

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULoud MAMMERI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



Mémoire de Master

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures



PREMIER OUVRAGE AU MONDE EN
BETON DE POUdRES REACTIVES

THEME

Poudre de verre dans le béton

Présenté par :

Mme Achili kahina

Encadré par :

Monsieur Mehaddene

Année 2016 /2017

Remerciements

Je tiens à remercier d'abord mon promoteur **Monsieur MEHADDENE**, qui m'a proposé ce sujet et qui m'a encadré et dirigé avec beaucoup d'attention et de disponibilité tout au long de ce travail.

Mes vifs remerciements vont égale mentaux membres du **jury Monsieur DAHMANI et Monsieur GOULEM** pour l'intérêt qu'il sont porté à mon travail en acceptant de l'examiner et de l'enrichir avec leurs propositions et leurs remarques.

Je souhaiterai remercier tous mes collègues et à tous mes amis en particulier **Mme MAZOUNI et Mr SOUSI** pour leur encouragement et leur soutien.

Qu'il me soit enfin permis de remercier toute ma famille spécialement ma **mère** et mon cher **Marie** pour leur appui et attention sans faille et leur amour inconditionnel qui m'accompagnent depuis toujours ; qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde gratitude.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

A la mémoire de mon père

A ma très chère mère

A Mon marie

A mes enfant Aksil et Iliana

A toute ma famille

A ma belle famille

Résumé :

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 réutiliser 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. Pour cela, la poudre de verre peut devenir un débouché commercial très important.

Summary:

The environmental problem posed by non-biodegradable waste, such as non-reusable bottles (glass), becomes a major concern in view of the huge amounts produced in large cities. One of the few ways of recycling such waste is reused in the methods of Construction (concrete). Thus, glass is some material rich in silica and sodium. Its use in a cement matrix causes two reactions to the contrary: the harmful alkali silica reaction for concrete by swelling it generates and the pozzolanic reaction is beneficial. For this, the glass powder can become a very important outlet.

SOMMAIRE

I. Introduction	1
II. POUDRE DE VERRE DANS LE BETON	
II.1 Introduction.....	4
II.2 Réaction alcali-granulat.....	4
II.3 Réaction pouzzolanique	7
III. CARACTERISATION DU VERRE	
III.1 Introduction	15
III.2 Définition de verre.....	17
III.3 Composition de verre	22
III.4 Granulométrie (la taille des grains de verre).....	25
IV. CARACTERISATION DU BETON AVEC AJOUT DE LA POUDRE DE VERRE	
IV.1 Temps de prise de la pâte de ciment	32
IV.2 Résistance en compression de béton binaire	35
IV.3 Résistance en compression de béton tertiaire	51
IV.4 Perméabilité aux ions chlorures	52
V. Conclusion	55

Liste des figures

I.1 : Déchets de verre jetés dans la nature.....	1
I.2 : Séparation des déchets par leurs natures (plastique, verre et papier)	1
I.3: Exemples d'utilisation de la poudre de verre.....	3
I.4 : Exemples d'utilisation d'agrégats de verre	3
II.1 : Représentation Schématique d'un mécanisme possible entraînant dégâts lors de réaction alcali-silice (Sprung et Sylla 1998).....	6
II.2 : Image pouzzolane naturelle.....	7
II.3 : Microstructure de ciment référence à 7 et 28 jours (Sobolev et al, 2004).....	9
II.4 : Microstructure d'éco-ciment contenant 50% de verre bouteille vert à 7 et 28 jours (Sobolev et al, 2004)	10
II.5 : Effet de lavage du verre sur la résistance en compression (Byars ,2003).....	11
II.6 : Résistance en compression des cubes de mortier contenant différents pourcentages de verre à 28 jours (avec la surface spécifique de 800m ² Kg) en remplacement de ciment (SHAYAN et Xu, 2002).....	12
II.7 : Schéma récapitulatif illustrant les deux réactions : alcali- granulat et pouzzolanique	14
III-1 : Image à Ouagnoun on 2016	15
III-2 : La fleur permaculturelle	16
III.3 a) Structure en anneau de la Cristobalite ; b) Modèle proposé par Zachariassen : les tétraèdres continuent d'exister en formant un réseau continu irrégulier et sont désorientés dans les trois dimensions.....	17

III.4 : représentation schématique bidimensionnelle de la silice cristalline (cristobalite) (Philip Gibbs 1996).....	18
III.5 : représentation schématique bidimensionnelle de la silice vitreuse (Philip Gibbs 1996)	18
III.6 : (a) l'empilement des atomes de la silice amorphe. (b) l'adjonction de Na ₂ O et CaO brise des liaisons dans la silice amorphe et donne naissance au verre sodocalcique	20
III.7 : Rupture d'un pont Si-O-Si par adjonction d'une molécule de ModificateurNa ₂ O (10)	21
III.8 :a) verre débarrassé de ses impuretés b) impuretés du verre (papiers, plastiques).....	22
III.9 : Image de ciment courant.....	23
III.10 : Image de la poudre de verre.....	23
III.11 : Composition chimique du ciment.....	24
III.12 : Composition chimique de la poudre du verre.....	24
III.13 : La distribution de taille de particule de la poudre de verre et du ciment.....	25
III.14 : Illustration de l'effet pessimum comme résultat de deux processus	27
III.15 : Expansion des éprouvettes de mortiers avec des verres différents Couleurs [YAMADA et coll., 2005].....	28
III.16 : Expansion a 14 jours d'éprouvettes de mortiers avec 10 % ou 100% de verre de différentes tailles [XIE et coll., 2003].....	29
III.17 : Expansion dans le temps d'éprouvettes de mortiers en fonction diamètre des grains de verre (MEYER et coll., 1997).....	29
III.18 : procédures d'obtention des différentes classes de verre.....	30
III.19 : Distributions granulométriques des classes C6-C7 et C8	31

IV.1 : Appareil de Vicat	33
IV.2 : Diagramme de prise du ciment	33
IV.3 : le temps du début de prise en fonction de la teneur en poudre de verre	34
IV.4 : Résistance en compression de mortier témoins et ceux contenant 10 et 15% de V70 (E/C=0.485).....	36
IV.5 : Résistance en compression de mortier témoin et ceux contenant 10 ET 15% de V70 (E/C = 0.45)	37
IV.6 : Résistance en compression de mortier témoin et ceux contenant 10 ET 15% DE V70 (E/L=0.35+SP).....	38
IV.7 : Résistance en compression de mortier témoin et ceux contenant 10 et 15% de V70 (E/L=0.45+réducteur d'eau).....	39
IV.8 : Résistance en compression de mortier témoin et ceux contenant 10, 15 et 30% de V40 (E/L = 0.485).....	40
IV.9 : Résistance en compression de mortier témoin et ceux contenant 10, 15 et 30% de V200 (E/L = 0.485).....	41
IV.10 : Résistance en compression de mortier témoin et ceux contenant 10, 15 et 30% de V40 (E/L=0.45).....	42
IV.11 : Résistance en compression de mortier témoin et ceux contenant 10, 15 et 30% de V200 (E/L=0.45).....	43
IV.12 : Résistance en compression de mortier témoin et ceux contenant 10, 15 et 30% de V40 (E/L=0.45+Réducteur d'eau)	44
IV.13 : Résistance en compression de mortier témoin et ceux contenant 10 , 15 et 30% de V200 (E/L=0.45 + Réducteur d'eau)	45

IV.14: Résistance en compression de mortier témoin et ceux contenant 10, 15 et 30% de V40 (E/L=0.35 + SP)	46
IV.15 : Résistance en compression de mortier témoin et ceux contenant 10, 15 et 30% de V200 (E/L=0.35 + SP)	47
IV.16 : Résistance en compression de mortier témoin et ceux contenant 10, 20, 30 et 40% de V200 (C4) [20]	49
IV.17 : Résistance en compression de mortier témoin et ceux contenant 10, 20, 30 et 40% de V70 (C6) [20]	50
IV.18 : Résistance en compression de mortier témoin et ceux contenant 10, 20, 30 et 40% de V40 (C8) [20]	50
IV.19 : Résistance en compression de témoin et ceux contenant 15, 20 et 30% de V40 + 5% de la fumée de silice (E/L=0.35+SP)	52
IV.20 : Dispositif expérimental de l'essai de diffusion aux ions chlorures	53
IV.21 : perméabilité aux ions chlorures du béton témoin et ceux contenant 15% des V ₄₀ et V ₂₀₀	53

Liste des tableaux :

III.1: Composition chimique des matériaux de cimentation [13]	23
III.2: Appellations des différentes fractions granulaires de verre.....	30
IV.1 : le début et la fin de prise.....	34
IV.2 : composition des mélanges des mortiers témoin et ceux contenant 10 et 15% de V70 (E/C=0.485)	35
IV.3: composition des mélanges des mortiers témoin et ceux contenant 10 et 15% de V70 (E/C=0.45)	36
IV.4: composition des mélanges des mortiers témoin et ceux contenant 10 et 15% de V70 (E/C =0,35 +SP)	37
IV.5: composition des mélanges des mortiers témoin et ceux contenant 10 et 15% de V70 (E/C =0,45 +Réducteur d'eau).....	38
IV.6 : composition des mélanges des mortiers témoin et ceux contenant 10, 15 et 30% de V40 (E/C =0,485).....	39
IV.7: composition des mélanges des mortiers témoin et ceux contenant 10, 15 et 30% de V200 (E/C =0,485).....	40
IV.8: composition des mélanges des mortiers témoin et ceux contenant 10, 15 et 30% de V40 (E/C =0,45).....	41
IV.9: composition des mélanges des mortiers témoin et ceux contenant 10, 15 et 30% de V200 (E/C =0,45).....	42
IV.10: composition des mélanges des mortiers témoin et ceux contenant 10, 15 et 30% de V40 (E/C =0,45 +Réducteur d'eau).....	43

IV.11: composition des mélanges des mortiers témoin et ceux contenant 10, 15 et 30% de V200 (E/C =0 ,45 +Réducteur d'eau)	44
IV.12 : composition des mélanges des mortiers témoin et ceux contenant 10, 15 et 30% de V40 (E/C =0 ,35 +SP).....	45
IV.13: composition des mélanges des mortiers témoin et ceux contenant 10, 15 et 30% de V200 (E/C =0 ,35 + SP).....	46
IV.14: composition de mélange et des mortiers témoin et ceux contenant 15, 20 et 30% V40 + 5% de fumée de silice (E/C= 0.35+SP)	51

Chapitre I

Introduction générale

Introduction générale

La plupart des industries modernes se basent essentiellement sur les déchets de la société en les utilisant comme matière première pour la fabrication des produits finis. Le verre, le plastic, le papier, etc.... sont ramassés, triés, lavés et séchés puis utilisés. Figure I .1



Figure I .1 Déchets de verre jetés dans la nature

Pour illustrer l'importance qu'a pris les déchets dans l'approvisionnement de la matière première, les corbeilles qu'ont mis les autorités à la disposition des citoyens sur lesquelles on peut lire le nom de la matière à mettre dedans en est un parfait exemple. Figure I .2



Figure I .2 : Séparation des déchets par leurs natures

Introduction générale

Le béton qui est de loin et pour longtemps encore, le matériau le plus utilisé sur la planète nous offre une opportunité pour la réutilisation des déchets de verre sous forme de poudre.

Améliorer la performance du béton tout en réduisant l'empreinte écologique liée à sa fabrication devient alors un enjeu important.

Relevant ce défi, l'équipe du professeur Arezki Tagnit-Hamou de l'Université de Sherbrooke a développé une innovation majeure pour l'utilisation de nano silice dans la fabrication du béton de haute performance.

Sa solution : remplacer la fumée de silice, un matériau peu accessible, par des nanopoudres de verre provenant de déchets recyclés disponibles localement et abondamment (considérablement)

Avantage:

- Béton plus performant, moins perméable et plus durable
- Substitution de matière polluante par du verre recyclé
- Coûts de transformation et de transport réduits
- Empreinte écologique réduite
- Nouvelle filière pour le recyclage du verre

En subissant un léger concassage, le verre peut être utilisé comme granulats dans le béton. Ce traitement a l'avantage de présenter un faible coût mais peut entraîner une réaction néfaste pour la structure. Qualifiée de "**cancer des bétons**", la réaction alcali-silice (RAS) est le résultat de la réaction de la silice amorphe d'un granulats avec les ions hydroxydes et alcalins présents dans la solution interstitielle du béton. Cette réaction donne naissance à un gel gonflant provoquant la fissuration du béton et dans certains cas sa destruction.

Un broyage prolongé laisse envisager une utilisation en tant que liant [19]. [33]. Dans ce cas-ci, la silice du verre réagit avec la chaux produite par la réaction du ciment, créant des composés dotés de propriétés liantes: c'est la réaction pouzzolanique.

L'intégration de la poudre de verre comme ajout cimentaire engendre

- Meilleure imperméabilité
- Durabilité accrue à long terme
- Matière de couleur blanche à l'état naturel
- Amélioration du bilan de carbone en favorisant

Introduction générale

la valorisation de matériaux recyclables.

- Proximité de la source d'approvisionnement
- Accroissement de la résistance en compression

Exemples d'utilisation de la poudre de verre :

- Béton pour la construction de trottoirs municipaux
- Utilisation de la poudre dans le pavé uni
- Intégration de la poudre de verre dans les peintures, les encres, etc.....



Figure I.3 Exemples d'utilisation de la poudre de verre.

Exemples d'utilisation d'agrégats de verre :

- Intégration dans les dalles de béton des planchers de succursales (SAQ Sélection Kirk and)
- Paillis de verre pour aménagement paysager



Figure I.4 : Exemples d'utilisation d'agrégats de verre

Chapitre II

POUDRE DE VERRE DANS LE BETON

II.1 : Introduction

Les réactions alcali-silice et pouzzolanique impliquent les mêmes composés silice, alcalins, calcium et hydroxydes et produisent des gels amorphes. D'une part les granulats contenant de la silice amorphe peuvent réagir avec les alcalins du ciment dans la solution interstitielle des pores de béton, quand celui-ci est exposé à des conditions d'humidité [1] le produit de réaction est un gel silico-alcalin qui peut entraîner des expansions et des fissures dans le béton (la réaction alcali-silice). D'autre part, dans les mêmes conditions, les mêmes matériaux finement broyés peuvent réagir avec la chaux libre du ciment, formant ainsi des hydrates ayant des propriétés liantes (réaction pouzzolanique) [2], [3] (MASSAZZA, 1976 ; SERSALE, 1980). La réaction pouzzolanique permet d'améliorer les propriétés du béton, notamment le durcissement et la durabilité. Il est aujourd'hui reconnu qu'elle représente l'un des meilleurs moyens de réduire les expansions du béton contenant des granulats alcali-réactifs. Pour les deux réactions, les matériaux sont plus réactifs quand leur cristallinité est faible [4],[5] (MASSAZZA et coll., 1980 ; FOOKES ET AL., 1981).

II.2 : REACTION ALCALI-GRANULAT:

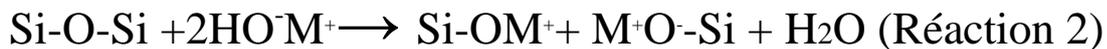
La réaction entre les ions hydroxydes dans les pores de béton et certaines formes de silice des granulats produit un gel et une expansion qui peuvent réduire certaines propriétés du béton. Quand cette réaction se développe suffisamment, elle peut provoquer la dilatation, la microfissuration résultant ainsi de la détérioration du béton. Cette réaction est dite réaction alcali-Granulat. (MENDES ET YOUNG 1981). [6]

Mécanisme de la réaction alcali-silice :

Selon (Poo 1992) [7] , la réaction ALCALI- SILICE se produit comme suit : Les minéraux qui composent le béton peuvent présenter plusieurs formes de silice diversement réactives SILANOL (SI-OH) est le 1^{er} à réagir avec les hydroxydes ALCALINS de la solution interstitielle ; [7]



L'attaque sur les ponts siloxane (Si-O-Si) situés plus profondément a lieu ensuite :



Avec (M = Na ou K)

De façon simplifiée, selon (Poo, 1992) [7] l'évolution de la réaction peut être détaillée comme suit (figure II.1):

- 1-Concentration des alcalins dans la solution interstitielle lors de la progression de l'hydratation.
- 2-Migration des ions OH⁻, Na⁺ et K⁺ de la solution interstitielle vers la silice réactive des granulats.
- 3-Réaction des hydroxydes alcalins avec l'acide silicique réactif.
- 4-Formation d'un gel de silice alcalin susceptible de gonfler.
- 5-Dans quelques cas, transformation du gel en silicate de calcium hydraté alcalin gonflant, qui, sous forme de membrane ou couche semi-perméable sur la surface, laisse passer de préférence les ions Na⁺ et K⁺ ainsi que l'eau.

POUDRE DE VERRE DANS LE BETON

6-Formation à l'intérieur des granulats de gel de silice alcalin susceptible de gonfler.

7-Poursuite de la réaction et absorption d'eau augmentant la pression intérieure.

8-Fissuration et écoulement du gel lorsque la pression intérieure est supérieure à la résistance à la traction des granulats et de la pâte de ciment durcie

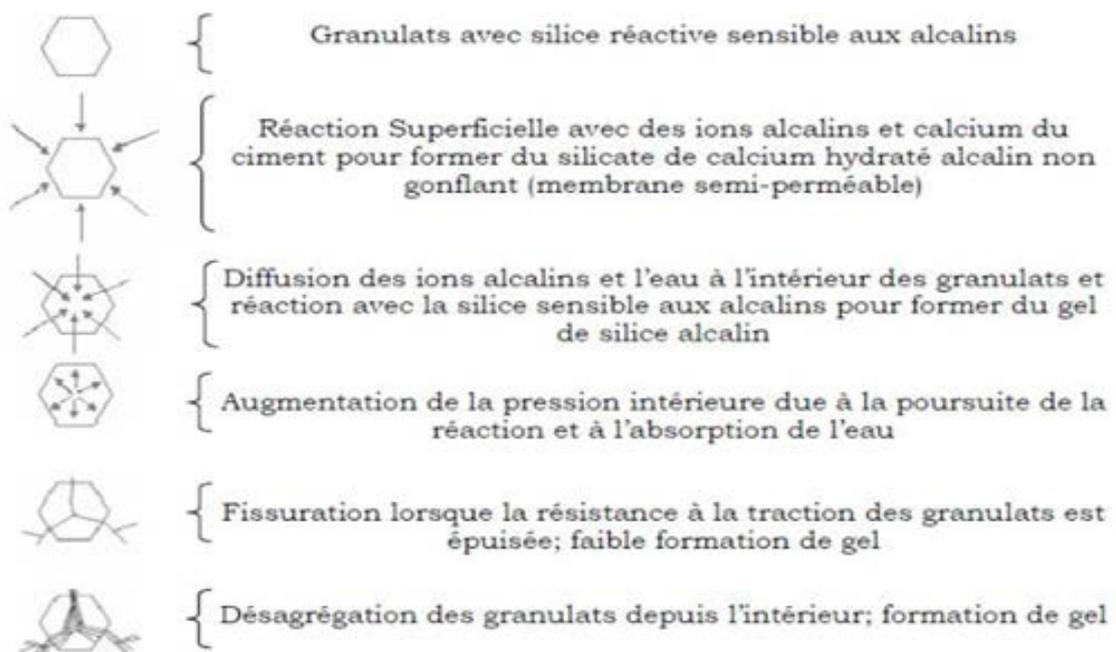


Figure II .1 : Représentation Schématique d'un mécanisme possible entraînant des dégâts lors de la réaction alcali-silice (Sprung et Sylla 1998).

[7]

L'eau est un paramètre important pour la réaction .donc Il faut qu'elle soit disponible. On conclut que pour qu'il y ait alcali-réaction une humidité relative <80% est nécessaire (olafsson ,1986) [9] Kurihara 1989. [10]

II .3 : Activité pouzzolanique :

La pouzzolane est une roche naturelle constituée par des scories (projections) volcaniques basaltiques ou de compositions proches. Elle possède une structure alvéolaire. La pouzzolane est généralement rouge ou noir. Avec toutes les teintes intermédiaires, exceptionnellement grise.



Figure II .2 : Pouzzolane naturelle [11]

Sous Rome antique, la pouzzolane est mélangée à la chaux aérienne, permettant à ces mortiers la prise hydraulique, durcir en présence d'eau. LOUIS VICAT [38] expliquera les principes de cette réaction dans sa théorie d'hydraulicité au XIX^{ème} siècle. Le XIX^{ème} siècle donnera le nom pouzzolane à toutes substances (naturelles ou artificielles) capable de conférer à une chaux ou un ciment l'hydraulicité. Autrement dit la « propriété pouzzolanique » est l'aptitude d'un matériau à se combiner à température ambiante en présence d'eau avec la chaux ou la portlandite pour donner des hydrates très peu solubles (Jean-Paul Kurtz 2004).[39]

Par exemple les cendres volantes silice-alumineuses issues de la combustion des charbons schisteux brûlés en centrale thermique, employées dans la confection des ciments contemporains sont appelées également « pouzzolanes ».

Etymologie et histoire :

La pouzzolane est appelée ainsi parce qu'on en trouve dans le voisinage de Pouzzoles (Pozzuoli en italien) qui est une ville située en bord de mer, à l'ouest de Naples en compagnie (Italie). La ville est connue dès l'antiquité et ses environs par une grande activité volcanique.

Les matériaux pouzzolaniques en général, sont composés d'une forme de silice vitreuse réactive, en la mélangeant avec de l'eau et la chaux et grâce à la température générée par l'hydratation du C2S et C3S elle forme un silicate de calcium hydraté. Similaire à celui qui est formé durant l'hydratation du ciment portland (Dron et Voinvith 1982)[12]

Les caractéristiques que doit contenir un matériau pouzzolanique sont les suivantes :

- Produit à forte teneur en silice
- Un produit amorphe
- Surface spécifique élevée

La réaction pouzzolanique peut s'écrire de la façon suivante

Pouzzolane + Chaux + Eau → silice de calcium hydraté (C-S-H)

Cette réaction est généralement lente nécessite plusieurs semaines pour se développer, donc, Pour que la réaction avec la chaux soit plus rapide, la pouzzolane doit être très fine et vitreuse (Papadaki et Venuat 1966)[13]

Le développement de la réaction pouzzolanique dans le béton se produit par la consommation de la portlandite (CH) qui produit ainsi du silicate de calcium hydraté (C-S-H), et cela peut augmenter la résistance du

POUDRE DE VERRE DANS LE BETON

mortier ou du béton. L'existence en grandes quantités d'alcalis dans le verre blanc contribue à la formation du gel C-S-H pendant l'hydratation grâce aux ions alcalis. Lorsque les ions de sodium sont substitués par le calcium, il y a plus d'ions de calcium disponibles* μ * pour la formation du portlandite (GIREBES et AL, 2004). [14]

Dans des travaux de (Sobolev et al)[15] la microstructure d'une pâte de ciment portland (référence), montre des fibres de C-S-H autour des grains de clinker et de CH, ainsi que des cristaux d'ettringite dispersés dans la phase interstitielle. A 28 jours, la microstructure de la pâte montre un gel siliceux entre les particules hydratées. la figure II.3 illustre la microstructure de cette pâte du ciment à 7 et à 28 jours.

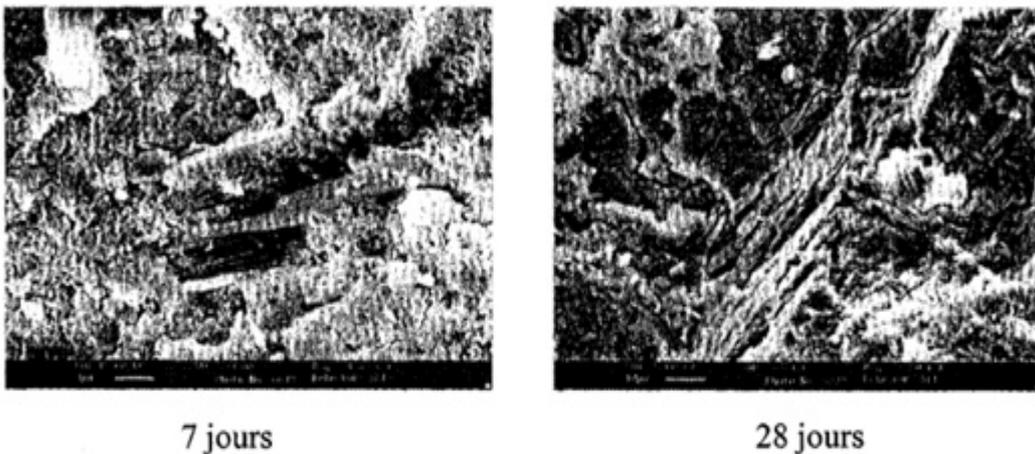


Figure II. 3 : Microstructure de ciment référence à 7 et 28 jours (Sobolev et al , 2004) [15]

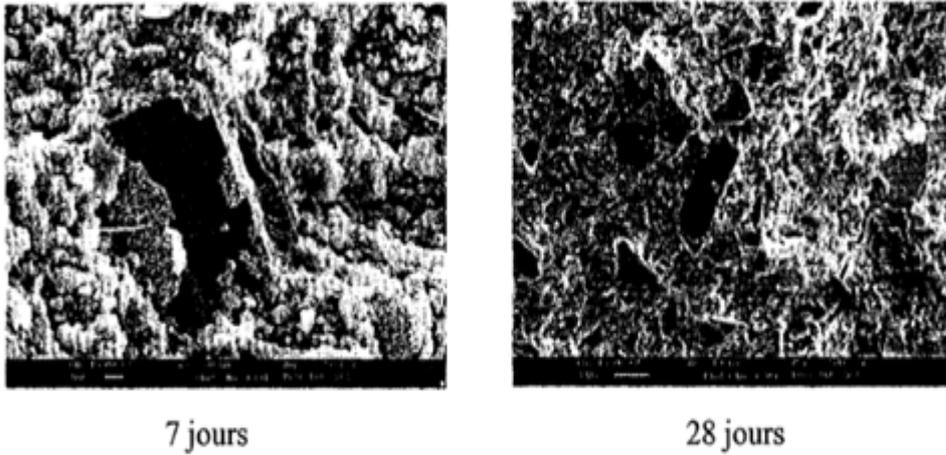


Figure II.4 : microstructure d'éco-ciment contenant 50% de verre bouteille vert à 7 et 28 jours (Sobolev et al, 2004)[15]

Par contre dans la microstructure de la pâte de ciment contenant de verre ayant des particules de même dimensions que celle de ciment de portland, les grains de verre sont bien dispersés dans la pâte, ce qui peut créer une structure dense avec de la microporosité. Il y a une densification visible autour des grains de verre due à l'hydratation partielle de ces grains qui peuvent former la phase C-S-H. Ces résultats ne révèlent pas de réaction alcali-silice créée par le verre (Figure II. 4).

L'indice de pouzzolanicité, SAI, est une façon d'évaluer la réactivité pouzzolanique du verre dans le mortier à différents âges.

$$SAI = \frac{R_x}{R_c} \times 100$$

Où R_x et R_c sont la résistance en compression des mortiers contenant du verre et celle de témoin, respectivement.

POUDRE DE VERRE DANS LE BETON

Lorsqu'on utilise le verre dans le béton, la couleur et le degré de contamination de verre n'influence pas significativement le développement de la résistance en compression du béton (Byars ,2003)[16]. La figure II. 5 montres l'effet du lavage de verre sur la résistance en compression du béton.

Plusieurs études ont été effectuées afin de déterminer l'effet de la poudre de verre sur le développement de la résistance en compression et du béton (Shao et al, 2000,[17] Shayan et Xu, 2003 [18] et Girbes et al ,2004[14]). La dimension des particules de verre et le pourcentage de remplacement sont deux facteurs importants qui peuvent influencer la résistance en compression et la demande en eau.

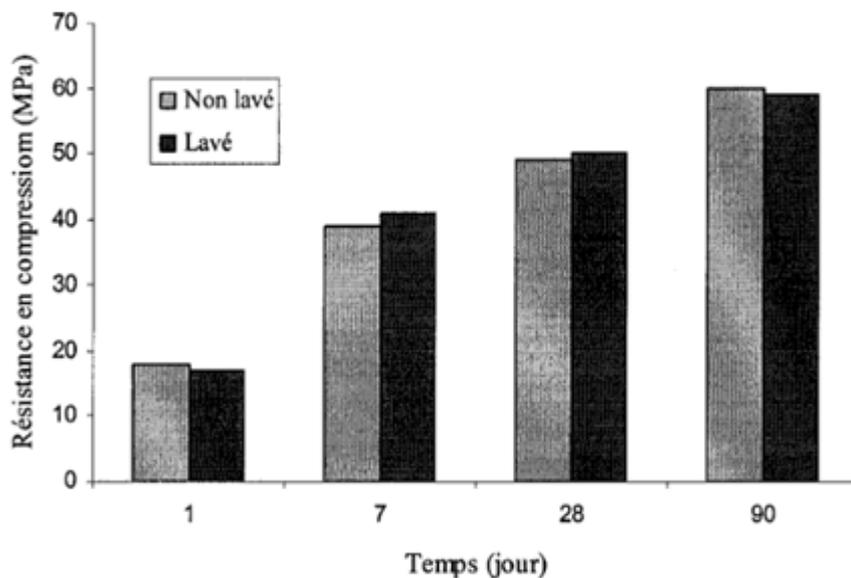


Figure II.5 : Effet de lavage du verre sur la résistance en compression (Byars, 2003)[16]

Le verre plus gros que le ciment portland ($150\mu m$) est moins réactif et la résistance en compression de mortier contenant ce verre n'est pas satisfaisant. Par contre, le verre plus fin ($38\mu m$) est plus réactif, mais son utilisation peut augmenter la demande en eau en fonction de sa finesse.

L'utilisation jusqu'à 30% de verre de 38 μm , en remplacement du ciment, nous donne une résistance en compression plus élevée que celle de béton ordinaire à 91 jours (Shao et al 2000) [17].

Lorsqu'on utilise la poudre de verre en remplacement du ciment, l'augmentation du taux de remplacement diminue la résistions en compression de mortier à 28 jours (Shayan et Xu, 2004) [19] La figure II.6 montre l'effet du remplacement de différent pourcentage , d'un verre ayant une finesse de $800\text{m}^2/\text{Kg}$, sur la résistance en compression du mortier .

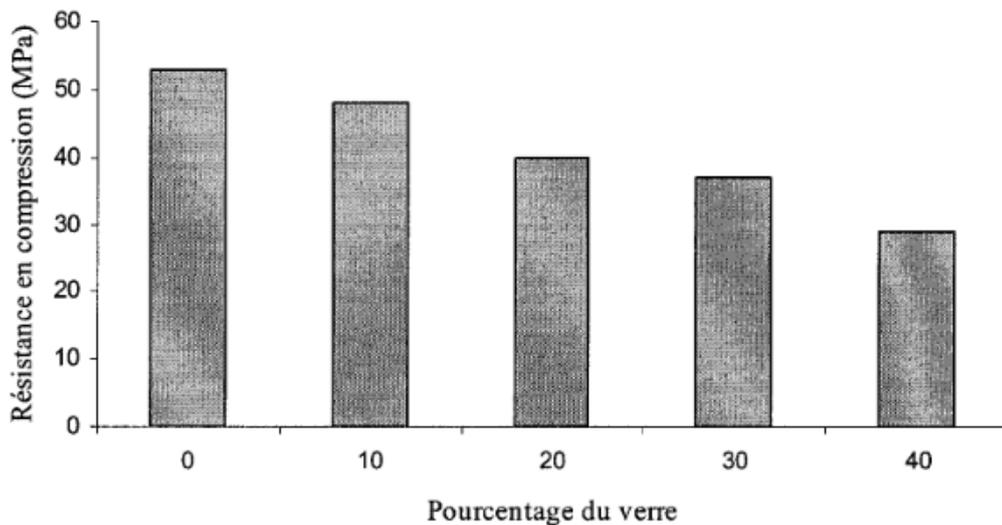


Figure II.6 : Resistance en compression des cubes de mortier contenant différents pourcentages de verre à 28 jours (avec la surface spécifique de $800\text{m}^2/\text{Kg}$) en remplacement de ciment (SHAYAN et Xu, 2004)[19]

Selon Byars (Byars, 2003) [16] pour obtenir du verre comme un matériau pouzzolanique dans le mortier et le béton, les conditions suivantes sont nécessaire :

1-Teneur en silice : La teneur minimale proposée silice dans le verre pouzzolanique doit être de 68%.

2-Teneur en chlorure : La teneur maximale de chlorure de verre utilisée ne devrait pas être plus de 0,1% cette valeur peut assurer que la poudre de verre n'a pas un effet néfaste sur la durabilité du béton renforcé par les barres d'aciers

3-Teneur de sulfure : Le dosage maximale de SO_3 est 3%.

4-Surface spécifique : La surface spécifique du verre ne doit pas être moins de $300\text{m}^2/\text{Kg}$. cette finesse est la finesse minimale requise d'un verre pouzzolanique pour avoir l'activité équivalente de celle de la cendre volante selon la norme européenne de BSEN 450.

5-Teneur en plomb : La teneur maximale en plomb est de 0,1%

Pour éviter le retard de la prise.

6-Temps de prise : Le temps de prise initial, quand on le mesure selon la norme BS EN196-3, peut être au plus de 2 heures plus tard que celui du ciment portland. cette valeur est un peu plus élevée que celles trouvées dans les cas de plus de 30 variétés de verre.

On **conclut** que l'utilisation de verre dans le béton est en fonction de sa taille, le verre peut manifester deux types de comportement à conséquences antagonistes : soit une réaction de type alcali-silice (RAS) entraînant des effets néfastes, soit une réaction de type pouzzolanique bénéfique pour la structure (Figure 20).

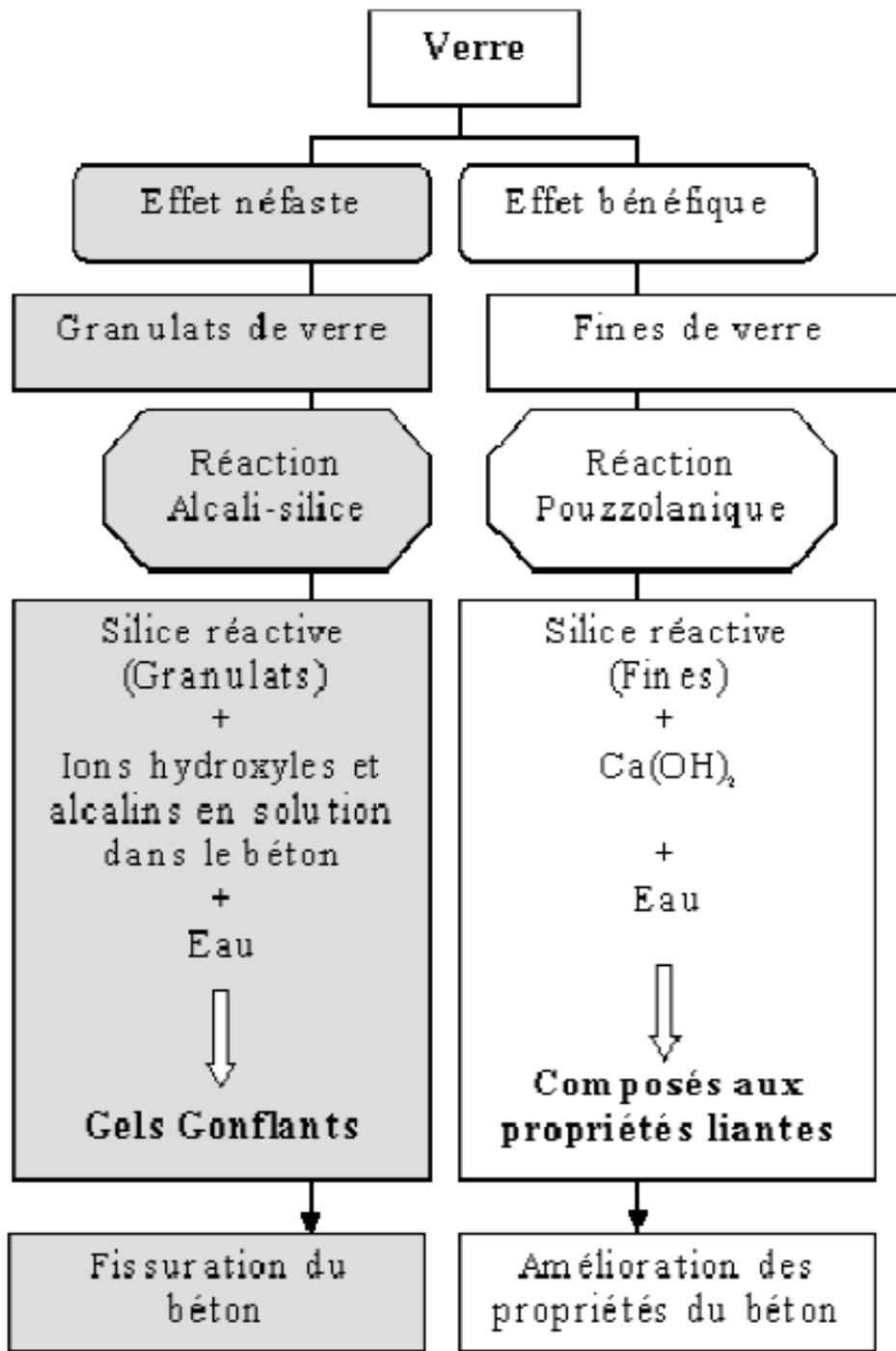


Figure II.7 : Schéma récapitulatif illustrant les deux réactions : alcali-granat et pouzzolanique.[20]

Chapitre III

CARACTERISATION DU

VERRE

III-1 : introduction : dans la région de Tizi-Ouzou, les bouteilles en verre coloré ne sont ni triées ni recyclées.



Figure III-1 : Image de bouteilles de verre jetées dans la nature.

Il faut signaler aussi que dans certains pays comme le Canada, le recyclage des bouteilles en verre coloré n'est pas très développé ; actuellement, son entreposage coûterait moins cher (Oxford Brookes University, 2004). Cependant, la valorisation du verre à bouteilles dans le béton pourrait constituer une alternative écologique et économique intéressante, permettant l'élimination de décharges encombrantes et polluantes et sa qualification comme une nouvelle source de matériaux de construction.

CARACTERISATION DU VERRE

Le dessin suivant nous résume l'utilité de verre.



Figure 3-2 : La fleur permaculturelle

Sur le plan technique, le verre à bouteille contient des quantités importantes d'alcalin pouvant entraîner des effets préjudiciables sur le béton en relation avec les réactions alcali-silice ou alcali-granat si le verre est utilisé sous forme granulaire. Par contre, de nombreux auteurs (Chen et al 2006)[21] conviennent que le verre entraîne un comportement bénéfique associé à la réaction pouzzolanique s'il est utilisé sous forme de poudre.

III-2 : Définition de verre : Le verre est un matériau ou un alliage dur, fragile (cassant) et transparent à la lumière visible.

L'état solide est plus ordonné que l'état gazeux ou que l'état liquide : les cristaux en sont une bonne illustration. Il existe des solides apparemment moins ordonnés : verre, polymères vitreux et des solides partiellement ordonnés comme les polymères semi-cristallins. Pour tous ces matériaux non-cristallins, il existe fréquemment une certaine forme d'ordre à courte distance ; on constate après refroidissement brutal que le matériau manifeste des propriétés différentes de celles du matériau initial. On obtient un verre : silice vitreuse.

L'étude approfondie de la silice vitreuse, en particulier par diffraction des rayons X, montre que les distances interatomiques imposées par les liaisons covalentes sont toujours respectées

Les tétraèdres continuent à exister dans la silice vitreuse, comme dans la cristobalite, mais il n'y a pas de motif qui se répète périodiquement (figure III- 3 a et b)

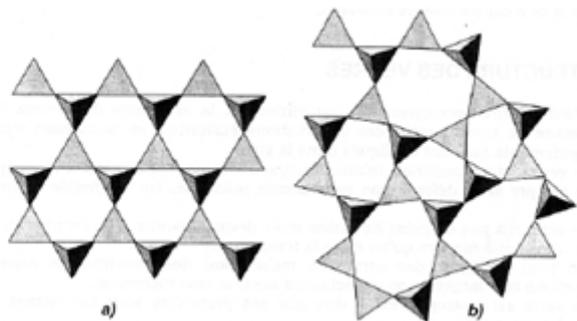


Figure III. 3 : a) Structure en anneau de la Cristobalite ; b) Modèle proposé par Zachariasen : les tétraèdres continuent d'exister en formant un réseau continu irrégulier et sont désorientés dans les trois dimensions[22]

CARACTERISATION DU VERRE

Le verre est constitué d'oxyde de silicium (silice SiO_2 le constituant principal du sable) .parmi tous les types de verre, le plus courant est le verre sodo -calciq (utilisé pour les vitrages) Du point de vue physique le verre est un matériau amorphe, c'est-à-dire non cristallin. De ce fait, il présente un désordre structural important .Sa structure microscopique est telle qu'il n'existe aucun ordre à grande distance. Il peut même être vu comme un « réseau » tridimensionnel, semblable à celui d'un cristal (**figure III.4**), mais dans lequel seul l'ordre à courte distance est conservé. Comparons par exemple, la structure de la silice (SiO_2) cristalline (sous sa forme cristobalite) et celle de la silice vitreuse **figure III.5**

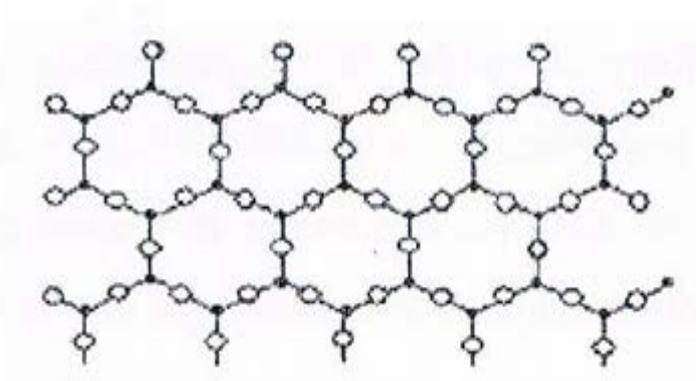


Figure III.4 : représentation schématique bidimensionnelle de la silice cristalline (cristobalite) (**Philip Gibbs 1996**)[23]

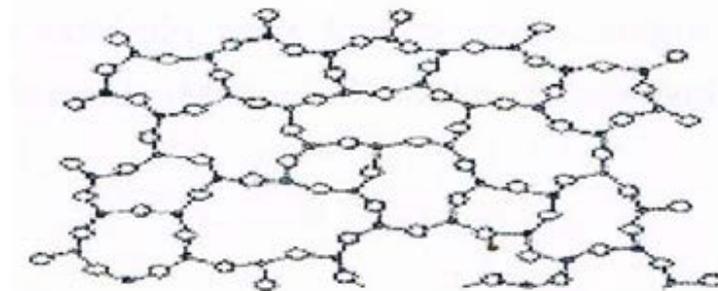


Figure III.5 : représentation schématique bidimensionnelle de la silice vitreuse (**Philip Gibbs 1996**)[23]

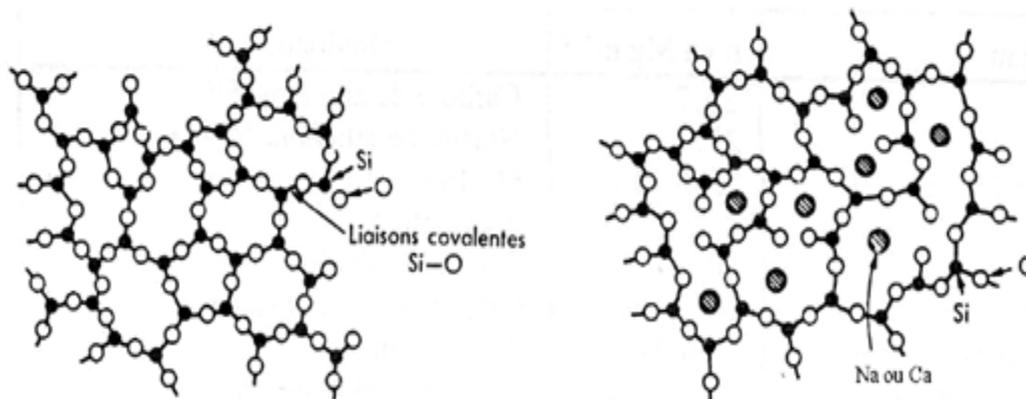
CARACTERISATION DU VERRE

Dans les deux cas, chaque atome de silicium est lié à quatre atomes d'oxygène, formant ainsi des tétraèdres SiO_4 ; chaque tétraèdre pouvant être considéré comme une « brique » de l'édifice final. Mais tandis que la cristobalite peut être définie comme un empilement régulier de ces briques, la silice vitreuse peut être considérée comme un empilement anarchique de ces mêmes briques SiO_4 .

LBEDV avait proposé un modèle pour le verre prévoyant l'existence de très petits domaines ordonnés appelés cristallites et reliés les uns aux autres par des domaines désordonnés ; La théorie de Zachariasen [22] décrit la silice vitreuse comme un réseau désordonné conservant les assemblages SiO_4 de la cristobalite. Le passage de la cristobalite à l'état vitreux s'explique par une trop grande viscosité du liquide qui empêche les tétraèdres désordonnés de reformer la cristobalite. Le matériau n'est ni totalement désordonné (conservation des tétraèdres), ni dans un état métastable au sens de la Thermodynamique mais il évolue simplement vers l'état cristallin avec une cinétique très lente. Zachariasen (1932)[22] a formulé les quatre conditions suivantes pour la formation des verres d'oxydes :

- coordination du cation doit être petite ;
- un ion d'oxygène ne doit pas être lié à plus de deux cations ;
- les polyèdres construits par les oxygènes ne peuvent avoir en commun que leurs sommets et non leurs arêtes ou leurs faces ;
- trois sommets au moins de chaque polyèdre doivent appartenir en même temps à d'autres polyèdres.

L'état vitreux est donc caractérisé par un désordre (Figure III.6), proche de celui d'un liquide qui tend à cristalliser. La cinétique de cristallisation est, en général, suffisamment lente pour que le matériau apparaisse comme stable à l'échelle de la vie humaine.



a) silice amorphe) silice modifié

Figure III.6 : (a) l'empilement des atomes de la silice amorphe. (b) l'adjonction de Na_2O et CaO brise des liaisons dans la silice amorphe et donne naissance au verre sodo-calcique[24].

La silice et tous les oxydes qui permettent de telles constructions sont appelés formateurs de réseau. Chaque liaison entre deux polyèdres est effectuée par un atome d'oxygène bivalent : un tel atome est appelé oxygène pontant.

On peut modifier la structure d'un verre en y introduisant des modificateurs de réseau. Ce sont des oxydes alcalins de formule M_2O , comme Na_2O et K_2O ou des alcalinoterreux de formule MO , comme CaO et BaO . En ajoutant les fondants (oxydes alcalins), la température de fusion passe de 1730°C à 1400°C (économie d'énergie) et les possibilités de travail sont facilitées. Avec Na_2O nous avons (**Figure III.7**) :

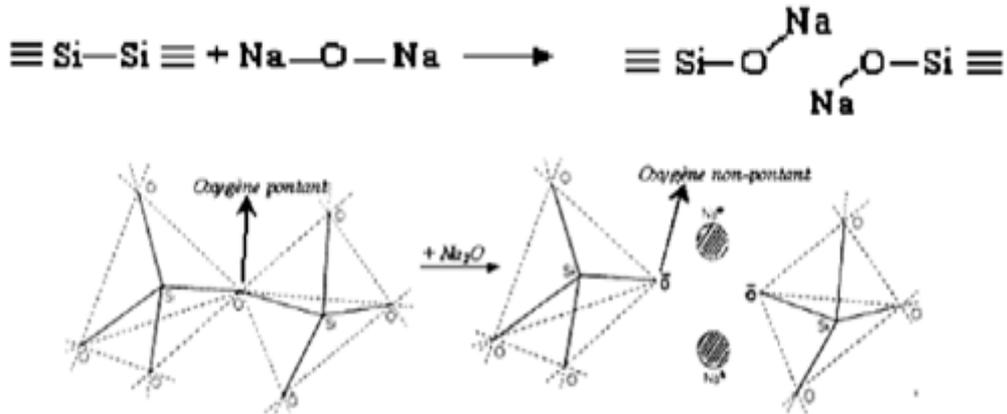


Figure III.7 : Rupture d'un pont Si-O-Si par adjonction d'une molécule de modificateur Na₂O ([25])

La présence de Na₂O provoque l'interruption des liaisons du réseau continu non cristallin, rendant le verre plus fluide à haute température. La formation de ces discontinuités entraîne un affaiblissement de la structure vitreuse dont la solidité augmente avec le nombre de ponts Si—O—Si.



L'introduction de CaO entraîne l'existence d'ions O⁻² liés au silicium d'un seul coté et apporte ainsi une certaine discontinuité au réseau. Mais la liaison Ca - O est considérablement plus forte que la liaison Na - O, à cause de la bivalence de l'ion Ca⁺², de sorte que les deux oxygènes non portants se trouvent en quelque sorte liés à l'ion Ca⁺². [26]

III-3 : Composition de verre :

D'après les recherches et travaux menés par **M. Arezki TAGNIT-HAMOU [20]** et autres sur le verre mixte, récupéré, débarrassé de toutes impuretés (métal, plastique, papier, matières organiques (alcool et colle) et autre... (Figure III.8), la composition chimique (tableau III.1) a montré que ce verre est principalement composé de SiO_2 (près de 73%). Les teneurs en CaO et Na_2O confirment bien la nature sodo-calcique du verre.

Le rapport molaire $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$ ne dépasse pas 1. Selon **VARGIN (1961) [27]**, cela signifie que l'ion Al_3^+ est une consolidation de plus pour la structure du verre. C'est-à-dire qu'il jouerait donc le rôle de formateur de réseau. À côté des éléments dominants tels les oxydes formateurs (SiO_2 et Al_2O_3) et les fondants et stabilisants (K_2O , Na_2O , CaO , MgO), d'autres éléments composent ce verre. Leur présence peut s'expliquer par le fait que notre matériau est un verre mixte comportant plusieurs couleurs. En effet, différents oxydes métalliques peuvent être ajoutés combinés à différents pourcentages lors du processus de fabrication du verre pour le colorier. [28].



Figure III.8: a) verre débarrassé des ses impuretés b) impuretés du verre (papiers, plastiques) [20].

CARACTERISATION DU VERRE

Composition (% en masse)	ciment	poudre de verre
silice (SiO ₂)	20.2	72.5
alumine (Al ₂ O ₃)	4.7	0.4
L'oxyde de fer (Fe ₂ O ₃)	3.0	0.2
L'oxyde de calcium (CaO)	61.9	9.7
L'oxyde de magnésium (MgO)	2.6	3.3
L'oxyde de sodium (Na ₂ O)	0.19	13.7
Oxyde de potassium (K ₂ O)	0.82	0.1
Le trioxyde de soufre (SO ₃)	3.9	-
Perte au feu	1.9	0.36
Finesse% passant (taille tamis)	97.4 (45 µm)	80 (45 µm)
Poids unitaire, kg / m ³	3150	2579
densité	3.15	2.58

Tableau III.1: Composition chimique des matériaux de cimentation [20].



Figure III.9 : Ciment courant

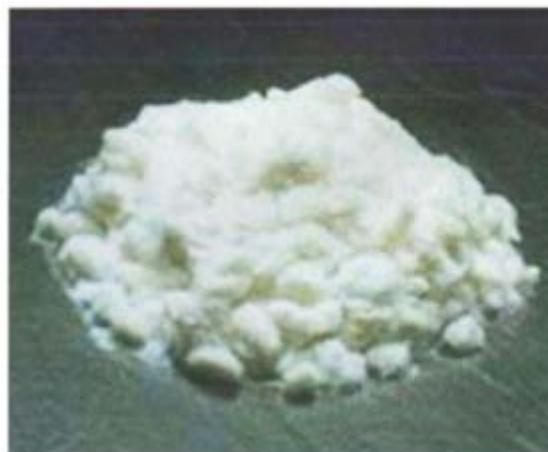


Figure III.10 : Poudre de verre

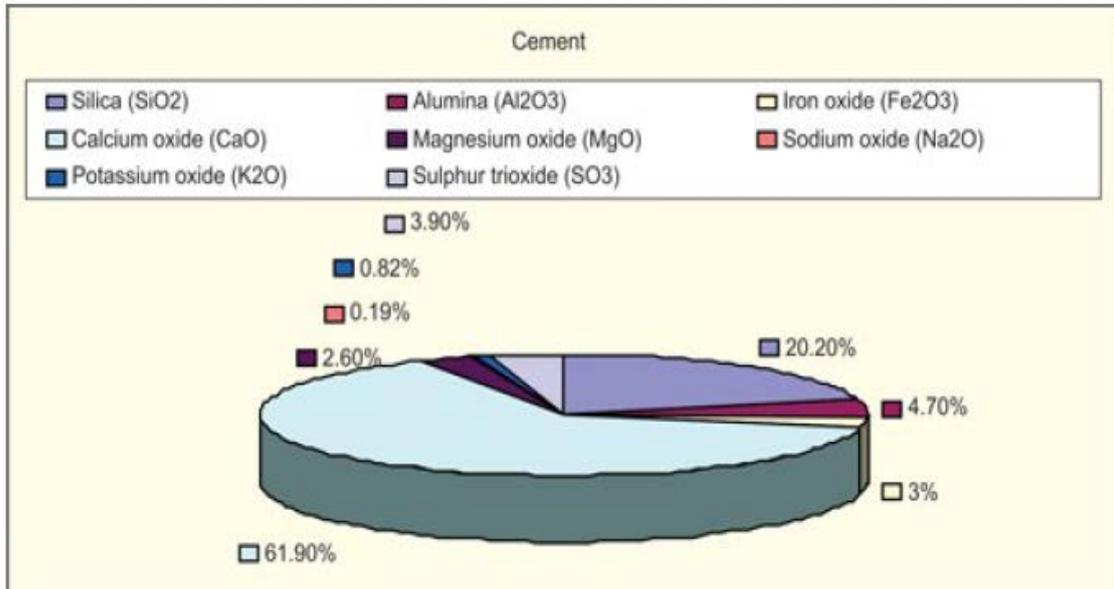


Figure III.11: Composition chimique du ciment [29]

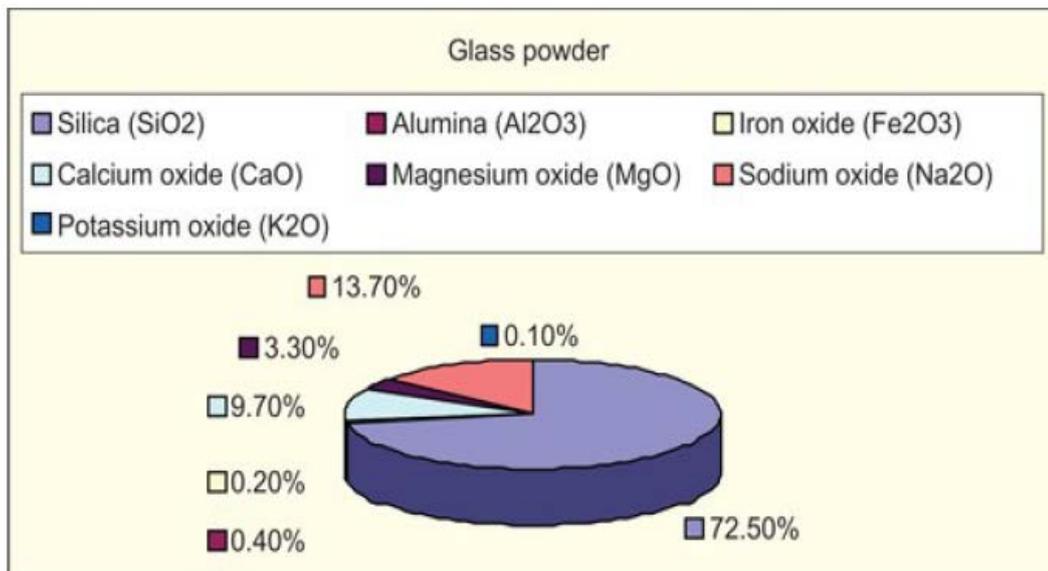


Figure III.12: Composition chimique de la poudre du verre [29].

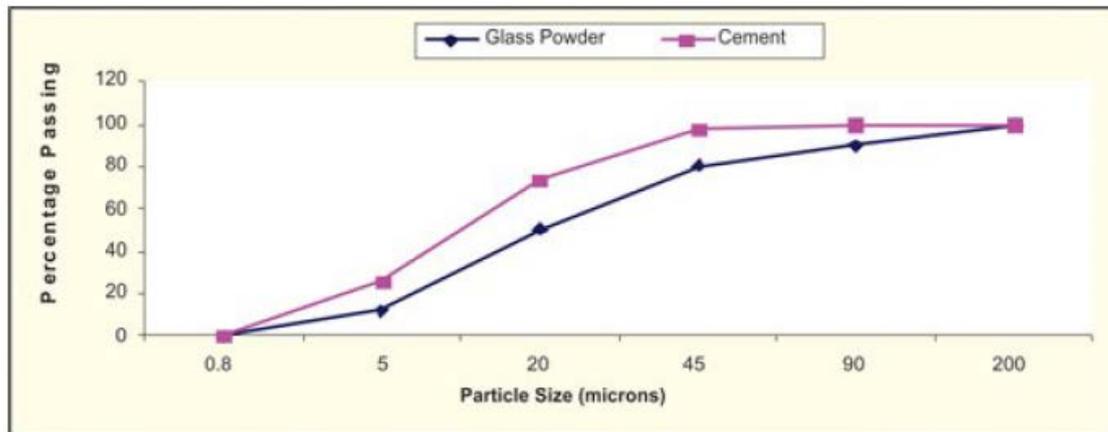


Figure III.13: La distribution de taille de particule de la poudre de verre et du ciment [29].

III.4 : Granulométrie :(La taille des grains de verre)

La taille des particules des granulats de verre a une influence sur l'expansion due à la RAS. Il semblerait que l'expansion augmente avec le diamètre des granulats réactifs. STANTON [1940] [1]. Est le premier à avoir indiqué que la taille des particules des granulats réactifs affecte l'expansion des mortiers.

En effet, dans le cas du verre, diverses études ont montré que diminuer la finesse du verre entraînait la RAS. Nous pouvons citer les travaux de SHAO et coll, [2000][17], SHI et coll, [2005][30] et SHAYAN et coll, [2002, 2006].[18]. Cependant, dans la plupart de ces travaux, les auteurs ont travaillé en terme de finesse non pas en terme de taille des grains. De ce fait il a été difficile de déterminer la taille des grains de verre qui est susceptible de provoquer des gonflements.

CARACTERISATION DU VERRE

Pour certains auteurs 150dm est la limite pour laquelle les bétons ne risquent pas d'être atteints de la RAS. [MEYER et coll., 1999][31].

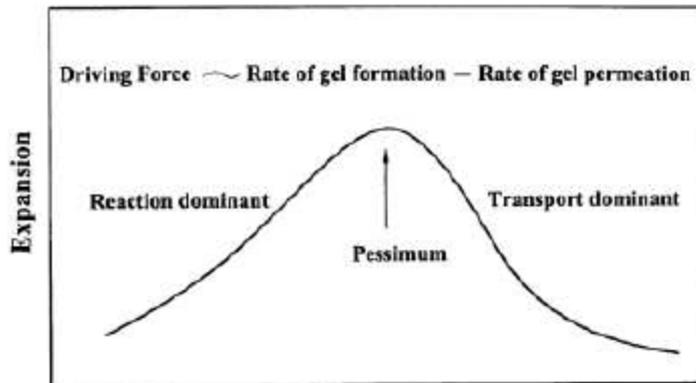
Cependant, la plus grande campagne expérimentale a été faite à l'université de SHEFFIELD. En effet, BYARS et coll, [2004][32] ont lancé un programme expérimental sur l'étude de l'effet de la taille des granulats de verre sur les gonflements des bétons. Ainsi, différentes classes granulaires de verre de 35dm à 12mm ont été étudiées. Ces auteurs concluent que l'expansion était proportionnelle à la taille des grains de verre.

Comme nous l'ont montré les paragraphes précédents, l'expansion associée à la réaction alcali-silice serait relative à la taille des granulats. Cependant, pour certains auteurs, il existerait une taille de granulats pour laquelle l'expansion produite est maximale, cette taille est appelée "pessimum".

La bibliographie concernant cet effet pessimum n'est pas abondante. Nous pouvons notamment citer les travaux de **JIN et coll, [2000][33]**, et les travaux de XIE et coll, [2003][34]. Qui ont mis en évidence l'effet pessimum sur des familles de granulats de taille comprise entre 0,150 et 4,75 mm. D'après ces auteurs ce pessimum se situerait entre 1,18 et 2,36 mm. Quand **a YAMADA et coll, [2005],[35]**. Ce pessimum serait de 0,6 mm ou même de 0,25 mm. Cependant, cette taille de granulats pour laquelle les gonflements sont maximums dépendrait d'autres paramètres que nous discuterons plus bas, notamment du type d'essai utilisé, la couleur du verre et de la teneur en celui-ci., la teneur en alcalin du mélange.

Pour **JIN et coll, [2000][33]** les pressions de gonflement sont gouvernées par deux processus : la formation du gel (effet chimique) et sa capacité de diffusion dans l'espace poreux de la matrice cimentaire (effet physique). Ces auteurs expliquent la taille pessimum par la différence de cinétique entre ces deux effets: la formation de gel entraîne des pressions internes, tandis que sa diffusion tend à les soulager. La vitesse de formation du gel et sa diffusion dépendent de la surface spécifique des granulats. La taille pour laquelle ces

deux processus s'équilibrent et pour laquelle l'expansion maximale se produit est le pessimum (Figure III.14).



Agrégat particule Fiennes

Figure III.14 : Illustration de l'effet pessimum comme résultat de deux processus.[33].

La taille du pessimum peut être décalée vers la droite quand la réactivité du granulat augmente et vers la gauche quand la perméabilité de la matrice augmente.[JIN et coll., 2000][33].

Plusieurs auteurs ont mentionné l'existence d'un diamètre pessimum où les expansions sont maximales. Ce diamètre se situerait à 2,36 mm pour XIE et coll,[2003][34], 1,18 pour JIN et col, [2000][33], et 0,25-0,6 mm pour YAMADA et coll, [2005][35].

Il est important de noter que le taux de remplacement affecte la taille du pessimum. En effet, il a été montré que plus le pourcentage du verre dans le mélange est important plus petite est la taille du pessimum. Par ce fait, cette taille passe de 1,18 mm pour XIE et coll. [2003][34]. et JIN et coll., [2000][33]. à 250dm pour XIE et coll. [2003][34]. et YAMADA et coll, [2005][35]. De la même manière MEYER et coll, [1997][31] ont fait ressortir cette tendance. Dans leurs conclusions la taille pessimum passait de 2,36mm

CARACTERISATION DU VERRE

à 1,8mm, à mesure que le pourcentage du verre dans le mélange augmentait. (Voir exemple sur la Figure III.15).

Cependant, ce péssimum ne dépend pas uniquement de la taille de granulat mais aussi de la couleur et du type du verre utilisé. JIN et coll, [2000] [33]BAZANT et coll,[2000] [36]et YAMADA et coll,[2005][35] ont travaillé sur trois différentes couleurs de verre et ont montré que celles-ci gouvernent la taille du péssimum. En effet, il passe de 600 μ m pour le verre brun et blanc à 1,18mm pour le verre vert (Figure III.16).

Pareillement, la taille du péssimum est modifiée par l'hydratation avancée des bétons. En effet, MEYER et coll.[31], [MEYER et coll., 1997][37] ont mis en évidence cet effet où la taille du péssimum passait de 300 μ m à 75 μ m entre 4 et 14 jours (Figure III.17).

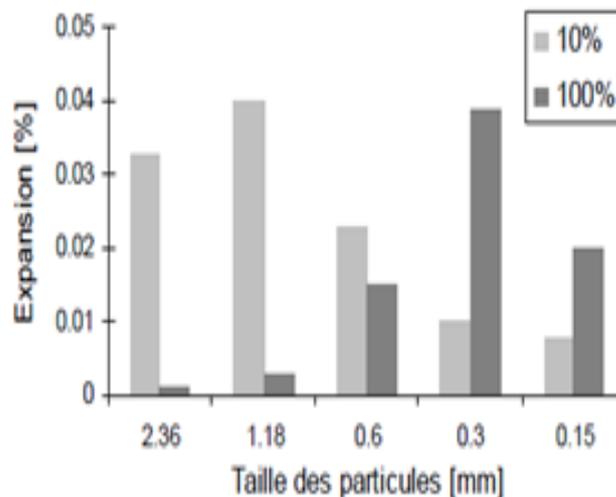


Figure III.15 : Expansion à 14 jours d'éprouvettes de mortiers avec 10 % ou 100% de verre de différentes tailles [XIE et coll., 2003][34]

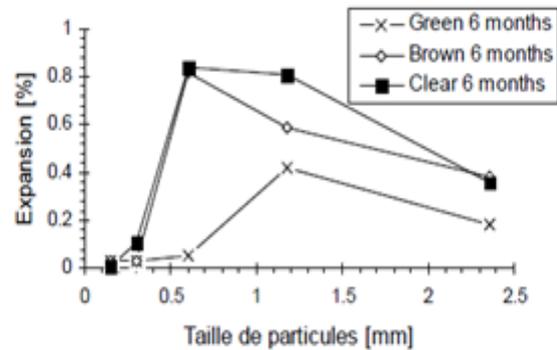


Figure III.16 : Expansion des échantillons de mortier avec des verres différentes Couleurs [YAMADA et coll., 2005][35]

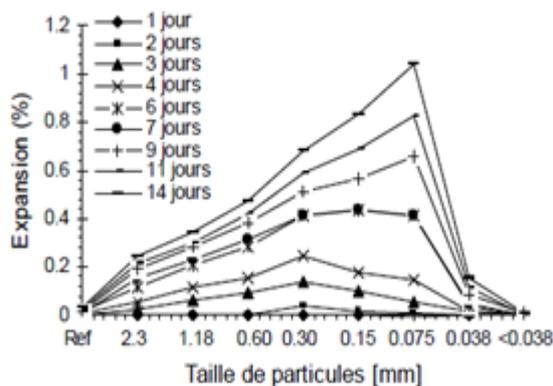


Figure III.17 : Expansion dans le temps d'échantillons de mortier en fonction du diamètre des grains de verre (MEYER et coll., 1997) [37]

La **Figure III.18** illustre la méthode d'obtention des différentes classes. Les classes C0, C1, C2, C3, C4, C5 et C6 ont été isolées par tamisage après broyage de l'échantillon global. Les classes C7 et C8 sont les résultats de broyage pendant 25 minutes et 6 heures des classes C6 et C0 respectivement

CARACTERISATION DU VERRE

(traitement particulier de la classe C8 (V40), C6(V70)et C4 (V200) parce que nous avons décidé de l'étudier a posteriori). Notons que le broyage a été effectué par tranches de 25 minutes, suivi d'une phase de nettoyage du broyeur. Cette procédure a permis de maintenir un rendement de broyage élevé.

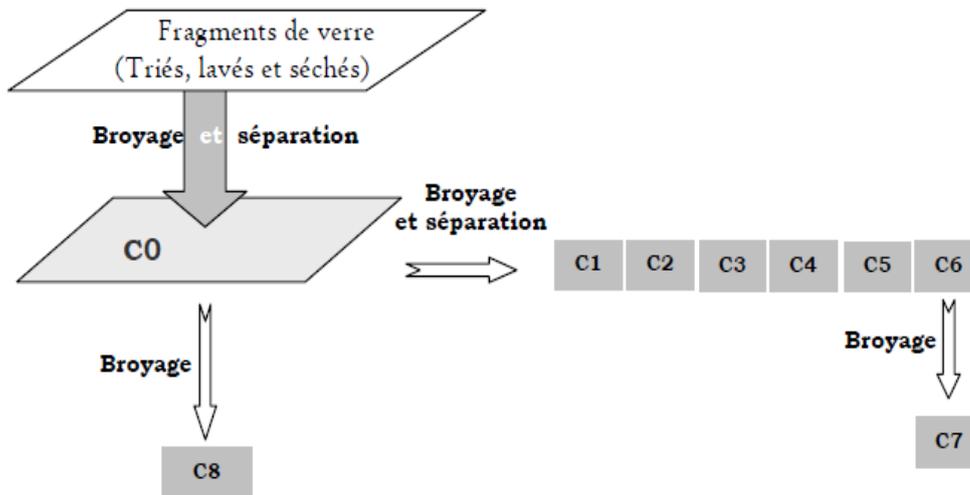


Figure III.18: Procédures d'obtention des différentes classes de verre [20]

Neuf différentes granulométries de verre ont été préparées de cette façon (broyage) : diamètre moyen allant de 7,8mm à 3,75mm (TABLEAU III.2).

Tableau III.2 : Appellations des différentes fractions granulaires de verre[20]

Noms des classes granulaires	Fractions granulaires [μm]	D_{moyen} des Fractions granulaires [μm]
C0	2500-5000	3750
C1	1250-2500	1875
C2	630-1250	940
C3	315-630	472,5
C4	160-315	237,5
C5	80-160	120
C6	<80	23,5 [*]
C7	<46	10,8 [*]
C8	<41	7,8 [*]

CARACTERISATION DU VERRE

* d50 est déterminé à partir des distributions granulométriques au laser des classes rassemblées dans la Figure III.19

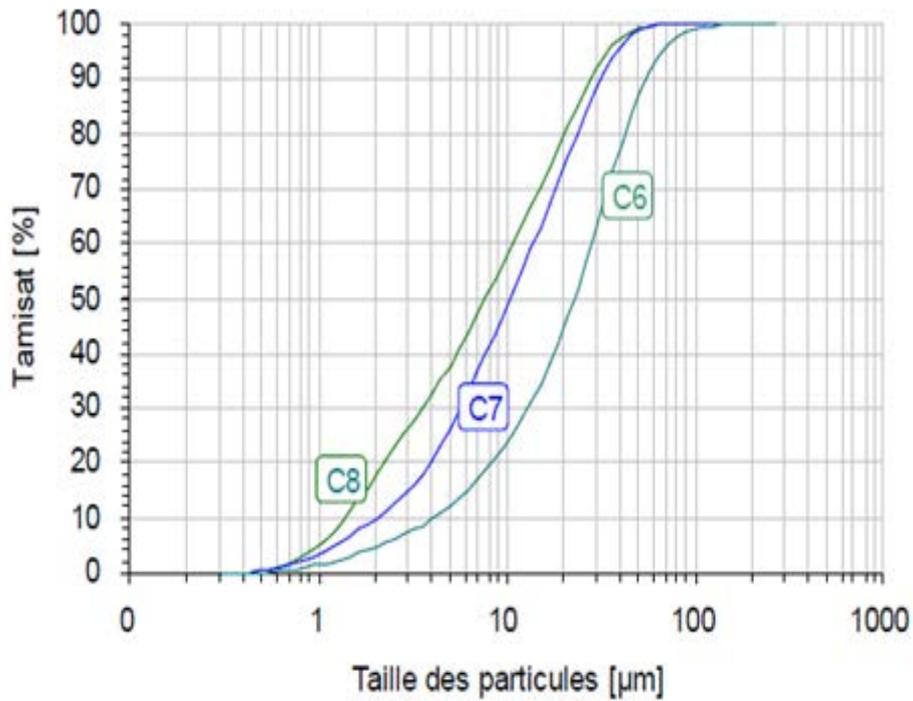


Figure III.19 : Distributions granulométriques des classes C6-C7 et C8 [20]

Chapitre IV

CARACTERISATION DU BETON AVEC AJOUT DE LA POUDRE DE VERRE

Liste d'abréviation :

C : Ciment

E : Eau

E/C : Rapport massique eau sur ciment

E/L : Rapport massique eau sur liant

V : verre broyé

V70 : le verre avec particules de moins de 70 micromètre.

FS : Fumée de silice

SP : Super plastifiants

S : Sable

RAG : réaction alcali-granulat

IV.1: Temps de prise de la pâte de ciment :

Les essais se font à l'aide de l'appareil de Vicat Figure **IV1**. Conformément a la norme EN 196-3 qui donne deux repérés pratiques : le début et fin de prise



. Figure IV.1 : Appareil de Vicat [38]

On dispose une aiguille verticale coulissante de 1 mm^2 de section et pesant 300 grammes au-dessus d'un récipient (le moule), contenant une pâte préparée. On appelle durée du début de prise le temps qui s'écoule entre l'instant du contact de l'eau avec le liant et celui où l'aiguille, descendue normalement c'est-à-dire 4mm, pour les ciments courants.

L'essai consiste à suivre la transformation d'état d'un matériau visqueux, facile à travailler à l'état d'un matériau durci (plus difficile voire impossible à travailler). **Figure IV.2**

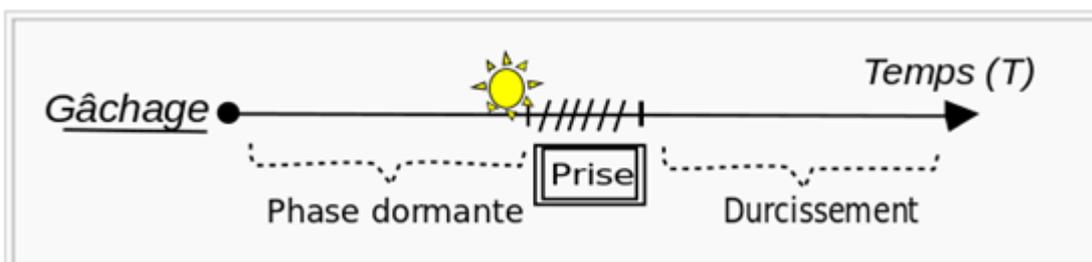


Figure IV.2 : Diagramme de prise du ciment [38]

Afin de pouvoir évaluer le temps disponible pour la mise en place correcte des mortiers et des bétons qui seront ensuite confectionnés.

Début	Fin
130 min	235min

Tableau IV.1 : Le début et la fin de prise. [41]

Les auteurs qui on utilise un mélanges de consistance normalisés (ciment + poudre de verre)

Afin de pouvoir évaluer le temps de début de prise de ces déférents mélanges.

Les résultats sont représentés sur la figure IV.3

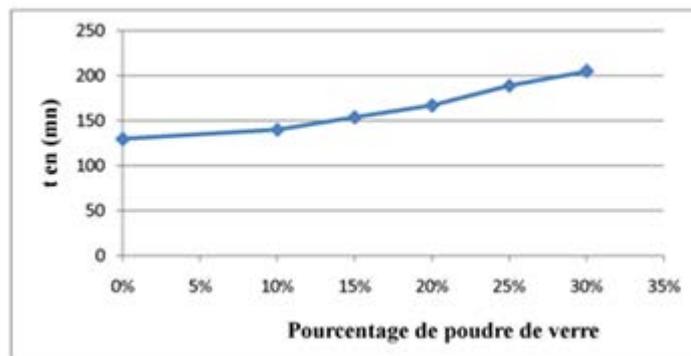


Figure IV.3 : Le temps du début de prise en fonction de la teneur en poudre de verre.

Le temps de début de prise augmente légèrement proportionnellement à la teneur en poudre de verre, la surface spécifique du verre a affecté le début de prise et la poudre de verre joue le rôle d'un retardateur de prise

IV.2: Résistance en Compression de béton binaire :

La résistance en compression du béton avec l'ajout de la poudre de verre a fait l'objet des travaux de plusieurs chercheurs en la matière et parmi eux on peut citer Mme Ouachem Samia en 2015, Maryam Sargolzahi en 2005, RACHIDA I en 2009

Les matériaux utilisés dans ces essais consignés dans les tableaux IV-2 à IV-13 et la résistance en compression sont présentés aux figures IV-4 à IV-15.

Les valeurs de résistance en compression des mortiers, indiqués dans les tableaux IV. 2 à IV.13, sont des valeurs moyennes de la résistance en compression de trois cubes de mortier qui sont mesuré en MPa.

Tableau IV.2 :Composition des mélanges des mortiers témoin et ceux contenant 10 et 15% de V70 (E/C=0.485) . [42].

	Témoin	10% V ₇₀	15% V ₇₀
Sable/liant	2,75	2,75	2,75
E/L	0,485	0,480	0,475
Étalement (cm)	18,7	18,5	18,5
f'_c (MPa) à 1 jour	16	13	12
f'_c (MPa) à 7 jours	34	33	28
f'_c (MPa) à 28 jours	41	40	34
f'_c (MPa) à 91 jours	45	45	46

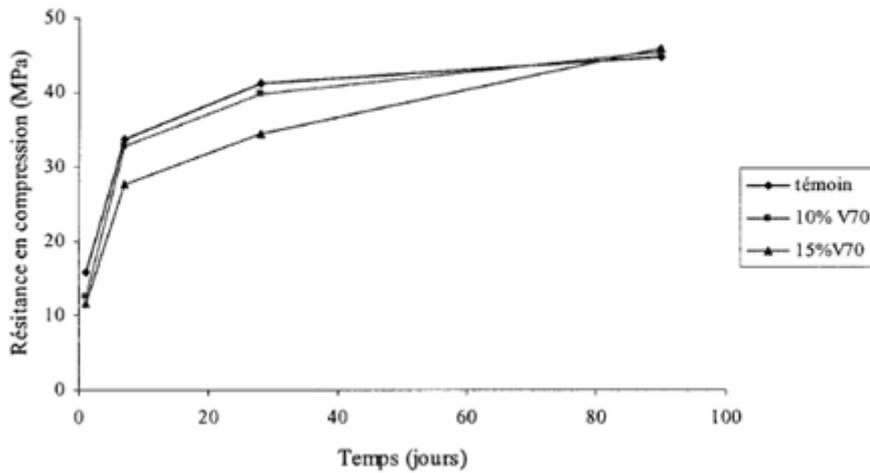


Figure IV.4 : Résistance en compression de mortier témoins et ceux contenant 10 et 15% de V70 (E/C=0.485) [42].

Tableau IV.3 : Composition des mélanges des mortiers témoin et ceux contenant 10 et 15% de V70 (E/C=0.45). [42].

	Témoin	10% V ₇₀	15% V ₇₀
Sable/liant	2,75	2,75	2,75
E/L	0,45	0,445	0,440
Étalement (cm)	15,7	15,9	15,9
f'_c (MPa) à 1 jour	18	16	14
f'_c (MPa) à 7 jours	36	34	28
f'_c (MPa) à 28 jours	40	40	37
f'_c (MPa) à 91 jours	45	45	44

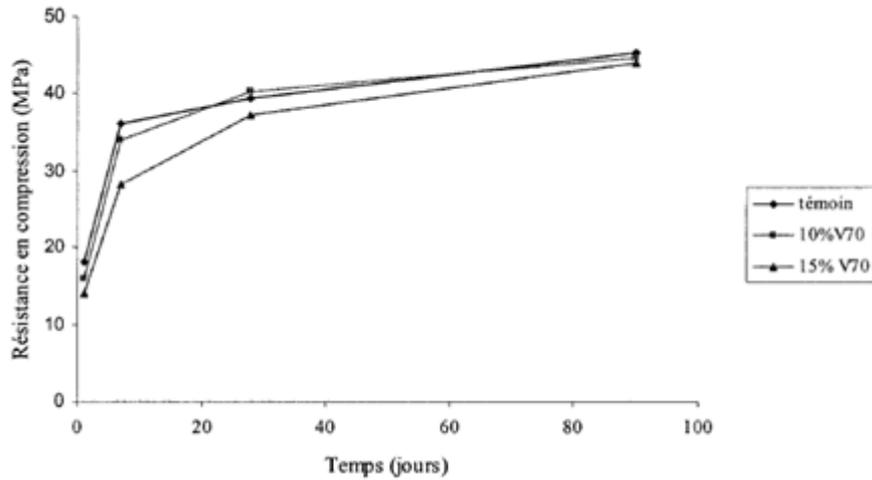


Figure IV.5 : Résistance en compression de mortier témoin et ceux contenant 10 et 15% DE V70 (E/C = 0.45) [42].

Tableau IV.4 : Composition des mélanges des mortiers témoin et ceux contenant 10 et 15% de V70 (E/C = 0,35 +SP) [42].

	Témoin	10% V ₇₀	15% V ₇₀
Sable/liant	2,25	2,25	2,25
E/L	0,35	0,35	0,35
SP (%)	0,90	0,85	0,80
Étalement (cm)	19,9	19,3	19,3
f'_c (MPa) à 1 jour	45	37	36
f'_c (MPa) à 7 jours	57	50	47
f'_c (MPa) à 28 jours	68	59	60
f'_c (MPa) à 91 jours	74	73	70

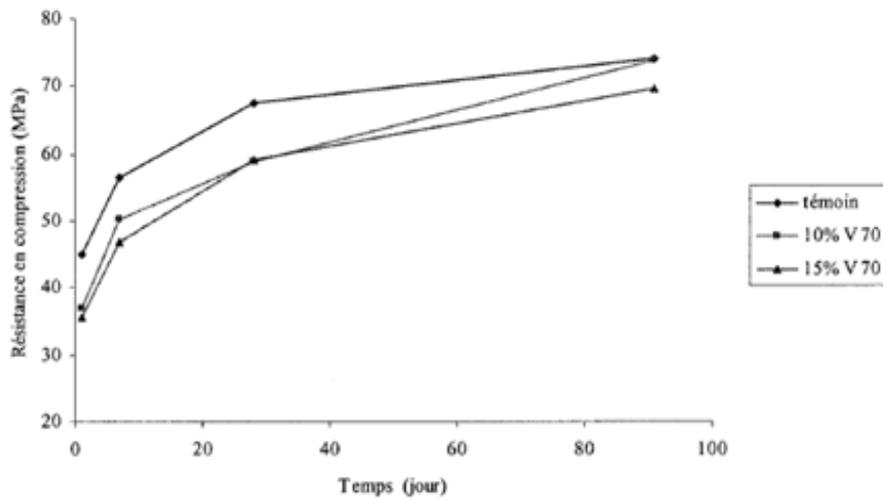


Figure IV.6 : Résistance en compression de mortier témoin et ceux contenant 10 et 15% DE V70 (E/L=0.35+SP) [42].

Tableau IV.5 : Composition des mélanges des mortiers témoin et ceux contenant 10 et 15% de V70 (E/C =0,45 +Réducteur d'eau) [42].

	Témoin	10% V ₇₀	15% V ₇₀
Sable/liant	2,4	2,4	2,4
E/L	0,45	0,45	0,45
Réducteur d'eau (ml)	1,50	1,45	1,40
Étalement (cm)	19,1	19,5	19,5
f'_c (MPa) à 1 jour	25	19	16
f'_c (MPa) à 7 jours	46	38	33
f'_c (MPa) à 28 jours	53	45	46
f'_c (MPa) à 91 jours	56	59	56

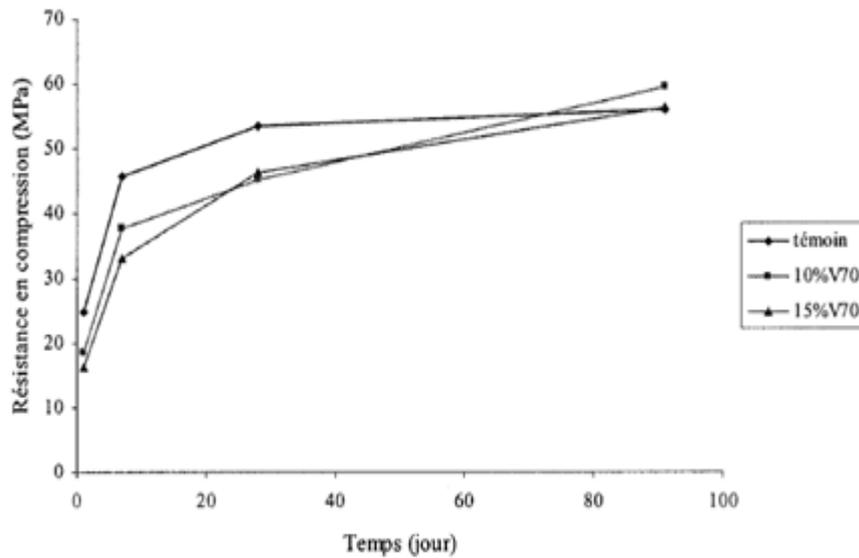


Figure IV.7 : Résistance en compression de mortier témoin et ceux contenant 10 et 15% de V70 (E/L=0.45+réducteur d'eau) [42].

Tableau IV.6 : Composition des mélanges des mortiers témoin et ceux contenant 10 15 et 30% de V40 (E/C =0 ,485) [42].

	Témoin	10% V ₄₀	15% V ₄₀	30% V ₄₀
Sable /liant	2,75	2,75	2,75	2,75
E/L	0,485	0,475	0,470	0,475
Étalement (cm)	19,1	19,3	18,9	18,9
f'_c (MPa) à 1 jour	12	7	7	4
f'_c (MPa) à 28 jours	37	30	28	24
f'_c (MPa) à 91 jours	52	41	36	33

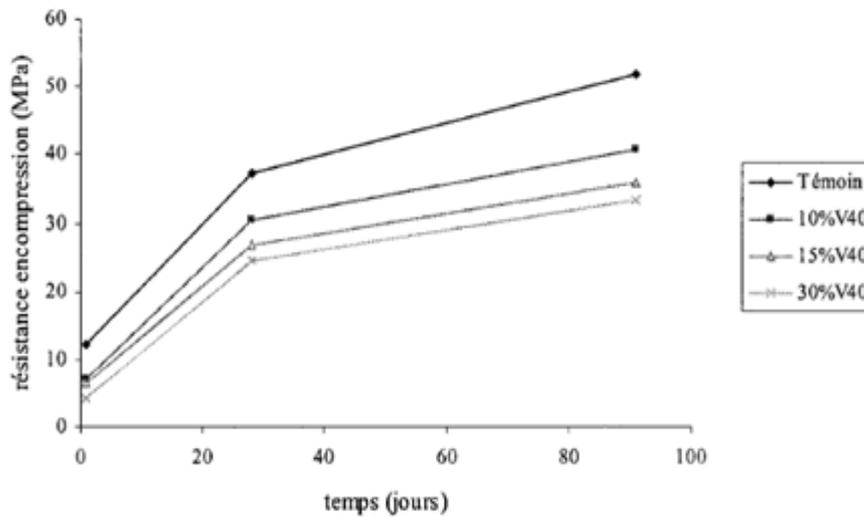


Figure IV.8 : Résistance en compression de mortier témoin et ceux contenant 10, 15 et 30% de V40 ($E/L = 0.485$) [42].

Tableau IV.7 : Composition des mélanges des mortiers témoin et ceux contenant 10-15 et 30% de V200 ($E/C = 0,485$) [42].

	Témoïn	10% V ₂₀₀	15% V ₂₀₀	30% V ₂₀₀
Sable /liant	2,75	2,75	2,75	2,75
E/L	0,485	0,475	0,470	0,470
Étalement (cm)	19,1	19,1	18,7	19,1
f'_c (MPa) à 1 jour	12	7	6	3
f'_c (MPa) à 28 jours	37	31	25	16
f'_c (MPa) à 91 jours	52	34	29	18

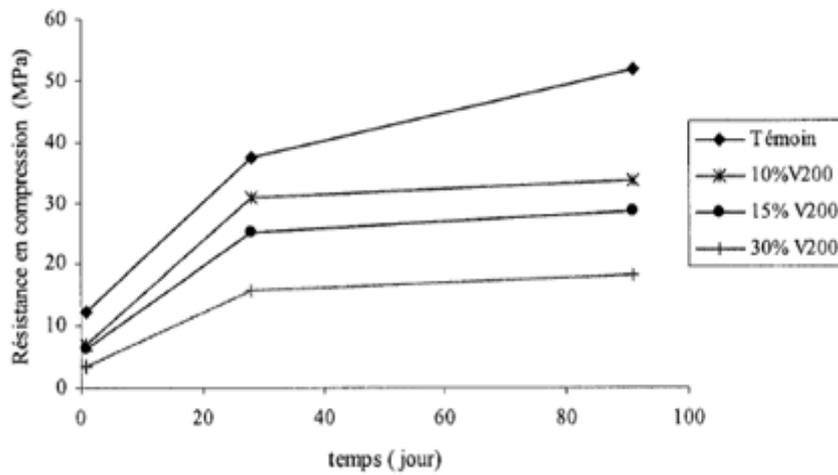


Figure IV.9 : Résistance en compression de mortier témoin et ceux contenant 10- 15 et 30% de V200 ($E/L = 0.485$) [42].

Tableau IV.8 : Composition des mélanges des mortiers témoin et ceux contenant 10 15 et 30% de V40 ($E/C = 0,45$) [42].

	Témoïn	10% V ₄₀	15% V ₄₀	30% V ₄₀
Sable /liant	2,75	2,75	2,75	2,75
E/L	0,45	0,445	0,440	0,440
Étalement (cm)	13,9	13,5	13,5	14,3
f'_c (MPa) à 1 jour	11	8	8	8
f'_c (MPa) à 28 jours	37	35	35	36
f'_c (MPa) à 91 jours	44	37	37	39

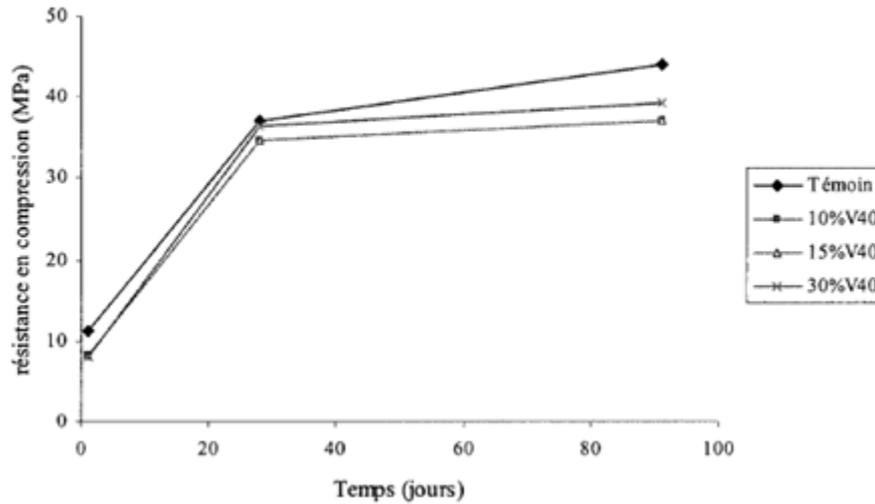


Figure IV.10 : Résistance en compression de mortier témoin et ceux contenant 10, 15 et 30% de V40 (E/L=0.45) [42].

Tableau IV.9 : Composition des mélanges des mortiers témoin et ceux contenant 10, 15 et 30% de V200 (E/C =0,45) [42].

	Témoins	10% V ₂₀₀	15% V ₂₀₀	30% V ₂₀₀
Sable /liant	2,75	2,75	2,75	2,75
E/L	0,45	0,445	0,420	0,400
Étalement (cm)	13,9	14,3	14,3	13,6
f'_c (MPa) à 1 jour	11	9	8	4
f'_c (MPa) à 28 jours	37	32	25	15
f'_c (MPa) à 91 jours	44	36	29	21

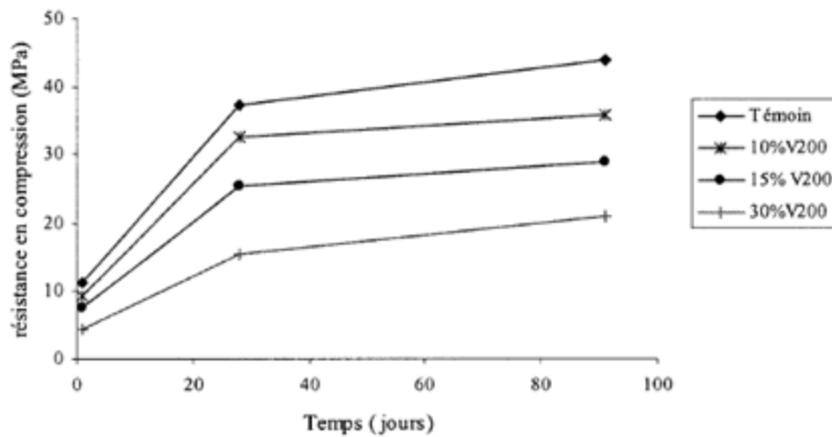


Figure IV.11 : Résistance en compression de mortier témoin et ceux contenant 10, 15 et 30% de V200 (E/L=0.45) [42].

Tableau IV.10 : Composition des mélanges des mortiers témoin et ceux contenant 10, 15 et 30% de V40 (E/C =0,45 +Réducteur d'eau) [42].

	Témoin	10% V ₄₀	15% V ₄₀	30% V ₄₀
Sable /liant	2,4	2,4	2,4	2,4
E/L	0,45	0,45	0,45	0,45
Réducteur (ml)	1,5	1,4	1,2	1,1
Étalement (cm)	19,5	19,9	19,9	19,9
f'_c (MPa) à 1 jour	15	7	6	4
f'_c (MPa) à 28 jours	50	30	29	27
f'_c (MPa) à 91 jours	54	44	38	44

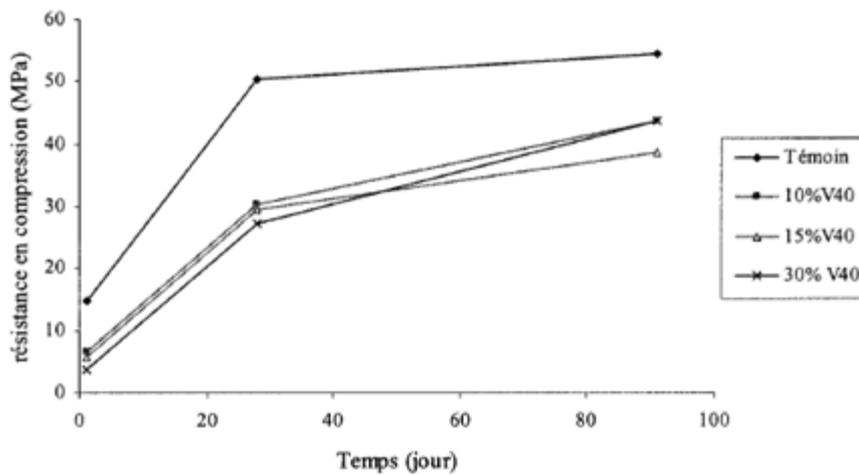


Figure IV.12 : Résistance en compression de mortier témoin et ceux contenant 10 15 et 30% de V40 (E/L=0.45+Réducteur d'eau) [42].

Tableau IV.11 : Composition des mélanges des mortiers témoin et ceux contenant 10 15 et 30% de V200 (E/C =0,45 +Réducteur d'eau) [42].

	Témoin	10% V ₂₀₀	15% V ₂₀₀	30% V ₂₀₀
Sable /liant	2,4	2,4	2,4	2,4
E/L	0,45	0,45	0,45	0,45
Réducteur (ml)	1,5	1,3	1,25	1,15
Étalement (cm)	19,5	19,5	19,5	19,5
f'_c (MPa) à 1 jour	15	10	7	4
f'_c (MPa) à 28 jours	50	5	30	19
f'_c (MPa) à 91 jours	54	33	34	24

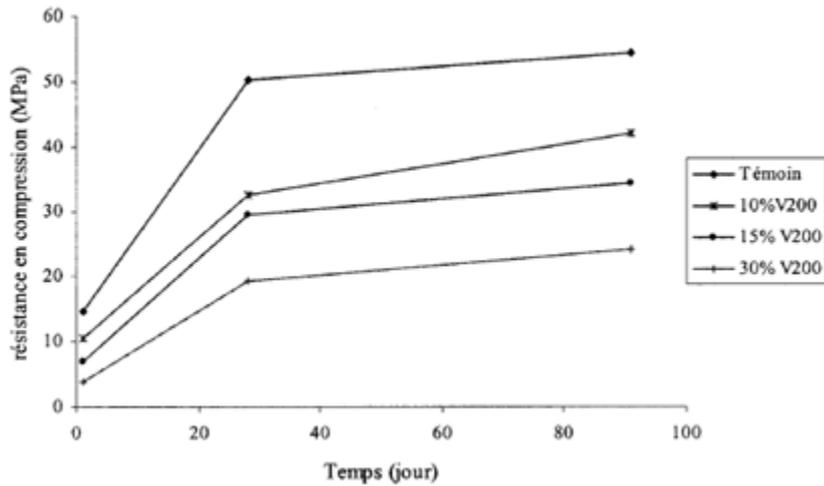


Figure IV.13 : Résistance en compression de mortier témoin et ceux contenant 10 , 15 et30% de V200 (E/L=0.45 + Réducteur d'eau) [42].

Tableau IV.12 : Composition des mélanges des mortiers témoin et ceux contenant 10 15 et 30% de V40 (E/C =0 ,35 +SP) [42].

	Témoin	10% V ₄₀	15% V ₄₀	30% V ₄₀
Sable /liant	2,25	2,25	2,25	2,25
E/L	0,35	0,35	0,35	0,35
SP (%)	0,90	0,85	0,85	0,90
Étalement (cm)	19,5	19,1	19,1	19,1
f'_c (MPa) à 1 jour	38	29	26	19
f'_c (MPa) à 28 jours	62	57	45	45
f'_c (MPa) à 91 jours	70.5	66	66.5	70

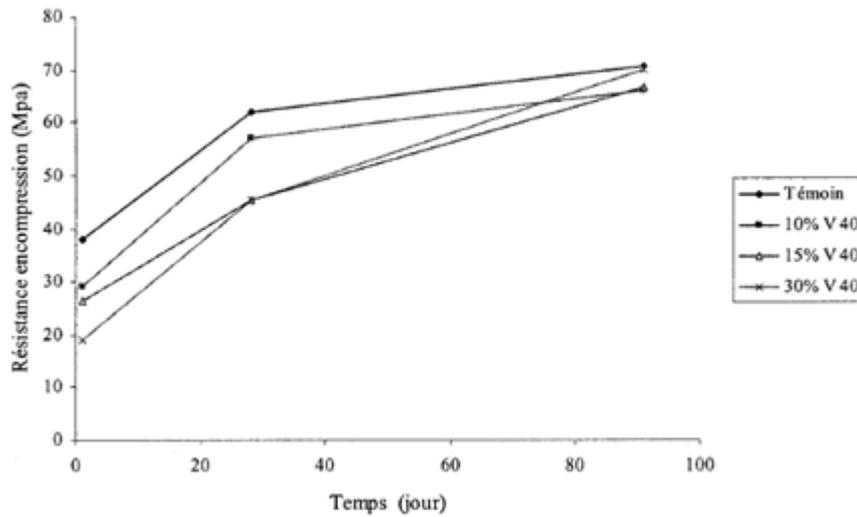


Figure IV.14 : Résistance en compression de mortier témoin et ceux contenant 10, 15 et 30% de V40 (E/L=0.35 + SP) [42].

Tableau IV.13 : Composition des mélanges des mortiers témoin et ceux contenant 10, 15 et 30% de V200 (E/C =0,35 + SP) [42].

	Témoïn	10% V ₂₀₀	15% V ₂₀₀	30% V ₂₀₀
Sable /liant	2,25	2,25	2,25	2,25
E/L	0,35	0,35	0,35	0,35
SP (%)	0,90	0,85	0,80	0,80
Étalement (cm)	19,5	19,5	19,1	19,1
f'_c (MPa) à 1 jour	38	35	28	19
f'_c (MPa) à 28 jours	62	59	52	37
f'_c (MPa) à 91 jours	70.5	66	56	45

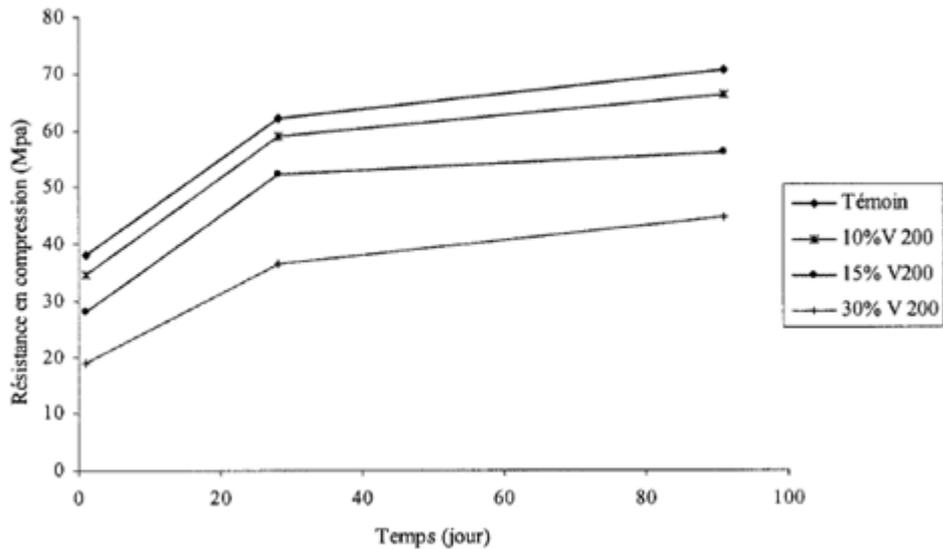


Figure IV.15 : Résistance en compression de mortier témoin et ceux contenant 10 , 15 et30% de V200 (E/L=0.35 + SP) [42].

Les données présentées dans les tableaux IV.2 à IV .13 montre que, dans le cas des mortiers contenant du verre , la demande en eau diminue en fonction du pourcentage de remplacement .En faisant du mortier avec le rapport E/C de 0.45 (témoin), dans le cas de mortier contenant de V200 , ce rapport a été diminué jusqu'a 5% pour le même étalement .La réduction de ce rapport a été observée même dans le cas de V40 . Alor que dans les essais effectués sur pâtes contenant ce verre, son utilisation a diminué la celle-ci.

Le résultat de l'essai de compression montre que les résistances de tous les mortiers à 24heurs ont diminué en fonction de pourcentage de remplacement. Dans les cas des mortiers content 30% V₂₀₀, en absence de super plastifiant, cette valeur est minimum (varie entre 3 et 4 MPa).

Dans les cas des mortiers avec un rapport E/C 0.485 et 0.45 le rapport S/L utilisé a été égal à 2.75. Mais dans le cas des mortiers contenant du super plastifiant, on utilisé un rapport de 2 .25. En utilisant ce rapport, on augmente la quantité de liant dans le mortier ; Dans la pratique ,le béton a

haute performance confactionné avec le superplastifiant contient une quantité plus élevée de ciment que celle du béton ordinaire ; pour cette raison, on choisit également le rapport S/L égal à 2.40 dans le cas des mortier contenant un réduction d'eau

Les résultats obtenus sur V70 montre que les résistance en compression à 1, 7 et 28 jours des mortiers contenant du verre avec E/C de 0.485 sont en général moins élevées que celle du mortier témoin, et que cette valeur diminue en fonction de taux de remplacement. Mais le développement de la résistance à la compression de ces mortiers montre qu'à 91 jours les résistance ont augmenté jusqu'à atteindre celle du mortier témoin (figure IV.4) . Dans le cas de mortiers fabriqués avec E/C de 0.45 à 28 jours, cette valeur est un peu plus élevée en utilisant 10% de verre (figure IV.5). De plus, en utilisant le superplastifiant, la résistance en compression des mortiers contenant 10% du verre similaire à celle de mortier témoin (figure IV.6) . Alors que, en utilisant le réducteur d'eau cette valeur est 3 MPa plus élevée que celle du témoin (figure IV.7). En effet , on peut conclure qu'après 28 jours il y a une réaction pouzzolanique importante entre la silice de verre et les ions hydroxyde dans la solution.

Les résultats obtenus sur V40, présenté dans les figures IV.8, IV.10, IV.12, IV.14, montrent une réactivité pouzzolanique moins élevée en utilisant le rapport E/L de 0.485 et 0.45. Dans le cas des mortiers contenant le réducteur d'eau, à 91 jours, la résistance en compression de mortier contenant 30% du verre est égale à celle contenant 10%, mais les mortiers contenant du verre sont moins résistants que le témoin .

Dans le cas des mortiers contenant le superplastifiant, il y a la réaction pouzzolanique remarquable dans le mortier contenant 30% V40 même jusqu'à 28 jours, telle que la résistance en compression de mortie est égale à celle contenant 15% du verre. Ainsi sa résistance à 91 jours est égale à celle du témoin qui montre excellent proprité pouzzolanique de ce verre .

Selon les résultats obtenus avec V200, qui est le verre le plus grossier, pour tous les rapports E/L et même en présence du superplastifiant et du réducteur d'eau, les résistances en compression ont été moins élevées que celles du mortier témoin en fonction du pourcentage de remplacement. Cette valeur est moins de 50% dans les cas des mortiers contenant 30% de ce verre (sauf de mortier contenant le superplastifiant.) à partir de 28 jours, le développement de la résistance en comprission de ces mortiers est trop lent, ce qui peut signifier que ce verre ne présente aucune proprité pouzzolanique .

En comparant les résultats de Maryam Sargolzahi en 2005 (42) et RACHIDA I en 2009 (20) pour les 3 classes de verre, on constate que les résistances en compretion sont simelaires . (les résultats des classes C4, C6 et C8 sot les mêmes avec Les figurs nt IV.15, IV 4 et figure IV.12 respectivement)

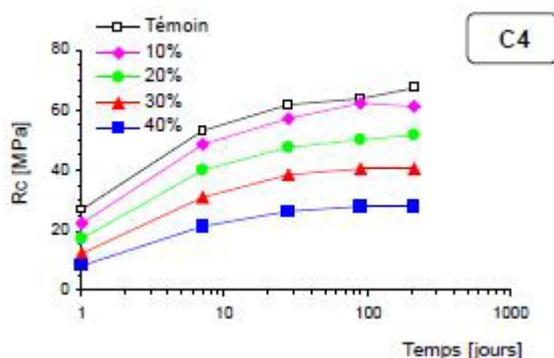


Figure IV. 16 : Résistance en compression de mortier témoin et ceux contenant 10 , 20,30 et40% de V200 (C4) [20].

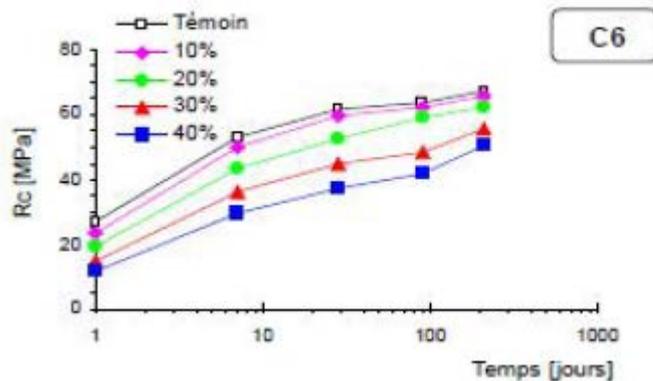


Figure IV. 17 : Résistance en compression de mortier témoin et ceux contenant 10 , 20,30 et40% de V70 (C6) [20].

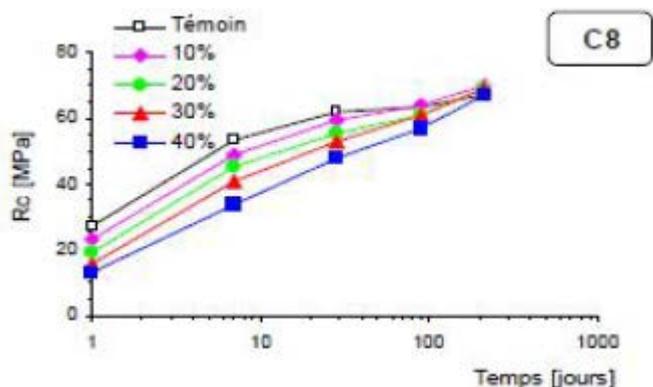


Figure IV. 18 : Résistance en compression de mortier témoin et ceux contenant 10 , 20,30 et40% de V40 (C8) [20].

On conclut que les classe les plus fines (C6et C8) seules manifestent une réaction chimique, donc on peu remplace le ciment par ce verre.

Ces résultats (de Maryam Sargolzahi en 2005, RACHIDA I en 2009) confirment le fait que l'ajout de PV entraine une perte de la résistance à jeune âge, mais augmente progressivement jusqu'à dépasser son témoin équivalent à des âges plus avancés.

IV.3 : Résistance en Compression de béton tertiaire :

Les matériaux utilisés dans ces essais sont donnée dans les tableaux IV.14 et les résistances en compression sont présentées à la figure IV.16.

Tableau IV.14 : composition de mélange et des mortiers témoin et ceux contenant 15,20 et 30% de V40 et 5% de fumée de silice (E/C= 0.35+SP) [42].

	Témoin	15% V ₄₀ + 5% FS	20% V ₄₀ + 5 % FS	30% V ₄₀ + 5 % FS
Sable /liant	2,25	2,25	2,25	2,25
E/L	0,35	0,35	0,35	0,35
SP (%)	0,90	1,2	1,2	1,2
Étalement (cm)	19,5	19,9	19,7	19,5
f ^l _c (MPa) à 1 jour	38	23	19	13,5
f ^l _c (MPa) à 28 jours	62	64	53	53
f ^l _c (MPa) à 91 jours	71	79	65	63

Les données présentées dans le tableau IV.14 montrent que, dans les cas des mortiers ternaires, la teneur de super plastifiant requise pour obtenir le même étalement a été augmenté, qui peut être à cause de la fumée de silice dans le mortier .Pour la même teneur de super plastifiant dans les mortiers ternaires, l'étalement a diminué légèrement en fonction du pourcentage de verre.

Les résultats des essais de compression sur ces mortiers ternaire montre que 15% de V40 en présence de 5% de fume de silice nous donne une résistance en compression plus élevée que celle du mortier témoin .Comme un grande partie du portland ite a réagit avec la fumée de silice et le reste n'est

pas suffisant pour réagir avec la teneur élevée de silice. On peut conclure que la substitution de 15% de ciment par V40 peut être une teneur optimum de ce verre dans le mortier ternaire contenant la fumée de silice. Malgré que la résistance en compression 6 mois peut nous donner plus d'information que ceux à 91 jours.

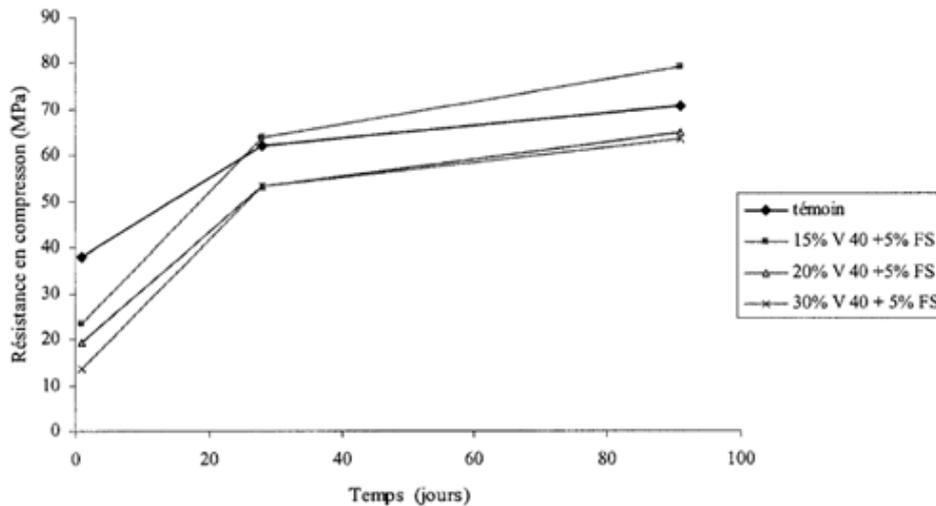


Figure IV.19 : Résistance en compression de témoin et ceux contenant 15 ,20 et 30% de V40 + 5% de la fumée de silice($E/L=0.35+SP$) [42].

IV.4 : Perméabilité aux ions chlorures :

Cet essai consiste à mesurer la charge en coulomb nécessaire pour diffuser des ions chlorures à travers un échantillon cylindrique de béton. Cet échantillon est placé entre deux compartiments amont, rempli d'une solution acide NaCl et un compartiment aval rempli d'une solution basique NaOH . Le passage d'un courant électrique continu de 60 volts pendant six heures permet de calculer la charge électrique de diffusion des ions chlorures. Le dispositif utilisé pour cet essai est représenté par la figure **IV.20** :

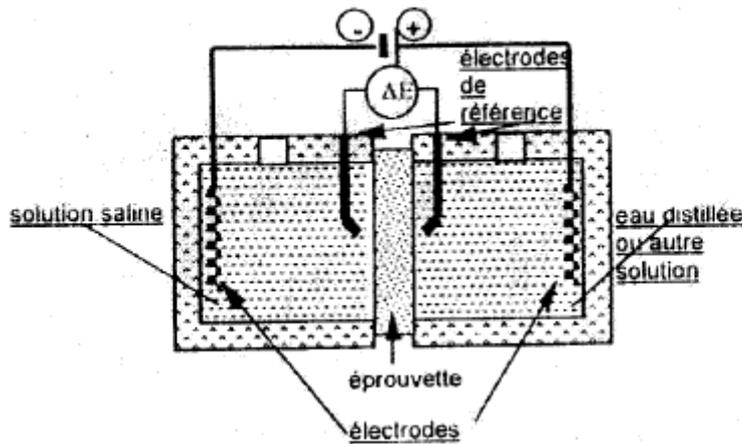


Figure IV.20: Dispositif expérimental de l'essai de diffusion aux ions chlorures

Les résultats de l'essai de perméabilité à 28 et 91 jours sur les bétons sont consignés dans la figure IV. 21.

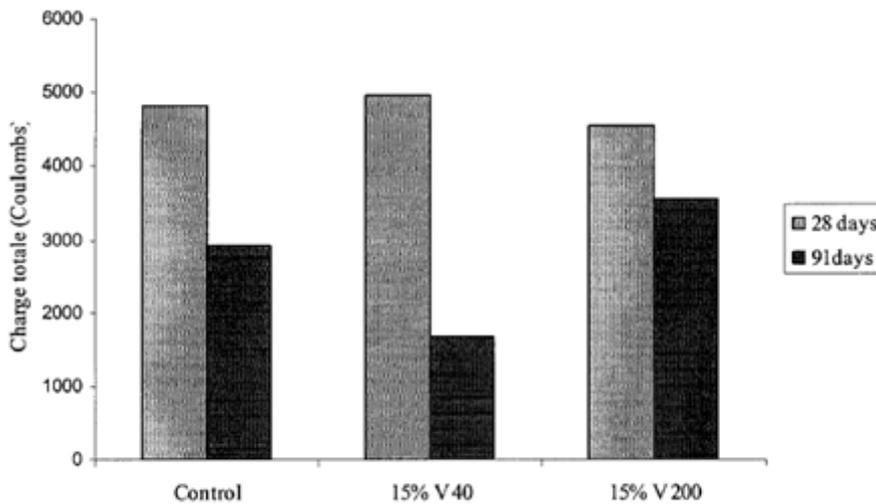


Figure IV.21 : Perméabilité aux ions chlorures du béton témoin et ceux contenant 15% des V_{40} et V_{200}

Selon les résultats obtenus, à 28 jours la charge totale qui a traversé les échantillons de béton est supérieure à 4000 coulombs, ce qui montre la forte perméabilité de ces bétons. A 91 jours, la charge traversant le béton

témoin confirme la perméabilité moyenne de ce béton (2914 coulombs). Dans le cas du béton contenant 15% de V40, la charge a été diminuée significativement, (1668 coulombs), ce qui montre la faible perméabilité de ce béton.

En effet, on peut dire que la perméabilité du béton est réduite avec un remplacement de 15% de V40. Par contre, l'effet inverse est observé lorsque le béton est confectionné en utilisant la même quantité de remplacement en V200 (3564 coulombs).

On peut conclure que l'utilisation de 15% de V40 avec une surface spécifique plus élevée que le ciment permet de diminuer la perméabilité du béton.

Chapitre V

Conclusion

Conclusion

Des millions de tonnes de verre sont récupérées chaque année et une voie de recyclage du verre consiste à l'utiliser dans les matériaux de construction. En général, la résistance du béton contenant du verre est inférieure à celle du béton contenant du gravier (Saadani, 2006).[43].

Du fait de sa nature amorphe et qu'il contienne des quantités relativement appréciables de silice, le verre est en général considéré comme étant pouzzolanique s'il est broyé finement.

Ainsi il pourrait être utilisé en remplacement partiel du ciment Portland dans les bétons (Rachida, 2009) [20]. Plusieurs travaux ont été conduits dans les années soixante sur l'utilisation du verre comme granulats dans les bétons. Cependant ces travaux ont montré que tous les bétons sont gonflés et fissurés. (Pike et al., 1960[44]; Schmidt et al., 1963[45] ; Pattengil et al., 1973 [46].) Depuis, l'idée a été en partie abandonnée.

Cette étude bibliographique a montré que les bétons de verre ont été étudiés et a confirmé que l'utilisation du verre dans les bétons est bien possible. Nous avons vu aussi que la taille des grains influence l'effet qu'apporte le verre au béton :

- L'incorporation du verre sous forme de fine améliore les **résistances en compression** et joue le rôle d'un **retardateur de prise** des bétons.
- poudre de verre L'utilisation du verre sous forme de granulats entraîne des gonflements liés à la réaction alcali-silice.
- La **perméabilité** du béton est **réduite** avec un remplacement de 15% de V40 que l'utilisation de V200.

Conclusion

On constate que l'ajout de la poudre de verre améliore de manière significative les propriétés du béton

- La résistance
- La durabilité
- L'économie

En somme, j'espère que ce modeste travail pourra offrir un plus aux promotions futures.

Bibliographies:

- [1] **Stanton, T.E.(1940).**Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate, Proceedings of the American society of Civil Engineers,vol.66,p.1781-811.
- [2] **MASSAZA, F. (1976).**Chemistry of pozzolanic additions and mixed cements, cement, vol.1,N°73,p.3.
- [3]**SERSALE,R.(1980).**structure and characterization of pozzolanas and of fly ashes, 7thproceedingsof theinternational congress, chemistry of cement, Paris, 1IV.
- [4] **MASSAZA, F et Pezzuoli, M. (1980). Cement paste-quartz bond** in autoclaved concretes, 7th Proceedings of the International Congress, Chemistry of Cement, paris, 3VII.
- [5] **FOOKES, P.G., Pollock, D. J. ET Kay. E. A (1981).** Middle East concrete, II Rates of deterioration, concrete, London, vol.9, n° 15, P. 12-19.
- [6] **MINDES, S., YOUNG, J .F. (1981)** Concrete. prentice-hall inc., Englewood cliffs, new jersey, p.195-197
- [7] **Poole, .B.(1992).**Alkali-silica reactivity mechanisms of gel formation and expansion,9th International conference on alkali Aggregate reaction, Londres , U.K,P. 782-787.
- [8] **Sprung, S. et Sylla, H. M.(1998).**Course of the alkali/ SILICA REACTION in concrete with different of aggregate, ciment, platreachaux, Allemagne, vol.51.N°6,P.334 -345.cite dans(Rachida,2009)
- [9]**Olafsson ,h.(1986).**The effect of relative humidity and temperature on alkali expansion of mortar bars, proceedings of the 7th international conference on Alkali-Aggregate reaction in concrete, Ottawa, Canada, p.461-465.cite dans (Rachida 2009)
- [10]**Kurhara, T. et katawaki. (1989).** Eeffects of moisture control and inhibition on alkali-silica reaction, proceedings of the 8th international conference on Akali -

Aggregate reaction in concret , p.629-634,Kyoto, Japon . Cite dans (Rachida,2009).

[11]**C. KIRPACH**, Ciments Luxembourgeois, Séminaire- Béton2001: JournéeD'information technique, **23 novembre 2001**, P 7-21.

[12]**DRON, R. et VOINOVITCH, I.A. ,(1982)** L'activation hydraulique des laitiers, pouzzolanes et cendre volantes ,Chapitre XIII du livre le béton hydraulique , édite par J .Baron et R. Sauterery .

[13]**PAPADAKI, M. et VENUAT, M. (1966)** Fabrication et utilisation des liants hydraulique, Deuxième édition, p .391

[14] **GIRBES, I., LOPEZ –TENDRERO,M ,SUESTA,C.BELENA,I.(2004)** Recycle glass cullet as partial Portland cement replacement, Glass waste, p.141-148.

[15]**SOBOLEV,K .,TURKER,P.,YEGINOBALI, A.,ERDOGAN,B. (2004)** the microstructure and properties of Eco-cement containing waste, glass waste,p.177-186.

[16]**BYARS, E.(2003)**Conglasscrete newsletter, Issue 3,Septembre 2003

[17]**SHAO, Y.LEFORT,T .MORAS ,S. RODRIGUEZ,D (2000)** studies on concrete containing ground waste glass, Cement and concrete research, Vol.30,p.91-100

[18]**SHAYAN,A .XU, A(2003)** Value-added utilisation of waste glass in concrete, Cement and concrete research, Volume 34,P.81-99.

[19] **SHAYAN, A. XU, A (2004)** Value-added utilisation of waste glass in concrete, Cement and concrete research, 34, (2004) 81-89.

[20]. **Rachida I;** ‘‘Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique’’, UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, p.58-59. Le 10 juillet 2009.

- [21] **CHEN, C.H., HUANG, R. WU, J.K et YANG, C.C. (2006).** Waste E-glass particles used in cementitious mixtures, *Cement and Concrete Research*, vol. 36, n°3, p.449-456.
- [22] **ZACHARIASEN, W.H. , Journal of Am .Chem.Soc.,54,3841(1932).**
- [23] **PHILIP GIBBS**, le verre est – il un solide ou liquide, **octobre 1996**. Cité dans (Serifou, 2014)
- [24]. **ASHBY, M.F.et JONES, M.F.** (1996). *Matériaux- propriétés et applications*, Paris, 2^e édition, Dunod, p.47.
- [25]. **ZARZYCKI, J.** (1962). A direct electron microscope study of the structure of glass, *Physics and chemistry of Glasses*, vol.3, p.163-166
- [26]. **SCHOLZE, H.** (1980). *Le verre, nature, structure et propriétés ; institut du verre*, Paris 1980.
- [27]. **VARGIN, V.V et YAKOVLEVA, K.A.** (1961). Effects of water and acid on vitreous sodium alumino-silicates, *Journal of applied chemistry*, vol. 34, p. 446-447
- [28]. **WIKIPEDIA**, Verre, [en ligne], <http://fr.wikipedia.org/wiki/Verre>.
- [29]. **M. N. Bajad**, Research Scholar, S.V.N.I.T, Surat, **C. D. Modhera**, Professor, S.V.N.I.T, Surat and **A. K. Desai**, Associate Professor, S.V.N.I.T, Surat.”
Resistance of Concrete Containing Waste Glass Powder Against MgSO₄ Attack.
- [30]. **SHI, C., WU, Y. et RIEFLERB, C. et WANG, H.** (2005). Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders, *Cement and Concrete Research*, vol.35, n° 5, p. 987- 993

[31].**MEYER, C.** et **BAXTER, S.** (1997). Use of Recycled Glass for Concrete Masonry Blocks Final Report 97-15, Albany, New York: New York State Energy Research and Development Authority

[32].**BYARS, E.,** **ZHU, H.** et **MORALES, B.** (2004). Conglasscrete , the Waste and Resources Action Programmer, Mars

[33]. **JIN, C.,** **MEYER, C.** et **BAXTER, S.** (2000). “Glass Crete”-Concrete with glass aggregate, American concrete institute, Material Journal, n°97, p.208-213

[34].**XIE, Z.,** **XIANG, W.** et **XI, Y.** (2003). ASR Potentials of Glass Aggregates in Water-Glass Activated Fly Ash and Portland Cement Mortars, Journal of Materials in Civil Engineering, p.67-74

[35].**YAMADA, K.** et **ISHIYAMA, S.** (2005). Maximum dosage of glass cullet as fine aggregate mortar. Dans Achieving Sustainability in Construction: Proceedings of the International Conference Held at the University of Dundee, Scotland, UK on 5-7 July 2005 London, Thomas telford Ltd, p.185-192

[36].**BAXTER, S.** (2000). A lithium based pozzolan for ASR control, 11th international conference of Alkali Aggregate Reaction, Quebec.

[37].**MEYER, C.** et **BAXTER, S.** (1997). Use of Recycled Glass for Concrete Masonry Blocks Final Report 97-15, Albany, New York: New York State Energy Research and Development Authority

[38]. *Louis Vicat* : élabore la *théorie* de l'hydraulicité En 1828. www.infociments.fr ›
Ciments

[39].**JEAN-PAUL, KURTZ**2004 Dictionary of Civil Engineering, Springer Science & Business Media,2004 <https://fr.wikipedia.org/wiki/Pouzzolane>

[40].**SNISNA ZOUBIDA** 2011.étude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux.

[41].https://fr.wikipedia.org/wiki/Essai_de_prise_du_ciment#Prise_d.E2.80.99essai_.C3.A0_1.E2.80.99aiguille_de_Vicat

[42].**Mariame SARGOLZAHJUILLET** 2005, Optimisation du verre mixte dans le béton de qualité.

[43].**SAADANI .M** (2006) Comportement des bétons à base des granulats recyclés .Génie civil (en ligne).Mémoire de magester.Université Mentouri Constantine .156P.

[44].**PIKE,R.G.,Hubbard ,d et Newman ,E.S.**(1960) .Binarysilicate glasses in the study of alkali-aggregate, reaction, highway research board bulletin, N°275,p.39-44 cite dans (rachida2009).

[45].**SCHMIDT.A.et Saia , W.H.F.**(1963).Alkali-aggregate reaction tests on glass used for exposed aggregate wall panel work .American concrete institute,n°60,p.1235-1236.Material journal cite dans (rachida2009).

[46].**PATTENGIL, M.et Shut T.C**(1973),Use of ground glass as a pozzolan; Albuquerque symposium on Utilisation of waste glass in secondary products ,Albuquerque ,new mexico,U.S.A.,p.137-153