$ m) la poudre de verre ainsi obtenue est ajoutée au ciment C E M I.

Après dosage et homogénéisation, nous avons élaboré quatre échantillons de ciments composés en faisant varier la proportion des déchets de verre de 0 à 30 %.

**Tableau 2.1:** Désignation et dosage des ciments élaborés.

<b>Ciment</b>	<b>E0</b>	<b>E10</b>	<b>E20</b>	<b>E30</b>
<b>CPA (%)</b>	100	90	80	70
<b>Verre (%)</b>	0	10	20	30

Le Tableau 2.1 regroupe les ciments élaborés et la teneur de chaque constituant. L'utilisation de la poudre de verre dans la fabrication du ciment n'entre pas dans le champ de la norme Algérienne du ciment NA442 [13], mais il répond à la démarche environnementale adoptée par les cimentiers pour réduire l'émission des gaz à effet de serre.





Figure 2.1 : Matériaux utilisés



Figure 2.2: Broyage des déchets de verre.

### 2.3. ESSAIS EFFECTUES

#### 2.3.1. Préparation des mortiers normalisés

Le sable normalisé [un sable naturel, siliceux, le plus quartzeux possible en particulier dans sa partie fine, propre, à grains arrondis et sec, livrée en sacs étanches contenant 1350 g correspondant à la préparation de 3 éprouvettes (4x4x16)cm<sup>3</sup> et le ciment à tester sont gâchés avec de l'eau en utilisant les proportions suivantes [53] :

- 450 g  $\pm$  2 g de ciment.
- 1350 g  $\pm$  5 g de sable normalisé.
- 225 g  $\pm$  1 g d'eau potable de robinet.

Le rapport E/C d'un tel mortier est donc 0.50. Avant d'être utilisé pour les différents essais ce mortier est malaxé pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la Norme EN196-1 (voir le tableau 2.2)



**Figure 2.3 :** Malaxeur pour la préparation du mortier normalisé

**Tableau 2.2 :** Malaxage d'un mortier normal [53].

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction du ciment		Introduction du sable		Raclage de la cuve		
Durée			30 s	30 s	30 s	15 s	75 s	60 s
Etat de malaxeur	Arrêt		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrêt		Vitesse rapide

Avec le mortier normal préparé on remplit un moule (4x4x16)cm<sup>3</sup>. Le serrage du mortier dans ce moule est obtenu en introduisant le mortier en deux couches et en appliquant au moule 60 chocs à chaque fois. Le moule est arasé, vibré et recouvert d'une plaque de verre et entreposé dans la salle ou l'armoire humide. Après 24 h du début du malaxage, ces éprouvettes sont démoulées et entreposées dans de l'eau à 20 °C ± 1°C jusqu'au moment de l'essai.

### 2.3.2. Essais de caractérisation chimique

#### 2.3.2.1. Perte au feu (PAF)

La perte au feu est l'élimination de CO<sub>2</sub>, l'eau de constitution et les matières organiques. La PAF a été déterminée en atmosphère oxydante (air) et conduite selon les prescriptions de la norme Algérienne NA235 [54] et sa vérification est faite selon la norme NA442.



**Figure 2.4 :** Four de calcination pour PAF

### 2.3.2.2. Composition chimiques par Fluorescence X

L'analyse chimique par spectromètre à fluorescence X [55] consiste à déterminer le pourcentage des différents oxydes dans la matière à étudier ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{AlO}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$ ) ainsi le calcul des modules et des indices. Dans son principe, un faisceau des rayons  $X$  est dirigé sur l'échantillon à analyser, provoquant l'émission par ce dernier des radiations  $X$  secondaire, dites de fluorescence. Ces radiations ont les longueurs d'onde caractéristiques de chaque élément contenu dans l'échantillon. La radiation est canalisée vers un cristal analyseur qui sépare les diverses longueurs d'ondes et les diffracte vers un détecteur. Les couches d'électrons concernées sont principalement les couches inertes (K, L). La mesure de l'intensité de chacune des raies caractéristiques des éléments à analyser (Ca, Si, Al, Fe, etc.) est faite par spectromètre.



**Figure 2.5:** Spectromètre à Fluorescence X

### 2.3.3. Caractérisation physique

#### 2.3.3.1. Masse volumique absolue des ciments anhydre

Les masses volumiques sont mesurées sur poudre de ciment anhydre conformément à la norme NA2595 [56]. La masse volumique absolue est mesurée à l'aide de densimètre Le Chatelier en utilisant le benzène comme solution inerte. La masse volumique absolue est mesurée avec l'équipement illustré dans la figure 2.6, en utilisant la formule suivante :

$$P_{\text{abs}} = \frac{M_1}{V_2 - V_1} \quad (2.1)$$

$M_1$  : Masse de l'échantillon de ciment

$V_1$  : Volume initial du benzène

$V_2$  : Volume après l'introduction de l'échantillon de ciment.



Figure 2.6: Masse volumique absolue des ciments.

#### 2.3.3.2. Masse volumique à l'état frais

La mesure de la masse volumique à l'état frais est effectuée par remplissage d'un récipient de volume connu par le mortier frais de chaque échantillon. La masse volumique à l'état frais ( $\rho_f$ ) du mortier est donnée par la formule suivant :

$$\rho_f = \frac{M_1 - M_0}{V} \quad (2.2)$$

$M_0$  : masse du récipient vide.

$M_1$  : masse de l'échantillon plus récipient.

$V$  : volume du récipient.

### 2.3.3.3. Mesure de la Surface Spécifique de Blaine (SSB) des ciments

La finesse de mouture de la poudre de ciment est mesurée à l'aide de la perméabilimètre de Blaine représentée dans la figure 2.7. Sa description complète et son principe de fonctionnement sont données par la norme EN 196-6 [57].



**Figure 2.7 : Appareil de Blaine (SSB)**

### 2.3.3.4. Absorption d'eau par immersion totale

L'absorption d'eau par immersion d'un mortier est déterminée selon la prescription de la norme NBN B15-215 :1989 [58].

Cet essai a été effectué afin d'avoir une idée sur la porosité interne du matériau, en déterminant la masse d'eau que peut absorber les éprouvettes après immersion totale durant une période donnée.

Rappelons que l'essai consiste à un séchage des éprouvettes  $(4 \times 4 \times 16) \text{cm}^3$  du mortier jusqu'à masse sèche constante dans une étuve ventilée dont la température est maintenue à  $150^\circ\text{C}$ . Ensuite l'immersion totale des éprouvettes dans un bac à eau à  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  durant un minimum de 48h et jusqu'à saturation du matériau. Avant la pesée l'éprouvette est essuyée avec une éponge humide de manière à la débarrasser de son eau superficielle. La masse est considérée constante lorsque deux pesées successives à 24h d'intervalle ne donnent pas une différence supérieure à 0.1%. Une fois la masse saturée est obtenue et la masse à sec préalablement connue, nous avons déterminé la masse d'eau absorbée.

L'absorption d'eau par immersion  $A_b$  est exprimée en % de la masse sèche et est calculée par la relation suivante :

$$A_b = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100 \quad (2.3)$$

$M_a$  : masse de l'échantillon imbibé d'eau.

$M_s$  : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105°C.

Les résultats obtenus sur 3 éprouvettes de chaque type de mortier sont exprimés, en pourcentage, sous la forme de la moyenne de 3 valeurs mesurées.



**Figure 2.8:** Etuve utilisée.

### 2.3.3.5. Essai de porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau a été mesurée par pesée hydrostatique, suivant la norme NF EN18-459 [59]. Les mesures ont été effectuées après conservation des éprouvettes (4x4x16) cm<sup>3</sup> dans l'eau à température ambiante jusqu'à l'échéance de 28 jours. Cette mesure simple, praticable sur une large variété de types de ciment, mortiers ou bétons, est considérée comme un paramètre de premier ordre dans l'évaluation et la prévision de la durabilité. C'est en effet un indicateur de la qualité du matériau. L'essai comprend les étapes suivantes :

#### 1. Pesée hydrostatique

Cette pesée s'effectue en immergeant complètement l'éprouvette à l'aide d'une balance hydrostatique (précision 0.01g) pour obtenir  $M_{eau}$  de l'éprouvette immergée dans l'eau.

#### 2. Pesée à l'air

Après la pesée à l'eau, il faut essuyer rapidement superficiellement l'éprouvette avec un chiffon sec sans toutefois retirer l'eau des pores. Ensuite peser immédiatement l'éprouvette à l'air à 0.01 g près. On obtient de cette manière, la masse  $M_{air}$  de l'éprouvette imbibée. Pour mieux caractériser un mortier, l'essai est réalisé sur 3 échantillons.

### 3. Pesée à sec

S'effectue par étuvage de l'échantillon à une température de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  jusqu'à stabilisation de la masse, c'est-à-dire lorsque deux pesées consécutives espacées de 24 heures ne diffèrent pas de plus de 0.05%. La masse ainsi déterminée est la masse de l'éprouvette sèche  $M_{\text{sec}}$ . On utilise la formule suivante pour calculer la porosité accessible à l'eau  $P$  :

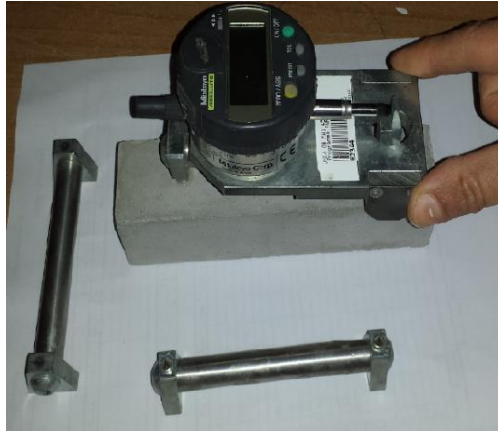
$$P = \frac{(M_{\text{air}} - M_{\text{sec}})}{(M_{\text{air}} - M_{\text{eau}})} \quad (2.4)$$



**Figure 2.9 :** Balance hydrostatique

#### 2.3.3.6. Essais de retrait

Le retrait et le gonflement ont été mesurés sur des éprouvettes de forme prismatique (4x4x16) cm<sup>3</sup> selon la norme NA440 [60], exposées après vingt quatre heures à une hygrométrie relative de 50% et à une température de 20°C jusqu'à l'échéance déterminée. Les déformations ont été mesurées à l'aide d'un rétractomètre digital à haute sensibilité. La figure 2.10 présente la méthode utilisée pour la mesure du retrait.



**Figure 2.10:** Mesure du retrait libre par un rétractomètre digital

### 2.3.4. Caractérisation mécanique

L'essai consiste à étudier les résistances à la flexion et à la compression d'éprouvettes de mortier normal. Dans un tel mortier, la seule variable est la nature du liant hydraulique ; la résistance du mortier est alors considérée comme significative de la résistance du liant utilisé.

#### Equipements nécessaires

L'ensemble est décrit de manière détaillée par la Norme EN196-1. Il est énuméré ci-dessous.

- Une salle maintenue à une température de  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  et à une humidité relative supérieure ou égale à 50 %.
- Une chambre ou une armoire humide maintenue à une température de  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  et une humidité relative supérieure 90 %.
- Un malaxeur normalisé.
- Des moules normalisés permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée 4 cm x4 cm et de longueur 16 cm (ces éprouvettes sont appelées éprouvettes (4x4x16)).
- Un appareil à chocs permettant d'appliquer 60 chocs aux moules en faisant chuter d'une hauteur de  $15 \text{ mm} \pm 0.3 \text{ mm}$  à la fréquence d'une chute par seconde pendant 60 s.
- Une machine d'essai de résistance à la flexion et à la compression.

#### Conduite de l'essai

La Norme NA234 [61].décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai.

Aux jours prévus, les trois éprouvettes sont rompues en flexion et en compression à 2 jours, 7 jours et 28 jours. Ces âges sont donc impératifs pour vérifier la conformité d'un ciment. Si des



## Chapitre 2 : Matériaux et procédures expérimentales

essais sont réalisés à d'autres âges, ils devront être réalisés dans les limites de temps indiquées dans le Tableau suivant :

**Tableau 2.3:** Limite de temps [59].

Age	24 h	48 h	72 h	7 j	28 j
Précision	± 15 min	± 30 min	± 45 min	± 2 h	± 8 h

Si  $F_f$  est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, le moment de rupture vaut  $F_f \cdot L / 4$  et la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette est :

$$R_f = \frac{1.5 \cdot F_f \cdot L}{b^3} \quad (2.5)$$

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture en flexion seront rompus en compression comme indiquée sur la figure. Si  $F_c$  est la charge de rupture, la contrainte de rupture vaudra :

$$F_c = \frac{F_c}{b^2} \quad (2.6)$$

Cette contrainte est appelée : contrainte à la compression.

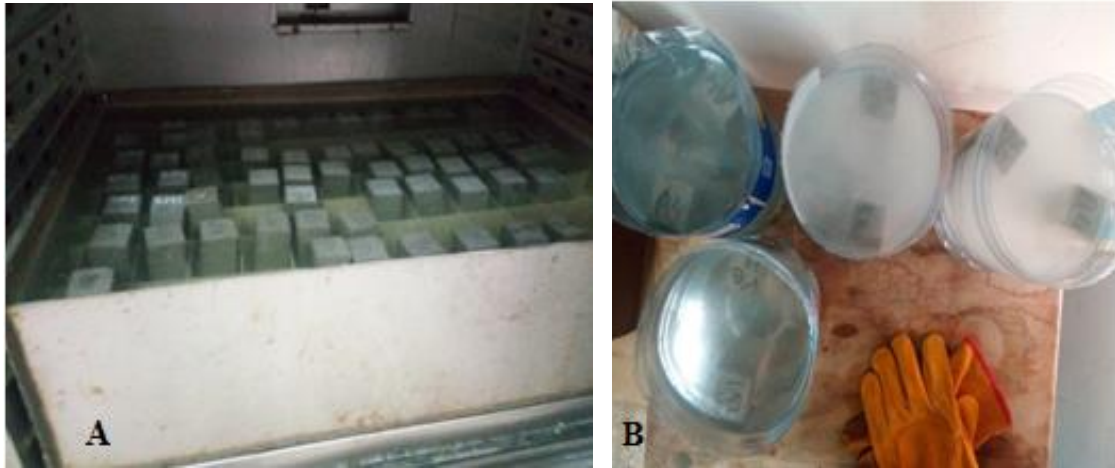


**Figure 2.11:** Appareil flexion-compression

## Chapitre 2 : Matériaux et procédures expérimentales

### 2.3.5. Essai de durabilité des ciments élaborés

Dans le but de tester la résistance des nouveaux ciments vis-à-vis l'agression des milieux agressifs, nous avons émergé les éprouvettes préparées après 28 jours de conservation dans l'eau potable dans une solution d'acide sulfurique de concentration 5%. La solution est renouvelée chaque 15 jour. D'autres éprouvettes ont été conservées dans de l'eau potable pour faire la comparaison.



**Figure 2.12:** Conservation des éprouvettes (A. Eau potable, B. Acide sulfurique)



**Figure 2.13 :** Eprouvettes confectionnées et conservées dans l'acide sulfurique  $H_2SO_4$  (5%) et l'eau potable à l'âge de 35 jours.

# **CHAPITRE 3**

**CARACTERISATION DES  
CIMENTS ELABORES**

## CHAPITRE 3

### CARACTERISATION DES CIMENTS ELABORES

#### 3.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des essais réalisés et qui ont été conduits majoritairement conformément aux normes sur les ciments en vigueur en Algérie.

Les résultats ainsi trouvés seront présentés, discutés et comparés avec l'échantillon de référence (ciment sans ajout), à savoir, la caractérisation chimique, physique et mécanique.

#### 3.2. RESULTATS DES ESSAIS REALISES

Pour la préparation des échantillons du ciment, nous avons procédé à un broyage et à un tamisage séparés des matières premières (CEM I- CPA, poudre de verre). Après dosage, les échantillons de ciment ainsi élaborés, contenant de 0 à 30% de déchets de verre et du 100 à 70 % du CEM I -CPA sont ensuite homogénéisés.

##### 3.2.1. Caractérisation des ciments élaborés

Une fois élaboré, les mélanges ont fait l'objet de caractérisations chimiques, physiques et mécaniques. Les résultats de tous les essais réalisés sont les moyennes de trois ou deux essais. Le détail des valeurs trouvées est regroupé dans l'annexe à la fin du mémoire.

##### 3.2.1.1. Caractérisation chimique

La détermination des constituants chimiques des ciments a été faite par fluorescence X. Les résultats de cette analyse sont reportés dans le tableau 3.1.

**Tableau 3.1:** Teneur en oxyde des ciments anhydres (teneur moyenne en masse)

Ech	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>3</sub>	P.A.F
E0	63.61	5.26	3.15	20.45	3.22	0.32	0.59	0.014	2.21	2.95
E10	55.13	4.68	2.75	32.76	3.92	3.02	0.52	0.013	1.79	2.72
E20	59.28	4.98	2.96	27.06	3.64	1.76	0.55	0.014	2.01	2.97
E30	51.35	4.44	2.55	39.11	4.23	4.38	0.49	0.012	1.52	3.00

## Chapitre 3 : Caractérisation des ciments élaborés

D'après le tableau 3.1, on constate que l'augmentation du pourcentage en poudre de verre induit une croissance de la teneur en silice  $\text{SiO}_2$ , en magnésium  $\text{MgO}$  et en alcalin  $\text{Na}_2\text{O}$ , et une décroissance de la teneur en oxyde de calcium  $\text{CaO}$ .

Réglementairement, et selon les prescriptions de la norme NA442 [13], la teneur en oxyde de magnésium est limitée à 5%, la teneur en sulfate  $\text{SO}_3$  est limitée à 3.5% et la perte au feu (P.A.F) est limitée 5%, ces conditions sont vérifiées pour l'ensemble des ciments élaborés.

### Indice d'hydraulicité

L'indice d'hydraulicité ou indice de Vicat est défini comme étant le rapport de la fraction acide à la fraction basique du ciment.

$$I = \frac{\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{CaO} - \text{MgO}} \quad (3.1)$$

**Tableau 3.2:** Indices hydrauliques des ciments élaborés.

Echantillons	E0	E10	E20	E30
I	0.25	0.54	0.39	0.73
$\left(\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}\right)$	3.11	1.68	2.19	1.31
$\left(\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}\right)$	0.25	0.14	0.18	0.11

La connaissance de la valeur de l'indice d'hydraulicité permet de classer les ciments selon leur résistance chimique. Ainsi on distingue [7] :

- les ciments basiques (ce sont généralement les ciments portland), pour lesquels  $I \leq 0.5$ .
- les ciments neutres (riches en laitier) pour lesquels  $I > 0.5$ .
- les ciments acides pour lesquels  $I \geq 0.5$ .

Ainsi, et à partir de la classification citée précédemment, on peut conclure que:

- les ciments contenant entre 0 et 20% d'ajouts peuvent être classés comme des ciments basiques ( $I \leq 0.5$ ).
- les ciments contenant des taux 10% et 30% rentrent dans la catégorie des ciments neutres ( $I > 0.5$ ).

## Chapitre 3 : Caractérisation des ciments élaborés

### 3.2.1.2. Caractérisation physique des ciments

#### a) Masses volumiques des ciments et des mortiers normalisés

Les mesures expérimentales des masses volumiques et Surface spécifique de Blaine des ciments élaborés sont reportées dans le tableau 3.3.

**Tableau 3.3:** Masses volumiques des ciments élaborés et des mortiers normalisés

Echantillons de ciment	E0	E10	E20	E30
Masses volumiques absolues ( $kg/m^3$ )	3150	2910	3070	3010
Masses volumiques absolues à l'état frais du mortier normalisé ( $kg/m^3$ )	2337	2446	2424	2403

D'après les résultats du tableau 3.3, on remarque une diminution quasi-linéaire des masses volumiques des ciments en fonction de la teneur en verres. Ces baisses constatées, s'expliquent aisément par le fait que la masse volumique de l'ajout utilisé est nettement plus faible que celle du clinker.

#### b) Surface spécifique de Blaine (SSB) des ciments élaborés

Le broyage a pour but de réduire les éléments en une poudre suffisamment fine afin de rendre la matière plus réactive (plus la surface spécifique est élevée, plus la réactivité chimique est importante). Les mesures de la Surface Spécifique de Blaine des ciments élaborés sont regroupées dans le tableau 3.4.

**Tableau 3.4:** Surface spécifique de Blaine (SSB) des ciments élaborés

Echantillons de ciment	E0	E10	E20	E30
Surface spécifique de Blaine (SSB)( $cm^2/g$ )	3470	3302	3282	3212

On remarque que la surface spécifique des ciments baisse en augmentant la teneur en verre, cela est expliqué par le fait que la finesse du ciment CEMI utilisé est supérieure à celle de la poudre de verre utilisée (tamisât du tamis 90 $\mu$ m).

#### c) Absorption d'eau par immersion totale

Après séchage jusqu'à masse constante puis émergement des éprouvette dans l'eau pendant 48h on a obtenu les pesés représentées dans le Tableau 3.5 :

### Chapitre 3 : Caractérisation des ciments élaborés

Tableau 3.5: Résultats d'absorption d'eau par immersion totale.

Echantillons	$M_0$ (g)	$M_{seche}$ (g)	$A_b = \frac{M_0 - M_{seche}}{M_{seche}} \times 100$ (%)
E0	595.63	548.35	8.62
E10	591.10	564.80	4.65
E20	592.80	566.30	4.67
E30	587.75	556.05	5.70

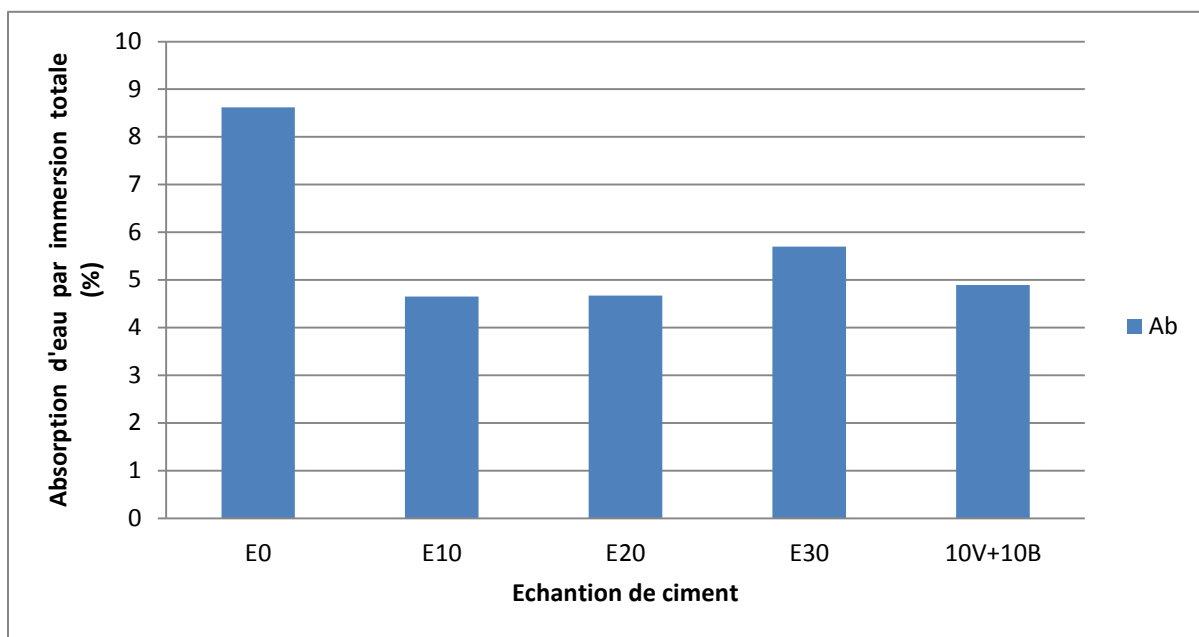


Figure 3.1: Résultats d'absorption d'eau par immersion totale

On remarque d'après le Tableau 3.5 et la figure 3.1, que l'absorption d'eau par immersion totale des ciments à base de verre présente des valeurs inférieures à celle de l'échantillon de référence. Les baisses représente 0.46, 0.45 et 0.33% pour les échantillons E10, E20 et E30 respectivement par-rapport-à l'absorption d'eau du mortier de référence contenant 0% d'ajout. La comparaison entre les échantillons E10, E20 et E30 montre que l'augmentation de la substitution du clinker par la poudre de verre induit une augmentation de l'absorption d'eau par immersion totale. Cette augmentation est peut être due à l'effet pouzzolanique retardé. Pour confirmer cette explication, on propose de prolonger la période de cure et refaire l'essai.

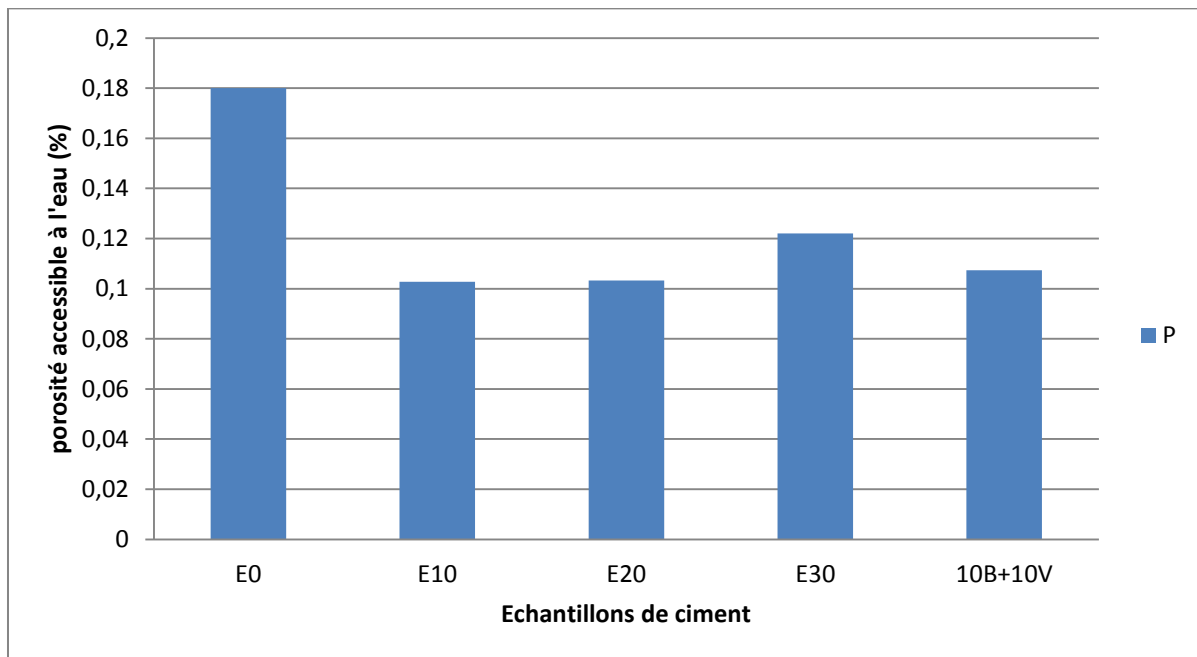
## Chapitre 3 : Caractérisation des ciments élaborés

### d) Porosité accessible à l'eau (Mesure hydraustatique)

Les résultats de l'essai de mesure de la porosité accessible à l'eau des mortiers normalisés contenant 0, 10, 20 et 30 % de la poudre de verre sont illustrés dans le Tableau 3.6.

**Tableau 3.6 :** Porosité accessible à l'eau des ciments élaborés en (%).

Echantillons	$M_{\text{eau}}$ (g)	$M_{\text{air}}$ (g)	$M_{\text{seche}}$ (g)	$P = \frac{(M_{\text{air}} - M_{\text{seche}})}{(M_{\text{air}} - M_{\text{eau}})}$ (%)
<b>E0</b>	329.86	596.36	548.35	0.1800
<b>E10</b>	335.40	591.10	564.80	0.1028
<b>E20</b>	336.45	592.80	566.30	0.1033
<b>E30</b>	328.20	587.75	556.05	0.1221



**Figure 3.2:** Porosité accessible à l'eau des ciments élaborés

D'après la figure 3.2, on constate, que la porosité accessible à l'eau suit la même allure de variation que l'absorption de l'eau par immersion totale. L'échantillon E30% présente une augmentation de 0.18% par rapport à E20 alors que l'échantillon E20 présente une augmentation de 0.005% par rapport à E10 seulement. Ces résultats sont en accord avec ceux de l'absorption d'eau par immersion totale.



## Chapitre 3 : Caractérisation des ciments élaborés

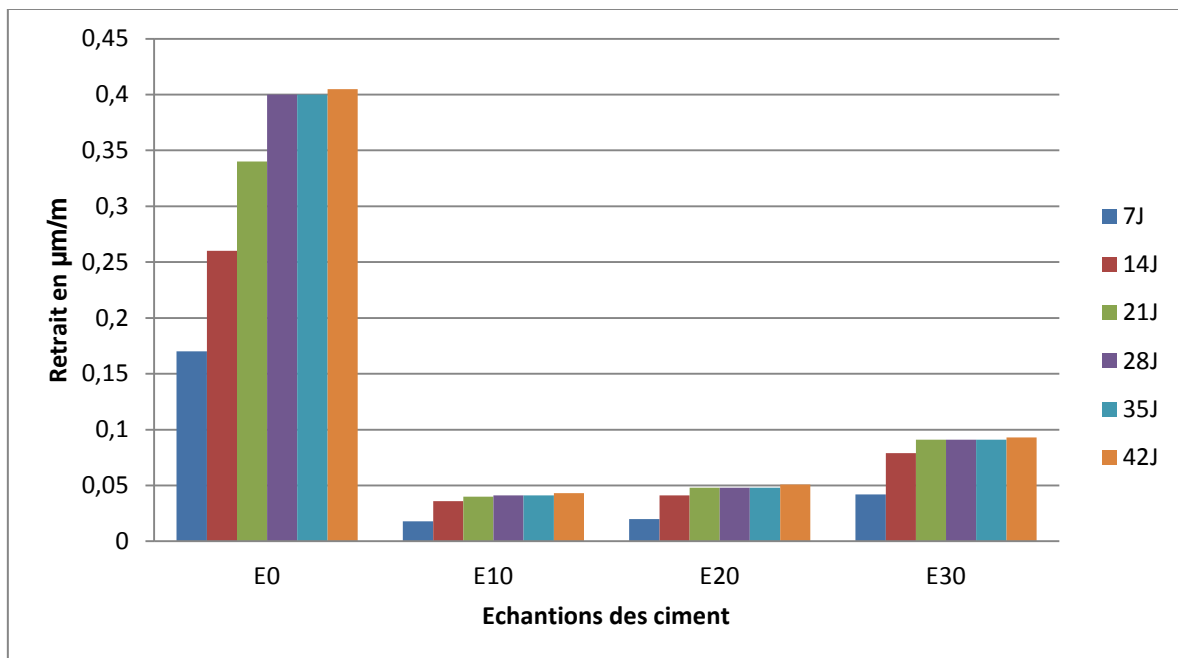
### e) Retrait libre des ciments

Le tableau 3.7 et la figure 3.3 illustrent l'évolution du retrait en fonction du temps des ciments contenant jusqu'au 30% de verre. D'après les résultats trouvés, on remarque que:

- Le retrait des ciments augmente en fonction du temps et en fonction de l'augmentation du taux de substitution. À cours terme et jusqu'à 14 jours de l'hydratation, le retrait des ciments est très important, et la différence entre les retraits deviennent moins importantes par la suite pour être stable à l'âge de 28 jours.

**Tableau 3.7:** Retrait des ciments élaborés en ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ).

	7Jours	14 Jours	21 Jours	28 Jours	35 Jours	42 Jours
E0	0.170	0.260	0.340	0.400	0.400	0.405
E10	0.018	0.036	0.040	0.041	0.041	0.043
E20	0.020	0.041	0.048	0.048	0.048	0.051
E30	0.042	0.079	0.091	0.091	0.091	0.093



**Figure 3.3 :** Retrait des mortiers de ciments élaborés en fonction du (%) du verre et en fonction du temps

## Chapitre 3 : Caractérisation des ciments élaborés

La stabilisation du retrait entre 21 et 28 jours est due d'une part à la formation progressive de des hydrates et d'une autre part à l'affinage des pores dans la structure.

- Les ciments contenant la poudre de verre on enregistrés des faibles retraits par rapport à l'échantillon de référence.

En générale, ces déformations ne sont pas très importantes, et les valeurs obtenues restent admissibles vis-à-vis des prescriptions de la norme Algérienne [NA442], qui rappelsons le fixe, pour les ciments portland CPJ-CEMII de classe 42.5, à 1000 $\mu$ m/m à 28 jours.

### 3.2.3.3. Caractérisation mécanique des ciments

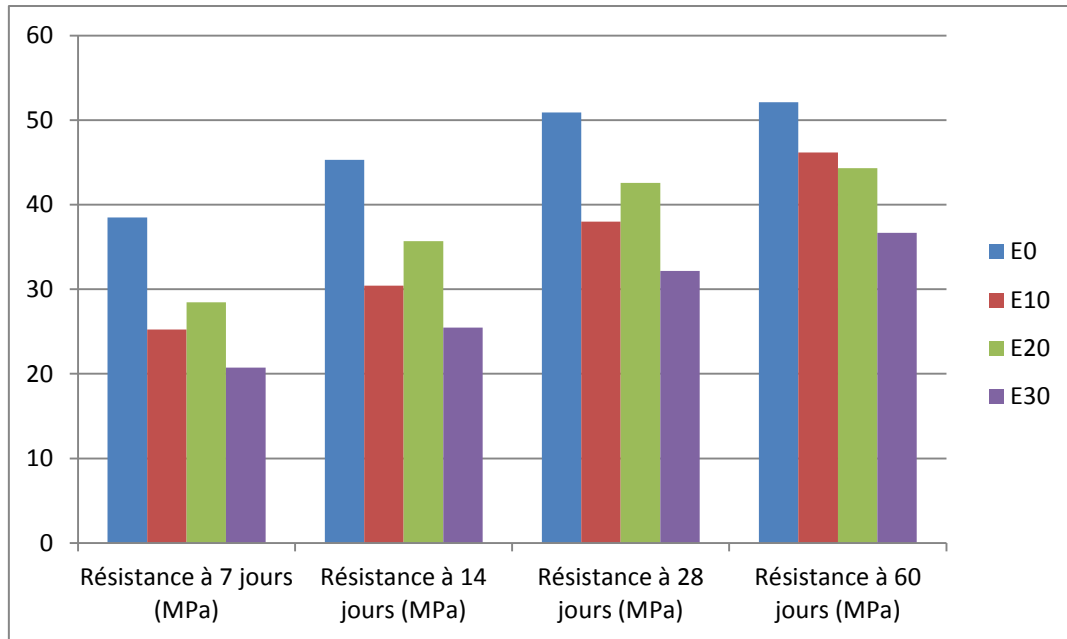
#### a) Résistance mécanique à la compression

Le but de cet essai est de déterminer la classe de résistance des ciments élaborés. Les résultats des essais d'écrasement en compression sont présentés dans le tableau 3.8.

**Tableau 3.8:** Résistance à la compression des mortiers de ciments élaborés.

Echantillons	E0	E10	E20	E30
Résistance à 7 jours (MPa)	38.50	25.22	28.46	20.72
Résistance à 14 jours (MPa)	45.30	30.42	35.67	25.45
Résistance à 28 jours (MPa)	50.90	38.00	42.57	32.17
Résistance à 60 jours (MPa)	52.10	46.17	44.30	36.67

La figure 3.4 illustre une synthèse de l'évolution de la résistance en compression dans le temps des ciments confectionnés avec des teneurs croissantes de la poudre de verre. D'après cette figure, on constate que la résistance à la compression baisse d'une manière générale avec l'accroissement de la teneur en verre. Ces diminutions sont liées à une diminution du pourcentage des silicates tricalciques dans le ciment à faible teneur en clinker qui favorisent les résistances à court terme. A l'âge de 60 jours, les échantillons E10 et E20 présentent des résistances importantes (46.17, 44.30 Mpa) respectivement. Alors que l'échantillon E 30 à enregistré des valeurs plus faible, cette dernière est liée à sa forte porosité par rapport aux autres échantillons.



**Figure 3.4:** Résistance à la compression en fonction du taux du verre et en fonction du temps.

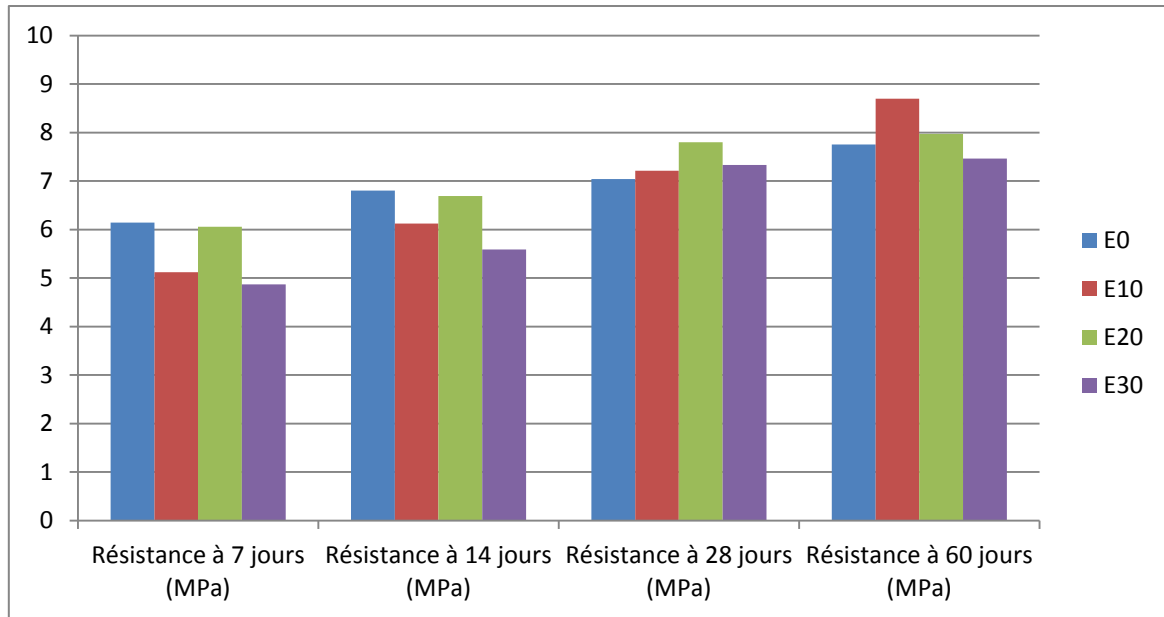
### b) Résistance à la traction par flexion

L'essai de rupture par flexion a été effectué sur des éprouvettes prismatiques de  $(4 \times 4 \times 16) \text{cm}^3$  en mortier normal, et consiste à appliquer une charge concentrée au milieu de la portée. Les résultats des essais de ruptures à la flexion sont reportés dans le tableau 3.9.

**Tableau 3.9:** Résistance à la flexion des mortiers de ciments élaborés

Echantillons	E0	E10	E20	E30
Résistance à 7 jours (MPa)	6.14	5.12	6.06	4.87
Résistance à 14 jours (MPa)	6.80	6.12	6.69	5.59
Résistance à 28 jours (MPa)	7.04	7.21	7.80	7.33
Résistance à 60 jours (MPa)	7.75	8.70	7.97	7.46

Les résultats du tableau 3.9 permettent de conclure que, les résistances à la flexion des ciments élaborés à base de la poudre de verre dépassent la résistance de l'échantillon de référence (sans ajout). Ces accroissements des résistances se développent grâce notamment à la réaction pouzzolanique qui cause l'affinage des pores et le remplacement du CH par du C-S-H. L'accroissement des résistances à la flexion est enregistré pour la majorité des ciments qui renferment les pouzzolanes [7].



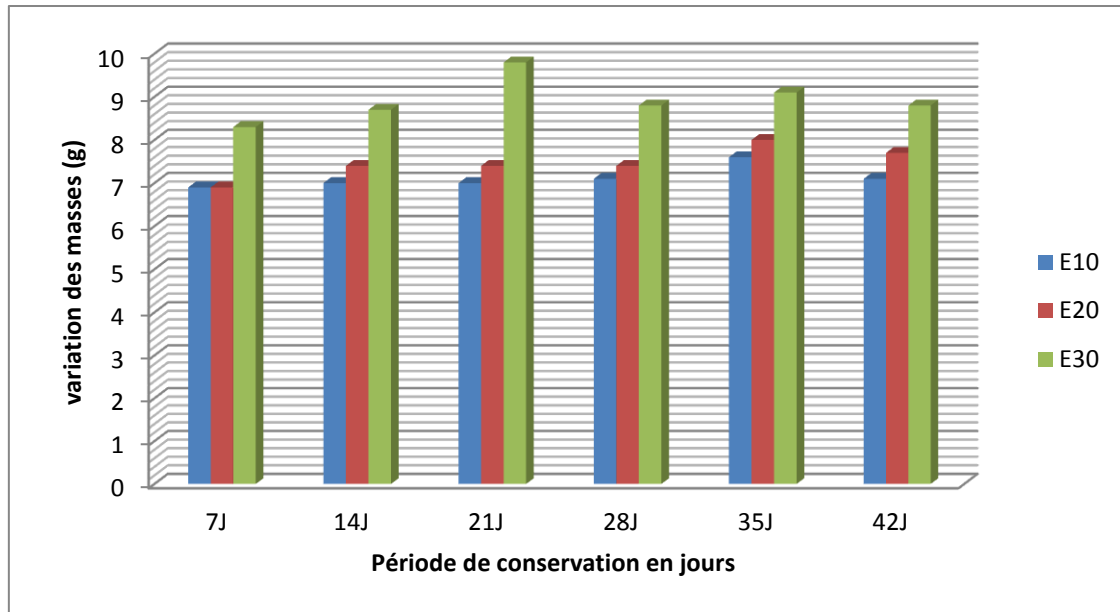
**Figure 3.5:** variation de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en verre

### 3.2.2. Évaluation de la durabilité des ciments

Pour évaluer la durabilité des ciments élaborés et pour pouvoir refléter l'effet du milieu de conservation sur les échantillons préparés, nous avons immergé des éprouvettes de mortiers normalisés dans l'eau potable, d'autres sont conservées à l'air libre et d'autres dans une solution acide de concentration 5% ( $H_2SO_4$ ) pendant une période de 42 jours. A' une échéance donnée, les éprouvettes sont pesées. Les résultats obtenus sont reportés dans les tableaux 3.10, 3.11 et 3.12 respectivement.

**Tableau 3.10 :** Variation des masses des éprouvettes conservées sous l'eau en (g)

Période de conservation	7J	14J	21J	28J	35J	42J
<b>E10</b>	6.90	7.00	7.00	7.10	7.60	7.10
<b>E20</b>	6.90	7.40	7.40	7.40	8.00	7.70
<b>E30</b>	8.30	8.70	9.80	8.80	9.10	8.80

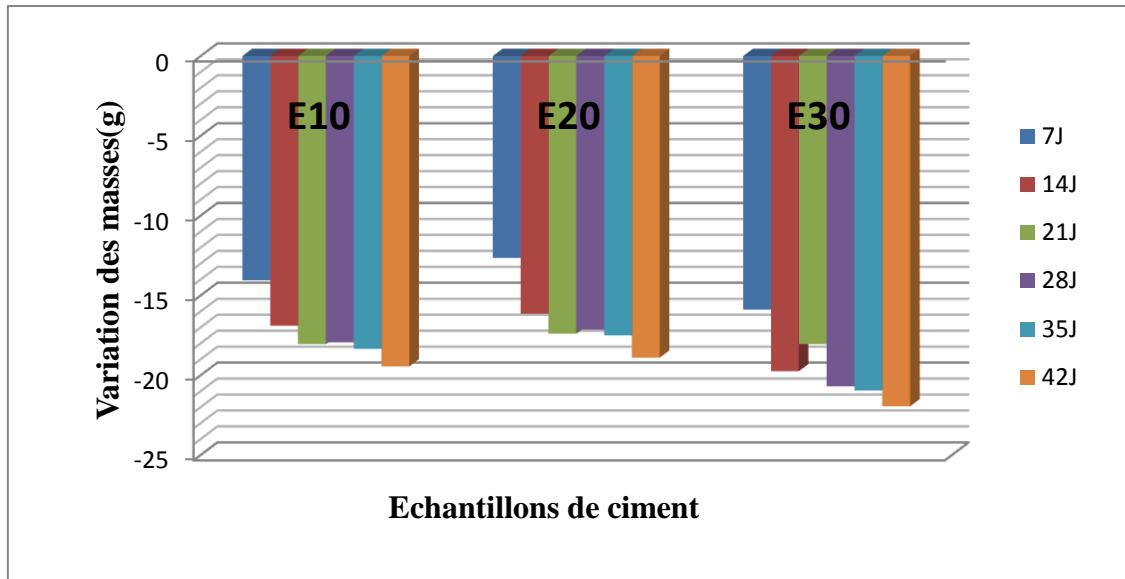


**Figure 3.6:** Variation des masses des éprouvettes conservées sous l'eau.

Les résultats trouvés montrent que, les échantillons E10 et E20 présentent une augmentation de masse tout le long de l'essai et avec des séquences presque régulière et très proche, tandis que l'échantillon E30 présente une croissance de masse jusqu'à 21 jours, puis des pertes de masses jusqu'à 42 jours. L'augmentation de masse de l'échantillon E30 est justifiée par sa grande porosité par rapport aux autres échantillons (E10 et E20).

**Tableau 3.11 :** Variation des masses des éprouvettes conservées à l'air ambiant (g).

Période de conservation	7J	14J	21J	28J	35J	42J
E10	-14.05	-16.90	-18.05	-17.95	-18.35	-19.45
E20	-12.65	-16.15	-33.95	-17.15	-17.50	-18.90
E30	-15.90	-19.75	-18.05	-20.70	-20.95	-21.95

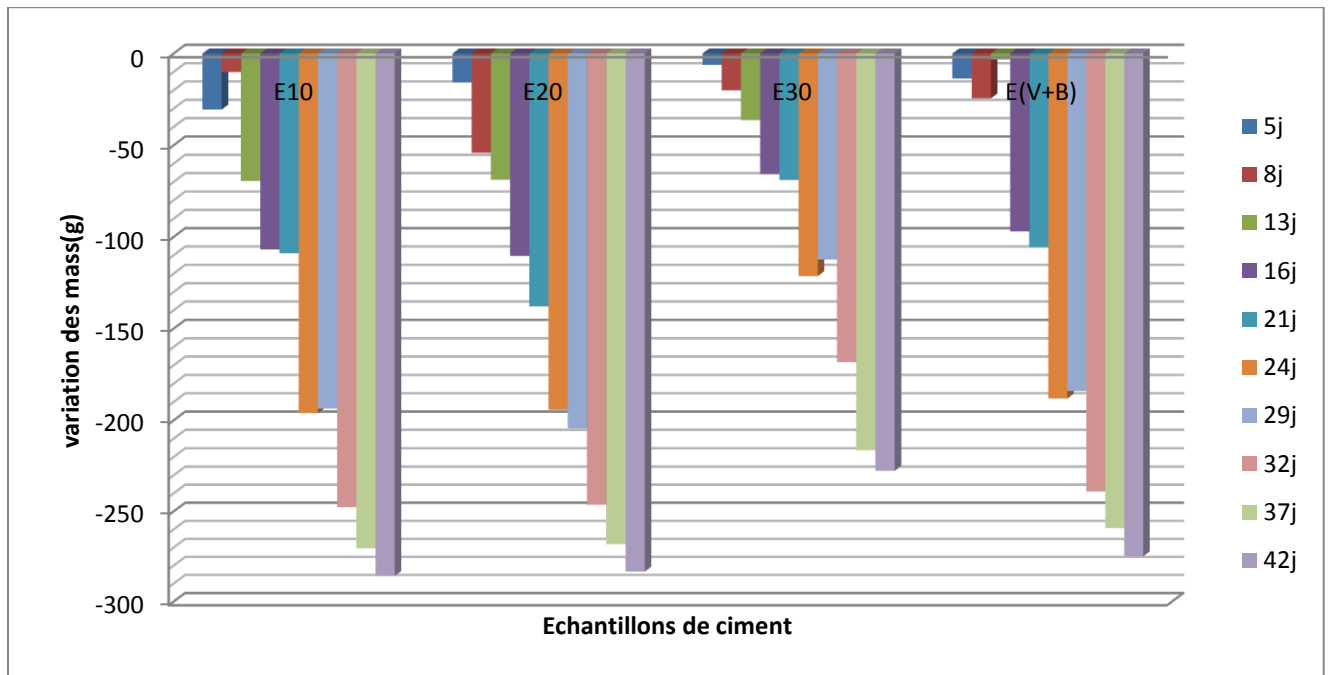


**Figure 3.7:** Variation des masses des éprouvettes conservées à l'air ambiant

Cet essai a pour but, d'évaluer la capacité des échantillons de garder ou de perdre de l'eau. Les résultats obtenus, montre que la majeure partie de l'eau est perdue entre 24 heures et 14 jours. Entre 21 jours et 35 jours les pertes de masse sont moins importantes. L'échantillon E30 a perdu des quantités d'eau plus importantes que les échantillons E10 et E 20, le même échantillon a enregistré une absorption d'eau et une porosité plus importante.

**Tableau 3.12:** Variation des éprouvettes conservées dans l'acide sulfurique en (g)

Age de conservation	5J	8J	13J	16J	21J	24J	29J	32J	37J	42J
<b>E10</b>	-30.55	-10.10	-69.50	-106.85	-108.90	-196.15	-193.62	-247.65	-270.40	-285.75
<b>E20</b>	-15.70	-54.20	-68.80	-110.35	-137.90	-194.25	-204.35	-246.40	-268.20	-283.40
<b>E30</b>	-6.15	-20.03	-36.30	-65.65	-69.00	-121.35	-112.40	-168.35	-216.25	-227.55



**Figure 3.8:** Variation des masses des éprouvettes conservées dans l'acide sulfurique (5%).

L'examen de la figure 3.8, montre clairement l'effet positif de l'introduction de la poudre de verre en raison de 30% sur la résistance de nos éprouvettes contre l'attaque de l'acide sulfurique. Les faibles pertes de masses enregistrées à partir de l'âge de 21 jours est du essentiellement à l'effet pouzzolanique de la poudre de verre ainsi que son effet filler.

# **CONCLUSIONS GENERALES**



## CONCLUSIONS GENERALES

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au laboratoire de génie civil et hydraulique de l'université 8 Mai 1945, Guelma et le laboratoire du control continu de la cimenterie Hadjar-soud (wilaya de Skikda).

L'objectif visé est de valoriser la poudre de verre transparent de vitres cassées dans la fabrication du ciment. Il entre dans le cadre de la valorisation et le recyclage des matériaux locaux. Il consiste à substituer le clinker, fabriqué à la cimenterie Hadjar soud par la poudre de verre pour des raisons de 0, 10, 20, et 30 %.

Après une série d'essais de caractérisation chimique, physique, mécanique et de durabilité référencier selon les normes Algériennes, Européenne et Américaines sur les liants hydrauliques, nous avons tiré les conclusions suivantes:

1. La composition chimique, le retrait ainsi que les résistons des ciments élaborés sont dans les fourchettes exigées par la norme NA442.
2. Les masses volumiques des mortiers élaborés avec les nouveaux ciments composés sont plus faibles que celles de l'échantillon de référence, ce qui peut être un avantage pour les structures lourdes.
3. Une augmentation de la porosité accessible à l'eau ainsi que de la l'absorption d'eau par immersion totale mesurées à un âge de 28 jours des éprouvettes confectionnées avec ajout de verre par rapport à l'échantillon de référence. Cette augmentation est expliquée par une croissance de porosité totale du fait que la réaction pouzzolanique n'est pas encore prédominante (effet prolongé de la pouzzolane).
4. Les ciments contenant la poudre de verre on enregistré des faibles retraits par rapport à l'échantillon de référence et a partir de 21 jours le retrait est devenu stable.
5. La résistance mécanique baisse avec l'accroissement de la teneur en verre à cours et à moyen terme. A l'âge de 60 jours, les échantillons E10 et E20 présentent des résistances importantes. En compression. Alors que les résistances à la flexion des ciments élaborés à base de la poudre de verre dépassent la résistance de l'échantillon de référence a partir de l'âge de 28 jours.

6. L'incorporation de la poudre de verre dans le ciment à améliorer les performances de durabilité et qu'une prolongation de la durée de cure est nécessaire pour mieux comprendre l'effet de la poudre de verre sur la durabilité du mortier.

**En perspective**, nous désirons compléter cette recherche par une étude microscopique pour étudier la réaction pouzzolanique de la poudre de verre et son influence sur les performances de durabilité des ciments, des mortiers et des bétons.

# **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. <https://www.febelcem.be/fr/ciment-applications/historique-du-ciment/>.
- [2]. <https://www.lafarge.fr/histoire-du-ciment>.
- [3]. <https://www.lafarge.fr/fabricationduciment?fbclid=IwAR28JCnC8QYjqpCNPSAIoys2wI48NvDwzp k8l7EknnWRJxfnRkNiI0exY>.
- [4]. Nigri G. Etude de l'influence des ajouts minéraux sur la qualité et les propriétés du ciment, Mémoire de Magister, Université 8 Mai 1945, Guelma, Algérie, 2005.
- [5]. <http://www.ciment.wikibis.com/clinker.php?fbclid=IwAR3JLL2INKhH4xtxECDhlZ4tHYJlpoZDyGJsylq9kvnXYjPZ0eZhFKLay0>.
- [6]. Pierre Claude A. Bétons Haute Performance, Édition Eyrolles 2001.
- [7]. Nigri G. Nouvelle élaboration d'un liant hydraulique, Thèse de doctorat, Université 8 Mai 1945, Guelma, Algérie 2018.
- [8]. <http://pravarini.free.fr/CaSO4.htm>.
- [9]. Nara Y et Guenchouba D. Etude de l'effet de la finesse de la poudre de verre sur les caractéristiques physique et mécanique des mortiers, Master académique, Université Ziane Achour, Djelfa, Algérie 2017.
- [10]. NF EN (12620) Critères de qualité pour les granulats à béton.
- [11]. <https://www.infociments.fr/glossaire/filler>.
- [12]. <http://boowiki.info/art/materiaux-de-construction/schiste-argileux-calcine.html>.
- [13]. Norme Algérienne NA442. Liants hydrauliques-ciments courants : Composition spécifications et critères de conformité, 2ème Edition, Edition Ianor, Algérie, 2000.
- [14]. <https://forumbtp.blogspot.com/2014/04/lesciments.html?fbclid=IwAR0kUHo4AMnvjdH5DH8Z4w2yNjWBHeCqHxBCF1HEUiv0AUNMxGzljSCLCyw>.
- [15]. Norme Française NF-P 15-301. Liants hydrauliques, ciments courants, composition spécification et critères de conformité, juin, 1994.
- [16]. Norme Française NF P 15 315 de September 1995 – Liants hydrauliques – Ciments pour travaux à la mer, 1995.
- [17]. <https://www.editions-eyrolles.com/Dico-BTP/definition.html?id=2199>.
- [18]. Norme Française NF P 15-314 – Liants hydrauliques – Ciment prompt naturel, 1993.
- [19]. [https://www.encyclopedie.fr/definition/Ciment\\_naturel\\_prompt](https://www.encyclopedie.fr/definition/Ciment_naturel_prompt).
- [20]. <https://www.editions-eyrolles.com/Dico-BTP/definition.html?id=2227>.
- [21]. Norme Française NF P 15-307 de décembre – Liants hydrauliques – Ciments à maçonner – Composition, spécifications et critères de conformité, 2000.
- [22]. <https://www.editions-eyrolles.com/Dico-BTP/definition.html?id=2215>.
- [23]. <https://www.legabion.net/wp-content/uploads/2019/07/Cours-sur-les-liants-en-ma%C3%A7onnerie.pdf>.

- [24]. <http://www.cimentetarchitecture.com/fr/Ciment-naturel-Prompt/L-historique/Ciment-naturel-ou-Ciment-romain>.
- [25]. <https://www.editions-eyrolles.com/Dico-BTP/definition.html?id=2218>.
- [26]. <https://www.editions-eyrolles.com/Dico-BTP/definition.html?id=2211>.
- [27]. <https://www.febelcem.be/fr/ciment-applications/fabrication-du-ciment/>.
- [28]. <http://www.schb.dz/processus-de-fabrication-du-ciment/>.
- [29]. Mellouk.Med.A et Aouali Med A. Le broyeur, Mémoire de Master, Université Saad dahlabl, Blida, Algérie.
- [30]. Fatouhi.A., Le ciment et les ajouts cimentaire, Mémoire de Master, Université Ziane Achour, Djelfa, Algérie 2011.
- [31]. Le diagnostic énergétique d'une cimenterie, Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie, IEPF.
- [32]. <https://www.infociments.fr/ciments/fabrication-du-ciment-le-process/la-cuisson>.
- [33]. <https://www.infociments.fr/ciments/fabrication-du-ciment-le-process>.
- [34]. Fiche technique. Association Canadienne de ciment, ciment et béton, Mai, 2010.
- [35]. Goto T. Influence des paramètres moléculaires du latex sur l'hydratation la rhéologie et les propriétés mécaniques des composites ciment/latex, Thèse de doctorat, Université de Paris vi-pierre et marie curie, Paris vi, France, 2006.
- [36]. Sahri Mohamed Amine, Elagoune Mouhamed Caractérisation d'un liant hydraulique à base de la poudre de verre - Etat de l'Art - Master : Génie Civil, Matériaux en Génie Civil, 2020.
- [37]. Defosse C. Chimie du ciment, Valorisation des déchets en cimenterie, Université libre de Bruxelles, site "CHIM 315 Partie 32004, 2004.
- [38]. Delair S. Etude de l'atténuation des efflorescences sur les matériaux cimentaires au moyen des produits pouzzolaniques, Thèse de doctorat, Ecole supérieure de Saint-Étienne, France, 2008.
- [39]. Kateb.Med.L., Utilisation des granulats de verre dans la fabrication des bétons architectural «cas des briques en bétons», Mémoire de maîtrise es sciences appliquées Université de Sherbrooke, Canada 2009.
- [40]. E.P.A, Advancing Sustainable Materials Management, Facts and Figures Environmental Protection Agency, United States, 2017.
- [41]. Bensaid. S., L'utilisation de la poudre de verre dans la composition du béton, Mémoire de aster, Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Algérie 2015.
- [42]. Slimani.H., Elaboration, mesure mécaniques et élastiques Des verres Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Li<sub>2</sub>O-MoO<sub>3</sub> (WO<sub>3</sub>), Mémoire de Master, Med Khider, Biskra, Algérie 2014.
- [43]. Malika.N., Effet des oxydes alcalino- terreux et les métaux de transitions sur les propriétés physiques des verres d'oxydes basés sur Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Med.Khider, Biskra, Algérie 2012.
- [44]. Salhi.K., Etude de l'influence de l'ajout du sable de dune et le laitier granulé finement broyés au ciment sur la stabilité de béton, mémoire de magister, Mohamed Khider, Biskra 2007.

- [45]. Aly Hussein.A., Optimisation et performance des bétons incorporant de la poudre de verre comme un remplacement partiel du ciment portland, Mémoire de Master, Sherbrooke Canada 2012.
- [46]. Rédadaa Fayza, Mahamdi Samira, Caractérisation physiques et de durabilité des ciments composés, à base de brique. Mémoire de Master Structure, Génie Civil, 2018.
- [47]. Shayan,A et Xu., Value-added utilization of waste glass in concrète Cernent and concrete research, 2004.
- [48]. Izemmouren.O., Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des briques de terre comprimée, Thèse de doctorat, Mohamed Khider, Biskra, Algérie 2016.
- [49]. Shayan.A ET Xu., Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete a field trial on concrète slabs, Cernent and concrète research, 2006.
- [50]. Idir.R., Mécanisme d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique, Thèse de doctorat Cotutelle, Université de Toulouse (France) et Université Sherbrooke, Canada, 2009.
- [51]. Shi.C et Wu.Y., Mixture proportioning and properties of self-consolidating lightweight concrète containing glass powder, ACI materials journal, 2005.
- [52]. Nguyen H, Valorisation du verre dans le béton , Etude expérimentale du comportement de pâte de ciment et du mortier: rhéologie, mécanique et durabilité, Thèse en cotutelle, France, 2013.
- [53]. NF EN 196-1 Méthodes d'essais des ciments - Partie 1: détermination des résistances Parie, Septembre 2016.
- [54]. Norme NA235: Liants hydrauliques - Détermination de la perte au feu. Institut Algérien de la normalisation.
- [55]. Norme NA5044: Liants hydrauliques - Méthode pratique instrumentale d'analyse des ciments par spectrométrie de fluorescence des rayons X. Institut Algérien de la normalisation.
- [56]. Norme NA2595: Granulats - Détermination de la masse volumique absolue des fines Institut Algérien de la normalisation.
- [57]. EN 196-6 SSB NF EN 196-6, Méthodes d'essai des ciments - Détermination de la finesse. Décembre 2018.
- [58]. NBN B15215. Essais des bétons: absorption d'eau par immersion. 1989.
- [59]. Boukour. S. Caractéristiques physico-chimiques et durabilité des éco-compositescimentaires à base de granulats de caoutchouc issue de pneus usagés. Université 8 Mai 1945. Guelma. Algérie. 2017.
- [60]. Norme NA440 Ciment - Méthodes d'essais des ciments – Détermination du retrait et du gonflement. Institut Algérien de la normalisation.
- [61]. Norme NA234: Méthodes d'essais des ciments - Détermination des résistances mécaniques. Institut Algérien de la normalisation.

**ANNEXE**

## ANNEXE

### 1. PRESENTATION DE LA CIMENTERIE DE HADJAR SOUD

L'élaboration des ciments s'est faite au niveau de la cimenterie de Hadjar Soud. L'usine utilise la technique par voie sèche pour la fabrication de ses produits.



**Figure 1:** Cimenterie de Hadjar Soud (SCHS)

La société des ciments de Hadjar Soud (SCHS) du groupe GICA de capital social de 1550 000 000 DA, à partir du 01 février 2008 a rentré en partenariat avec le partenaire social italien BUZZI- UNICEM d'un pourcentage de 35%, le groupe GICA est majoritaire de 65%.

La cimenterie de Hadjar Soud est située sur l'axe de la route N°44 reliant Annaba - Constantine et Skikda, soit à 50km d'Annaba. La cimenterie fait partie de la commune de Bekkouche Lakhdar, Daira de Ben Azzouz (Wilaya de Skikda). La superficie de l'assiette du terrain de la cimenterie est de 29ha 52a. Elle longe la ligne du chemin de fer à laquelle elle est raccordée par un tronçon de voie interne.

- ▶ La cimenterie est opérationnelle depuis 1973 intègre dans sa globalité le processus de production du ciment : Gisements de matières premières,
- ▶ Transport - Production de clinker et ciment- stockage - Expédition,



- ▶ La cimenterie est constituée de deux lignes de fabrication avec une capacité contractuelle de production de 900000 tonnes.

La première ligne démarrée en 1973 avec une capacité de production de 1250 tonnes de clinker par jour.

La deuxième ligne est entrée en service en 1975 avec une capacité de production de 1800 tonnes de clinker par jours.

### **Approvisionnement en matières premières :**

La carrière argile : située à une distance de 4km de l'usine. Sa superficie est de 72ha. Elle renferme des réserves estimées à plus de 6 millions de tonnes. L'argile est extraite par ripage à l'aide d'une pelle mécanique, ensuite formée en tas, chargée sur camions à l'aide de chargeuse pour être acheminée vers l'usine.

- ▶ Le sable : il rentre dans la fabrication du mélange cru et présente un bon apport de silice. Il est approvisionné par la cimenterie Elma de la wilaya de Tébessa,
- ▶ Le minerai de fer : il est approvisionné de Ferphos (mine d'El Ouenza),
- ▶ Le gypse : il rentre dans la fabrication du ciment en pourcentage de 5%. Il est approvisionné par wagons et camions à partir des lacs de Ain m'lila,
- ▶ Le laitier : il est approvisionné à partir du complexe sidérurgique d'El Hadjar

L'usine utilise pour l'élaboration de ces produits la technique par voie sèche, et qui est de très loin la technique la plus employée, aujourd'hui, en Algérie. La matière première est préparée sous forme de poudre. La préhomogénéisation permet d'atteindre un dosage parfait des constituants essentiels du ciment, par superposition de multiples couches. Une station d'échantillonnage analyse régulièrement les constituants et le mélange pour en garantir la régularité. À la sortie du hall de préhomogénéisation, le mélange est très finement broyé dans des broyeurs sécheurs, qui éliminent l'humidité résiduelle et permettent d'obtenir une poudre qui présente la finesse requise ; cette poudre, le « cru », est une nouvelle fois homogénéisée par fluidisation

## 2. ESSAIS REALISES ET TESULTATS TROUVES

Au sein du laboratoire du contrôle continu de la cimenterie de Hadjar soud, j'ai réalisé plusieurs essais de caractérisation de mes échantillons.

### 2.1. Caractérisation chimique

**Tableau 1:** Teneur en oxyde des ciments anhydres (teneur moyenne en masse)

Ech	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>3</sub>	P.A.F
E0	63.61	5.26	3.15	20.45	3.22	0.32	0.59	0.014	2.21	2.95
E10	55.13	4.68	2.75	32.76	3.92	3.02	0.52	0.013	1.79	2.72
E20	59.28	4.98	2.96	27.06	3.64	1.76	0.55	0.014	2.01	2.97
E30	51.35	4.44	2.55	39.11	4.23	4.38	0.49	0.012	1.52	3.00

### 2.2. Caractérisation physique

#### 2.2.1. Masse volumique à l'état frais

**Tableau 2.** Masses volumiques absolues à l'état frais des mortiers normalisés élaborés

Echantillons	M0	M1	$\square = \frac{(M1 - M0)}{V}$
E10	145.5	1241.6	2440
E20	145.5	1164.6	2270
E30	145.5	1222.3	2403

#### 2.2.2. Masse volumique absolue des ciments élaborés

**Tableau 3:** Masse volumique absolue des ciments élaborés

Echantillons de ciment	E0	E10	E20	E30
Masses volumique absolue ( $kg/m^3$ )	3150	2910	3100	3010

#### 2.2.3. Surface spécifique de Blaine (SSB) des ciments élaborés

**Tableau 4 :** Surface spécifique de Blaine (SSB) des ciments élaborés

Echantillons de ciment	E0	E10	E20	E30
Surface spécifique de Blaine (SSB)( $cm^2/g$ )	3470	3302	3682	3212

## 2.2.4 Absorption d'eau par immersion totale

**Tableau 5.** Absorption d'eau par immersion totale

Echantillons	M <sub>0</sub> (g)	M <sub>seche</sub> (g)	$A_b = \frac{M_0 - M_{seche}}{M_{seche}} \times 100$
<b>E0</b>	595.63	548.35	8.62
<b>E10</b>	591.10	564.80	4.65
<b>E20</b>	592.80	566.30	4.67
<b>E30</b>	587.75	556.05	5.70

## 2.2.5. Porosité accessible à l'eau (Mesure Hydrostatique)

**Tableau 6.** Porosité accessible à l'eau (Mesure Hydrostatique)

Echantillons	M <sub>eau</sub> (g)	M <sub>air</sub> (g)	M <sub>seche</sub> (g)	$P = \frac{(M_{air} - M_{sec})}{(M_{air} - M_{eau})}$	P moyennes (%)
<b>E10</b>	339.2	596.1	570.2	0.1008	0.1028
	331.6	586.1	559.4	0.1049	
<b>E20</b>	335.2	591.4	564.6	0.1046	0.1033
	337.7	594.2	568	0.1021	
<b>E30</b>	326.5	586.9	554.7	0.1236	0.1221
	329.9	588.6	557.4	0.1206	

## 2.2.6. Retrait des ciments élaborés

**Tableau 7:** Retrait des ciments élaborés en µm/m

	7Jours	14 Jours	21 Jours	28 Jours	35 Jours	42 Jours
E0	0.170	0.260	0.340	0.400	0.400	0.405
E10	0.018	0.036	0.040	0.041	0.041	0.043
E20	0.020	0.041	0.048	0.048	0.048	0.051
E30	0.042	0.079	0.091	0.091	0.091	0.093

### 2.3. Resistance mécaniques

**Tableau 8.** Resistance à la flexion des ciments élaborés en fonction du temps.

Echantillons	7j	14j	28j	60j
<b>Resistance à la flexion (MPa)</b>				
<b>E10</b>	4.92	6.17	7.23	8.81
	5.33	6.08	7.19	8.60
<b>E20</b>	6.09	6.30	7.67	7.97
	6.04	7.09	7.94	7.97
<b>E30</b>	5.01	5.47	7.79	7.61
	4.73	5.71	6.87	7.32
<b>Resistance à la compression (MPa)</b>				
<b>E 10</b>	25.10	30.50	36.40	45.80
	24.70	30.50	36.00	47.00
	25.70	31.40	36.80	44.00
	25.40	29.30	38.00	47.90
<b>E 20</b>	28.00	36.00	41.70	44.80
	28.06	33.70	44.30	44.40
	30.10	37.30	41.50	44.30
	27.70	35.70	42.80	43.70
<b>E 30</b>	21.30	25.40	30.80	37.40
	20.10	24.50	31.70	35.40
	20.90	25.30	33.00	36.60
	20.60	26.60	33.20	37.30

## 2.4. EVALUATION DE LA DURABILITE DES CIMENTS

**Tableau 9.** Variation des masses en fonction du milieu de conservation (Conservation dans l'acide et sous l'eau) exprimée en (g).

	M <sub>0</sub>	5j	8j	13j	16j	21j	24j	29j	32j	37j	42j
<b>Conservation dans l'acide</b>											
<b>E10</b>	588.10	542.70	596.80	504.20	464.00	460.10	373.40	378.70	322.80	298.60	285.60
	556.00	540.30	527.10	500.90	466.40	462.20	378.40	378.10	326.00	304.70	287.00
<b>E20</b>	590.00	575.80	552.00	520.00	480.50	453.90	396.00	386.60	343.80	322.00	305.60
	589.20	572.00	548.80	521.60	478.00	449.50	394.70	383.90	342.60	320.80	306.80
<b>E30</b>	562.70	558.00	543.70	527.40	497.80	495.20	436.50	446.00	390.40	341.90	336.30
	560.20	552.60	539.15	522.90	493.80	489.70	443.70	452.10	395.80	348.50	331.50
<b>Conservation dans l'eau</b>											
<b>E10</b>	582.30	582.30	582.90	582.90	582.80	580.70	580.70	582.80	582.90	582.80	583.00
	550.30	556.00	556.80	556.80	557.00	555.80	555.10	556.90	557.30	557.00	557.20
<b>E20</b>	564.30	563.80	564.10	564.60	564.10	564.30	564.30	564.60	564.70	564.60	564.60
	588.70	589.00	589.20	589.20	589.20	589.30	589.30	589.20	589.40	589.20	589.20
<b>E30</b>	576.30	576.60	576.80	577.20	576.50	576.80	577.80	576.90	577.10	577.10	577.00
	556.50	556.40	557.20	557.50	557.50	557.20	556.20	557.60	557.40	557.80	557.50

### Variations des masses en fonction du milieu ambiant

**Tableau 10.** Variation des masses conservées à l'air ambiant exprimée en (g).

Echantillons	M <sub>0</sub>	7j	14j	21j	28j	35j	42j
<b>E10</b>	582.6	568.7	566.0	564.9	565.0	564.50	563.50
	583.6	569.4	566.4	565.2	565.3	565.00	563.80
<b>E20</b>	602.0	589.3	586.0	584.7	584.9	584.60	583.10
	599.2	586.6	582.9	581.7	582.0	581.60	580.30
<b>E30</b>	584.9	568.5	564.7	563.6	564	563.80	562.90
	583.4	568.0	564.1	562.6	562.9	562.60	561.50

**Tableau 11: Variation des masses des éprouvettes conservées sous l'eau**

<b>Période de conservation</b>	<b>7J</b>	<b>14J</b>	<b>21J</b>	<b>28J</b>	<b>35J</b>	<b>42J</b>
<b>E10</b>	6.90	7.00	7.00	7.10	7.60	7.10
<b>E20</b>	6.90	7.40	7.40	7.40	8.00	7.70
<b>E30</b>	8.30	8.70	9.80	8.80	9.10	8.80