

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ

– BOUIRA –



Faculté des Sciences et Des Sciences Appliquées

Mémoire de Master

Présenté par :

Mr DJAFER-KHODJA Miloud

En vue de l'obtention du diplôme de Master en :

Filière : Génie Civil

Option : Ingénierie des Matériaux de Construction

Thème

**Étude de l'effet de la finesse de la poudre de verre sur
les propriétés physico-mécanique du béton**

Devant le jury composé de :

Président	AMRANE	Belaid	MCB	UAMOB
Encadreur	KENNOUCHE	Salim	MCB	UAMOB
Examineur	HAMI	Brahim	MAA	UAMOB
Examineur	SAOUDI	Nacira	MAA	UAMOB
Examineur	ARAB	Bahia	MAA	UAMOB

Année universitaire : 2016/2017

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord mon encadreur, Monsieur KENNOUCHE Salim, pour sa patience, et surtout pour sa confiance, ses remarques et ses conseils, sa disponibilité et sa bienveillance.

Qu'il trouve ici le témoignage de ma profonde gratitude.

Je voudrais également remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques.

Je tiens aussi à remercier les ingénieurs responsables de laboratoire matériaux pour leurs aides et disponibilité.

Mes vifs remerciements à tous mes enseignants, en signe d'un grand respect et d'un profond amour !!!

Merci à vous tous

Dédicace

À la mémoire de mes parents.

À ma femme qui a toujours été à mes côtés

À mes chers enfants : Ahmed, Houda, Rafik et Rym

À mon grand frère et oncle Mokhtar

À tous mes frères et sœurs, ainsi que leurs enfants

À mes beaux-parents et à toute ma famille

À tous mes amis et collègues

À tous les étudiants de la promotion 2016/2017

Option : matériaux

À tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer

Résumé :

L'utilisation de la poudre de verre dans le béton en remplacement partiel du ciment pourrait constituer une solution appropriée vers le développement durable des structures sous condition que le verre soit finement broyé. Dans cette recherche, les propriétés physico-mécaniques des bétons ont été évaluées. Les bétons étudiés sont un béton témoin et trois autres bétons contenant la poudre de verre à granulométrie différentes 0/80 μm , 0/125 μm et 0/250 μm . Des essais d'ouvrabilité caractérisée par l'affaissement au cône d'Abrams et les performances mécaniques de la résistance à la compression ont été réalisés en fixant le taux de la substitution à 15%. Les résultats ont montré qu'une augmentation de la finesse de la poudre de verre induit une légère augmentation de l'affaissement. Pour évaluer les effets pozzolaniques, des essais de compression ont été également réalisés et ont généralement abouti à une progression satisfaisante. Les bétons à verre recyclé ont manifesté une convergence relativement acceptable par rapport aux échantillons témoins, une convergence proportionnelle à l'âge du béton. Les performances mécaniques du béton contenant la poudre de verre 0/125 et 0/80 μm ont été évaluées à 88% par rapport à celles de béton témoin à l'âge de 28 jours. Sous un microscope confocal à balayage laser, des modèles 3D ont été développés pour aider à visualiser la vraie morphologie des échantillons.

La finesse 0/125 μm a été jugée plus convaincante compte tenu du coût et de l'environnement.

Mots-clés : - Poudre de verre, béton, ouvrabilité, résistance à la compression, effets pozzolaniques, microscopie confocal à balayage laser.

Abstract:

The use of glass powder in concrete as a partial replacement of cement could be an appropriate solution for the sustainable development of structures provided that the glass is finely crushed. In this research, the physico-mechanical properties of concrete were evaluated. The concretes studied are a control concrete and three other concretes containing the glass powder with different grain sizes 0/80 μm , 0/125 μm and 0/250 μm . Workability tests characterized by Abrams cone slump and mechanical performance of the compressive strength were performed by fixing the substitution rate at 15%. The results showed that an increase in the fineness of glass powder induces a slight increase in the slump. To evaluate the pozzolanic effects, compression tests were also carried out and generally resulted in satisfactory progression. Recycled glass concretes showed a relatively acceptable convergence compared to the control samples, a convergence proportional to the age of the concrete. The mechanical performances of concrete containing glass powder 0/125 and 0/80 μm were evaluated at 88% compared to those of control concrete at the age of 28 days. Under a confocal laser scanning microscope, 3D models were developed to help visualize the true morphology of the samples.

The fineness 0/125 μm was found more convincing considering the cost and the environment.

Keywords: - Glass powder, concrete, workability, compressive strength, pozzolanic effects, laser scanning confocal microscopy.

ملخص

استخدام مسحوق الزجاج في الخرسانة كبديل جزئي للأسمنت يمكن أن يكون حلاً مناسباً لتحقيق التنمية المستدامة للبنى بشرط أن يكون سحق الزجاج دقيقاً. الخرسانات المدروسة هي خرسانة مرجعية وثلاثة خرسانات تحتوي مسحوق الزجاج لجسيمات مختلفة 0/80، 0/125، 0/250 ميكرون من خلال تحديد نسبة الاستبدال بـ 15%. وأظهرت النتائج أن زيادة نعومة مسحوق الزجاج تؤدي إلى زيادة طفيفة في هبوط الخرسانة الطازجة. لتقييم الآثار البوزلانية، أجريت اختبارات ضغط أيضاً وأسفرت عموماً في زيادة مقبولة ولقد وجدت عموماً زيادة نسبية للمقاومة ضغط لعينات تحتوي على مسحوق الزجاج 0/125 و 0/80 ميكرون لعمر 28 يوماً. وتشير النتائج إلى أن خرسانة الزجاج المعاد تدويره أظهرت تقارب مقبول نسبياً مع عينات المرجع وتقارب نسبي مع الخرسانة المرجعية. تم تقييم الأداء الميكانيكي بـ 88% مقارنة مع المرجع.

. تبين أن خرسانة الزجاج 0/125 ميكرون هي أكثر إقناعاً في ضوء التكلفة والبيئة

كلمات البحث: - مسحوق الزجاج، الخرسانة، الآثار البوزلانية

Table des matières

Introduction générale.....	1
Problématique.....	5
I.1. Introduction.....	8
I.2. Historique.....	8
I.3. Définition et formation de verre.....	9
I.3.1. Définition de verre :	9
I.3.2. Formation de verre:.....	11
I.3.2.1 Critère de Goldschmidt :	12
I.3.2.2 Critère de Zachariasen :	13
I.4. Propriétés du verre	15
I.4.1 Propriétés mécaniques.....	15
I.4.1.1. Résistance à la traction et résistance à la compression	15
I.4.1.2. Elasticité.....	16
I.4.1.3. Dureté superficielle	16
I.4.2. Propriétés chimico-physiques	16
I.4.3. Propriétés thermiques.....	18
I.4.3.1. Coefficient de dilatation thermique.....	18
I.4.3.2. Conductibilité thermique.....	18
I.4.3.3. Résistance aux chocs thermiques	19
II.1. Introduction	21
II.2. Production annuelle mondiale du verre	22
II.3. Challenges environnementaux et économiques de l'industrie du ciment.....	24
II.4. Valorisation et recyclage des déchets de verre	24
II.4.1. Valorisation	24
II.4.2. Recyclage de verre dans la production du ciment	26
II.5. Valorisation des déchets de verre comme granulats	27
II.5.1. L'effet de la taille des agrégats de déchet de verre sur les propriétés mécaniques des bétons ...	29
II.5.2. Propriétés thermiques de l'agrégat de déchets de verre	30
II.6. Valorisation de déchets de verre en remplacement partiel du ciment.....	32
II.6.1. L'effet de la granulométrie des déchets de verre.....	32
II.6.2. Le taux de remplacement du ciment par la poudre de déchet de verre.....	33
II.6.4. Effet de la poudre de verre sur les propriétés du béton durci	36
II.7. Valorisation de déchets de verre en remplacement partiel du ciment et agrégat dans le même mélange	37
II.8. Valorisation de déchets de verre comme matière première pour la production de ciment.....	40

II.9. Valorisation de déchets de verre comme ajout cimentaire	41
II.9.1.Effet de la poudre de verre sur les propriétés de béton frais.....	41
II.9.2. Effet de la poudre de verre sur les propriétés du béton durci	42
III.1. Caractérisation des matériaux utilisés	45
III.1.1. Ciment	45
III.1.2. Poudre de verre.....	46
III.1.3. Eau de gâchage.....	47
III.1.4. Sable	47
III.1.4.1.Module de finesse.....	48
III.1.4.2. Equivalant de sable (ES)	48
III.1.5. Granulats	49
III.1.5.1 Essais Los Angeles.....	50
III.1.5.2 Essai Micro Deval	50
III.1.5.3 Coefficient d'aplatissement.....	50
III.1.6. Adjuvant Superplastifiant.....	51
III. 2. Formulation des bétons d'études	51
III. 2.1. Partie normative selon NF EN 206-1	51
III.2.1.1. Classe d'exposition.....	51
III.2.1.2. Classe de résistance du béton	52
III. 2.1.3. Classe de consistance du béton.....	52
III.2.1.4.Classe en fonction de la dimension maximale des granulats.....	53
III.2.2. Formulation selon la méthode Dreux-Gorisse.....	53
III.3.1 Essais sur béton à l'état frais	58
III.3.1.1 Affaissement au cône d'Abrams NF EN 12350-2.....	58
III.3.1.2 Masse volumique.....	59
III.3.2 Essais sur béton à l'état durci	60
III.3.2.1. Résistance à la compression	60
III.3.2.2. Evolution de la masse volumique en fonction de l'âge.....	61
III.3.2.3. Détermination du module d'élasticité et évolution des contraintes-déformations.	61
III.3.2.4. Fonctionnement du microscope confocal.....	63
IV.1.1Caractérisation du béton à l'état frais	66
IV.1.1.1 Affaissement au cône d'Abrams	66
IV.1.1.2 Masse volumique	66
IV.1.2 Caractérisation du béton à l'état durci.....	67
IV.1.2.1. Résistance à la compression.....	67
IV.1.2.2. Masse volumique à l'état durcis.....	70

IV.1.2.3. Contrôle de l'évolution contrainte-déformation.....	71
IV.1.2.4. Composition chimique de la poudre de verre verte analysé par la fluorescence X.....	74
IV.1.2.5. Images de la microstructure sous microscope confocal à balayage laser.....	74
Conclusion générale	77
Perspectives	78
Références bibliographiques	80
Annexes.....	87

Liste des tableaux.....Page

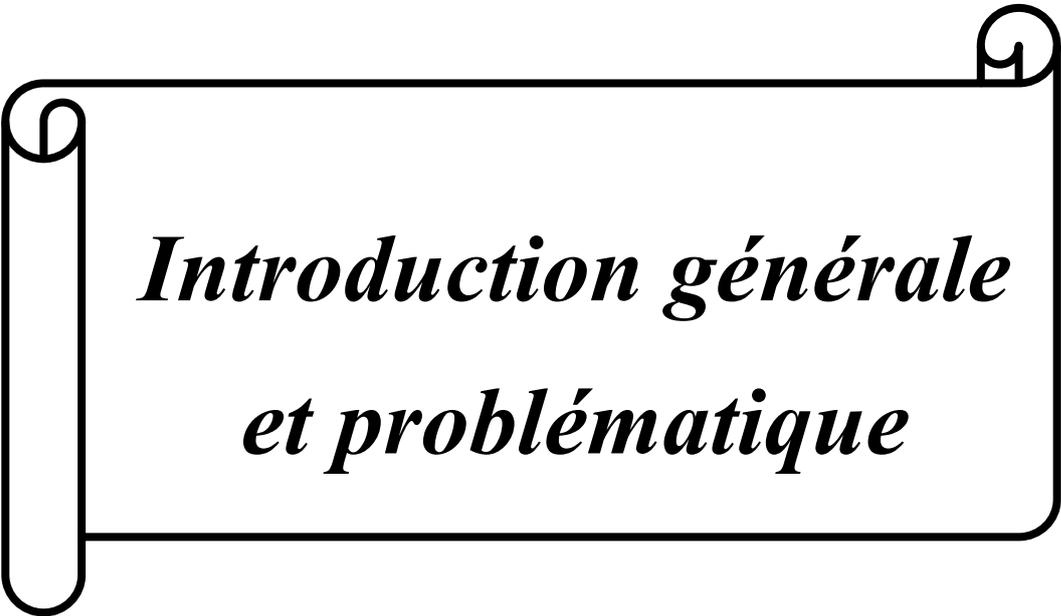
Tableau I. 1: Classification des oxydes selon leur caractère : formateur, modificateur ou intermédiaire selon Zachariassen [Zachariassen cité par [10]].....	15
Tableau I. 2: Composants de verre sodocalcique, verre cristal au plomb, borosilicate et verre E	18
Tableau I. 3: Résumé des principales caractéristiques techniques du verre flotté [8].....	19
Tableau II. 1: Quantité de déchets de verre et taux de recyclage dans différents pays.	26
Tableau II. 2: Composition chimique du ciment et différents verre colorés [1, 17,26].....	27
Tableau II. 3: Propriétés physique des déchets de verre et sable [37].....	28
Tableau II. 4: Résumé des recherches d'utilisation des déchets de verre comme agrégats.....	31
Tableau II. 5: Résumé des recherches sur l'utilisation des déchets de verre en remplacement partiel du ciment.	34
Tableau II. 6: La granulométrie des déchets de verre utilisé [36,66].	39
Tableau II. 7: Les granulométries et les pourcentages de déchets de verre [67].	39
Tableau II. 8: Résumé des recherches examinées sur l'utilisation de déchets de verre en remplacement partiel du ciment et des agrégats dans le même mélange.	39
Tableau II. 9: Propriétés de ciment à déchet de verre et ciment portland normal [70]	40
Tableau III. 1: Caractéristiques physiques du ciment utilisé.....	45
Tableau III. 2: Composition chimique du ciment utilisé.....	46
Tableau III. 3: Composition minéralogique du ciment utilisé.....	46
Tableau III. 4: Caractéristiques physiques de la poudre de verre.....	46
Tableau III. 5 : Composition chimique de la poudre de verre verte par fluorescence X.....	46
Tableau III. 6: Caractéristiques physiques des sables.	48
Tableau III. 7: Caractéristiques des graviers.	49
Tableau III. 8: Caractéristiques physiques de superplastifiant.	51
Tableau III. 9: Les classes de résistances du béton à 28 jours(MPa) [71].....	52
Tableau III. 10: Classe de consistance	52
Tableau III. 11: Données de base	53
Tableau III. 12: Coefficient granulat G en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats Dmax	54
Tableau III. 13: Correction sur le dosage de pâte en fonction de D_{max}	54
Tableau III. 14 : Correction sur le dosage de pâte en fonction de Dmax.	55
Tableau III. 15 : Correction sur le dosage de pâte en fonction de D_{max}	57
Tableau III. 16: Dosages des composants en Kg pour un mètre cube de béton fini.....	58

Tableau IV. 1 : Récapitulation des résistances des bétons sur cubes 15*15 à 7 jours.....	67
Tableau IV. 2: Récapitulation des résistances des bétons sur cubes 15*15 à 14 jours.....	68
Tableau IV. 3: (a) Récapitulation des résistances des bétons sur cubes 15*15 à 28 jours.	68
Tableau IV. 4: Exemple de calcul du module d'élasticité à 28 jours.	73
Tableau IV. 5: les modules d'élasticité des bétons étudiés à 28 jours.....	73
Tableau IV. 6: Composition minéralogique de la poudre de verre verte analysé par la fluorescence X.	74

Liste des figures.....Page

Figure 0-1 : Schéma récapitulatif illustrant les deux réactions : alcali-silice et pouzzolanique.....	4
Figure I. 1:Phénomène de transition vitreuse.....	12
Figure I. 2: Représentation bidimensionnelle selon Zachariasen [Zachariasen cité par [10]].....	13
Figure I. 3: Illustration schématique de l'effet de l'addition d'oxyde alcalin à la silice [H.Scholze cité par [10]]......	14
Figure I. 4: (a) Rupture d'une liaison Si-O-Si par le sodium (b) Modèle du réseau continu désordonné de Zachariasen-Warren [Zachariasen cité par [10]].	14
Figure II 1: Effet de l'utilisation de la poudre de verre en remplacement partiel du ciment sur l'affaissement des bétons [2]......	35
Figure II 2:Résultats des tests de résistance à la compression du béton réalisé avec de la poudre de verre en remplacement du ciment[2]......	37
Figure II 3:Résultats des tests de résistance à la traction du béton réalisé avec de la poudre de verre en remplacement du ciment[2]......	37
Figure II 4: Effet de l'utilisation de la poudre de verre en remplacement partiel du ciment sur l'affaissement des bétons [2]......	41
Figure II 5:Résultats des tests de résistance à la compression du béton réalisé avec de la poudre de verre en addition du ciment [2].	42
Figure II 6:Résultats des tests de résistance à la traction du béton réalisé avec de la poudre de verre en addition au ciment [2]......	42
Figure III 1: Préparation de la poudre de verre.	47
Figure III 2: Analyses granulométriques Laser de la poudre de verre.	47
Figure III 3: Courbes granulométriques des différents composants.....	56
Figure III 4: Photos des essais d'affaissement au cône d'Abrams.....	59
Figure III 5 : Confection et démoulages des éprouvettes et essais de compression.....	60
Figure III 6: Préparation de l'essai de mesure de module d'élasticité statique.....	62

Figure III 7: Photo du microscope confocal.	63
Figure III 8: Schéma des interactions faisceau-échantillon.	64
Figure IV 1: Effet de la poudre de verre sur l'affaissement des bétons.	66
Figure IV 2: Effet de la poudre de verre sur la masse volumique à l'état frais.	67
Figure IV 3: Résistance à la compression en fonction de l'âge des bétons.	69
Figure IV 4: Effet de la poudre de verre sur l'évolution de la résistance à la compression.	70
Figure IV 5: Effet de la poudre de verre sur la masse volumique à l'état durci.	70
Figure IV 6: (a) et (b) Courbe contrainte-déformation tracée sous Excel et celledonnée par le logiciel.	72
Figure IV 7: Images d'échantillons en 2D et 3D de béton BPV1 à poudre 0/80.	75
Figure IV 8: Images d'échantillons en 2D et 3D de béton BPV2 à poudre 0/125.	75
Figure IV 9: Images d'échantillons en 2D et 3D de béton BPV3 à poudre 0/250.	75



*Introduction générale
et problématique*

Introduction générale

Les déchets de verre constituent des problèmes environnementaux graves, en raison de l'augmentation continue des produits d'emballage jetables, ainsi que l'extension de l'industrie du verre. Ces déchets entraînent des dégradations de lourdes conséquences sur l'environnement [1].

En Algérie, les déchets de verre se sont accrus et ils ont un impact de plus en plus négatif sur l'environnement. Ils peuvent être collectés de manière rentable dans des couleurs mélangées.

D'autre part, des problèmes économiques et environnementaux sont générés par les industries du ciment en raison des besoins en grande quantités pour répondre aux fortes demandes des projets de construction, des émissions élevées de gaz à effet de serre, de l'utilisation intensive de l'énergie et de l'utilisation extrême des ressources naturelles. On estime Environ 800 millions de tonnes de béton ont été consommées aux États-Unis en 2007 et la consommation mondiale était estimée à 11 billions de tonnes, soit environ 1,7 tonnes pour chaque être humain vivant. La production de ciment (liant dans le béton) est un processus à forte intensité énergétique et très polluant, qui contribue d'environ 5-8% aux émissions mondiales de CO₂ [2].

Habituellement, les ajouts cimentaires les plus utilisés sont des coproduits et sous-produits industriels, tels que la fumée de silice, les laitiers de haut fourneau et les cendres volantes. Ils sont mélangés au ciment lors du broyage du clinker pour produire des ciments composés.

Par ailleurs, d'autres produits alternatifs ayant un potentiel pouzzolanique émergent de plus en plus, on retrouve notamment la poudre de verre (PV). Cette dernière est issue du broyage des déchets de verre mixte provenant de la collecte sélective des bouteilles et contenants en verre coloré peut jouer le rôle de solution alternative aux problèmes environnementaux et économiques évoqués précédemment.

En raison de la composition chimique et les propriétés pouzzolaniques des déchets de verre, l'option de l'utilisation de la poudre de ces déchets comme remplacement partiel du ciment dans les bétons et mortiers apparait comme une stratégie viable pour réduire l'utilisation du ciment Portland et ainsi réduire les impacts environnementaux et énergétiques de la production de béton.

La poudre de verre est obtenue en broyant à une grande finesse le verre récupéré. Lorsqu'il est incorporé au béton en remplacement d'une portion de ciment, le verre ainsi réduit en poussière se lie avec les éléments de la chaux en vertu de ses propriétés pouzzolaniques, améliore les performances mécaniques et rhéologiques du béton. Au CANADA, les travaux

sur la valorisation du verre menés depuis plus d'une vingtaine d'année par R.IDIR et al [3] ont permis de démontrer le potentiel d'utilisation de cette option alternative.

En effet, l'utilisation de ces déchets contribuera à préserver les ressources naturelles de la terre, à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à économiser de l'énergie et de l'argent. Les besoins en grandes quantités et les grands projets de construction font de l'industrie de la construction l'un des moyens les plus attrayants pour résoudre l'impact environnemental des déchets de verre. Cette contribution s'explique par le fait que la production de chaque tonne de ciment émet une tonne de dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère à la fois à partir du combustible et de la combustion des matières premières du ciment [2].

Le verre est une vaste source de déchet industriel, devient un thème de recherche dans le béton pour quatre principales raisons :

1. Etant un matériau artificiel, la composition chimique du verre est stable et bien définie.

Cela permet de prévenir les réactions chimiques inattendues et de modifier ou de traiter le verre si nécessaire.

2. L'absorption d'eau dans le verre est négligeable. C'est un avantage pour la formulation du béton car les autres matériaux naturels comme le gravier ou le sable absorbent plus ou moins une quantité d'eau initiale dépendante de leur nature et leur origine. Grâce à cette propriété du verre, la maniabilité du béton ou le rapport entre eau et liant pourrait être amélioré sans besoin d'ajouter des plastifiants. Cet avantage favorise les propriétés rhéologiques du béton frais.

3. Un autre atout du verre est sa résistance abrasive et sa dureté par rapport à celle des granulats naturels. En plus la résistance en compression du verre concassée est bien mentionnée dans la littérature. De ce côté, nous pouvons considérer la nature mécanique du verre concassée comme bien adapté pour l'utilisation comme granulats dans le béton.

4. Aussi, l'intérêt le plus important est de profiter de la source de verre recyclé qui augmente de millions de tonnes chaque année dans le monde entier (41 milliards d'objets de verre en moyenne chaque année aux Etats-Unis).

Etant un matériau très durable et recyclable à 100% et à l'infini, il est nécessaire de profiter cette ressource par rapport à l'environnement. Grâce à ces avantages, l'utilisation du verre dans la fabrication du béton devient un sujet intéressant dans plusieurs pays. Au cours des années, de nombreux progrès ont été apportés à ce sujet.

Malgré plusieurs avantages, le verre est chimiquement incompatible avec le ciment et présente un phénomène insurmontable dans le système cimentaire : la réaction alcali-silice (en anglais alkali silica reaction, ou ASR) [3].

Le verre utilisé dans le béton peut manifester, en fonction de la taille de ses particules, 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, le schéma illustré sur la figure (fig.1) inspiré des travaux de R.IDIR et al [3] résume et simplifie les effets de chacune des réactions alcali-silice et pouzzolanique.

Aussi, le verre concassé peut être utilisé comme granulats dans le béton. Cette option a l'avantage de présenter un faible coût. Néanmoins, l'utilisation de ce sable est susceptible de générer la réaction alcali-silice défavorable pour la structure. Qualifiée de « *Cancer des bétons* », la 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. Cette réaction est fortement dépendante non seulement de la quantité et de la solubilité de la silice du granulats, mais également de la quantité d'alcalins potentiellement mobilisable. Or, les verres mixtes de recyclage contiennent environ 13% d'alcalins. Le devenir des alcalins du verre représente donc un problème supplémentaire qui doit être pris en compte car ils sont des activateurs de la réaction alcali-silice. Des études antérieures menées sur le verre ont conclu que le gonflement causé par la réaction alcali-silice constitue le principal frein à sa valorisation dans les bétons R.IDIR et al[3].

Un broyage du verre à une plus grande finesse laisse envisager une utilisation de ce matériau en tant que liant. Dans ce cas, la silice du verre réagit avec la chaux produite par la réaction du ciment, créant ainsi des composants dotés de propriétés liantes : c'est la réaction pouzzolanique.

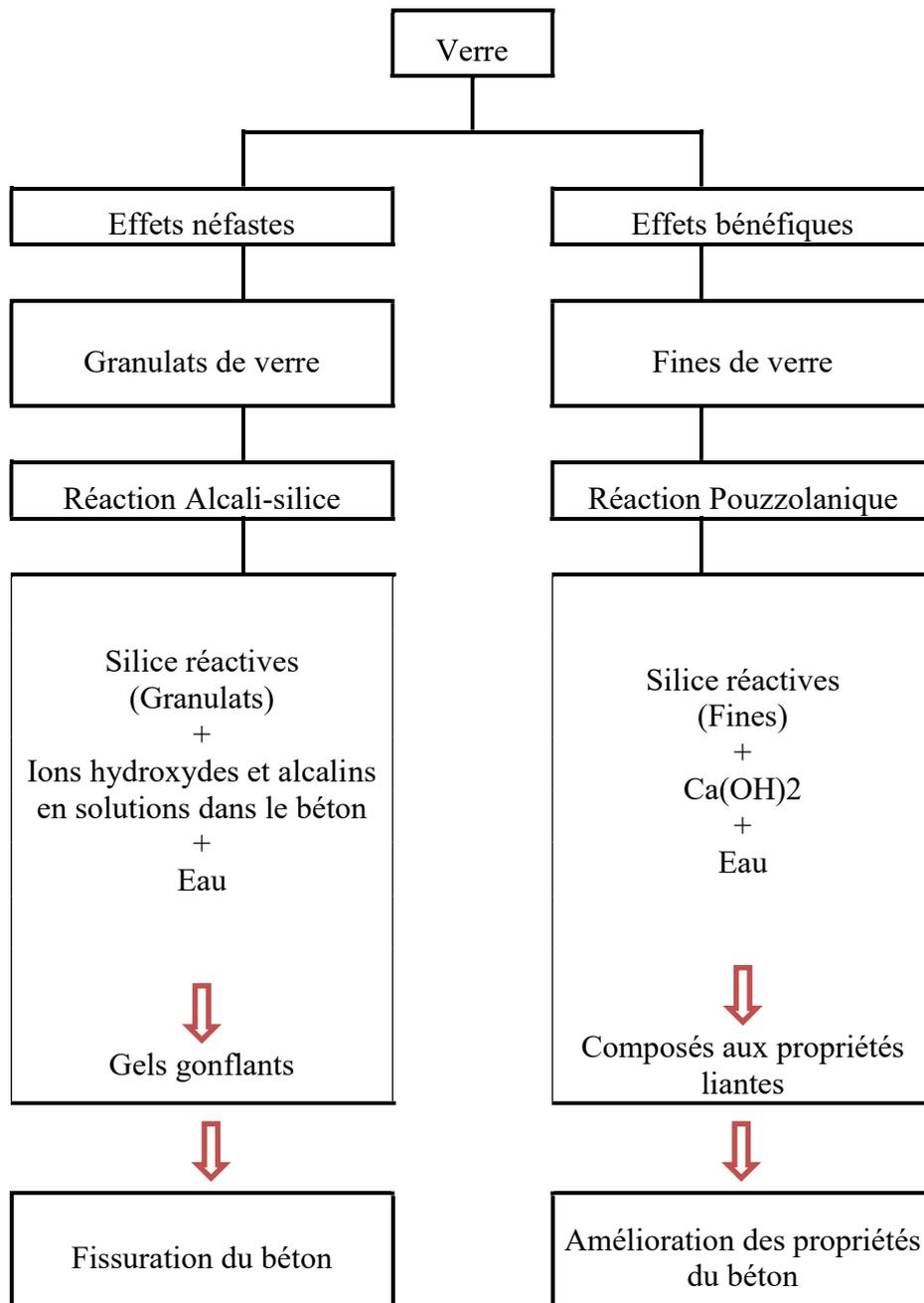


Figure 0-1: Schéma récapitulatif illustrant les deux réactions : alcali-silice et pouzzolanique
Selon Federico et Chidiac, et Jin et al. [1,4, 5], Les verres de couleur mélangés offrent la composition chimique souhaitée et la réactivité pour une utilisation comme matériau cimentaire supplémentaire qui peut bénéficier à la stabilité chimique, à la résistance humide et à la durabilité du béton. Pour réaliser ce potentiel, les déchets de verre doivent être broyés à la micro-taille afin d'accélérer ses réactions chimiques bénéfiques dans le béton.

Problématique

Le recyclage des déchets de verre connaît un essor de plus en plus important en raison des considérations économiques, de la prise de conscience des aspects environnementaux et de la politique de développement durable qui s'introduit dans les activités de Génie Civil. Le développement de matériaux cimentaires alternatifs locaux s'avère également nécessaire et impératif. Les déchets de verre mis en décharge accentuent les problèmes environnementaux par la pollution et la défiguration du paysage.

En Algérie, les déchets de verre constituent un problème environnemental grave à cause de la défiguration des paysages et les risques de pollution. L'une des voies plausibles de valorisation de verre est son utilisation comme remplaçant partiel du ciment en considérant la pathologie qu'entraînent les granulats de verre, la réaction alcali-silice (RAS) évoquée à maintes fois par les travaux de recherches réalisés précédemment, il est clair que la valorisation du verre ne soit possible qu'à travers un broyage accentué. Cependant, les coûts excessifs qu'engendre une telle opération peuvent restreindre cette voie de valorisation.

Les études examinées ont montré que les déchets de verre peuvent être utilisés dans le ciment et le béton, mais la taille des particules de déchets de verre joue un rôle essentiel dans la réaction destructive RAS et la performance du béton. Les propriétés pouzzolaniques du verre ont augmenté avec la diminution de ses granulométries de moins de 100 μm , tandis que tous les résultats expérimentaux ont montré que l'augmentation du pourcentage d'agrégats de déchets de verre réduit l'entretien du béton.

En raison des contradictions et des variations des résultats des essais disponibles sur les bétons modifiés avec de la poudre de verre, les recherches se poursuivent afin de trouver les réponses aux questions suivantes :

A partir de quelle taille les particules de verre ont-elles un effet néfaste/bénéfique ?

Que deviennent les alcalins du verre ?

Quel est le taux de l'utilisation de ces déchets en remplacement partiel du ciment ou en granulats ?

La réponse à ces questions est très importante pour assurer l'équilibre entre les performances mécaniques exigées par les cahiers de charge et les moyens optimaux nécessaires aux opérations de production de la poudre de verre dans un cadre de développement durable.

L'objectif de ce mémoire est de revaloriser ces déchets comme substituant partiel du ciment, aussi d'examiner l'influence de la finesse de la poudre de verre sur les propriétés physico-mécaniques, en cherchant la granulométrie optimale de la PV qui assure durabilité et permet

un broyage avec des moindres coûts en réduisant les moyens énergétiques mis en œuvre pour cette tâche.

Pour cela, nous avons étudié 03 variantes d'un remplacement partiel fixé à 15% de dosage de ciment par la poudre du verre broyée en finesse variable selon une granulométrie allant de 0 à 250 μm , les trois fractions sont incorporées dans les bétons afin que nous puissions investiguer et comparer leurs influences sur les propriétés physico-mécaniques des bétons. L'utilisation des déchets de verre dans l'industrie de la construction peut offrir une solution respectueuse de l'environnement et réduire les problèmes rencontrés avec les industries du verre et du ciment aussi.

Ce mémoire se compose principalement de cinq parties :

Introduction et problématique : Dans cette partie, nous cernons la problématique ainsi que les objectifs visés que nous tenterons d'atteindre à travers ce travail de recherche.

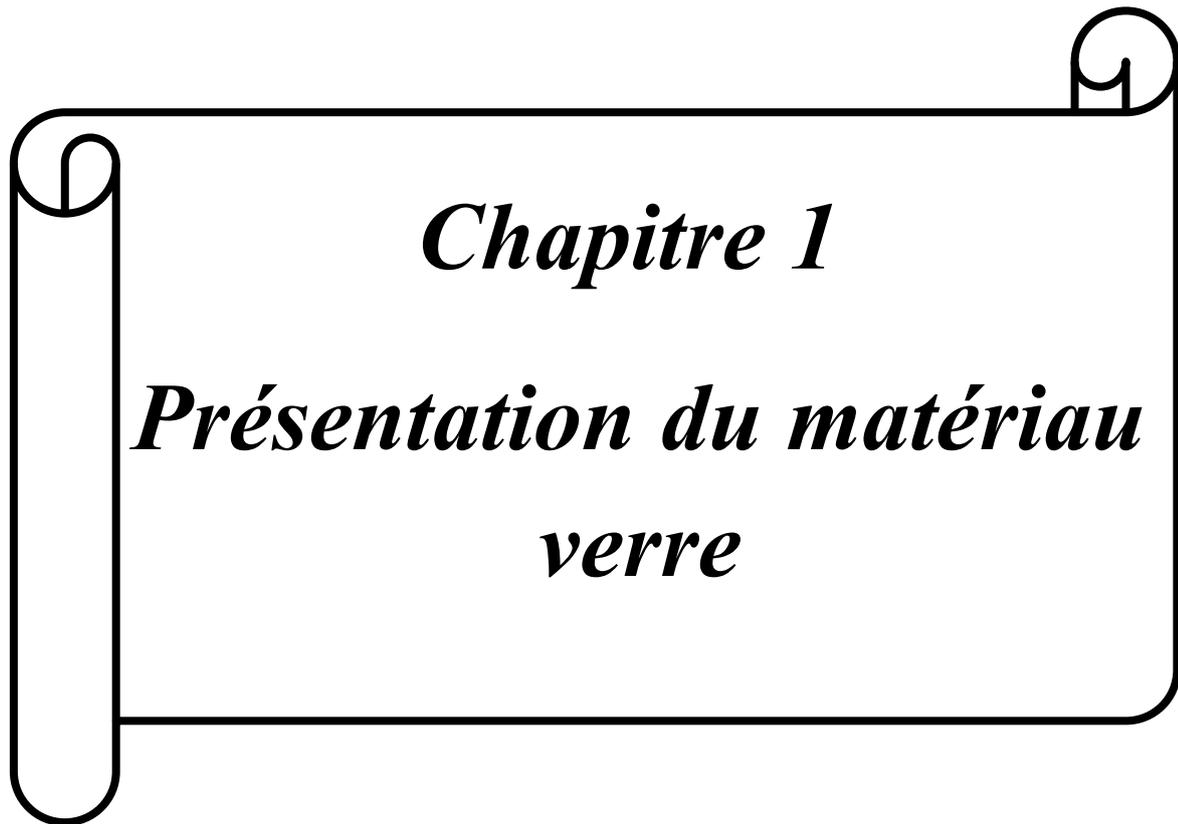
Chapitre 1 –***Présentation de matériau verre*** : C'est des définitions et un tour d'horizon sur la fabrication et l'utilisation des verres depuis l'antiquité à nos jours.

Chapitre 2 -***Etude Bibliographique sur la valorisation des déchets de verre*** : Ce chapitre est une revue de littérature et les principaux travaux réalisés à travers le monde concernant la valorisation des déchets de verre et les résultats obtenus par les recherches précédentes.

Chapitre 3 -***Partie expérimentale*** : Ce chapitre concerne le programme expérimental mis au point afin d'atteindre les objectifs fixés. Les caractéristiques des matériaux utilisés et les différentes normes et procédures d'essais sont décrites.

Chapitre 4 -***Résultats et analyses*** : Les résultats obtenus tout au long des différentes phases du projet sont exposés et analysés dans ce chapitre.

Conclusions et perspectives : C'est la dernière partie, nous résumons le travail accompli par une conclusion finale et des suggestions pour les futures recherches.



Chapitre 1

Présentation du matériau verre

I.1. Introduction

Depuis longtemps, le verre occupe une partie importante dans les activités industrielles, environnementales et culturelles de l'homme grâce à ses multiples applications. En évolution constante, il est favorisé par une immense palette de propriétés physiques ajustables en raison de la grande flexibilité de compositions qu'autorise le matériau verre.

Le chapitre ci-après présente : l'historique, définition, élaboration, propriété et quelques chiffres de la production mondiale, ensuite, une démonstration de la nécessité de recycler ce précieux matériaux justifiée par plusieurs facteurs environnementaux, économiques et techniques.

Enfin une description générale sur l'utilisation et la valorisation de déchets de verre dans le domaine de génie civil sous plusieurs voies, une sorte d'introduction pour le chapitre suivant.

I.2. Historique

Le verre est considéré comme l'un des plus anciens matériaux façonnés par l'homme néanmoins l'origine de la fabrication du verre demeure à nos jours une énigme. Le premier verre fabriqué a été trouvé en Mésopotamie vers 3 000 av. J.-C. et les premiers vaisseaux en verre furent fabriqués vers 1500 av. J.-C. en Mésopotamie et en Égypte [1, 6,7].

Le verre a toujours été un élément du développement des techniques. Les verres naturels (obsidienne) étaient jadis utilisés dans la confection des pointes de flèche.

Le verre apparaît sous forme d'émail recouvrant des poteries céramiques. Le verre massif, sous forme de pâte de verre, ses compositions verrières n'étaient pas très éloignées des compositions actuelles. On y retrouve les composants majeurs du verre à vitre : la silice, SiO_2 , l'oxyde de sodium, Na_2O , et l'oxyde de calcium, CaO , le verre était un matériau de décoration (collier en perles de verre), rarement utilisé comme objet ayant fonction de récipient

A cette époque, l'industrie du verre était lente et coûteuse à cause des petits fours, de la mauvaise qualité des pots d'argile et la chaleur ne suffisait guère à la fonte des matières premières. L'invention de la serpe, en environ 30 av.J.C, a rendu la production de verre plus facile, plus rapide et moins coûteuse et le verre est devenu disponible pour les gens ordinaires pour la première fois dans l'histoire [1,6, 7]. Le verre incolore est apparu pour la première fois au début du Xe siècle, grâce à l'introduction de l'oxyde de manganèse [1,6, 7].

Les premiers verres plats semblent avoir été fabriqués à l'époque romaine. Ils sont obtenus par soufflage d'une ampoule de verre qui, après ouverture, était étalée sous forme de disque.

Les verres colorés, dont la composition comporte souvent une quantité non négligeable de K_2O entrent dans la confection des vitraux.

En 1674, un verrier anglais George Ravenscroft a breveté un nouveau type de verre grâce à l'utilisation d'une grande quantité d'oxyde de plomb dans la matière première. Ce type de verre appelé verre de plomb. En 1688, un nouveau procédé a été développé pour la production de verre plat en France. Ce développement a contribué à la production des miroirs de haute qualité. Le scientifique français Edouard Benedictus a inventé le coffre-fort et le verre Triplex sécurisé en 1910 en utilisant la technique de stratification. C'est en 1959 qu'Alastair Pilkington, de nationalité anglaise, développa le procédé de fabrication du verre flotté. Ce fut le pas décisif vers un système de fabrication économique permettant de produire des plaques de verre de grande qualité dotées de surfaces absolument planes et parallèles. Le verre flotté est aujourd'hui le type de verre le plus utilisé [6,7, 8].

La technologie verrière et la quantité pratiquement infinie des compositions ont permis à chaque avancée scientifique de formuler des verres répondant à la fonction souhaitée. Les ampoules électriques et les fibres optiques sont, à des dates différentes, la démonstration de la flexibilité de ce matériau qui autorise des cadences de production élevées

I.3. Définition et formation de verre

I.3.1. Définition de verre :

Le verre que nous utilisons aujourd'hui comme matériau de construction est appelé verre sodocalcique en raison de sa composition. Lors de la fabrication, les matières premières sont chauffées. Au cours du processus de refroidissement qui suit, les ions et molécules n'ont pas la possibilité de s'ordonner. Le silicium et l'oxygène ne peuvent pas cristalliser. L'état désordonné de la molécule est ainsi « gelé ». Le verre est donc composé d'un réseau d'ions silicium (Si) et oxygène (O) enchainés irrégulièrement dans l'espace. Les vides sont occupés par des cations. Lorsque le verre est chauffé à 800-1000° C et que cette température est maintenue pendant un certain temps, un phénomène appelé dévitrification se produit. Des cristaux de silicium se détachent alors de la masse de verre. Cela donne du verre opaque laiteux.[8]

Au sens chimique et physique, le verre n'est pas un solide, mais plutôt un liquide solidifié. Les molécules sont totalement désordonnées et ne forment pas de réseau cristallin. Cet état est souvent cité comme étant la raison de la transparence de ce matériau.

Mais il existe d'autres théories à ce sujet. Une d'entre elles relie la transparence au fait que l'oxyde de silicium est une combinaison très stable qui n'a pas d'électrons libres susceptibles de se télescoper sous l'effet du rayonnement lumineux [8].

Il n'existe pas de formule chimique pour le verre, car il se compose de différentes combinaisons [8].

Le verre n'a pas de point de fusion, comme c'est le cas pour d'autres éléments comme l'eau qui est liquide au-dessus de 0°C et qui cristallise en glace en dessous de 0°C . Lorsqu'il est chauffé, le verre passe progressivement d'un état solide à un état visqueux, puis à un état liquide. La plage de températures entre l'état solide cassant et l'état visqueux plastique est souvent désignée par le terme plage de transformation.

Pour le verre flotté, cette plage correspond à des températures de 520 à 550°C . En simplifiant, on peut en déduire une valeur moyenne (535°C) qui est désignée comme le point ou la température de transformation du verre (T_g)[8].

Le fait que le verre soit qualifié, à raison, de liquide gelé mène souvent à l'idée qu'il coule en continu également à l'état solidifié, bien que très lentement.

Cela voudrait dire que l'épaisseur de l'extrémité inférieure d'une plaque de verre disposée à la verticale serait, après une période suffisamment longue (de plusieurs décennies ou siècles), plus importante que l'épaisseur de la partie supérieure. Mais ce n'est pas le cas. Il est aujourd'hui scientifiquement prouvé que la forme d'un corps en verre n'est pas modifiée par son propre poids à sa température d'utilisation, à moins qu'il s'agisse d'une flexion au sens statique [8].

Par comparaison avec de nombreux cristaux, le verre a une isotropie amorphe, c'est-à-dire que les propriétés ne dépendent pas de la direction de mesure.

Le verre peut être fabriqué par fusion d'un mélange de silice (oxyde de silicium), de carbonate de sodium, de dolomie ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) et de calcaire (CaCO_3) à haute température, jusqu'à 1600°C . Le mélange est ensuite refroidi pour se solidifier sans cristallisation.

L'état non liquide, non solide fait du verre un matériau solide amorphe. Des additifs spéciaux sont utilisés pour donner aux verres leurs couleurs et leurs propriétés spécifiques [9].

Différentes formes de verre sont produites, selon la composition chimique et les additifs utilisés, tels que: silice vitreuse, silicates alcalins, verres sodocalcique (conteneurs, flotté, feuille, ampoules et réchauds), verres borosilicates (appareils chimiques, Tubes en fibre de

verre et résistances), les verres de plomb (tube de couleur, tube de néon, pièces électroniques et silex optique dense), les verres de baryum (panneau de TV couleur et la couronne de baryum optique dense) et les verres d'aluminosilicate. Ces verres sont fabriqués en trois couleurs différentes, la plupart vert, brun et incolore [1,5].

I.3.2. Formation de verre:

La manière classique de produire un verre consiste à refroidir un liquide suffisamment rapidement pour que la cristallisation n'ait pas le temps de se produire. Le comportement thermique du verre peut être décrit par l'évolution de variables thermodynamiques telles que le volume spécifique ou l'enthalpie en fonction de la température.

Lors du refroidissement, un liquide peut se trouver à une température inférieure à la température de fusion (T_f) dans un état métastable de surfusion. Pour certains d'entre eux, cet état de surfusion peut s'établir sur un grand intervalle de température.

La figure I.1 permet de comprendre la formation d'un verre [J.Zarzycki cité par [10]]. Partant de la phase liquide haute température, le volume molaire V_M (ou l'enthalpie H) décroît avec la température. A une température inférieure à la température de fusion, pour un traitement de durée infinie, le liquide se transforme en un cristal dont le volume molaire (ou l'enthalpie) est bien plus faible que celui du liquide surfondu correspondant. Cependant, si le refroidissement est continu et rapide depuis l'état liquide stable jusqu'à très basse température, le liquide passe dans un domaine de température où il se trouve dans un état de surfusion. C'est cet état métastable qui va progressivement se figer pour donner naissance au verre à température ambiante. Le passage continu du liquide surfondu au verre est appelé domaine de transition. La température de transition vitreuse T_g est définie comme l'intersection des courbes extrapolées à partir du liquide et du verre. Ce domaine s'étend sur un intervalle de température dépendant de la nature du verre et de la vitesse de refroidissement. Plus la vitesse de refroidissement est élevée et plus la transformation s'effectue à haute température [J.Zarzycki cité par [10]].

La variation du volume molaire du verre en fonction de la température est continue et pratiquement linéaire. Ainsi, le coefficient de dilatation thermique linéique est quasiment constant. C'est là une des propriétés du verre. A température ambiante (figure I.1a), le verre présente un volume molaire supérieur à celui du cristal correspondant. Sa structure ouverte facilite la diffusion des espèces chimiques de faible taille.

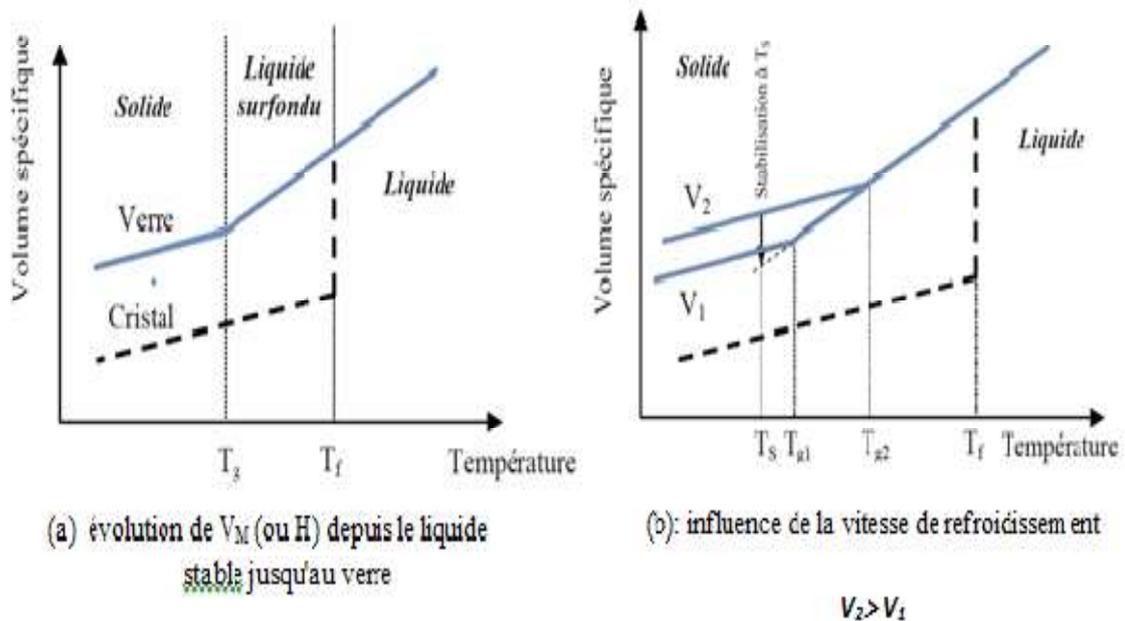


Figure I. 1: Phénomène de transition vitreuse

Le verre est dans un état métastable ou hors équilibre. Il se distingue du cristal par deux aspects essentiels : Un aspect thermodynamique caractérisé par un excès d'énergie et un aspect géométrique caractérisé par une absence d'ordre à longue distance, même s'il apparaît toutefois une conservation de l'ordre à courte portée.

De cet état vitreux, on peut alors redéfinir le verre : « Le verre est un solide non cristallin caractérisé par le phénomène de transition vitreuse. »

De nombreuses études ont été faites pour expliquer l'aptitude à la formation vitreuse. On peut citer celles de **Goldschmidt et Zachariasen** fondées sur des concepts structuraux, qui font appel à la distribution spatiale des atomes ainsi que leur force de liaisons.

Vu la grande diversité des substances formant des verres, il est difficile de trouver des critères généraux qui peuvent s'appliquer pour tous les cas, mais chacune des règles a ses propres limites [B.Dubois cité par [10]].

1.3.2.1 Critère de Goldschmidt :

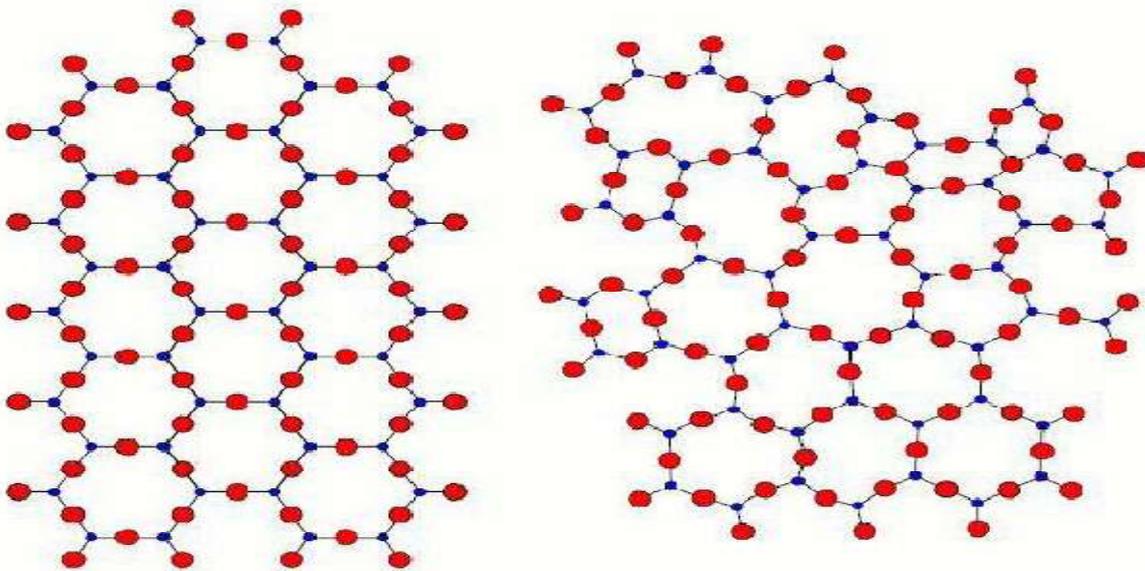
En 1926, Goldschmidt étudia la structure des verres d'oxydes inorganiques. Il développa sa théorie sur la formation vitreuse pour un oxyde simple de type $MmOn$ (M le cation). Il considéra également que la formation vitreuse est possible si le rapport des rayons atomiques

R_a/R_c est compris entre 0.2 et 0.4 ou R_a et R_c sont respectivement les rayons ioniques de l'anion et de cation.

Cette condition est satisfaite pour les oxydes SiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 , GeO_2 et par suite pour BeF_2 . En cristalochimie le rapport $0.20 < R_a/R_c < 0.40$ implique une structure tétraédrique avec 4 anions aux coins. Par conséquent Goldschmidt a affirmé que cet arrangement tétraédrique est nécessaire pour la formation vitreuse. Mais cette condition n'est plus applicable pour certains cas, par exemple l'oxyde BeO impossible de le vitrifier [J.Zarzycki cité par [10]].

1.3.2.2 Critère de Zachariasen :

Zachariasen développa la théorie de Goldschmidt et publia peut-être le papier le plus cité en science de verre. L'hypothèse de Zachariasen repose sur le constat : La différence d'énergie entre un verre et un cristal de même composition étant très faible. A noter que les cristaux de silicate, qui forment aisément des verres, ont des structures de réseau au lieu de l'emballage-fermé de l'arrangement tétraédrique décrit par Goldschmidt. En postulant que les polyèdres de l'oxygène trouvés dans les cristaux d'oxyde seraient également présents dans les verres, Zachariasen forma le concept d'une structure aléatoire continue de réseau pour un verre, avec l'arrangement structural périodique empêché par des orientations aléatoires [Zachariasen cité par [10]]. Celles-ci peuvent être réalisées par des variations des angles et des longueurs d'attache, ou par la rotation des unités structurales (Figure I.2).



(a) la structure de la silice cristalline (b) d'un verre silicaté.

Figure I. 2: Représentation bidimensionnelle selon Zachariasen [Zachariasen cité par [10]].

Zachariasen proposa un ensemble de règles pour tenir compte de cette structure :

- 1- Le nombre d'atomes d'oxygène entourant n'importe quel cation donné doit être petit.
 - 2- Aucun atome d'oxygène ne doit être lié à plus de deux cations.
 - 3- Les polyèdres formés par les oxygènes doivent avoir en commun uniquement leurs sommets et non leurs arêtes ou leurs faces.
 - 4- Au moins trois sommets de chaque polyèdre doivent être partagés avec d'autre polyèdre.
- Ces conditions sont remplies par des oxyde de types M_2O_3 , MO_2 et M_2O_5 ; et pratiquement a été confirmé par l'existence des verres de B_2O_3 , As_2O_3 , SiO_2 , GeO_2 et P_2O_5 .

Concernant les systèmes à plusieurs constituants d'oxydes tels que le binaire M_2O-SiO_2 la situation évolue d'une manière spectaculaire. A titre d'exemple l'addition de Na_2O-SiO_2 a pour effet séparation des motifs $Si-O-Si$ représenté sur la figure. I.3.

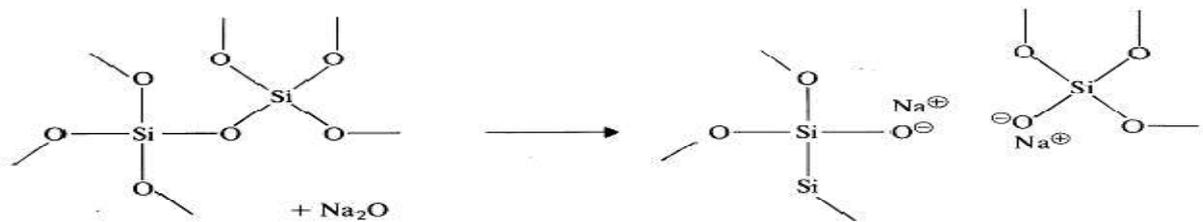


Figure I. 3: Illustration schématique de l'effet de l'addition d'oxyde alcalin à la silice [H.Scholze cité par [10]].

Le modèle de ZachariasenWarren représente schématiquement à la figure I.4 a dominé pendant plusieurs décennies la science du verre et constitue encore la référence habituelle.

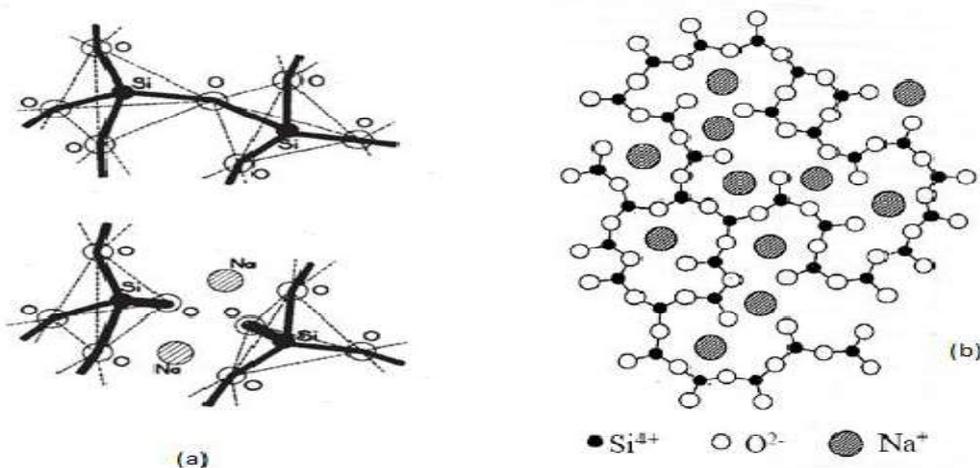


Figure I. 4: (a) Rupture d'une liaison $Si-O-Si$ par le sodium (b) Modèle du réseau continu désordonné de Zachariasen-Warren [Zachariasen cité par [10]].

Dans les verres de silice pure, tous les ions O^{2-} qui sont liés à deux cations Si^{4+} , s'appellent des oxygènes pontant. L'insertion de l'oxyde Na_2O coupe la liaison, et les ions O^{2-} ne partageant plus qu'une seule liaison avec Si^{4+} s'appellent oxygène non pontant.

Dans ce cas la silice joue le rôle d'un formateur de réseau, tandis que Na_2O agit tant que modificateur de réseau. Certains oxydes jouent suivant le cas le rôle d'un formateur ou d'un modificateur, on les appelle oxydes intermédiaires.

Zachariasen classa les oxydes selon leurs caractères ; comme le montre le tableau. I.1

Le modèle de Zachariasen souffre de nombreuses exceptions, notamment les verres d'oxydes à base de coordination octaédrique comme les verres de titanates, ou encore des coordinances plus complexes comme les tellurites.

Tableau I. 1: Classification des oxydes selon leur caractère : formateur, modificateur ou intermédiaire selon Zachariasen [Zachariasen cité par [10]].

Formateur	Modificateur	Intermédiaire
SiO_2	Li_2O	Al_2O_3
GeO_2	Na_2O	PbO
B_2O_3	K_2O	ZnO
P_2O_5	CaO	CdO
As_2O_3	BaO	TiO_2
V_2O_5		

I.4. Propriétés du verre

I.4.1 Propriétés mécaniques

I.4.1.1. Résistance à la traction et résistance à la compression

La résistance à la compression du verre est très élevée et dépassé de loin celle des autres matériaux de construction. C'est pourquoi les problèmes sont rares lors du montage de vitrages sur un bâtiment. La résistance à la traction est un facteur déterminant, en particulier la résistance à la flexion. Il est connu que les fibres de verre présentent une très bonne résistance à la traction. Mais il existe une très grande différence entre la résistance à la traction d'une fibre de verre et celle d'une plaque de verre. La résistance à la traction de la plaque de verre ne dépend pratiquement plus de la cohérence de la structure chimique, mais d'autres facteurs. En réalité, le verre n'est pas un corps compact plein, mais présente de nombreuses discontinuités, comme des imperfections de surface sous la forme de microrayures et d'entailles. Ce sont elles qui au final déterminent la résistance du verre dans la pratique.

Il est également important de noter que la résistance diminue en fonction de la durée d'application de la charge. C'est pourquoi, dans la pratique, différentes tensions admissibles sont prises en compte, en fonction de la durée d'application de la charge. Un exemple type de charge de courte durée est la charge due au vent, alors que les charges dues à la neige peuvent s'exercer pendant une plus longue période[8].

La résistance du verre à la compression est très élevée, de l'ordre de 400 MPa.

Resistance à la traction pratique et théorique

- Resistance théorique à la traction du verre sodocalcique (rupture) 6000 à 8000 MPa.
- Resistance pratique à la traction du verre sodocalcique (rupture) 30 à 80 MPa.

1.4.1.2.Elasticité

Contrairement aux métaux, le verre n'a pas de plage plastique : il est élastique jusqu'à sa limite de rupture. La rupture est soudaine, sans signe préalable visible.

Son module d'élasticité est de 70 000 MPa[8].

1.4.1.3. Dureté superficielle

Le verre tire sa dureté et sa résistance de sa base de silicate, mais également sa fragilité connue et indésirable.

C'est une propriété à laquelle il faut dédier toute l'attention qui lui est due, quel que soit le type d'application.

Par comparaison à d'autres matériaux comme le bois, les métaux et le plastique, le verre présente une dureté superficielle très élevée [8].

Dureté superficielle, Verre sodocalcique (verre flotte, verre à vitre, verre décoratif) 5 à 6 HM.

1.4.2. Propriétés chimico-physiques

Dans sa forme chimique la plus simple, le verre peut consister en silice pure, auquel cas il s'appelle «quartz glass» ou «quartz fondu». Cependant, la production de verre amorphe à partir de silice pure nécessite beaucoup d'énergie, nécessitant des températures d'environ 1900° C. En tant que tel, le verre à quartz n'est produit que pour des applications nécessitant une résistance chimique élevée et appartient donc aux types spéciaux de verre.

Afin de réduire les besoins en énergie pour la production de verre, la plupart du verre est composé de silice (SiO₂) et d'autres composés. Silicène a le rôle d'un «ancien réseau», et c'est

l'élément principal utilisé comme réseau. Les formateurs de réseaux alternatifs sont le bore ou le germanium.

Les formateurs de réseaux créent un réseau fortement restreint de liaisons chimiques. Outre les formateurs de réseau, le verre contient également des « modificateurs de réseau », qui sont des alcalis-oxydes ajoutés comme agents fondants pour abaisser le point de fusion du verre (sodium, potassium, lithium, etc.), les oxydes de métaux alcalino-terreux (calcium, magnésium, baryum, Strontium, etc.) et d'autres oxydes métalliques (c'est-à-dire l'oxyde d'aluminium). Les modificateurs de réseau modifient les relations de liaison et les groupes structuraux, ce qui entraîne des changements dans les propriétés physiques et chimiques du verre. Les modificateurs sont généralement présents sous forme d'ions, compensés par des atomes d'oxygène voisins non pontés, liés par une liaison covalente au réseau de verre et tenant une charge négative pour compenser l'ion positif à proximité.

Le verre peut également contenir d'autres substances ajoutées (par exemple le plomb, le titane, l'aluminium, le zirconium, le béryllium, le magnésium, le zinc), qui peuvent agir à la fois comme formateurs de réseau (par exemple Pb^{4+} remplaçant Si^{4+}) et en tant que modificateurs de réseau, selon la composition du verre.

Les principaux types de verre, selon la composition physico-chimique, sont:

1. Verre sodocalcique.
2. Cristal au plomb et le verre cristal
3. Verre borosilicate
4. Le verre électrique, également appelé verre E

Les trois premières catégories représentent plus de 95% de tous les verres produits. Les compositions physico-chimiques des types de verre les plus fréquents (sodocalcique, cristal au plomb, borosilicate et verre E) sont résumés dans le tableau I.2 [8].

Tableau I. 2: Composants de verre sodocalcique, verre cristal au plomb, borosilicate et verre E

	Verre sodocalcique	Cristal au plomb et le verre cristal	borosilicate	verre E
Dioxyde de plomb(SiO_2)	71-75%	54-65%	70-80%	52-56%
Trioxyde de bore(B_2O_3)			7-15%	0-10%
Oxyde de plomb(PbO)		25-30%		
Soda (Na_2O)	12-16%	13-15%	4-8%	0-2%
or Potassium oxide (K_2O)				
chaux (CaO)	10-15%			16-25%
Trioxyde d'Aluminium (Al_2O_3)			7%	12-16%

I.4.3. Propriétés thermiques

I.4.3.1. Coefficient de dilatation thermique

Lorsqu'on le compare à d'autres matériaux, le verre présente une faible dilatation thermique qui, de plus, dépend de sa composition. Par exemple, le verre céramique ne présente pratiquement pas de dilatation thermique. Ainsi, les tensions susceptibles de découler de zones chauffées à différentes températures n'existent pas.

Le coefficient de dilatation thermique de $9,0 \times 10^{-6}/\text{K}$ signifie qu'une plaque de verre flotte d'un mètre de longueur soumise à une augmentation de température de 100°K se dilate de 0,9 mm. Pour l'aluminium, la valeur analogue serait de 2,4 mm[8].

I.4.3.2. Conductibilité thermique

Par rapport aux métaux, la capacité du verre à transférer la chaleur est certes faible, mais elle est élevée par rapport aux matériaux d'isolation courants.

Elle joue cependant un rôle peu significatif pour les applications pratiques dans les bâtiments, car l'exceptionnelle isolation thermique offerte par les verres isolants en particulier s'appuie sur l'effet des traitements isolants. Coefficient de conductibilité thermique Verre sodocalcique est de $1,00 \text{ W/mK}$ [8].

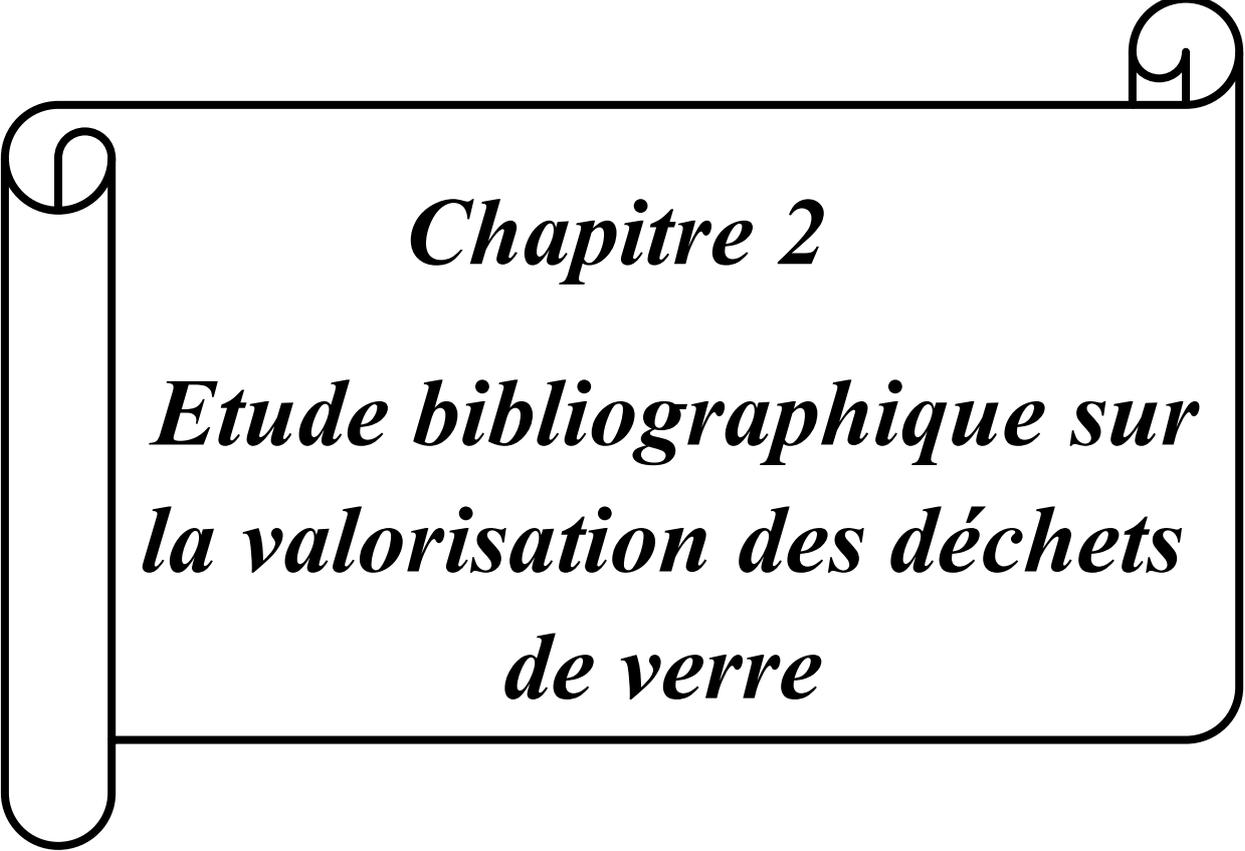
I.4.3.3. Résistance aux chocs thermiques

La résistance aux chocs thermiques correspond à la capacité de résister à un changement de température abrupt. Elle est exprimée en degré kelvin et représente la vraisemblance d'un choc thermique, à savoir une rupture suite à une surcharge thermique. Plus la résistance aux chocs thermiques d'un verre est élevée, plus le risque de choc thermique est faible. Il n'est cependant pas possible de dériver directement les températures de surface maximales admissibles sur un vitrage à partir de la résistance aux chocs thermiques, car la répartition de la température est un facteur particulièrement décisif.

Résistance aux chocs thermiques Verre flotté : 40° K, Verre céramique > 300° K [8].

Tableau I. 3: Résumé des principales caractéristiques techniques du verre flotté [8]

Propriété	Symbole	Valeur chiffrée et unité
Densité (à 18° C)	ρ	2500 kg/m ³
Dureté		6 unités (selon Mohs)
Module d'élasticité	E	70 GPa
Coefficient de Poisson	μ	0,2
Capacité thermique spécifique	c	0,72 x 10 ³ (J/kg x K)
Coefficient d'allongement linéaire thermique moyen entre 20 et 300° C	α	9 x 10 ⁻⁶ /K
Conductibilité thermique	λ	1 W/mK



Chapitre 2

*Etude bibliographique sur
la valorisation des déchets
de verre*

II.1. Introduction

Toute activité de production ou de consommation génère des déchets, qui sont souvent associés à la détérioration de notre environnement et à de multiples risques pour la santé humaine et des risques d'épuisements sur les ressources naturels.

L'industrie en Algérie a une part de responsabilité majeure dans la pollution globale du pays, notamment l'industrie pétrochimique, chimique et de traitement des minerais.

Certes, l'industrie de production reste un moteur essentiel de la croissance économique et de la compétitivité, mais il est également reconnu qu'une réduction de la pollution et l'utilisation rationnelle des ressources et de l'énergie, constituent des impératifs de développement durable et rendent fréquemment les coûts unitaires des produits moins élevés.

Les nuisances de l'industrie sur l'environnement sont :

- Emission de vaste quantité de polluants dans l'atmosphère
- L'exploitation des ressources naturelles telle que pratiquée actuellement n'est pas sans effets négatifs sur l'environnement :
 - Cicatrices dans le paysage (carrières et mines).
 - Destruction du patrimoine forestier.
 - Surexploitation des ressources (extraction abusive des sables, argiles et calcaires).

Face aux nuisances causées sur l'environnement, l'inquiétude ne cesse de grandir ; et notre domaine le génie civil est appelé à jouer un rôle important dans la protection de la nature et l'environnement par l'utilisation des déchets solides dans la fabrication des matériaux de construction (liants et bétons) et dans la réalisation des structures (remblais et les assises de chaussées,) afin de limiter l'exploitation excessive des ressources naturelles et de diminuer la pollution atmosphérique.

Il faut signaler ici que notre pays, depuis la première conférence mondiale sur l'environnement organisée à Stockholm en 1972 a pris progressivement conscience de la nécessité d'intégrer la dimension environnementale dans la démarche de planification du développement et d'utilisation durable des ressources naturelles du pays.

Dans cette perspective, les déchets de verres provenant des différentes origines peuvent être ramassés et recyclés dans le secteur de la production cimentaire et béton. Les voies de ce

recyclage sont multiples et variées : en remplacement des granulats, en remplacement du ciment, ajout cimentaire etc....

L'utilisation des déchets de verre dans l'industrie de la construction peut offrir une solution respectueuse de l'environnement pour ces déchets et réduire les problèmes rencontrés avec les industries du verre et du ciment aussi.

Les études examinées ont montré que les déchets de verre peuvent être utilisés dans le ciment et le béton, mais la taille des particules de déchets de verre joue un rôle essentiel dans la réaction destructive alcali-silice et la performance du béton. Les propriétés pouzzolaniques du verre ont augmenté avec la diminution de ses granulométries à moins de 100 μm , tandis que tous les résultats expérimentaux ont montré que l'augmentation du pourcentage d'agrégats de déchets de verre réduit l'entretien du béton [1].

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux différentes voies de recyclage des déchets de verre dans le béton et l'effet des tailles des particules utilisées sur les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques essentielles examinées dans les principales recherches réalisées dans le monde notamment aux USA , Canada et pays Européens .

II.2. Production annuelle mondiale du verre

Statistiquement, Les quantités exactes des déchets de verre dans le monde, ne sont connues d'une façon claire et précise à cause d'un manque d'informations de différents pays, comme le Moyen-Orient par exemple. Selon l'estimation des déchets solides des Nations Unies, en 2004, il y avait 200 millions de tonnes de déchets solides dont 7% des déchets de verre, soit 14 millions de tonnes de déchets de verre [1,11].

Une énorme quantité de ressources naturelles est utilisée par les industries du verre comme matières premières. On a estimé que chaque 1 kg de verre en feuille consommait 1,73 kg de matières premières et 0,15 m³ d'eau [1,12]. En outre, il a été constaté que la production de chaque tonne de verre container consommé 1,2 tonne des matières premières coûteuses [13].

En plus, l'industrie du verre est considérée comme l'une des industries les plus intensives en énergie, en raison de la nécessité d'une température élevée jusqu'à 1600 ° C pour faire fondre les matières premières. On a estimé que chaque 1 kg de feuille de verre produisait 16,9 MJ de déchets de chaleur [1,12]. Tandis que la production de chaque tonne de verre européen consommait 7,8 GJ d'énergie.

La consommation totale d'énergie de l'industrie européenne du verre a été de 352 PJ en 2007, soit environ 13-17% de la consommation totale d'énergie industrielle en Europe [9].

D'autre part, l'utilisation intensive de l'énergie est rencontrée avec une forte émission de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre. On a constaté, en 2007, que la production de chaque tonne de verre européen produisait 0,57 tonne de CO₂[1,4]. L'étape de fusion ne peut libérer que 0,2 tonne de CO₂ pour chaque tonne de verre d'emballage produite [1,13].

La production totale mondiale de verre a été d'environ 89,4 millions de tonnes en 2007. Les pays de l'UE ont produit environ 38,3 millions de tonnes dans la même année, ce qui représente environ 30% de la production mondiale totale, a fait de l'UE le plus grand producteur de verre en 2007.

Environ 83% de la production de verre de l'UE était le verre des conteneurs et le verre plat, c'est-à-dire le verre sodocalcique [1,4]. On s'attend à ce que la production totale de verre augmente en raison de l'augmentation de l'industrialisation et de l'amélioration du niveau de vie, c'est-à-dire que le déchet de verre augmentera également. À titre d'exemple, le total des déchets de verre de l'UE en 2002 était de 3 millions de tonnes, alors que le total des déchets de verre de l'UE en 2008 était de 4,1 millions de tonnes [Eurostat statistical books, 2010 cité par [1]].

Les déchets de verre générés nécessitent des solutions de traitement efficaces. Plusieurs voies de valorisation se développent afin de trouver des débouchés aux déchets de verre. Des opérations de broyage et de tamisage permettent d'obtenir une poudre de verre qui trouve de nombreuses applications comme additifs (peintures, matériaux plastiques, béton, carrelage, tuiles...) ou pour élaborer de nouveaux matériaux pour le bâtiment comme les mousses de verre isolantes ou les billes de verre expansé.

L'utilisation de déchet dans la production de ciment et de béton s'avère une voie prometteuse et peut contribuer à sauver les ressources naturelles de la terre, économiser l'énergie et réduire le coût de la production de ciment et le prix du ciment, ainsi que réduire les émissions de gaz à effet de serre et réduire l'impact environnemental.

En plus cette utilisation aide à surmonter les multiples challenges environnementaux, économiques et sociaux qui entravent la production du ciment. Cette industrie devra répondre à des exigences commerciales c'est-à-dire, satisfaire le marché mondial en quantités suffisantes, sauvegarder les ressources naturelles avec une utilisation rationnelle et protéger l'environnement en réduisant les pollutions qui menacent la faune et la flore.

II.3. Challenges environnementaux et économiques de l'industrie du ciment

De nombreux défis confrontent l'industrie du ciment, tels que l'augmentation du coût des combustibles et de l'énergie, les besoins pour réduire la quantité énorme d'émissions de gaz à effet de serre, en particulier les émissions de CO₂ et le coût élevé des matières premières et la fourniture de ces matières premières en quantités et qualités suffisantes. Ces défis devraient augmenter avec l'augmentation de la production annuelle de ciment. L'industrie du ciment devra affronter une pression régulière pour trouver des solutions à ces défis ou au moins minimiser leurs effets sur une plage acceptable.

L'industrie du ciment est considérée comme l'une des industries les plus consommatrices d'énergie en raison de l'énorme quantité d'énergie nécessaire pendant les étapes de production et de la température élevée utilisée pour brûler le clinker, jusqu'à 1500 ° C. Le coût énergétique de la production de ciment représentait environ 40% de son coût total variable [1,14], de 50 à 60% dans certains pays [1,15]. On estime que l'industrie du ciment consomme 5% de la consommation totale d'énergie dans le monde en 2006 [1,16]. Récemment, la consommation d'énergie a augmenté à 12-15% de la consommation totale d'énergie industrielle dans le monde entier et il est prévu que la consommation totale d'énergie augmentera avec l'augmentation de la production totale de ciment [15, 17, 18].

Bosoaga et al. [19] ont conclu que la réduction de la quantité de clinker dans le ciment mélangé pourrait être considérée comme l'une des méthodes efficaces pour réduire les émissions de CO₂. L'utilisation de déchets mélangés avec le clinker pour produire du ciment pourrait réduire les émissions de CO₂ de 5% [18] ou de 20% [19], selon le pourcentage de la substitution.

En outre, on a constaté que la production de chaque tonne de clinker de ciment consomme de 1,5 à 1,7 tonnes de ressources naturelles de la terre en tant que matières premières; à titre d'exemple, l'industrie chinoise du ciment consomme environ 1,5 billion de tonnes de calcaire et d'argile annuellement [17].

II.4. Valorisation et recyclage des déchets de verre

II.4.1. Valorisation: tout traitement où utilisation des déchets qui permet de leur trouver un débouché ayant une valeur économique positive. Le terme général valorisation englobe réemploi, recyclage et réutilisation.

L'intérêt qui est porté de plus en plus à la valorisation des déchets de verre est lié à la fois à la crise de l'énergie, à la diminution des ressources mondiales en matières premières et enfin la législation qui devient très sévère concernant la protection de la nature et l'environnement. Les arguments peuvent être résumés en :

- Augmentation de la production.
- Le coût de stockage où de traitement est de plus en plus élevé.
- Une législation de plus en plus sévère.
- Une meilleure gestion de la recherche.

En ce qui concerne le verre, le calcin (qui est le déchet de verre broyé qui peut être recyclé) a été largement utilisé dans la production du verre d'emballage et de la laine de verre [4]. Il a été constaté que l'augmentation de l'utilisation du calcin de 10% dans les matières premières de verre réduit la consommation d'énergie de 2-3% [4].

Pratiquement, l'utilisation du calcin comme matière première dans la production de verre ne nécessite que 40% de cette énergie utilisée pour produire du verre à partir de sable [20]. Théoriquement, le verre peut être recyclé complètement et infiniment sans perdre aucune de ses propriétés chimiques et physiques. Cependant, les déchets de verre cassés et mélangés rendent le procédé de recyclage peu pratique et très coûteux car ces matériaux peuvent provoquer une variation de la composition chimique du verre recyclé [1,21]. Les impuretés et les contaminants qui peuvent être trouvés dans le verre de déchets avec la couleur mixte peut affecter les propriétés du nouveau verre produit [13, 21].

Le taux de recyclage des déchets de verre est faible dans le monde entier et il est principalement concentré sur les containers et le secteur d'emballage [22]. Aux États-Unis, 11,5 millions de tonnes de déchets de verre ont été produits en 2010 avec un taux de recyclage de 27% seulement [23]. Alors que le total des déchets de verre dans les pays de l'UE était estimé à 4,1 millions de tonnes en 2008 avec un taux de recyclage d'environ 60% [Eurostat statistical books, 2010 cité par [1]].

En Suède, 195000 tonnes de couleur isolée et 44 000 tonnes de verre de couleur mélangée ont été produites en 2010 avec un taux de recyclage de 93% pour le verre de couleur isolé utilisé dans le verre des bouteilles et emballage [24].

Tableau II. 1: Quantité de déchets de verre et taux de recyclage dans différents pays.

Pays	Déchets de verre (tonnes)	% de taux de recyclage	Année	Référence
Etats-Unis	11 500000	27	2010	[23]
Canada	116 000	68	2009	[21]
Singapour	72 800	29	2010	[25]
Suède	195 000 isolés 44 000 mixtes	93 0	2010	[24]
Portugal	493 000	25	2001	[26]
Turquie	120 000	66	2004	[11]
Allemagne	3 200 000	94	2003	[11]
Jordanie	35 verres de construction	0	2004	[27]

La pratique de gestion des déchets des verres non recyclables est de les jeter dans les décharges. Le dépôt de ces déchets dans des sites d'enfouissement de nature non biodégradable n'offre pas une bonne solution environnementale. Par conséquent, les déchets de verre représentent un défi pour les systèmes de gestion des déchets solides dans le monde entier en raison du faible taux de recyclage, d'un manque ou absence d'espaces dans les décharges [17,26]. L'industrie de la construction, en particulier l'industrie du ciment et du béton, peut fournir une solution très intéressante et utile pour l'impact environnemental des déchets de verre, en raison de la composition chimique et des propriétés physiques du verre semblables à celles du sable et du ciment, comme reporté sur le Tableau II.2.

L'utilisation de déchets de verre dans la production de ciment et de béton conserve les ressources naturelles de la terre, économise de l'énergie et de l'argent et réduit les émissions de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre.

II.4.2. Recyclage de verre dans la production du ciment

Différents déchets ont été utilisés dans la production du ciment et de béton tels que les laitiers de haut fourneau [1,28], l'argile [29], les déchets de tubes cathodiques [1,30], les cendres volantes [1,31] et les déchets de verre [1,32].

Cependant, de grandes quantités de déchets solides qui peuvent être utilisés dans la fabrication du ciment et de béton sont encore jetées dans des décharges. Deux milliards de tonnes de déchets solides industriels, qui peuvent être utilisés dans la fabrication de ciment et de béton, Chine en 2010 [17].

Tableau II. 2: Composition chimique du ciment et différents verre colorés [1, 17,26].

Elément Chimique	Ciment (%)	Verre clair (%)	Verre gris (%)	Verre verts (%)	Verre concassé (%)	Poudre de verre (%)	Sable (%)
SiO ₂	20.2	72.42	72.21	72.38	72.61	72.20	78.6
Al ₂ O ₃	4.7	1.44	1.37	1.49	1.38	1.54	2.55
CaO	61.9	11.50	11.57	11.26	11.70	11.42	7.11
Fe ₂ O ₃	3.0	0.07	0.26	0.29	0.48	0.48	2.47
MgO	2.6	0.32	0.46	0.54	0.56	0.79	0.4
Na ₂ O	0.19	13.64	13.75	13.52	13.12	12.85	0.42
K ₂ O	0.82	0.35	0.20	0.27	0.38	0.43	0.64
SO ₃	3.9	0.21	0.10	0.07	0.09	0.09	
TiO ₂		0.035	0.041	0.04			0.15
Perte au feu	1.9	—	—	—	0.22	0.36	7.6

La composition chimique des différentes couleurs et des déchets de verre broyé montre que le verre contient une grande quantité de silicium et de calcium sous une structure amorphe; Le verre a la capacité d'être un matériau pouzzolanique ou même un matériau cimentaire. La structure non biodégradable du verre rend sa mise au rebut dans une décharge comme mauvaise solution, tandis que l'industrie du ciment et du béton peut assurer une gestion écologique des déchets de verre.

Plusieurs études ont été réalisées sur l'utilisation des déchets de verre dans les industries du ciment et du béton. Certaines de ces études utilisaient des déchets de verre comme agrégat [25, 33]; D'autres l'utilisaient comme un remplacement de ciment [1, 34, 35] et certaines études l'utilisaient comme agrégat et remplacement de ciment dans le même mélange [1,36].

II.5. Valorisation des déchets de verre comme granulats

Les déchets de verre et le sable naturel ont approximativement les mêmes propriétés physiques, comme le montre le tableau II.3. La comparaison entre les propriétés du déchet de verre et les propriétés du sable naturel montre que le taux d'absorption des déchets de verre est inférieur à celui du sable, C'est-à-dire que le béton confectionné avec du verre comme agrégat a un taux d'absorption plus faible pour l'eau [1,37]. Ces propriétés font du déchet de verre un matériau intéressant à utiliser comme agrégat dans la production du béton.

Tableau II. 3: Propriétés physique des déchets de verre et sable [37].

Propriété physique	Déchets de verre	Sable
Masse volumique (kg/m ³)	2190	2570
Absorption (%)	0.39	2.71
Indice pouzzolanique(%)	80	--

Au cours du 20^{ème} siècle, différentes études ont été réalisées pour l'utilisation de déchets de verre broyés comme agrégats dans la production de béton [33,38].

Pike et Hubbard [33] ont étudié l'utilisation de différentes formes de verre comme agrégat (quartz, opale, fibre de verre et verre) avec du ciment. Ils ont constaté que le ciment composé avec ces agrégats craquait à cause de la réaction destructive alcali-silice.

Johnston [38] a étudié l'utilisation du verre broyé comme agrégat avec une granulométrie maximale de 19 mm et une teneur élevée et faible en ciment alcalin, respectivement de 0,58 et 1,13. Ses résultats étaient en accord avec ceux de Pike et Hubbard [33], la réaction alcali-silice provoquait une fissuration du ciment produit. En raison de la préoccupation de l'impact environnemental des déchets de verre, beaucoup d'études ont été faites récemment pour l'utilisation des déchets de verre comme agrégats dans le béton. Ces études ont examiné les propriétés de l'agrégat de déchet de verre et les auteurs ont essayé de trouver le pourcentage optimal de déchets de verre qui peut être utilisé comme agrégat sans aucun effet sur les propriétés du béton produit. On a trouvé que la granulométrie de l'agrégat de déchets de verre joue un rôle vital dans la réaction néfaste alcali-silice.

Takata et al. [39] ont étudié l'effet de la granulométrie du verre sur les propriétés du ciment produit. Un déchet de verre des bouteilles avec des granulométries de (4,75-0,15 mm) a été utilisé avec différent pourcentage comme remplacement partiel de l'agrégat naturel (0-100%).

Les résultats ont montré que l'expansion due à la réaction alcali-silice a augmenté avec l'augmentation de la taille des particules de l'agrégat de déchets de verre. De plus, l'expansion a augmenté au fur et à mesure que le pourcentage de déchets de verre a augmenté. Le pourcentage optimal de déchet de verre et la taille de l'agrégat qui ne présentait aucun effet nocif de la réaction alcali-silice étaient respectivement de 20% et de moins de 1,18 mm. Ces résultats concordent avec les résultats d'Idir et al. [3]. Idir et al. [3] ont constaté qu'une taille de particule inférieure à (0,9-1 mm) ne présentait aucune expansion avec un 20% de remplacement partiel de l'agrégat de déchets de verre. Avec des tailles de particules plus faibles (diamètre moyen égal à 150 µm), un pourcentage plus élevé d'agrégats de déchet de verre peut être utilisé en toute sécurité, jusqu'à 40%.

De plus, Corinaldesi et al. [40] ont constaté que 70% des déchets de verre peuvent être utilisés en toute sécurité en tant qu'agrégat avec des granulométries de (36-50 μm). La réduction des granulométries de déchet de verre augmente les propriétés pouzzolaniques et conduit à produire un matériau cimentaire résultant de la réaction pouzzolanique entre les fines des granulats de déchet de verre et le ciment. Le matériau cimentaire améliore la résistance de la pâte et une résistance plus élevée vis-à-vis des contraintes expansives du gel de la réaction alcali-silice est produite [41, 42].

II.5.1. L'effet de la taille des agrégats de déchet de verre sur les propriétés mécaniques des bétons

Le béton, en tant que matériau de construction principal, doit avoir des propriétés mécaniques spécifiques pour surmonter la contrainte élevée des charges de construction. Pour spécifier l'effet des déchets de verre sur les propriétés du béton, la résistance à la compression, la résistance à la flexion et la résistance à la traction pour le béton de déchets de verre produit ont été étudiées par différents chercheurs [11, 37, 42].

Il a été constaté que la résistance à la compression diminuait au fur et à mesure que le pourcentage de déchets de verre augmentait [32]. La résistance à la compression a diminué de 49% quand le pourcentage de déchets de verre atteint 60% [11]. La mauvaise forme de l'agrégat de déchets de verre grossier a provoqué une diminution de la force d'adhésion entre l'agrégat de déchets de verre et la pâte de ciment et a produit un béton à faible résistance à la compression [42]. Cependant, les résultats de Batayneh et al. [27] ont montré que la résistance à la compression a augmenté avec l'augmentation du pourcentage d'agrégats de verre de déchets jusqu'à 20%. Le même résultat a été trouvé par Ismail et Al-Hashmi [37], Mageswari et Vidivelli [43], Degirmenci et al. [44] et Tan et Du [25]. Mais, Idir et al. [3] ont constaté que la résistance à la compression du béton est également affectée par les granulométries de l'agrégat utilisé de déchets de verre, en raison de l'augmentation des propriétés pouzzolaniques. Les résultats expérimentaux ont montré que la résistance à la compression augmentait au fur et à mesure que la taille des particules de verre diminue. Une augmentation de 30 à 35 MPa dans la résistance à la compression du béton de déchets de verre a été trouvée avec une granulométrie de 80 μm [3].

En outre, les résultats expérimentaux des différentes études ont montré que la résistance à la flexion du béton a diminué avec l'augmentation du pourcentage de l'agrégat de déchets de verre en raison de la diminution de la force d'adhésion à la surface des particules de verre [11,25, 42, 44]. Batayneh et al. [27] et Mageswari et Vidivelli [43] ont montré une

augmentation de la résistance à la flexion de béton avec l'augmentation de l'agrégat de déchets de verre fins jusqu'à 20%. Ils ont expliqué que l'augmentation de la résistance à la flexion était due à la texture de surface et à la résistance des particules de verre par rapport à celle du sable.

La résistance à la traction du béton fabriqué à partir d'agrégats de déchets de verre a montré une augmentation de la résistance à la traction avec l'agrandissement du granulats de verre jusqu'à 20% [27,43] et même jusqu'à 25% [25]. L'augmentation des déchets de verre a encore diminué la résistance à la traction du béton de déchets de verre [25]. Cependant, Topcu et Canbaz [11] ont constaté que la résistance à la traction diminue quand l'agrégat de déchets de verre augmente. Les mêmes résultats ont été trouvés par Park et al. [42]. Il n'existe pas d'information claire sur l'effet de l'agrégat de déchets de verre et sur la taille des particules des déchets de verre sur les propriétés mécaniques du béton. Les recherches publiées ont montré des variations dans les résultats expérimentaux des propriétés mécaniques du béton de déchets de verre produit.

II.5.2. Propriétés thermiques de l'agrégat de déchets de verre

L'effet de la température, de -20°C à 60°C , sur les propriétés du béton composé avec l'agrégat de déchets de verre a été étudié par Poutos et al. [45]. Le béton de déchets de verre a montré une élévation plus basse de la température à 60°C et une diminution de la température à -20°C par rapport au béton à base de sable naturel. Les résultats expérimentaux ont prouvé que le béton confectionné avec le granulats de déchets de verre présentait une plus grande stabilité à la température tant pour les hautes que les basses températures, car le verre a une chaleur spécifique plus faible que celle du sable naturel et à cause de l'activité pouzzolanique du verre [45].

Terro [46] a étudié les propriétés de l'agrégat de déchets de verre à haute température jusqu'à 800°C . Différents pourcentages d'agrégats de déchets de verre ont été utilisés pour produire du béton, 0-100%. Et, différentes tailles de particules ont été étudiées (grossière, fine et mélange fine-grossière). Les résultats montrent que la résistance à la compression a diminué avec l'augmentation de la température jusqu'à $700-800^{\circ}\text{C}$ et avec l'augmentation du pourcentage de déchets de verre supérieur à 10% pour toutes les tailles de particules. C'est parce que ce verre s'approche de son seuil de fusion à $700-800^{\circ}\text{C}$. Cependant, le béton constitué de 10% de granulats de verre grossier a présenté une résistance à la compression plus élevée par rapport au béton normal à température ambiante et à des températures plus élevées.

Tableau II. 4: Résumé des recherches d'utilisation des déchets de verre comme agrégats

Type de déchet de verre	% étudié	Taille des particules étudiée	% optimal	Taille optimale	méthode de détection de la RAS	Réf.
Quartz, opale, fibre de verre et verre	100	Grossière	Fissures due à la RAS	Non indiqué	Mortar bar lengthchange	[33]
Bouteilles (verre sodocalcique)	100	Moins de 19 mm	Fissures due à la RAS	Non indiqué	Mortar bar lengthchange	[38]
Bouteilles (verre sodocalcique)	0–100	4.75–0.15 mm	20	Moins de 1.18 mm	(ASTM C1260)a	[39]
Bouteilles (verre sodocalcique)	0–60	4–16 mm	23	Moins de 4 mm	(ASTM C1260)a	[11]
Bouteilles (verre sodocalcique)	0–70	Moins de 5 mm	Moins de 30	Moins de 5 mm	(ASTM C1260)a	[42]
Container (verre sodocalcique)	0–70	36–100 µm	70	75 µm	Mortar bar length change	[40]
Bouteilles (verre sodocalcique)	0–100	Fine (moins de 4.75 mm), Grossier (plus de 4.75 mm)	10	Fine-grossière, Fine et grossière	Non étudié	[46]
Verre de construction (sodocalcique)	0–20	0.15–9.5 mm	20	0.15–9.5 mm	Non étudié	[27]
Calcin (sodocalcique)	0–100	0.15–9.5 m	No indiqué	Non indiqué	Non étudié	[45]
Container et verre plat (sodocalcique)	0–20	0.15–4.75 mm	20	0.15–4.75 mm	(ASTM C1260) a	[37]
Feuilles de verre (sodocalcique)	0–50	Moins de 4.75 mm	10	Moins de 4.75 mm	Non étudié	[43]
Bouteilles (verre sodocalcique)	0–40	8–3750 µm	40	120 µm	test de rétrécissement	[3]
Bouteilles (verre sodocalcique)	0–100	0.125–2.00 mm	30	0.125–2.00 mm	(ASTM C1260)a	[44]
Verre de construction et par brise	0–20	Fine (moins de 4 mm) et Grossière (plus de 4 mm)	20	Grossière	Test de rétrécissement LNECE-398(1993)	[32]
Bouteilles (verre sodocalcique)	0–100	0.15–4.75 mm	Moins de 25	Fine	(ASTM C1260)a	[25]

II.6. Valorisation de déchets de verre en remplacement partiel du ciment

L'utilisation des déchets de verre comme agrégats grossiers et fins dans la production de béton a été très limitée et n'a pas donné de résultats satisfaisants en raison de la réaction destructive alcalin-silice entre le ciment et l'agrégat de déchets de verre et aussi en raison de la faible performance de béton, une faible résistance à la compression, à la traction et à la flexion. Les propriétés pouzzolaniques du verre ont suscité l'idée d'utiliser des déchets de verre comme matériau de ciment ou comme un remplacement partiel de ciment dans la production de béton. Les propriétés pouzzolaniques du verre sont fortement affectées par la taille des particules du verre [34]. Cependant, dans toutes les études concernant les propriétés pouzzolaniques des déchets de verre, personne n'a réussi à identifier les produits de la réaction pouzzolanique ni à en proposer le mécanisme [47].

II.6.1. L'effet de la granulométrie des déchets de verre

Shao et al. [34] ont étudié l'effet de la granulométrie des déchets de verre sur les propriétés du ciment et du béton en utilisant 30% de déchets de verre comme remplacement partiel du ciment dans le béton. Les lampes fluorescentes de déchets de verre (sodocalcique) ont été utilisées avec différentes tailles de particules, 150 μm , 75 μm et 38 μm . Les déchets d'une taille de 150 μm ne sont pas considérés comme un matériau pouzzolanique en raison de la granulométrie grossière, mais seuls les 38 μm satisfont l'exigence d'être un matériau pouzzolanique selon ASTM C618. Les résultats montrent que la résistance à la compression a augmenté au fur et à mesure que la taille des particules des déchets de verre diminue.

Après 90 jours de durcissement, la résistance à la compression du béton de verre de 38 μm a été supérieure à celle du ciment Portland de 8%. Les résultats ont montré que l'expansion due à la réaction alcali-silice de toutes les granulométries des déchets de verre était inférieure à celle du béton de référence. Les résultats expérimentaux ont montré que l'expansion a diminué avec la diminution de la taille des particules des déchets de verre. Shao et al. [34] ont conclu que l'utilisation des déchets de verre jusqu'à 30% avec une granulométrie de 38 μm pourrait améliorer les propriétés du ciment Portland.

Khmiri et al. [47,48] ont étudié l'effet des granulométries des déchets de verre sur les propriétés pouzzolanique du verre et sur les propriétés du béton lors d'un remplacement partiel constant du ciment par 20% de déchets de verre. Quatre granulométries différentes de verre sodocalcique ont été utilisées en remplacement partiel du ciment (moins de 100 μm , moins de 80 μm , moins de 40 μm et moins de 20 μm). Les résultats expérimentaux ont

montré que la résistance à la compression augmentait au fur et à mesure que la taille des particules des déchets de verre diminue. La résistance à la compression du béton de verre de 20 μm a été plus élevée que celle du béton témoin de 2% après 90 jours de durcissement. Les résultats ont prouvé que les déchets de verre ont montré des propriétés pouzzolaniques lorsqu'ils sont à moins de 20 μm et le déchet de verre a amélioré les propriétés du béton lorsque 20% du verre de 20 μm utilisé comme remplacement partiel au ciment. Ces résultats concordent avec ceux de Shi et al. [49].

De plus, Shi et al. [49] les résultats ont montré que l'expansion due à la réaction alcali-silice a considérablement diminué avec l'utilisation de 20% de déchets de verre finement broyés comme remplacement partiel du ciment dans la production des bétons.

II.6.2. Le taux de remplacement du ciment par la poudre de déchet de verre

Différentes études ont été réalisées pour étudier le pourcentage optimal de déchets de verre qui peut être utilisé comme un remplacement partiel de ciment pour produire du béton. Schwarz et al. [50] ont étudié l'utilisation de déchet de verre (5, 10 et 20%) en remplacement partiel du ciment. La poudre de verre utilisée était légèrement supérieure dans la distribution granulométrique que dans le ciment Portland. On a trouvé que le pourcentage optimal de déchet de verre était de 10% sur la base des résultats du test de résistance à la compression. Les résultats expérimentaux ont montré que la résistance à la compression du béton de déchet de verre était inférieure à celle du béton témoin.

Les résultats des tests d'expansion due à la réaction alcali-silice ont montré que l'expansion a diminué avec l'augmentation du pourcentage de la poudre de déchets de verre parce que la réaction pouzzolanique de la poudre de verre a consommé la concentration d'hydroxyde alcalin et le CH du mélange de béton.

Les chercheurs ont conclu qu'un remplacement de 30% du ciment par les déchets de verre est nécessaire pour réduire l'expansion due à la réaction alcali-silice en dessous de 0,1%.

Nassar et Soroushian [51] ont examiné trois pourcentages (15, 20 et 23%) de déchet de verre avec une granulométrie moyenne de 25 μm en remplacement partiel du ciment dans deux projets à l'Université d'Etat du Michigan. Les résultats de résistance à la compression ont montré que le béton avec 15 et 20% de remplacement de déchets de verre présentait une résistance à la compression supérieure à celle du béton témoin. Alors que le béton avec 23% de verre de remplacement a montré la même résistance à la compression du béton témoin. Les résultats de résistance à la flexion ont montré le même comportement que celui de la

Chapitre2 : Etude bibliographique sur la valorisation des déchets de verre

résistance à la compression. Les résultats expérimentaux ont montré que la résistance à l'abrasion augmentait avec l'augmentation du pourcentage de déchets de verre et que seulement 23% des déchets de béton de verre donnaient les mêmes résultats que le béton témoin. Après 2 ans de tests, le béton composé de déchets de verre a montré une très bonne performance dans les deux projets sur le terrain sans aucune apparence de l'expansion néfaste de la réaction alcali-silice. L'étude a constaté que le pourcentage optimal de déchets de verre qui peut être utilisé en toute sécurité comme un remplacement partiel du ciment était de 20%. Les résultats expérimentaux de Nassar et Soroushian [51] étaient en contradiction avec ceux de Schwarz et al. [50], en particulier dans le pourcentage optimal de déchets de verre.

L'étude récente menée par Ali A Aliabdo et al [2] montre l'effet de l'utilisation de la poudre de verre comme remplacement du ciment sur la résistance à la rupture du béton pour le béton de 33 MPa et de 45 MPa est illustré à la figure Fig. II.2. A partir de ces résultats, l'effet positif de l'utilisation de la poudre de verre comme remplacement du ciment s'étend à 15% sur la résistance à la traction du béton, soit pour le béton ayant une teneur en béton de 33 MPa, soit de 45 MPa. Le niveau optimal de remplacement de la poudre de verre est respectivement de 10,0% et 15,0% pour le niveau de béton de 33 MPa et de 45 MPa. L'amélioration de la résistance à la traction du béton atteignant 28 jours maximum était respectivement de 19,5% et de 18,1% pour 33 MPa et 45 MPa niveau de béton.

Tableau II. 5: Résumé des recherches sur l'utilisation des déchets de verre en remplacement partiel du ciment.

Type de déchets de verre	% de étudiés	Granulométrie étudiée	%Optimum de déchets de verre	Taille de particule optimale	Méthode de détection ASR	Réf.
Lampes fluorescentes verre (sodocalcique)	30	38-150 μm	30	38 μm	(ASTM C1260) a	[34]
Perles de verre (sodocalcique)	20	10-700 μm	20	30-100 μm	(ASTM C1260) a	[49]
Verre plat des pare-brises (sodocalcique)	0-20	1-100 μm	10	1-100 μm	(ASTM C1260) a	[50]
Bouteilles (verre sodocalcique vert)	0-23	13-25 μm	20	13-25 μm	(ASTM C1260) a	[51]
Container (verre à base de sodocalcique)	20	20-100 μm	20	20 μm	Non étudié	[47, 48]
Déchets de verre recyclé (sodocalcique)	0-20	0,1-100 μm	20	0,1-100 μm	(ASTM C1567) b	[52]

a: Méthode de changement de barre de mortier en longueur.

b: Méthode d'essai de la barre de mortier accélérée.

II.6.3. Effet de la poudre de verre sur les propriétés de béton frais

L'une des grandeurs définissant les propriétés des bétons frais, est l'ouvrabilité. Elle est caractérisé par la mesure de l'affaissement, Kumarappan [53] a présenté qu'il y a une augmentation systématique de l'affaissement du béton lorsque la poudre de verre traversait un tamis de 300 μm . L'affaissement variait d'environ 40 mm pour le mélange de référence de 0% de poudre de verre à 160 mm à 40% de poudre de verre. Khatib [54] a montré qu'il y avait une augmentation systématique de l'affaissement au fur et à mesure que la teneur en poudre de verre dans le mélange augmentait. Khatib n'a pas mentionné la distribution granulométrique de la poudre de verre utilisée. Chikhalikar [55] a étudié les propriétés caractéristiques du béton armé de fibres contenant 600 μm de poudre de verre en poudre. Chikhalikar a conclu qu'il ya une amélioration de l'affaissement du béton est observé jusqu'à 40% de poudre de verre comme remplacement de ciment .Soroushian [51] a utilisé 13 μm de poudre de verre et ses résultats ont montré que l'affaissement a augmenté légèrement avec la poudre de verre moulue. Au contraire, les résultats de Vandhiyan [56] ont montré que l'utilisation de la poudre de verre a un effet négatif sur l'ouvrabilité du béton. Vandhiyan a utilisé la poudre de verre de forme angulaire passant par un tamis de 90 μm et 50% conservé dans un tamis de 75 μm . Ali A Aliabdo et al [2] ont étudié récemment l'utilisation de la poudre de verre comme remplacement partiel du ciment et ont conclu qu'il y a une augmentation de l'affaissement des 02 bétons étudiés RN 33 et RN 45 proportionnelle au pourcentage du remplacement comme le montre la figure II.1.

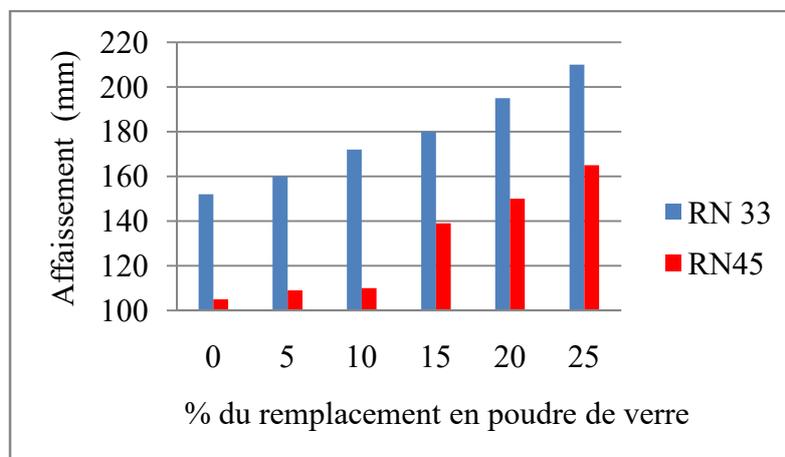


Figure II 1: Effet de l'utilisation de la poudre de verre en remplacement partiel du ciment sur l'affaissement des bétons [2].

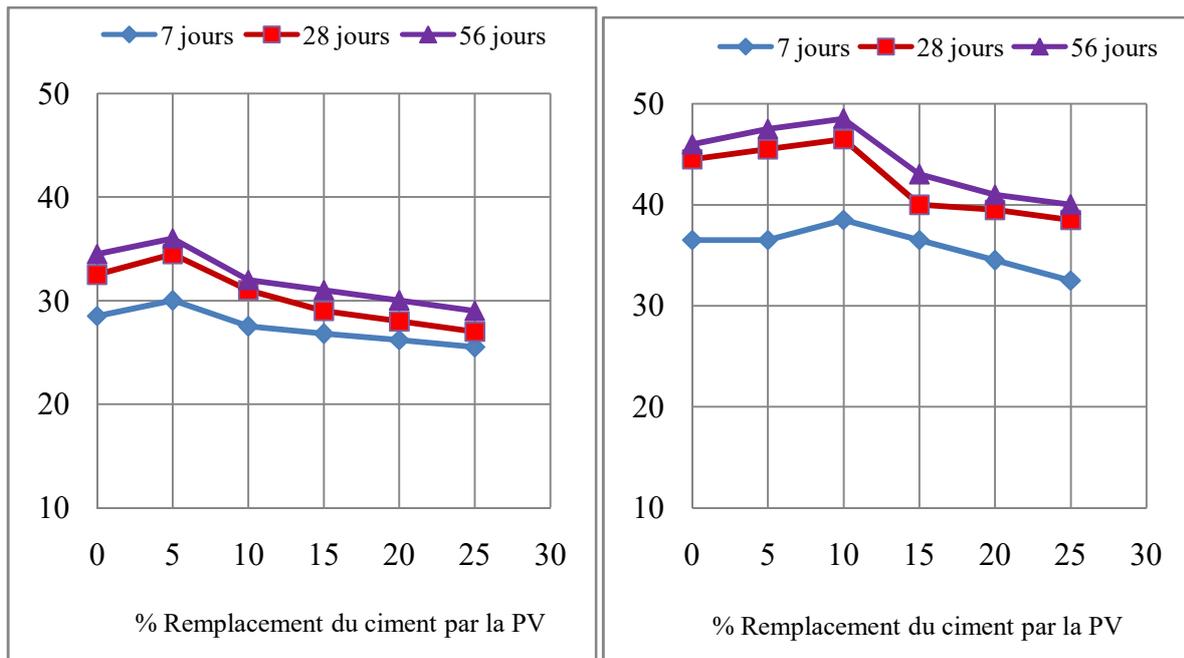
II.6.4. Effet de la poudre de verre sur les propriétés du béton durci

En ce qui concerne les propriétés de béton durci, il existe des variations dans l'effet de la poudre de verre dans la résistance à la compression du béton. (Kumarappan et Khatib [53,54] ont conclu que l'on observe une amélioration de la résistance à la compression du béton jusqu'à 10,0% de substitution du ciment par la poudre de verre. Vandhiyan [56] a étudié le remplacement du ciment par la poudre de verre et a conclu qu'il y a augmentation considérable à l'âge jeune du béton, en particulier chez les échantillons contenant à 15% de poudre de verre qui ont donné une augmentation de 29% de la résistance à 7 jours de plus que l'échantillon témoin. À 28 jours, cette différence de force se réduit à 23%.

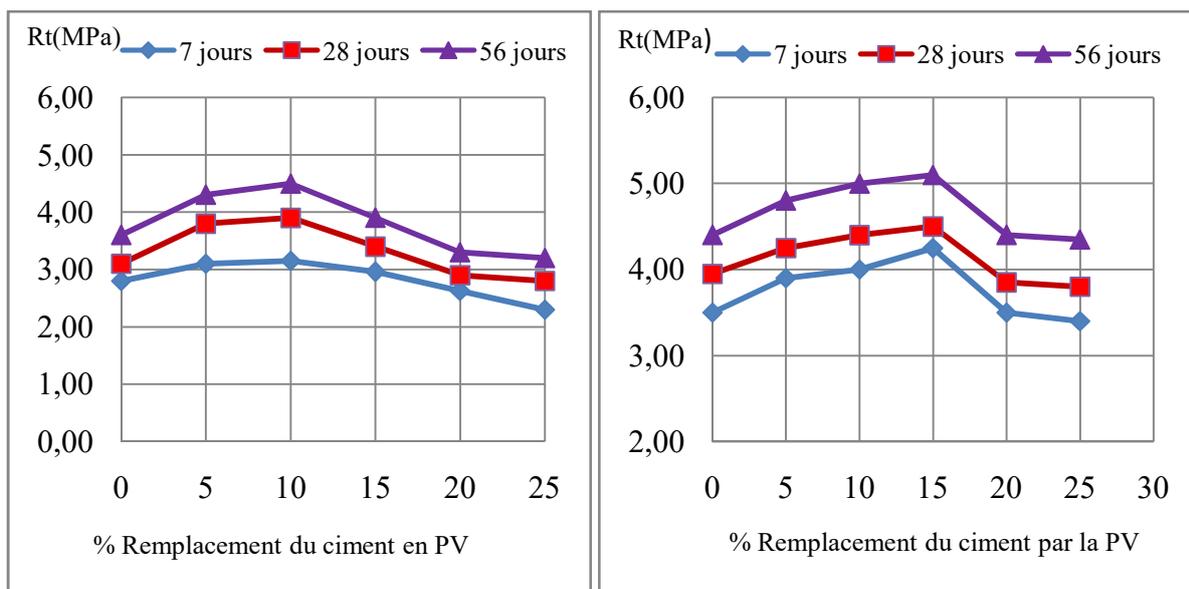
L'augmentation de la résistance est optimale à 10% de remplacement. Dali [57] a étudié l'effet de la poudre de verre tamisée à travers un tamis de 600 μm et il a observé la résistance à la compression est amélioré jusqu'à 25% de remplacement du ciment, mais le pic est observé à 20% de remplacement. Patil [58] a utilisé de la poudre de verre de granulométrie inférieure à 90 μm à travers un travail expérimental et a conclu qu'il ya une amélioration de la résistance à la compression du béton est observé jusqu'à 10,0% de remplacement du ciment en poudre de verre. Les résultats des tests de Vasudevan [59] ont montré que l'utilisation de poudre de verre jusqu'à 20,0% renforcé la résistance à la compression du béton. De plus, Chikhalikar [55] a observé que la résistance à la compression du béton augmente en raison de la substitution du ciment en poudre de verre jusqu'à 20% et Vijayakumar [60] a conclu que l'utilisation de la poudre de verre tamisée de 75 μm jusqu'à 40,0%.

De plus, Chikhalikar [55] a observé que la résistance à la compression du béton augmente en raison du remplacement du ciment en poudre de verre jusqu'à 20,0% et Vijayakumar [60] a conclu que l'utilisation de poudre de verre tamisée de 75 μm jusqu'à 40%. Le comportement perméable de la résistance à la compression du béton modifié avec de la poudre de verre comme remplacement du ciment a également été observé dans les forces de traction et de flexion [55, 56, 57, 60, 61].

Dans l'investigation réalisée par Ali A Aliabdo et al [2], il a été montré que le remplacement partiel du ciment par la PV améliore la résistance à la compression et la traction des deux bétons étudiés RN 33 et RN 45 comme illustrés sur les figures II.2 a,b et II.3a,b.



(a) Résistance à la compression RN 33 MPa (b) Résistance à la compression RN45 MPa
Figure II 2:Résultats des tests de résistance à la compression du béton réalisé avec de la poudre de verre en remplacement du ciment[2].



(a) Résistance à la traction RN 33 MPa (b) Résistance à la traction RN45 MPa
Figure II 3:Résultats des tests de résistance à la traction du béton réalisé avec de la poudre de verre en remplacement du ciment[2].

II.7. Valorisation de déchets de verre en remplacement partiel du ciment et agrégat dans le même mélange

L'un des phénomènes les plus nocifs dans le béton est la réaction alcali-silice (RAS). Il s'agit d'une réaction chimique qui se produit entre les agrégats de silice réactive et les alcalis dans la pâte de ciment. Le gel alcali-silice est le résultat de cette réaction et ce gel a la capacité

d'absorber l'eau et augmente en volume Cette augmentation du volume provoque une pression élevée à l'intérieur de la pâte de ciment et causant une contrainte interne qui peut conduire à un dommage grave pour le béton. La réaction alcali-silice dépend de la présence de milieux basiques élevés ($\text{PH} > 12$), d'une humidité relative élevée, elle augmente avec l'augmentation de la température et nécessite beaucoup de temps pour apparaître, jusqu'à plusieurs mois [33, 62-63].

Différents matériaux ont été utilisés pour atténuer la réaction alcali-silice comme le métakaolin [64], la cendre volante [50, 53] et la fumée de silice [22]. Il a également été prouvé que les verres broyés, d'une granulométrie inférieure à $75 \mu\text{m}$, ont la capacité de supprimer la réaction alcali-silice grâce aux propriétés pouzzolaniques du verre [65]. La capacité du verre broyé à supprimer cet effet nocif encourage les chercheurs à essayer d'utiliser les déchets de verre pour entraver l'effet de la réaction alcali-silice. Shayan [36] et Shayan et Xu [66] ont étudié l'utilisation des déchets de verre comme un ciment partiel et un agrégat de remplacement dans le même mélange pour produire du béton. Le tableau II.6 montre la distribution granulométrique des déchets de verre utilisés.

Ils ont utilisé des déchets de verre grossiers et fins en tant que remplacement partiel d'agrégats avec une plage de tailles de particules (0,15-12 mm) tandis que la poudre de déchets de verre a été utilisée comme remplacement partiel du ciment avec des granulométries inférieures à $10\mu\text{m}$. Les résultats expérimentaux ont montré que la résistance à la compression des bétons de déchets de verre a été améliorée par rapport à celle sans verre.

Les tests ont montré que l'augmentation de la poudre de verre réduit l'effet de la réaction alcali-silice grâce à la réaction pouzzolanique. Les résultats ont prouvé que 30% de substitution du ciment par la poudre de verre et 50% de substitution de l'agrégat naturel par le verre grossier et fin pourrait être utilisé en toute sécurité sans aucun effet sur les propriétés du béton produit.

Ils ont également étudié l'utilisation de déchets de verre de différentes couleurs comme un ciment partiel [67]. Différents pourcentages de déchets de verre ont été utilisés comme remplacement partiel du ciment et l'agrégat naturel et avec des granulométries différentes comme indiqué dans le tableau II.7. Les résultats expérimentaux après 404 jours ont montré que le béton en poudre de verre ne présentait aucune trace de l'effet alcali-silice avec un pourcentage de 30% comme remplacement du ciment et 40-50% d'agrégat de verre. Et les propriétés mécaniques du béton à déchet de verre étaient meilleures à celles du béton témoin.

Tableau II. 6: La granulométrie des déchets de verre utilisé [36,66].

Produit	Gamme de taille des particules
Agrégat de verre grossier	12-4.75 mm
Agrégat de verre fin	4.75-0.15 mm
Poudre de verre	Moins de 10 μ m

Tableau II. 7: Les granulométries et les pourcentages de déchets de verre [67].

Produit	Gamme de taille des particules
Agrégats des déchets de verre grossiers	2,36-0,60 mm
Agrégats des déchets de verre fins	0,30-0,15 mm
Poudre de verre en remplacement du ciment	Moins de 15 μ m
Pourcentage de la substitution	20-30%
Pourcentage d'agrégats des déchets de verre	40-75%

Taha et Nounu [68] ont étudié les propriétés du béton constitué de déchets de verre comme un remplacement partiel de l'agrégat et du ciment. Une poudre de verre ayant une taille moyenne de particule de (45 μ m) a été utilisée en remplacement partiel du ciment avec 20% de remplacement. En outre, on a utilisé les déchets de verre comme agrégat dans le même mélange avec une taille de particule moyenne inférieure à (5 mm) et avec deux pourcentages de remplacement 50% et 100%. Les résultats ont montré que la résistance à la compression diminuait avec l'augmentation du granulats de déchet de verre. Les mêmes résultats ont également été observés pour la résistance à la traction et la résistance à la flexion, comme le montre le tableau II.8.

Tableau II. 8: Résumé des recherches examinées sur l'utilisation de déchets de verre en remplacement partiel du ciment et des agrégats dans le même mélange.

Type de déchets de verre	% de déchets de verre étudiés	Taille des particules étudiées	Optimum% de déchet de verre	Taille optimale des particules	Méthode de détection ASR	Réf.
Verre à container (sodocalcique)	0 à 30 pour le ciment	Montré dans le tableau II. 6	30 pour le ciment	Montré dans le tableau II. 6	(ASTM C1260) a	[36,66]
	0-50 pour agrégat		50 pour l'agrégat			
Verre à container (sodocalcique)	0 à 30 pour le ciment	Montré dans le tableau II.7	30 pour le ciment	Montré dans le tableau II.7	(ASTM C1260) a	[67]
	0 à 75 pour l'agrégat		50 pour l'agrégat			
Verre recyclé	20 pour ciment	Moyenne de 45 μ m pour le ciment	Non indiqué	Non indiqué	Non étudié	[68]
	50 et 100 pour l'agrégat	Moins de 5mm pour l'agrégat				

II.8. Valorisation de déchets de verre comme matière première pour la production de ciment

Xie et Xi [69] et Chen et al. [70] ont étudié l'utilisation des déchets de verre comme l'une des matières premières pour produire du ciment Portland. En raison de la composition chimique similaire entre les déchets de verre et d'argile, les chercheurs ont essayé d'utiliser des déchets de verre comme un remplacement partiel à l'argile [69] ou au lieu d'argile [70] dans le mélange de matières premières de ciment.

Tableau II. 9: Propriétés de ciment à déchet de verre et ciment portland normal [70]

	Ciment portland normal	Ciment de déchet de verre
Na ₂ O (%)	0,10	0,20
K ₂ O (%)	0,32	0,31
Total alcalin (%)	0,31	0,40
SO ₃ (%)	2,49	2,47
lime libre (%)	1,25	1,20
SiO ₂ (%)	20,70	21,30
CaO (%)	65,20	65,10
Fe ₂ O ₃ (%)	3,33	3,37
Al ₂ O ₃ (%)	4,96	5,37
MgO (%)	0,57	0,61
C ₃ S (%)	62,70	55,60
Blaine (m ² /kg)	308,00	304,00
Finesse (≈325) (%)	93,50	94,40
Résistance à la compression RC		
2 jours (MPa)	21,90	20,30
7 jours (MPa)	39,60	36,50
28 jours (MPa)	55,10	53,50

Xie et Xi [69] ont utilisé des déchets de verre comme remplacement partiel à l'argile (grès).

Toutes les matières premières ont été mises dans un broyeur à jarre jusqu'à une finesse inférieure à 75 µm pour produire un mélange homogène. Les résultats expérimentaux ont montré que la résistance à la compression du ciment produit diminue avec l'augmentation de

la teneur en déchets de verre dans le mélange de matières premières de ciment. L'analyse de diffraction des rayons X a montré que le ciment de déchets de verre ne produisait pas de nouveaux minéraux dans le clinker et les chercheurs ont conclu que les déchets de verre peuvent être utilisés comme matière première pour la production de ciment mais avec de petites fractions, en raison de la teneur élevée en alcali des déchets de verre.

Chen et al. [70] a étudié l'utilisation de neuf couleurs différentes de déchets de verre des bouteilles comme l'une des matières premières pour la production de ciment Portland au lieu d'argile. Deux usines de production expérimentales avec des taux d'alimentation différents, 1 t / h pendant 24 h et 1,77 t / h pendant 56 h, ont été utilisées pour étudier les propriétés du ciment Portland de déchets de verre produit. Les déchets de verre ont été mélangés avec les matières premières suivantes: calcaire (80%), cendres volantes (9%), sable de silice (9%) et débris de fer (2%). Les résultats expérimentaux ont montré qu'il n'y avait pas de changements significatifs dans les niveaux de NOx et de SO2 lors de l'utilisation des déchets de verre comme matière première et sans elle. On a constaté que les propriétés physiques et chimiques du ciment de verre produit étaient identiques à celles du ciment Portland sans verre, comme le montre le tableau II .9. Une légère augmentation a été observée dans la teneur en alcali du ciment de verre, mais la valeur était dans la fourchette acceptée (0,4%).

II.9. Valorisation de déchets de verre comme ajout cimentaire

II.9.1.Effet de la poudre de verre sur les propriétés de béton frais

L'effet de l'utilisation de la poudre de verre en tant qu'addition cimentaire a été examiné par Ali A Aliabdo et al [2]. Les résultats des essais d'affaissement ont montré que l'utilisation de poudre de verre comme ajout au ciment diminue l'affaissement du béton. Les résultats obtenus sont reportés sur la figure II.4.

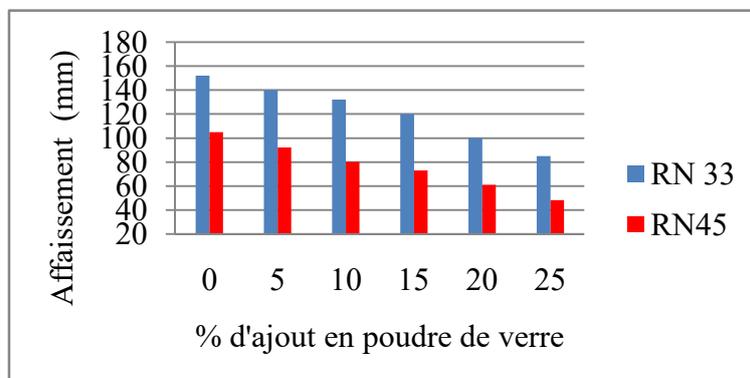
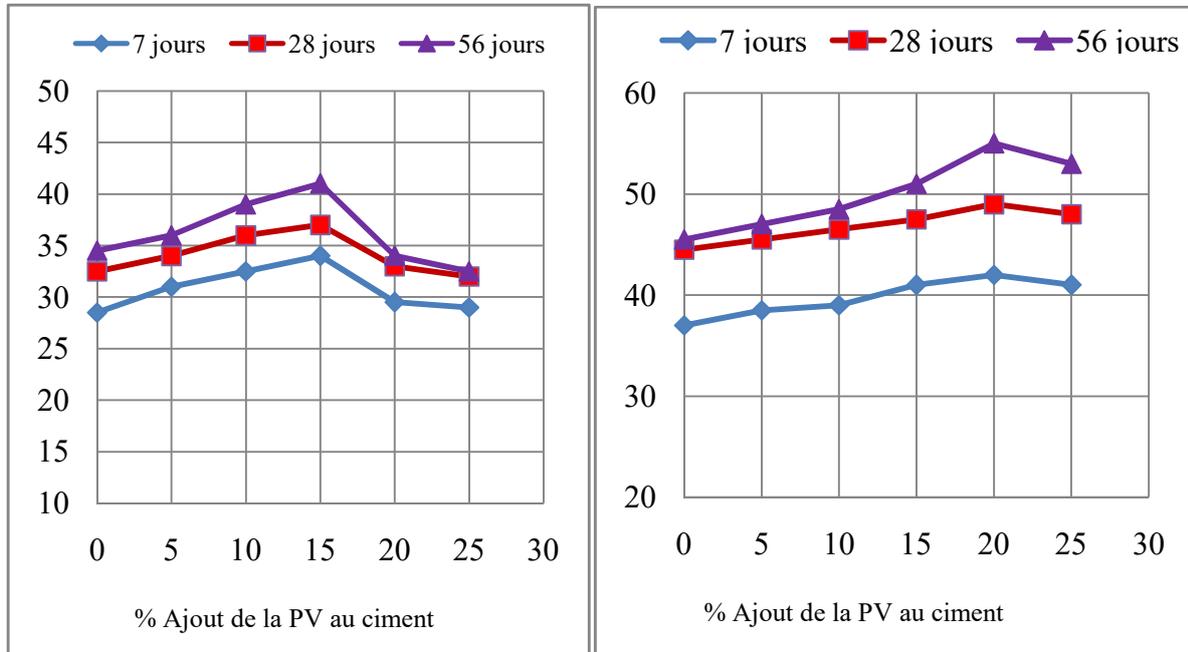


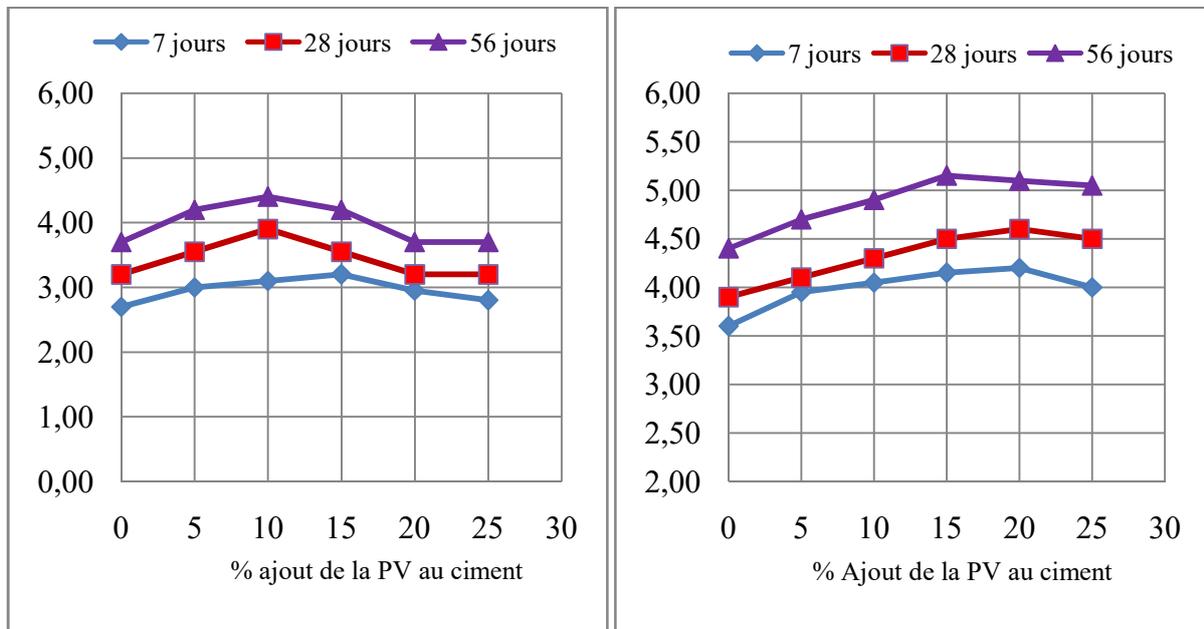
Figure II 4: Effet de l'utilisation de la poudre de verre en ajout cimentaire sur l'affaissement des bétons [2].

II.9.2. Effet de la poudre de verre sur les propriétés du béton durci

Les résultats des essais de résistance à la compression des bétons sont représentés sur la figure Fig. II.5. A partir de cette figure, pour le béton RN 33 MPa, il est montré que l'addition de poudre de verre jusqu'à 15% augmente la résistance à la compression du béton.



(a) Résistance à la compression RN 33 MPa (b) Résistance à la compression RN45 MPa
Figure II 5:Résultats des tests de résistance à la compression du béton réalisé avec de la poudre de verre en addition du ciment [2].

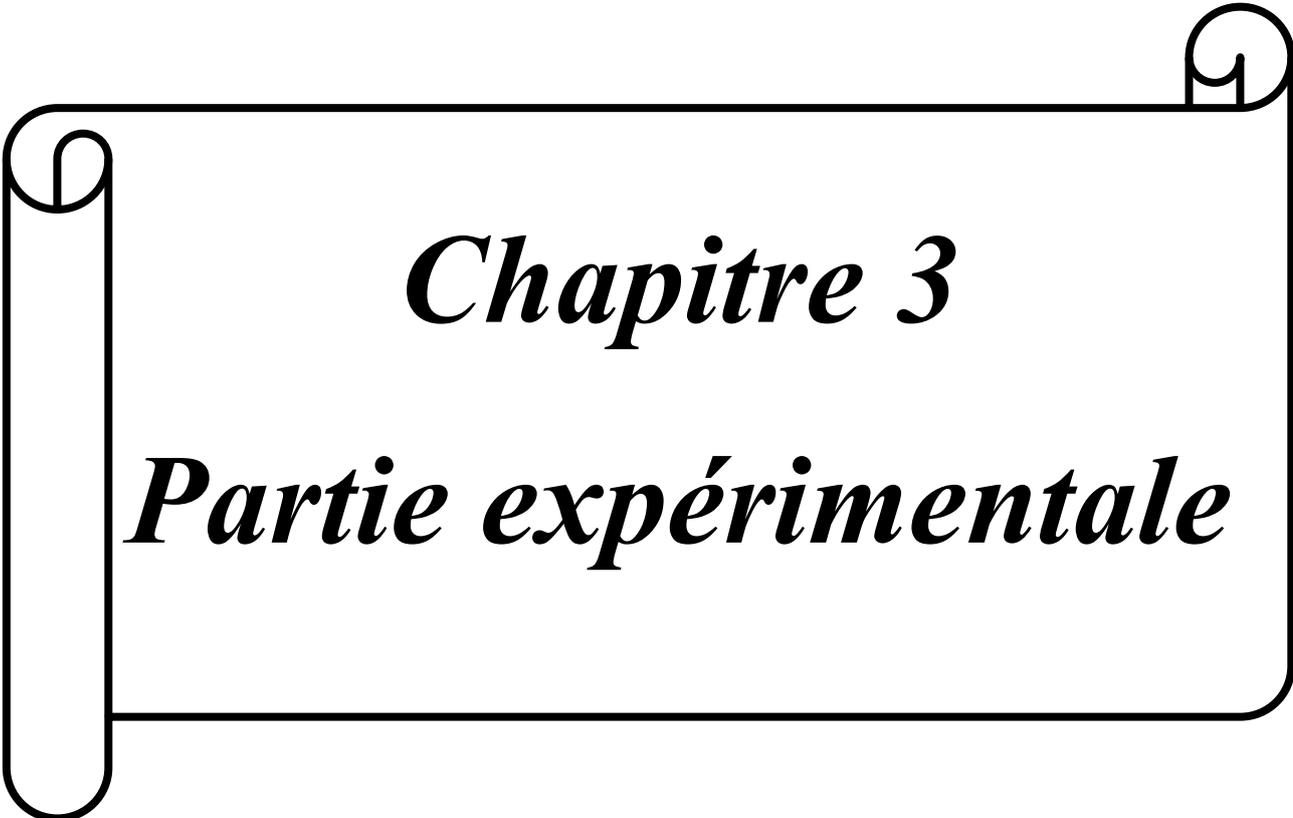


(a) Résistance à la traction RN 33 MPa (b) Résistance à la traction RN45 MPa
Figure II 6:Résultats des tests de résistance à la traction du béton réalisé avec de la poudre de verre en addition au ciment [2].

Chapitre2 : Etude bibliographique sur la valorisation des déchets de verre

Compte tenu de cette revue bibliographique et les paragraphes II.6.2, II.6.3 et II.7 ainsi que les informations figurant sur le tableau II.5, nous constatons que la majorité des chercheurs s'accordent à dire que le taux de remplacement optimal pour utiliser la poudre de verre comme remplacement du ciment se situe sur l'intervalle de 10 à 30% pour une granulométrie allant de 0/20 μm à 0/700 μm .

Pour cela, nous considérons comme hypothèse dans le présent travail que ce pourcentage optimal est de 15%. Cependant, Ali A Alia do et al [2] ont conclu que l'utilisation de poudre de verre 0/70 μm en tant que remplacement du ciment de plus de 15% diminue la résistance à la compression du béton de 28 jours.



Chapitre 3

Partie expérimentale

III. Etude expérimentale : matériaux, méthode et normes

III.1. Caractérisation des matériaux utilisés

La connaissance des propriétés : physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques des matériaux, est une exigence primordiale dans toute opération de construction, dans le but tout d'abord d'un emploi judicieux de ces matériaux, ensuite pour faire un choix répondant à leur destination, et en fin pour que ces matériaux soient façonnés d'une façon normalisée correcte afin de produire un mélange homogène à grande échelle.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux normes, caractéristiques essentielles des différents composants du béton. La connaissance de ces caractéristiques est fondamentale à toute recherche puisqu'elles peuvent influencer sur les résultats obtenus.

L'objectif est de vérifier leurs conformités par rapport aux normes Européennes, aussi les essais à réaliser doivent être conformes aux normes afin que nous puissions procéder à la formulation d'un béton normalisé selon la NF EN 206-1[71] et une méthode adéquate parmi les méthodes utilisées (Dreux-Gorisse, Bolomy, Faury etc.....).

III.1.1. Ciment

Le ciment utilisé est le ciment MATINE CPJ-CEM II /B 42.5 N provenant de l'usine ACC de LAFARGE Algérie dont les caractéristiques physico-chimiques ainsi les compositions chimiques et minéralogiques sont présentées dans les tableaux III.1.1, III.1.2 et III.1.3.

Tableau III. 1:Caractéristiques physiques du ciment utilisé.

Masse volumique absolue	3100 kg/m ³
Masse volumique apparente	1030 kg/m ³
Consistance normale	25 - 28.50%
Début de prise	140-195 minutes
Fin de prise	195-290 minutes
Surface spécifique Blaine	SSB=4150 - 5250 cm ² /g

Tableau III. 2:Composition chimique du ciment utilisé.

Composant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Alcalis	Perte au feu %
Teneur(%)	17.50	4.40	3.00	60.40	1.80	2.40	0.72	11.00

Tableau III. 3:Composition minéralogique du ciment utilisé.

Composant	Silicates tricalciques C ₃ S	Silicates bicalciques C ₂ S	Aluminates tricalciques C ₃ A	Aluminoferrites tetracalciques C ₄ AF
Teneur (%)	58.00	18.00	6.00	12.00

III.1.2. Poudre de verre

La poudre de verre utilisée provenant des emballages des boissons alcoolisées ramassés, lavés et finement broyés, le broyage dure plus d'une heure pour aboutir aux finesses désirées. Un tamisage est réalisé en laboratoire pour ressortir les trois (03) fractions que nous avons utilisé : 0/80µm, 0/125µm et 0/250µm.

En se basant sur les travaux énumérés dans le paragraphe II.3.2 qui concerne la recherche du pourcentage optimal de la substitution, qui était variable sur la plage de 10 à 30%, nous rappelons de maintenir le pourcentage optimal de déchets de verre à 15% comme remplacement du ciment et faire varier la taille des particules jusqu'à un seuil 250µm afin de prendre de la sécurité vis-à-vis l'activation de la réaction alcali-silice.

Tableau III. 4: Caractéristiques physiques de la poudre de verre.

Masse volumique absolue	2530 kg/m ³
Surface spécifique Blaine	SSB=de 2000 à 3600 cm ² /g
Couleur	Blanc grisâtre

Tableau III. 5 : Composition chimique de la poudre de verre verte par fluorescence X.

Composant	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃
% massique	73.89	1.72	1.24	8.40	0.44	0.30	7.05	0.25	0.12

Perte au feu : 0.89



Figure III 1: Préparation de la poudre de verre.

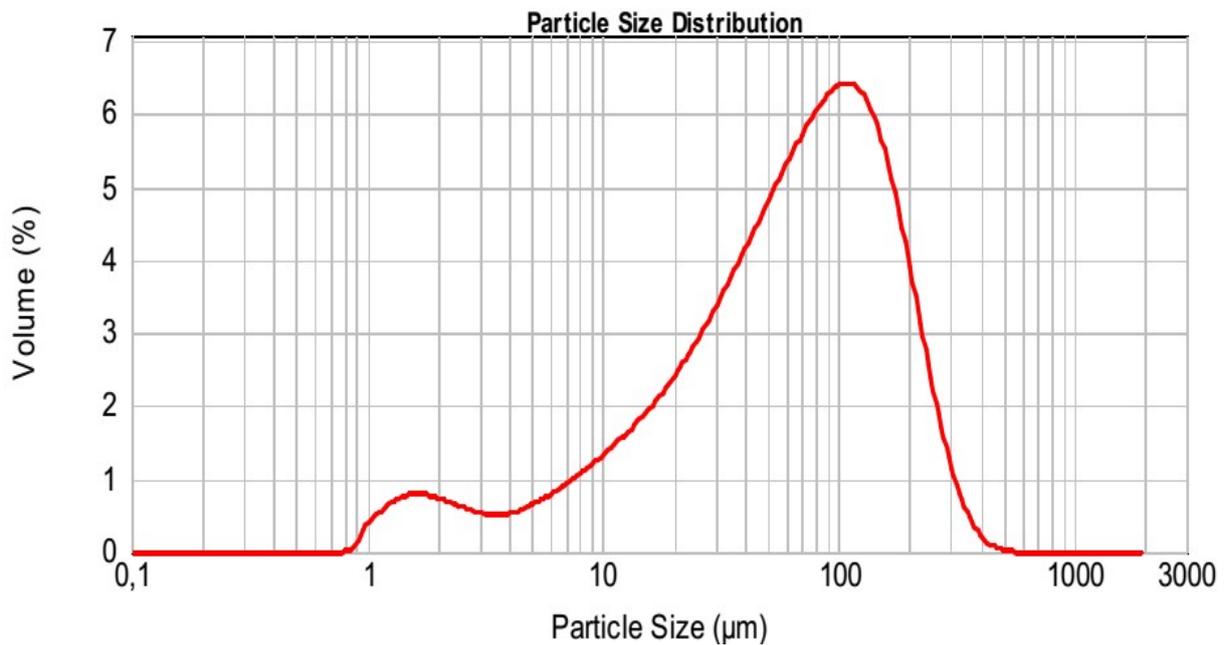


Figure III 2: Analyses granulométriques Laser de la poudre de verre.

III.1.3. Eau de gâchage

L'eau utilisée pour le gâchage de béton est l'eau de l'eau du robinet de l'Université de Bouira, nous supposons qu'elle répond à toutes les prescriptions de la norme (EN 1008) en matière de béton.

III.1.4. Sable

Le sable utilisé est le sable concassé de TIPAZA corrigé avec le sable fin de Boussaâda.

Les tableaux résumant les propriétés physiques et granulométriques des sables utilisés.

Tableau III. 6: Caractéristiques physiques des sables.

Echantillon		Sable (80%Tipaza +20%Boussaâda)			Norme appliquée
		sable de Tipaza	sable de Boussaâda	Sable 0/5 corrigé	
Ouverture des tamis	6,3	100,00	100,00	100,00	NF EN933-1
	5	100,00	100,00	100,00	
	4	93,40	100,00	94,70	
	2.5	81,70	100,00	85,40	
	1.25	59,00	100,00	67,20	
	0.63	33,20	93,00	45,20	
	0.315	11,40	45,60	18,20	
	0.16	3,40	7,80	4,30	
	0,08	0,70	1,20	0,80	
Masse volumique absolue (t/m ³)		2,66	2,51	2,63	NF P 18-545
Module de finesse		3,18	1,54	2,85	NF EN933-1
Equivalent de sable (%)		79,30	55,90	74,60	NF EN 933-8

III.1.4.1. Module de finesse

Le module de finesse (MF) d'un granulat peut aussi donner un aperçu sur le classement des échantillons de sable. Selon la Norme Française NF EN 933-1, le module de finesse est égal au 1/100e de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm.

En général, le sable est classé selon la valeur du module de finesse MF. Il est classé comme suit:

- MF = 1.8 à 2.2 : le sable est à majorité de grains fins,
- MF = 2.2 à 2.8 : on est en présence d'un sable préférentiel,
- MF = 2.8 à 3.3 : le sable est un peu grossier. Il donnera des bétons résistants mais moins maniables.

III.1.4.2. Equivalant de sable (ES)

Par l'essai de l'équivalent de sable (ES), on détermine la proportion de sol fin (ou les impuretés) dans les sables, donc permettant de mesurer la propreté d'un sable. Cet essai est normalisé, il est impératif de bien choisir l'échantillon et de veiller à ce que le diamètre des grains ne dépasse pas les 5mm. L'équivalent de sable est donné par la formule suivante:

$$ES = (h_2/h_1) \times 100$$

Oùh1 : hauteur entre la base de l'éprouvette et niveau supérieur du floculant

h2 : hauteur entre la base de l'éprouvette et niveau supérieur du sable sédimenté.

Plus l'équivalent de sable est élevé, moins le matériau contient des éléments fins nuisibles. Il s'applique assez bien aux sols faiblement plastiques et peut s'appliquer à tous les matériaux grenus, il s'effectue sur les fractions inférieures à 5 mm. Pour calculer l'équivalent de sable il existe deux types d'essais : visuel ou au piston. Cet essai est effectué sur la fraction du sable passant au tamis à mailles carrées de 2 mm, mais il peut être réalisé sur la fraction 0/4.

III.1.5. Granulats

Les granulats utilisés, les fractions des graviers 3/8, 8/15 et 15/25 proviennent de la carrière El Ain Nador –Tipaza, le tableau résume les caractéristiques physiques et pétrographiques des graviers.

Tableau III. 7: Caractéristiques des graviers.

Echantillons		Graviers Nador-TIPAZA			Norme appliquée
		Gravier 3/8	Gravier 8/15	Gravier 15/25	
Ouverture des tamis	40				NF EN 933-1
	31.5				
	25			100,00	
	20		100,00	65,80	
	16		89,50	23,40	
	12.5		60,00	6,60	
	10	100,00	22,70	0,90	
	8	85,20	5,00	0,60	
	6.3	65,20	1,00		
	5	38,50	0,80		
	4	16,80			
	2.5	3,50			
	1.25	0,90			
	0.63				
Masse volumique absolue (t/m ³)	2,69	2,69	2,68	NF P18-545	
Propreté superficielle (%)	0,80	0,80	0,70	NF EN 933-1	
Los Angeles (%)	21,90	22,80	23,30	NF EN 1097-2	
Micro-Deval (%)		14,90		NF EN 1097-1	
Aplatissement (%)	5,30	4,40	3,30	NF EN 933-3	

Les essais Los Angeles et Micro-Deval montrent que les graviers sont d'une excellente qualité pétrographique.

III.1.5.1 Essais Los Angeles :

Cet essai permet d'évaluer une caractéristique pétrographique de la roche, la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottement. Le principe de cet essai est la détermination du coefficient dit " Los-Angeles " consiste à faire tourner les granulats dans un tambour fermé contenant des boulets métalliques. Le coefficient LA représente la proportion d'éléments fins produits au cours de l'essai. Plus le coefficient, est faible plus la résistance des gravillons, est élevée.

A l'aide d'un autre coefficient on peut également évaluer la résistance d'un granulat à la fragmentation, c'est le coefficient de fragmentation dynamique.

Il est déterminé à partir d'un essai qui consiste à mesurer la quantité d'éléments fins inférieurs à 1.6 mm produits en soumettant le matériau aux chocs d'une masse normalisée. La formule qui sert à calculer le coefficient de fragmentation dynamique est la même que celle du coefficient Los-Angeles.

$$LA = (M - M_1) \times 100 / M$$

Où M : La masse initiale sèche de l'échantillon

M₁ : La masse des granulats supérieurs à 1.6 mm.

III.1.5.2 Essai Micro Deval :

L'essai permet de déterminer la résistance à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat. Le matériau évolue pendant l'essai par frottement des éléments, sur le cylindre de la machine en rotation et sur les boulets (charge abrasive) à sec ou en présence d'eau.

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les classes granulaires : 4-3mm; 6.3-10 mm; 10-14 mm; 25-50 mm.

Pour les essais effectués sur les gravillons entre 4 et 14 mm, une charge abrasive est utilisée.

Principe :

Si M est la masse du matériau soumis à l'essai, m la masse des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à l'usure s'exprime par le coefficient Micro-Deval **MDE = 100 x m/M.**

III.1.5.3 Coefficient d'aplatissement

Le coefficient d'aplatissement A est le rapport de la somme des masses de passant sur les grilles à fentes correspondantes d'écartement Di/2 en gramme à la somme des masses des

granulats élémentaires d_i/D_i en grammes. Ce rapport représenté ci-dessous est exprimé en pourcentage et arrondi au nombre entier le plus proche.

Plus A est élevée, plus le gravillon contient d'éléments plats. Une mauvaise forme a une incidence sur la maniabilité et favorise la ségrégation. On le note :

$$CA = (M_1 \times 100) / M_2$$

M_2 : la somme des masses des granulats élémentaires d_i/D_i en grammes

M_1 : la somme des masses de passant sur les grilles à fentes correspondantes d'écartement $D_i/2$ en gramme.

III.1.6. Adjuvant Superplastifiant

Le superplastifiant utilisé est Rheobuild R850, produit BASF spécialement formulé pour conférer au béton des propriétés rhéoplastiques.

Tableau III. 8: Caractéristiques physiques de superplastifiant.

Densité	1.21 à 25C°
Point de congélation	0 °C
Couleur	Brun liquide

III. 2. Formulation des bétons d'études

III. 2.1. Partie normative selon NF EN 206-1

Ce sont des bétons coulés sur place, sur chantier destinés au bâtiment et ouvrage de génie civil selon les prescriptions de la norme européenne, version française NF EN 206-1[71], où cette dernière couvre, les bétons de masse volumique normale (entre 2000 et 2600 kg/m³).

III.2.1.1. Classe d'exposition

La classe d'exposition est donnée en fonction des actions dues à l'environnement auxquelles les bétons de l'ouvrage ou de la partie de l'ouvrage vont être soumis pendant leur durée de service [71].

La norme NF EN 206-1[71] définit dix-huit sous-classes d'exposition regroupées en six classes par risque de corrosion, d'attaques ou d'agressions dépendant des actions et conditions environnementales.

Nous retenons la classe XC qui comporte quatre sous classes qui sont :

XC1 : sec et humide en permanence.

XC2: humide, rarement sec.

XC3: humidité modérée.

XC4 : Alternance d'humidité et de séchage.

Nous prendrons en compte la sous classe XC4 pour notre étude.

III.2.1.2. Classe de résistance du béton

La norme NF EN 206-1[71] définit la classe de résistance à la compression. Lorsque le béton est classé selon sa résistance à la compression, La valeur f_{ck-cyl} est la résistance caractéristique exigée à 28 jours mesurée sur des cylindres de 150 mm de diamètre sur 300 mm de haut, et la valeur $f_{ck-cube}$, à la résistance caractéristique exigée à 28 jours mesurée sur des cubes de 150 mm de côté.

Tableau III. 9: Les classes de résistances du béton à 28 jours(MPa) [71].

Classe	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 40/50	C 45/55
Résistance sur cylindre (15x30cm ²)	25	30	35	40	45
Résistance sur cube (15 x15 cm ²)	30	37	45	50	55

Nous supposons que le béton est destiné aux tabliers et entretoises des ouvrages d'art, une classe de résistance C35/45 est sélectionnée.

III. 2.1.3. Classe de consistance du béton

La norme NF EN 206-1[71] définit d'après l'affaissement, cinq classes de consistance des bétons qui sont représentées ci-dessous dans le tableau suivant :

Tableau III. 10:Classe de consistance

Classe	Affaissement (mm)
S1	de 10 à 40
S2	de 50 à 90
S3	de 100 à 150
S4	de 160 à 210
S5	≥ 220

Pour notre étude nous avons utilisé comme un moyen de spécification de la consistance le cône d'Abrams qui reste le moyen le plus utilisé car il est le plus simple. Il nécessite un matériel peu coûteux et peut être exécuté par un personnel moyennement qualifié.

Pour la consistance, la mise en œuvre du béton exige une fluidité relative où la valeur d'affaissement est de (120 ± 30) comprise entre 90 et 150 mm, ce qui suppose un béton de consistance très plastique.

III.2.1.4. Classe en fonction de la dimension maximale des granulats

Le diamètre de plus gros élément constituant le béton est $D_{max} = 25\text{mm}$.

III.2.2. Formulation selon la méthode Dreux-Gorisse

Le béton témoin étudié est un béton à propriétés spécifiées (BPS) qui d'après la norme NF EN 206-1[71], est désigné par: BPS NF EN 206-1[71], le tableau récapitule les propriétés du béton désiré.

Tableau III. 11: Données de base

Données de base	Valeur / description
Béton normal de classe	C35/45.
Consistance	béton très plastique.
Affaissement	(120 ± 30) mm.
Classe vraie du ciment σ'_c	42,5 MPa
Forme des granulats	Granulats concassés.
Qualité des granulats	Bonne (courante).
Serrage	vibration faible.
Dosage en ciment	$C = 430\text{kg/m}^3$
Dimension maximale de granulat	$D_{max} = 25 \text{ mm}$

❖ Résistance visée :

Le béton doit être formulé pour qu'à 28 jours sa résistance moyenne en compression atteigne la valeur caractéristique σ'_{28} . Cette valeur doit, par mesure de sécurité, majorée de 15 % à la résistance minimale en compression f_{c28} nécessaire à la stabilité de l'ouvrage.

$$\sigma'_{28} = 1,15 \times f_{c28}, \quad \sigma'_{28} = 1,15 \times f_{c28} = 1.15 \times 35 \approx 41 \text{ MPa.}$$

❖ **Détermination du rapport C/E :**

Le rapport C/E est calculé par la formule de Bolomey:

$$\text{Avec : } C/E = [\sigma'_{28} / (\sigma'_c \cdot G)] + 0.5$$

σ'_{28} = résistance visée à 28 jours.

σ'_c = classe vraie de ciment en MPa.

G = coefficient granulaire.

C = dosage en ciment (Kg de ciment/m³ de béton).

E = dosage en eau potable (Kg d'eau/m³ de béton ou litre d'eau/m³ de béton).

❖ **Coefficient granulaire G**

G est un coefficient granulaire sans dimension dont la valeur dépend de la qualité des granulats et la dimension D_{max} .

Tableau III. 12: Coefficient granulat G en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats D_{max}

Qualité des granulats	Dimension D _{max} des granulats		
	Fins D _{max} < 12,5 mm	Moyens 20 < D _{max} < 31,5	Gros D _{max} > 50 mm
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Le rapport C/E = 2.43 et l'affaissement A= 12 cm, l'abaque donne un dosage en ciment entre 400 et 450 Kg avec l'utilisation de superplastifiant.

C= 435 Kg/m³, on déduit la valeur de E= 179.00 Kg

❖ **Corrections sur le dosage en ciment C et le dosage en eau E**

Tableau III. 13: Correction sur le dosage de pâte en fonction de D_{max}.

Dimension max des granulats(D _{max} en mm)	5	8	12,5	20	31,5	50	80
Correction dosage de pâte (en%)	+ 15	+ 9	+ 4	0	- 4	- 8	- 12

C= 430 Kg/m³ et E=177 Kg (le rapport C/E reste inchangé).

❖ **Détermination du mélange optimal à minimum de vides**

C'est le pourcentage de sable et de gravier exprimé à partir de la courbe granulaire de référence construite. La courbe OAB, où B à l'ordonnée 100% correspond à la dimension D du plus gros granulat et le point de brisure A à des coordonnées ainsi définies comme suit:

En abscisse : si $D \leq 20$ mm l'abscisse est $D/2$, si $D \geq 20$ mm l'abscisse est située au milieu du segment, gravier limité par le module 38(5mm) et le module correspond à D.

En ordonnée : Y donnée par la formule suivante : $Y = 50 - \sqrt{D} + K$

K est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés (surtout le sable, dont l'influence est prépondérante) et également du module de finesse du sable. Valeur trouvée $K = 2.10$ pour $MF = 2.85$

Tableau III. 14 : Correction sur le dosage de pâte en fonction de Dmax.

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en Ciment	400 + Fluid	- 2	. 0 .	- 4	- 2	- 6	- 4
	400	0	+ 2	- 2	0	- 4	- 2
	350	+ 2	+ 4	0	+ 2	- 2	0
	300	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4	0	+ 2
	250	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4
	200	+ 8	+ 10	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6

La courbe granulaire de référence OAB est tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats composants. On trace alors les lignes de partage entre chacun des granulats en joignant le point à 95%.

❖ Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux :

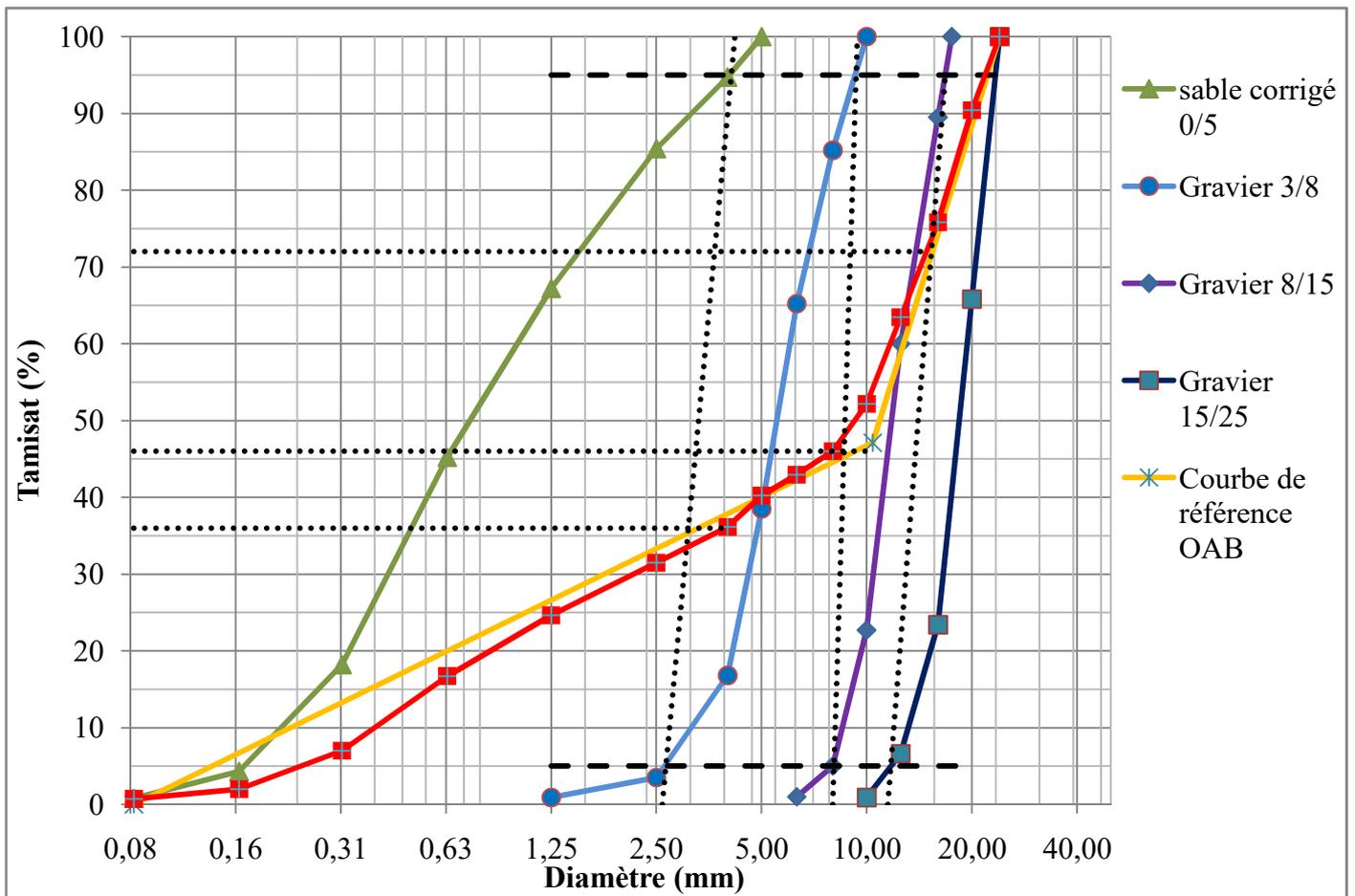


Figure III 3: Courbes granulométriques des différents composants.

Les pourcentages en volumes absolus de granulats sont déduits à partir du graphe Fig. III.3

% Sable corrigé 0/5 = 36%

% Gravier 3/8 = 10%

% Gravier 8/15 = 26%

% Gravier 15/25 = 28%

❖ **Détermination de la compacité du béton**

Le volume absolu de l'ensemble des granulats est $V=1000\gamma-c$.

C: le volume absolu de ciment. $c= C/3.10 = 138.70$ litre.

γ : coefficient de compacité : valeur tabulée en fonction de la consistance, le serrage et la dimension maximale des grains de granulat D et en fonction de terme correctif sur le type de granulats (concassés, roulés) et le dosage en ciment différent de 350kg/m^3 .

On lit les corrections effectuées, on trouve $\gamma = 0,825$.

Tableau III. 15 : Correction sur le dosage de pâte en fonction de D_{\max} .

Consistance	Serrage	Compacité (c_0)						
		D = 5	D=8	D=12.5	D= 20	D=31.5	D= 50	D= 80
Molle (TP-FI)	Piquage	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique (P)	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme (F)	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

Tableau III. 16: Dosages des composants en Kg pour un mètre cube de béton fini.

Désignation du béton	Témoin		BPV1		BPV2		BPV3	
REFERENCE	C35/45; CPJ		C35/45; CPJ		C35/45; CPJ		C35/45; CPJ	
Composition	1 m ³							
Granulat 15/25 (Kg)	517		517		517		517	
Granulat 8/15 (Kg)	480		480		480		480	
Granulat3/8 (Kg)	185		185		185		185	
Sable TIPAZA (Kg)	520		520		520		520	
Sable Boussaâda(Kg)	130		130		130		130	
CEM II/B 42.5 N(Kg)	430		365		365		365	
PV 0/0.080 (Kg)			65					
PV 0/0.125 (Kg)					65			
PV 0/0.250 (Kg)							65	
Eau	177		150		150		177	
RHEOBLUID R 850	1,00%	4,30	1,00%	3,70	1,00%	3,70	1,00%	3,70
Total Mélange	2443		-		-		-	
Rapport E/C	0,41		0,41		0,41		0,48	

III.3.1 Essais sur béton à l'état frais

III.3.1.1 Affaissement au cône d'Abrams NF EN 12350-2

❖ Principe de l'essai

Cet essai consiste à mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume tronconique de béton frais. Ce dernier est compacté dans un moule ayant la forme d'un tronc de cône. Lorsque le cône est soulevé verticalement, l'affaissement du béton permet de mesurer sa consistance.

❖ Appareillage

Moule pour former l'éprouvette : en acier galvanisé pour résister aux attaques de la pâte de ciment, d'une épaisseur de 1,5 mm. La paroi intérieure du moule doit être lisse, sans aspérités. Le moule doit avoir la forme d'un tronc de cône creux aux dimensions intérieures suivantes :

- Diamètre de la base: (200± 2) mm;

- Diamètre du haut: (100± 2) mm;

•Hauteur: (300 ± 2) mm;

Le moule doit être muni, à sa partie supérieure, de deux poignées et, à sa partie inférieure, de pattes de fixation ou d'appui, afin de l'immobiliser.

•Tige de piquage: de section circulaire, rectiligne, en acier, de (16 ± 1) mm de diamètre, et de (600 ± 5) mm de longueur, dont les extrémités sont arrondies.

•Entonnoir: en matériau non absorbant et non directement attaqué par la pâte de ciment, ayant un dispositif permettant à l'entonnoir d'être placé correctement sur le moule spécifié ci-dessus.

•Règle : graduée de 0 mm à 300 mm, avec des graduations de 5 mm, le zéro étant situé à une extrémité de la règle.

•Surface ou plateau de base: plateau ou autre surface, rigide, plat, non absorbant, sur lequel le moule sera posé.



Figure III 4: Photos des essais d'affaissement au cône d'Abrams

III.3.1.2 Masse volumique

La masse volumique des bétons a été déterminé par la formule suivante :

$$\rho = (m_2 - m_1) / V$$

m_2 : la masse du béton + moule.

m_1 : la masse du moule.

V : le volume de l'éprouvette.

III.3.2 Essais sur béton à l'état durci

Afin de mieux comprendre l'influence des différentes finesses de la poudre de verre sur les comportements physico-mécaniques du béton à l'état durci, nous allons procéder aux essais suivants :

- Evolution de la résistance à la compression.
- Evolution de la masse volumique en fonction de l'âge.
- Détermination du module d'élasticité et évolution des contraintes-déformations.
- La microstructure des bétons avec Microscope confocal à balayage laser.

III.3.2.1. Résistance à la compression

La caractérisation du comportement en compression est effectuée conformément à la norme EN 12390-3, sur des éprouvettes cylindriques et cubiques de dimensions respectivement (16x32 cm²) et (15 x 15 x 15 cm³), mûries à l'eau. Les résultats de la résistance à la compression f_{cj} obtenus à 7, 14 et 28 jours représentent la moyenne de trois échantillons. La machine utilisée pour l'écrasement uni axial des cylindres et des cubes est une presse hydraulique RP 3000 XP dont la capacité maximale est de 3000KN en compression. La presse est reliée a une machine d'acquisition qui permet l'enregistrement simultané de la force en fonction du temps, la vitesse de l'essai est de 0.6 KN/S.

L'expression des résultats sera donnée par la relation $f_{cj} = F/S$ (en MPa) où F est la charge maximale et S la surface de compression de l'éprouvette.



Figure III 5 : Confection et démoulages des éprouvettes et essais de compression



III.3.2.2. Evolution de la masse volumique en fonction de l'âge.

Des pesées sont effectuées avant l'écrasement des éprouvettes à 7, 14 et 28 jours pour contrôler la variation de la masse en fonction de l'âge depuis le jour du coulage.

III.3.2.3. Détermination du module d'élasticité et évolution des contraintes-déformations.

Les essais de compression sont réalisés sur des cylindres 16*32 selon la norme ASTM C469 qui suit les mêmes directives que la norme EN 12390-13.

L'essai est réalisé à l'aide de la même presse utilisée pour la compression pilotée par un ordinateur équipé de logiciel, doté d'un capteur de force jusqu'à 2000KN.

Un fichier résultats est récupéré, exploité pour tracer le diagramme contrainte déformation en le comparant à l'image fournie par le logiciel et en l'utilisant pour détermination du module d'élasticité sécant.

On détermine le module élastique à 28 jours sur des éprouvettes cylindriques de (16x 32 cm²) mûries à l'eau, et équipées d'extensomètre axial d'un seul capteur permettant de mesurer les déformations longitudinales de l'échantillon sous trois (03) cycles de chargement-déchargement jusqu'à une contrainte maximale égale à $\sigma_c = 0.4f_{c28}$

❖ Mode opératoire

- Mise en place des capteurs inductifs : Fixer les capteurs de déformations sur l'éprouvette de manière que l'extensomètre soit positionné à égale distance des faces d'extrémité de l'éprouvette ;
- Régler les capteurs de manière à ce que la valeur affichée soit positive
- Appliquer à l'éprouvette la contrainte inférieure.

- 1er cycle de chargement des éprouvettes : augmenter la charge de façon à générer une élévation constante de la contrainte de $0,6 \pm 0,2 \text{ N/mm}^2$ par seconde. La contrainte supérieure correspond à 40% de la résistance à la compression sur cylindre.
- Maintenir la contrainte supérieure constante. Enregistrer la contrainte supérieure effective et la déformation absolue.
- Réduire la charge jusqu'à la valeur de départ de la contrainte inférieure, avec une vitesse identique à celle utilisée pour la charge. Enregistrer la contrainte inférieure effective et la déformation correspondante.
- Répéter cette opération deux fois (2e et 3e cycles. Lors du 3e cycle la contrainte supérieure est maintenue pendant 15 s au moins (jusqu'à ce que la déformation cesse d'augmenter).
- Dessiner le diagramme contrainte – déformation spécifique, respectivement tension – déformation, correspondant au 3e cycle.
- On calculera le module d'élasticité E à partir de la contrainte inférieure (σ_{\min}) précédant le 3e cycle et de la contrainte supérieure (σ_{\max}) du 3e cycle, ainsi que des différences de déformations correspondantes (ϵ_{\max} , ϵ_{\min} : déformations correspondant aux contraintes σ_{\max} , σ_{\min}):

$$E = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}}$$



Figure III 6: Préparation de l'essai de mesure de module d'élasticité statique

III.3.2.4. Fonctionnement du microscope confocal

III.3.2.4.1. Définition

La microscopie confocale est une technique optique non destructive permettant d'obtenir des coupes optiques non seulement dans le plan (X,Y) mais également suivant un plan (X,Z) parallèle à l'axe optique qui peuvent faire l'objet de reconstructions tridimensionnelles.

Ces coupes optiques "virtuelles" n'affectent en rien l'intégralité de l'échantillon contrairement aux coupes physiques nécessaires en microscopie électronique.

Les derniers développements en microscopie confocale fluorescente permettent, par des moyens de marquage basés sur l'utilisation des produits fluorescents, d'observer des structures 3D remarquables.

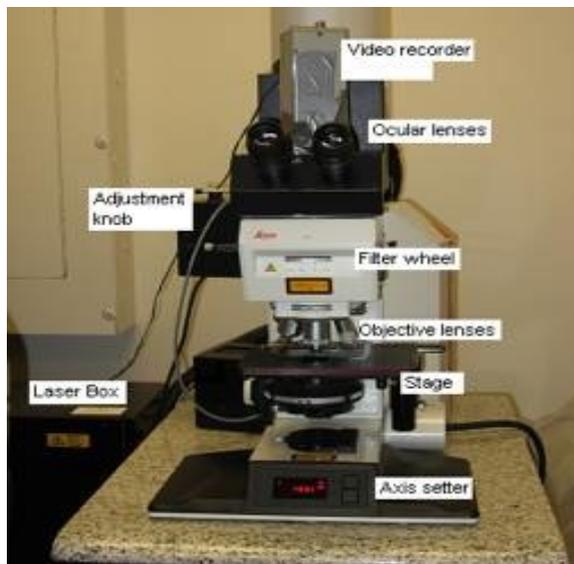


Figure III 7: Photo du microscope confocal.

III.3.2.4.2. Principe de fonctionnement

Le microscope confocal nécessite une lumière d'excitation particulièrement intense et focalisée. La lumière laser comme source d'excitation s'est imposée dans la plupart des microscopes confocaux. Dans la tête de scan, le faisceau laser d'excitation est réfléchi par un miroir dichroïque puis envoyé sur des miroirs galvanométriques (miroirs de balayage) qui, en pivotant sur leur axe, vont permettre le balayage rapide de l'ensemble du champ.

La lumière d'émission récupérée via l'objectif est descannée suivant le même trajet, puis parvient au détecteur (tube photomultiplicateur) via successivement le miroir dichroïque, puis le diaphragme confocal. Le signal électrique émis par le photomultiplicateur est amplifié puis envoyé à l'ordinateur, où il est digitalisé, puis affiché sur le moniteur. L'ordinateur gère les

miroirs de balayage, le moteur pas à pas (ou la platine galvanométrique) contrôlant le déplacement en z de la platine et l'ouverture du diaphragme confocal.

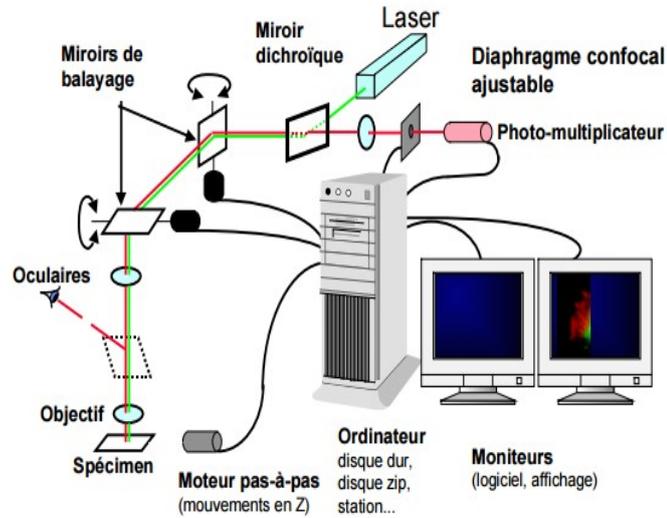
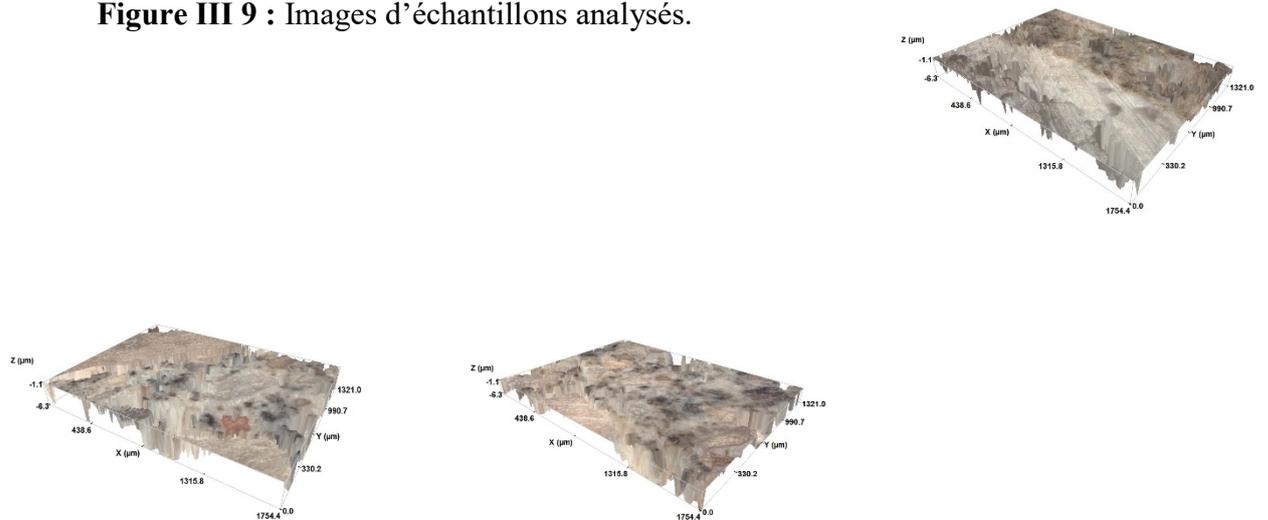
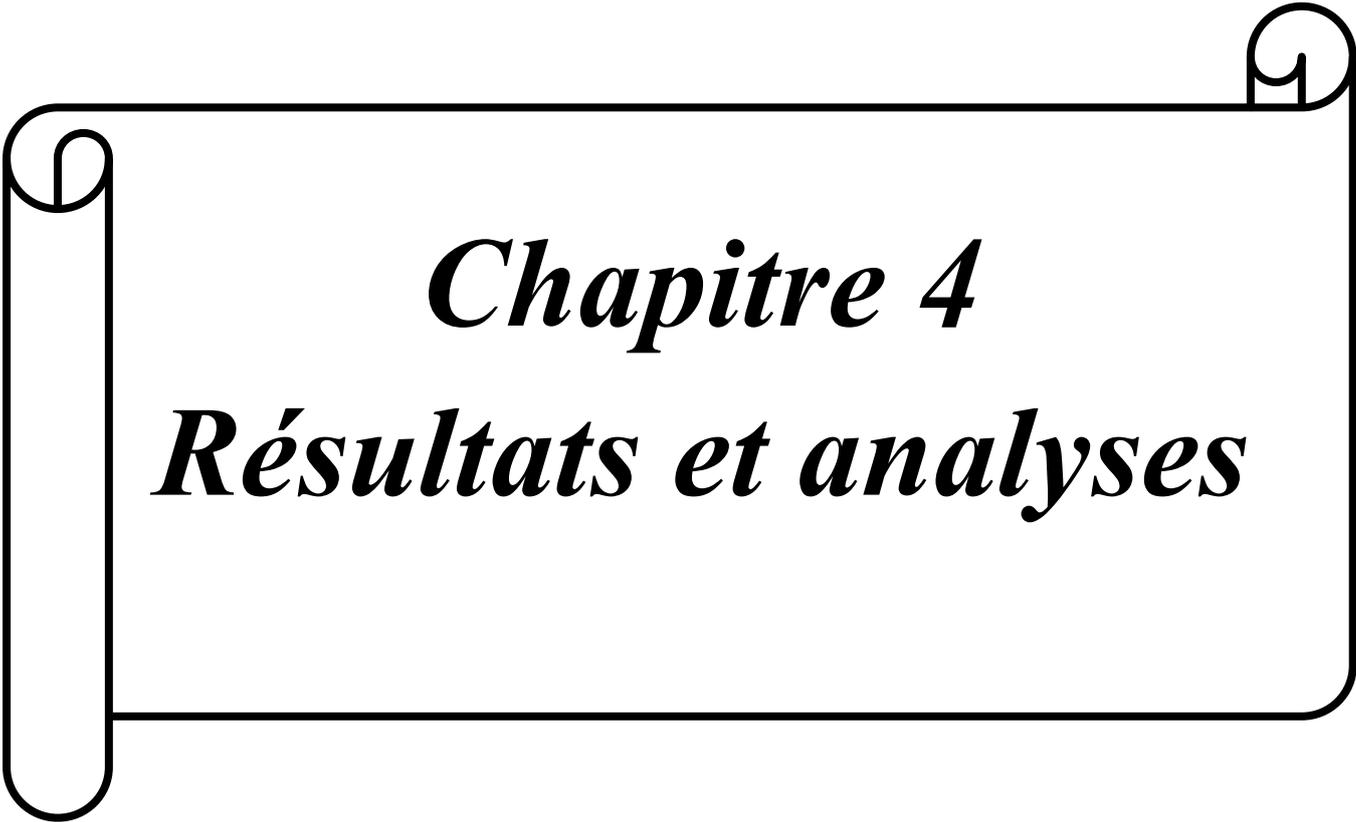


Figure III 8: Schéma des interactions faisceau-échantillon.



Figure III 9 : Images d'échantillons analysés.





Chapitre 4
Résultats et analyses

IV. Résultats et analyses

IV.1.1 Caractérisation du béton à l'état frais

IV.1.1.1 Affaissement au cône d'Abrams

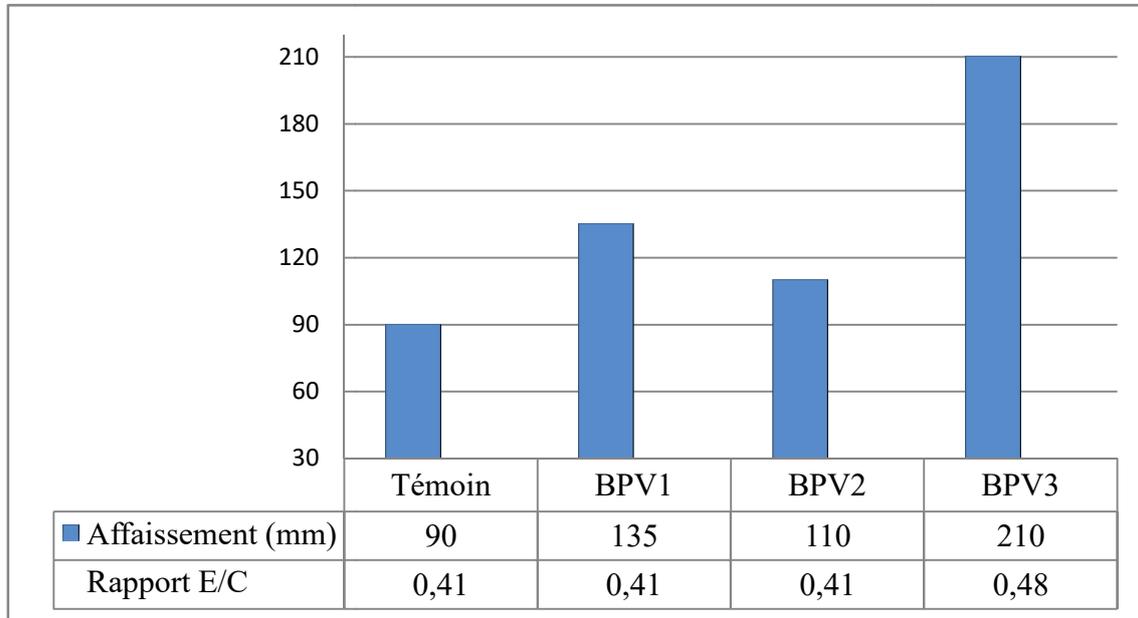


Figure IV 1: Effet de la poudre de verre sur l'affaissement des bétons.

Nous constatons que pour le même rapport E/C, les affaissements des bétons BPV1 et BPV2 dépassent celui du béton témoin, cela confirme l'effet positif de la poudre de verre sur l'ouvrabilité des bétons ordinaires. Comme déjà évoquée et étudiée par Ali A Aliabdo et al [2]

En ce qui concerne le béton BPV3, l'affaissement est sorti du domaine très plastique vers le domaine des bétons fluides à cause de l'effet de la poudre de verre et l'augmentation du rapport E/C qui est passé de 0.41 à 0.48. Donc nous confirmons que la poudre de verre peut améliorer l'ouvrabilité. Sur ce point d'ouvrabilité, nous concluons que le mélange optimal est le BPV1, aussi le mélange BPV2 donne des résultats acceptables et les deux sont mieux que le béton témoin.

IV.1.1.2 Masse volumique

Sur la figure Fig. IV.2, il apparait le pic correspondant à la masse volumique du béton BPV2 c'est-à-dire que la compacité la plus élevée est donnée pour le béton BPV2, cela peut s'expliquer par l'amélioration de la granulométrie du mélange par la poudre de verre 0/125 qui a colmaté une partie des vides présents dans le béton. Le béton BPV3 présente la plus

basse masse volumique à cause de l'eau excédentaire et la consistance fluide de ce béton.

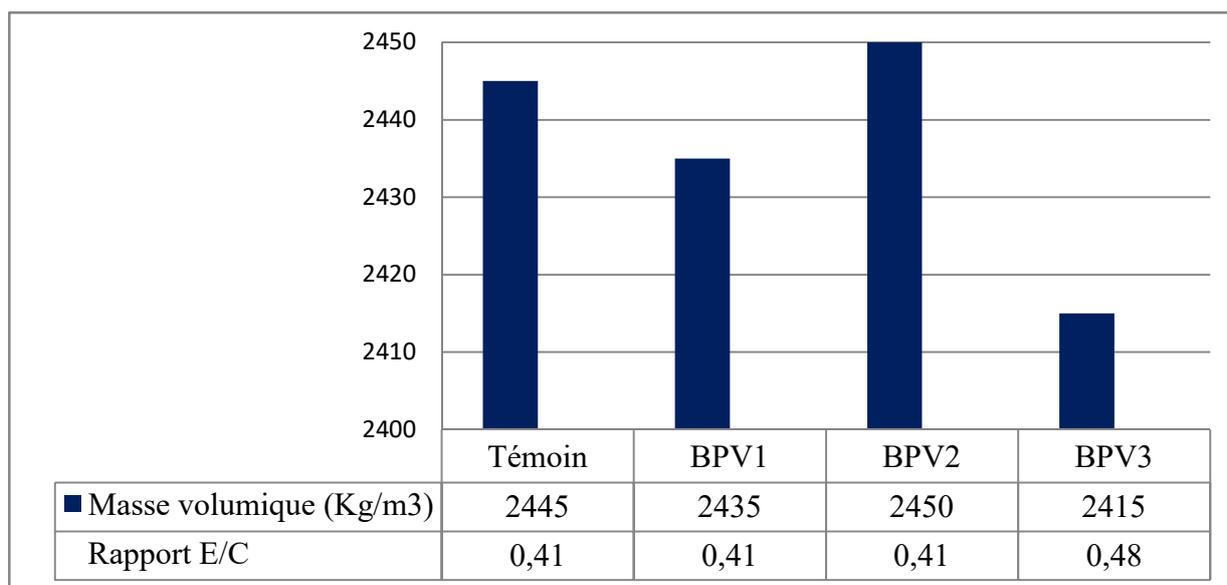


Figure IV 2: Effet de la poudre de verre sur la masse volumique à l'état frais.

IV.1.2 Caractérisation du béton à l'état durci

IV.1.2.1. Résistance à la compression

Tableau IV. 1 : Récapitulation des résistances des bétons sur cubes 15*15 à 7 jours.

Désignation des bétons	N°	Date de coulage	Date d'essai	Poids (Kg)	Résistance RC		rapport Rc/Rc0
					Charge (KN)	Rc (Mpa)	
Témoin	1	10/05/2017	17/05/2017	8,23	1247,80	55,50	100,0%
	2	10/05/2017	17/05/2017	8,24	1209,40	53,80	
	3	10/05/2017	17/05/2017	8,19	1172,30	52,10	
	Moyenne			8,22	1209,83	53,80	
BPV3	11	14/05/2017	21/05/2017	8,08	942,80	41,90	78,6%
	12	14/05/2017	21/05/2017	8,04	970,20	43,10	
	13	14/05/2017	21/05/2017	8,09	940,50	41,80	
	Moyenne			8,07	951,17	42,30	
BPV2	21	15/05/2017	22/05/2017	8,25	1046,30	46,50	86,8%
	22	15/05/2017	22/05/2017	8,23	1047,50	46,60	
	23	15/05/2017	22/05/2017	8,20	1071,90	47,00	
	Moyenne			8,23	1055,23	46,70	
BPV1	32	16/05/2017	23/05/2017	8,16	1010,30	44,90	86,1%
	33	16/05/2017	23/05/2017	8,19	1071,90	47,60	
	Moyenne			8,18	1041,10	46,30	

Tableau IV. 2: Récapitulation des résistances des bétons sur cubes 15*15 à 14 jours.

Désignation des bétons	N°	Date de coulage	Date d'essai	Poids (Kg)	Résistance RC		rapport Rc/Rc0
					Charge (KN)	Rc (Mpa)	
Témoin	4	10/05/2017	24/05/2017	8,19	1318,70	58,60	100,0%
	5	10/05/2017	24/05/2017	8,22	1301,20	57,80	
	Moyenne			8,21	1309,95	58,20	
BPV3	14	14/05/2017	28/05/2017	8,06	1037,50	46,10	78,7%
	15	14/05/2017	28/05/2017	8,04	1024,20	45,50	
	Moyenne			8,05	1030,85	45,80	
BPV2	24	15/05/2017	29/05/2017	8,20	1134,00	50,40	87,5%
	25	16/05/2017	30/05/2017	8,22	1156,50	51,40	
	Moyenne			8,21	1145,25	50,90	
BPV1	31	16/05/2017	30/05/2017	8,13	1127,30	50,10	86,8%
	34	16/05/2017	30/05/2017	8,15	1145,30	50,90	
	Moyenne			8,14	1136,30	50,50	

Tableau IV. 3: (a) Récapitulation des résistances des bétons sur cubes 15*15 à 28 jours.

Désignation des bétons	N°	Date de coulage	Date d'essai	Poids (Kg)	Résistance RC		rapport Rc/Rc0
					Charge (KN)	Rc (Mpa)	
Témoin	6	10/05/2017	07/06/2017	8,20	1389,90	61,80	100,0%
	9	10/05/2017	07/06/2017	8,20	1394,20	62,00	
	Moyenne			8,20	1392,05	61,90	
BPV3	16	14/05/2017	11/06/2017	8,09	1143,00	50,80	80,6%
	19	14/05/2017	11/06/2017	8,00	1102,40	49,00	
	Moyenne			8,05	1122,70	49,90	
BPV2	26	15/05/2017	12/06/2017	8,19	1233,00	54,80	88,4%
	29	15/05/2017	12/06/2017	8,23	1228,50	54,60	
	Moyenne			8,21	1230,75	54,70	
BPV1	35	16/05/2017	13/06/2017	8,11	1212,50	53,90	87,6%
	36	16/05/2017	13/06/2017	8,17	1226,20	54,50	
	Moyenne			8,14	1219,35	54,20	

Tableau IV. 3 : (b) Récapitulation des résistances des bétons sur cylindres 16*32 à 28 jours.

Designation des bétons	N°	Date de coulage	Date d'essai	Poids (Kg)	Résistance RC		rapport Rc/Rc0
					Charge (KN)	Rc (Mpa)	
Témoin	1	10/05/2017	07/06/2017	15,650	1012,10	50,30	100,0%
	2	10/05/2017	07/06/2017	15,620	979,20	48,70	
	Moyenne			15,64	995,65	49,50	
BPV3	11	14/05/2017	11/06/2017	15,330	859,20	42,70	83,6%
	12	14/05/2017	11/06/2017	15,350	805,30	40,10	
	Moyenne			15,34	832,25	41,40	
BPV2	21	15/05/2017	12/06/2017	15,660	929,80	46,20	90,3%
	22	15/05/2017	12/06/2017	15,650	868,70	43,20	
	Moyenne			15,66	899,25	44,70	
BPV1	31	16/05/2017	13/06/2017	15,520	875,90	43,60	89,7%
	32	16/05/2017	13/06/2017	15,540	908,30	45,20	
	Moyenne			15,53	892,10	44,40	

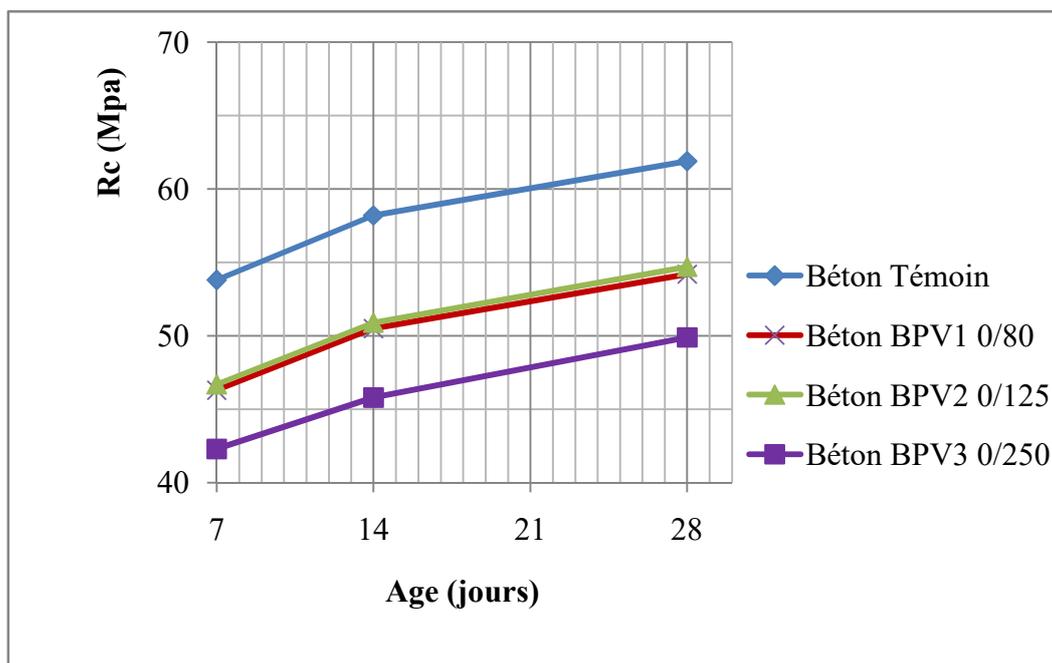


Figure IV 3: Résistance à la compression sur cubes 15*15 en fonction de l'âge des bétons.

A partir des tableaux IV.3(a) et (b), nous pouvons déduire le rapport de la résistance à la compression sur cylindre et sur cube, elle est de 0.80, 0.82, 0.82 et 0.83 respectivement pour les bétons témoin, BPV1, BPV2 et BPV3. Cela confirme que la formule de corrélation reste

valable pour les bétons à poudre de verre, le coefficient de corrélation peut être considéré de 0.82 pour l'ensemble des bétons étudiés.

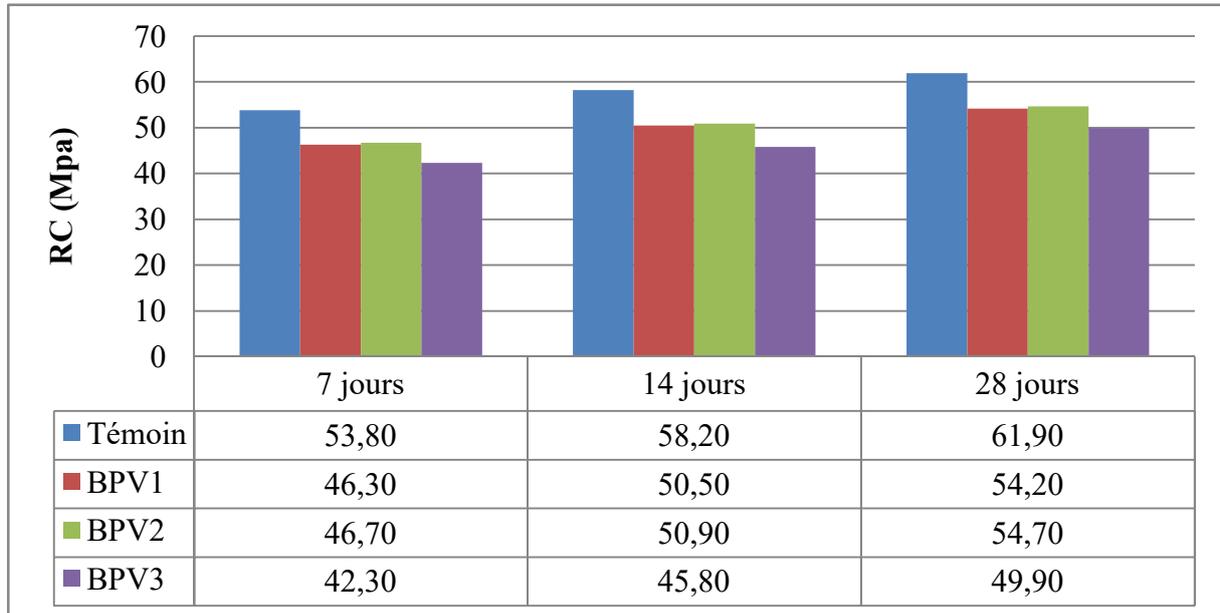


Figure IV 4: Effet de la poudre de verre sur l'évolution de la résistance à la compression.

Les résultats des essais de compression sont récapitulés sur les histogrammes Figure .IV.4 et la figure.IV.5 , nous constatons une convergence des résistances des béton BPV1 et BPV2 vers la résistance du béton témoin ou le rapport est passé de 86% à 88% respectivement pour les âges de 7 et 28 jours. Le béton BPV3 reste en retard par rapport au béton témoin à cause de rapport E/C élevé, néanmoins la progression de sa valeur Rc est relativement bonne puisqu'elle passe de 42 à 50 MPa respectivement pour les âges de 7 et 28 jours.

IV.1.2.2. Masse volumique à l'état durcis

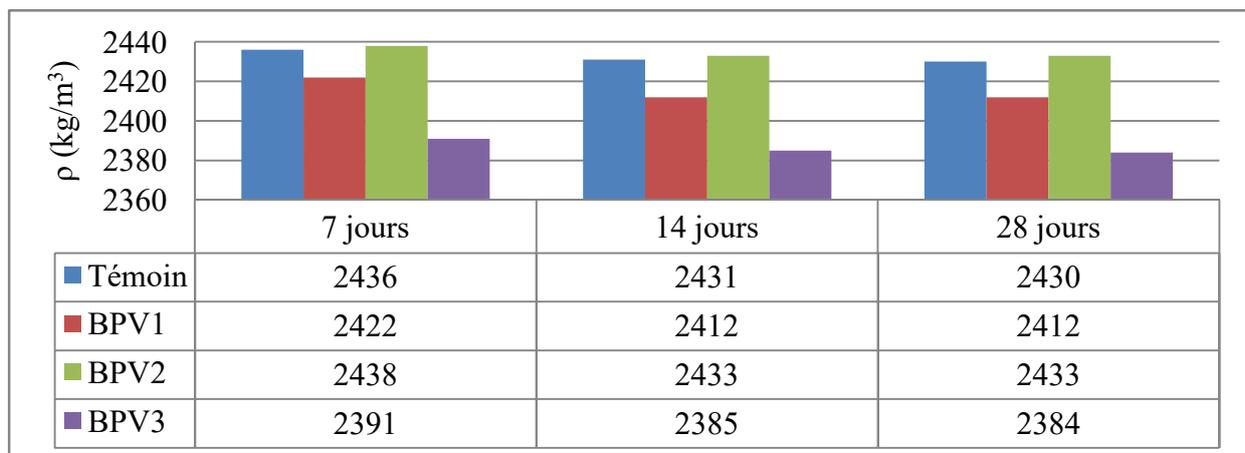


Figure IV 5: Effet de la poudre de verre sur la masse volumique à l'état durci.

Les résultats des mesures de la masse volumique montrent que le béton BPV2 est le béton optimal recherché. Sa masse est la plus élevée.

Les variations de masse entre 7 et 28 jours sont -6, -10, -5 et -7 Kg/m³ respectivement pour les bétons témoin, BPV1, BPV2 et BPV3, ces valeurs sont toutes proches, mis à part la variation de masse du béton BPV1 qui est plus importante que les autres, nous pouvons interpréter cela par la présence d'un excès de fines de la fraction 0/80µm.

IV.1.2.3. Contrôle de l'évolution contrainte-déformation

Dans le programme principal, le chargement axial des spécimens a été effectué à l'aide d'une presse hydraulique de capacité 3000 KN reliée à un système d'acquisition automatique de données de type 3R_Quantium. L'acquisition et le pilotage sont gérés par un PC muni d'un logiciel de mesure.

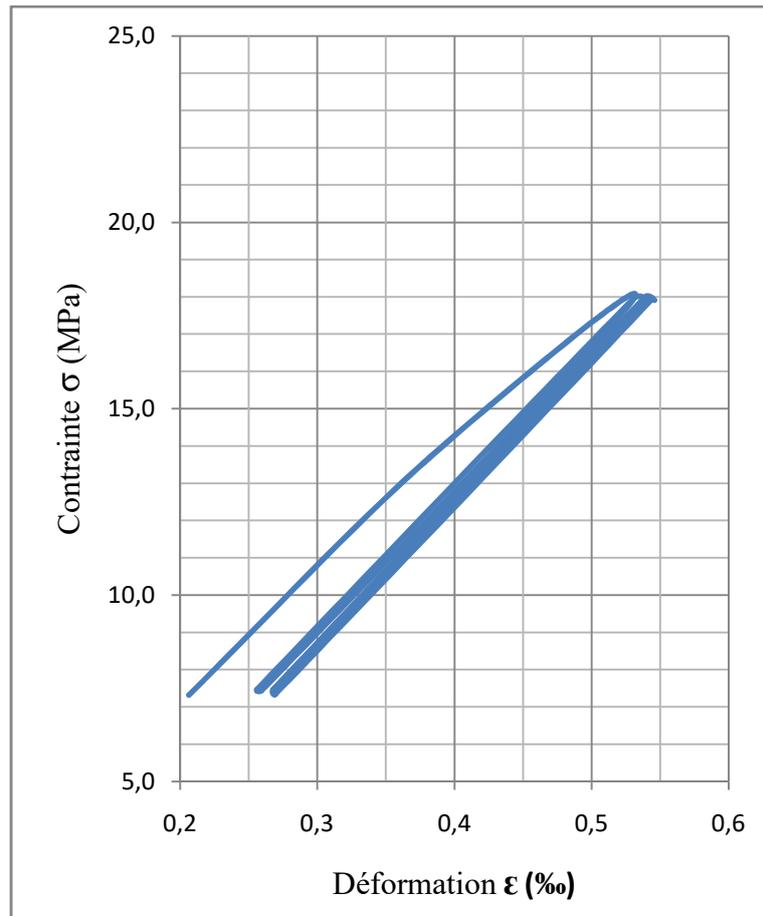
La vitesse de chargement était constante et elle a été ajustée afin que la presse exerce une pression moyenne de 0,60 MPa/seconde pendant tout le chargement

La contrainte et les déplacements sont mesurés tous les 0,20secondes et les lectures sont transmises au système d'acquisition automatique des données.

Nous avons calculé le module d'élasticité E à partir de la contrainte inférieure (σ_{min}) précédant le 3e cycle et de la contrainte supérieure (σ_{max}) du 3e cycle, ainsi que des différences de déformations correspondantes (ϵ_{max} , ϵ_{min} : déformations correspondant aux contraintes σ_{max} , σ_{min}):

$$E = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{\epsilon_{max} - \epsilon_{min}}$$

Un exemple de calcul relatif au béton BPV1, les valeurs principales des contraintes et déformations ainsi que le graphe correspondant sont représentés ci-après : le tableau IV.5 et les figures .IV.6a et b.



(a) Courbe contraintes déformation



(b) Courbe contraintes déformation

Figure IV 6: (a) et (b) Courbe contrainte-déformation tracée sous Excel et celledonnée par le logiciel.

Tableau IV. 4: Exemple de calcul du module d'élasticité à 28 jours.

Base de mesure extensomètre (mm) = 140

Cycle	$\Delta L(\mu m)$	$\varepsilon\% = 1000 * \Delta L / L$	σ (MPa)	E (GPa)
1er	28,897	0,206	7,324	37,634
	52,944	0,378	13,561	
	74,192	0,530	17,904	
	36,315	0,259	7,443	
	36,315	0,259	7,443	
	35,857	0,256	7,462	
	74,382	0,531	17,970	
	75,367	0,538	17,895	
2ème	37,501	0,268	7,453	
	75,488	0,539	18,000	
	76,075	0,543	17,912	
	37,740	0,270	7,341	
3ème	37,494	0,268	7,448	
	75,823	0,542	17,982	
	76,413	0,546	17,910	

Les ΔL sont récupérés du fichier résultats de l'essai et la base de mesure de l'extensomètre figure sur l'appareil est de 140 mm.

Nous avons comparé les valeurs des modules d'élasticité déterminés par les essais entre eux pour voir la variation entre béton témoin et bétons à poudre de verre, ensuite nous les avons comparés avec ceux donnés par le [BAEL91] qui évalue par formule le module élastique en fonction de la résistance caractéristique du béton:

$$E_{cm} = 11000 \sqrt[3]{f_{ck}} \text{ , } E_{cm} \text{ et } f_{ck} : \text{ exprimés en MPa.}$$

Tableau IV. 5: les modules d'élasticité des bétons étudiés à 28 jours.

Désignation des bétons	Rc sur Cylindre (MPa)	E1 déterminé par essais (GPa)	E2 calculé par BAEL (GPa)	Rapport E1/E2
Témoin	49,50	39,840	40,389	0,99
BPV3	41,40	36,200	38,053	0,95
	0,84	0,91	0,94	
BPV2	44,70	38,361	39,039	0,98
	0,90	0,96	0,97	
BPV1	44,40	37,634	38,951	0,97
	0,90	0,94	0,96	

Ces résultats sont très proches et donnent des valeurs satisfaisantes par rapport à la valeur théorique donnée par le BAEL 91.

IV.1.2.4. Composition chimique de la poudre de verre verte analysé par la fluorescence X

Le tableau suivant résume la composition minéralogique de la poudre de verre utilisée dans ce travail.

Tableau IV. 6: Composition minéralogique de la poudre de verre verte analysé par la fluorescence X.

Elément et pourcentage massique (%)	
SiO ₂	73.89
Al ₂ O ₃	1.72
Fe ₂ O ₃	1.24
CaO	10.12
MgO	0.44
SO ₃	0.21
K ₂ O	0.25
Cr ₂ O ₃	0.12
Na ₂ O	7.05
TiO ₂	-
Perte au feu : 0.89	
Masse volumique = 3.53 g/cm ³	

D'après les résultats d'analyse, on note que la poudre de verre est riche en silice (73,89 %).

IV.1.2.5. Images de la microstructure sous microscope confocal à balayage laser

Des échantillons des bétons à poudre de verre de 14 jours d'âge ont été examinés sous le microscope confocal à balayage laser (CSLM). La pâte de ciment durcie en béton contient des pores capillaires, avec des tailles de l'échelle micrométrique. Nous remarquons sur les images 3D que les morphologies des échantillons avec le rapport E/C de 0,41, C'est-à-dire dans les bétons BPV1 et BPV2 sont plus épaisses que celle du BPV3 à poudre de verre 0/250 et E/C égal à 0.48.

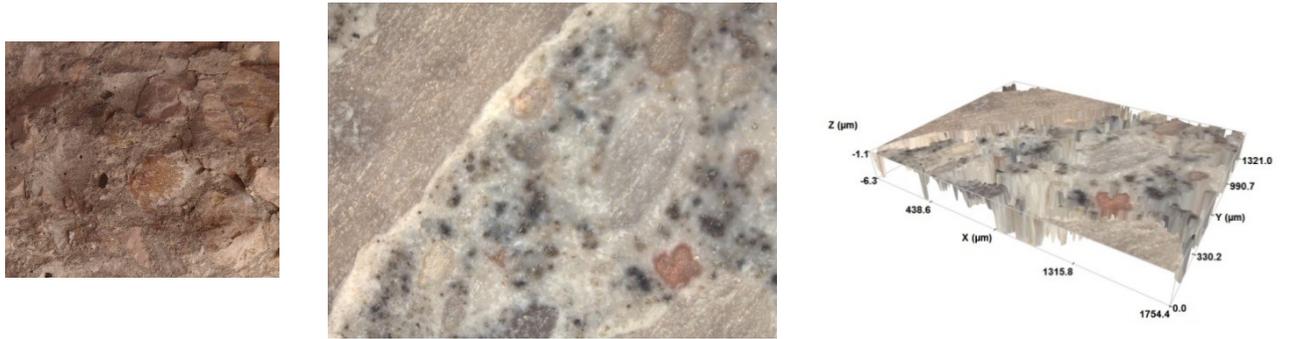


Figure IV 7: Images d'échantillons en 2D et 3D de béton BPV1 à poudre 0/80.



Figure IV 8: Images d'échantillons en 2D et 3D de béton BPV2 à poudre 0/125.

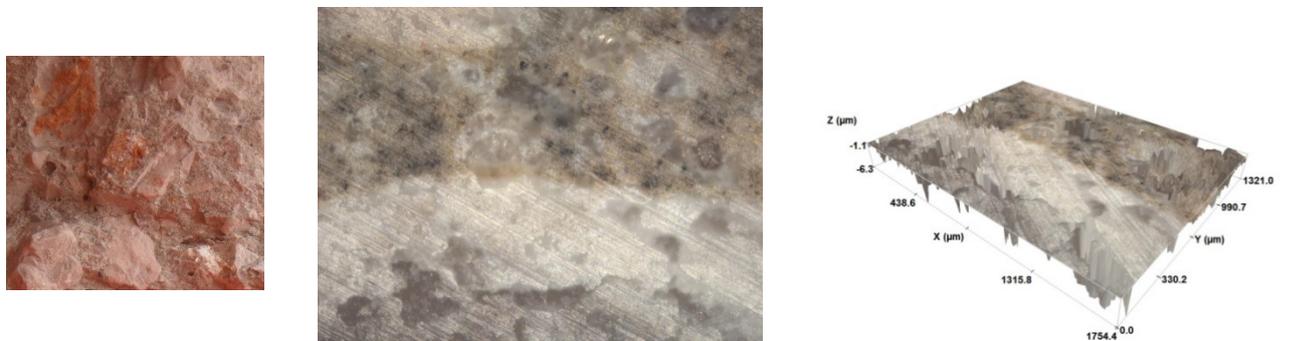
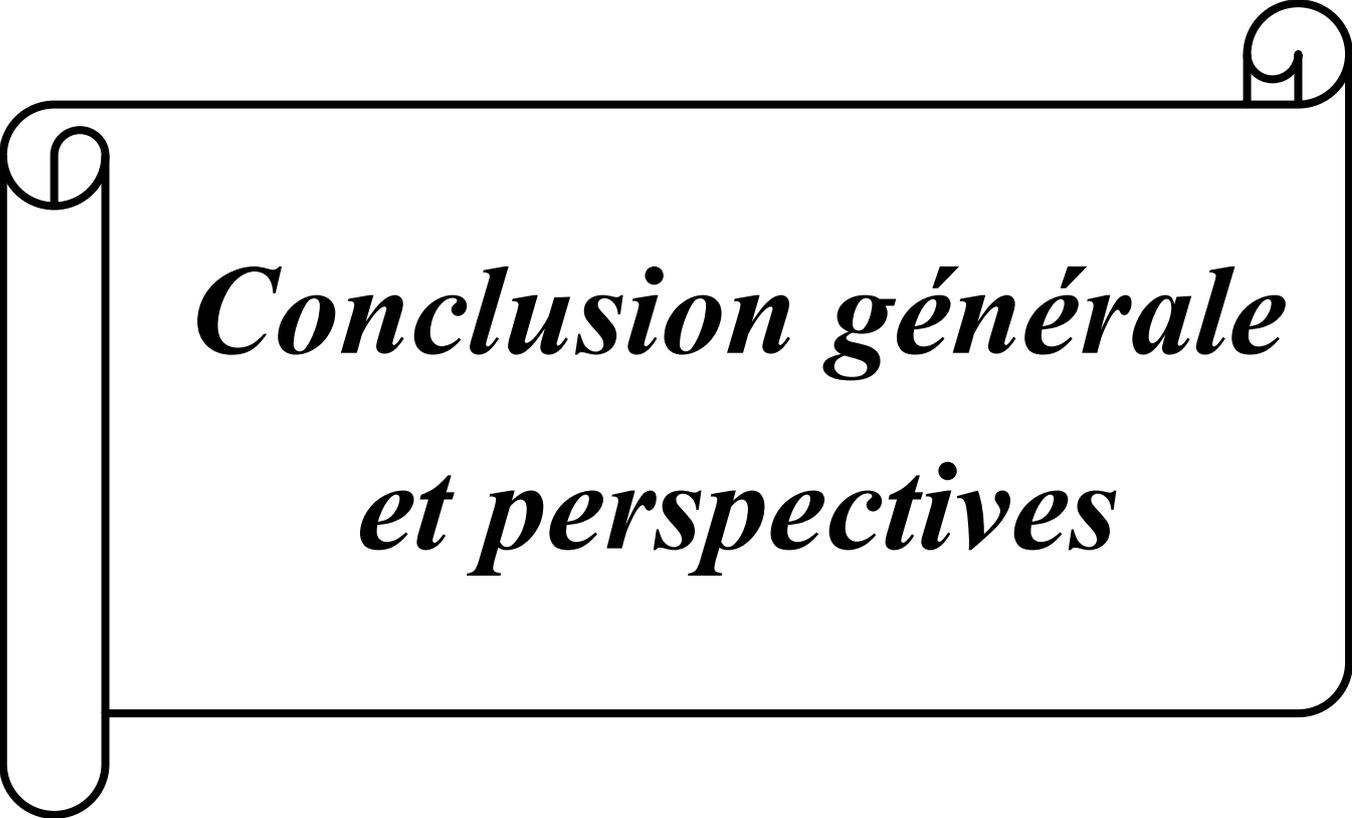


Figure IV 9: Images d'échantillons en 2D et 3D de béton BPV3 à poudre 0/250.



*Conclusion générale
et perspectives*

Conclusion générale

La nature non biodégradable des déchets de verre fait de ces déchets un défi pour tous les pays du monde entier en raison du manque d'espaces dans les décharges et de l'absence d'espaces pour de nouvelles décharges. Cependant, les industries du verre et du ciment ont d'énormes défis de nos jours : l'utilisation intensive des ressources naturelles de la terre comme matières premières, l'utilisation intensive de l'énergie et les émissions élevées de gaz à effet de serre qui sont responsables des changements climatiques.

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

- 1- L'utilisation des déchets de verre dans l'industrie de la construction peut offrir une solution respectueuse de l'environnement pour ces déchets et réduit les problèmes rencontrés avec les industries du verre et du ciment aussi.
- 2- Les résistances à la compression et par conséquent, les modules d'élasticité statiques des bétons confectionnés avec poudre de verre donnent des valeurs satisfaisantes qui progressent vers les performances de béton témoin au fur et à mesure que leurs âges avancent.
- 3- L'affaissement des bétons à poudre de verre est plus élevé que celui de béton témoin, la poudre de verre améliore l'ouvrabilité de béton et augmente sa plasticité.
- 4- Les masses volumiques des bétons à poudre de verre restent proches de celle de béton témoin, mis à part le béton à poudre de verre 0/125 μm qui offre une masse volumique légèrement élevée que celle de béton témoin.
- 5- La variante optimale de la poudre de verre, qui donne des résultats plus convaincants à tous les niveaux est celle où on utilise la granulométrie 0/125 μm .
- 6- En principe et compte tenu des performances des bétons à poudre de verre, l'utilisation de poudre de verre comme remplacement partiel du ciment peut réduire les coûts de revient la production de béton. Néanmoins une étude technico-économique exhaustive s'impose pour déterminer en détail les conséquences budgétaires.
- 7- La composition minéralogique de la poudre de verre, montre un taux intéressant de la silice (73,89 %), ce qui rend possible son utilisation dans plusieurs domaines, essentiellement dans l'industrie du verre, l'industrie des bétons et ciment.

Perspectives

Ce travail a permis d'effectuer une étude globale sur l'optimisation de la classe granulaire de la poudre de verre comme remplacement partiel du ciment à un taux constant de 15%. Cependant il a également soulevé certains points qu'il serait intéressant d'exploiter à l'avenir à savoir :

- 1- Une étude technico-économique est nécessaire pour estimer le gain budgétaire d'utilisation de la PV comme remplacement du ciment, la PV a une granulométrie de 0/125 μm et effectuée avec un taux de remplacement de 15%.
- 2- Les bétons formulés avec la poudre de verre ont montré que le rapport E/C est un paramètre déterminant pour la consistance du béton et les résistances en compression, à cet effet, une suggestion d'étudier l'influence de rapport E/C sur les paramètres physico-mécanique pourrait être explorée dans les prochains travaux.
- 3- Les déchets de verre des bouteilles que nous avons utilisé contiennent une quantité importante en alcalins de l'ordre de 7,50 %. A cet effet, nous recommandons de ne pas négliger l'effet de la réaction alcali-silice (RAS) avec une éventuelle réduction de la finesse en examinant la plage granulométrique de poudre de verre située entre 0/125 et 0/250 μm .
- 4- En ce qui concerne la microstructure, les prochains travaux porteront sur l'étude de la porosité des bétons à poudre de verre, étudier la géométrie 3D et la connectivité des pores capillaires et un éventuel développement de modèle pour la quantification de la connectivité des pores 3D.
- 5- Une étude sur l'utilisation de poudre de verre comme une source de correction de la matière première utilisé pour la fabrication de ciment, vu sa composition minéralogique qu'est riche en silice (73,89 %).

A decorative border resembling a scroll, with a thick black line forming a rectangular frame. The top-left and top-right corners are rolled up, and the left side has a vertical strip that also appears to be part of the scroll's edge.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] **Yahya Jani, William Hogland**, Waste glass in the production of cement and concrete – A review, *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2 (2014) 1767–1773.
- [2] **Ali A. Aliabdo, Abd Elmoaty M. Abd Elmoaty, Ahmed Y. Aboshama**, Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete, *Construction and Building Materials* 124 (2016). 867–875.
- [3] **R. Idir, M. Cyr, A. Tagnit-Hamou**, Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars, *Construction and Building Materials* 24 (2010) 1309–1312,
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.030>.
- [4] **A. Schmitz, J. Kami_nski, Scalet B. Maria, A. Soria**, Energy consumption and CO₂ emissions of the European glass industry, *Energy Policy* 39 (2011) 142–155,
<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2010.09.022>.
- [5] **G.W.McLellan, E.B.Shand**, *Glass Engineering Handbook*, McGraw-Hill, USA, 1984.
- [6] **K. Dan, L. Ward**, *The History of Glass*, Orbis, London, 1984.
- [7] **R.M. Knittle**, *Early American Glass*, The Century Co., USA, 1927.
- [8] *Le verre et ses applications*, Livre ISBN 978-3-033-04009-0, (2013) 15–36.
- [9] **D.E. Koranyi**, *Surface Properties of Silicate Glass*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1963.
- [10] **Mourad BAAZOUZI**, *Elaboration et caractérisation des verres d’oxydes à indice de réfraction complexe pour application dans l’optique non linéaire* Doctorat en sciences en : Physique Option : Sciences des Matériaux. Université Mohamed Khider – Biskra, Sciences de la Matière, (2014) 8–12.
- [11] **IB. Topçu, M. Canbaz**, Properties of concrete containing waste glass, *Cement and Concrete Research* 34 (2004) 267–274, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.07.003>.
- [12] **M. Saito, M. Shukuya**, Energy and material use in the production of insulating glass windows, *Solar Energy* 58 (1996) 247–252,
[http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X\(96\)00056-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X(96)00056-4).
- [13] **M. Ruth, P. Dell’Anno**, An industrial ecology of the US glass industry, *Resources Policy* 23 (1997) 109–124, [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4207\(97\)00020-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4207(97)00020-2).

Références bibliographiques

-
- [14] **N. Pardo, J.A. Moya, A. Mercier**, Prospective on the energy efficiency and CO₂ emissions in the EU cement industry, *Energy* 36 (2011) 3244–3254, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.016>.
- [15] **N.A. Madloul, R. Saidur, M.S. Hossain, N.A. Rahim**, A critical review on energy use and savings in the cement industries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 2042–2060, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.005>.
- [16] **L. Szabó, I. Hidalgo, J.C. Ciscar, A. Soria**, CO₂ emission trading within the European Union and Annex B countries: the cement industry case, *Energy Policy* 34 (2006) 72–87, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2004.06.003>.
- [17] **T. Zhang, P. Gao, P. Gao, J. Wei, Q. Yu**, Effectiveness of novel and traditional methods to incorporate industrial wastes in cementitious materials – an overview, *Resources, Conservation and Recycling* 74 (2013) 134–143, <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.03.003>.
- [18] **M.B. Ali, R. Saidur, M.S. Hossain**, A review on emission analysis in cement industries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 2252–2256, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.014>.
- [19] **A. Bosoaga, O. Masek, J.E. Oakey**, CO₂ capture technologies for cement industry, *Energy Procedia* 1 (2009) 133–140, <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.020>.
- [20] **H. Isa**, The need for waste management in the glass industries: a review, *Scientific Research and Essay* 3 (2008) 276–279.
- [21] **L.M. Federico, S.E. Chidiac**, Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete – critical review of treatment methods, *Cement and Concrete Composites* 31 (2009) 606–610, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.02.001>.
- [22] **H. Du, K.H. Tan**, Use of waste glass as sand in mortar. Part II. Alkali–silica reaction and mitigation methods, *Cement and Concrete Composites* 35 (2013) 118–126, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.029>.
- [23] State U., Environmental Protection Agency report, 2012, <http://www.epa.gov/epawaste/conserva/materials/glass.htm>

Références bibliographiques

- [24] **C. Ambell, A. Bjorklund, M. Soderman**, Potential för öÖkad Materialåtervinning av Hushållsavfall och Industrialavfall (Swedish), KTH report, Stockholm, ISSN 1652-5442, 2010.
- [25] **K.H. Tan, H. Du**, Use of waste glass as sand in mortar. Part I. Fresh, mechanical and durability properties, *Cement and Concrete Composites* 35 (2013) 109–117, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.028>.
- [26] **L.A. Pereira-de-Oliveira, J.P. Castro-Gomes, P.M.S. Santos**, The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components, *Construction and Building Materials* 31 (2012) 197–203, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.110>.
- [27] **M. Batayneh, I. Marie, I. Asi**, Use of selected waste materials in concrete mixes, *Waste Management (New York, N.Y.)* 27 (2007) 1870–1876, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2006.07.026>. 17084070.
- [28] **K.M. Lee, H.K. Lee, S.H. Lee, G.Y. Kim**, Autogeneous shrinkage of concrete containing granulated blast furnace slag, *Cement and Concrete Research* 7 (2006) 1279–1285.
- [29] **N. Farzadnia, Ali A.A. Abang, R. Demirboga, M.P. Anwar**, Effect of halloysite nanoclay on mechanical properties, thermal behavior and microstructure of cement mortars, *Cement and Concrete Research* 48 (2013) 97–104, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.03.005>.
- [30] **N. Lairaksa, A.R. Moon, N. Makul**, Utilization of cathode ray tube waste: encapsulation of PbO-containing funnel glass in Portland cement clinker, *Journal of Environmental Management* 117 (2013) 180–186, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.12.014.23376301>.
- [31] **S. Kou, C. Poon**, A novel polymer concrete made with recycled glass aggregates, fly ash and metakaolin, *Construction and Building Materials* 41 (2013) 146–151, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.083>.
- [32] **S. de Castro, J. de Brito**, Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates, *Journal of Cleaner Production* 41 (2013) 7–14, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.021>.
- [33] **R.G. Pike, D. Hubbard**, Physicochemical studies of the destructive alkali aggregate reaction in concrete, *Journal of Research of the National Bureau of Standards* 59 (2) (1957) 127–132, <http://dx.doi.org/10.6028/jres.059.013>.

- [34] **Y. Shao, T. Lefort, S. Moras, D. Rodriguez**, Studies on concrete containing ground waste glass, *Cement and Concrete Research* 30 (2000) 91–100, [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00213-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00213-6).
- [35] **R. Idir, M. Cyr, A. Tagnit-Hamou**, Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet, *Cement and Concrete Composites* 33 (2011) 19–29, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.09.013>.
- [36] **A. Shayan**, Value-added utilization of waste glass in concrete, IABSE Symposium, Melbourne, 2002, pp. 1–11.
- [37] **Z.Z. Ismail, E.A. Al-Hashmi**, Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete, *Waste Management (New York, N.Y.)* 29 (2009) 655–659, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2008.08.012>. 18848773.
- [38] **C.D. Johnston**, Waste glass as coarse aggregate for concrete, *Journal of Testing and Evaluation* 2 (5) (1974) 344–350, <http://dx.doi.org/10.1520/JTE10117J>.
- [39] **R. Takata, S. Sato, T. Nonaka, H. Ogata, K. Hattori**, Investigation on alkali-silica reaction utilizing waste glass in concrete and suppression effect by natural zeolite, 29th Conference on Our World in Concrete and Structures: 25–26 August, Singapore, 2004).
- [40] **V. Corinaldesi, G. Gnappi, G. Moriconi, A. Montenero**, Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars, *Waste Management (New York, N.Y.)* 25 (2005) 197–201, <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2004.12.009>. 15737718.
- [41] **W. Hogland**, Remediation of an old landfill site, *ESPR-Environmental Science and Pollution Research* 1 (2002) 49–54.
- [42] **S.B. Park, B.C. Lee, J.H. Kim**, Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate, *Cement and Concrete Research* 34 (2004) 2181–2189, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.006>.
- [43] **M. Mageswari, B. Vidivelli**, The use of sheet glass powder as fine aggregate replacement in concrete, *Open Civil Engineering Journal* 4 (2010) 65–71, <http://dx.doi.org/10.2174/1874149501004010065>.
- [44] **N. Degirmenci, A. Yilmaz, O. Cakir**, Utilization of waste glass as sand replacement in cement mortar, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences* 18 (2011) 303–308.

Références bibliographiques

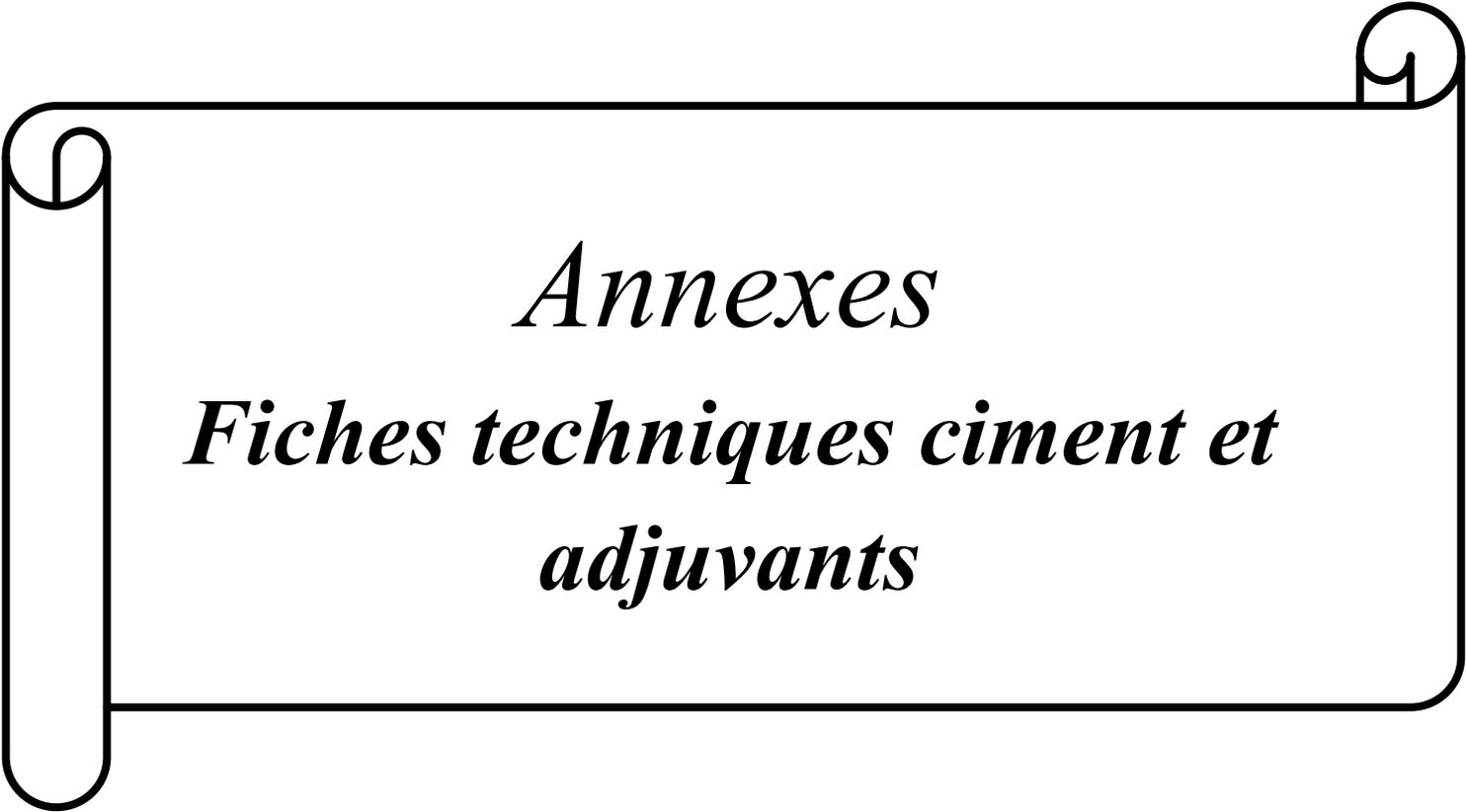
- [45] **K.H. Poutos, A.M. Alani, P.J. Walden, C.M. Sangha**, Relative temperature changes within concrete made with recycled glass aggregate, *Construction and Building Materials* 22 (2008) 557–565, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.11.018>.
- [46] **M.J. Terro**, Properties of concrete made with recycled crushed glass at elevated temperatures, *Building and Environment* 41 (2006) 633–639, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.02.018>.
- [47] **A. Khmiri, M. Chaabouni, B. Samet**, Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars, *Construction and Building Materials* 44 (2013) 74–80, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuild-mat.2013.02.040>.
- [48] **A. Khmiri, B. Samet, M. Chaabouni**, A cross mixture design to optimise the formulation of a ground waste glass blended cement, *Construction and Building Materials* 28 (2012) 680–686, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.032>.
- [49] **C. Shi, Y. Wu, C. Riefler, H. Wang**, Characteristic and pozzolanic reactivity of glass powders, *Cement and Concrete Research* 35 (2005) 987–993, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.015>.
- [50] **N. Schwarz, H. Cam, N. Neithalath**, Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash, *Cement and Concrete Composites* 30 (2008) 486–496, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemcon-comp.2008.02.001>.
- [51] **R. Nassar, P. Soroushian**, Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement, *Construction and Building Materials* 29 (2012) 368–377, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuild-mat.2011.10.061>.
- [52] **A.M. Matos, J. Sousa-Coutinho**, Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement, *Construction and Building Materials* 36 (2012) 205–215, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.027>.
- [53] **N. Kumarappan**, Partial replacement cement in concrete using waste glass, *Int.J. Eng. Res. Technol.* 2 (10) (2013). ESRSA Publications.
- [54] **J.M. Khatib, E.M. Negim, H.S. Sohl, N. Chileshe**, Glass powder utilization in concrete production, *Eur. J. Appl. Sci.* 4 (4) (2012) 173–176.
- [55] **S.M. Chikhalikar, S.N. Tande**, An experimental investigation on characteristics properties of fibre reinforced concrete containing waste glass powder as pozzolona, in: 37th Conference on Our World in Concrete and Structures, Singapore, 2012.

Références bibliographiques

- [56] **R. Vandhiyan, K. Ramkumar, R. Ramya**, Experimental study on replacement of cement by glass powder, *Int. J. Eng. Res. Technol.* 2 (5) (2013). ESRSA Publications.
- [57] **J.S. Dali, S.N. Tande**, Performance of concrete containing mineral admixtures subjected to high temperature, in: 37th Conference on Our World in Concrete and Structures, Singapore, August, 2012.
- [58] **D.M. Patil, K.K. Sangle**, Experimental investigation of waste glass powder as partial replacement of cement in concrete, *Int. J. Adv. Technol. Civ. Eng.* 2 (1) (2013).
- [59] **G. Vasudevan, S.G.K. Pillay**, Performance of using waste glass powder in concrete as replacement of cement, *Am. J. Eng. Res.* 2 (12) (2013) 175–181.
- [60] **G. Vijayakumar, H. Vishaliny, D. Govindarajulu**, Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass powder as a partial replacement of cement in concrete, *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.* 3 (2)
- [61] **M.N. Bajad, C.D. Modhera, A.K. Desai**, Effect of glass on strength of concrete subjected to sulphate attack, *Int. J. Civ. Eng. Res. Dev.* 1 (2) (2011) 01–13.
- [62] **S. Diamond**, A review of alkali–silica reaction and expansion mechanisms. 1. Alkalies in cements and in concrete pore solutions, *Cement and Concrete Research* 5 (1975) 329–345, [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(75\)90089-7](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(75)90089-7).
- [63] **M.R. Farshad, M. Hamed**, E.F. Gregor, Investigating the alkali–silica reaction of recycled glass aggregates in concrete materials, *Journal of Materials in Civil Engineering* (2010) 1201–1208.
- [64] **T.H. Panzera, P.H.R. Borges, A.L.R. Sabariz, F.P. Cota**, Recycled glass as potential aggregate for concrete tiles: a statistical analysis of the physical and engineering properties, *International Journal of Environment and Waste Management* 12 (2013) 280–299, <http://dx.doi.org/10.1504/IJEW.2013.056196>.
- [65] **D. Serpa, Silva A. Santos, J. de Brito, J. Pontes, D. Soares**, ASR of mortars containing glass, *Construction and Building Materials* 47 (2013) 489–495, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.058>.
- [66] **A. Shayan, A. Xu**, Value-added utilisation of waste glass in concrete, *Cement and Concrete Research* 34 (2004) 81–89, [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00251-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00251-5).

Références bibliographiques

- [67] **A. Shayan, A. Xu**, Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: a field trial on concrete slabs, *Cement and Concrete Research* 36 (2006) 457–468, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.012>.
- [68] **B. Taha, G. Nounu**, Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement, *Construction and Building Materials* 22 (2008) 713–720, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.019>.
- [69] **Z. Xie, Y. Xi**, Use of recycled glass as a raw material in the manufacture of Portland cement, *Materials and Structures* 35 (2002) 510–515, <http://dx.doi.org/10.1007/BF02483139>.
- [70] **G. Chen, H. Lee, K.L. Young, P.L. Yue, A. Wong, T. Tao, K.K. Choi**, Glass recycling in cement production—an innovative approach, *Waste Management (New York, N.Y.)* 22 (2002) 747–753, [http://dx.doi.org/10.1016/S0956-053X\(02\)00047-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0956-053X(02)00047-8).12365777.
- [71] **Norme NF EN 206-1**

A decorative border resembling a scroll, with a thick black line forming a rectangular frame. The top-left and top-right corners are rolled up, and the bottom-left corner is also rolled up, creating a scroll-like effect.

Annexes

*Fiches techniques ciment et
adjuvants*

TECHNIQUE
v03

Analyses et caractérisation

Analyses chimiques

Perte au feu (%), (NA 5042):	7,50 - 12,00
Résidus insolubles (%), (NA 5042):	0,7 - 2,00
Teneur en sulfates SO ₃ (%), (NA 5042):	2,00 - 2,70
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%):	1,00 - 2,20
Teneur en chlorures (%), (NA 5042):	0,01 - 0,05
Teneur équivalent en alcalis (%):	0,3 - 0,75

Composition hypothétique du clinker (Bogue)

Silicates tricalciques C ₃ S (%):	58 - 64
Silicates bicalciques C ₂ S (%):	12 - 18
Aluminates tricalciques C ₃ A (%):	6,00 - 8,00
Aluminoferrites tétracalciques C ₄ AF (%):	10,00 - 12,00

Propriétés physiques

Consistance normale de la pâte de ciment (%):	25 - 28,50
Finesse suivant la méthode de Blaine (NA 231):	4150 - 5250
Retrait à 28 jours en µm/m	<1 000
Expansion en mm	0,3 - 2,5

Temps de prise à 20°C (NA 230)

Début de prise (min)	140 - 195
Fin de prise (min)	195 - 290

Résistance à la compression (NA 234)

02 jours (MPa)	≥ 10,0
28 jours (MPa)	≥ 42,5

MATINE
Ciment pour béton exigeant
CEM II/B 42,5 N NA 442



Algerian Cement Company (SPA)

Hammam: Daria, Algérie (ACO)
Tel: +213 35 50 78 00
Fax: +213 35 55 70 36

Direction générale

31 Rue des Pins, Algérie
Tel: +213 01 21 48 18 52
Fax: +213 01 21 48 16 77

Ciment Blanc Algérie (SPA)

Zone Oujda (MBA)
BP 67, 29450, NBS, Alg.
Tel: Fax: +213 01 45 54 85 02

LAFARGE
لوفارج

FICHE TECHNIQUE

Réf : DC/FT MT. v03

MATINE est un ciment gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle (clinkérisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile.

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO₂) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al₂O₃) et le fer (Fe₂O₃), ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500°C. En présence d'eau a lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant (propriété hydraulique) constitué principalement de micro-cristaux de silicates de calcium hydratés.

MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conformes à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301/94.

Domaine d'utilisation :

MATINE est utilisé pour tous les projets de construction qui nécessitent de hautes résistances mécaniques mais qui ne présentent pas un besoin spécifique en bétons exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau, ainsi que dans les ouvrages dans lesquels le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment.

Les principales applications de ce ciment sont :

- Secteur habitat (logements et d'autres constructions civiles) ;
- Secteur travaux publics (tunnels, ponts, port, aéroport .etc.) ;
- Secteur hydraulique (barrages, châteaux d'eau, stations d'épuration, stations de dessalement, .etc.) ;
- Secteur industriel.

MATINE
Ciment pour béton exigeant
CEM II/B 42,5 N NA 442



Algerian Cement Company (SPA) Direction générale

Hamriyam - Oulfa - Algérie (ALCO)
Tel : +213 20 56 78 20
Fax : +213 20 56 78 20

11 Rue des Miniers - Algérie - Algérie
Tel : +213 21 48 16 65
Fax : +213 21 48 16 7

Ciment Blanc Algérie (SPA)

Zone Oujda 11988
BP 67 - 29100, Mascara
Tel : Fax : +213 26 21 84 25 24

LAFARGE
لافارج



The Chemical Company

RHEOBUILD® 850

Superplastifiant, haut réducteur d'eau pour béton rhéoplastique.

Description

Le RHEOBUILD® 850 est un adjuvant liquide prêt-à-emploi à base de polymères syndiotiques spécialement formulés pour conférer au béton des propriétés rhéoplastiques.

Un béton rhéoplastique est un béton fluide présentant à l'essai du cône d'Abrams un affaissement d'au moins 200mm ; il s'écoule facilement sans ségrégation et possède un rapport Eau/Ciment similaire à celui d'un béton ayant un faible affaissement au cône (20mm) sans adjuvant. Le RHEOBUILD® 850 est exempt de chlorure.

Avantages

Le RHEOBUILD® 850 améliore considérablement les propriétés du béton à l'état frais et à l'état durci.

Domaines d'application

Le RHEOBUILD® 850 est formulé pour une utilisation dans tout type de béton et notamment :

- Béton à base de micro-silice.
- Béton de masse.
- Béton prêt à l'emploi.
- Béton transporté sur de longues distances.
- Béton pompé.
- Béton mis en œuvre par temps chaud.

Propriétés

Le RHEOBUILD® 850 permet au béton d'obtenir :

- Une réduction des pointes thermiques.
- Le maintien de la maniabilité pendant de longues périodes.
- Une diminution de la pression de pompage.
- Un retard de prise accompagné d'un long maintien d'ouvrabilité.
- Des résistances élevées à la rupture.
- Une augmentation de la durabilité.
- Une diminution de la perméabilité.

Compatibilité

Le RHEOBUILD® 850 est compatible avec tous les types de ciment et la plupart des adjuvants entraîneurs d'air répondant aux normes ASTM.

La combinaison du RHEOBUILD® 850 avec le MCHOLAIR® 111 (adjuvant entraîneur d'air) est recommandée dans le cas où le béton devrait résister à des cycles de gel/dégel.

Conditionnement

Le RHEOBUILD® 850 est disponible en cuvettes de 1000 litres ou 10 de 210 litres ou en vrac.

Caractéristiques*

Couleur	Brun
Densité	1,210 à +25°C
Teneur en chlorure (à 50°C par l)	Nulle
Point de congélation	0°C
Point éclair	Non concerné

Normes

Le RHEOBUILD® 850 est conforme à ASTM C-494 type A, B, D, F et G.

Dosage

Le dosage optimal du RHEOBUILD® 850 devra être déterminé par des essais de préliminaires.

À titre indicatif, les dosages suivants sont recommandés comme point de départ pour tout essai : Pour un béton normal, le dosage est de 0,8 à 2% du poids de ciment. Dans un béton à haute performance à base de micro-silice le dosage est compris entre 1,5 et 3%.

Suivant les conditions de mise en œuvre, il est possible d'employer un dosage plus élevé de RHEOBUILD® 850 sans aucun effet indésirable pour le béton.

Veuillez consulter le service technique de BASF pour de plus amples informations.

