



République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة عين تموشنت بلحاج بوشايب

Université Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil et travaux publics

Mémoire pour l'Obtention du diplôme de Master

Filière : GENIE CIVIL

Spécialité : STRUCTURES

Thème

**Effet de la température sur les caractéristiques  
mécaniques d'un ciment de poudre de verre**

Présenté Par :

- ✓ Smaine Mohamed Rida
- ✓ Tahar Abdennour

Devant le jury composé de :

Dr. A .MAMOUNE

UBBAT (AIN T'émouchent) Président

Dr. MENAA.R

UBBAT (AIN T'émouchent) Examinatrice

Dr. DERBAL. A

UBBAT (AIN T'émouchent) Encadreur

**Année universitaire**

2021/2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## ***DEDICACES***

A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et ma soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes parents.

A toutes personnes qui ma aider à poursuivre mes études

A mes très chers frères.

A toute ma famille sans exception.

A tous mes amis (es) et toute la promo de master2 génie civil.

A celui qui m'a collaboré dans la réalisation de ce mémoire, à toi Rida.

Enfin à tous ceux qui nous sont très chers.

## ***DEDICACES***

A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et ma soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes parents.

A toutes personnes qui ma aider à poursuivre mes études

A mes très chers frères.

A toute ma famille sans exception.

A tous mes amis (es) et toute la promo de master2 génie civil.

A celui qui m'a collaboré dans la réalisation de ce mémoire, à toi Abdenour.

Enfin à tos ceux qui nous sont très chars.

## ***REMERCIEMENTS***

Tout d'abord nous remercions avant tous, dieu le tout puissant qui nous a donné le courage, et la volonté pour atteindre notre objectif, et tous les enseignants qui ont contribué à notre formation durant tous les cycles.

Nous remercions vivement, notre promoteur **Mme : Derbal** de nous avoir pris en charges, et pour sa disponibilité, son aide et ses précieux conseils.

Nous portons

s avec gratitude de reconnaissance pour l'ensemble des professeurs du département de Génie Civil qui ont contribué à notre formation d'ingénieur en Génie Civil.

On remercie **Mr : Adel** et **Mme: Nadjet** de nous avoir aidés à réaliser ce travail.

Nous ne saurons oublier de remercier les honorables Membres du Jury qui nous ont fait l'immense honneur de Présider et d'examiner ce Modeste travail.

A tous ceux ou celles qui nous apportés leur soutien, trouvent ici, l'expression de nos vives et sincères reconnaissances.

***Abdenour et Rida***

# Résumé

Le coulis de ciment est un mélange très fluide de ciment, d'eau et éventuellement d'adjuvant, largement utilisé pour renforcer des sols, les fondations, la réparation des fissures dans les structures.

Les ajouts cimentaires connaissent un développement croissant dans l'industrie de ciment et dans le béton, car leur utilisation apporte une amélioration des propriétés physicomécaniques des matériaux cimentaires, notamment la réduction des quantités de ciment utilisées. L'utilisation des ajouts issus de déchets tels que le verre sous forme de poudre, s'avère comme une solution intéressante, car elle contribue à la réduction des couts de réalisation ainsi que la prise en charge de ce type de déchet.

Ce travail expérimental étudie l'effet de la substitution partielle du ciment par la poudre de verre à des pourcentages (10% à 35%) respectivement sur les propriétés physicomécaniques de coulis de ciment.

L'ajout de poudre de verre a donné des résultats acceptables par rapport le témoin, cette addition de poudre de verre améliore la maniabilité et la résistance mécanique.

**Mots clés :** mortier, poudre de verre, sable, déchets, coulis de ciment.

## *Abstract*

Cement grout is a very fluid mixture of cement, water and uses of adjuvant, widely used to reinforcement of the soil, foundations, repairing cracks in structures.

Cement additions are growing in the cement industry, as their uses bring about an improvement in the physic mechanical properties of cement materials, in particular the reduction of the cement quantities used, the use of additions from waste such as glass powder, proves to be an interesting solution, as it contributes to the reduction of the costs of production as well as the reduction of this type of waste.

This experimental work studies the effect of the partial substitution of cement by glass powder at different percentages (10% à 35%) respectively, and their effect on the physic mechanical properties of cement grouts.

Addition of glass powder is given acceptable results compared to the control. This addition improved maneuverability and mechanical strength.

**Keywords:** mortar, glass powder, sand, waste, Cement grout, glass powder



## ملخص

الرجص الأسمنتي عبارة عن خليط ساثل جدا من الأسمنت والماء وربما خليط يستخدم على نطاق واسع لتقوية الأرضيات والأساسات وإصلاح الشقوق في الهياكل.

شهد الإضافات الأسمنتية تطوراً متزايداً في صناعة الأسمنت والخرسانة ، لأن استخدامها يحسن الخواص الفيزيائية الميكانيكية للمواد الأسمنتية ، والسبب في ذلك هو أن استخدامها يثبت استخدام الإضافات من الإضافات مثل الزجاج في شكل مسحوق أنه حل مثالي للمصنّعين ، لأنه يساهم في تقليل تكاليف الإنتاج وكذلك إدارة هذا النوع من الإضافات.

يُدرس هذا العمل التجريبي تأثير السبدال الجزئي للمسحوق الزجاجي للأسمنت بنسب (10% إلى 35%) على التوالي على الخواص الفيزيائية الميكانيكية للرجص الأسمنتي.

أعطت إضافة مسحوق الزجاج نتائج مثبوتة مقارنة بالتحكم ، إضافة مسحوق الزجاج هذا يحسن قابلية التشغيل والمقاومة الميكانيكية.

الكلمات المفتاحية: مالت ، مسحوق زجاج ، رمل ، زنايات ، مالت أسمنتي.

<b>Titre :</b>	<b>Page</b>
TABLE DES MATIERES .....	I
LISTE DES TABLEAUX .....	III
LISTE DES FIGURES .....	IV
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : CIMENT PORTLAND ET RECYCLAGE DU VERRE</b>	
1.1 introduction .....	02
I.2 fabrication de ciment portland .....	03
I.3 procédé de fabrication de ciment portland et son impact sur l'environnement	04
I.3.1 matières premières naturelle .....	04
I.3.2 matières premières extraites des déchets.....	05
I.4. Formation du cru .....	05
I.5 clinkérisation et broyage .....	06
I.6. Obtention de ciment .....	09
I.7.les différents ajouts utiliser .....	10
I.7.1.les Ajouts .....	10
I.7.2. La chimie des cimentiers .....	10
I.8. Ciment vert : Ciment sulfo-alumineux.....	11
I.8.1. Présentation.....	11
I.8.2. Les Différentes type de ciment sulfo_ alumineux .....	11
I.9. Fabrication et impact environnemental des ciments sulfo-alumineux...	12
I.10. Les principaux phases d'un ciment sulfo-alumineux sont .....	13
I.10.1. Propriétés du ciment Sulfo-alumineux.....	13
I.11. Réduction d'énergie et impact environnement.....	14
I.13. Classes de ciment portland... ..	15
I.14. RECYCLAGE DU VERRE.....	17
I.14.7. Recyclage du verre en Algérie .....	22
1.14.8 domaines de recyclage des déchets de verre .....	23

I.15. Conclusion .....	24
<b>CHAPITRE II : MATERIAUX ET ESSAIS EFFECTUÉS SUR CIMENT</b>	
II.1. Introduction.....	25
II.2. Matériaux utilisés.....	25
II.2.1. Sable .....	25
II.2.2. La poudre de verre .....	27
II.2.3. Clinker .....	27
II.2.4. Le gypse.....	28
II.3. Préparation de mortier .....	28
II.4. Préparation de ciment .....	30
II.4.1. Eau... ..	31
II.5. Les essais effectués.....	31
II.5.1. Expansion de ciment.....	32
II.5.2. Mesure de la finesse de ciment.....	33
II.5.3. Masse volumique absolue de ciment .....	36
II.5.4. Consistance et délais de prise/ Vicat .....	38
II.5.5. Essais de maniabilité.....	39
II.5.6. Préparation des éprouvettes .....	41
II.5.7. Tests mécaniques .....	43
II.5.7.1. Résistance à la flexion .....	43
II.5.8. Mesure de L'air Occlus dans le mortier .....	45
II.5.9 ultra son... ..	48
II.5.10. Les essais de chauffage.....	49
II.11. Conclusion .....	51

## **CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS**

III.1. Introduction .....	53
III.2. Résultat .....	53
III.2.1. Maniabilité.....	53
III.2.2. Résistance à la flexion .....	54
III.2.3. Résistance à la compression .....	57
III. 3.les essais de chauffage .....	58
III.4. Discussion .....	61
III.4.1. Effet du dosage en poudre de verre sur l'évolution du temps de prise et la consistance.....	61
III.5. Le milieu chimique.....	63
III.6. Conclusion.....	66
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>67</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>69</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>74</b>

## *Liste des tableaux*

### **Chapitre I : ciment portland et recyclage de verre**

<b>Tableau I.1</b> : la composition minéralogique du clinker... ..	07
<b>Tableau I.2</b> : constituants anhydres du clinker sulfo-aluminieux .....	13
<b>Tableau I.3</b> : enthalpie de formation et émission de Co2 générées par les phases du ciment	15
<b>Tableau I.4</b> : les différents types de ciment portland en fonction de leur composition	16
<b>Tableau I.5</b> : les différents types de ciment portland en fonction de leur résistance normale	17
<b>Tableau I.6</b> : matières premières pour la fabrication du verre .....	19
<b>Tableau I.7</b> : capacité de recyclage.....	22

### **Chapitre II : Matériaux et essais effectués sur ciment**

<b>Tableau II.1</b> : composition minéralogique de clinker .....	30
<b>Tableau II.2</b> : composition quantitative de ciment étudié .....	30
<b>Tableau II.3</b> : composition chimique de ciment étudié .....	31
<b>Tableau II.4</b> : résultats d'essai d'expansion à chaud de ciment étudié .....	33
<b>Tableau II.5</b> : la masse volumique apparente des poudres.....	37
<b>Tableau II.6</b> : type de mortier selon le temps de maniabilité.....	41

### **Chapitre III : résultats et discussions**

<b>Tableau III.1</b> : résultats d'essai de maniabilité.....	53
<b>Tableau III.2</b> : résultat d'essai de Vicat .....	62
<b>Tableau III.3</b> : perte de masse H2SO4.....	63
<b>Tableau III.4</b> : de perte de masse hydroxyde de sodium.....	64
<b>Tableau III.5</b> : de perte de masse HCL.....	65



# *Liste des figures*

## **Chapitre I : ciment portland et recyclage de verre**

<b>Figure I. 1 :</b> Schéma représentatif les procédés de fabrication de ciment.....	03
<b>Figure I. 2 :</b> Broyage de clinker .....	07
<b>Figure I. 3 :</b> Aspect du clinker après refroidissement .....	09
<b>Figure I. 4 :</b> Fabrication du ciment « ciment vert » .....	09
<b>Figure I. 5 :</b> matières premières pour la fabrication du verre .....	19
<b>Figure I. 6 :</b> Processus de transformation de déchets de verre .....	21

## **Chapitre II : Matériaux et essais effectués sur ciment**

<b>Figure II. 1 :</b> Figure II.1: Sable normalisé .....	26
<b>Figure II. 2 :</b> La poudre de verre (tamisage).....	27
<b>Figure II. 3 :</b> broyage de clinker .....	27
<b>Figure II. 4 :</b> le gypse .....	28
<b>Figure II. 5 :</b> Malaxeur de mortier... ..	31
<b>Figure II. 6 :</b> Essai de expansion à chaud .....	33
<b>Figure II. 7 :</b> Perméabilimètre de Blaine .....	34
<b>Figure II. 8 :</b> le Chatelier.....	37
<b>Figure II. 9 :</b> Appareil de Vicat.....	39
<b>Figure II. 10 :</b> maniabilimètre de mortier.....	40
<b>Figure II. 11 :</b> éprouvette 4*4*16... ..	41
<b>Figure II. 12 :</b> préparation des éprouvettes .....	42
<b>Figure II. 13 :</b> les éprouvettes dans la chaux.....	43
<b>Figure II. 14 :</b> dispositif pour l'essai de résistance à la flexion .....	45
<b>Figure II. 15 :</b> dispositif pour l'essai de résistance à la compression .....	46

<b>Figure II. 16 :</b> mesure de la teneur en air du béton...	48
<b>Figure II. 17 :</b> ultra son .....	49
<b>Figure II. 18 :</b> à une température de 600 C° .....	50

### **Chapitre III : résultats et discussions**

<b>Figure III. 1 :</b> maniabilité de pate cimentaire .....	54
<b>Figure III. 2 :</b> évolution de la résistance en flexion dans le temp.....	56
<b>Figure III. 3 :</b> essai de flexion.....	56
<b>Figure III. 4 :</b> évolution de la résistance en compression dans le temp et l'effet de la température.....	58
<b>Figure III. 5 :</b> évolution de la résistance en flexion dans le temp.....	61
<b>Figure III. 6 :</b> Évolution de la résistance en compression dans le temps et l'effet de la température En fonction des dosages de la Pate cimentaire.....	61
<b>Figure III. 7 :</b> résultats d'essai de maniabilité.....	62
<b>Figure III. 8 :</b> perte de masse pour H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	64
<b>Figure III. 9 :</b> préparation des produit chimique.....	65
<b>Figure III. 10 :</b> diagramme de perte de masse de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	65



## Introduction générale

## **Introduction générale**

### ***Introduction générale :***

Le ciment Portland est obtenu par cuisson à 1450°C d'un mélange de calcaire et d'argile, broyé en poudre très fine. Ce processus est appelé la clinkérisation, consomme seul environ 60% de l'énergie totale nécessaire à la production de ciment, qui s'élève à 4,5 GJ / tonne de ciment synthétisé. Dans le four, la réaction de décarbonatation du calcaire ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CAO} + \text{CO}_2$ ) dégage une quantité énorme de dioxyde de carbone, ce qui explique en partie pourquoi l'industrie cimentière participe à près de 5% des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> (environ 1.53 gigatonnes en 2010).

Dans le contexte actuel de développement durable, la protection de l'environnement est devenue l'une des préoccupations majeures de la société. Ceci est traduit clairement par le protocole de Kyoto qui imposait en 2008 une réduction de 5,2 % des émissions de gaz à effet de serre par rapport à 1990.

Le développement des ciments verts est donc un véritable défi des industriels qui déploient de grands efforts et lancent de nombreuses recherches afin d'enrichir leurs gammes de nouveaux ciments. Ces ciments devront respecter les normes appliquées aux ciments actuels, avoir des caractéristiques similaires et à celle des ciments actuels et ayant moins d'impact sur l'environnement.

Notre travail sera organisé en trois chapitres, le premier chapitre est une bibliographie d'où on parlera sur le ciment et le recyclage du verre.

Le second chapitre sera destiné aux matériaux utilisés et les méthodes d'essais employées. Les résultats obtenus seront présentés dans le troisième chapitre et en fin on termine par une conclusion.

# ***CHAPITRE I***

## **I.1. Introduction :**

Les ciments ont été découverts il y a deux mille ans par les Romains qui ont été les premiers à utiliser les propriétés hydrauliques de la chaux résultante de la décarbonatation des calcaires pour la construction de leur maçonnerie. L'invention du ciment portland est généralement attribuée à JOSEPH ASPDIN, un maçon anglais, celui-ci obtenait en 1824 un brevet pour son produit, qu'il nommait ciment portland parce qu'il produisait un béton qui avait la couleur de l'excellente pierre naturelle extraite de l'île calcaire de Portland située à l'ouest de l'île de Wright en Angleterre, le nom Portland a été conservé et utilisé partout dans le monde.[1]

Depuis de nombreuses années, le ciment Portland constitue le matériau de construction le plus utilisé dans le monde à cause de ses performances mécaniques, sa tenue au feu et son coût compétitif. Cependant, sa fabrication est très énergivore et dégage une quantité importante de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) bien connu pour son incidence sur l'effet de serre. Ce  $\text{CO}_2$  provient de la dépense d'énergie pour produire de très hautes températures et de la décarbonatation du calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ) en chaux ( $\text{CaO}$ ) et engaz carbonique. Les émissions de ce dernier provenant de l'industrie du ciment ont été estimées à 5-7% des émissions mondiales avec 0,9 tonne émis dans l'atmosphère pour produire une tonne de ciment.[2]

### **I.1.1. Définition du ciment :**

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre très fine, composée d'oxydes minéraux dont les deux principaux sont la chaux ( $\text{CaO}$ ) et la silice ( $\text{SiO}_2$ ). Il réagit avec l'eau en donnant des hydrates stables qui lui confèrent une résistance mécanique. Les réactions d'hydratation du ciment conduisent à la formation d'une pâte durcissant progressivement à l'air libre.

Le ciment Portland est un ciment hydraulique produit par la pulvérisation du clinker, essentiellement composé de silicates de calcium, avec une faible quantité de sulfate de calcium (qui peut être ajouté sous différentes formes). Les ciments portland sont des liants hydrauliques, c'est-à-dire que leur prise et leur durcissement se fait en se combinant avec l'eau. Cette réaction s'appelle l'hydratation. [3]

C'est le matériau le plus utilisé dans le domaine de génie civil, leurs caractéristiques physiques et chimiques, thermiques et mécaniques font de lui le liant numéro 1 dans presque toutes les formulations qui sont au courant avec la construction.

## I.2. Fabrication de ciment Portland

### I.2.1. Procédé de fabrication de ciment Portland :

Le procédé de fabrication du ciment est illustré par la Figure I-1. Le calcaire et l'argile sont tout d'abord extraits de carrières, puis concassés et dosés avec précision, afin de garantir les performances du produit final.

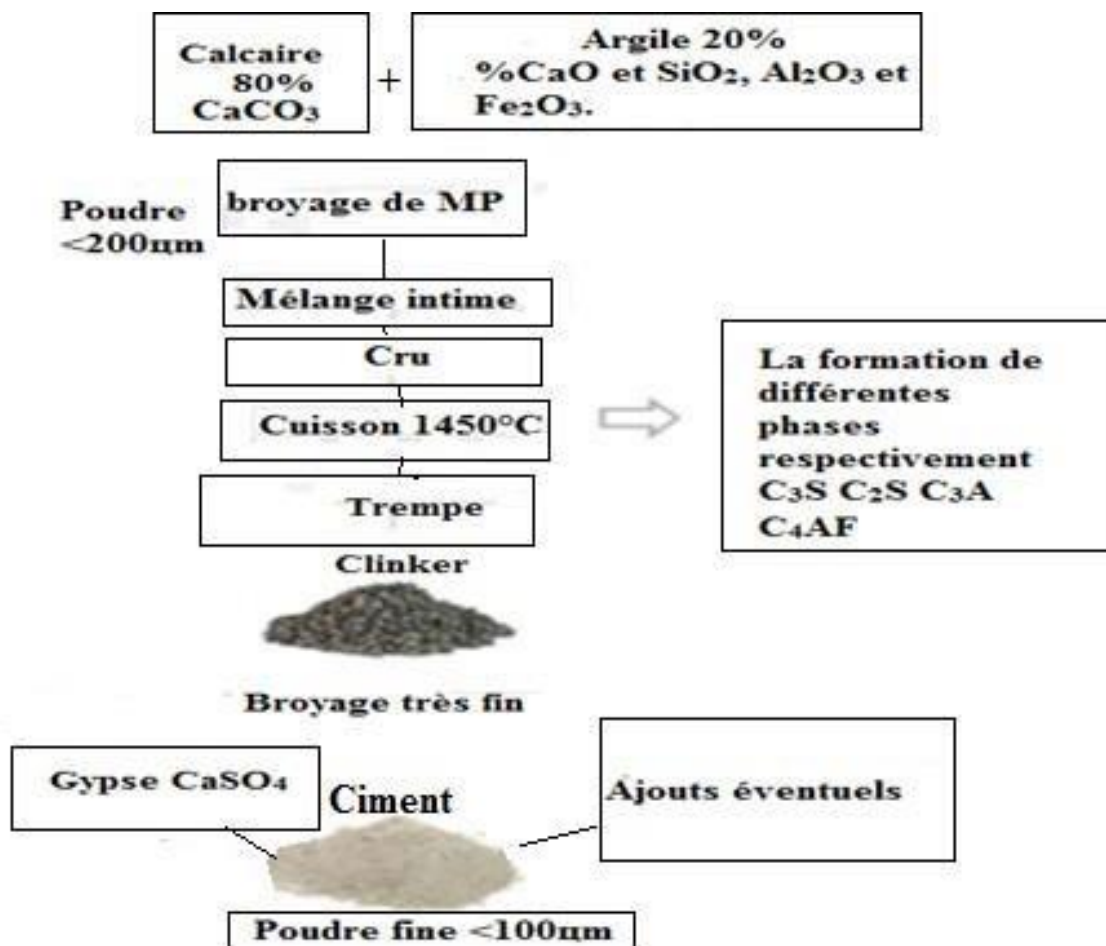


Figure I. 1 : Schéma représentatif des procédés de fabrication de ciment [4]

La plupart des éléments réactifs sont issus de  $\text{CaO}$  et  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Les particules constituées de ces composés doivent être finement broyées et bien mélangées afin de favoriser la formation des produits de la réaction.

Le mélange obtenu (cru), est ensuite cuit dans un four rotatif et incliné. De cette manière, le cru est chauffé progressivement jusqu'à  $1450^\circ\text{C}$ , permettant son passage par les différentes étapes décrites ci-dessous et nécessaires à la formation des différentes phases du ciment.

La cristallisation des phases  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$  et  $\text{C}_4\text{AF}$  dépend de :

- La composition et de la finesse des grains composant le cru.
- La température de cuisson.
- Le mode et de la durée de refroidissement et le type de combustible utilisé.

Les phases de nature différentes, silicates ou aluminates, ont des propriétés différentes. Les silicates ( $\text{C}_3\text{S}$  et  $\text{C}_2\text{S}$ ) représentent 75 à 80 % du ciment et assurent essentiellement la résistance mécanique du ciment hydraté. La phase  $\text{C}_3\text{S}$  est la plus abondante et présente la plus grande réactivité avec l'eau (hydraulicité). Les aluminates ( $\text{C}_3\text{A}$  et  $\text{C}_4\text{AF}$ ) sont à l'état liquide à la température de formation du clinker et forment une phase interstitielle autour du solide composé de cristaux de  $\text{C}_3\text{S}$  et  $\text{C}_2\text{S}$ . Lors du refroidissement, cette phase cristallise et forme un squelette assurant la cohésion des silicates.

### I.3. Procédé de fabrication du ciment et son impact sur l'environnement :

**Notation cimentaire :**

C	A	S	S	F	H	C
CaO	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SO}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{CO}_2$

#### I.3.1. Matières premières naturelles :

La fabrication d'un ciment nécessite un mélange homogène de la chaux, de silice,

d'alumines et de fer. En pratique et pour des raisons économiques, les industries cimentières tournent vers des carrières à ciel ouvert et faciles à exploiter. Ces dernières doivent être riches en calcaire et en argile.

Le calcaire fournit le carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) alors que L'argile fournit principalement l'oxyde de silicium( $\text{SiO}_2$ ), l'oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et l'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Aussi, les carrières peuvent contenir d'autres éléments entre autre l'oxyde de magnésium ( $\text{MgO}$ ), les sulfates et chlorures alcalins. Les alcalis  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  et le soufre présentent sous plusieurs formes. Pour déterminer les proportions de tous ces éléments, des échantillons sont prises pendant l'extraction .des corrections de composition peuvent être effectuées selon les pourcentages des éléments obtenus dans le mélange. L'extraction, le transport et la rareté de ces matières premières rendent cette étape de fabrication demandeuse en énergie. C'est qui implique la nécessité de chercher d'autres sources moins onéreuses ayant moins d'impact sur l'environnement. [5]

### **I.3.2. Matières premières extraites des déchets :**

Pour des raisons environnementales les chercheurs pensent à substituer les matières premières naturelles par des matériaux issus des déchets riches en oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ) plutôt en carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ).

On cite, à titre indicatif, les cendres volantes et le laitier réduisent l'émission de  $\text{CO}_2$  provenant de la fabrication du ciment .Les chercheurs ont prouvé, aussi, que le fer de laitier et de l'acier peuvent être utilisés comme matière première pour la fabrication de ciment portland.

D'autres recherches ont montré que des ciments spéciaux peuvent être synthétisés à partir de déchets des matériaux tels que la boue rouge (à partir de l'aluminium, l'oxyde de silicium contenant principalement, l'oxyde d'aluminium, et l'oxyde de fer).

### **I.4. Formation du cru :**

La formation de cru se fait dans un four fréquemment rotatif incliné par l'une des voies ; humide, semi sèche ou sèche.

La voie humide est la plus ancienne, elle demande plus d'énergie mais plus simple que les autres voies. Elle consiste à mettre les matériaux assez liquides dans un fourrotatif et à la sortie de four le matériau devient sec grâce au brassage continu de la pâte.

La voie semi -sèche : dans ce procédé le cru introduit dans le four sous forme de petit grain ; humidifier dans de grandes « assiettes » rotatives inclinées.

La voie semi -sèche consiste à introduire dans le four des matières premières sous forme des petits grains humides dans de grandes « assiettes » rotatives inclinées.

La voie sèche est la voie la plus usuelle. Après avoir été broyés, les matériaux sont introduits directement dans le four sous forme de la poudre, après un préchauffage dans une tour à échangeurs thermiques.

La voie sèche est la voie la plus usuelle. Après le broyage, les matériaux sont introduits directement dans le four sous forme de poudre. Un préchauffage dans une tour à échangeurs thermiques constitue une phase préliminaire avant la cuisson.

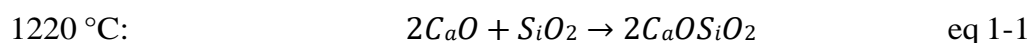
L'objectif est d'obtenir un mélange homogène d'argile et de calcaire (cru) dont le diamètre est inférieur à 200 µm. Des compositions chimiques de cru sont entre 77 à 83 % de carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>), 13 à 14% de Silice (SiO<sub>2</sub>), 2 à 4% d'Alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). En plus de 1,5 à 3 % d'Oxyde de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) qui est responsable de la couleur grise du ciment portland.

### I.5. Clinkérisation et broyage

La cuisson est une opération très consommatrice d'énergie. Elle se fait à une température au voisinage de 1450 C°. Elle permet aux constituants de l'argile (silicates d'alumine et d'oxyde de fer) de se combiner avec la chaux existant dans le calcaire pour donner des silicates et aluminates de chaux. Au cours de la cuisson, les réactions chimiques suivantes se produisent

1220 °C:

- C<sub>2</sub>S : Bélite



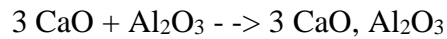
- C<sub>3</sub>S : Alite





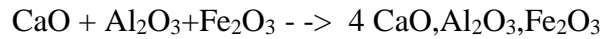
1450 °C:

- C<sub>3</sub>A: Célite



1450 °C:

- C<sub>4</sub>AF : Célite



Le refroidissement de mélange, souvent par un refroidisseur à grille de la matière, nécessite une énergie importante. Le clinker est obtenu sous forme des granulats dont le pourcentage d'alite est majoritaire. Le tableau ci-après récapitule les différents constituants de clinker :

Nom	Formule	Minimum	Maximum
Alite (silicate tricalcique)	Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub>	45.0 %	79.7 %
Bélite (silicate bicalcique)	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	5.7 %	29.8 %
Aluminate tricalcique	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	1.1 %	14.9 %
Aluminoferrite tétra-calcique	Ca <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>10</sub>	2.0 %	16.5 %
Chaux libre	CaO	0.6 %	2.8 %

**Tableau 1 : La composition minéralogique du clinker [6]**



Figure I.3 : Aspect du clinker après refroidissement [6]

### I.6. Obtention du ciment

Pour obtenir le ciment pur, il faut broyer finement le clinker et le gypse, dans le but est d'assurer une bonne homogénéisation. Le gypse sert à régulariser la prise et sa proportion ne doit pas être supérieure à 5 %.

Des constituants secondaires sont également à additionner pour obtenir d'autres ciments composés, comme laitier de hauts fourneaux, des cendres volantes des schistes calcinés, du calcaire, des fumées de silice ou encore des fillers qui sont des matériaux

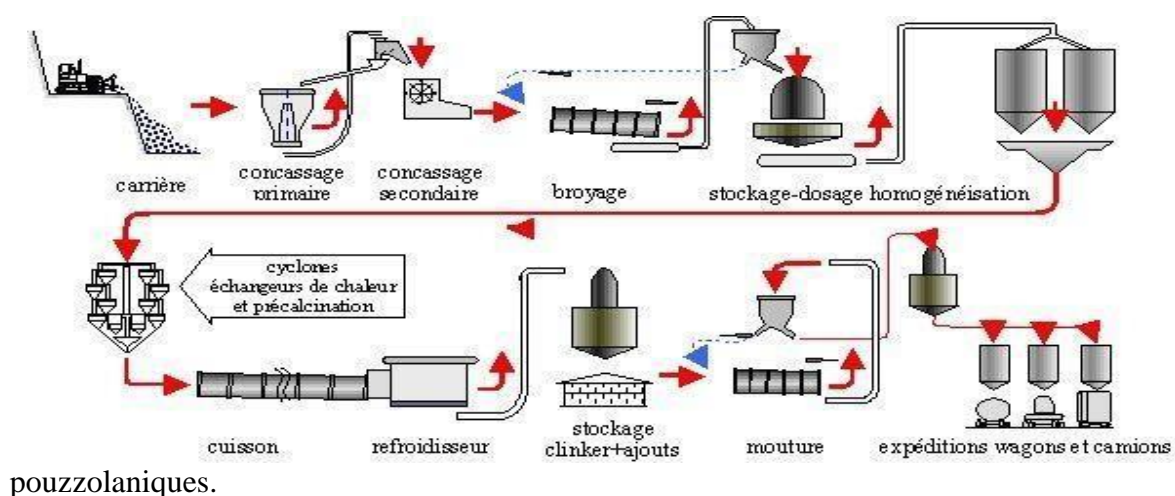


Figure I.4 : fabrication du ciment » Ciment vert : Ciment sulfo-alumineux [7]

## I.7. Les Différents Ajouts Utilisés :

### I.7.1. Les ajouts :

On appelle ajout tout corps autre que le clinker et gypse entrant en composition avec ses derniers pour augmenter les caractéristiques de résistance au liant, ses ajouts sont :

- Poudres fines pouzzolaniques (cendres, fumée de silice.) ;
- Fibres de différentes natures ;
- Colorants (naturels ou synthétiques) ;
- Polymères.

### I.7.2 La Chimie des Cimentiers :

La chimie du ciment se construit essentiellement à partir des 4 oxydes majeurs présents dans les matières premières, et qui vont former les silicate sets les aluminates de calcium du clinker :

- $\text{CAO} = \mathbf{C}$
- $\text{SiO}_2 = \mathbf{S}$
- $\text{Al}_2\text{O}_3 = \mathbf{A}$
- $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \mathbf{F}$

C'est-à-dire que si on a

- $(\text{CAO})_3\text{SiO}_2$  sera noté  $\mathbf{C}_3\mathbf{S}$  (silicate tricalcique) ou (alite)
- $(\text{CAO})_2\text{SiO}_2$  sera noté  $\mathbf{C}_2\mathbf{S}$  (silicate bi calcique) ou (bélitre)
- $(\text{CAO})_3\text{Al}_2\text{O}_3$  sera noté  $\mathbf{C}_3\mathbf{A}$  ( aluminatetricalcique )
- $(\text{CAO})_4\text{Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$  sera noté  $\mathbf{C}_4\mathbf{AF}$  (alumino-ferritetetracalc.)

## **I.8. Ciment vert : Ciment sulfo-alumineux**

### **I.8.1. Présentation :**

Les ciments sulfo-alumineux sont des liants hydrauliques relativement récents. Ils sont, ainsi, moins connus que les ciments Portland, mais ont des potentialités, tout à fait, intéressantes.

La consommation d'une grande quantité de matières premières non renouvelables, l'émission

Des tonnes de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère ont mené des industriels à chercher d'autres solutions, à la fois, économiques et écologiques. Ces facteurs ont contribué au développement d'un ciment vert ayant des propriétés similaires au ciment portland.

Les ciments sulfo-alumineux sont très nombreux, se composent essentiellement de clinker sulfo-alumineux et de sulfate de calcium, hydraté (gypse), ou anhydrite.

### **I.8.2 Les différents types de ciments sulfo-alumineux :**

#### **Le ciment sulfo-alumineux alitique**

Il se caractérise par l'absence de bélite (C<sub>2</sub>S), la présence de ye'élite (C<sub>4</sub>A<sub>3</sub>Š) et d'alite (C<sub>3</sub>S). En termes de durabilité, il est très résistant, précisément, à la carbonatation.

#### **Le ciment Portland modifié à la ye'élite**

Il se caractérise par une meilleure résistance au jeune âge et un temps de prise plus court. Il est fabriqué en mélangeant 5 à 20% de ye'élite avec un clinker de ciment portland séparément fabriqué.

#### **Le ciment ye'élitique**

Il se distingue par une résistance très élevée au jeune âge mais qui ne s'améliore pas à long terme. Il se caractérise, aussi, par la présence de sulfopurrite (C<sub>5</sub>S<sub>2</sub>Š, 25-77%) et de 15 à 50% de ye'élite. Cependant qu'il ne contient pas de silicate de calcium.

#### **Les ciments sulfo-alumineux bélitiques**

Ces types de ciments, appelés sulfo-alumineux à base de calcium et à haute teneur

en bélite (SAB), ils se distinguent de ciment Portland par absence d'alite ( $C_3S$ ), sa faible teneur en chaux (C) et sa grande friabilité. Ces caractéristiques sont importantes puisqu'elles permettent de réduire la demande d'énergie nécessaire à la décarbonatation du calcaire et au broyage pendant la fabrication. [8]

## **I.9. Fabrication et impact environnemental des ciments sulfo-alumineux**

### **I.9.1. Matières premières :**

Les matières premières composent généralement de calcaire, bauxite (roche ayant une teneur en aluminium très élevée et un coût élevé), et de gypse ou d'anhydrite. Aussi d'autres éléments peuvent être y ajoutés dans la composition du cru, comme :

Cendres volantes riches en fer et en alumine : sont des particules fines recueillies lors de la combustion du charbon, utilisé dans les centrales thermiques.

Laitier : C'est un produit issu de la fusion ou d'élaboration de métaux par voie liquide,

Il compose notamment d'un mélange d'oxydes de silice, d'aluminium, de phosphore et de soufre, qui sont formés en cours de fusion ou d'élaboration de métaux.

Mâchefer.

Ils permettent à la fois de minimiser le coût de ciment et d'autre part de diminuer la matière première non renouvelable. [8]

### **I.10. Clinkérisation et étapes d'hydratation d'un ciment vert**

De même que le ciment portland, les sulfo-alumineux sont réalisés dans des fours rotatifs normalisés. La matière première doit être séchée puis broyer finement avec le gypse.

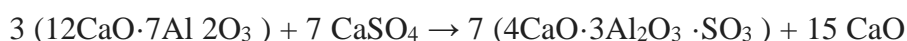
Les proportions des phases qui peuvent constituer le clinker d'un ciment sulfona-alumineux sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Nom	Notation commentaries	Proportions ( %)
Silicate bicalcique (bélite)	C <sub>2</sub> S	10-60
Yeelimite	C <sub>4</sub> A <sub>3</sub> Š	10-55
Sulfate de calcium	C Š	0-25
Chaux libre	C	0-25
Alumino ferrite tétralcique	C <sub>4</sub> AF	0-40
Mono aluminat de calcium	CA	0-10
Aluminat de calcium : mayenite	C <sub>12</sub> A <sub>7</sub>	0-10

**Tableau 2 : constituants anhydres du clinker sulfo-alumineux [9]**

#### I.11. Les principes phases d'un ciment sulfo-alumineux sont :

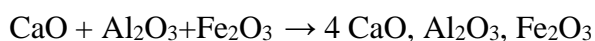
**Yeelimite (C<sub>4</sub>A<sub>3</sub>Š)** : se forme par la réaction, à l'état solide, d'une phase intermédiaire mayenite (C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>) et l'anhydrite (CaSO<sub>4</sub>). Autre façon, à partir de la chaux libre CaO, l'oxyde d'aluminium AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et l'anhydrite (CaSO<sub>4</sub>). Il se produit par le biais d'une réaction suivante :



**Bélite (C<sub>2</sub>S)** : il présente dans les clinkers des ciments sulfo-alumineux sous formes ;  $\alpha'$  et  $\beta$ . Il est moins rapide, dans sa formation, que la Yeelimite. En plus, il est beaucoup moins important dans le sulfo-alumineux que dans le ciment Portland. Il se forme à partir de la chaux libre CaO et de l'Oxyde de Silicium par la réaction suivante



**Ferrite (C<sub>4</sub>AF)** : qui se forme, à partir, de l'oxyde de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et de l'oxyde d'aluminium (AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Et ce, en présence de la chaux libre CaO ou éventuellement à partir de ferrite (C<sub>2</sub>F) après l'intégration de l'aluminium.



### **I.11.1 Propriétés du ciment Sulfo-alumineux**

Le ciment sulfona-alumineux se distingue, par-rapport à d'autres types de ciments, par plusieurs propriétés, entre autres :

#### **Propriétés physiques :**

Capabilité de développer des performances mécaniques du béton. Émission minimale possible de CO<sub>2</sub> lors de sa fabrication.

Résultats encourageants en termes de durabilité et en résistance aux attaques chimiques.

#### **Propriétés mécaniques :**

La formation d'ettringite non expansive, sous forme des cristaux larges, qui génère un durcissement à jeune âge (durcissement rapide entre 55 et 70MP à 28 jours).

Une faible perméabilité qui permet, à la fois, de bonnes résistances à la carbonatation et aux sulfates.

Une faible porosité qui donne de bonnes résistances à la corrosion et au gel. Une faible alcalinité qui empêche, les réactions alcali-granulats, la résistance à la corrosion ainsi que l'apparition d'efflorescence.

De bonnes résistances mécaniques. En même temps, ciment sulfo-alumineux possède certains désavantages ; Hydratation rapide de la Yee limite pose des problèmes de maniabilité pendant la mise en œuvre de béton. Alors, pour éviter ces prises prématurées, des additifs sont proposés, comme l'oxyde de Zinc, le Plomb et l'acide citrique.

Il donne aussi une chaleur immodérée d'hydratation.

### **I.12. Réduction d'énergie et impact environnemental :**

Le ciment Portland est obtenu par cuisson à 1450°C d'un mélange de calcaire et d'argile, broyé en fine poudre. Ce processus de clinkérisation consomme à lui seul, environ, 60% de l'énergie totale nécessaire à la production de ciment. Dans le four, la réaction de la décarbonation du calcaire ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ) dégage également beaucoup de dioxyde de carbone, ce qui explique en partie pourquoi l'industrie cimentière participe à près de 5% des émissions mondiale de CO<sub>2</sub>.

Alors, la fabrication d'un ciment sulfona-alumineux nécessite une température

compris entre 1250 et 1350° et la quantité de calcaire contenant dans la cru est réduite par rapport au ciment portland. Le cru de ciment sulfona-alumineux est moins riche en calcaire, cependant que ce dernier dégage une quantité considérable de CO<sub>2</sub>.

Le clinker sulfo-alumineux est plus fragile que ceux des autres ciments ce qui explique la diminution de sa consommation énergie lors du broyage. En plus d'une proportion plus faible de la chaux dans le ciment, il génère une enthalpie plus faible en comparant avec le ciment portland. Le tableau ci-dessous mis en évidence une simple comparaison entre le dégagement de CO<sub>2</sub> et l'enthalpie formé par les cartes principales phases des deux ciments.

Phases	Les proportions des phases en %		Enthalpie [kJ/kg de clinker]	CO <sub>2</sub> rejeté [kg/kg de clinker]
	Sulfo	Portland		
Alite C <sub>3</sub> S	0	45-80	1848-1	578
Bélite β C <sub>2</sub> S	10-60	6-30	1336-8	511
Aluminate de calcium CA	0-10	2-15	1030-2	278
Yeelite(C <sub>4</sub> A <sub>3</sub> S)	10-55	0	800	216

**Tableau I.3 : Enthalpie de formation et émission de CO<sub>2</sub> générées par les phases de ciment [9]**

### I.13. Classes de ciment portland :

Les ciments peuvent être classés en deux parties, en fonction de leur composition et en fonction de leur résistance normale.

#### I.13.1. Classification des ciments portland en fonction de leur composition :

D'une manière générale, les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par. Ils sont numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse) :

- CEM I: Ciment portland artificiel (CPA).
- 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).

Le tableau (Tableau I.4) représente les différents types de ciment en fonction de leur composition.

Composition de ciment Portland	Ciment portland Artificial	Ciment portland compose	
	CPA- CEM I	CPJ-CEM II/A	CPJ-CEM II/B
Clinker(K)	/95%	80%<94%	65%<79%
Laitier (S)	+	6%< total	21%< total <35% (fumiee de silice <10%)
Pouzzolanes (Z)	+	<20%	
Cendre siliceuse (V)	+	(fume de silice	
Fumée de silice (D)	+	<10%)	
Cendre calcique (W)	+		
Schistes (T)	+		
Calcaire (L)	+		
Fillers (F)	+	/	/

**Tableau I.4 : Les différents types de ciment portland en fonction de leur Composition.[10]**

### I.13.2 Classification des ciments en fonction de leur résistance normale

Trois classes (32,5, 42,5 et 52,5) sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours. Les sous classes (32,5 R, 42,5 R et 52,5 R) sont associées à ces trois classes principales pour désigner des ciments. Les huit types de ciment portland à établir sont les suivants.[10]

Les types de ciment Portland	Classification
Type I	Normal
Type IA	Normal, à l'air entrainer
Type II	A résistance moyenne aux sulfates
Type IIA	A résistance moyenne aux sulfates, à l'air entraîné
Type III	A haute résistance initial
Type IIIA	A haute résistance initiale, à air entraîné
Type IV	A faible chaleur d'hydratation
Type V	A haute résistance aux sulfates

**Tableau I.5: Les différents types du ciment portland en fonction de résistance normale.**

## I.14 Recyclage du verre.

### Introduction :

Le problème environnemental que posent les déchets non biodégradables tels que les bouteilles non réutilisables (verre) devient une préoccupation majeure au regard des quantités énormes produites dans les Grandes villes. L'une des rares voies de recyclage de ces déchets est de les stocker dans les procédés de construction (béton). Ainsi, le verre est un matériau riche en silice et en sodium. Son utilisation dans une matrice cimentaire entraîne deux réactions à effet contraire : la réaction alcali silice néfaste pour les bétons par les gonflements qu'elle génère, et la réaction pouzzolanique qui est bénéfique.

### Définition de verre :

Le dictionnaire indique que le mot verre vient du mot latin vitrum qui désigne une substance minérale transparente et isotrope.

Le verre est un solide obtenu par figeage d'un liquide qui n'a pas été cristallisé limite le terme verre aux seuls produits obtenus par refroidissement d'un liquide .Au sens chimique et physique, le verre n'est pas un solide, mais plutôt un liquide solidifié.

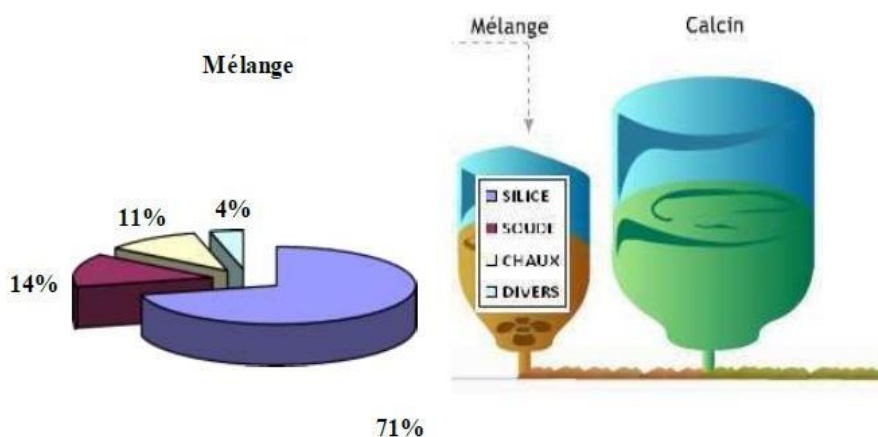
Les molécules sont totalement désordonnées et ne forment pas de réseau cristallin.

### La composition du verre :

Certains éléments comme le silicium et le bore peuvent former un verre par leur seule combinaison avec de l'oxygène (oxyde de métaux) utilisation (élévation de température). Ces oxydes sont appelés oxydes «formateurs» car ils forment le squelette du verre. On les combine avec d'autres éléments dits « modificateurs » qui sont

- Les fondants : qui abaissent la température de fusion des oxydes formateurs (silice =1730°C).
- Les stabilisants : qui modifient les propriétés physiques du verre atténuées par l'adjonction du fondant.

### Principales matières premières du verre :



**Figure I.5: matières premières pour la fabrication du verre.**

Le calcin est désormais une matière première des verriers, certains fours utilisent jusqu'à 95%. En plus du sable les carbonates de calcium et de sodium les sulfates de potassium et de sodium, la dolomie et le charbon.

Les matières premières sont représentées dans le tableau I.6 suivant :

Matière première	Fonction	Mais encore
La silice	Vitrifier	Apporté par le sable siliceux
Le carbonate de soude	Fondre	Permet d'abaisser la température de fusion de la composition
La calcite		Calcaire naturel sous forme de chaux
Le sulfate de soude		En substituant au carbonate
Le calcin	Amorcer la fusion	Verre concassé qui provient des verriers ou de la récupération ménagère.
La magnésie	Stabiliser	Apporter par la dolomie, qui permet au verre en cours de travail de ce maintenir suffisamment plastique sur un long palier de température.
L'alumine	Augmenter la résistance thermique, mécanique et la viscosité	Apporté par le feldspath
Le minium	Réfranger	Réfraction à la lumière
La barite		
Le borax	Baisser le coefficient de dilatation	Verre spéciaux
Le bioxyde de manganèse	Colorer	Pour colorer le verre vert
Sélénium		A faible dose
Les oxydes métalliques		Fer, cuivre, chrome, cobalt (décolore le verre blanc)

**Tableau I.6: matières premières pour la fabrication du verre.[11]**

**Les Propriétés du verre :**

Le verre est la seule matière minérale solide que l'on puisse produire à des dimensions et sous des formes quelconques tout en conservant sa transparence.

Ses propriétés physiques, chimiques, thermiques sont les suivantes :

**Propriété physique :**

- ✓ La transparence : mais il peut être opaque ou opalescent.
- ✓ La dureté : seuls les diamants et le carbure de tungstène le rayent. Le verre le plus dur est le verre de Bohême et le cristal est le plus tendre.
- ✓ La densité : elle dépend des composants ; elle est d'environ 2,5.
- ✓ La résistance et l'élasticité : la cassure du verre est liée à sa flexion et à sa résistance au choc. Il casse là où le métal se tord. Contrairement, sa résistance à la compression est importante.
- ✓ L'imperméabilité : elle est extrêmement grande mais le verre reste poreux pour certains liquides comme le kérosène ; on dit « qu'il sue ».

**Propriétés chimiques :**

- ✓ L'action de l'eau : l'eau agit sur les silicates qui, en se décomposant, forment un dépôt en surface qui devient peu à peu opaque ; le verre perd de sa transparence.
- ✓ L'action de l'air : les silicates alcalins se combinent avec l'acide carbonique contenu dans l'air ce qui donne un dépôt blanchâtre à la surface du verre.
- ✓ L'action de la lumière : exposés aux ultraviolets, certains verres se colorent ou se décolorent.
- ✓ L'action des acides : ils décomposent la silice, le plus rapide est l'acide fluorhydrique qui permet de graver en profondeur le verre plaqué. Le verre peut donc être dissout.

**Propriétés thermiques :**

- ✓ **La dilatation** : C'est un très mauvais conducteur de chaleur. Il se brise s'il subit un brusque changement de température car les différentes parties du verre ne se réchauffent pas en même temps. Son coefficient de dilatation est faible, ce qui lui confère de nombreuses applications : il sert d'isolant thermique (laine de verre). On retrouve presque les mêmes coefficients que certains métaux d'où l'exécution des soudures verre-métal. Ce coefficient varie selon la composition.

**La conductivité** : Il est mauvais conducteur (environ 500 fois moins que le cuivre); on l'utilise comme isolant électrique. C'est aussi un bon isolant acoustique suivant l'épaisseur de la feuille. Ceci n'est pas le cas à chaud car il devient conducteur à partir de 250°C.

- ✓ Il est **inflammable** et **incombustible**.

### Le recyclage du verre :



**Figure I.6: Processus de transformation de déchets de verre.[12]**

Le verre constitue une composante importante des ménages et des déchets industriels en raison de son poids et de sa densité. La composante de verre dans les déchets municipaux est généralement constituée de bouteilles cassées, verrerie, des ampoules et autres articles. Aussi de nombreuses méthodes manuelles de création d'objets en verre ont un taux de défektivité l'ordre de quarante pour cent.

Le recyclage du verre est le processus de transformation de déchets de verre en produits utilisables (figure I.6). Pour ce faire, les déchets de verre doivent être séparés par leur composition chimique (séparés en différentes couleurs) car le verre conserve sa couleur après

Le recyclage, et ensuite, en fonction de l'utilisation finale et les capacités locales de transformation Cette procédure permet d'utiliser moins d'énergie que la fabrication du verre à partir de sable, de chaux et de soude.

### I.15. Recyclage du verre en Algérie :

La composition des déchets solides produits en Algérie se caractérise par une part très significative des produits organiques avec un taux moyen de 72%. Quant au plastique, il ne représente que 10% de ces déchets et 9,3 % pour le papier/carton, 4,14% pour le chiffon et autres, 3,2% pour les Métaux et 1,36% pour le verre. La capacité de recyclage de ces déchets est donnée dans le (tableau I.7).

Nature des déchets	Quantité en tonne/ an
Papier	<b>385.000</b>
Plastique	<b>130.000</b>
Métaux	<b>100.000</b>
Verre	<b>50.000</b>
Matières diverses	<b>95.000</b>
Total	<b>760.000</b>

**Tableau I.7: Capacité de recyclage [13]**

#### I.15.1. Domaines de recyclage des déchets de verre :

Le recyclage du verre d'emballage possède de nombreux avantages, et celui notamment d'être utilisé à l'infini. Le verre après broyage peut être réutilisé sous plusieurs formes dans plusieurs secteurs d'activité ;

✓ **La construction** : il remplace les gravillons qu'on peut trouver dans les parpaings, et possède des qualités d'acoustique et de légèreté.

✓ **L'abrasion** : les microbilles de verre pour traiter des surfaces sans les endommager ou la poudre de verre afin de préparer des surfaces à travailler, et les billes de verre pour le broyage

✓ **Les pigments pour la peinture** : dans les enduits pour un effet esthétique particulier ou dans la peinture pour la signalisation routière.

✓ **Les matériaux de décoration** : dans les roches décoratives pour la mosaïque par exemple

✓ **Les nettoyages** : par la libération de soude et de potasse, ainsi que grâce à ses microparticules, qui possèdent des qualités de détergents.



**I.16. Conclusion :**

L'accumulation de déchets de verre peut être dangereuse pour l'environnement, afin d'éviter de tels risques, des solutions appropriées doivent être recherchées pour réutiliser ces déchets dans différents domaines.

Parmi les solutions possibles, il y a la réutilisation comme ajout dans la composition du ciment, c'est ce que nous allons apprendre à travers certaines expériences que nous ferons dans cette recherche.

# ***CHAPITRE II***

## **II.1. Introduction :**

L'incorporation des ajouts minéraux maintenant une technique importante en améliorant les propriétés du béton telle que la fluidité, la résistance, la durabilité., etc. Ces additions affectent de manière significative la rhéologie des matériaux cimentaires à l'état frais, qui est directement relié avec le développement de la résistance la durabilité des matériaux durcis.

Les formulations des bétons résultent pour l'essentiel d'une approche empirique basée sur des tâtonnement sen laboratoire et de ce fait plusieurs échecs sont été essayés lors de la mise en œuvre de ces bétons sur chantier.

La compatibilité entre les différents constituants de ciment nécessite sans doute de prendre en compte tous les paramètres susceptibles d'influer son comportement. Or célanèses site un très grand nombre d'essais qu'il nous est impossible d'étudier tous à la fois, de ce fait ; dans ce chapitre nous définissons quelques essais sur ciment et mortier, ainsi que les appareils utilisés.

## **II.2. Matériaux Utilisés :**

### **II.2.1. Sable :**

Les sables utilisés sont les sables appelés "sable normalisé". Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent dans les intervalles entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle important : Ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées et même le prix. Les dosages se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume de sable humide.

Ils peuvent être :

- Naturels et roulés (de rivières, de sablières, ..), de nature siliceuse ou silico-calcaire;
- Naturels concassés (roches de carrières), comme des basaltes, porphyres, quartzites. Ils sont anguleux et durs.
- Spéciaux (lourds, réfractaires, légers) :
  - Sable de laitier ;
  - Sable d'oxydes de fer, de chromite ;

- Corindon ;
- Sable de briques concassés ;
- Liège torréfié ;
- Polystyrène expansé ;
- Vermiculite, perlite.

Certains sables sont à éviter, notamment les “sables à lapin”, généralement très fins, les sables crus qui manquent de fines et les sables de dunes ou de mer qui contiennent des sels néfastes pour les constituants des ciments, par contre ils doivent être propres.

Le diamètre maximum des grains de sable utilisés pour les mortiers est:

- Extra-fins : jusqu'à 0,8 mm (en tamis), soit 1 mm (en passoire);
- Fins : jusqu'à 1,6 mm ;
- Moyens : jusqu'à 3,15 mm ;
- Gros : jusqu'à 5 mm



**Figure II.1: Sable normalisé**

### II.2.2 Poudre de verre ( $D_{MAX} < 80 \mu m$ ) :

Cette poudre est issue de la récupération de bouteilles de boissons alcooliques ramassées, vaineur disponibilité et gêne dans la nature Ces bouteilles sont nettoyées afin d'éliminer les étiquettes en papier, séchées, concassées et finement broyées, La poudre de verre obtenue est passée sur le tamis dont  $D_{max} < 80 \mu m$



Figure : II.2. La poudre de verre (tamisage)

### II.2.3. Clinker :



---

**Figure II.3 Broyage de clinker**

Le clinker utilisé est celui de GICA de la cimenterie de Beni Safe Ain T'émouchent. (Voir l'ANNEXE N° II.1)

**II.2.4. Le gypse :**

Lors du broyage du clinker, le sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) d'hémi hydrate, ou d'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ) (environ 5%) utilisé comme « régulateur de prise » rendant ce dernier moins rapide.

Les différents composés du clinker ainsi que le sulfate de calcium représentent plus de 90% des composants du ciment et ne sont pas des composés purs, mais des solutions solides, contenant des, Impuretés. La pâte durcie finale est le résultat de réactions d'hydratation, entre le clinker et l'eau où les principaux composés du clinker réagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui durcissent avec le temps ; les hydrates



**Figure II.4 : le gypse**

### II.3. Préparation de mortier :

La composition de pate cimentaire étudié est composée de ciment + sable normalisé + eau selon le tableau suivant :

Mortier étudié			
Constituants	Ciment	Sable normalisé	Eau
1	450g	1350g	225ml

**Tableau II.4 : Dosage de mortier étudié.**

#### ❖ Malaxage du mortier :

Il faut malaxer chaque gâchée de mortier mécaniquement au moyen du malaxeur spécifié.

- Verser l'eau dans le récipient et introduire le ciment.
- Mettre alors immédiatement le malaxeur en marche à petite vitesse et après 30 s, introduire régulièrement tout le sable (pendant les 30 s suivantes).
- Mettre le malaxeur à sa vitesse la plus grande et continuer à mélanger pendant 30s supplémentaires.
- Arrêter le malaxeur pendant 1 min 30 s. Pendant les 15 premières secondes, enlever au moyen d'une raclette en caoutchouc tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.
- Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s.

❖ **Propriétés chimiques :**

	Si <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	C35	C25	C3A	C4AF	CaOL
MIN	21.10	5.05	3.30	65.50	0.90	58.00	12.00	7.50	9.50	0.30
MOY	21.62	5.27	3.40	66.00	1.00	60.00	16.00	8.25	10.50	0.90
MAX	22.15	5.50	3.50	66.50	1.10	62.00	20.00	9.00	11.50	1.50

**Tableau II.1: Composition minéralogique de CLINKER.****II.4. Préparation de ciment :**

La composition de ciment étudié est composée de gypse + clinker + poudre de verre selon le tableau suivant :

/	CLINKER (%)	GYPSE (%)	POUDRE DE VERRE (%)
C1	85	5	10
C2	82.5	5	12.5
C3	80	5	15
C4	75	5	20
C5	70	5	25
C6	65	5	30
C7	60	5	35

**Tableau II.2 : Composition quantitative de ciment étudié.**



❖ **Composition chimique de ciment :**

❖ Oxides	C1	C2	C3	C4	C5
CAO	59.45	50.3	49.2	48.5	43.98
SiO <sub>2</sub>	34.68	39.21	42.34	43.78	52.97
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.96	4.98	5.1	4.89	5.01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.55	2.50	2.45	2.43	2.38
SO <sub>3</sub>	1.79	2.50	1.59	1.91	1.67
K <sub>2</sub> O	0.24	0.21	0.23	0.23	0.19
MGO	0.98	1.07	1.12	1.17	1.21

**Tableau II.3 : Composition chimique de ciment étudié.**

### II.4.1. Eau :

L'eau utilisée pour les différentes gâchées de mortier est issue du robinet de laboratoire de béton du département de génie civil et hydraulique d'UNIVERSITÉBELHADJ BOUCHAIB AIN TEMOUCHENT. C'est une eau propre et potable.



**Figure II. 5 : Malaxeur de mortier**

## II.5. LES ESSAIS EFFECTUÉS :

Les premiers essais sur ciment et mortiers que nous présentons sont des essais classiques qui s'effectuent traditionnellement au domaine. Aucune modification n'a été

---

effectuée pour les appliquer.

### **II.5.1. Expansion de ciment :**

Les expansifs des ciments sont le gypse ajouté au moment du broyage afin de régulariser la durée de prise, la chaux libre et la magnésie libre.

#### **❖ Conduite de l'essai**

Le mortier normal ou la pâte normale sont préparés comme pour les essais sur les liants. Vérifier avant l'essai que les moules sont libres dans le sens de l'expansion, propres et les aiguilles droites et indépendantes.

1- Placer les moules sur des plaques de verre, les remplir de pâte normale ou de mortier normal, et les recouvrir chacun d'une autre plaque de verre légèrement lestée.

2- Immerger aussitôt les moules dans le bain provisoire à 20°C et mesurer l'écartement initiale des aiguilles " A " .

3- Après 24 heures du temps de moulage, enlever les plaques de verre avec précaution et porter les moules dans leurs bains.

#### **• Essai d'expansion à chaud :**

Les moules sont immergées dans le bain thermostatique dont on porte l'eau à l'ébullition pendant 3 heures. Puis mesurer de nouveau l'écartement final des pointes des Aiguilles " B " .

Trois moules à aiguilles de le Chatelier sont confectionnées pour mesurer la stabilité aux expansifs de notre ciment.

Les résultats sont présentés au tableau suivant :

Type d'échantillons	Expansion à chaud en mm
Ech C01	0.5
Ech C02	01
Ech C03	01
Ech C04	02
Ech C05	0.5

**Tableau II.5 : Résultats d'essai d'expansion à chaud de ciment étudié.**

Dans notre cas l'ouverture des aiguilles n'a pas dépassé 10 mm, donc on peut dire que ce ciment est vérifié à l'égard des normes.



**Figure II.6 : Essai de consistance**

---

### II.5.2. Mesure de la finesse du ciment :

La surface spécifique (finesse Blaine) permet de mesurer la finesse de mouture d'un ciment. Elle est caractérisée par la surface spécifique ou surface développée totale de tous les grains contenus dans un gramme de ciment. Elle s'exprime en  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Suivant le type de ciment, cette valeur est généralement comprise entre 2800 et 5000  $\text{m}^2/\text{g}$ .



**Figure II.7: Perméabilimètre de Blaine**

#### **Conduite de l'essai (mode opératoire) :**

Le liant hydraulique dont on désire mesurer la surface spécifique doit être à porosité constante (égale à 0,500).

- 
- Méthode : peser à 0,01 g près, une masse  $m$  de liant telle que, compte tenu de son volume  $V$  après tassement dans la cellule, sa porosité soit égale à 0,500.
  - La masse de matière à prendre s'écrit :  $m = (1 - e) \rho V$ .

$\rho$  - masse volumique.

$V$  - volume utile de la cellule.

- Placer la grille au fond de la cellule. Appliquer sur cette grille, au moyen d'une tige à face inférieure plane et d'une équerre, un disque neuf de papier-filtre.
- Verser le liant dans la cellule en utilisant un entonnoir.
- Donner quelques légères secousses à la cellule pour niveler la couche supérieure du liant, puis placer sur celui-ci un autre disque neuf de papier filtre.
- Tasser avec précaution au moyen du piston en évitant la remontée de la poudre au-dessus du papier filtre jusqu'à ce que le collier vienne buter contre le haut de la cellule.
- Retirer le piston lentement (Il est commode de pratiquer une légère rotation alternative).
- Aspirer lentement au moyen de la poire l'air du tube jusqu'à ce que le niveau du liquide atteigne le trait supérieur. Fermer le robinet. Mettre en marche un chronomètre sensible au cinquième de seconde quand le niveau de liquide atteint le deuxième trait.
- L'arrêter quand le niveau de liquide atteint le troisième trait.
- Noter le temps écoulé  $t$  ainsi que la température de la pièce.
- Faire trois mesures et prendre la moyenne arithmétique des trois temps.
- La surface spécifique est calculée par la formule :

$$S = k \text{ [Eq II.1]}$$

$S$  - Surface spécifique ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ).

$k$  - Constante de l'appareil.

$e$  - Porosité de la couche tassée.

$t$  - Temps mesuré en secondes.

$\rho$  - Masse volumique ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

$\nu$  - Viscosité de l'air à la température d'essai (en poises).

**❖ Résultat :**

Les résultats de l'essai n'étaient malheureusement pas satisfaisants.

Et sa justifier l'effet de l'addition poudre de verre sur le poids spécifique du ciment.

La conclusion suivante peut être tirée : Réduction des temps de prise.

Selon les résultats obtenus, on note que l'augmentation de la quantité de l'ajout de poudre de verre incorporé dans le ciment à un effet significatif sur le poids spécifique de ciment. Ceci peut être dû à la porosité créée par la substitution partielle du clinker par poudre de verre (taux de substitution de poudre de verre) et la faible densité de l'ajout.

**II.5.3. Essai de la masse volumique****La masse volumique apparente des poudres :**

L'essai de la masse volumique apparente des poudres est selon, C'est la masse de l'unité de volume apparent du corps, c'est-à-dire du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient.

**Principe d'essai :**

Savoir la différence de la masse volumique de ciment utilisé en tenant compte le volume de vide qui se trouvent dans la poudre étudiée.

**Mode opératoire de l'essai :**

- Prendre l'échantillon dans la main.
- Verser l'échantillon toujours au centre du récipient, jusqu'à ce qu'il déborde tout autour en formant un cône, raser à la règle et Peser le contenu.
- Calculer la masse volumique apparente à partir de la formule suivante :

$$M_{V \text{ app}} = (M_T - M_0) / V$$

Avec :

- $M_0$  : La masse du récipient de mesure vide.
- $M_T$  : La masse du récipient avec la poudre.
- $V$  : le volume du récipient de mesure.

### Les résultats d'essai :

Les résultats sont résumés dans le tableau comme suite :

. La masse de récipient vide : 1393.9g

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
La masse de ciment	2873g	2821.23g	2871.5g	2841.66g	2811.23g	2758.2g	2742.66g
La masse volumique	1479.1	1427.33	1477.66	1447.7	1417.3	1364.3	1348.7

**Tableau IV. 6 : La masse volumique apparente des poudres**

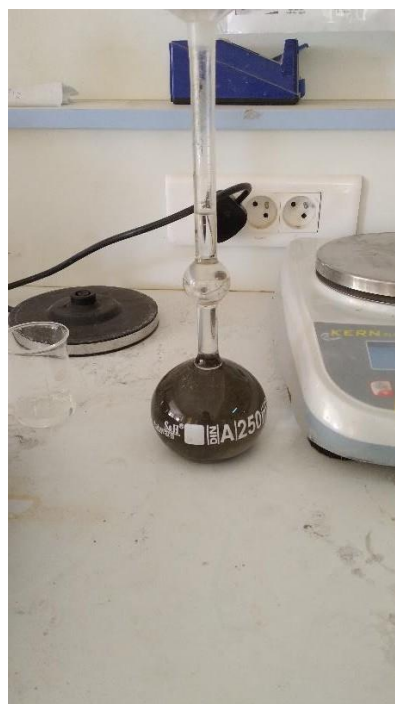
### Masse volumique absolue de ciment :

#### Equipement nécessaire : (Volumétre de Le Chatelier)

C'est un récipient de 250 cm<sup>3</sup>, comportant un col étroit muni d'un renflement de 20 cm<sup>3</sup> environ.

Au-dessous du renflement se trouve le trait zéro avec une courte graduation de part et d'autre (en 1/10 de cm<sup>3</sup>).

Au-dessus du renflement, une autre graduation donne le volume (en 1/10 cm<sup>3</sup>) à partir du zéro.



---

**Figure II.8 : Le Chatelier**
**❖ Méthode du volumétre :**

1- Mettre du toluène jusqu'au niveau V1, voisin du zéro. Noter V1, en valeur algébrique (négative au-dessous du repère). Peser l'ensemble, soit M1.

2- Introduire le liant dans le volumétre jusqu'à ce que le niveau du liquide soit dans la partie utile de la graduation supérieure. Bien chasser les bulles d'air. Noter V2. Peser, soit M2.

La masse volumique du liant testé est calculée par la formule suivante :

[Eq. II.2]

$$P_s = (M_2 - M_1) / (V_2 - V_1)$$

Ciment	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Ps	3.06	3.05	3.05	3.04	2.99	2.97	2.93

**Tableau: de la masse volumique absolue de ciment**

**❖ Résultat :**

La masse volumique trouvée vérifier.

**II.5.4. Consistance et délais de prise : Vicat**

La détermination de la consistance normale et les temps de débuts et fins de prise des différents mélanges ont été étudiés avec un appareil de Vicat (figure II.9).

Les mélanges sont rapidement introduits dans un moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessive, puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de Vicat l'aiguille placée à la surface de l'échantillon est relâchée et s'enfonce dans la pâte.

Lorsqu'elle s'immobilise (ou après 30 secondes d'attente), on relève la distance **d**



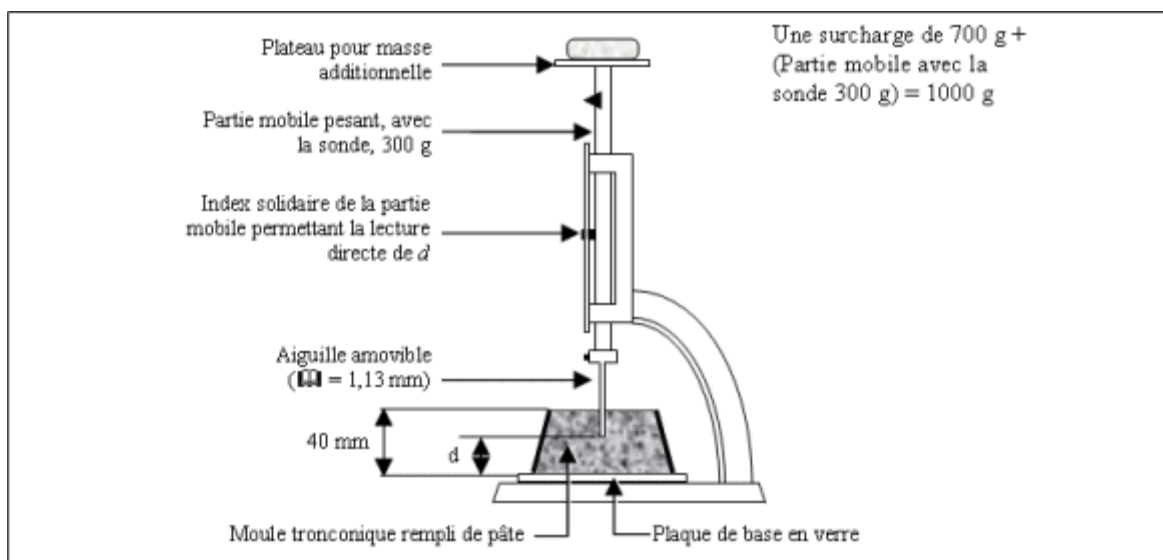
séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base.

Un mélange (ou pâte) est considéré de consistance normale si  $d = 6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$

1Si  $d > 7 \text{ mm}$ , on considère qu'il n'y a pas assez d'eau et à l'inverse si  $d < 5 \text{ mm}$ , on considère



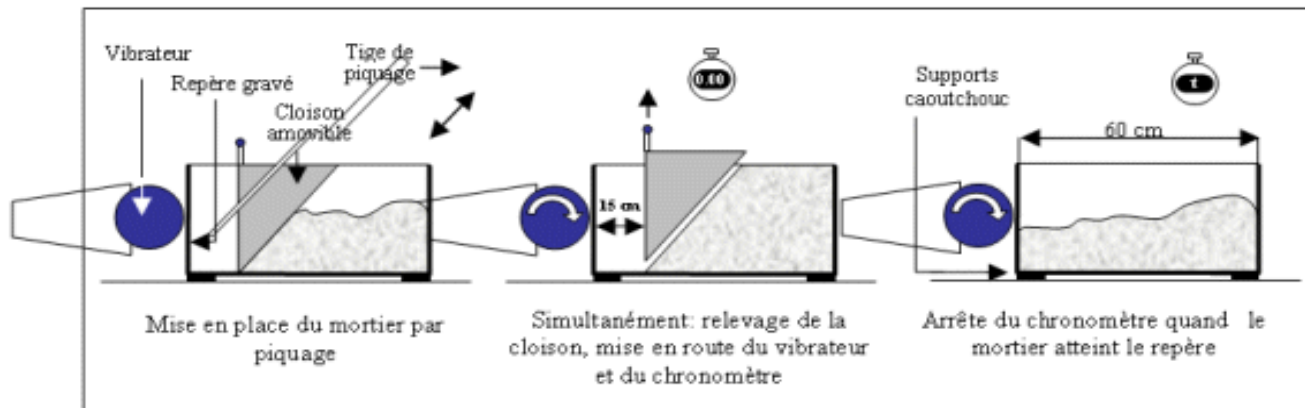
qu'il y a excès d'eau.



**Figure II.9 : Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge**

### II.5.5. Essais de maniabilité : (consistance de mortier)

Il est constitué d'un moule parallélépipédique comportant une paroi mobile et un vibreur. Le principe de l'essai consiste, après avoir enlevé la paroi mobile, à mesurer le temps mis par le mortier sous vibrations pour atteindre un repère gravé sur la face intérieure du moule.



### Principe de fonctionnement du maniabilimètre

#### L'appareil utilisé :

L'appareil utilisé est appelé maniabilimètre LCL, et aussi illustré consiste en un boîtier parallélépipédique métallique ( $7.5\text{cm} \times 7.5\text{cm} \times 15\text{cm}$ ), posé sur des supports en caoutchouc, équipé d'un vibreur et muni d'une cloison amovible.



Figure II.10 : Maniabilimètre de mortier.

**Conduite de l'essai :**

Le mortier est introduit dans la partie la plus grande délimitée par la cloison et mis en place par piquage en quatre couches.

Quatre minutes après la fin du malaxage, la cloison est retirée, provoquant la mise en route du vibreur et le déclenchement d'un chronomètre par l'opérateur.

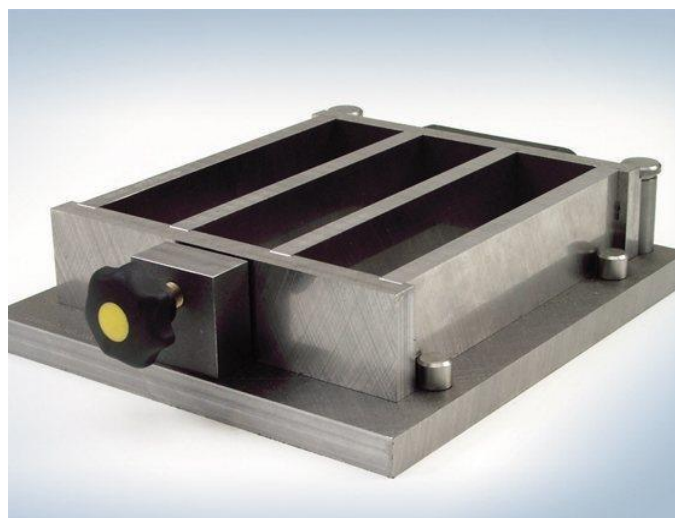
Sous l'effet de la vibration le mortier s'écoule. Le chronomètre est arrêté quand le mortier atteint un trait repère sur la paroi opposée du boîtier.

Classe de consistance	Durée (s)
Ferme	$t \geq 40$
Plastique	$20 < t \leq 30$
Très plastique	$10 < t \leq 20$
Fluide	$t \leq 10$

**Tableau II.6 : Type de mortier selon le temps de maniabilité.**

**II.5.6. Préparation des éprouvettes :**

Les éprouvettes sont de forme prismatique 4cm x 4cm x 16cm. Elles doivent être moulées le plus vite possible après la confection du mortier.



**Figure II.11 : Eprouvette 4x4x16**

---

Le moule métallique à trois alvéoles et sa hausse étant fermement fixés à la table à choc, on introduit la première des deux couches de mortier.

### Mode opératoire :

Le mode opératoire a été réalisé au moyen d'un malaxeur automatique, axe verticale, à trois vitesses et de capacité de cinq (5) litres.

La confection du ciment, poudre de verre et le superplastifiant est comme suite :

- Mettre le malaxeur en marche sur la première vitesse.
  - Verser la quantité d'eau
  - Verser le ciment + poudre de verre.
  - Arrêter le malaxage et racler les cotés
  - Mettre le malaxeur en deuxième vitesse et malaxer pendant 2 minutes
  - Arrêter le malaxage et racler les cotés
  - Reprendre le malaxage à grande vitesse pendant 2 minutes
  - Arrêter et terminer le malaxage
  - Verser le coulis de ciment dans des moules prismatiques (4×4×16) cm<sup>3</sup>.
  - Utiliser la table vibrante (table des chocs) pendant 60 second
  - A la fin d'essai, les moules sont conservés dans les conditions du laboratoire
- 
- (T=28±2°C) durant 48h, on effectue après l'opération de démoulage de 24 éprouvettes, 03 éprouvettes pour chaque variante.



---

**Figure II.12 : préparation des éprouvettes**

Nous mettons les éprouvettes pendant trois jours dans l'eau et de la chaux avant de faire l'écrasement



**Figure II.13 : les éprouvettes dans la chaux**

### **II.5.7. Tests mécaniques :**

L'essai de résistance à la traction par flexion (trois points) et de la résistance en compression

#### **II.5.7.1 Résistance à la traction par flexion :**

Placer le prisme dans le dispositif de flexion avec une face latérale de moulage sur les rouleaux d'appui et son axe longitudinal perpendiculaire à ceux-ci. Appliquer la charge verticalement par le rouleau de chargement sur la face latérale opposée du prisme et l'augmenter de  $50 \text{ N/s} \pm 10 \text{ N/s}$ , jusqu'à rupture.

Conserver les demi-prismes humides jusqu'au moment des essais en compression. La résistance en flexion  $R_f$  (en  $\text{N/mm}^2$ ) est calculée au moyen de la

---

formule :

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

D'où :

- **R<sub>f</sub>** : la résistance en flexion, en newtons par millimètre carré ou en MPa.
- **B** : le côté de la section carrée du prisme, en millimètres.
- **F<sub>f</sub>** : la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newtons.
- **l** : est la distance entre les appuis, en millimètres.

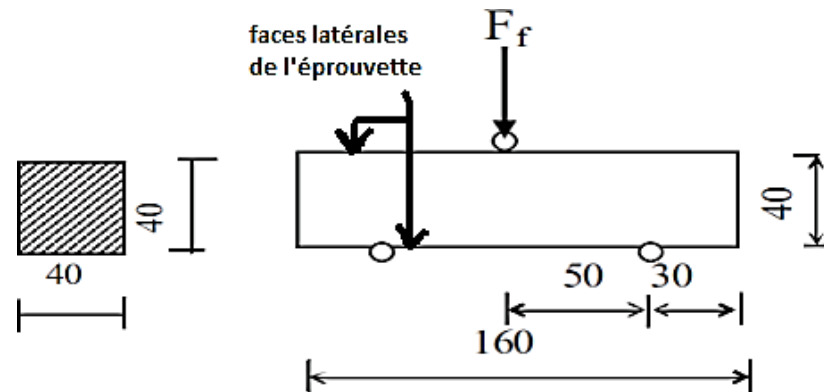


Figure II. 14 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.

### II.5.7.2 Résistance en compression :

Centrer chaque demi-prisme latéralement par rapport aux plateaux de la machine à  $\pm 0.5$  mm près et longitudinalement de façon que le bout du prisme soit en porte-à-faux par rapport aux plateaux d'environ 10 mm

Augmenter la charge avec une vitesse providence durant toute l'application de la charge jusqu'à la rupture (compenser la décroissance de vitesse de la charge à l'approche de la rupture).

La résistance en compression  $R_c$  (en  $N/mm^2$ ) est calculée au moyen de la formule :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2}$$

D'où :

$R_c$  : Résistance en compression (MPa).

$F_c$  : Charge de rupture (N).

$b^2$  : Côte de l'éprouvette est égale à 40mm.

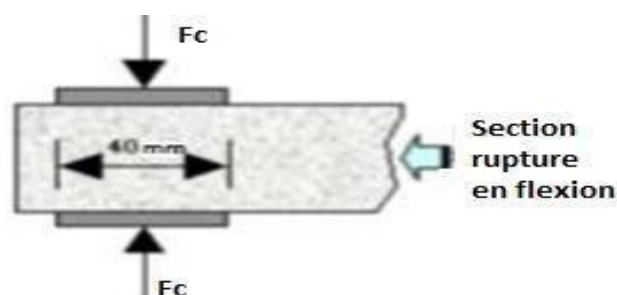






Figure II. 15 : Dispositif pour l'essai de résistance en compression.

### II.5.8. Mesure de l'air occlus dans le mortier :

#### Objectif :

Afin de faciliter la mise en place du ciment et pour augmenter sa durée de vie,

il a été démontré que les caractéristiques mécaniques du ciment étaient optimales lorsqu'il contenait 3 à 4 d'air en volume.

#### Description de l'appareil :

- Une cuve d'un volume de 1 L
- Un couvercle étanche comportant
- Attaches rapides
- Une chambre de pression
- Une pompe à air
- Soupape noire et soupape verte

\* deux vannes

#### Mode opératoire



---

**Mise en place du mortier dans la cuve :**

1/ introduire dans la cuve, en 2 couches, le mortier après la fin du malaxage.

2/ applique 10 coups de tige de compactage à chaque couche.

3/ Araser le mortier au niveau du bord supérieur de la cuve à l'aide d'une règle métallique à face biseautées, avec un mouvement de sciage.

**Exécution de l'essai :**

- Mettre en place le couvercle sur la cuve
- Ouvrir les vannes rouges sur le couvercle
- Par la vanne de gauche, au moyen d'un pissette
- Farmer les 2 vannes
- A l'aide de la pompe à main
- Tapoter légèrement le monomètre et l'aéromètre pour s'assurer que pression ne change pas
- Appuyer sur le bouton poussoir vert quelques secondes
- Le manomètre indique alors directement en pourcentage le volume d'aire occlus dans le mortier
- Noter la valeur de la teneur en air 0.5 %prés.
- Appuyer simultanément sur les touches noires et verte
- Ouvrir les vannes
- Répéter la mesure
- Le pourcentage d'aire retenu est la moyenne arithmétique des lecture effectuées.

**Résultat :**

-nous avons trouvé le pourcentage d'air dans le ciment 22 %.



**Figure II.16 : mesure de la teneur en air du béton**

**II.5.9. Ultra son (testeur de béton) :**

Le Pundit PL-200 est un instrument haut de gamme dédiée à la mesure de la vitesse d'impulsion ultrasonique (UPV) permettant d'examiner la qualité du béton.

Ciment	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
La vitesse	435m/s	445m/s	439m/s	430m/s	414m/s	392m/s	342m/s
/	45.9 $\mu$ S	46.7 $\mu$ S	47.4 $\mu$ S	48.4 $\mu$ S	50.2 $\mu$ S	53.1 $\mu$ S	60.9 $\mu$ S



**Figure II.17 : Ultra son**

---

### II.5.10. Les Essais de chauffage :

Nous mettons les éprouvettes au four pendant deux heures à des températures variables (200 C° ; 400 C° et 600C°).



Figure II.18 : à une température de 600C°

---

## II.11. Conclusion

Afin de pouvoir procéder au dosage correct des différents composants d'une matrice cimentaire d'une part, et d'expliquer les tendances observées dans les résultats, d'autres part, il est indispensable de faire plusieurs types d'identification. Tout en utilisant des essais avec des appareils normalisés pour des résultats satisfaisants.

Nous envisageons dans cette recherche d'établir une base de données expérimentale d'utilisations des différents essais et appareils de laboratoire sous différents modes de conservation et des paramètres de composition pouvant être exploités et complétés visant certaines propriétés des matériaux élaborés.

Nous intéressons dans cette recherche de travailler sur l'interaction des différents composants, et l'influence des additions (l'effet de l'ajout de poudre de verre sur les caractéristiques mécaniques du mortier).

# ***CHAPITRE III***

# RESULTATS ET DISCUSSIONS

## EFFET DE LA TEMPERATURE

### SUR LES CARACTERISTQUES MECANIQUE D'UN CIMENT DE POUDRE DE VERRE

#### III.1. INTRODUCTION :

Nous présentons dans ce chapitre les résultats et l'analyse des essais physiques et mécaniques (Vicat, maniabilité, la résistance à la compression, et la résistance à la traction par flexion) effectués sur les éprouvettes des pates cimentaires.

#### III.2. RESULTATS :

##### III.2.1. Maniabilité :

Dans un premier temps, nous avons pris le temps d'écoulement de pate cimentaire dans la boite de maniabimètre comme un mortier à consistance normal. Les résultats de cet essai seront établis dans le tableau suivant :

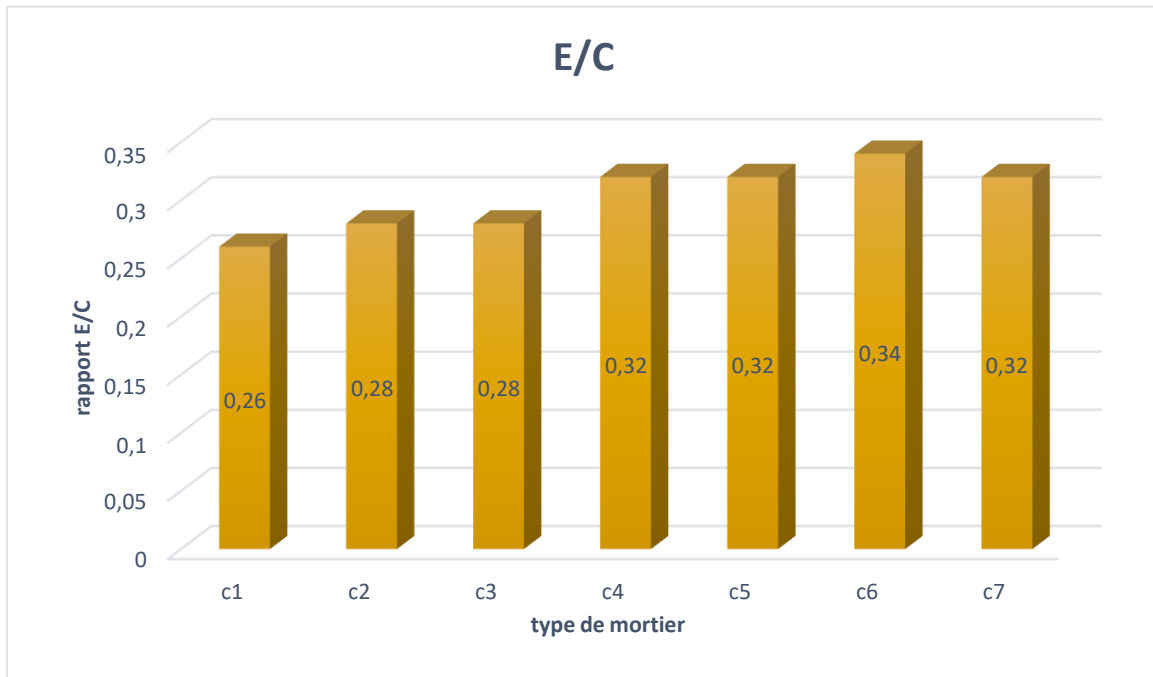
CIMENT	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
TEMP DE écoulement)	9	9	7	6	4	4	3.92

**Tableau III.1 : Résultats d'essais de maniabilité**

Les histogrammes de la figure III.1 représentent la variation de la maniabilité en fonction du pourcentage de clinker et poudre de verre.

La figure III.1 montre que le pourcentage d'eau dans les pattes qui contient 10% et 35% était plus grand, par rapport aux mortiers ou pates qui contiennent 25% et 30% de poudre de verre

En outre le pourcentage a continué à diminuer dans les mortiers contenant 20% de poudre de verre. Ce qui laisse dire que la poudre de verre N'absorbe pas de l'eau.



**Figure III.1 : Maniabilité de pate cimentaire**

### III.2.2. Résistance à la flexion :

Le tableau suivant représente les résultats de cet essai :

Après deux jours :

Ciment	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Témoin
La contrainte (MPa)	1.302	1.252	1.205	1.2	1.204	1.253	1.201	1.241
La force (KN)	2.083	2.003	1.928	1.919	1.927	2.005	1.921	1.986

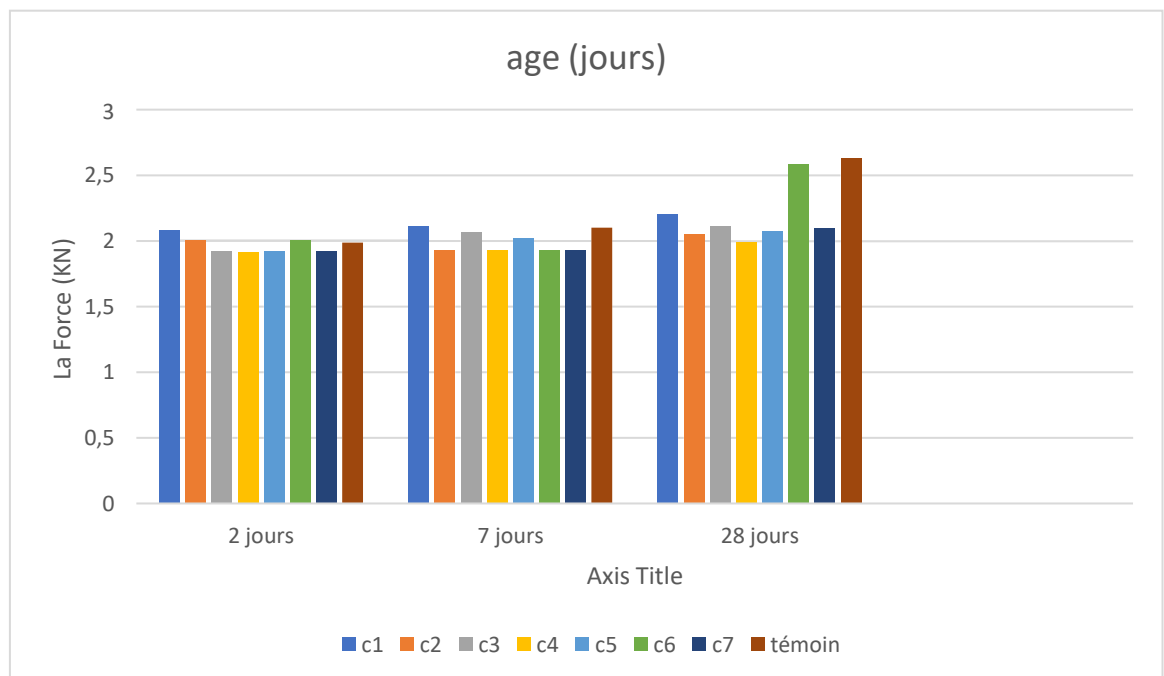


**Après 7 jours :**

Ciment	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Témoin
La contrainte (MPa)	1.321	1.206	1.291	1.206	1.264	1.206	1.206	1.314
La force (KN)	2.113	1.930	2.065	1.930	2.023	1.929	1.929	2.102

**Après 28 jours :**

Ciment	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Témoin
La force (KN)	2.202	2.055	2.117	1.995	2.076	2.088	2.090	2.635
La contrainte (MPa)	1.425	1.634	1.291	1.634	1.308	1.355	1.355	1.367



**Figure III.2 : Évolution de la résistance en flexion dans le temps**

**Remarque :**

A travers la courbe des graphiques, on remarque une augmentation de la résistance en fonction de nombre de jours de de développements dans les essais de flexion.



**Figure III.3 : essai de flexion**

### III.2.3. Résistance à La compression :

**Après deux jours :**

Ciment	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Témoin
La contrainte (MPA)	24.733	18.138	34.774	27.387	39.133	35.741	33.699	28.301
La force (KN)	39.573	29.02	55.638	43.82	62.613	57.185	53.919	45.281

**Après 7 jours :**

Ciment	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Témoin
La contrainte (MPA)	52.788	33.259	26.025	26.376	29.395	31.234	26.675	24.866
La force (KN)	84.461	53.214	41.640	42.220	46.675	49.975	42.680	39.817

### Après 28 jours :

Ciment	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Témoin
La force (KN)	91.433	77.158	93.388	90.979	86.935	77.781	88.786	83.855
La contrainte (MPa)	57.146	48.224	58.368	56.862	54.335	48.613	55.491	52.409

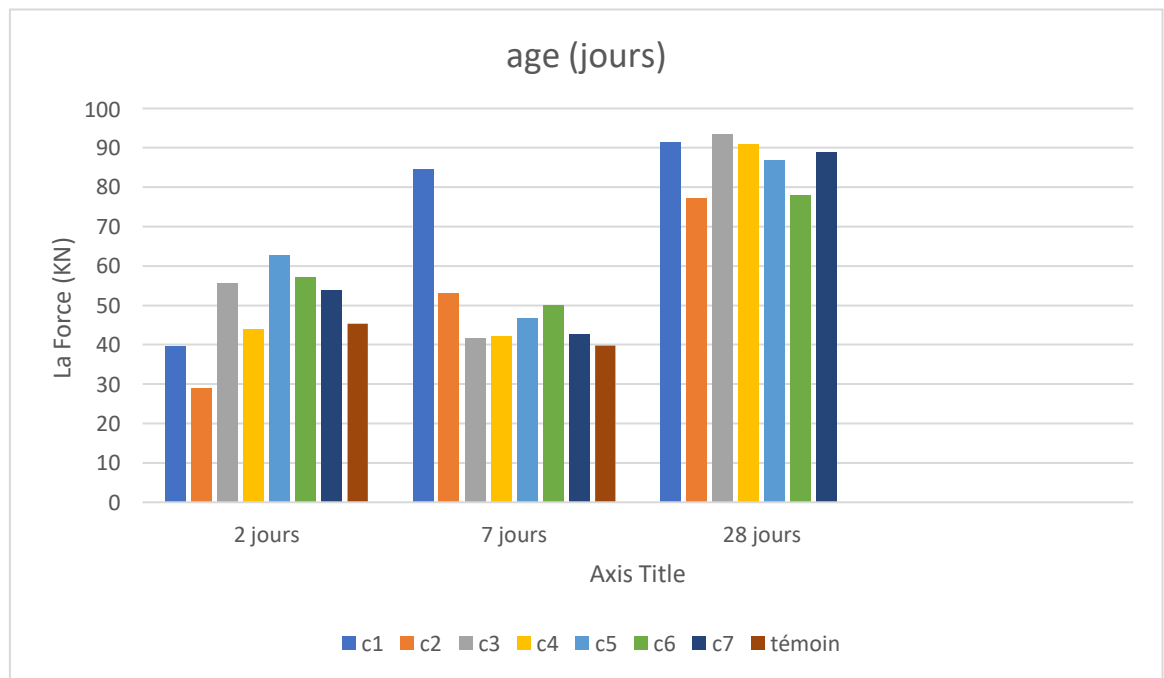


Figure III.4 : Évolution de la résistance en compression dans le temps

### Remarque :

On note que les évolutions de la résistance en termes de jours (une relation positive).

### III.3. Essai de chauffage :

On met les éprouvettes au four à différentes températures : 200c°-400c°-600C°

Nous avons alors appliqué la flexion et la compression sur les éprouvettes

## A température 200c° :

### La flexion :

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Témoin
La force	1.933kn	1.998kn	1.933kn	2.027kn	1.925kn	1.926kn	1.999kn	2.029kn
La contrainte	1.208mpa	1.186mpa	1.208mpa	1.267mpa	1.203mpa	1.204mpa	1.249mpa	1.268mpa

### La compression :

-pour chaque éprouvette nous avons faite deux essais pour la compression et enregistré la valeur la plus élevée

Ciment	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Témoin
La force	51.976kn	51.744kn	46.708kn	53.261kn	53.864kn	45.404kn	49.202kn	38.505kn
La contrainte	32.485mpa	32.44mpa	29.192mpa	33.288mpa	33.665mpa	28.377mpa	30.751mpa	24.066mpa

## A température 400 c° :

On met les éprouvettes dans une étuve à une température de 400c° pendant deux heures puis on laisse refroidir progressivement.

### La flexion :

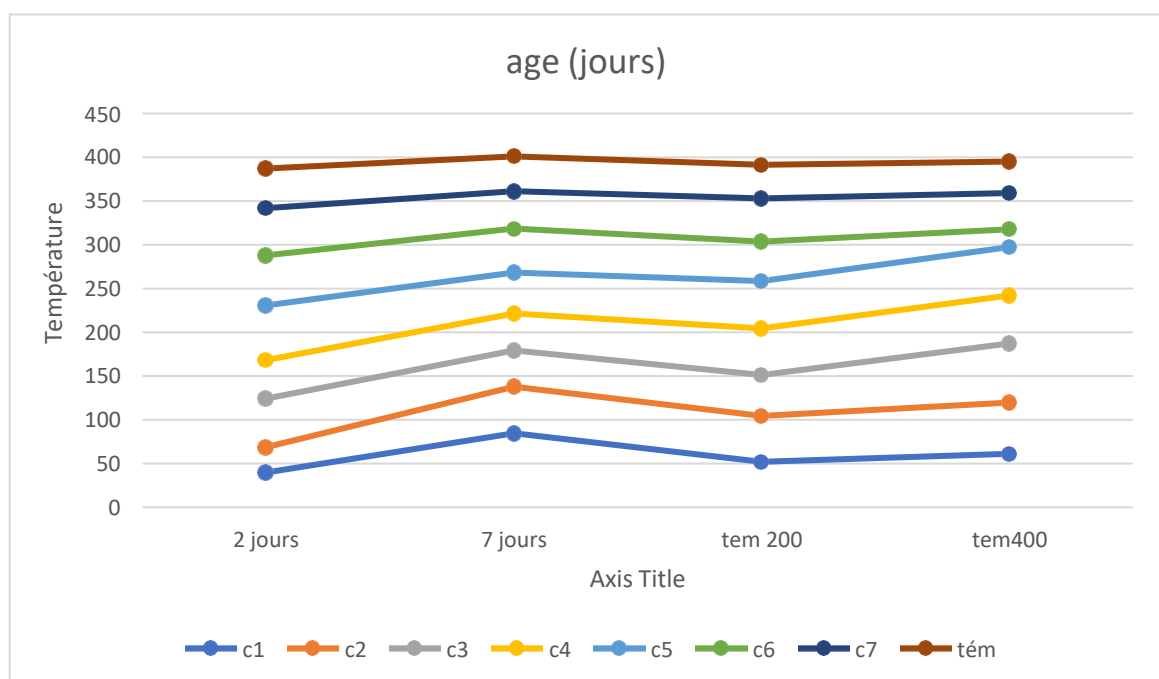
Ciment	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
La force	0.002kn	0.02kn	0.012kn	0.003kn	0.039kn	0.003kn	0.023kn
La contrainte	0mpa	0mpa	0mpa	0mpa	0mpa	0mpa	0mpa

## La compression :

Ciment	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
La force (KN)	60.798	58.780	67.558	54.799	55.398	20.646	41.413
La contraint (MPA)	37.899	36.737	42.224	34.249	34.624	12.903	25.833

### A température 600 c° :

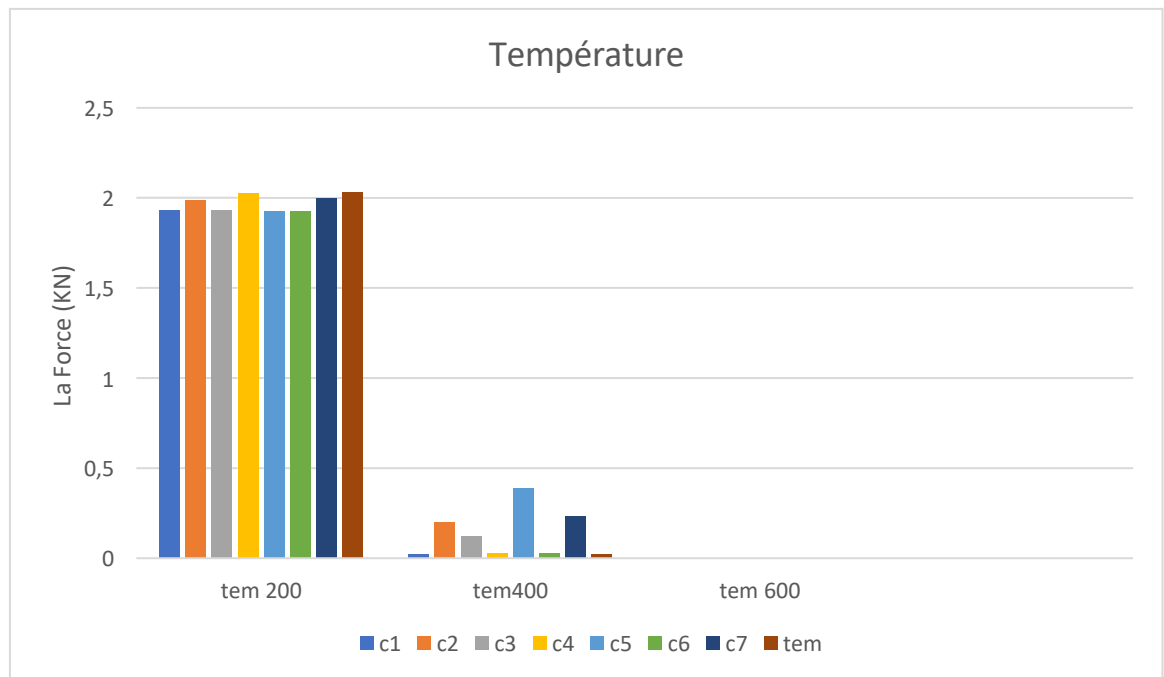
-en plaçant les éprouvettes dans un four à une température de 600c° on remarque des fissures apparaissant dans les éprouvettes et sans faire essai de flexion et compression.



**Figure III.5 : Évolution de la résistance en compression dans le temps et l'effet de la température En fonction des dosages de la Pate cimentaire.**

### Remarque :

On remarque l'effet de la température sur la résistance surtout lorsqu'elle atteint une température de 600 C°, ou apparaissent des fissures qui nous empêchent de faire l'essai de flexion.



**Figure III.6 : Évolution de la résistance en flexion dans le temps et l’effet de la température En fonction des dosages de la Pate cimentaire.**

### **III.4. DISCUSSIONS :**

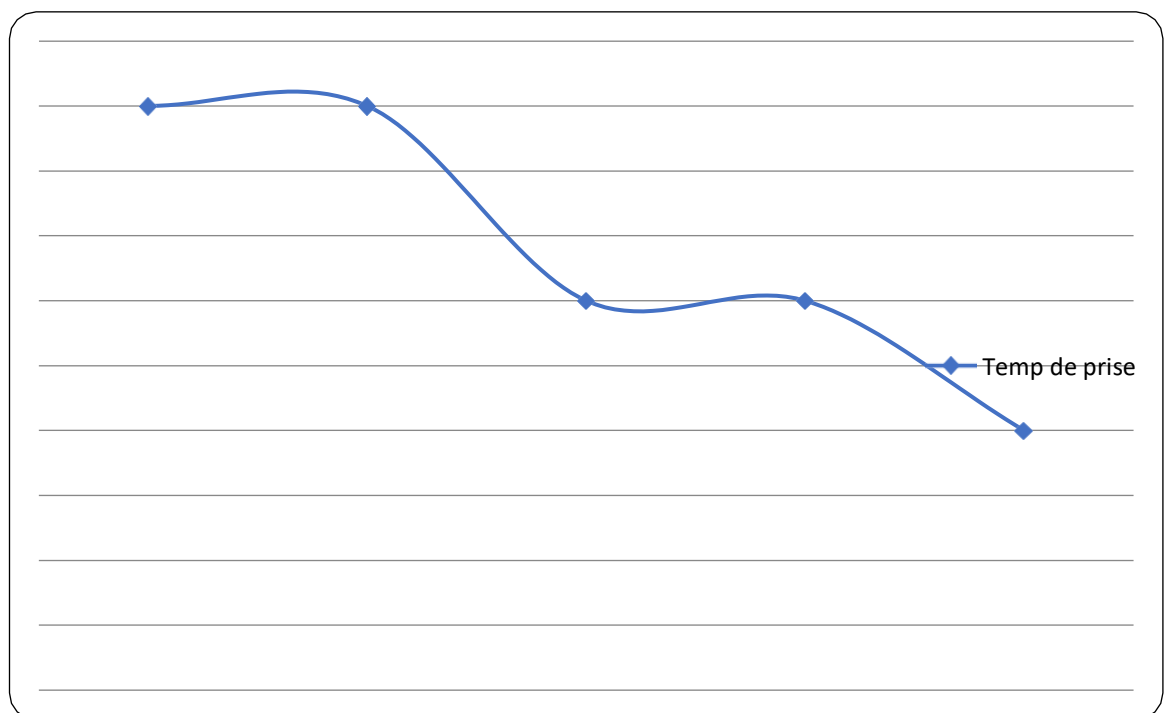
#### **III.4.1. Effet du dosage en poudre de verre sur l’évolution du temps de prise et la consistance :**

Les résultats de la figure III.7 représentent les temps de début et fin de prise ainsi que la consistance de nos pates pour les cinq dosages de poudre de verre et clinker (figure III.5). Chaque condition expérimentale a été testée en triplicatas. Les résultats présentés sont les valeurs moyennes obtenues pour chaque condition des dosages des pates. (Tableau III.4)

	E/C	Début de prise (min)	Fin de prise (min)
<b>C1</b>	0,26	68	240
<b>C2</b>	0,28	200	270
<b>C3</b>	0,28	180	260
<b>C4</b>	0,32	190	240
<b>C5</b>	0,32	150	230
<b>C6</b>	0,34	200	270
<b>C7</b>	0,32	180	250

**Tableau III.4 : Résultat d'essai de Vicat**

Les résultats de suivi de prise illustrés à la figure III.4 montrent que l'ajout de poudre de verre affecte légèrement les temps de prise puisqu'un écart pas important de 30% est enregistré entre la pâte témoin sans PV (pates des anciens recherches) et celle dont des % des poudres de verre et clinker qui sont ajouter à la Pâte cimentaire.



**Figure III.7 : Résultats d'essai de maniabilité.**

**Remarque :** En revanche, on observe que la consistance diminue avec le dosage en poudre de verre substituée au ciment. Cette observation pourrait présenter un intérêt pratique en cas de bétonnage par temps chaud.

### III.5. Le milieu chimique :

Nous avons fait une série d'expérience sur le mortier ou nous avons met l'éprouvette dans un groupe de solutions et nous avons constaté une perte de masse après plusieurs jours de placement des échantillons dans la solution chimique.

Les solutions :H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ; HCL ; NAOH

**H<sub>2</sub>so<sub>4</sub> :**

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Tém
La masse	552.28g	562.74g	548.97g	516.71g	546.93g	556.97g	566.77g	561.77g
Après 7jour	541.98g	527.88g	529.63g	504.98g	535.11g	543.06g	552.86g	551.22g
Après de 14 jour	490g	515.1g	516.2g	491.9g	523g	517.8	547.9g	540.9g

**Tableau III.3 : de perte de masse H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>**

**Résultat :** à cette expérience nous avons conclu plus la durée de l'échantillon dans une solution chimique est longue, plus l'apparition de corrosion à son borde et diminution de la masse de l'échantillon sont importantes





### Figure III.8 : perte de masse H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

#### Hydroxyde de sodium : NaOH

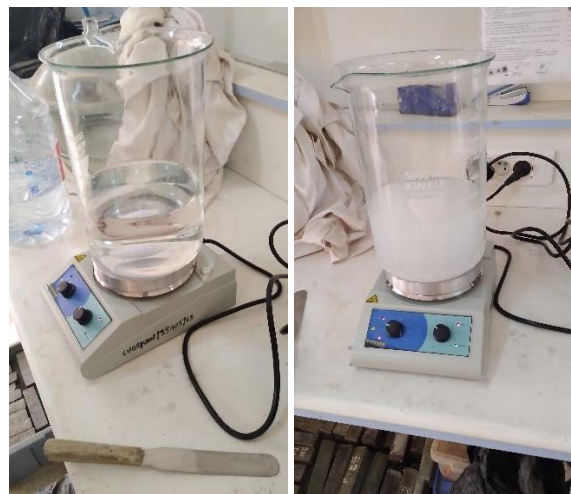
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Témoin
La masse	577.62g	575.30g	571.46g	516.70g	579.30g	567.03g	533.45g	590.53g
Après 7jour	583.30g	589.08g	581.46g	527.23g	583.41g	586.79g	556.33g	593.30g
Après 14 jour	582.6g	588.4g	580.6g	526.8g	583.4g	586.4g	555.9g	593.3

**Tableau III.4 : de perte de masse hydroxyde de sodium**

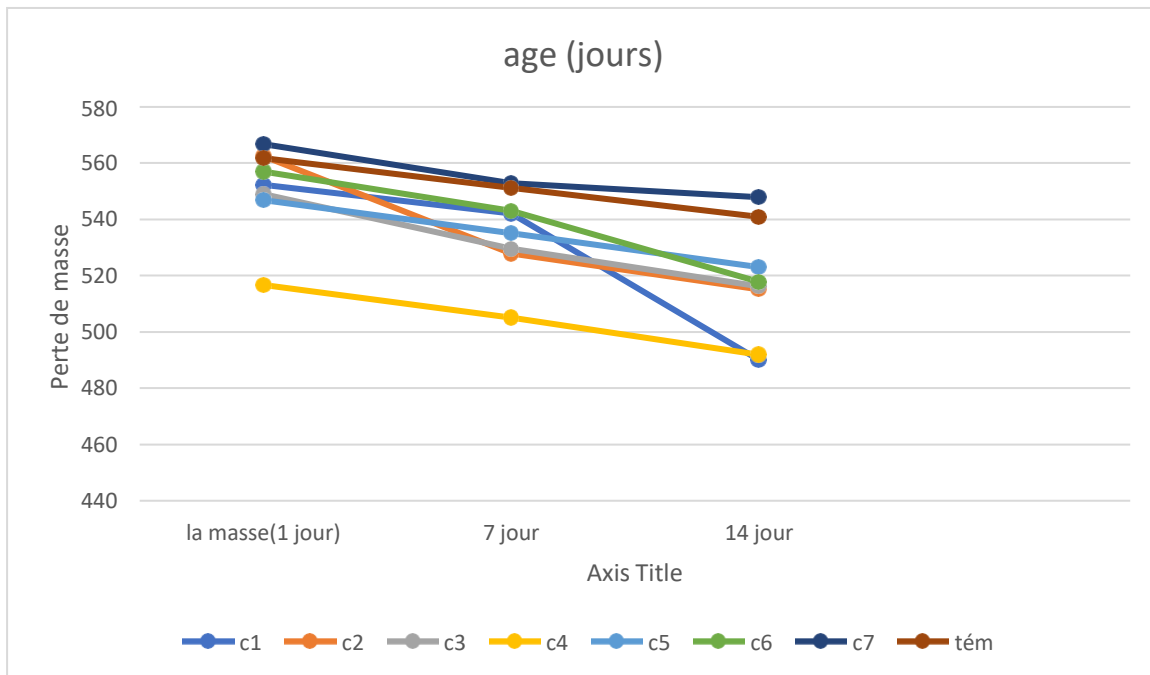
#### Acide hydrochlorique : HCL

Ciment	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Témoin
La masse	591g	570.14g	575.50g	544.83g	555.15g	568.14g	557.43g	592.97
Après 7jour	592.68g	571.66g	577.56g	546.65g	555.91g	569.09g	558.38g	593.13g
Après 14jour	591.4g	570.1g	576.2g	545.7g	554.6g	567.7g	556.8g	593g

**Tableau III.5 : perte de masse pour acide hydrochlorique**



**Figure III.9 : Préparation des produits chimiques**



**Figure III .10 : diagramme perte de masse pour H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>**

**Remarque :**

On remarque une perte de masse lors de la mise en place des échantillons dans des solutions chimiques, en particulier la solution  $H_2SO_4$ , ce qui a fortement affecté la masse.



**Perte de masse  $H_2SO_4$**



**perte de masse HCL**



**Perte de masse HCL**



**Perte de masse NaOH**

### III.6. CONCLUSION :

L'objectif général de ce travail était d'évaluer l'effet de la substitution de ciment par la poudre de verre (PV) sur la résistance mécanique des mortiers à base de clinker. L'intérêt de l'approche est de permettre le recyclage du verre, et de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Il a ainsi été rapporté que la substitution de 20 % de ciment par de la poudre de verre réduit de 18 % les émissions de CO<sub>2</sub> .

La poudre de verre, tout comme d'autres ajouts cimentaires classiques, modifie la cinétique de développement de la résistance à la compression des bétons. Elle entraîne ainsi un développement lent de la résistance, qui à 28 jours est plus faible que celle des témoins sans PV. Cette observation peut s'expliquer par les modifications de l'hydratation de la matrice induites par la substitution de ciment par la PV qui absorbe moins d'eau que le ciment.

La résistance à la flexion est quant à elle améliorée à 28 jours de prise. La poudre de verre exerce donc un effet physique et chimique (réaction pouzzolanique et alcali-silice).

La valorisation de poudre de verre comme substitut partiel au ciment dans les mortiers d'usage courant semble réalisable. Des travaux complémentaires restent toutefois nécessaires pour conforter ces résultats.



# *Conclusion générale*

### *Conclusion générale*

La nature difficilement dégradable des déchets de verre, fait de ces déchets un défi pour tous les pays du monde en raison des difficultés de gestion de ce type de déchet. Cependant, les industries du verre et du ciment ont d'énormes défis de nos jours : le recours à l'exploitation excessive des ressources naturelles, une consommation élevée de l'énergie et les émissions de gaz à effet de serre qui sont parmi les causes des changements climatiques.

Le renforcement des matériaux de construction, particulièrement, les sols glissants par les coulis de ciment par projection ou injection est une technique intéressante dans le but d'améliorer leurs caractéristiques physicomécaniques.

Le but de ce travail est l'étude de l'effet d'ajout des déchets de verre, sous forme de poudre à des taux (10 % à 35 %) avec une granulométrie inférieure à 80  $\mu\text{m}$ , sur les propriétés physicomécaniques des coulis de ciment.

Les résultats obtenus au cours de ce travail mènent aux conclusions suivantes :

- 1) L'utilisation des déchets de verre dans l'industrie de la construction peut offrir une solution respectueuse de l'environnement pour ces déchets, et participer effectivement à la gestion de ce type de déchet.
- 2) Une amélioration des propriétés rhéologiques des coulis de ciment, à démontrer en augmentant le taux de dosage de superplastifiant.
- 3) Les résistances à la compression et par conséquent, des coulis de ciment confectionnés avec la poudre de verre donnent des valeurs satisfaisantes, en les comparant avec les valeurs de résistance préconisées par les organismes de contrôle technique des structures.

Les matériaux de base utilisés sont :

- ✓ Le clinker.
- ✓ Gypse.
- ✓ La poudre de verre (PV).
- ✓ Sable normalisé 0/5.
- ✓ L'eau.

Les essais effectués sur les constituants sont :

## Conclusion générale

- ✓ Mesure de La finesse de ciment
- ✓ Mesure de la masse volumique absolue de ciment
- ✓ Mesure de l'expansion de ciment.

Les essais effectués sur mortier sont :

- ✓ Essai de consistance par l'appareil de vicat.
- ✓ Essai de maniabilité.
- ✓ Résistance en compression par flexion des mortiers.

L'étude des différentes phases du sujet a permis d'aboutir aux conclusions suivantes

L'ajout de poudre de verre a donné des résultants acceptables, essentiellement la composition contenant de 15 % de poudre de verre amélioré la maniabilité et la résistance mécanique. La résistance à la compression des mortiers obtenus sont proche de celle de mortiers témoin avec une diminution de la masse volumique ce qui montre que l'utilisation de verre comme filler est possible à condition de trouve une solution au problème de stabilité.

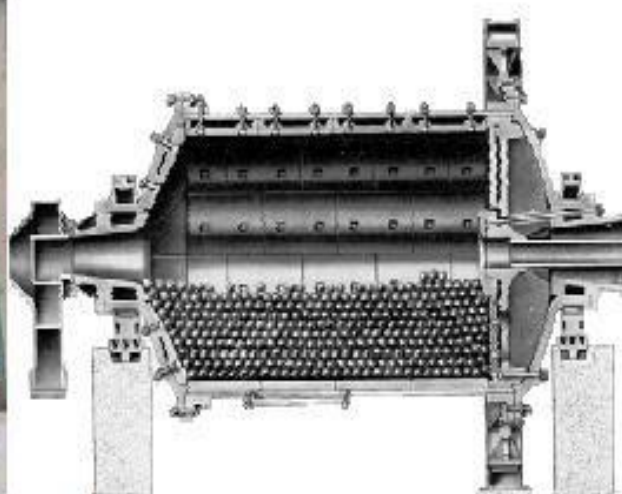
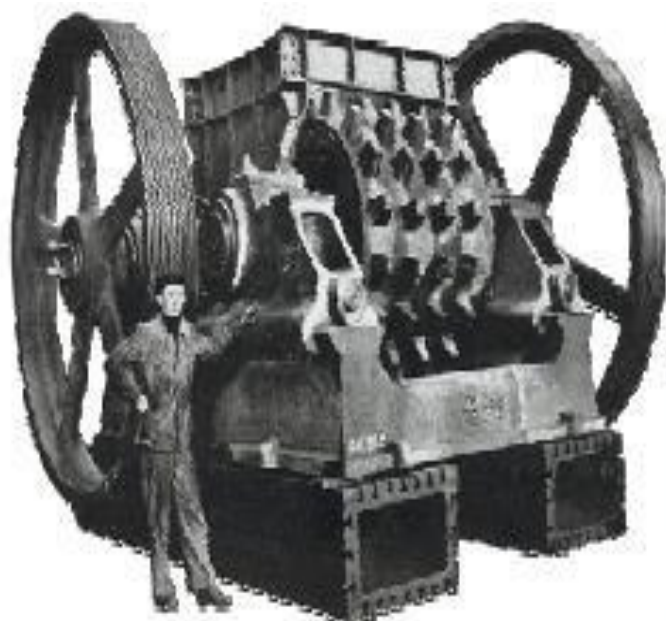
L'ajout de sable normalisé donne des résultants acceptables cet ajout conduit à l'amélioration de maniabilité et la résistance mécanique aussi.

L'utilisation des déchets dans la fabrication de ciment peut donner un autre type de ciment de caractéristiques différentes ce qui influe à la matrice cimentaire et la durabilité des ouvrages.



# ***ANNEXES***

## CONCASSEUR CYLINDRE



## ANNEXE I.2 : BROYEUR

**Notice produit**  
Edition Août 2016  
Numéro 1.23  
Version n° 108.2016  
SIKA® VISCOCRETE® 665

## SIKA® VISCOCRETE® 665

Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi.

Conforme à la norme NF EN 934-2 Tab 3.1 et 3.2.

<b>Présentation</b>	Le Sika Viscocrete 665 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique. Le Sika Viscocrete 665 est compatible avec tous les ciments même avec un taux C3A faible.
<b>Domaines d'application</b>	Le Sika Viscocrete 665 permet la fabrication : <ul style="list-style-type: none"> <li>■ de bétons plastiques à autoplaçants transportés sur de longues distances et pompés.</li> <li>■ de bétons à longs maintiens de rhéologie (&gt;2h30), sans reprise de fluidité dans le temps.</li> </ul>
<b>Caractères généraux</b>	Le Sika Viscocrete 665 est un superplastifiant qui confère aux bétons les propriétés suivantes : <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Longue rhéologie (&gt;2h30)</li> <li>■ Evolution rapide des résistances à court et à long terme</li> <li>■ Réduction de la viscosité</li> <li>■ Amélioration de la stabilité du béton frais et limitation de la ségrégation avec des granulats concassés</li> <li>■ Pas de reprise de fluidité dans le temps</li> <li>■ Qualité de parement</li> </ul>
<b>Agréments, essais de laboratoire</b>	PV CNERIB : DTEM : 396/2016.
<b>Caractéristiques</b>	
<b>Aspect</b>	Liquide marron
<b>Conditionnement</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Fût de 200 Kg</li> <li>■ Conteneur perdu de 1000 Kg</li> <li>■ Vrac</li> </ul>
<b>Stockage</b>	A l'abri du gel. En cas de gel accidentel, le produit retrouve ses qualités d'origine une fois dégelé lentement et réhomogénéisé.
<b>Conservation</b>	12 mois dans son emballage d'origine intact



<b>Données techniques</b>	
densité	1,085 ± 0,015
pH	5 ± 1,0
Teneur en Na <sub>2</sub> O Eq.	≤ 1,0%
Extrait sec	33,0 ± 1,1% (méthode halogène selon NF 085)
Teneur en ions Cl <sup>-</sup>	≤ 0,1%
<b>Conditions d'application</b>	
Dosage	Plage de dosage : 0,4 à 2% du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées.
Mise en œuvre	Le Sika Viscocrete 665 est ajouté, soit en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.
Précautions d'emploi	En cas de contact avec la peau, laver abondamment à l'eau. Consulter la fiche de données de sécurité accessible sur Internet.
Mentions légales	Produit réservé à un usage strictement professionnel Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile. «Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la notice correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»



Sika El Djazair  
08 route de l'Arbaa, 16111 Eucalyptus  
Alger/ ALGERIE  
Web : dza.sika.com

Tel.: 213 (0) 21 50 21 84  
213 (0) 21 50 16 92 à 95  
Fax: 213 (0) 21 50 22 08





المجمع الصناعي لإسمنت الجزائر  
GICA  
Groupe Industriel des Ciments d'Algérie  
SCIBS

QUALITE
PRIX
DISPONIBILITE

## FICHE TECHNIQUE CLINKER

%	Si2O3	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	C3S	C2S	C3A	C4AF	CaOL
MIN	21,10	5,05	3,30	65,50	0,90	58,00	12,00	7,50	9,50	0,30
MOY	21,62	5,27	3,40	66,00	1,00	60,00	16,00	8,25	10,50	0,90
MAX	22,15	5,50	3,50	66,50	1,10	62,00	20,00	9,00	11,50	1,50



■ MIN ■ MOY ■ MAX

**NB:** La composition minéralogique du clinker est calculée selon la formule de BOGUE.

Type conditionnement :

- VRAC
- BIG BAG

**NB:** Les données que comporte cette fiche sont fournies à titre indicatif. La présente fiche se veut un outil d'information à portée générale seulement et ne doit pas être considérée comme la fiche technique du mois en cours ni du stock existant. Vous êtes prié de demander conseil auprès de la direction commerciale qui prendrait en compte les données techniques nouvelles et de ne pas vous fier uniquement aux données de la présente fiche d'information. \* Certains changements peuvent éventuellement se produire sans préavis.

### **ANNEXE II.1 : FICHE TECHNIQUE DE CLINKER**

***REFERENCES***

***BIBLIOGRAPHIQUES***



### *Références bibliographiques*

- [1] Benhamou, 1994, « Comportement rhéologique des coulis de liants hydrauliques ultrafins destinée à l'injection », Thèse de doctorat en géologie de L'Ingénieur. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 332 p.
- [2] B. Emad, Z. Gholamreza, S. Ezzatollah et B. Alireza, 2013. «Global strategies and potentials to curb CO<sub>2</sub> emissions in cement industry», Journal of Cleaner Production, pages: 142-161.
- [3] SALHI KAMEL, 2007. « Etude de l'influence de l'ajout du sable de dune et le laitier granulé finement broyés au ciment sur la stabilité de béton », thèse de magister, Université de Biskra, pages : 5-10.
- [4] DE LARRARD, F, 2000. Structures granulaires et formulation des bétons. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, pages : 30-208.
- [5] PARADAKIS M., VENUAT M., –Industries de la chaux du ciment leurs et de plâtre – Paris : DUNOD Paris, 1970. -257 p
- [6] IFIPS. Le béton. (Pages consultées le 03 juin 2012). Accueil, [en ligne].  
<http://lebeton.free.fr/ciment.html>
- [7] La fabrication du ciment courant. (Pages consultées le 03 juin 2012). Accueil, [en ligne].  
[http://www.lerm.fr/lerm/Newsletter/Newsletter14/lerm\\_Newsletter14\\_fabrication.html](http://www.lerm.fr/lerm/Newsletter/Newsletter14/lerm_Newsletter14_fabrication.html)
- [8] BERGER S., -Etude des potentialités des ciments sulfo-alumineux bélitiques pour le conditionnement du zinc De l'hydratation à la durabilité : thèse. Lille : L'UNIVERSITE LILLE 1 SCIENCES ET TECHNOLOGIES, 2009
- [9] MICHEL M., -Accélération de ciment au laitier par du ciment sulfo-alumineux : thèse. - Lyon : L'institut National des sciences Appliqués de Lyon, 2009
- [10] Yahya Jani, William Hogland, 2014. Waste glass in the production of cement and concrete – A review, Journal of Environmental Chemical Engineering
- [11] **Khazaz Adel** ; valorisation des déchets de verre dans le domaine de matériaux de construction ; 2018 pages 7
- [12] Source de l'image : recyclage et valorisation du verre : [www.idverre.net](http://www.idverre.net)
- [13] **Brahim DJEMACI**, la gestion des déchets en Algérie : analyse prospective et élément d'efficacité, thèse de doctorat, université de Rouen, 2011
- [14] Cours en ligne : Matériaux De construction. Chapitre 2 : les ciments. (Pages consultées le

## Références bibliographiques

- 03 juin 2012). Accueil, [en ligne].[http://www.la.refer.org/materiaux/chapitre\\_deux\\_deux.html](http://www.la.refer.org/materiaux/chapitre_deux_deux.html)
- [15] KURYATNYK T., -Insensibilisation à l'eau des mélanges à base de sulfate de calcium par ajout de clinker sulfo-alumineux : thèse. Lyon : L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2007
- [16] Irvin Allen Chen, B.S. -Synthesis of Portland Cement and Calcium Sulfate-Belite Cement for Sustainable Development and Performance: these. - Austin The University of Texas at Austin, 2009
- [17] Ciment. Partie 1 : Composition, spécification et critères de conformité des ciments courants, Septembre 2011 : norme NF EN 197-1 (2012-04). - 36p.
- [18] Méthodes d'essais des ciments. Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques : norme NF EN 196-1 (2006-04).- 29p.
- [19] Méthodes d'essais des ciments. Partie 2 : Analyse chimique des ciments : norme NF EN 196-2 (2006-04).- 46p.
- [20] Méthodes d'essais des ciments. Partie 3 : Détermination du temps de prise et de la stabilité : norme NF EN 196-3+A1 (2009-01).- 13p.
- [21] Méthodes d'essais des ciments. Partie 5 : Essai de pouzzolanité des ciments pouzzolaniques : norme NF EN 196-5 (2006-04).- 11p.
- [22] Matière première pour la fabrication du verre sur site [www.univerre.fr](http://www.univerre.fr) consulté 4 /2018
- [23] **Khazaz Adel** ; valorisation des déchets de verre dans le domaine de matériaux de construction ;2018
- [24] Matière première pour la fabrication du verre sur site [www.univerre.fr](http://www.univerre.fr) consulté 4/2018
- [25] **Khazaz Adel** ; valorisation des déchets de verre dans le domaine de matériaux de construction ;2018. Page 14-15.
- [26] Ali A. Ali Abdo, M. Abd El Moty, Ahmed Y. Aboshama, 2016. Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete, construction and Building Materials, 124 p.