



Mémoire de Fin d'Etudes

Présenté au

Département : Génie Civil
Domaine : Sciences et Techniques
Filière : Génie Civil
Spécialité : Géotechnique et matériaux

Réalisé par

NARA YUCEF
GUENCHOUBA DJAMEL EDDINE
Pour l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

Intitulé

Etude de l'effet de la finesse de la poudre de verre sur les caractéristiques physique et mécanique des mortiers.

Soutenu le : 02/07/2017
Devant le jury de soutenance composé de :

MM : BRAHIMI MOHAMED	MCA	Univ. Djelfa	Président
ELBAHI B SEDDIK.	MAA	Univ. Djelfa	Encadreur
ELBAHI BACHIR.	MCB.	Univ. Djelfa	Co-encadreur
DIF FODHIL	MAA	Univ. Djelfa	Examineur

REMERCIEMENTS

La présente étude a été réalisée au sein du département de Génie Civil de l'Université « ziane Achour » de Djelfa.

Nous voulons remercier :

Monsieur **Elbahi B Seddik**, qui a encadré ce travail, pour sa disponibilité, pour son écoute, pour ses grandes qualités pédagogiques, ainsi que pour sa rigueur scientifique, qu'il a su me communiquer pour mener au mieux ce travail de mémoire.

Monsieur le Maître de conférences, de m'avoir fait l'honneur de présider
Notre jury de soutenance.

Nous remercions également responsable du Laboratoire de Génie Civil de l'université de ziane Achour de Djelfa et Tous le personnel du laboratoire de LNHC

Nous voulons exprimer toute ma gratitude à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

DEDICACE

C'est avec profonde gratitude et sincères mots,
nous dédions ce modeste travail de fin d'étude à
nos chers parents ; qui ont sacrifié leur vie pour
notre réussite et nous ont éclairé le chemin par
leurs conseils judicieux. Nous espérons qu'un jour,
nous pourrons leurs rendre un peu de ce qu'ils ont
fait pour nous, que dieu leur prête bonheur et
longue vie.

Nous dédions aussi ce travail à nos frères et
soeurs, nos amis et à tous ceux qui nous sont

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES	I
LISTE DES TABLEAUX	III
RESUME	IV
INTRODUCTION GENERALE	VII
Chapitre I : Le ciment et les ajouts minéraux	
I.1.INTRODUCTION	1
I.2.LE CIMENT PORTLAND	1
I.2.1.LES CONSTITUANTS DU CIMENT PORTLAND	1
I.2.2.HYDRATATION DU CIMENT PORTLAND :	2
I.2.3.COMPOSITION DU CIMENT	2
I.2.3.1.COMPOSITION CHIMIQUE ET MINERALOGIQUE DU CIMENT	2
I.3.DEFINITION DES AJOUTS MINERAUX	4
I.3.1.CLASSIFICATION DES ADDITIONS	4
I.3.2.NORMALISATION DES ADDITIONS	4
I.3.3.IMPORTANCE DES ADDITIONS DANS L'INDUSTRIE CIMENTIERE	4
I.3.4.FONCTION DES ADDITIONS	5
I.3.5.NOTION DE LIANT EQUIVALENT	5
I.3.6.CARACTERISATION DE L'ACTIVITE D'UNE ADDITION MINERALE	5
I.4.DEFINITION DES AJOUTS CHIMIQUES	5
I.4.1.LES PROPRIETES DES PRINCIPALES PHASES HYDRATEES	6
I.4.1.1.LA PORTLANDITE $Ca(OH)_2$	6
I.4.1.2.LES SILICATES DE CALCIUM HYDRATES (C-S-H)	6
I.4.1.3.LES ALUMINATES DE CALCIUM	7
I.4.1.4.L'ETTRINGITE	7
I.4.2.HYDRATATION DES MATERIAUX A BASE DU CIMENT CEM I	7
I.4.2.1.HYDRATATION DES SILICATES DE CALCIUM	7
I.4.2.2.HYDRATATION DES ALUMINATES	8
I.5.LES AJOUTS MINERAUX CIMENTAIRES	8
I.5.1.GENERALITES	8
I.5.1.1.AVANTAGES TECHNIQUES	8
I.5.1.2.AVANTAGES ECONOMIQUES	8
I.5.1.3.AVANTAGES ECOLOGIQUES	8
I.6.LE BROYAGE	8
I.6.1.GENERALITES	8
I.6.2.BROYABILITE DU CLINKER	8
I.6.3.BROYABILITE DES AJOUTS MINERAUX	9
I.6.3.1.BENEFICES FONCTIONNELS	9
I.6.3.2.BENEFICES ECONOMIQUES	9
I.6.3.3.BENEFICES ECOLOGIQUES	9
I.7.EFFET DES ADDITIONS MINERALES SUR LES MATERIAUX	

CIMENTAIRES	10
I.7.1.EFFET GRANULAIRE	10
I.7.2.EFFET PHYSICO-CHIMIQUE	10
I.7.3.EFFET CHIMIQUE	10
I.8.L'INTERET DE L'UTILISATION DES AJOUTS MINEREAUX DANS LE GENIE CIVIL	10
I.9.L'ETAT DE L'ART	11
I.10.CONCLUSION	14
Chapitre II : Les caractéristiques des matériaux utilisés	
II.INTRODUCTION	15
II.1.LES MATERIAUX UTILISES	15
II.1.1.LE SABLE	15
II.1.1.1.ANALYSE GRANULOMETRIQUE	15
II.1.1.2.MODULE DE FINESSE (MF)	18
II.1.1.3.EQUIVALENT DE SABLE (LA NORME NF P 18 -598	18
II.1.2.LE CIMENT	20
II.1.2.1. COMPOSITION CHIMIQUE ET MINERALOGIQUE DU CIMENT CPA	20
II.1.2.2.SURFACE SPECIFIQUE ET LA MASSE VOLUMIQUE	20
II.1.3.POUDRE DE VERRE	20
II.1.4. L'EAU DE GACHAGE	21
II.2. PROTOCOLE EXPERIMENTAL	21
II.2.1.CONFECTION DES EPROUVETTES ET CONDITION DE CONSERVATION	21
II.2.2. L'ABSORPTION CAPILLAIRE	21
II.2.3. LA RESISTANCE A LA COMPRESSION	22
II.2.4. LA RESISTANCE A LA FLEXION	23
II.3.CONCLUSION	24
Chapitre III : Résultats et interprétation	
III.PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES	25
III.1.INTRODUCTION	25
III.2.LES MELANGES DES CEMENTS ETUDIES	25
III.3.RESULTATS ET INTERPRETATION	25
III.3.1.ESSAIS SUR LA PATE DE CIMENT	25
III.3.1.1.LA CONSISTANCE NORMALISEE	25
III.3.2.L'ABSORPTION CAPILLAIRE	27
III.3.3.LA RESISTANCE A LA COMPRESSION	30
III.3.4. LA RESISTANCE A LA FLEXION	31
III.3.5. Evaluation de l'activité pouzzolanique de la poudre de verre	32
III.4.CONCLUSION	33
CONCLUSION GENERALE	34
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	35

LISTES DES FIGURES

N° de Figure	Titre de figure	page
CHAPITRE I		
Figure I.1	les constituants du ciment portland.	1
Figure I.2	Les constituants anhydres du clinker du ciment Portland	2
Figure I.3	(a) structure cristalline de la portlandite; (b) image au MEB de cristaux de portlandite.	6
Figure I.4	Morphologie du C-S-H. Image MEB de C-S-H poussant à la surface de grains d'alite	6
Figure I.5	Micrographie SE d'une fracture de béton montrant une pelote d'étrengéite	7
Figure I.6	Adsorbats en surface des grosses particules.	10
Figure I.7	Résistance a la compression des mortiers incorporant poudre de verre [SHAYAN et coll., 2004].	11
Figure I.8	Activité pouzzolanique de la poudre de verre [SHI et coll., 2005b].	12
Figure I.9	Effet de la poudre de verre sur les résistances en traction et en flexion des bétons [TAHA et coll., 2008a].	13
Figure I.10	La Résistance en flexion sur des prismes de bétons à 130 jours.	13
Figure I.11	Porosité capillaire en fonction du taux de substitution [SCHWARZ et coll.,2007].	14
CHAPITRE II		
Figure II.1	Les tamis de l'analyse granulométrique.	16
Figure II.2	Courbe granulométrique dans différents cas.	16
Figure II.3	Courbe granulométrique de notre sable utilisé.	17
Figure II.4	Essai d'équivalent de sable	18
Figure II.5	Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire.	22
Figure II.6	Appareil universel	23
Figure II.7	Appareil de flexion 3 points	23
CHAPITRE III		
Figure III.1	L'appareil de Vicat	26
Figure III.2	La consistance normalisée des ciments en fonction du pourcentage de la poudre de verre	27

Figure III.3	Evolution de l'absorption capillaire des mortiers après 2j de cure en fonction de \sqrt{t}	28
Figure III.4	Evolution de l'absorption capillaire des mortiers après 7j de cure en fonction de \sqrt{t}	29
Figure III.5	Evolution de l'absorption capillaire des mortiers après 28j de cure en fonction de \sqrt{t}	30
Figure III.6	Evolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction de temps.	31
Figure III.7	Evolution de la résistance à la flexion des mortiers en fonction de temps.	32
Figure III.8	Activité pouzzolanique de la poudre de verre après 28 j.	33

LISTES DES TABLEAUX

N° de tableau	Titre de tableau	Page
CHAPITRE I		
Tableau I.1	Les constituants principaux du ciment	3
Tableau I.2	Composition minéralogique du ciment	3
Tableau I.3	Les résistances sont mesurées sur mortier normal; les valeurs minimaux garanties en Mpa	3
Tableau I.4	Affaissement des bétons E/L = 0,49 [SHAYAN et coll., 2006]	11
CHAPITRE II		
Tableau II.1	Les résultats de l'analyse granulométrique	17
Tableau II.2	Les lectures de l'essai de l'équivalent de sable	19
Tableau II.3	les valeurs d'équivalent de sable indiquent la nature et qualité du sable	19
Tableau II.4	Analyse chimique du ciment en %	20
Tableau II.5	Composition minéralogique du ciment en %	20
Tableau II.6	La surface spécifique et la masse volumique de ciment	20
Tableau II.7	Analyse chimique de la poudre de verre	20
Tableau II.8	Caractéristiques physiques de la poudre de verre	21
CHAPITRE III		
Tableau III.1	Mélange des ciments	25
Tableau III.2	La consistance des ciments	26
Tableau III.3	L'absorption capillaire des mortiers après 2j de cure	27
Tableau III.4	L'absorption capillaire des mortiers après 7j de cure	28
Tableau III.5	L'absorption capillaire des mortiers après 28j de cure	29
Tableau III.6	La résistance à la compression des mortiers après 2j de cure	30
Tableau III.7	La résistance à la flexion des mortiers après 2j et 28j de cure	32

RÉSUMÉ:

Le recyclage du verre pour la fabrication de nouveaux verres n'est actuellement pas économiquement viable. Ceci explique la recherche d'autres débouchés que le stockage ou l'enfouissement en décharges.

Vu sa composition riche en silice réactive, la valorisation de verre dans les mortiers de ciment semble être une bonne alternative pour son recyclage.

Notre travail consiste à étudier l'influence de la finesse de poudre de verre avec trois surfaces spécifiques différentes (PV30, PV45 et PV70) sur les propriétés physiques et mécaniques des mortiers à base des ciments ; en remplaçant une quantité de ciment portland (CEM) par un ajout de poudre de verre avec des proportions 10 et 20 %.

Les résultats obtenus montrent qu'une substitution partielle de 10% de poudre de verre (PV70) pour les mortiers à base des ciments semble favorable.

Mots clés : mortier, ajout, poudre de verre, finesse.

ABSTRACT:

Glass recycling for the production of new glasses is not currently economically viable. This explains the search for outlets other than the storage or burial in landfills.

Given its composition rich in reactive silica, recovery of glass in mortar seems to be a good alternative for recycling.

Our work consists to study the influence of fineness of glass powder on the property physical and mechanical of mortars by replacing an amount of Portland cement (CEM) by addition of glass powder with different proportions 10 and 20%.

The results show that partial substitution of 10% of glass powder (PV70) for cement mortar appears favorable.

Keywords: mortar, addition, glass powder, fineness

ملخص:

إعادة تدوير الزجاج لصناعة زجاج جديد ليس مجديا اقتصاديا حاليا، وهذا ما يفسر في البحث عن وسائل أخرى غير التخزين أو الدفن في مدافن النفايات.

و بالنظر إلى تركيبته الغنية بالسيليكا التفاعلي، و استعادة الزجاج في الملاط الاسمنتي يكون بديلا جيدا لإعادة تدويره.

يعتمد عملنا على دراسة تأثير صفاء مسحوق الزجاج مع ثلاث أسطح محددة مختلفة (PV30, PV45, و PV70)، على الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية للملاط ذات القاعدة الإسمنتية، باستبدال كمية من الإسمنت البورتلاندي (CEM) بالإضافة مسحوق الزجاج مع نسب 10% و 20%.

و النتائج المتحصل عليها أظهرت أن الإستبدال الجزئي بنسبة 10% من مسحوق الزجاج (PV70) للملاط ذو القاعدة الاسمنتية يبدو مواتيا.

كلمات مفتاحية: ملاط، إضافة، مسحوق الزجاج، صفاء.

INTRODUCTION GENERALE :

1. CONTEXTE :

Généralement, le verre est principalement composé de silice amorphe. Récemment, des études ont été effectuées sur l'utilisation du verre comme matériau pouzzolanique dans l'industrie cimentaire.

Ces études ont démontrés que les particules très fines de verre de dimensions de moins de 38 μm , peuvent améliorer les propriétés mécaniques du béton à cause de la réaction pouzzolanique du verre (Shao et al, 2000).

Selon la composition chimique du verre, le pourcentage d'alcalis dans le verre ordinaire varie entre 10 et 20% par masse du verre.

L'étude sur la substitution partielle des granulats fins par du verre n'a donné que des résultats insatisfaisantes dus à la réaction alcali-silice (Polley et Cramer, 1998).

Pour éviter ce problème, on peut le broyer très finement et l'utiliser comme matériau pouzzolanique (Jin et al, 2000), en effet, le verre ayant une surface spécifique élevée est réactif selon la réaction pouzzolanique et peut diminuer le risque de réaction alcali-silice à long terme.

2. OBJECTIF :

L'objectif de notre étude est d'évaluer expérimentalement l'influence de la finesse de poudre de verre sur les caractéristiques physiques et mécaniques du mortier à base des ciments.

3. METHODOLOGIE DU TRAVAIL

Le premier chapitre de ce travail est destiné à l'étude bibliographique. Dans cette partie nous avons exposé les travaux effectués par différents auteurs, notamment sur les ajouts minéraux, la poudre de verre.

Le deuxième chapitre est consacré à la caractérisation des matériaux utilisés ainsi que, les essais expérimentaux effectués sur les mortiers notamment, la résistance mécanique et l'absorption capillaire.

Le troisième chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus et les discussions tirées lors de cette étude.

Enfin, une conclusion générale reprend les principaux résultats dégagés lors de cette étude.



Chapitre I :
Le ciment et les
ajouts minéraux

Chapitre I Le ciment et les ajouts minéraux

I.1.INTRODUCTION :

Les matériaux cimentaires sont les matériaux les plus utilisés au monde. Ce sont essentiellement eux qui façonnent notre environnement.. Voies de circulation, ouvrages d'art et d'assainissement, bâtiments de toute nature, édifices historiques, rien n'échappe à leur omniprésence.

Le ciment est un composant essentiel des matériaux cimentaires comme le béton. Il assure une fonction mécanique car il lie le squelette granulaire, mais il est aussi en grande partie responsable de la tenue à long terme du matériau béton. La conception d'un béton est extrêmement liée à l'environnement dans lequel va être exposé durant sa durée de vie [1].

I.2.LE CIMENT PORTLAND :

Cette partie porte sur les constituants du ciment portland, leurs caractéristiques chimiques ainsi que leurs évolutions au cours de l'hydratation.

Grâce à la simplicité de sa technologie, le ciment portland est, de nos jours, le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction [1].

I.2.1.LES CONSTITUANTS DU CIMENT PORTLAND :

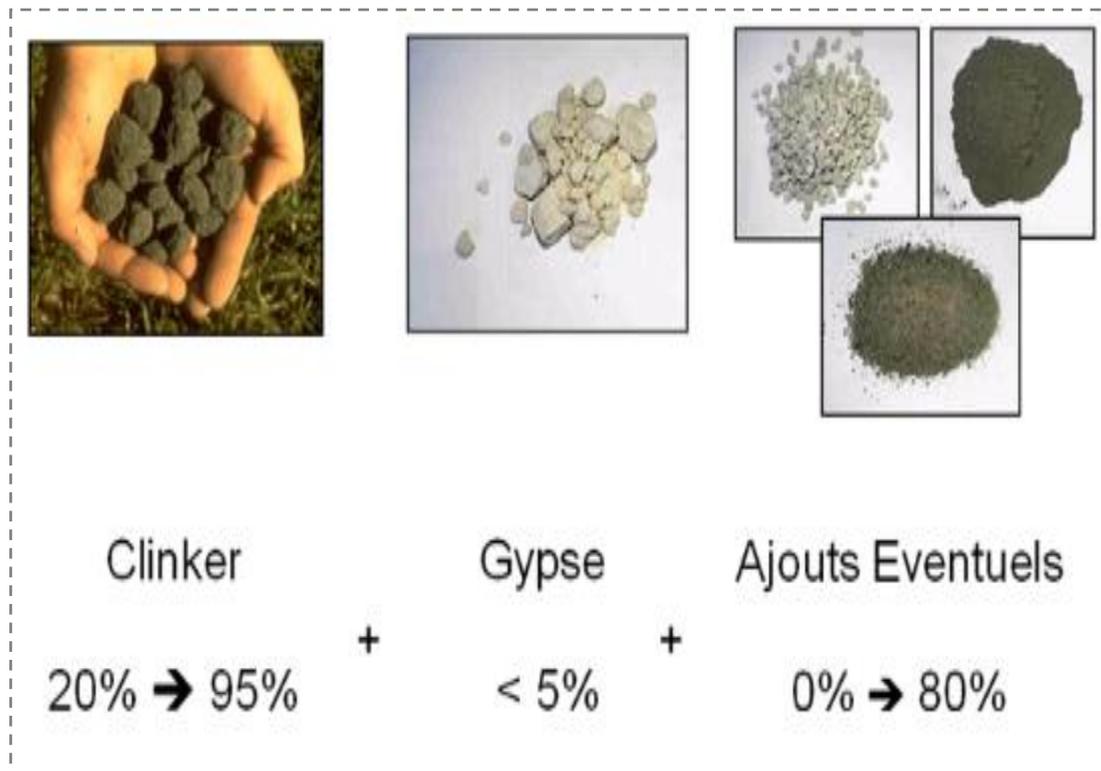


Figure I. 1: les constituants du ciment portland

Le ciment Portland est un mélange composé suivant le cas de clinker, de gypse (CaSO_4) finement broyés et d'ajouts éventuels. La taille des grains du ciment Portland ordinaire varie de quelques microns à 150 microns. Ses caractéristiques granulaires sont exprimées au travers de sa granulométrie et de sa finesse. Cette finesse est souvent caractérisée par sa surface massique où surface spécifique Blaine qui représente la surface totale des grains de ciment rapportée à la masse. Elle s'exprime en cm^2/g . La finesse habituelle est de l'ordre de $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$, elle passe à $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ et plus pour les ciments à forte résistance au jeune âge. [2].

Chapitre I Le ciment et les ajouts minéraux

I.2.2. HYDRATATION DU CIMENT PORTLAND :

l'hydratation est un ensemble de réactions chimiques qui interviennent dès le début de gâchage et qui se poursuivent dans le temps.

Comme le clinker est un mélange de différents constituants anhydres, il est nécessaire, dans un premier temps, de considérer séparément les processus d'hydratation de chacun des composants du clinker. L'accent sera mis sur les processus d'hydratation du C₃S et du C₃A qui sont les phases les plus réactives, donc les plus susceptibles d'influencer la rhéologie des pâtes de ciment et du béton. La figure I.3 présente schématiquement des constituants anhydres du clinker du ciment Portland et leurs produits d'hydratation, l'aire des cases donne le volume approximatif des phases [2].

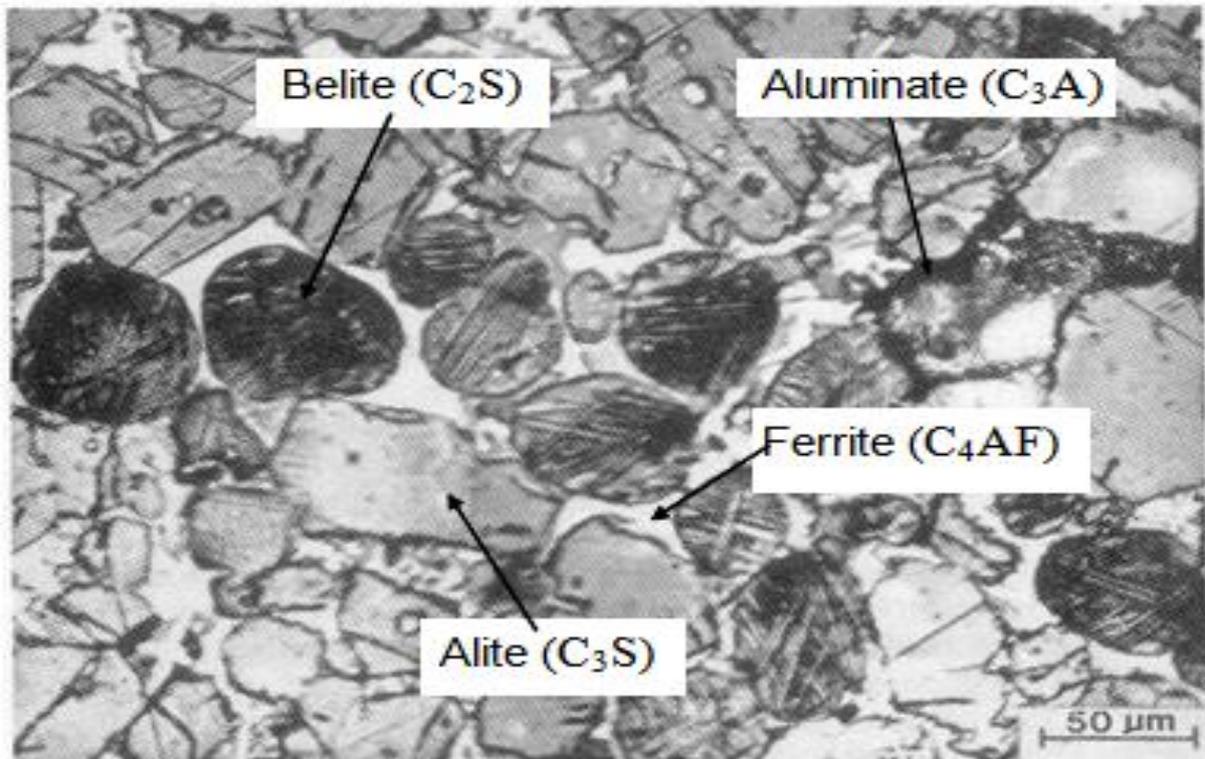


Figure I. 2 : Les constituants anhydres du clinker du ciment Portland

I.2.3. COMPOSITION DU CIMENT :

Les ciments sont des poudres fines obtenues par le broyage d'un mélange de clinker et d'environ 4 à 8 % de gypse dont le rôle est de régulariser la prise (retardateur de prise) [3].

I.2.3.1. COMPOSITION CHIMIQUE ET MINÉRALOGIQUE DU CIMENT :

Les constituants principaux (Tableau I.1) de la matière première réagissent entre eux pour former principalement quatre (04) composés Minéralogiques (Tableau I.2). [3]

Chapitre I Le ciment et les ajouts minéraux

Tableau I.1 : les constituants principaux du ciment [3] :

Oxydes constitutifs	Teneur limites %	Source (matière première)
CaO	60 à 69	Calcaire
SiO ₂	18 à 24	
Al ₂ O ₃	04 à 08	Argile
Fe ₂ O ₃	01 à 08	
MgO	0 à 05	
Alcali (K ₂ O et Na ₂ O)	0 à 02	Calcaire et argils
SO ₂	0 à 03	

Tableau I.2 : Composition minéralogique du ciment [3] :

Composés	Composition	Appellation abrégée	Taux
-Silicate tricalcique	3CaO.SiO ₂	C2S	45 à 65%
-Silicate bicalcique	2CaO.SiO ₂	C3S	15 à 35%
-Aluminate tricalcique	3CaO.Al ₂ O ₃	C3A	4 à 14%
-Aluminoferrite tétracalcique	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C4AF	10 à 18%

Caractéristiques garanties : Les résistances sont mesurées sur mortier normal; les valeurs minimaux. garanties sont données comme suit :

Tableau I.3: Les résistances sont mesurées sur mortier normal; les valeurs minimaux. garanties en Mpa [3] :

Classe	Resistance minimal garentie en Mpa	
	2 jours	28 jours
CPA 42,5	10	40
CPA 42,5 R	18	40
CPA 52,5	18	50
CPA 52,5 R	28	50

I.3.DEFINITION DES AJOUTS MINERAUX :

Les ajouts cimentaires sont des matériaux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore le plus souvent au ciment Portland et donnent ses propriétés au béton, grâce à une activité hydraulique et/ou pouzzolanique.

Les ajouts tels que les cendres volantes le laitier granulé de haut fourneau (LGHF) et les fumées de silice, pouzzolanes, les fillers etc. Permettent soit d'améliorer les caractéristiques rhéologiques ou mécaniques du béton ou de lui conférer des propriétés spécifiques. [4].

I.3.1.CLASSIFICATION DES ADDITIONS :

Généralement, on utilise dans les ciments et les bétons les ajouts minéraux suivants :

- Les cendres volantes,
- Les laitiers de haut fourneau,
- Les fillers calcaires,
- Les fumées de silice.

I.3.1.1.LES FUMÉES DE SILICE :

Se sont des sous produits de la fabrication du silicium ou de ferrosilicium. Ils se présentent sous forme de microsphères de silice ayant des diamètres moyens de 0,1 µm. la surface spécifique varie de 20 à 25 m²/g.

I.3.1.2.LES CENDRES VOLANTES :

Les cendres volantes utilisées dans les ciments et les bétons sont produites dans les centrales thermiques utilisant du charbon pulvérisé. Elles se présentent sous forme d'une poudre de couleur plus ou moins foncée suivant sa teneur en carbone et en impureté.

I.3.1.3.LES LAITIERS DE HAUT FOURNEAU :

Les laitiers sont des sous-produits de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux des usines sidérurgiques.

I.3.1.4.LES FILLERS CALCAIRES :

L'utilisation des fillers calcaires dans l'industrie du ciment et du béton est assez récente. Les additions calcaires dans les matrices cimentaires ont déjà fait l'objet de plusieurs études, essentiellement en France et aux Etats-Unis d'Amérique [4].

I.3.2.NORMALISATION DES ADDITIONS :

Avec l'apparition des nouvelles normes sur les bétons et granulats, des notions nouvelles sont apparues dans la définition des fillers, telles que celle de l'addition normalisée partiellement substituable au ciment [norme NF P18-305 « Béton prêt à l'emploi »] et celle de correcteur granulaire (norme NF P18-541). La différence entre les deux définitions est liée aux propriétés particulières que peuvent posséder les additions. Ainsi, la normalisation distingue les produits de broyage de roches naturelles dont la fonction principale est d'améliorer la compacité du béton frais comme du béton durcie [NF P 18-501 « Additions pour bétons hydrauliques-Filler » (Mars 1992)], des matériaux finement divisés et pouvant être substitué partiellement au ciment pour améliorer certaines propriétés du béton ou pour lui conférer des propriétés particulières [NF P18-508 « Additions pour bétons hydrauliques-Additions calcaires » (Juillet 1995)] Selon la norme béton EN 206 [4].

I.3.3.Importance des additions dans l'industrie cimentière :

Dans le domaine des travaux publics et du bâtiment, le ciment Portland artificiel sans ajout ne dépend plus à lui seul à toutes les exigences (mécaniques, durabilité, coût, ...). De

Chapitre I Le ciment et les ajouts minéraux

plus, dans une même cimenterie et pour répondre aux différentes demandes commerciales, on a tendance à ne plus fabriquer qu'un seul clinker et à le broyer plus ou moins finement avec des additions minérales de provenances diverses pour fabriquer des ciments composés (CEM II) [4].

I.3.4.FONCTION DES ADDITIONS :

Pour présenter les différentes fonctions des additions, il convient de distinguer leurs différents modes d'incorporation [5] :

- Additions mélangées avec le clinker en cimenterie.
- Additions introduites directement dans les bétons.

I.3.5.NOTION DE LIANT EQUIVALENT :

Pour chacune des additions minérales, un coefficient de prise en compte k (valeur fonction de l'activité de l'addition) doit être défini. C'est ainsi que la notion de « liant équivalent » est apparue. Le liant équivalent, constitué de ciment CEM I et d'une addition normalisée, est défini par : $L = C + K \cdot A$ (Eq.I.1)

Avec :

C : quantité de ciment CEM I (en kg/m^3) ;

A : quantité d'addition prise en compte (en kg/m^3) ;

K : coefficient de prise en compte.

Cette nouvelle approche est assez régulièrement adoptée pour les bétons conformes à la norme (dans ce cas, le producteur de béton applique le coefficient forfaitaire et limite sa substitution conformément à la norme) et pour les bétons de marque (le producteur optimise sa substitution en fonction du coût et de la seule résistance mécanique à 28 jours) [5].

I.3.6.CARACTERISATION DE L'ACTIVITE D'UNE ADDITION MINERALE :

I.3.6.1.INDICE D'ACTIVITE :

Le mortier témoin ou normalisé, confectionné selon la norme NF EN 196-1, est constitué, en masse, d'une partie de ciment, de 3 parties de sable et d'une demi partie d'eau. Les mortiers avec additions sont obtenus dans les mêmes conditions en remplaçant une fraction massique ρ (taux de substitution) de ciment par l'addition minérale, les quantités de sable et d'eau restant inchangées. Les paramètres de compositions satisfont

l'équation : $\frac{E}{C} = \frac{E}{A+C}$ (Eq I.2) avec :

C_0 et $C = (1-\rho) C_0$ sont respectivement les masses de ciment dans le mortier témoin et dans le mortier avec addition, $A = \rho C_0$ la masse d'addition, E la masse d'eau et ρ taux de substitution [5].

I.4.DEFINITION DES AJOUTS CHIMIQUES :

Les adjuvants sont des produits chimiques qui, incorporés dans les bétons lors de leur malaxage ou avant la mise en œuvre à des doses inférieures à 5% du poids de ciment, provoquent des modifications des propriétés ou du comportement de ceux-ci [1].

Chapitre I Le ciment et les ajouts minéraux

I.4.1. LES PROPRIETES DES PRINCIPALES PHASES HYDRATEES :

I.4.1.1. LA PORTLANDITE $Ca(OH)_2$:

La portlandite est le nom minéralogique de l'hydroxyde de calcium cristallisé. C'est la phase la plus soluble de la pâte de ciment hydratée [6].

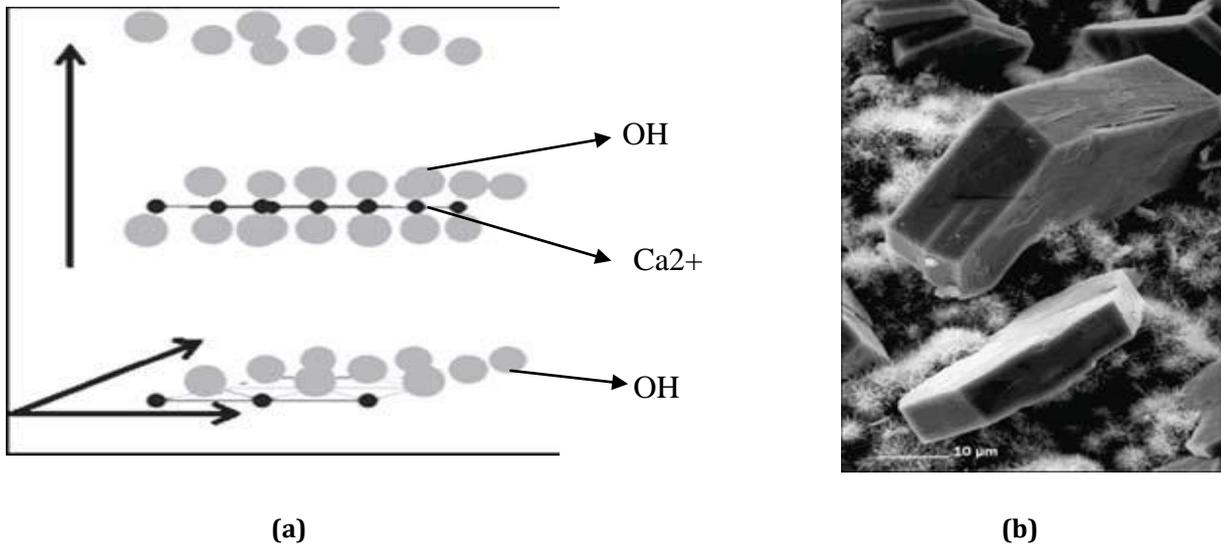


Figure I.3: (a) structure cristalline de la portlandite; (b) image au MEB de cristaux de portlandite [6].

I.4.1.2. LES SILICATES DE CALCIUM HYDRATES (C-S-H) :

Les C-S-H constituent la majeure partie de la phase liante de la pâte de ciment. On parle souvent de gel de C-S-H en se référant à des composés amorphes. Ce sont en fait des composés nanocristallins constitués de particules nanométriques agrégées les unes aux autres (Figure I.4) [6].

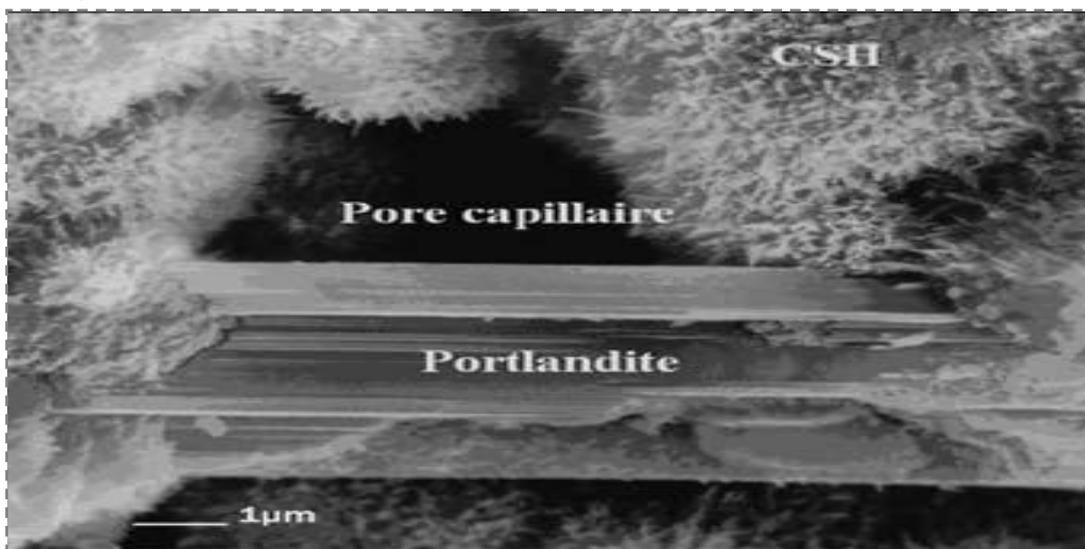


Figure I.4: Morphologie du C-S-H. Image MEB de C-S-H poussant à la surface de grains d'alite [6].

I.4.1.3. LES ALUMINATES DE CALCIUM HYDRATES :

On distingue les phases hexagonales (C2AH8 – C4AH13) et la phase cubique C3AH6.

- Le C3AH6 ou hydrogénât

Le C3AH6, Ca3Al2 (OH)12 est la forme la moins soluble des aluminates de calcium hydratés et la plus stable. Il présente la même structure cristalline que le grenat Ca3Al2(SiO4)3 (Katoite) [6]. L'hydrogénât est le produit de l'hydratation des ciments alumineux, on le trouve rarement dans les ciments Portland hydratés à des températures normales.

- Les phases hexagonales :

Les hydrates les plus stables sont les carboaluminates de calcium qui se forment dans les ciments contenant des ajouts calcaires ou simplement à partir des carbonates dissous dans la solution interstitielle du fait du contact avec le CO2 atmosphérique [6].

I.4.1.4. L'ETTRINGITE :

L'ettringite (C3A3CSH32) cristallise sous forme d'aiguilles à base hexagonale (Figure I.5), souvent rayonnantes (oursins) autour des grains de ciment anhydres dans une pâte de ciment âgée. Ces aiguilles se retrouvent parsemées dans les fibres de C-S-H. Le nombre de molécules H2O de la formule de l'ettringite est mal connu, il peut être 30, 31, ou 32 H2O suivant la température et la pression partielle de vapeur d'eau du milieu [6].

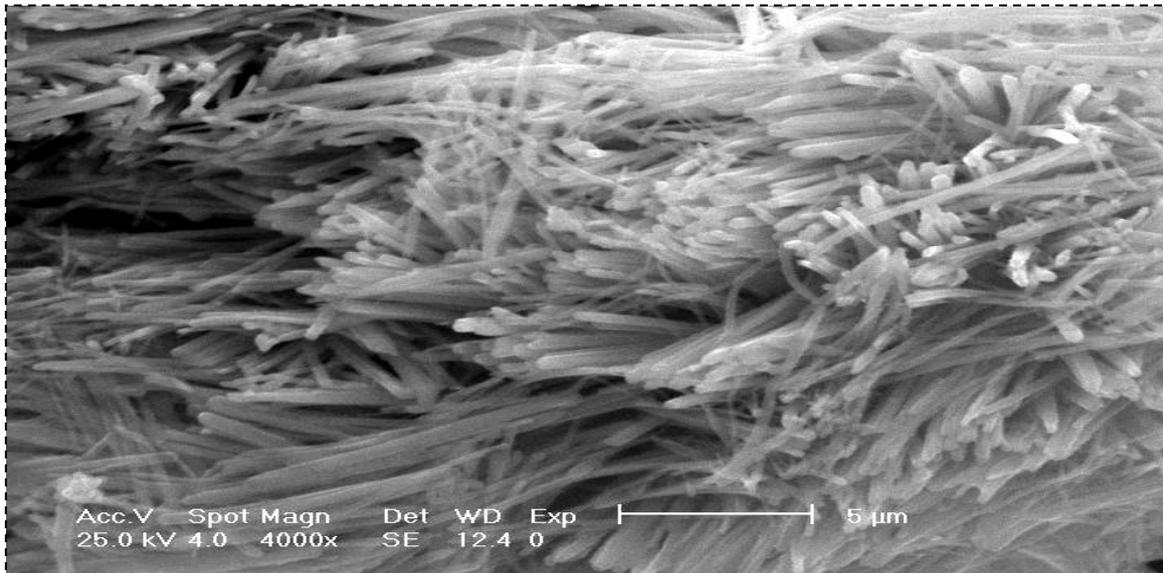


Figure I.5: Micrographie SE d'une fracture de béton montrant une pelote d'ettringite [6].

I.4.2. HYDRATATION DES MATERIAUX A BASE DU CIMENT CEM I :

I.4.2.1. Hydratation des silicates :

Au contact de l'eau, les silicates tricalciques (C3S) et les silicates bicalciques (C2S) se dissolvent sous forme d'ions Ca²⁺, OH⁻ et H₂SiO₄²⁻, qui interagissent entre eux et forment des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la portlandite (Ca(OH)₂). Ces réactions sont exothermiques et peuvent servir de catalyseur à la réaction d'hydratation. Dans le cas du C2S, la cinétique d'hydratation est plus lente et la quantité de Portlandite formée est plus faible [7].

À titre indicatif, les équations des réactions d'hydratation des silicates peuvent s'écrire :

Pour le C3S: $2C3S + 6H \rightarrow C3S2H3 + 3CH$.

Pour le C2S: $2C2S + 4H \rightarrow C2S2H3 + CH$ [5].

Chapitre I Le ciment et les ajouts minéraux

I.4.2.2.Hydratation des aluminates :

L'aluminate tricalcique est le composé du ciment le plus réactif avec l'eau. C'est parce que l'hydratation des aluminates est très rapide que les cimentiers ajoutent du sulfate sous forme de gypse au clinker pour contrôler ces réactions .

I.4.2.3.Hydratation de l'aluminate tricalcique C3A :

La réaction est donnée par:



I.4.2.4.Hydratation de L'aluminoferrite tétracalcique C4AF :

Le C4AF réagit avec le gypse avec un mode semblable que celui de C3A, mais dans ce cas, la réaction est beaucoup plus lente [7].

I.5.LES AJOUTS MINÉRAUX CIMENTAIRES :

I.5.1.GENERALITES :

Les ajouts minéraux cimentaires sont des matériaux minéraux que l'on mélange au ciment Portland afin d'améliorer les propriétés du mortier ou du béton grâce à une activité hydraulique et / ou pouzzolanique.

I.5.1.1.AVANTAGES TECHNIQUES :

- Permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée (sauf pour les matériaux de très grande surface active, comme les fumées de silice).
- Améliorent généralement la résistance, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques.
- Permettent une moindre chaleur d'hydratation des ciments mélangés.
- Les ajouts cimentaires améliorent la résistance à la fissuration.

I.5.1.2.AVANTAGES ECONOMIQUES :

Typiquement, le ciment Portland est le composant le plus coûteux d'un mélange de béton, puisqu'il est un matériau à forte intensité d'énergie.

I.5.1.3.AVANTAGES ECOLOGIQUES :

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO₂). De fait, le remplacement du ciment Portland par des ajouts cimentaires réduit d'autant les émissions de CO₂[8].

I.6.LE BROYAGE :

I.6.1.GENERALITES :

Les broyeurs utilisés sont analogues dans leur principe à ceux servant à la fabrication de la farine crue. Ils sont alimentés par les bascules doseuses délivrant le clinker, le gypse et les autres constituants [9].

I.6.2.BROYABILITE DU CLINKER :

Jusqu'à une finesse de 2000 cm²/g, il existe une bonne corrélation entre la broyabilité et la porosité. Ensuite, l'augmentation des finesses en fonction du temps va dépendre de:

- * La dimension et la nature des cristaux du clinker.
- * La microfissuration du clinker (choc thermique lors du refroidissement), sachant qu'une meilleure trempe donne un clinker plus facile à broyer grâce à une forte microfissuration.

Chapitre I Le ciment et les ajouts minéraux

En général, le broyage est plus facile quand le clinker possède [9] :

- plus de C3S,
- moins de C3A,
- le plus possible de petits cristaux.

Selon certains chercheurs, plus le rapport $[(C3S + C2S) / (C3A + C4AF)]$ est élevé, plus facile est le broyage [9].

I.6.3.BROYABILITE DES AJOUTS MINERAUX :

Les bénéfices d'utilisation des ajouts minéraux sont [9]:

- * Fonctionnels.
- * Economiques.
- * Ecologiques .

I.6.3.1.BENEFICES FONCTIONNELS :

- Incorporation des particules fines améliore la maniabilité et réduit la demande en eau (à l'exception des ajouts d'une grande finesse).
- Amélioration des propriétés mécaniques et de la durabilité du béton
- Diminution de la chaleur d'hydratation dégagée du béton, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.

I.6.3.2.BENEFICES ECONOMIQUES :

- la plupart des ajouts minéraux sont des sous-produits de différents industries et leur coût est souvent égal au coût du transport et de la manipulation).
- comme la production du ciment est un grand consommateur d'énergie, son remplacement par des ajouts minéraux réduit le prix du béton pour le coût du combustible.

I.6.3.3.BENEFICES ECOLOGIQUES :

- Diminution de l'émission du CO₂ par l'industrie cimentière.
- Elimination des sous-produits de la nature.

*** Le Laitier De Haut Fourneau :**

Jusqu'à une finesse de 2500 cm²/g, il est plus dur à broyer que le clinker. Ensuite, il se broie plus facilement et peut donner des finesses élevées (de l'ordre de 6 000 cm²/g).

*** Les Cendres Volantes :**

Elles sont assez fines au départ, avec des finesses variant de 2500 à 4000 cm²/g. Leur broyabilité est analogue à celle du clinker. Elles présentent l'avantage d'augmenter le débit du broyeur à ciment.

*** Les Fillers :**

A cause de leurs natures différentes (siliceux, calcaires), ils présentent des broyabilités différentes.

*** Le Gypse :**

- * Il se broie très facilement, mais a tendance à s'agglomérer.
- * Dans le ciment, la température du broyage élevée peut causer la déshydratation du gypse et la formation de l'hémihydrate de calcium qui se dissout beaucoup plus rapidement et en plus grande quantité que du gypse.

I.7.EFFET DES ADDITIONS MINERALES SUR LES MATERIAUX CIMENTAIRES :

I.7.1.EFFET GRANULAIRE :

Un effet granulaire favorable qui conduit soit à l'amélioration de la consistance du mélange frais à quantité d'eau constante, soit à la réduction de la quantité d'eau pour une consistance donnée en améliorant la compacité du mélange et les performances mécaniques du matériau durci [10].

I.7.2.EFFET PHYSICO-CHIMIQUE :

Plusieurs auteurs ont confirmé que l'effet physico-chimique et microstructural des additions minérales agit essentiellement sur l'évolution des résistances mécaniques aux jeunes âges et sur les propriétés physiques et microstructurales des matériaux cimentaires durcis [10].

I.7.3.EFFET CHIMIQUE :

L'effet chimique des additions permet de les faire contribuer à l'évolution des résistances mécaniques aussi bien que les produits hydratés du ciment. Plusieurs auteurs ont montré que l'incorporation des quantités d'additions minérales peut engendrer dans certains cas des augmentations des résistances en compression indépendamment de l'âge du mortier . L'effet chimique est intimement lié à leur composition minéralogique et concerne la capacité des additions caractérisées par des propriétés pouzzolanique et/ou hydrauliques, à réagir avec l'eau et les constituants anhydres ou hydratés du ciment pour former de nouvelles phases minérales qui peuvent contribuer à l'évolution des résistances mécaniques au même titre que les produits hydratés du ciment L'effet chimique, est dû à l'activité pouzzolanique de certaines additions qui améliore la résistance en compression du ciment [10].

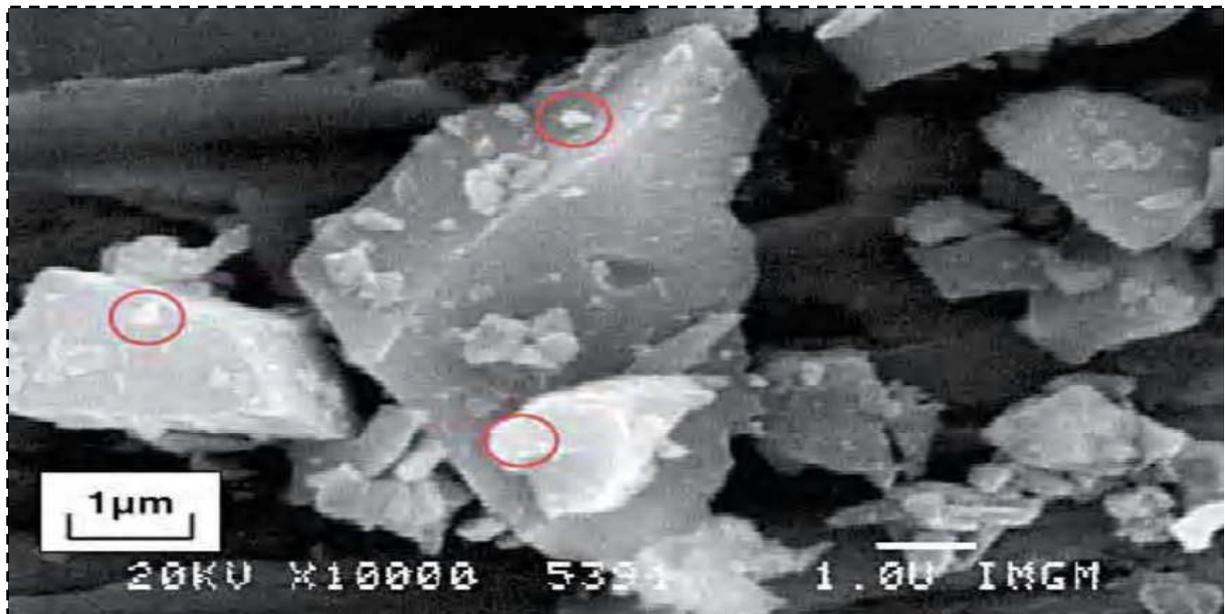


Figure I.6 : Adsorbats en surface des grosses particules [10].

I.8.L'INTERET DE L'UTILISATION DES AJOUTS MINEREAUX DANS LE GENIE CIVIL

- L'intérêt du point de vue économique. - L'intérêt du point de vue technique [11].

I.9.L'ETAT DE L'ART :

L'utilisation de la poudre de verre dans un système cimentaire, est un moyen de valorisation des verres en décharge. C'est une technique récente et les quelques résultats des travaux antérieurs effectués sur le verre, utilisés en poudre comme substitut partiel du ciment sont décrits dans cette partie [12].

I.9.1.SHAYAN ET COLL. (2006) : ont mené des études sur une dizaine de mélanges de bétons de rapport E/L=0,49, dont trois incorporant 0, 20 et 30 % de la poudre de verre en substitution partielle du ciment et désignés respectivement par Mix1, Mix3 et Mix4 retiennent particulièrement notre attention. Les surfaces spécifiques de Blaine des matériaux utilisés sont de 350 m²/kg et 800 m²/kg respectivement pour le ciment et la poudre de verre.

Les résultats de l'affaissement exprimés par le tableau I.4 montrent que la poudre réduit l'ouvrabilité des mélanges. Ceci serait lié à sa surface spécifique très élevée, plus que le double de celle du ciment utilisé.

Tableau I.4: : Affaissement des bétons E/L = 0,49 [SHAYAN et coll., 2006]

Mélanges	Témoin	20% poudre de verre	30% poudre de verre
Affaissement (mm)	70	65	60

I.9.2.SHAYAN ET COLL. (2004): ont remarqué que la poudre de verre de finesse de Blaine de 800 m²/kg développe des réactions pouzzolaniques importantes dans le mortier et pourrait remplacer jusqu'à 30 % de ciment dans quelques mélanges de béton. Ils ont étudié l'effet de l'incorporation de la poudre de verre par substitution partielle du ciment portland sur les résistances à la compression des cubes de mortiers. Leurs résultats sont illustrés dans la figure I.7.

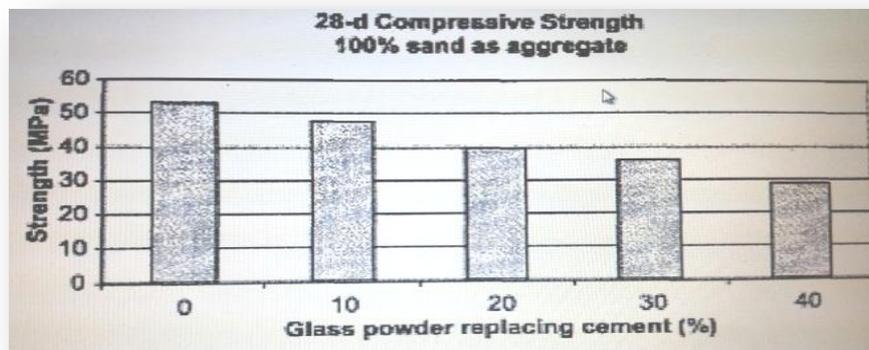


Figure.I.7: Résistance à la compression des mortiers incorporant poudre de verre [SHAYAN et coll., 2004]

Chapitre I Le ciment et les ajouts minéraux

Cette figure montre une diminution de la résistance à la compression lorsque le taux de remplacement par la poudre augmente. Les indices de pouzzolanité à 28 jours des mélanges respectivement avec 10 %, 20 %, 30 % et 40 % de poudre de verre sont d'environ 92 %, 77 %, 71 % et 58 %.

I.9.3.SHI ET COLL. (2005B) : ont porté sur des poudres de verre de différentes finesses variant de 264 à 582 m²/kg. Les surfaces spécifiques des poudres de verre GP- dust, GP-4000 et GP-6000 sont respectivement 264 m²/kg, 467 m²/kg et 582 m²/kg et celui du ciment est de 383 m²/kg. Les résultats montrent que la réaction pouzzolanique est d'autant plus importante que la finesse est élevée. Ils ont également observé qu'une augmentation de la température de murissement des échantillons accélère l'activation de la réaction pouzzolanique de la poudre de verre et des cendres volantes. Voir la figure I.8

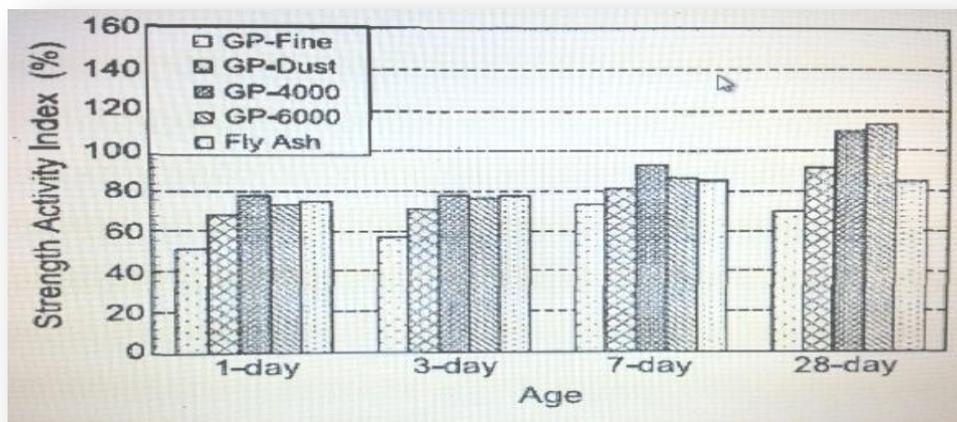


Figure.I.8: Activité pouzzolanique de la poudre de verre [SHI et coll., 2005b]

I.9.4.TAHA ET COLL. (2008A) : Les résistances en traction et en flexion évaluées par TAHA et coll. (2008a) sur des mélanges incorporant 20 % de poudre de verre sont similaires à celles du témoin. Par contre SHAYAN et coll. (2006) ont observé une légère réduction des résistances en traction et en flexion à 130 jours en fonction du taux de substitution par la poudre. (Figure I.9 et I.10)

Chapitre I Le ciment et les ajouts minéraux

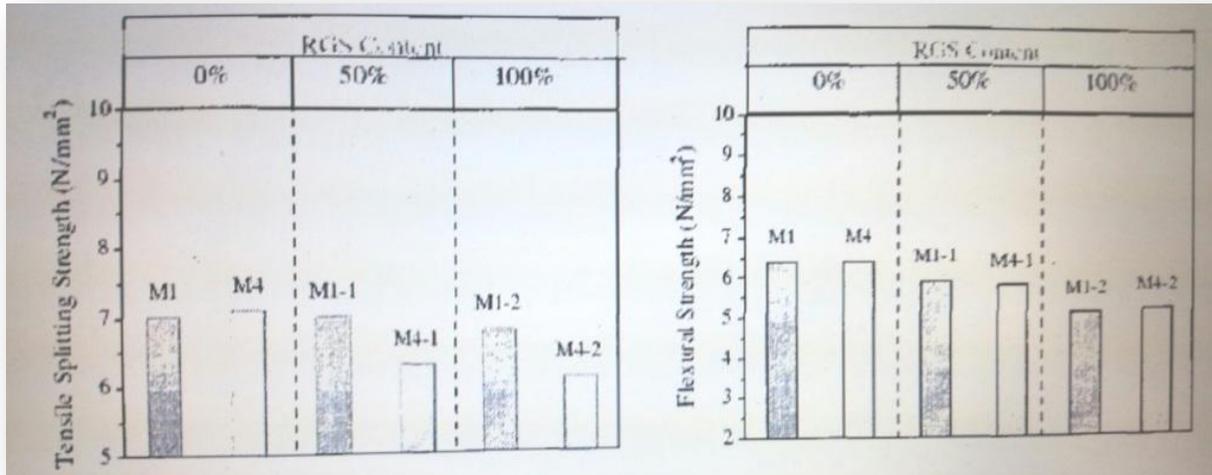


Figure I.9: Effet de la poudre de verre sur les résistances en traction et en flexion des bétons [TAHA et coll., 2008a]

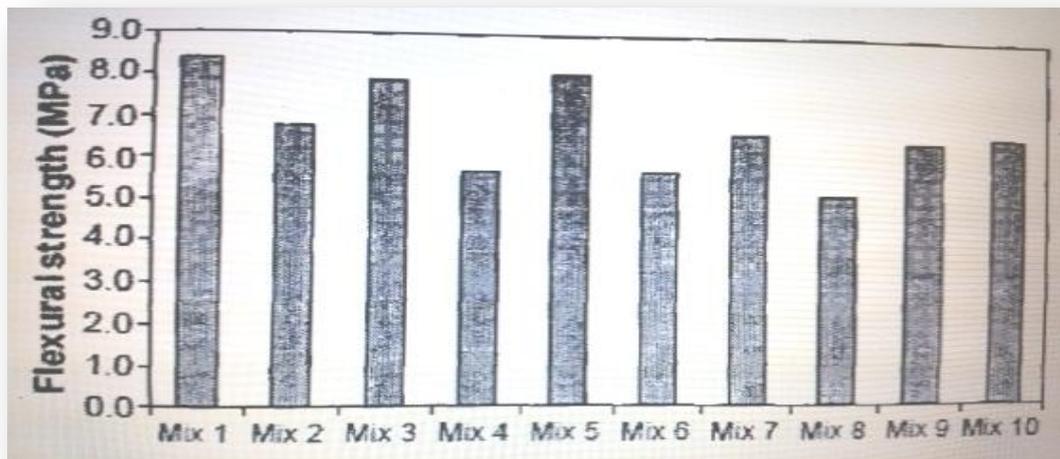


Figure I.10: la Résistance en flexion sur des prismes de bétons à 130 jours

I.9.5. [SHAYAN ET COLL., 2006] : Cette différence de tendance observée par ces chercheurs pourrait être liée aux finesses des poudres de verre étudiées et au rapport E/L, Puisque TAHA et coll. (2008a) ont utilisé une poudre de diamètre moyen inférieur à 45 μm dans des mélanges avec $E/L = 0,38$, alors que SHAYAN et coll (2006) ont utilisé une poudre de verre de finesse 800 m^2/kg dans des mélanges de $E/L = 0,49$.

Chapitre I Le ciment et les ajouts minéraux

I.9.6. LES TRAVAUX DE SCHWARZ ET COLL. (2007, 2008A ET 2008B) : ont montré que la poudre de verre améliore le degré d'hydratation du ciment Portland, diminue la porosité du béton et réduit l'interconnectivité des pores.

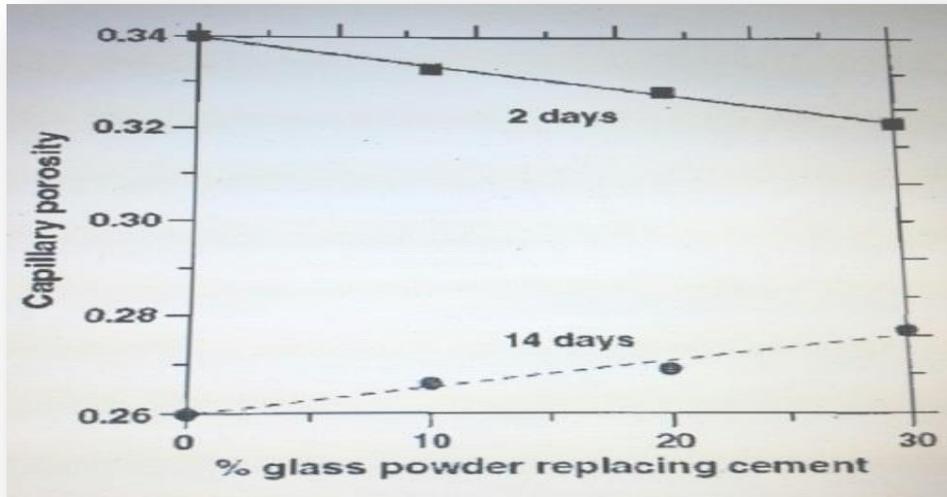
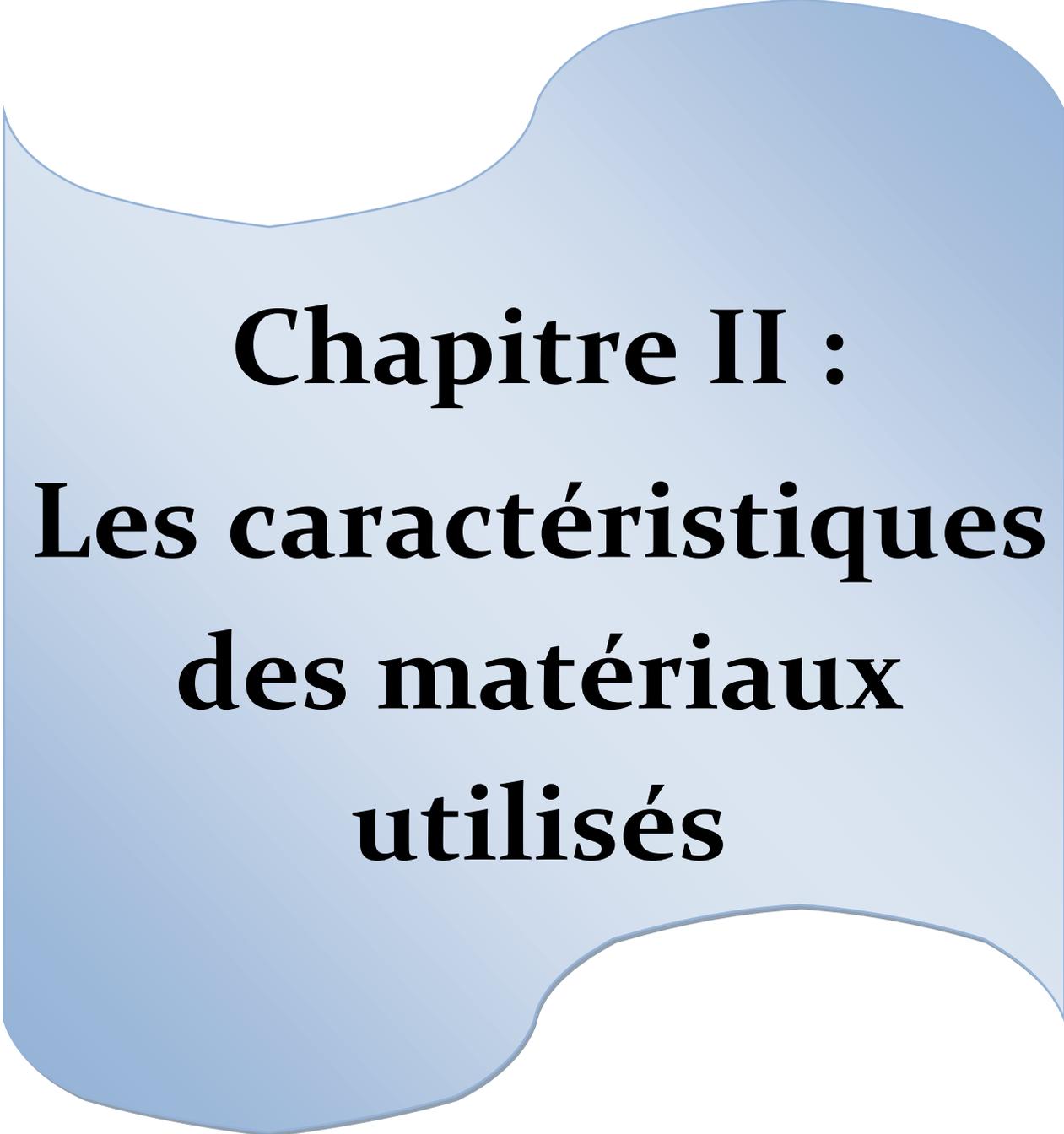


Figure I.11: Porosité capillaire en fonction du taux de substitution [SCHWARZ et coll, 2007]

D'après la figure I.11, on remarque que la porosité capillaire à 2 jours diminue en fonction du taux de substitution mais augmente à 14 jours. L'augmentation du rapport E/L effectif favorise la dispersion des grains qui occasionne la porosité élevée. Cette porosité élevée est à l'origine des faibles résistances observées dans ces mélanges de poudre de verre au jeune âge.

I.10. CONCLUSION :

Un des arguments souvent avancé en faveur de l'utilisation des ajouts minéraux est qu'ils permettent d'économiser de l'énergie et de préserver les ressources naturelles comparées au ciment Portland. Cet argument est en partie juste, mais le principal argument en l'incorporation de ces matériaux dans les mortiers et bétons est en réalité qu'ils apportent des avantages techniques considérables.



Chapitre II :
Les caractéristiques
des matériaux
utilisés

II.INTRODUCTION :

Ce deuxième chapitre a pour objectif de présenter les caractéristiques des matériaux qui ont été utilisés durant cette étude. Ensuite, nous décrirons la préparation des éprouvettes. Ainsi que les différents essais réalisés.

II.1.LES MATERIAUX UTILISES :

II.1.1.LE SABLE :

Le sable utilisé dans cette étude provient de LAGHOUAT, Le sable est le constituant du squelette granulaire qui a le plus d'impact sur les qualités du béton et du mortier , Il joue un rôle primordial en réduisant les variations volumiques, les chaleurs dégagées et le prix de revient des mortiers. Il doit propre et ne pas contenir d'éléments nocifs. Il convient de se méfier de la présence de sables granitiques, de micas en paillettes, d'argiles, de sulfates...et dans le cas de sable concassé: des poussières, des plaquettes, des aiguilles.

En vue de son utilisation dans la confection du mortier, le sable doit être soumis à des essais de laboratoire, à savoir l'analyse granulométrique, l'essai de l'équivalent de sable.

Nous tenons à rappeler quelques spécifications des normes françaises concernant les sables. Il est préférable que la courbe granulométrique du sable appartienne au fuseau proposé pour la granularité optimale de sable à mortier qui correspond à un module de finesse (MF) compris entre 2.2 et 2.8.

II.1.1.1.ANALYSE GRANULOMETRIQUE :

L'analyse granulométrique selon la norme NF EN 933-2[25]. Permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs de différentes familles de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63um.à l'exclusion des filler. L'essai consiste à classer les différent grains constituant l'échantillon en utilisant série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas .le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis, On distingue :

- Le refus désigne la partie des grains retenue dans un tamis.
- Le refus cumulé représente tous les grains bloqués jusqu'au tamis considéré (les grains du tamis considéré plus les grains bloqués dans les tamis de mailles supérieures).
- Le tamisa ou passant désigne la partie qui traverse le tamis.

Les masses cumulées des différents refus sont exprimées en pourcentage par rapport à la masse initiale de l'échantillon de granulats. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités soit numériquement soit graphiquement. Cela permet d'observer la proportion de refus cumulé ou de tamisa jusqu'à un diamètre de grain par rapport au granulats

Chapitre II Les caractéristiques des matériaux utilisés

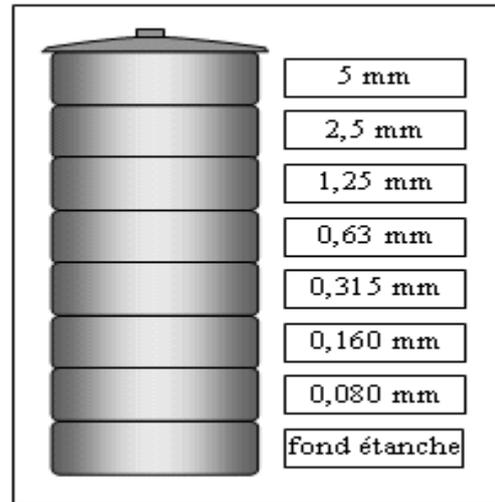


Figure II.1 : Les tamis de l'analyse granulométrique.

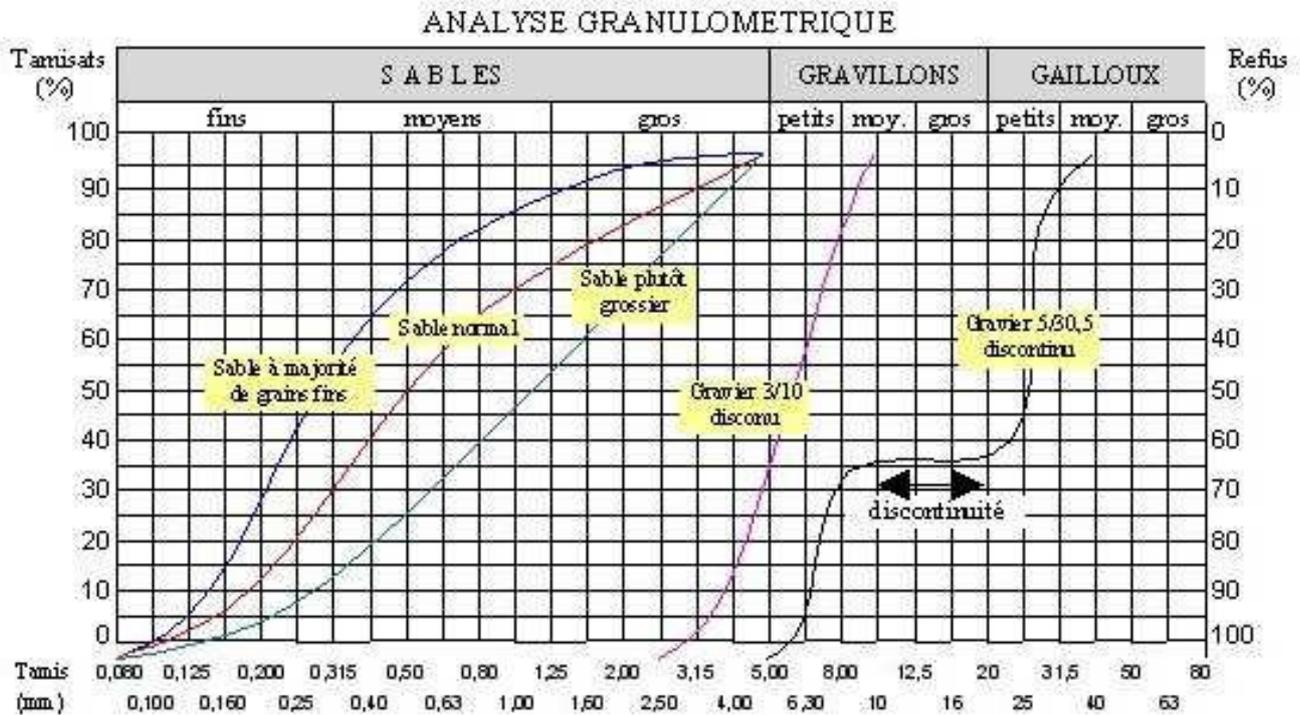


Figure II.2 : Courbe granulométrique dans différents cas

Chapitre II Les caractéristiques des matériaux utilisés

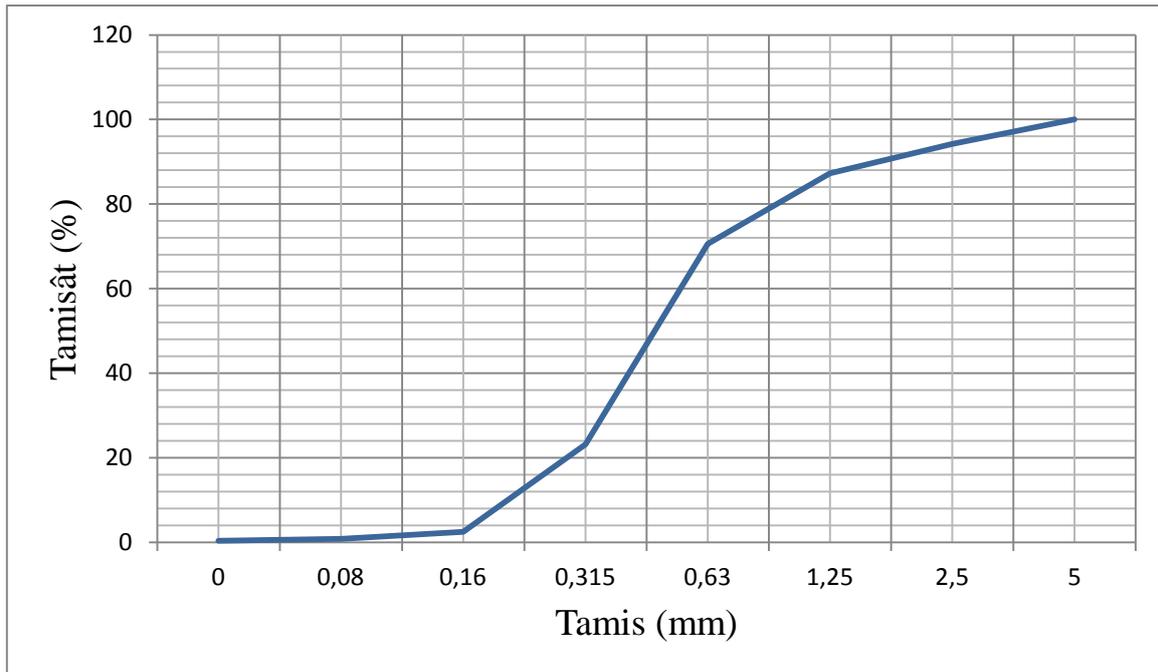


Figure II.3 : Courbe granulométrique de notre sable utilisé.

d'après la courbe de la Figure II.3, en déduire que le type de notre sable est un sable normal.

Tableau II.1 : Les résultats de l'analyse granulométrique.

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Passant (%)
5	00	00	00	100
2.5	58	58	5.8	94.2
1.25	69	127	12.7	87.3
0.63	167	294	29.4	70.6
0.315	474	768	76.8	23.2
0.16	207	975	97.5	2.5
0.08	17	992	99.2	0.8
Fond de tamis	04	996	99.6	0.4

Chapitre II Les caractéristiques des matériaux utilisés

II.1.1.2. MODULE DE FINESSE (MF) :

Par la Norme Française [NFP 18-540] :

$$Mf = \frac{1}{100} \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis (0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.5 - 5)}$$

$$Mf = \frac{1}{100} (5.8 + 12.7 + 29.4 + 76.8 + 97.5)$$

$$Mf = 2.22$$

Alors on obtenus un sable préférentiel.

II.1.1.3. EQUIVALENT DE SABLE (LA NORME NF P 18 -598) :

L'essai d'équivalent de sable utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons ou mortier, elle consiste à séparer les Particules fines contenues dans les sables. une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci. L'essai est effectuée sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier. le tamisage se fait par voie humide afin de ne pas perdre d'éléments fins. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout. au bout de 20 minutes, on mesure les éléments suivants :

- hauteur h1 : sable propre + éléments fins.
- hauteur h2 : sable propre seulement. Mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine ESV (équivalent de sable visuel) ou ES (équivalent de sable au piston).

$$ES = \frac{h2}{h1} \times 100$$

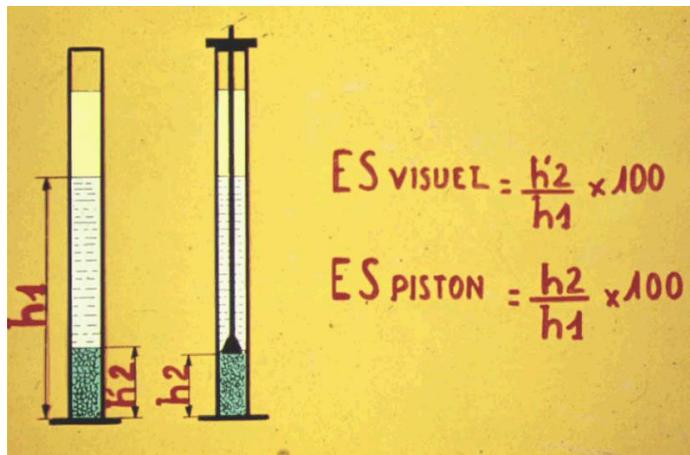


Figure II.4: Essai d'équivalent de sable

Hauteur h1 :Sable propre + élément finis.

Hauteur h2 : Sable propre seulement (piston).

Hauteur h'2 : Sable propre seulement (visuel).

Chapitre II Les caractéristiques des matériaux utilisés

Tableau II.2 : Les lectures de l'essai de l'équivalent de sable

Essai	(1)	(2)	(3)
h1	13.9	13.9	15
h'2	9.3	9.2	9.7
h2	8.5	8.9	8.3

$$ES_{piston} = \frac{h2}{h1} \times 100 = \frac{8.57}{14.27} \times 100$$

$$ES_{piston} = 60.1$$

$$ES_{visuel} = \frac{h'2}{h1} \times 100 = \frac{9.4}{14.27} \times 100$$

$$ES_{visuel} = 65.87$$

Tableau II.3: les valeurs d'équivalent de sable indiquent la nature et qualité du sable

ES à vue	ES au piston	Nature et qualité du sable
ES < 65%	ES < 60%	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité ou vérification plus précise de la nature des fines par un essai au bleu de Méthylène.
65% ≤ ES < 75%	60% ≤ ES < 70%	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton.
75% ≤ ES < 85%	70% ≤ ES < 80%	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
ES ≥ 85%	70% ≤ ES < 80%	Sable très propre. L'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

Alors notre sable est d'équivalent préférentiel pour notre étude : (Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton).

Chapitre II Les caractéristiques des matériaux utilisés

II.1.2.LE CIMENT :

Le ciment utilisé est de types : CEMI/42.5 provenant de la cimenterie de la tunisie. Commercialisé dans le marché algérien sous le nom « HRS ».

II.1.2.1.COMPOSITION CHIMIQUE ET MINERALOGIQUE DU CIMENT CPA

On a utilisé pour tous nos mélanges, un seul type de ciment. C'est un CEM I /42.5 provenant de la cimenterie de safsaf (Tunisie). Ses différentes propriétés chimiques, minéralogiques, et physiques sont données dans les tableaux II.1 et II.2 suivants :

Tableau II.4 : Analyse chimique du ciment en %

Elements	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	SO ₃	CL	PF
CEM I 42.5	20.0- 23.0	4.07- 4.80	4.70- 5.40	62.0- 65.0	0.71- 1.22	0.07- 0.18	1.00- 1.45	0.0- 0.01	≤ 3.0

Tableau II.5 : Composition minéralogique du ciment en %

Phases cristallines	C3S	C2S	C3A	C4AF
CEM I 42.5	54-65	10-35	≤ 3.0	13.45-15.80

II.1.2.2.SURFACE SPECIFIQUE ET LA MASSE VOLUMIQUE:

La finesse de mouture est caractérisée par la surface spécifique des grains de ciment (Tableau II.3), exprimée en (cm²/g). Plus la finesse de mouture est grande, plus la vitesse des réactions d'hydratation est élevée et plus ces résistances mécaniques à jeune âge sont grandes.

Tableau II.6 : la surface spécifique et la masse volumique de ciment

Type de ciment	la surface spécifique (cm ² /g)	la masse volumique (g /cm ³)
CEM I 42.5	2500-3263	3.07-3.23

II.1.3.POUDRE DE VERRE :

Au cours de cette étude, nous avons utilisé une poudre de verre provient du broyage des déchets de verre. Avec trois surfaces spécifiques : 3000 cm²/g (PV30), 4500 cm²/g (PV45) et 7000 cm²/g (PV70).

Le broyage de la poudre de verre a été effectué au niveau de laboratoire de la cimenterie de M'sila.

Les caractéristiques chimiques et physiques sont illustrées dans le tableau II-7 et II-8.

Tableau II.7: Analyse chimique de la poudre de verre

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
Verre	70.26	0.85	2.03	8.92	1.71	0.18	0.58	5.00	0.62

(Réalisé au niveau de laboratoire de la cimenterie de M'sila)

Chapitre II Les caractéristiques des matériaux utilisés

Tableau II.8: Caractéristiques physiques de la poudre de verre :

Paramètres	Densité S Blaine (cm ² /g)	Couleur
La poudre de verre	2.54	Blanc grisâtre

II.1.4. L'EAU DE GACHAGE :

L'eau de gâchage utilisée pour la confection du béton et du mortier doit être pure que Possible, elle ne doit pas contenir une quantité excessive de vase, de matières organiques, acides, sels, matières sucrées, etc...

L'eau de gâchage utilisée dans notre étude est une eau potable « eau du robinet» Fournie au laboratoire de Génie-civil à l'université de Djelfa et de laboratoire de LNHC (Laboratoire Nationale de l'Habitat et Construction).

II.2. PROTOCOLE EXPERIMENTAL :

II.2.1. CONFECTION DES EPROUVETTES ET CONDITION DE CONSERVATION :

Afin d'étudier en parallèle l'effet des différents pourcentages de poudre de verre pour un dosage en eau constant sur la résistance mécanique et l'absorption capillaire des mortiers, on a utilisé des éprouvettes de (4×4×16) cm³.

Trois séries des éprouvettes de dimensions 4x4x16 cm³ sont confectionnées pour estimer la résistance mécanique et l'absorption capillaire des mortiers.

Nous avons incorporés la poudre de verre de différents surfaces spécifique égale à 3000 cm²/g (PV30) , 4500 cm²/g (PV45) , 7000 cm²/g (PV70) comme un remplaçant de ciment à différents pourcentages (10% et 20%),

Les échantillons sont conservés dans l'eau jusqu'au jour de l'échéance.

Il est à noter que les essais mécaniques ont été effectués aux échéances : 2 et 28 jours

II.2.2. L'ABSORPTION CAPILLAIRE : (Norme : NF P10-502)

Dans le but d'étudier l'absorption d'eau des mortiers aux echeances 2, 7 et 28 jours du durcissement dans l'eau, nous avons adopté un essai généralement appliqué à des terres cuites et des pierres calcaires. Chaque formulation comprend trois échantillons de dimensions (4 × 4 × 16) cm³.

Cet essai mesure le taux d'absorption de l'eau par succions capillaires des éprouvettes de mortier, non saturées, mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique.

Avant les mesures de la Sorptivité, les spécimens seront prés conditionnés dans l'étuve à environ 105°C jusqu'à une masse constante. L'essai de Sorptivité détermine le taux ou vitesse d'absorption par remontée capillaire d'une éprouvette prismatique 40 x 40 x 160 mm³ placée sur de petits supports dans un bac contenant de l'eau suivant le schéma indiqué à la figure (3.6) de sorte que l'eau ne touche l'éprouvette que d'une hauteur de 5mm de la profondeur du bac, le reste de l'éprouvette est préalablement imperméabilisé par une résine époxydique sur toutes les autres faces. On mesure alors l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps.

Chapitre II Les caractéristiques des matériaux utilisés

Les résultats de l'essai d'absorption des différents mortiers, sont présentés en traçant toutes les droites lissées sur les segments d'augmentation des masses des éprouvettes en fonction de la racine carrée du temps.

L'équation de ces droites a la forme : $Q/A = S\sqrt{t}$

Q : La quantité d'eau absorbée en (cm³) ;

A : La surface du spécimen en contact avec l'eau (cm²) ;

t : Le temps (s) ;

S : Le coefficient de Sorptivité du spécimen (cm/s^{1/2}).

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

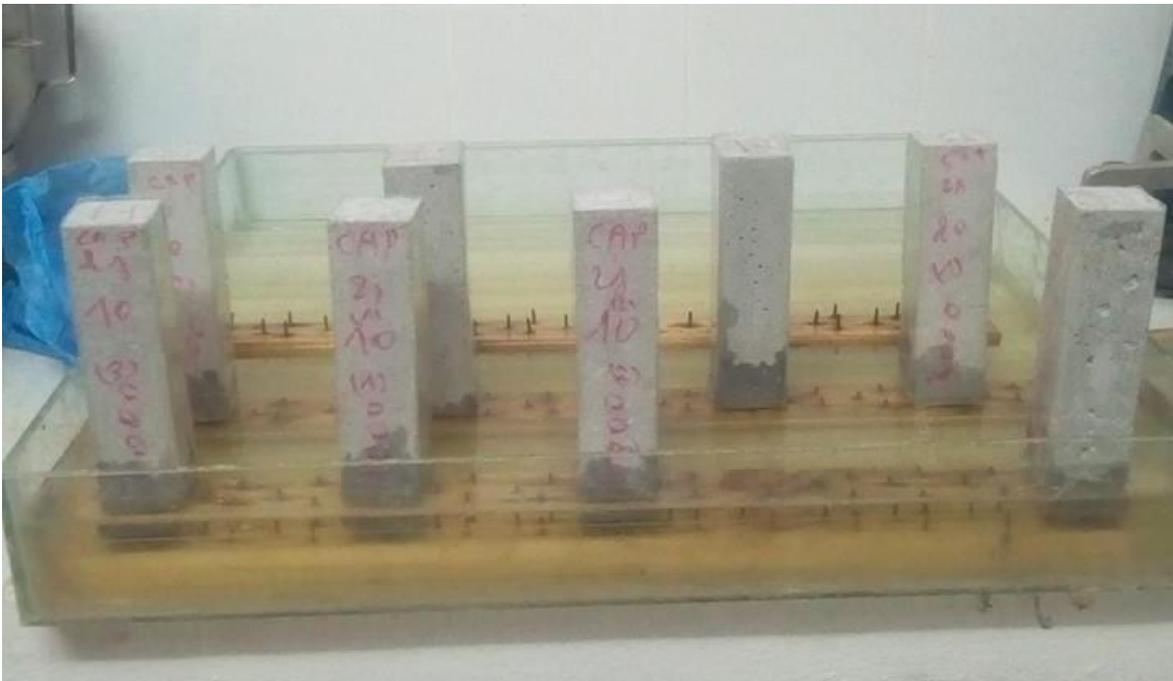


Figure II.5 : Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire.

II.2.3. LA RESISTANCE A LA COMPRESSION : (Norme NF P15-471)

La résistance à la compression des mortiers a été évaluée sur les six demi primes issues de la flexion trois-points. Les essais de compression ont été menés à l'aide d'un appareil universel de capacité 300KN disponible au niveau de laboratoire de génie civil de l'université de Djelfa.

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

$$\sigma = P/S$$

où P et S sont respectivement l'effort de rupture et la section de l'éprouvette.

Chapitre II Les caractéristiques des matériaux utilisés

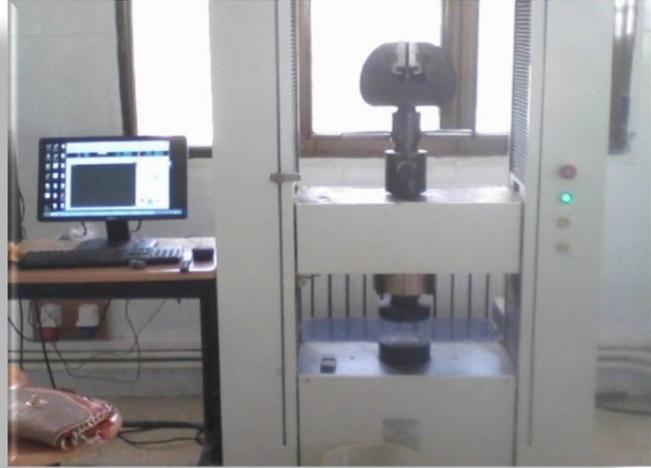


Figure II.6 : Appareil universel

Les essais de compression ont été effectués après 2 et 28 jours de durcissement dans l'eau. Ces valeurs représentent la moyenne de six essais.

II.2.4. LA RESISTANCE A LA FLEXION : (Norme NF P15-471)

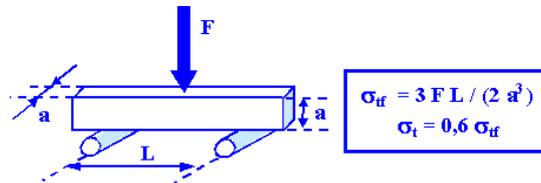
La mesure de la résistance à la flexion a été effectuée à l'aide d'un appareil disponible au niveau de laboratoire LNHC de Djelfa, pourvu d'un dispositif de flexion trois points (Figure II.7).



Figure II.7 : Appareil de flexion 3 points

Chapitre II Les caractéristiques des matériaux utilisés

Pour chaque combinaison, 3 échantillons prismatiques 40 x 40 x 160 mm³ sont testés à une vitesse de chargement constante.



II.3.CONCLUSION :

Les essais physiques, les analyses chimiques et les analyses minéralogiques effectués dans les différents laboratoires donnent une idée générale sur les caractéristiques principales des matériaux servant à la formulation des mortiers qui seront étudiés au chapitre suivant du point de vue mécanique et physique.

La connaissance de ces caractéristiques nous aide d'une façon significative à commenter les résultats des essais expérimentaux.



**Chapitre III :
Résultats et
interprétation**

III. PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES :

III.1. INTRODUCTION :

Nous présentons dans ce chapitre les résultats des différents essais effectués sur les mortiers confectionnées à base de ciment CEM I 42.5 en combinaison avec la poudre de verre de différentes finesses.

Ces résultats portent sur la résistance mécanique à la compression, la flexion aux échéances 2 et 28 jours, et l'absorption capillaire à 2, 7 et 28 jours.

Notre travail consiste à substituer une partie de ciment CPA par l'ajout de la poudre de verre, selon les formulations suivantes. Pour ceci, nous avons utilisés trois types de poudres de verre PV30 (SSB=3000cm²/g), PV45 (SSB=4500cm²/g), et PV70 (SSB=7000cm²/g)

III.2. LES MELANGES DES CIMENTS ETUDIÉS :

Les mélanges des ciments étudiés sont représentés dans les tableaux III.1

Tableau III.1: Mélange des ciments

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

III.3. RESULTATS ET INTERPRETATION :

III.3.1. ESSAIS SUR LA PATE DE CIMENT :

III.3.1.1. LA CONSISTANCE NORMALISEE :

La consistance de la pâte de ciment est sa plus ou moins grande fluidité. C'est une caractéristique qui évolue au cours du temps. Pour pouvoir étudier l'évolution de la consistance en fonction des différents paramètres, il faut pouvoir partir d'une consistance qui soit la même pour toutes les pâtes étudiées. La consistance dite "consistance normalisée" peut être déterminée par l'essai en utilisant un appareil qui s'appelle "Vicat" (figure III.1).

La distance (d) caractérise l'aptitude de la consistance de la pâte étudiée.

Afin d'étudier l'effet des différents ajouts sur la consistance du ciment, on a fixé le rapport E/L (E/L=0.28). La poudre de verre est ajoutée avec un pourcentage de 10 et 20%, pour les trois surfaces spécifiques.

Les résultats obtenus sont représentés sur la figure III.2.

Chapitre III Résultats et interprétation



Figure III.1 : L'appareil de Vicat

Tableau III.2: La consistance des ciments.

100 % CEM	6.5
90% CEM+10% PV30	7
80% CEM+20% PV30	10
90% CEM+10% PV45	8
80% CEM+20% PV45	14
90% CEM+10% PV70	8
80% CEM+20% PV70	17

Chapitre III Résultats et interprétation

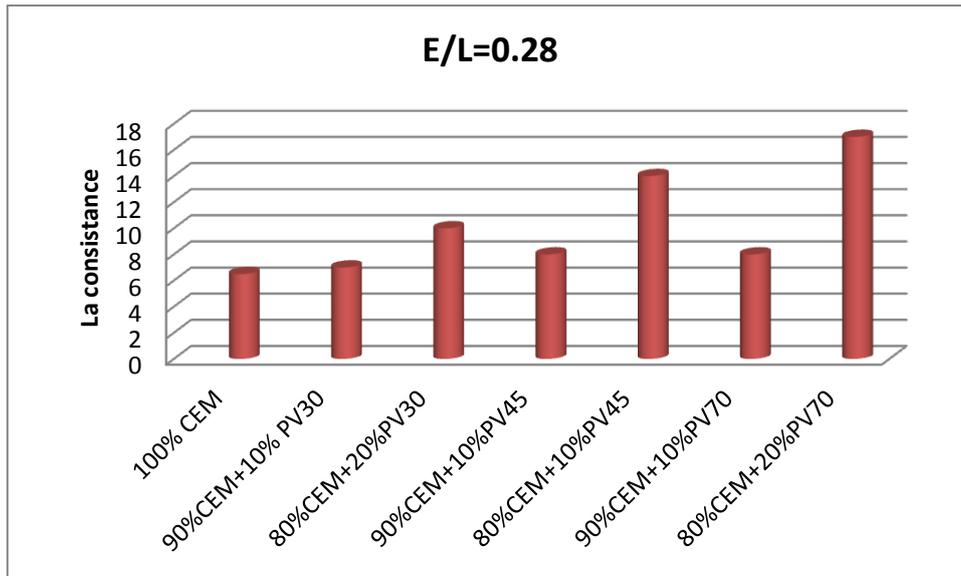


Figure III.2 : La consistance normalisée des ciments en fonction du pourcentage de la poudre de verre

D'après la figure, On remarque que l'augmentation de la teneur en verre dans les ciments augmente la demande en eau.

Lorsque la finesse de la poudre de verre augmente, la consistance diminue et la demande en eau augmente.

III.3.2.L'ABSORPTION CAPILLAIRE :

Les mortiers utilisés pour les essais de l'absorption capillaire, et confectionnés selon les combinaisons choisies sont récapitulés au tableau (III.3) (III.4) et (III.5)

Les essais de l'absorption sont effectués après 2j, 7j et 28 jours de durcissement dans l'eau.

Pour notre étude, nous utilisons les notations suivantes :

- PV30 : poudre de verre de surface spécifique égale à 3000 cm² /g.
- PV45 : poudre de verre de surface spécifique égale à 4500 cm² /g.
- PV70 : poudre de verre de surface spécifique égale à 7000 cm² /g.

Afin d'étudier l'effet de la finesse de la poudre de verre sur l'absorption capillaire des mortiers, on a fixé le rapport E/L (E/L=0.5). La poudre de verre est ajoutée avec un pourcentage de 10% et 20%, pour les trois surfaces spécifiques.

Les résultats obtenus sont représentés sur la figure III.2.

Tableau III.3: L'absorption capillaire des mortiers après 2j de cure.

temps (S1/2)	0	2.23	5.47	7.74	37.94
0%	0	0.47197132	1.29911332	1.74292767	4.70331743
10% PV30	0	0.59408664	1.43280819	1.92586938	6.16466739
20% PV30	0	0.4973065	1.25019781	1.66396463	4.85935527
10% PV45	0	0.45020247	1.09964755	1.4148335	4.63047688
20% PV45	0	0.45239935	1.14200643	1.54635455	5.32429251
10% PV70	0	0.3825716	0.99005505	1.35089094	4.57084855
20% PV70	0	0.45366774	1.16854083	1.56546908	5.07362784

Chapitre III Résultats et interprétation

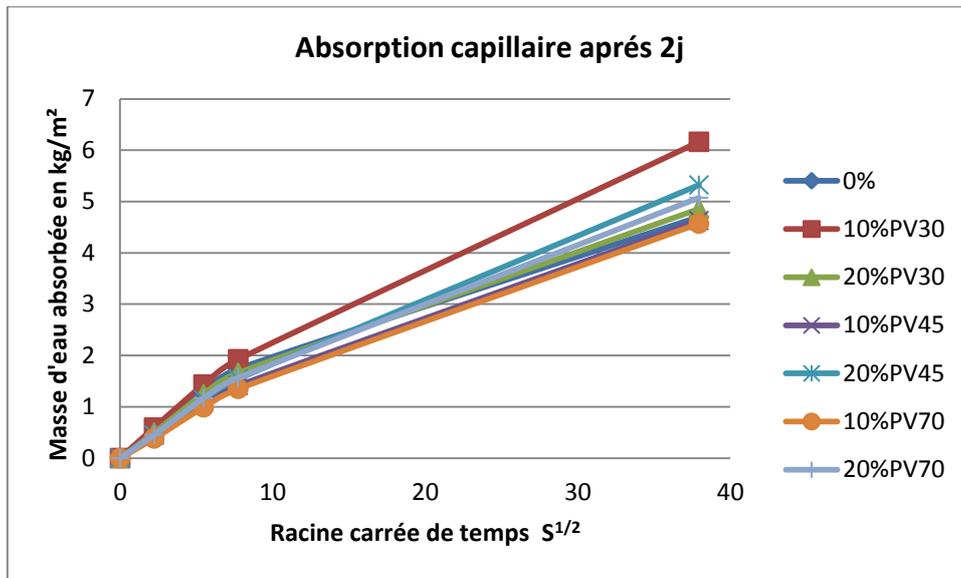


Figure III.3 : Evolution de l'absorption capillaire des mortiers après 2j de cure en fonction de \sqrt{t} .

La figure (III.3) présente l'influence de la surface spécifique de la poudre de verre sur l'absorption d'eau des mortiers aux ciments après 2 jours de cure. On remarque que l'incorporation de la poudre de verre (PV45) et (PV70) à des taux de 10% au ciment CPA est très avantageuse puisqu'elle permet une réduction importante d'absorption capillaire. Dans ce cas, les pores dans la pâte durcie et les interfaces entre cette dernière et les agrégats sont remplis par ces ajouts et les pores capillaires sont réduits, par contre l'incorporation de la poudre de verre à des taux de 20% a augmenté la sorptivité par rapport au mortier témoin.

On remarque que lorsque la finesse de la poudre de verre augmente, l'absorption capillaire diminue, ceci est expliqué peut être par la réaction pouzzolanique de la poudre de verre qui augmente en fonction de la finesse.

Tableau III.4: L'absorption capillaire des mortiers après 7j de cure.

temps ($S^{1/2}$)	0	2.23	5.47	7.74	37.94
0%	0	0.31072267	0.87444466	1.24059244	4.65119157
10% PV30	0	0.3029375	0.79724943	1.09811866	3.06746432
20% PV30	0	0.5345181	1.30341725	1.61585632	3.81088263
10% PV45	0	0.35243684	0.89686296	1.14762883	3.30558133
20% PV45	0	0.45918948	1.14448234	1.57541545	4.92429839
10% PV70	0	0.40346784	1.0072188	1.38809144	3.91222374
20% PV70	0	0.45923656	1.18486122	1.57985827	5.0690855

Chapitre III Résultats et interprétation

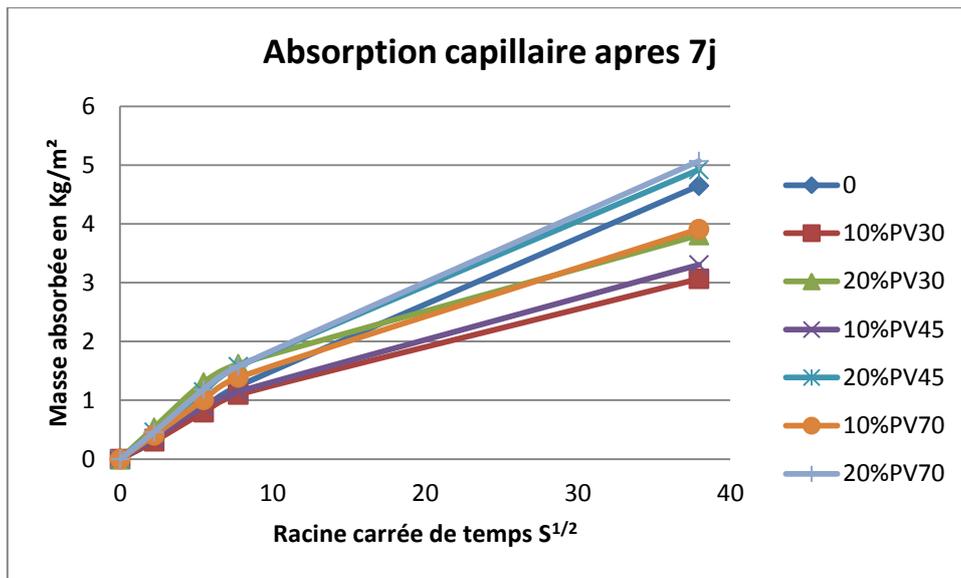


Figure III.4 : Evolution de l'absorption capillaire des mortiers après 7j de cure en fonction de \sqrt{t}

La figure (III.4) présente la comparaison de l'absorption capillaire des mortiers contenant différents pourcentages de poudre de verre. On a constaté que presque le même phénomène qui se produit et l'optimum s'obtient pour un pourcentage de 10% de PV70. On remarque aussi que lorsque la finesse de la poudre augmente, l'absorption capillaire diminue, ce qui est peut être expliqué par la réaction pouzzolanique de la poudre de verre qui diminue la porosité.

Tableau III.5: L'absorption capillaire des mortiers après 28j de cure.

temps ($S^{1/2}$)	0	2.23	5.47	7.74	37.94
0%	0	0.30239173	0.65896011	0.83871515	2.69782755
10%PV30	0	0.17741143	0.35482285	0.41402949	1.06478238
20%PV30	0	0.16715625	0.37431249	0.49951087	1.74671151
10%PV45	0	0.20401346	0.56420425	1.02319746	1.44243002
20%PV45	0	0.3046208	0.76594364	0.99213527	3.69636723
10%PV70	0	0.25349275	0.54440998	0.63422116	0.90886793
20%PV70	0	0.29349617	0.6960198	0.97262046	3.89413786

Chapitre III Résultats et interprétation

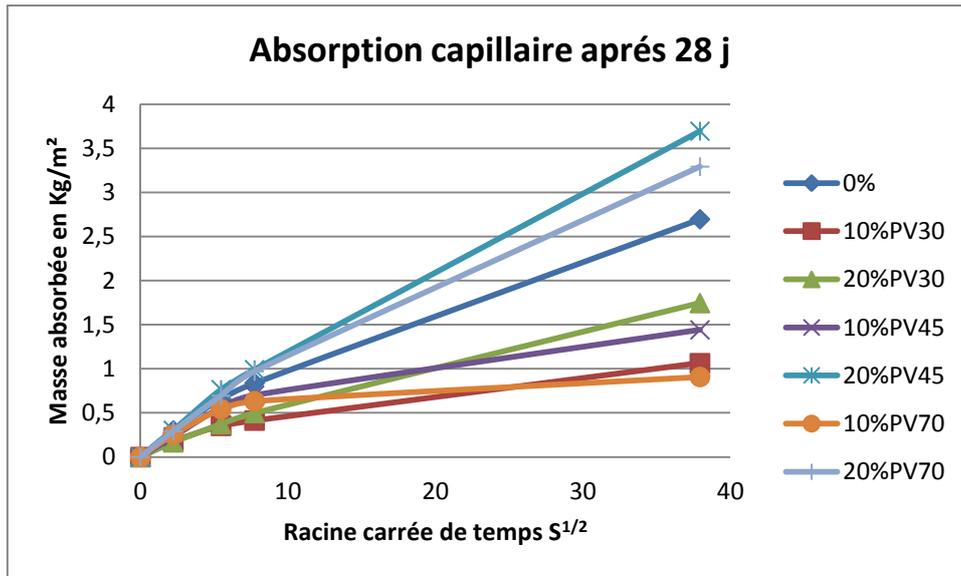


Figure III.5 : Evolution de l'absorption capillaire des mortiers après 28j de cure en fonction de \sqrt{t} .

Les résultats montrent que l'absorption capillaire augmente avec l'augmentation de la finesse de la poudre de verre, et l'optimum s'obtient pour un pourcentage de 10% de PV70. L'amélioration de la compacité peut être expliquée par l'effet physique et chimique de la poudre de verre qui augmente en fonction de la finesse de la poudre de verre. Ce dernier ajuste la granulométrie du ciment, en augmentant ainsi la compacité de la pâte (Effet physique).

Elle présente une réaction pouzzolanique avec les produits d'hydratation du clinker pour former des CS-H denses. (Effet chimique).

III.3.3.LA RESISTANCE A LA COMPRESSION :

Les éprouvettes utilisées sont des éprouvettes prismatiques de 4x4x16 cm³ confectionnées pour estimer la résistance à la compression des mortiers.

Les résultats ci-dessous donnent les valeurs de résistance à la compression des différents mortiers en fonction de pourcentage de la poudre de verre.

Tableau III.6 : La Résistance à la compression des mortiers après 2j et 28j de cure.

Temps (j)	2j	28j
0%	19.68	30.575
10 % PV30	18.475	31.42
20 % PV30	20.926	26.59
10 % PV45	19.268	31.07
20 % PV45	17.15	24.36
10 % PV70	22.336	33.036
20 % PV70	18.17	25.81

Chapitre III Résultats et interprétation

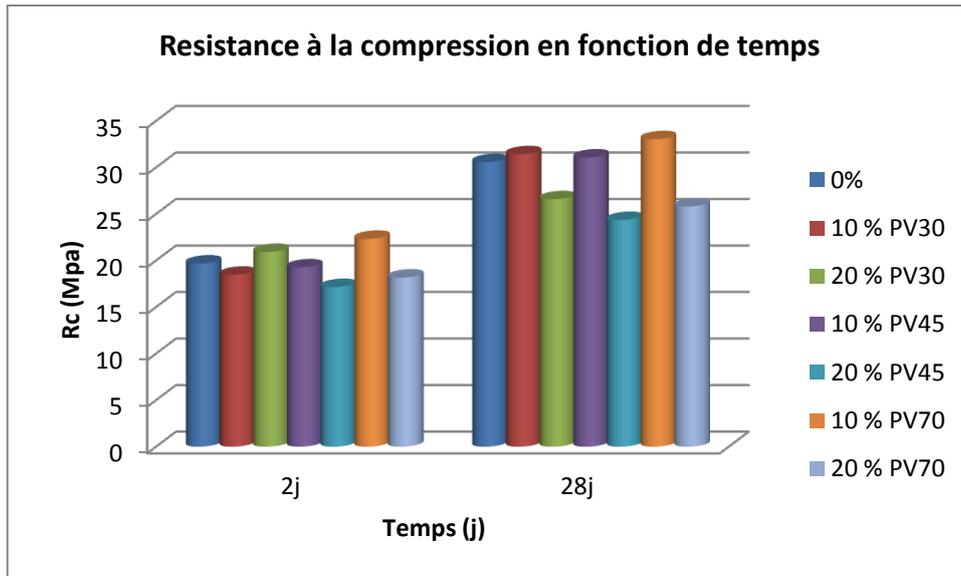


Figure III.6 : Evolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction de temps.

Les résultats des essais mécaniques obtenus pour les différentes éprouvettes des mortiers après 2 et 28 jours de durcissement sont présentés dans la Figure III.6. Ces résultats montrent que l'addition progressive de la poudre de verre dans le ciment jusqu'à 20%, a entraîné une légère diminution des résistances mécaniques par rapport à celle du témoin au jeune âge et à long terme. Ces résistances sont comparables avec celle du mortier témoin.

Les mortiers élaborés avec 10% de poudre de verre développent des résistances légèrement supérieures par rapport à celle du mortier témoin au jeune âge et à long terme. Cette augmentation est en fonction de la finesse de la poudre de verre, et l'optimum s'obtient pour 10% de (PV70).

Cette amélioration de la résistance peut être expliquée par l'effet physique et chimique de la poudre de verre. La poudre de verre ajuste la granulométrie du ciment, ainsi elle augmente la compacité de la pâte (effet physique).

Elle présente une réaction pouzzolanique avec les produits d'hydratation du clinker pour former des CS-H denses responsables de la résistance. (effet chimique)

III.3.4. LA RESISTANCE A LA FLEXION :

Les éprouvettes utilisées sont des éprouvettes prismatiques de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ confectionnées pour estimer la résistance à la flexion des mortiers.

Les résultats ci-dessous donnent les valeurs de résistance à la flexion des différents mortiers en fonction de pourcentage des ajouts.

Chapitre III Résultats et interprétation

Tableau III.7: La Résistance à la flexion des mortiers après 2j et 28j de cure.

temps (j)	2j	28j
0%	11.563	17.948
10 % PV30	15.521	18.646
20 % PV30	15.156	15.542
10 % PV42	12.968	17.635
20 % PV42	5.938	14.635
10 % PV70	7.687	18.521
20 % PV70	6.188	15.188

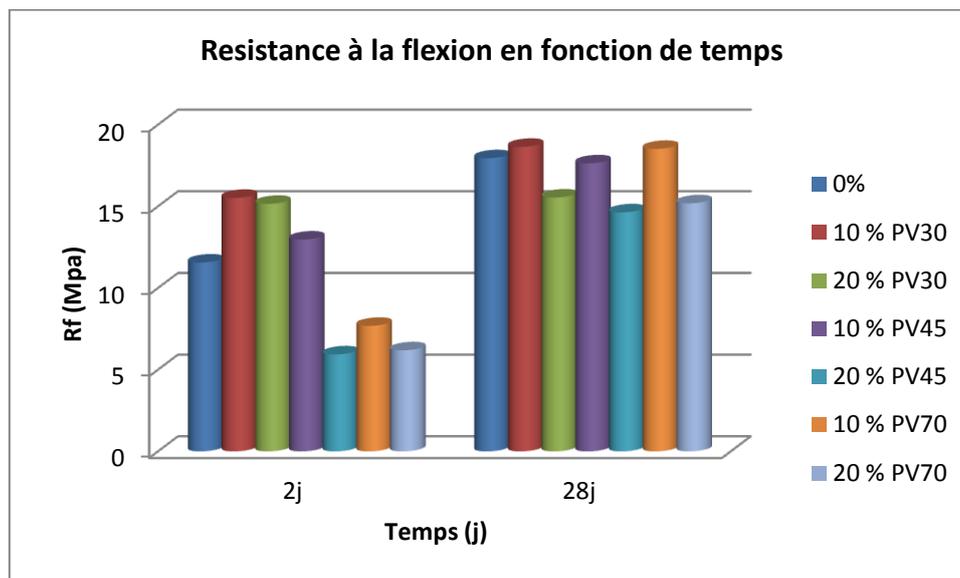


Figure III.7 : Evolution de la résistance à la flexion des mortiers en fonction de temps.

L'évolution de la résistance à la flexion des mortiers confectionnés selon les différentes combinaisons CPA / PV est présentée à la figure (III.7).

On remarque que, à 28 jours, l'incorporation de la poudre de verre à des taux de 10 % augmente nettement la résistance à la flexion des mortiers, ceci est du probablement à la finesse de la poudre de verre qui a augmenté la réaction pouzzolanique pour former des C-S-H supplémentaires et la combinaison (90% CPA/10% PV70) semble la plus efficace.

III.3.5. Evaluation de l'activité pouzzolanique de la poudre de verre :

L'indice de pouzzolanité est une façon d'évaluer la réactivité pouzzolanique du verre dans les mortiers à différents âges.

$$I (\%) = (R_X/R_C) * 100$$

Ou : R_X et R_C sont les résistances en compression des mortiers contenant du verre et celle de témoin, respectivement

Chapitre III Résultats et interprétation

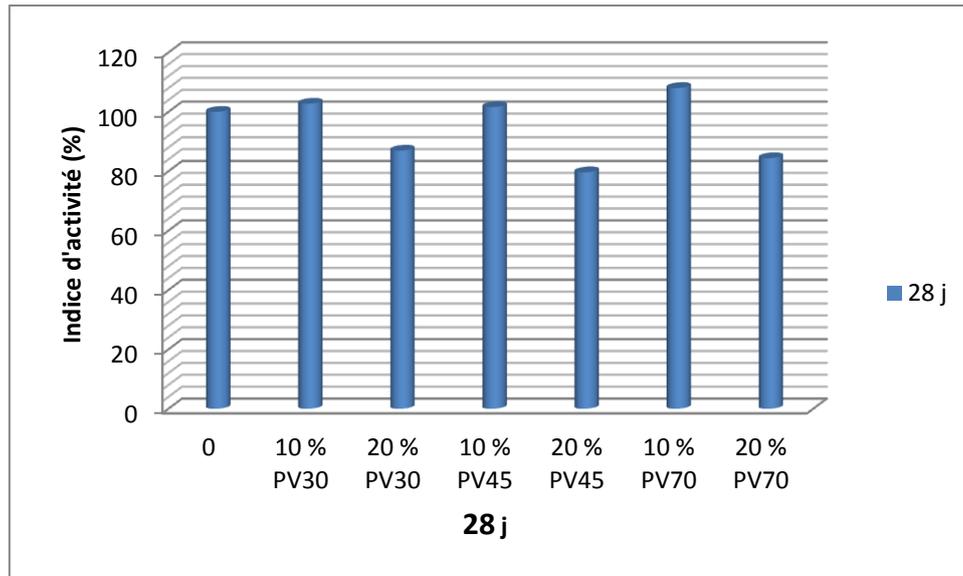


Figure III.8 : Activité pouzzolannique de la poudre de verre après 28 j.

Les résultats montrent que la réactivité pouzzolannique augmente avec l'augmentation de la finesse de la poudre de verre, et l'optimum s'obtient pour un pourcentage de 10% de PV70.

III.4.CONCLUSION :

A la lumière de ce qui précède, on remarque que l'incorporation d'ajout minéral actif (Poudre de verre) au ciment CPA, contribue d'une façon positive sur les performances mécaniques et la physique des mortiers confectionnés selon les différentes combinaisons. Il permet une amélioration de la résistance mécanique des mortiers qui égale ou surpasse celle du mortier contrôle à court et à long terme, réduisent l'absorption capillaire en diminuant la porosité de la pâte de ciment durcie et augmentent la résistivité de ces mortiers.

CONCLUSION GENERALE :

Ce présent travail de recherche s'inscrit dans le cadre de valorisation des déchets, il a traité l'influence de la finesse de poudre de verre sur les caractéristiques physiques et mécaniques des mortiers.

Les résultats obtenues nous amène à conclure les points suivants :

- ✚ La consistance normalisée est obtenue pour un rapport E/L égal à 0.28
- ✚ La variation de pourcentage de la poudre de verre de 10 à 20% a une influence sur la consistance des pâtes à base de CPA.
- ✚ La consistance des pâtes diminue en fonction de l'augmentation de la finesse de la poudre de verre
- ✚ Pour une substitution de 20% de PV70, La pâte demande une quantité d'eau supplémentaire pour le mouillage.
- ✚ L'absorption capillaire des mortiers diminue en fonction de l'augmentation de la finesse de la poudre de verre
- ✚ La réaction pouzzolanique de la poudre de verre augmente avec la finesse
- ✚ Une substitution de 10% de poudre de verre (PV70) augmente significativement la résistance à la compression des liants à tous les âges.
- ✚ Pour les ciments ternaires, la combinaison (10 % PV45, 10 % L) améliore la résistance à la compression des liants à tous les âges.
- ✚ Une substitution de 10% de poudre de verre (PV70) s'avère favorable.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]- **AMOURI Chahinez** , " Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité). Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine en 2009.
- [2]- **Ben Khadda BEN AMMAR** ; 'Effet de l'étuvage par énergie solaire sur les propriétés mécaniques, la déformabilité et la durabilité des bétons', Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider , Biskra, en 2014
- [3]- **Senisna Zoubida, Chaouche Hanane;** " 'Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux', mémoire de master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, en 2011.
- [4]- **Fatima-Zohra DAKHMOUCHE CHABIL,** " CARBONATATION DE BETONS ADJUVANTES A BASE DE RESSOURCES LOCALES ALGERIENNES'. Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine en 2009.
- [5]- **BELHOCINE AIDA, NAGOUDI NADJAT** ; " Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts Minéraux', mémoire de master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, en 2014
- [6]- **BENIA Mounir,** " Influence de la surface spécifique des ciments aux ajouts minéraux sur le comportement mécanique du mortier et du béton à base de matériaux locaux. Magistère , UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF DE M'SILA.
- [7]- **Toufik Boubekour1, Bensaid Boulekbache1, Ali Makhelouf** ; "INFLUENCE DU LAITIER SUR LES PROPRIETES DES CIMENTS A BASE DE CALCAIRE, Département de Génie Civil, Université de Chlef.
- [8]- **Rachida IDIR** ; "Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique. DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE.
- [9]- **BEGHOURA IMED, TOUATI ISSAM** ; "Contribution à la formulation des BHP à base des matériaux locaux', Université Mohamed El bachir Elibrahimi, Bordj Bou Arreridj, en 2015.

[10]- Salim guatala, "Contribution à l'étude de l'influence de l'ajout du sable de dune finement broyé au ciment, sur les performances physico-mécaniques, la déformabilité & la durabilité du béton. Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra en 2012.

[11]- Fayçal Aladdine, "Propriétés à l'état frais, à l'état durci et durabilité des bétons incorporant du verre finement broyé " Mémoire de maîtrise es sciences appliquées, Université de SHERBROOKE, Canada, en 2009.

[12]- SCHWARZ ET COLL ; "influence de la poudre de verre sur les caractéristiques de béton ", Centre M'Tir Enquête sur la recherche et l'analyse ZUMA, Mannheim, République fédérale d'Allemagne.