

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Ecole Nationale Polytechnique

Département Génie Civil



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Projet de fin d'études
en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur
d'Etat en Génie Civil

Intitulé

Etude des bétons à la poudre de verre

Proposé et dirigé par:

Pr.A.BALI

Présenté par:

LEGHREIB Mekki Nour El Islam

TAMAoust Aissam

Promotion 2015

ENP : 10, avenue Hacene Badi, El Harrach, Alger

Résumé

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Cependant, la production de ciment portland, constituant essentiel du béton, conduit à la libération d'une quantité importante de CO₂ (gaz à effet de serre); la production d'une tonne de ciment portland à base de clinker et synonyme environ d'une tonne de CO₂ et autres gaz à effet de serres (GES). Les impacts environnementaux jouent un rôle important dans le développement durable de l'industrie du ciment et du béton, d'où la nécessité de remplacer une partie du ciment par un matériau pouzzolanique afin de réduire la pollution causée par l'industrie cimentaire est devenue une priorité. Lorsque les déchets de verre sont broyés et transformés en poudre très fine, ils montrent certaines propriétés pouzzolaniques en raison de leur teneur en silice. Par conséquent, la poudre de verre dans une certaine mesure peut remplacer le ciment et contribue au développement de la résistance du béton. Ce travail examine la possibilité d'utiliser la poudre de verre comme un remplacement partiel du ciment avec des taux de substitution de l'ordre de 20% et 30%, pour différents rapports E/L. Nous avons exploité les résultats bruts des tests de compression élaborés par Ablam Zidol (Université de Sherbrooke), et nous avons même reproduit une des compositions au sein de l'ENP, les résultats obtenus ont montré que les bétons avec poudre de verre ont de très bonnes résistances à la compression notamment pour une substitution de 20 % de ciment par la poudre de verre.

Mots clés :

Béton , ciment , ajout cimentaire , poudre de verre , réaction pouzzolanique, résistance à la compression.

Abstract

Concrete is the most construction's material used in the world. However, the production of portland cement, an essential constituent of the concrete, leads to the release of a large amount of CO₂ (greenhouse gas); the production of one ton of Portland clinker cement is equal approximately to one ton of CO₂ and other greenhouse gases (GHGs). Environmental impacts play an important role in sustainable development of the cement and concrete industry; hence the need to replace part of cement by pozzolanic material to reduce pollution caused by the cement industry is becoming a priority. When glass wastes are finely ground into powder, they showed some pozzolanic properties because of their silica content. Therefore, the glass powder to some extent can replace the cement and contributes to strength development of concrete. This work examines the possibility of using glass powder as a partial replacement of cement with substitution rates of around 20% and 30%, for different W / B. We have analyzed the raw results of the compression tests developed by Ablam Zidol (Sherbrooke University), and we even reproduced a composition in ENP laboratory, the results showed that concrete with glass powder has very good compressive strengths particularly for 20% of cement's substitution by the glass powder.

Keywords: Concrete, Cement, Cementitious additives, glass powder, pozzolanic reaction,, compressive strength

ملخص

تعتبر الخرسانة المادة الأكثر استخداماً للبناء في العالم، ومع ذلك، يؤدي إنتاج الإسمنت البورتلاندي، أحد المكونات الرئيسية للخرسانة، إلى تحرير كميات كبيرة من غاز الـ CO₂. إن إنتاج طن واحد من إسمنت الكلنكر البورتلاندي يعادل بالتقريب تحرير طن كامل من غاز الـ CO₂ و غازات دفيئة أخرى. تلعب التأثيرات البيئية دوراً هاماً في التنمية المستدامة لصناعة الإسمنت و الخرسانة، ولهذا فإن إستبدال جزء من الإسمنت بمادة ذات خصائص بوزولانية أصبح أولوية ضرورية لتقليل التلوث الناجم عن صناعة الإسمنت. عند القيام بطحن نفايات الزجاج إلى غايه تحولها إلى مسحوق دقيق جداً فإنها تظهر خصائص بوزولانية نظراً لكمية السيليكا الموجودة فيها، و نتيجة لذلك، و وفق شروط معينة، فإنه بإمكان مسحوق الزجاج تعويض جزء من الإسمنت و المساهمة في تحسين مقاومة الخرسانة. يقوم هذا العمل بدراسة إمكانية إستعمال مسحوق الزجاج كبديل جزئي للإسمنت بمعدلات إستبدال 20 % و 30 % وذلك لمختلف نسب م/ر (E/L). قمنا بإستغلال النتائج الأولية لإخ بتارات الضغط المنجزة من طرف السيد أبلام زيدول Ablam Zidol (جامعة شيربروك) و حاولنا أيضاً إعادة إحدى تركيبات الخرسانة في المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات. أظهرت النتائج المتحصل عليها أن الخرسانات التي أستعمل فيها مسحوق الزجاج لها مقاومة جيدة للضغط خاصة التي أستبدلت فيها نسبة 20 % من الإسمنت بمسحوق الزجاج.

كلمات مفتاحية:

خرسانة، إسمنت، إضافة إسمنتية، مسحوق الزجاج، تفاعل بوزولاني، مقاومة الضغط

Remerciements

Tout d'abord nous tenons à remercier Dieu tout puissant de nous avoir donné le courage, la force et la patience d'achever ce modeste travail.

Nous tenons à remercier particulièrement notre encadreur monsieur Abderrahim BALI professeur à l'ENP, pour l'honneur qu'il nous a fait d'encadrer ce travail, pour ses grandes qualités pédagogiques, pour sa rigueur scientifique, pour l'aide précieuse et l'intérêt constant qu'il a bien voulu montrer pour mener à bien ce travail.

Nous remercions monsieur Malek OULD-HAMOU, chef de département du génie minier de nous avoir accueillis et permis de réaliser une partie de notre travail dans le laboratoire du génie minier, nous remercions aussi monsieur Mustapha MEZIANI et madame Rachida IBDOUHAN pour leur assistance au laboratoire.

Nous tenons également à remercier tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation et d'une façon distinguée Pr. Ratiba KETTAB pour son aide et ses conseils très précieux.

Nous ne saurions tourner cette page sans adresser nos affectueux remerciements à tous nos amis qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.



DÉDICACES

*En témoignage de ma reconnaissance infinie pour toute la sollicitude dont ils m'ont faite preuve durant toutes ces années d'études, de mon affection pour toute la patience et pour tous les nombreux sacrifices qu'ils n'ont cessés de me consentir ; que mes chers parents trouvent dans ce travail l'expression de mon profond amour et gratitude,
JE VOUS AIME.*

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail à :

- + mon frère Chafik que j'aime énormément, à ma belle Sœur, et mes petites nièces, mes amours Lilia et Yasmine que Dieu les protège.*
- + ma tante Isma et son époux Nacer , ainsi que mes cousins Salah Eddine et Radia.*
- + la mémoire de mon cousin Youcef , que Dieu incha'allah l'accueille de son vaste paradis.*
- + à mon binôme Issam à qui je souhaite tout le succès et le bonheur incha'allah.*

Je termine par une dédicace très spéciale à toute ma promo GC 2015, ainsi que tous mes amis à l'ENP, mes amis du CAP et mes coéquipiers d'EL BAHDJA Handball.









LEGHREIB Mekki Nour El Islam



DÉDICACES

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail à :

-  *Mon Père et ma Mère qui ont beaucoup sacrifié à mon bonheur.*
-  *Mes deux frères Ramzi et Abd-Erahim.*
-  *Ma sœur Loubna.*
-  *Toute la famille TAMAOUST.*
-  *Tous mes amis de prêt ou de loin*
-  *à mon binôme Mekki à qui je souhaite tout le succès et le bonheur inchalah*

*Je termine par une dédicace très spéciale à toute ma promo GC 2015,
ainsi que tous mes amis à l'ENP.*



Aissam TAMAOUST

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Matériaux cimentaires classiques	3
1.1. Introduction	3
1.2. Le ciment portland.....	4
1.3. Les granulats.....	6
1.3.1. Forme de Particule et Texture.....	6
1.3.2. La porosité	7
1.3.3. La nature minéralogique	7
1.4. Eau de gâchage	7
1.5. Les Adjuvants	7
1.5.1. Définition	7
1.5.2. Fonctions des adjuvants	8
1.5.3. Classification des adjuvants (selon F. Massazza).....	9
1.5.4. Adjuvants courants.....	10
1.6. Les ajouts cimentaires	12
1.6.1. Rôle de l'ajout cimentaire.....	12
1.6.2. Classification des ajouts minéraux.....	14
1.6.3. Principaux ajouts minéraux inertes.....	14
1.6.4. Les ajouts minéraux actifs	14
1.7. Conclusion.....	22
Chapitre 2 : Matériau cimentaire alternatif : la poudre de verre	23
2.1. Introduction	23
2.2. Propriétés des déchets de verre.....	24
2.2.1. Propriétés physiques	24
2.2.2. Propriétés chimiques	25
2.2.3. Autres propriétés :.....	27

2.3. Options de gestion :	28
2.3.1. Recyclage.....	28
2.4. Les challenges de l'industrie cimentaire :	30
2.5. Les déchets de verre dans la production du ciment et béton	31
2.6. L'utilisation des déchets de verre comme remplacement de ciment	33
2.7. L'effet des tailles des particules du verre :	34
2.8. Poudre de verre et son influence dans le béton	34
2.8.1. Pourcentage de substitution du ciment	35
2.8.2. L'activité pouzzolanique de la poudre de verre	35
2.8.3. Les réactions Alkali-Silica (RAS).....	36
2.8.4. La réaction pouzzolanique de la poudre de verre dans le béton	39
2.8.5. La perméabilité aux chlorures.....	40
2.8.6. Effet de la température de durcissement sur les propriétés d'hydratation de la poudre de verre dans les matériaux à base de ciment	41
2.9. Comparaison entre la poudre de verre et les cendres volantes	43
2.10. Les avantages environnementaux et économiques de l'utilisation de la poudre de verre	43
2.11. Conclusion.....	44
Chapitre 3 : Objectif et méthodologie du travail pratique.....	45
3.1. Introduction	45
3.2. Caractérisation des matériaux utilisés (36).....	46
3.2.1. Le sable	46
3.2.2. Les granulats	46
3.2.3. Le ciment	46
3.2.4. Eau de gâchage	47
3.2.5. Caractéristiques des ajouts cimentaire	47
3.2.6. Caractéristiques des adjuvants	52
3.3. Essai de compression (ASTM C39)	53

3.4. Béton avec poudre de verre réalisé dans notre laboratoire	53
3.4.1. Caractérisation des matériaux utilisés.....	53
3.4.2. Confection et conservation des éprouvettes pour essais de compression	57
3.4.3. L'Essai de Compression (selon la norme ASTM C39)	58
3.5. Conclusion.....	59
Chapitre 4 : Présentation et interprétation des résultats	60
4.1. Introduction	60
4.2. Résultats des essais de compression (selon la norme ASTM C 39).....	60
4.2.1. En variant le temps.....	61
4.2.2. En variant le rapport (E/L).....	67
4.3. Interprétation des résultats.....	73
4.3.1. Influence du rapport Eau/Liant (E/L)	73
4.3.2. Influence de l'âge.....	74
4.3.3. Influence des adjuvants.....	75
4.3.4. Influence de la nature d'ajout cimentaire.....	75
4.4. Discussion des résultats des essais réalisés au sein de notre laboratoire.....	75
4.5. Conclusion.....	77
Conclusion générale	78
Recommandations et perspectives	81
Bibliographie.....	82
Annexes	85

Liste des figures

Figure 1.1: Le ciment portland	4
Figure 1.2: Les granulats (gravier et sable).....	6
Figure 1.3: Adjuvants liquides	8
Figure 1.4: Adjuvant sous forme de poudre.....	8
Figure 1.5: Action des supers plastifiants défloculations des grains de ciment.....	10
Figure 1.6: Structures des bétons avec et sans entraîneur d'air	11
Figure 1.7: Mode d'action des entraîneurs d'air	11
Figure 1.8: La microstructure d'un béton (a- avec ajout , b- sans ajout)	12
Figure 1.9: Les réactions pouzzolaniques	13
Figure 1.10: Pouzzolane naturelle	15
Figure 1.11: Pouzzolane artificielle	15
Figure 1.12: Les particules de la fumée de silice	16
Figure 1.13: La fumée de silice en poudre	16
Figure 1.14: Le laitier du haut fourneau en poudre	18
Figure 1.15: Les particules des cendres volantes	20
Figure 1.16: Les cendres volantes en poudre	20
Figure 2.1 : Déchets de Verre dans une décharge	23
Figure 2.2: Structure du quartz, verre de silice et de verre de silicate Na-Ca.....	27
Figure 2.3: Le verre concassé dans une machine de recyclage.....	30
Figure 2.2.4:L'application actuelle et potentielle de produits en béton avec verre dans la construction.....	33
Figure 2.5: Les étapes de recyclage des déchets de verre en des matériaux cimentaires et granulaires	34
Figure 2.6:Morphologie de la poudre de verre.....	35
Figure 2.2.7:Forme et taille de la particule de verre à 38 µm.	36
Figure 2.8: Image MEB d'une particule de verre montrant une formation RAS dans la frontière de la particule	38
Figure 2.9: Réaction Alkali-Silica se produisant à l'intérieur d'une particule de verre sodocalcique, tandis que la surface des particules est soumise à une réaction pouzzolanique.	38
Figure 2.10: Image MEB du béton sans poudre de verre à l'âge de 28 jours (a/ 20 °C et b °40).....	41
Figure 2.11: Image MEB du béton avec 20 % de poudre de verre à l'âge de 28 jours (a-20 °C et b - 40°C).....	42
Figure 2.12: Image MEB du béton avec 40 % de poudre de verre à l'âge de 28 jours (a-20 °C et b - 40°C).....	42
Figure 2.13: le Tri de verre dans le processus de recyclage.....	44
Figure 3.1: Le laitier du haut fourneau en poudre	47
Figure 3.2: Les cendres volantes en poudre	49
Figure 3.3: La poudre de verre	51
Figure 3.4: Essai de compression suivant la norme ASTM C39	53
Figure 4.1.a : Histogrammes des résistances à la compression (E/L=0,65).....	61
Figure 4. 1.b: Courbes des résistances à la compression (E/L = 0,65).....	61

Figure 4.2.a: Histogrammes des résistances à la compression ($E/L = 0,55$).....	62
Figure 4. 2.b: Courbes des résistances à la compression ($E/L = 0,55$).....	62
Figure .4.3.a: Histogrammes des résistances à la compression ($E/L = 0,48$).....	63
Figure 4. 3.b : Courbes des résistances à la compression ($E/L = 0,48$).....	63
Figure 4.4.a: Histogrammes des résistances à la compression ($E/L = 0,45$).....	64
Figure 4. 4. b: Courbes des résistances à la compression ($E/L = 0,45$).....	64
Figure 4.5.a: Histogrammes des résistances à la compression ($E/L = 0,40$).....	65
Figure 4.5. b: Courbes des résistances à la compression ($E/L = 0,40$).....	65
Figure 4.6.a: Histogrammes des résistances à la compression ($E/L = 0,35$).....	66
Figure 4.6. b: Courbes des résistances à la compression ($E/L = 0,35$).....	66
Figure 4.7.a : Histogrammes des résistances à la compression ($t = 1$ jour).....	67
Figure 4.7. b: Courbes des résistances à la compression ($t = 1$ jour).....	68
Figure 4.8.a: Histogrammes des résistances à la compression ($t = 28$ jours).....	69
Figure 4. 8. b: Courbes des résistances à la compression ($t = 28$ jours).....	69
Figure 4.9.a: Histogrammes des résistances à la compression ($t = 56$ jours).....	70
Figure 4.9. b: Courbes des résistances à la compression ($t = 56$ jours).....	71
Figure 4.10.a: Histogrammes des résistances à la compression ($t = 91$ jours).....	72
Figure 4.10. b: Courbes des résistances à la compression ($t = 91$ jours).....	72
Figure 4.11: Essai de compression sur les éprouvettes cylindriques ($200 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$).....	76
Figure 4.12: Les Eprouvettes cylindriques après l'essai de compression.....	76

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Réactions d'hydratation des composés du ciment portland	5
Tableau 1.2: Composition chimiques de la fumée de silice	17
Tableau 1.3: Composition typique de laitier du haut fourneau	19
Tableau 1.4: Composition chimique type de certaines cendres volantes	21
Tableau 2.1: Type de verre et ses principales utilisations	24
Tableau 2.2: Propriétés physiques des déchets de verre	25
Tableau 2.3: Composition chimique de différents types de verre	26
Tableau 2.4: Résultats de conductivité thermique	28
Tableau 2.5: La quantité des déchets de verre et le pourcentage de recyclage dans différents pays.....	29
Tableau 2.6: La composition chimique du ciment et des différents verres colorés	32
Tableau 3.1: Caractéristiques physiques du sable	46
Tableau 3.2: Caractéristiques physiques des granulats	46
Tableau 3.3: Composition chimique du ciment en %	46
Tableau 3.4: Caractéristiques techniques du laitier	47
Tableau 3.5: Composition chimique du laitier de haut fourneau en %	48
Tableau 3.6: Caractéristiques techniques des cendres volantes	49
Tableau 3.7: Composition chimique des cendres volante en %	50
Tableau 3.8: Caractéristiques Techniques de la poudre de verre	51
Tableau 3.9: Composition chimique de la poudre de verre en %	52
Tableau 3.10 : L'analyse granulométrique du gravier.	54
Tableau 3.11 : L'analyse granulométrique du sable.	54
Tableau 3.12 : Masse volumique apparente des granulats.	55
Tableau 3.13 : Masse volumique absolue des granulats.	55
Tableau 3.14 : Résultat de l'essai de LA.....	55
Tableau 3.15 : Le module de finesse.....	55
Tableau 3.16 : Résultat de l'essai ES.	55
Tableau 3.17: Caractéristiques physiques du ciment	56
Tableau 3.18: Caractéristiques mécaniques du ciment	56
Tableau 3.19: Composition chimique	57
Tableau 3.20: Composition minéralogique	57
Tableau 4.1: Résultats des essais de compression.....	75

Introduction

générale

Introduction générale

Le béton est le matériau le plus utilisé dans le monde. Il est économique, écologique et représente un enjeu stratégique et universel dans le développement durable. Le seul constituant qui peut être considéré comme polluant et consommateur d'énergie est le ciment. De ce fait, en raison du réchauffement climatique, réduire la consommation d'énergie est devenu un facteur primordial recherché par toutes les industries pour la préservation de l'écosystème. La production du ciment nécessite des niveaux élevés d'énergie, ce qui libère de grandes quantités de dioxyde de carbone (CO_2) et autres gaz à effet de serre. Les concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone ont augmenté d'environ 30 pour cent au cours des 200 dernières années d'où la nécessité de remédier à cette situation et de limiter l'impact sur l'environnement.

Le recyclage des déchets de construction contribue à économiser l'espace d'enfouissement et réduire les coûts de leur élimination. L'énergie nécessaire pour réutiliser la matière recyclable reste toujours inférieure à celle utilisée pour l'exploitation des matériaux naturels vierges.

Le concept de l'utilisation des déchets pour des applications de construction a toujours montré des résultats appréciables ; ces déchets peuvent être des cendres volantes, du laitier ou des fumées de silice. Le développement de nouveaux ajouts cimentaires alternatifs ou complémentaires comme substituants partiels du ciment Portland (OPC) font l'objet de plusieurs études que nous présenterons par la suite.

L'utilisation des déchets de verre recyclé dans le ciment Portland et du béton a suscité beaucoup d'intérêt dans le monde entier pour des raisons économiques et environnementales. Les estimations faites par les services de notre ministère de l'environnement font état de la possibilité de récupération de 50.000 tonnes/an de verre en Algérie. Cependant, en l'absence de circuit de collecte et de recyclage des bouteilles en verre, celles-ci sont jetées dans les bennes à ordures ou en décharges sauvages (en bord de mer, le long des routes et dans les espaces verts) ; sachant qu'une bouteille en verre met au moins 4.000 ans pour se dégrader. Le choix de ces matériaux comme addition dans le béton est surtout préconisé en raison de leur réactivité. La poudre de verre est potentiellement pouzzolanique. Son incorporation dans les bétons a été étudiée par certains chercheurs, qui relatent ses bienfaits. Cependant plusieurs questions restent posées quant à la faisabilité d'un béton à base de poudre de verre :

- Quels sont les effets de la poudre de verre sur les propriétés mécaniques et de durabilité des bétons ?

Introduction générale

- Quel est le dosage adéquat de substitution dans le ciment et quel est l'effet d'une incorporation massive des ajouts cimentaires notamment la poudre de verre ?
- Quels sont les effets, sur les demandes en eau et en superplastifiant, des poudres seules en fonction de leur finesse et en mélange avec le ciment en fonction de leur nature et dosage ?

Afin d'apporter des éléments de réponse à ces préoccupations, nous allons essayer de présenter une étude sur l'utilisation bénéfique de la poudre de verre dans le béton dans ce manuscrit qui comprend quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique dans lequel il est mentionné les principaux ajouts cimentaires entrant dans la composition des bétons modernes.

Le deuxième chapitre porte sur les études menées concernant l'utilisation des déchets de verre dans l'industrie cimentaire notamment l'utilisation de la poudre de verre et ses caractéristiques physico-chimiques.

Le troisième chapitre traitera la partie expérimentale avec toutes les caractéristiques physico-chimiques des matériaux entrant dans la composition des bétons élaborés pour réaliser l'étude comparative entre l'effet de la poudre de verre et les autres ajouts cimentaires dans le béton.

Le dernier chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus avec une discussion et une interprétation détaillée.

Une conclusion générale rappelant les principaux résultats obtenus et des recommandations et perspectives pour des potentielles études à venir est donnée à la fin de ce travail.

Chapitre 1

Matériaux cimentaires classiques

1.1. Introduction

Le béton est de nos jours le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Son faible coût, sa simplicité de fabrication et de mise en œuvre, ses performances mécaniques ainsi que sa durabilité ont légitimé son utilisation pour réaliser des ouvrages divers, notamment des immeubles d'habitation, des ponts, des routes, des barrages...etc.

On peut présenter le béton comme un mélange de matériaux de nature généralement minérale. Il est composé de matières inertes tels que les granulats ou agrégats (gravillons, sables, etc.), d'un liant (ciment ou ciment + ajout cimentaires) ainsi que des adjuvants qui modifient les propriétés physiques et chimiques du mélange. Mélangés à l'eau, on obtient une pâte, avec une homogénéité variable, qui peut selon le matériau, être moulée en atelier (pierre artificielle), ou coulée sur chantier. Le béton fait alors « prise », durcie et ses caractéristiques évoluent dans le temps.

Dans les dernières années, la découverte des ajouts cimentaires a beaucoup contribué au développement du béton. Ces matériaux sont devenus une partie essentielle du béton. Ils sont utiles pour améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité du béton par un impact bénéfique sur la microstructure du matériau. Parmi les ajouts cimentaires on peut citer les cendres volantes, la fumée de silice, la pouzzolane et le laitier. D'autres variétés de matériaux issus de déchets recyclés présentant un potentiel d'addition cimentaire ou un caractère pouzzolanique peuvent être ainsi considérées comme ajouts cimentaires.

Les matériaux à caractère pouzzolanique sont généralement utilisés en mélange avec les liants aériens et hydrauliques dans le but d'améliorer les caractéristiques des bétons.

Après un bref rappel, les différents constituants du béton seront décrits et nous expliquerons le rôle de chacun ainsi que leur contribution dans la matrice du béton et spécialement les matériaux cimentaires.

1.2. Le ciment portland

Les ciments portlands sont des liants hydrauliques composés principalement de silicates de calcium hydrauliques qui font prise et durcissent en vertu d'une réaction chimique avec l'eau appelée hydratation.



Figure 1.1: Le ciment portland (1)

Le clinker est le principal constituant du ciment industriel. Il est obtenu par cuisson du cru (80% de calcaire et 20% d'argile) à environ 1450 °C, c'est le phénomène de clinkérisation (combinaison de la chaux venant du calcaire et de différents oxydes venant de l'argile). Il est essentiellement constitué de 4 phases :

- Silicate tricalcique $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ noté C_3S (alite) 50-70 %.
- Silicate bicalcique $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ noté C_2S (bélite) 15-30%.
- Aluminate tricalcique $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ noté C_3A (célite) 5-10%.
- Alumino-ferrite tétracalcique $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ noté C_4AF 5-15%.
- Autre : sulfate, alcalis, filler calcaire, chaux libre, impuretés. (1)

Pour éviter la prise rapide suite à l'hydratation des C_3A , une quantité de 5% de gypse est ajoutée et broyée avec le clinker. Les résultats de l'hydratation du ciment sont énumérés dans le tableau suivant :

Chapitre 1: Matériaux cimentaires classiques

Tableau 1.1: Réactions d'hydratation des composés du ciment portland (1)

$2 (3\text{CaO}.\text{SiO}_2)$	$+6\text{H}_2\text{O}$	$= 3\text{CaO}.\text{SiO}_2.8\text{H}_2\text{O}$	$+ 3(\text{CaO}.\text{H}_2\text{O})$
Silicates Tricalcique	Eau	Silicates de calcium hydratés	Hydroxyde de calcium
$2 (2\text{CaO}.\text{SiO}_2)$	$+ 4\text{H}_2\text{O}$	$= 3\text{CaO}.\text{SiO}_2.3\text{H}_2\text{O}$	$+ \text{CaO}.\text{H}_2\text{O}$
Silicates Bicalcique	Eau	Silicates de calcium hydratés	Hydroxyde de calcium
$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	$+ 3 (\text{CaO}.\text{SO}_3.2\text{H}_2\text{O})$	$+ 26\text{H}_2\text{O}$	$= 6\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.3\text{SO}_3.32\text{H}_2\text{O}$
Aluminates tricalcique	Gypse	Eau	Ettringite
$2 (3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3)$	$+ 6\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.3\text{SO}_3.32\text{H}_2\text{O}$	$+ 4\text{H}_2\text{O}$	$= 3(4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{SO}_3.13\text{H}_2\text{O})$
Aluminates tricalcique	Ettringite	Eau	Monosulfoaluminate de Calcium
$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	$+ \text{CaO}.\text{H}_2\text{O}$	$+ 12\text{H}_2\text{O}$	$= 4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.12\text{H}_2\text{O}$
Aluminates tricalciques	Hydroxyde de calcium	Eau	Aluminates tetracalciques hydratés
$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	$+ 10 \text{H}_2\text{O}$	$+ 2(\text{CaO}.\text{H}_2\text{O})$	$= 6\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3.12\text{H}_2\text{O}$
Aluminoferrite Tetracalcique	Eau	Hydroxyde de calcium	Aluminoferrite de calcium Hydrate

1.3. Les granulats

Comme les trois quart du volume d'un béton sont occupés par les granulats, il n'est pas étonnant que la qualité de ces derniers revête une grande importance. Non seulement les granulats peuvent limiter la résistance du béton, mais, selon leurs propriétés, ils risquent d'affecter la durabilité et la performance structurelle du béton. (2)

Le choix des granulats doit être fait avec beaucoup de soin. D'une manière générale, les qualités demandées aux granulats pour l'obtention des bons bétons concernent essentiellement la forme et l'état de surface, la porosité, la granularité, les propriétés mécaniques et la nature minéralogique. (3)



Figure 1.2: Les granulats (gravier et sable) (source : www.multivracrg.com)

1.3.1. Forme de Particule et Texture

Idéalement, pour réduire au minimum la quantité de la pâte de ciment exigée pour fournir l'ouvrabilité adéquate au béton frais, les granulats doivent grossièrement posséder les mêmes dimensions avec des surfaces relativement lisses. Comme ces conditions idéales sont indisponibles, les granulats concassés peuvent être utilisés, ils peuvent avoir une surface plus rugueuse et être plus angulaires en forme. En conséquence la demande en pâte de ciment augmente pour assurer une bonne ouvrabilité. Cependant, les granulats de formes plates ou allongées devraient être évités. (4)

Chapitre 1: Matériaux cimentaires classiques

1.3.2. La porosité

Les granulats poreux (avec une porosité communicante) modifient la consistance du matériau par absorption d'eau dans le malaxeur. Il est recommandé d'utiliser des granulats avec un coefficient d'absorption inférieur à 1 %. (3)

1.3.3. La nature minéralogique

Elle est caractérisée par la texture (la rugosité de surface) des grains et la possibilité des réactions à l'interface granulats – pâte de ciment. Les granulats présentant des risques de réactions alcali – granulats sont à proscrire car ces réactions détruisent l'étanchéité, et affecter la stabilité à long terme des ouvrages. La présence de poussières ou d'argile sur les granulats réduit l'adhérence et exige une augmentation de la teneur en eau entraînant une chute des résistances. (3)

1.4. Eau de gâchage

L'eau est un des ingrédients essentiels du béton. En effet, l'eau introduite dans le béton lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère au béton frais les propriétés rhéologiques d'un liquide et une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation et donc de la résistance mécanique. L'eau de gâchage doit avoir les propriétés de l'eau potable.

Pratiquement toute eau naturelle potable n'ayant pas une odeur ou un goût prononcé peut être employée pour la fabrication du béton. Cependant, certaines eaux non potables peuvent devenir néfastes au béton. Un excès d'impuretés dans l'eau peut influencer non seulement le temps de prise, la résistance et la stabilité volumétrique du béton, mais peut aussi faire apparaître des efflorescences, des taches, peut attaquer les armatures et réduire la durabilité. Certaines limites peuvent donc être établies pour les chlorures, sulfates, alcalins et solides présents dans l'eau de gâchage comme on peut effectuer des essais appropriés pour déterminer l'effet de l'impureté sur diverses propriétés. (1)

1.5. Les Adjuvants

1.5.1. Définition

L'adjuvant est tout ingrédient autre que le ciment, les granulats et l'eau, que l'on ajoute au mélange. Ce sont le plus souvent des polymères de synthèse au poids moléculaire assez élevé (20000 - 30000).

Chapitre 1: Matériaux cimentaires classiques

Les adjuvants pour béton sont des produits chimiques solubles dans l'eau qui modifient principalement:

- les solubilités
- les vitesses de dissolution
- l'hydratation des divers constituants d'un liant hydraulique (5)



Figure 1.3: Adjuvants liquides de gauche à droite : agent anti-lessivage, réducteur de retrait, réducteur d'eau, agent moussant, inhibiteur de corrosion et agent entraîneur d'air. (6)



Figure 1.4: Adjuvant sous forme de poudre (6)

1.5.2. Fonctions des adjuvants

Les adjuvants possèdent une fonction principale et une fonction secondaire:

a- Fonction Principale:

Chaque adjuvant est défini par une fonction principale unique. Elle est caractérisée par la ou les modifications majeures qu'elle apporte aux propriétés du béton à l'état frais ou durci.

Chapitre 1: Matériaux cimentaires classiques

b- *Fonctions secondaires:*

En plus de sa fonction principale, un adjuvant peut avoir une ou plusieurs fonctions secondaires. Un adjuvant n'est pas palliatif. Il n'a ni pour effet ni pour mission de faire un bon béton à partir d'un mauvais dosage, d'une mauvaise composition ou d'une mise en œuvre défectueuse. (7)

1.5.3. Classification des adjuvants (selon F. Massazza) (8)

❖ *Adjuvants qui modifient la prise et le durcissement :*

- accélérateurs,
- retardateurs.

❖ *Adjuvants qui modifient la rhéologie :*

- réducteurs d'eau : plastifiants et super plastifiants,
- adjuvants affectant la viscosité.

❖ *Adjuvants entraîneurs d'air dans le mélange :*

- adjuvants entraîneurs et dés entraîneurs d'air,
- adjuvants producteurs de gaz,
- adjuvants producteurs de mousse.

❖ *Adjuvants qui modifient la résistance du béton aux attaques physiques et chimiques :*

- adjuvants antigel,
- inhibiteurs de corrosion,
- produits qui améliorent la résistance aux attaques chimiques.

❖ *Autres adjuvants :*

- les colorants,
- les produits qui améliorent la résistance aux attaques biologiques.

Il existe également des adjuvants pour le ciment, tels que les plastifiants et réducteurs d'eau pour la pâte du mélange des matières dans le cas du procédé de fabrication du ciment par voie humide et les agents de mouture. L'addition de ces produits dans le béton engendre des phénomènes physico-chimiques très complexes.

Chapitre 1: Matériaux cimentaires classiques

1.5.4. Adjuvants courants

a- Les supers-plastifiants

Selon la norme EN 934-2, un super plastifiant est un adjuvant qui, introduit dans un béton, un mortier ou coulis, a pour fonction principale de provoquer un accroissement important de l'ouvrabilité du mélange. En se fixant sur les grains de ciment, il modifie la nature des charges électriques. L'action d'un super plastifiant passe nécessairement par son absorption sur les particules de ciment. Les grains de ciment ont alors tendance à s'éloigner les uns des autres du fait qu'ils ont tous la même charge et s'entourent d'un film d'eau très mince. Ainsi on obtient un gain de fluidité, puisque les grains de ciment sont mieux dispersés. L'eau existante sert alors à fluidifier le béton.

Dans certains cas, l'ajout de super plastifiant est directement additionné dans la toupie du camion afin d'éviter une perte de fluidité pendant le trajet.

Le super plastifiant est ajouté dans le béton puis malaxé pendant 3 minutes dans la toupie à vitesse maximale. (9)

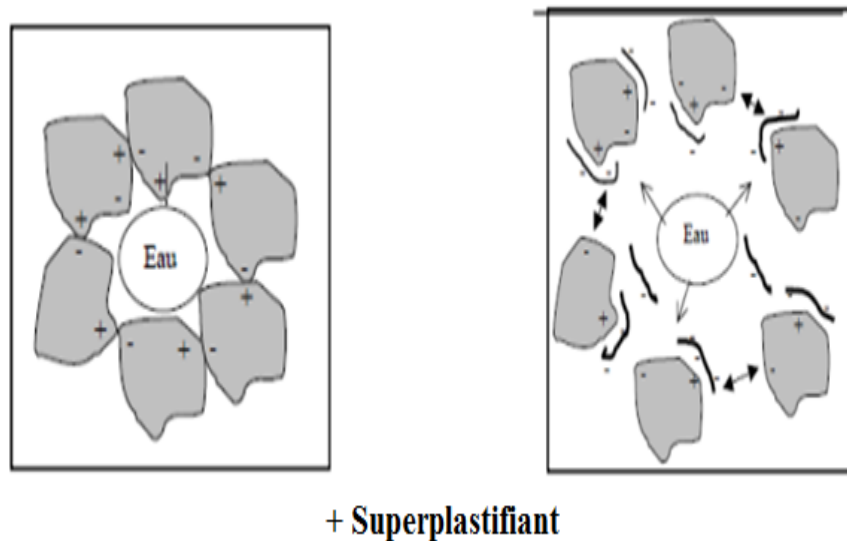


Figure 1.5: Action des supers plastifiants défloculations des grains de ciment (10)

b- Les entraineurs d'air :

Leur rôle est de créer dans le béton des bulles d'air microscopiques. Le diamètre de ces bulles varie entre 10 et 200 μ . Ces adjuvants sont surtout utilisés pour améliorer la tenue du béton durci au gel et au cycle gel- dégel. Mais il est important de souligner que l'addition d'un entraineur d'air dans le béton, diminue les résistances mécaniques de béton. Le pourcentage d'air dans le béton ne doit pas dépasser 6%.

L'adjuvant est introduit directement dans la bétonnière pendant le malaxage du béton.

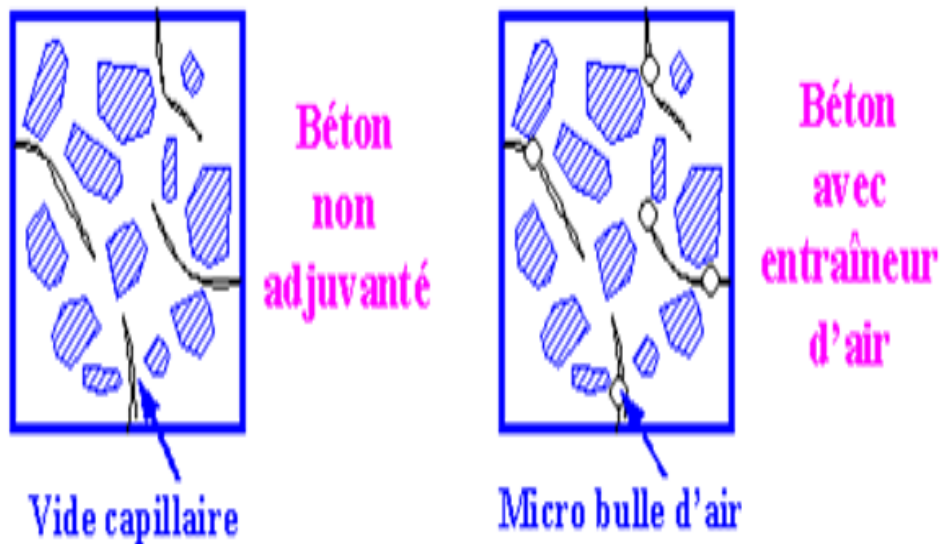


Figure 1.6: Structures des bétons avec et sans entraîneur d'air (source : <http://iut-tice.ujf-grenoble.fr/tice-espaces/GC/materiaux/mtx3/Qcm/ADJ1D.1.gif>)

Les entraîneurs d'air permettent une diminution de l'eau de gâchage et réduisent ainsi la ségrégation et le ressuage. Ils améliorent très souvent l'aspect du béton au démoulage. Ils peuvent en très grande quantité, provoquer des baisses de résistances mécaniques. Comme un certain nombre de facteurs interviennent sur la teneur en air, il est indispensable d'effectuer sur le chantier des essais de contrôle sur le béton frais. L'air occlus améliore et d'une façon spectaculaire la résistance au gel du béton durci. Le pourcentage d'air nécessaire décroît avec le diamètre maximal des granulats. (9)

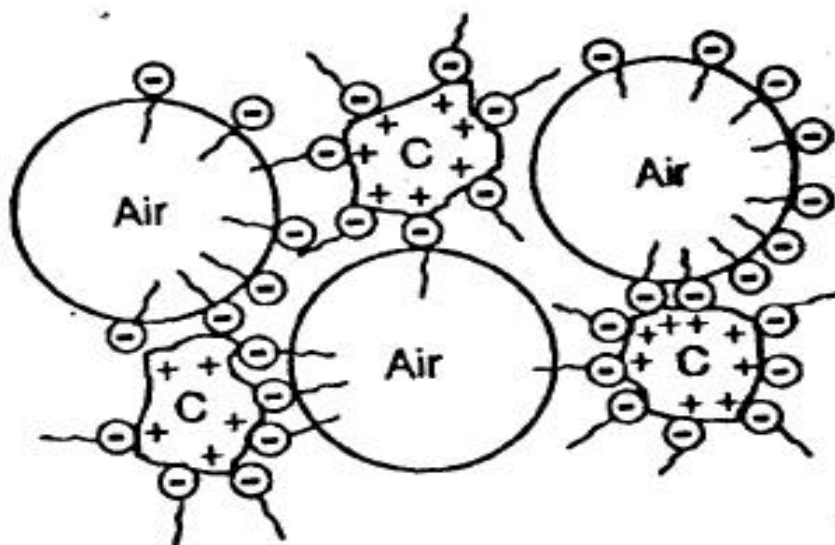


Figure 1.7: Mode d'action des entraîneurs d'air

(source : www.civil.usherbrooke.ca/cours/gci714/PDF/)

1.6. Les ajouts cimentaires

Les ajouts cimentaires sont utilisés pour réduire les effets sur les changements climatiques. Ils sont généralement incorporés au clinker. Etant donné que l'industrie du ciment est une industrie polluante, on peut constater que 60 % des émissions de gaz à effet de serre associées à la production du ciment sont liées à la cuisson des matières premières pour obtenir le clinker, donc tonne de ciment produite c'est environs une tonne de gaz qui est relâchée. L'incorporation d'ajouts cimentaires réduit quelque peu cette émission de CO_2 .

Les ajouts cimentaires contribuent aussi à la réduction de la consommation de l'énergie et l'accroissement de la production sans devoir ajouter de nouveaux fours.

Lorsqu'ils sont bien utilisés les ajouts cimentaires peuvent :

- améliorer l'ouvrabilité et la finition du béton frais.
- réduire le ressuage et la ségrégation du béton frais.
- réduire la chaleur de l'hydratation qui est bénéfique lors des coulées massives.
- réduire la perméabilité et l'absorption
- réduire la réaction alcaline des granulats. (11)

1.6.1. Rôle de l'ajout cimentaire

1.6.1.1. Rôle de la granulométrie de l'ajout

Les ajouts cimentaires finement broyés comblent les interstices granulaires inaccessibles aux grains de ciment et rendent le mélange plus fluide ce qui permet de diminuer la quantité d'eau, et engendre des grappes d'ultrafines qui se forment lors du gâchage. (12)

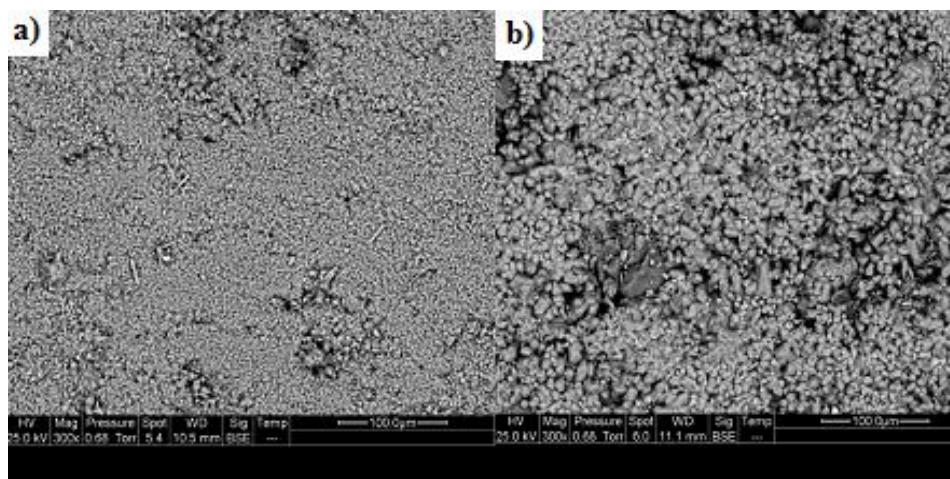


Figure 1.8: La microstructure d'un béton (a- avec ajout , b- sans ajout) (8)

Chapitre 1: Matériaux cimentaires classiques

1.6.1.2. Rôle pouzzolanique des ajouts cimentaire

L'hydratation du ciment Portland libère une grande quantité de chaux à la suite de la réaction d'hydratation du C_3S et C_2S (30% de la masse du ciment). Cette chaux connue sous le nom de portlandite $Ca(OH)_2$, contribue peu à la résistance de la pâte cimentaire hydratée. Elle peut même être responsable des problèmes de durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par de l'eau. L'augmentation de ce lessivage entraîne une augmentation de la porosité et de la perméabilité dans le béton.

Les ajouts cimentaires (actifs) réagissent avec cette chaux libérée par l'hydratation du ciment pour donner des silicates de calcium hydratés C-S-H, elles contribuent à l'augmentation des résistances mécaniques du matériau. L'idéal est d'avoir une ultrafine à grande cinétique de réaction, avec des grains lisses (à défloculation facile) et à très forte activité pouzzolanique (3). Les réactions pouzzolaniques sont les suivantes:



Pour les aluminates tricalciques elles réagissent avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment pour donner des aluminates de calcium hydratés (C-A-H) responsables de la prise immédiate de la pâte du ciment.

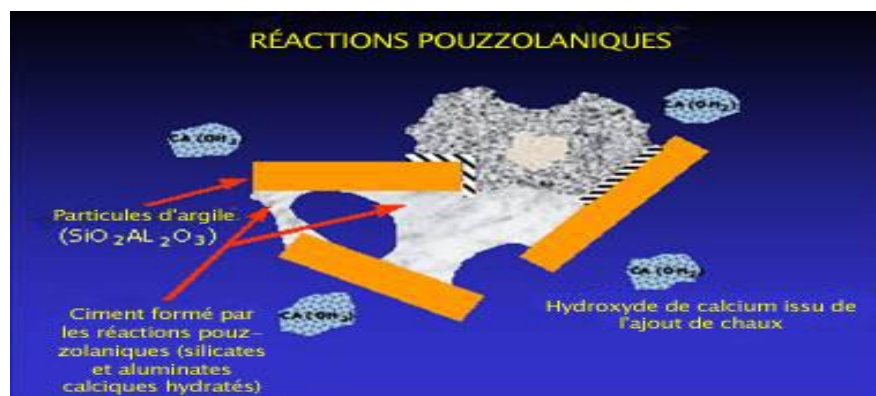


Figure 1.9: Les réactions pouzzolaniques

(source : <http://www.calcinor.com/fra/images/Mejoras5.jpg>)

Chapitre 1: Matériaux cimentaires classiques

1.6.2. Classification des ajouts minéraux

Selon la norme [ENV 2006] paragraphe 3.1.5, les ajouts minéraux sont classés en actifs et inertes.

1.6.3. Principaux ajouts minéraux inertes

Selon certains chercheurs, les particules de clinker de dimension supérieure à 60 μ m ne subissent pas une hydratation complète même au cours du durcissement à long terme, pour cette même raison les particules de clinker de telle dimension pourraient être remplacées par celles de matériaux inertes (N F P 18- 305).

En outre, les particules les plus fines d'un ajout inerte servent à remplir les pores de la pâte de ciment, ils jouent le rôle de micro agrégats.

Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés qui, par leur composition granulométrique améliorent les propriétés physiques du ciment Portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau). Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires et les poussières.

1.6.4. Les ajouts minéraux actifs

1.6.4.1. Les pouzzolanes

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes. (13)

Les normes françaises donnent les définitions suivantes des pouzzolanes entrant dans la fabrication des ciments :

➤ *Pouzzolane naturelle*

C'est un produit essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques. Elle peut être d'origine volcanique ou sédimentaire.



Figure 1.10: Pouzzolane naturelle

(source : http://www.natureobaignades.fr/images/shop/1358_2.jpg)

➤ *Pouzzolane artificielle*

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques.

Les roches traitées thermiquement sont des argiles ou schistes. On classe les pouzzolanes en trois catégories:

- Les constituants actifs: phase vitreuse plus au moins altérée, opale, terre de diatomées, zéolites cristallisées,
- Les constituants inertes: phase cristallisée autre que les zéolites,
- Les constituants nocifs: substances organiques et argiles gonflantes.



Figure 1.11: Pouzzolane artificielle (source : http://www.eti-construction.fr/wp-content/uploads/2014/06/sem23_SOL-TECH_pouzzolane.jpg)

1.6.4.2. La fumée de silice

La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium, de différents alliages de ferrosilicium ou de zircon. Le silicium et les alliages de silicium sont produits dans des fours à arc électrique où le quartz est réduit en présence de charbon (et de fer pour la production de ferrosilicium). Durant la réduction de la silice dans l'arc électrique, un composé gazeux, le dioxyde de silicium (SiO_2) se forme et s'échappe vers la partie supérieure du four, il se refroidit,

Chapitre 1: Matériaux cimentaires classiques

se condense et s'oxyde sous forme de particules ultrafines de silice SiO_2 .

Ces particules sont récupérées dans un système de dépoussiérage. D'un point de vue chimique, la fumée de silice est essentiellement composée de silice. (14)

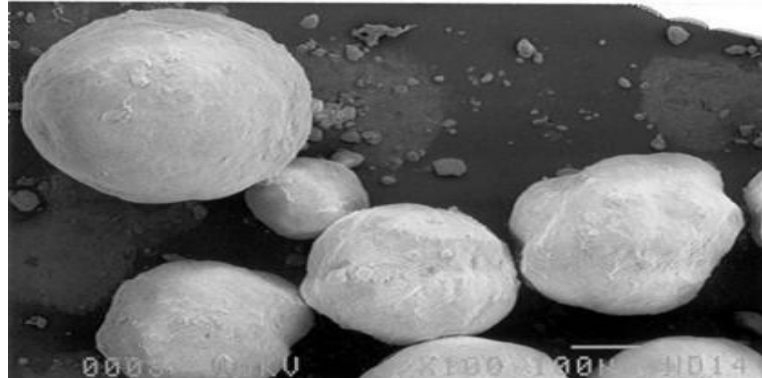


Figure 1.12: Les particules de la fumée de silice
(source : http://www.condensil.com/dbMedias/bloc/images/thumbnails/51__image2_420x0)

La teneur en SiO_2 de la fumée de silice varie selon le type d'alliage produit. Plus la teneur en Silicium de l'alliage est élevée plus la teneur en SiO_2 de la fumée de silice est élevée. Les fumées de silice produites durant la fabrication de silicium métal contiennent en général plus de 90% de SiO_2 .



Figure 1.13: La fumée de silice en poudre (source : <http://www.http://fr.made-in-china.com/manufacturers/micro-silica-fume-refractory-concrete.html>)

Du point de vue structural, la fumée de silice est essentiellement composée de silice vitreuse. Du point de vue morphologique, les particules de fumée de silice se présentent sous forme de sphères ayant des diamètres compris entre $0.03\mu\text{m}$ et $0.3\mu\text{m}$ (le diamètre moyen habituel se situant en dessous de $0.1\mu\text{m}$), de telle sorte que la dimension moyenne des sphères de fumée de silice est 100 fois plus faible que celle d'une particule de ciment avec un diamètre moyen de l'ordre de $1/10$ de micron. (1)

Chapitre 1: Matériaux cimentaires classiques

Tableau 1.2: Composition chimiques de la fumée de silice (1)

Composés	Silicium (grise)	Ferrosilicium (grise)	Blanche
SiO ₂	93.7	87.3	90
Al ₂ O ₃	0.6	1.0	1.0
CaO	0.2	0.4	0.1
Fe ₂ O ₃	0.3	4.4	2.9
MgO	0.2	0.3	0.2
Na ₂ O	0.2	0.2	0.9
K ₂ O	0.5	0.6	1.3
Pertes Au Feu (PAF)	2.9	0.6	1.2

Les caractéristiques très particulières de la fumée de silice en font une pouzzolane très réactive à cause de sa très forte teneur en silice, de son état amorphe et de son extrême finesse. Les effets bénéfiques de la fumée de silice sur la microstructure et les propriétés mécaniques du béton sont dus essentiellement à la rapidité à laquelle la réaction pouzzolanique se développe et à l'effet physique particulier aux particules de fumée de silice qui est connu sous le nom d'effet filler.

Ces deux effets entraînent à la fois une forte augmentation de la compacité et une amélioration des résistances mécaniques du fait de la réaction pouzzolanique des fumées de silice.

Ajoutons cependant que la fumée de silice est un matériau peu économique, elle est aussi appelée micro silice ou fumée de silice condensée, mais le terme fumée de silice est le plus généralement utilisé. La densité de la fumée de silice est généralement de 2.2, mais aussi un peu plus élevée lorsque la teneur en silice est plus faible.

Elle est moins dense que le ciment Portland dont la densité est 3,1. Ce produit se présente sous la forme d'une poudre ultra fine de couleur claire ou grise. Lorsque l'on considère les propriétés du béton aux fumées de silice, il importe de garder à l'esprit qu'on utilise ces dernières de deux manières différentes :

- comme substitue du ciment, pour réduire les quantités de ciment utilisées, en général

Chapitre 1: Matériaux cimentaires classiques

pour des raisons d'économie,

- comme ajout, pour améliorer les propriétés du béton, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durcis. (15)

1.6.4.3. Laitier des hauts fourneaux

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



Figure 1.14: Le laitier du haut fourneau en poudre

(source : http://french.alibaba.com/promotion/promotion_ground-granulated-blast-furnace-slag-powder-promotion-list.html)

D'un point de vue chimique (tableau3.1), les laitiers ont une composition relativement constante à laquelle le métallurgiste porte une certaine attention puisque tout écart par rapport à cette composition chimique optimale se traduit par une augmentation des coûts énergétiques assez importants et donc à des coûts de production plus élevés pour la fabrication de la fonte.

Le laitier est fondu à une densité beaucoup plus faible (de l'ordre de 2.8) que celle de la fonte (qui est supérieure à 7.0) de telle sorte que le laitier fondu flotte au – dessus de la fonte fondue au bas du haut fourneau si bien que l'on peut retirer ces deux liquides séparément.

Chapitre 1: Matériaux cimentaires classiques

Tableau 1.3: Composition typique de laitier du haut fourneau (16)

Oxydes	Laitier français	Laitier USA	Laitier algérien
SiO ₂	29 à 36	33 à 42	38 à 42
Al ₂ O ₃	13 à 19	10 à 16	8 à 12
CaO	40 à 43	36 à 45	48 à 52
Fe ₂ O ₃	4	0.3 à 20	2.0
MgO	6	3 à 12	4.7
S	1.5	-	0.15

Le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été séparé ou après avoir été cobroyé avec le clinker. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le ciment Portland et craint donc d'avantage la dessiccation. Par contre il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de la chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique. La réactivité du laitier peut être augmentée de trois façons :

- par un broyage poussé,
- par de la chaleur (étuvage, autoclavage),
- par ajout des produits chimiques (la chaux, la soude (NaOH) ou des sels de soude, le sulfate de calcium (gypse).

1.6.4.4. Les cendres volantes

Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées par les systèmes de dépoussiérages des gaz des chaudières des centrales thermiques. Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et différentes compositions de phase parce que celles-ci sont reliées exclusivement au type d'impuretés qui sont contenues dans le charbon que l'on brûle dans la centrale thermique. (1)

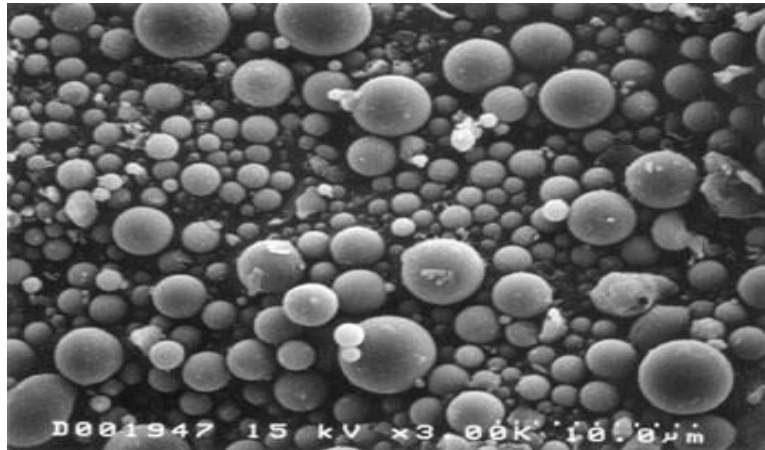


Figure 1.15: Les particules des cendres volantes

(source: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6f/Fly_Ash_FHWA_dot_gov.jpg)



Figure 1.16: Les cendres volantes en poudre (source : http://www.crusherinc.com/fr/concasseur-de-pierre/images/fly_ash.jpg)

Des charbons provenant de la même source et utilisés dans la même centrale thermique produisent des cendres volantes très semblables. Cependant, comme on peut le voir dans le tableau (chimique type de certaines cendres volantes) la composition chimique des cendres volantes qui proviennent de différentes usines peut varier beaucoup.

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

- les cendres silico- alumineuses (cendre de houille),
- les cendres sulfocalciques (cendre de lignite),

Chapitre 1: Matériaux cimentaires classiques

- les cendres non typifiées de composition irrégulière ou de propriétés assez incertaines.

La plupart des particules ont un diamètre compris entre $1\mu\text{m}$ et $100\mu\text{m}$, leur surface spécifique Blaine se situe généralement entre 250 et $600\text{ m}^2/\text{kg}$. La grande surface spécifique des cendres volantes signifie que le matériau réagit facilement avec l'hydroxyde de calcium. D'une façon générale, l'introduction des cendres volantes dans le béton diminue la porosité et la perméabilité. Elle diminue la sensibilité du béton aux eaux agressives, en fixant progressivement la chaux. La cendre volante permet au béton de conserver sa compacité et de rester imperméable.

Il est reconnu que l'emploi des ciments aux cendres volantes entraîne une diminution du retrait hydraulique et thermique du béton. En plus des propriétés décrites, lorsqu'elles sont utilisées comme une fraction liante, les cendres volantes jouent également d'autres rôles dans le béton tels que l'amélioration de l'ouvrabilité, la diminution de la proportion d'eau pour le béton frais et l'imperméabilité des surfaces. (15)

Tableau 1.4: Composition chimique type de certaines cendres volantes (16)

Composés	Classe F	Classe C
	Silico-alumineuses	Sulfo-calciques
SiO ₂	47.2 à 54	18 à 24.8
Al ₂ O ₃	27.7 à 34.9	12.1 à 14.9
Fe ₂ O ₃	3.6 à 11.5	6.3 à 7.8
CaO	1.3 à 4.1	42.9 à 49
MgO	1.4 à 2.5	1.9 à 2.8
Na ₂ O	0.2 à 1.6	0.5 à 2
SO ₃	0.1 à 0.9	5.5 à 9.1
PAF	2.0	1.5
Chaux libre	0.1	18 25

Chapitre 1: Matériaux cimentaires classiques

1.6.4.5. La poudre de verre

Il existe un autre ajout, qu'on qualifiera d'alternatif, constitué la poudre de verre. Cette dernière est obtenue en broyant à une certaine finesse le verre récupéré des différentes décharges. 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 chaux en vertu de ses propriétés pouzzolaniques. Ce nouveau matériau cimentaire sera décrit avec plus de détails dans les chapitres qui suivront. Cette poudre de verre est l'objet de l'étude de ce projet.

1.7. Conclusion

Les ajouts cimentaires peuvent être de nature hydraulique (comme le laitier), c'est-à-dire qu'ils s'hydratent très lentement de façon autonome au contact de l'eau. Ils peuvent aussi réagir de façon pouzzolanique, c'est-à-dire qu'en présence d'eau, l'ajout réagit avec la portlandite pour former des C-S-H. Cette réaction est particulièrement intéressante puisque la portlandite, qui contribue peu à la résistance, est remplacée par des C-S-H qui sont beaucoup plus liants. L'utilisation d'ajouts cimentaires a des effets sur plusieurs propriétés du béton. La forme géométrique et la finesse des particules influent sur la maniabilité et le ressuage du béton frais. Les ajouts cimentaires modifient aussi la cinétique d'hydratation et l'évolution de la résistance dans le temps.

Chapitre 2

Matériau Cimentaire Alternatif

la poudre de verre

2.1. Introduction

Le verre est un matériau transparent formé par la fusion d'un mélange de plusieurs composants tel que la silice, les carbonates de sodium et les carbonates de calcium dans des températures très élevées, suivi par un refroidissement durant lequel la solidification se produit sans cristallisation.

Quand les déchets du verre sont concassés/broyés jusqu'à obtenir un sable dont la taille de ses particules est similaire à celle du sable naturel, il présente presque les propriétés d'un agrégat. Le verre est produit sous différentes formes : verre d'emballage, verre de lampes et verre d'écran de tubes à rayon cathodique (TRC) comme montré dans le tableau (2.1). (17)



Figure 2.1 : Déchets de Verre dans une décharge (source : www.usinenouvelle.com)

L'utilisation des produits en verre a connu un accroissement ces dernières années, qui a engendré de grandes quantités de déchets de verre. Néanmoins il existe deux types de déchets de verre (les déchets colorés et les déchets incolores). La plus part des déchets incolores sont généralement recyclables mais les déchets de verre colorés représentent un taux de recyclage très bas, d'où l'orientation de ces déchets vers les décharges qui sont très souvent insuffisantes et pose ainsi de sérieux problèmes écologiques.

Chapitre 2: Matériau Cimentaire alternatif : la poudre de verre

Tableau 2.1: Type de verre et ses principales utilisations (17)

Type de verre	Principaux produits
Verre Sodocalcique	Bouteille Vaisselle Verre plat
Verre à base du plomb	Vaisselle en cristal Les écrans de télévision et les équipements à écran de visualisation
Verre en borosilicate	fibres de verre Isolation en laine plats pour les fours
Verres techniques par exemple ; Alumino silicate, Alkali barium	Scientifique Optique

Comme le verre n'est pas biodégradable les sites de décharges ne fournissent pas de solutions environnementales, d'où la nécessité de trouver une utilisation à ces déchets. Nous nous proposons dans ce qui suit d'introduire les principales propriétés du verre ainsi que son utilisation dans le béton notamment comme ajout cimentaire.

2.2. Propriétés des déchets de verre

2.2.1. Propriétés physiques

Les particules du verre concassées/broyées ont généralement une forme angulaire et peuvent contenir quelques particules longues et plates.

Le degré d'angularité et la quantité des particules plates et longues dépendent du processus du concassage/broyage. Les plus petites particules provenant du concassage et du broyage fins produisent un peu moins d'angularité et réduisent la quantité des particules longues et plates.

Chapitre 2: Matériau Cimentaire alternatif : la poudre de verre

Le verre non contaminé (clean) possède des propriétés consistantes, cependant les propriétés du verre provenant des installations de récupération sont plus variables. Le verre récupéré dans les installations de traitement des déchets peut avoir une densité spécifique de l'ordre de 2.5. Le degré de variabilité de cette valeur dépend du degré de contamination et il est reflété dans une plage de densités comme montré ci-dessous dans le tableau (2.2). (18)

Tableau 2.2: Propriétés physiques des déchets de verre (18)

Echantillon du verre	Densité spécifique	Perméabilité (cm/sec)
Grossier	1.96–2.41	$\sim 2 \times 10^{-1}$
Fin	2.49–2.52	$\sim 6 \times 10^{-2}$

Le verre concassé a un coefficient de perméabilité variant de 10^{-1} à 10^{-2} cm/sec. Donc on peut le considérer comme un matériau très perméable similaire au sable grossier.

L'actuel coefficient de perméabilité dépend de la graduation du verre, qui, à son tour, dépend du degré du processus de concassage pour lequel le verre est exposé. Il faut noter par ailleurs que la distribution des tailles des particules du verre peut varier considérablement.

2.2.2. Propriétés chimiques

Les composants du verre sont les éléments qui peuvent être convertis en verre lorsqu'ils sont combinés avec de l'oxygène. Le dioxyde de silicium (SiO_2) entrant dans la composition du sable, est l'élément le plus commun des différents types de verre.

Le verre commun contient généralement près de 70 % de SiO_2 . Les carbonates de sodium anhydride Na_2CO_3 qui agissent comme un agent fluxant dans la masse fondue, abaissent le point de fusion et la viscosité du verre formé, libèrent le dioxyde de carbone et aide l'écoulement du fondu. Le tableau (2.3) donne les différentes compositions chimiques du verre sodocalcique, verre à base du plomb et le verre en borosilicate.

Les bouteilles et les vitres sont généralement faites à partir du verre sodocalcique, pour les ampoules ainsi que pour les lunettes optiques on utilise le verre combiné avec du plomb (Lead-alkali-silicate glass). Le verre en borosilicate qui a une résistance chimique extraordinaire et des

Chapitre 2: Matériau Cimentaire alternatif : la poudre de verre

points de ramollissements à hautes températures est utilisé dans la fabrication des outils de cuisson et matériels de laboratoire. (19)

Tableau 2.3: Composition chimique de différents types de verre

Constituent (%)	Verre sodocalcique (20)	Verre à base du plomb (20)	Verre en Borosilicate (21)
SiO_2	70–73	60–70	60-80
Al_2O_3	1.7–2.0	-	1-4
Fe_2O_3	0.06–0.24	-	-
Cr_2O_3 seulement dans le verre vert	0.1	-	-
CaO	9.1–9.8 1	1	-
MgO	1.1–1.7	-	-
BaO	0.14–0.18	-	-
Na_2O	13.8–14.4	7-10	4.5
K_2O	0.55–0.68	7	-
PbO	-	15-25	-
B_2O_3	-	-	10-25

La structure du verre peut être décrite à l'aide d'un cadre à deux dimensions de tétraèdres SiO_4 représentés schématiquement sur la Fig. 2. Selon la théorie de réseau proposée par Zachariasen (1932), les composants du verre peuvent être classés en trois groupes: (1) formateurs de réseau; (2) modificateurs de réseau; et (3) intermédiaires. Les formateurs des réseaux sont caractérisés par de faibles rayons ioniques, les valences ioniques les plus élevées possibles, et sont entourés par quatre atomes d'oxygène. Ensemble, avec des atomes d'oxygène, ils forment un réseau plus

Chapitre 2: Matériau Cimentaire alternatif : la poudre de verre

ou moins désordonné à trois dimensions par des tétraèdres. Les énergies de liaisons entre ces formateurs de réseau et des atomes d'oxygène sont généralement plus élevées que 335 KJ / mol.

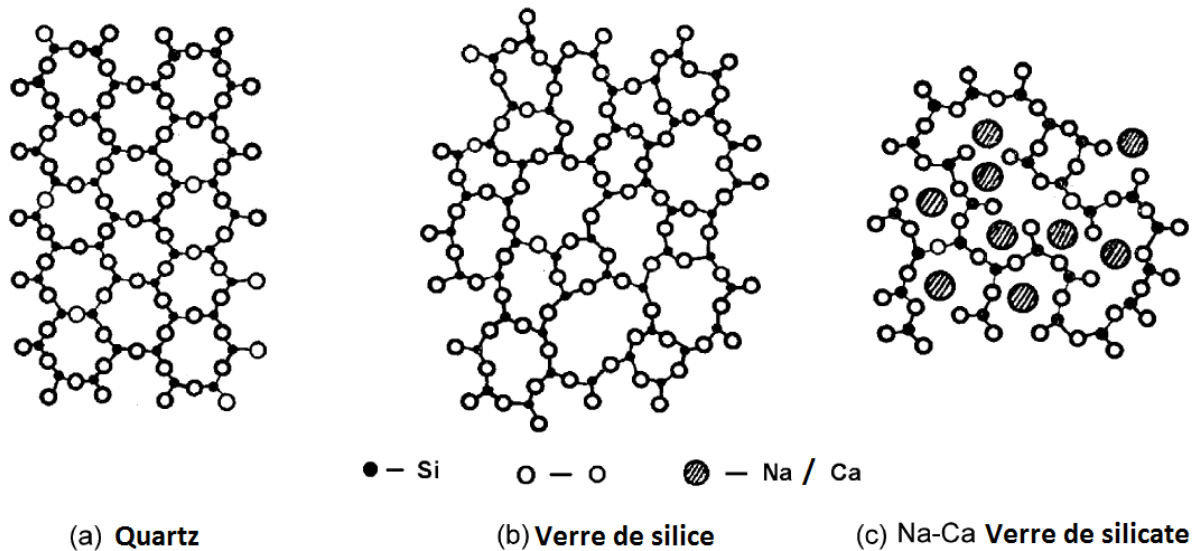


Figure 2.2: Structure du quartz, verre de silice et de verre de silicate Na-Ca. (22)

Les modificateurs du réseau ont les grands rayons ioniques. La présence d'un réseau modificateur désordonne et dépolymérise le réseau. Les énergies de liaison entre les modificateurs de réseau et les atomes d'oxygène sont généralement moins de 210 KJ/mol.

Les intermédiaires peuvent jouer le rôle à la fois de formateurs de réseau et des modificateurs. Les énergies de liaison des atomes d'oxygène varie de 210 à 335 kJ / mol. (23)

A partir des énergies de liaison des agents formateurs et modificateurs du réseau, on peut conclure que plus la quantité de formateurs de réseau est grande et plus le verre devient moins réactif.

2.2.3. Autres propriétés :

Le verre est connu pour sa basse conductivité thermique, les agrégats avec une conductivité thermique réduite peuvent aider à diminuer la profondeur de la pénétration au gel.

Chapitre 2: Matériau Cimentaire alternatif : la poudre de verre

Tableau 2.4: Résultats de conductivité thermique (18)

Matériau	Conductivité thermique apparente Watts/mètre °K	
	Echantillon 1	Echantillon 2
Verre concassé	0.315	0.260
Sable	0.463	0.683

Les résultats de conductivité thermique obtenus (tableau 2.4) montrent que le verre peut présenter une meilleure rétention de la chaleur par rapport aux agrégats.

2.3. Options de gestion :

2.3.1. Recyclage

Selon une estimation des Nations Unis pour l'année 2004, il y aurait autour de 200 millions de tonnes de déchets solides avec plus de 7 % de déchets de verre, ce qui équivaut à 14 millions de tonnes de déchets de verre et ce chiffre n'a cessé d'augmenter depuis. (17)

L'industrie du verre utilise une grande quantité des ressources naturelles de la terre comme matériaux bruts. Il est estimé que 1 Kg de verre plat consomme 1.73 Kg de matière brute et 0.15 m³ d'eau.

On a trouvé aussi que la production de chaque tonne d'emballage en verre consomme 1.2 tonne de matériaux bruts onéreux. De plus l'industrie du verre est considérée comme une des industries les plus intensives à cause du besoin d'une température supérieure à 1600 ° C pour fusionner les matières premières. Il est estimé que chaque Kg de verre plat produit 16.9 MJ de chaleur perdue.

La totalité d'Energie consommée par l'industrie du verre en Europe était de 352 PJ en 2007, qui représente entre 13 et 17 % de l'énergie consommée par l'industrie européenne totale.

Par ailleurs, l'utilisation intensive de l'énergie induit une grande émission de CO₂ et d'autres gaz à effets de serres. Il a été constaté qu'en 2007 la production d'une tonne de verre produit 0.57 tonne de CO₂.

Chapitre 2: Matériau Cimentaire alternatif : la poudre de verre

Théoriquement le verre peut être complètement et infiniment recyclé sans perdre aucune de ses propriétés physiques et chimiques, mais le verre cassé et de couleurs mixtes rend difficile le processus de recyclage et coûteux, car ces matériaux peuvent causer une variation dans la composition chimique du verre recyclé. Les impuretés et les contaminants qui peuvent se trouver dans les déchets de verre avec couleurs mixte peuvent affecter les propriétés du nouveau verre produit. (24)

Le taux de recyclage des déchets de verre est très faible dans le monde entier, il est essentiellement concentré dans les secteurs du packaging et l'emballage. Le tableau (2.5) donne la quantité des déchets de verres ainsi que le pourcentage de la partie recyclée dans différents pays.

Tableau 2.5: La quantité des déchets de verre et le pourcentage de recyclage dans différents pays (25)

Pays	Déchets de verre (tonnes)	% du taux de recyclage	Année
Etas Unis	11 500 000	27	2010
Canada	116 000	68	2009
Singapour	72 800	29	2010
Suède	195 000 isolés	93	2010
	44 000 mixte	0	
Portugal	493 000	25	2001
Turquie	120 000	66	2004
Allemagne	3 200 000	94	2003

Les déchets de verre représentent un challenge pour la gestion des déchets solides à travers le monde à cause du taux de recyclage bas mais aussi du manque des sites des décharges. L'industrie de la construction, plus précisément l'industrie du ciment et du béton peuvent fournir une solution importante et pratique pour l'impact environnemental des déchets de verre à cause

Chapitre 2: Matériau Cimentaire alternatif : la poudre de verre

de ses propriétés physiques et chimiques qui sont presque similaires à celle du ciment et du sable.



Figure 2.3: Le verre concassé dans une machine de recyclage
(source : www.emag.suez-environnement.com)

L'utilisation des déchets de verre dans la production du ciment et du béton conserve les ressources naturelles du globe, économise l'énergie et les coûts et réduit les émissions de CO_2 et autres gaz à effets de serres.

2.4. Les challenges de l'industrie cimentaire :

Le ciment est le matériau le plus utilisé pour tous les types de construction en béton, il est produit partout dans le monde. La production annuelle globale du ciment a atteint 2.8 milliards tonne et on prévoit une augmentation importante dans les prochaines années, d'où une production dépassant les 4 milliards de tonne/an à cause de la croissance dans différents pays comme la Chine, l'Inde, le Moyen Orient et l'Afrique du Nord.

Le type de ciment le plus utilisé est le ciment Portland il est composé essentiellement du Calcaire ($CaCO_3$) des Silicates (SiO_2), de l'oxyde de Magnésium (MgO), des alumine (Al_2O_3) et d'oxyde du fer (Fe_2O_3).

Théoriquement, chaque matériau qui possède tous ces oxydes peut être utilisé comme élément entrant dans la production du ciment Portland. Il existe deux processus de production du ciment : la voie humide et la voie sèche. La sélection de l'une de ces deux méthodes dépend des propriétés des matières premières, leurs coûts et leurs disponibilités. Mais ce qui est sûr c'est que les deux processus consomment beaucoup d'énergie notamment pour la cuisson du clinker.

Chapitre 2: Matériau Cimentaire alternatif : la poudre de verre

De nos jours, l'industrie du ciment fait face à beaucoup de challenges comme l'augmentation des coûts des carburants et de l'énergie. La nécessité de réduire la grande quantité des émissions de gaz à effets de serre notamment les émissions du CO_2 , les coûts élevés des matières premières et l'approvisionnement en matériaux avec des quantités suffisantes et qualités satisfaisantes.

Avec la croissance de la production annuelle du ciment, les enjeux vont en découler. L'industrie cimentaire fera donc face à des pressions régulières pour trouver des solutions ou minimiser les effets de ces enjeux à un rang acceptable.

L'industrie du ciment est considérée comme une des grandes industries intensives. Le coût de l'énergie pour la production du ciment peut atteindre 40% de ses coûts variable et même 50 à 60 % dans certains pays. (25)

Une des plus grandes industries responsables des émissions de gaz à effets de serre est l'industrie cimentaire avec plus de 7 % des émissions totale de CO_2 dans le monde.

La réduction des quantités de clinker dans le ciment peut s'avérer une des solutions pour réduire les émissions du CO_2 .

L'utilisation des déchets dans la production du ciment et du béton en tant qu'ajouts cimentaires peut sauvegarder les ressources naturelles de notre monde, réduit le coût de la production du ciment, les émissions des gaz à effets de serre et l'impact environnemental de ces déchets solides notamment les déchets de verre à cause de leur nature non biodégradable.

2.5. Les déchets de verre dans la production du ciment et béton

Différents déchets ont été utilisés dans la production du ciment et du béton comme le laitier des hauts fourneaux, la fumée la silice, l'argile et les déchets de verre.

La composition chimique des différents déchets de verre de couleurs différentes montre que le verre a une large quantité de silicate et une bonne quantité de calcium comme montré dans le tableau (2.6). Avec sa structure amorphe, le verre a la capacité d'être une pouzzolane ou même un matériau cimentaire.

Chapitre 2: Matériau Cimentaire alternatif : la poudre de verre

Tableau 2.6: La composition chimique du ciment et des différents verres colorés (25)

Composition chimique	Ciment (%)	Verre transparent (%)	Verre ambré (%)	Verre vert (%)	Verre concassé (%)	Poudre de Verre (%)	Sable (%)
SiO_2	20.2	72.42	72.21	72.38	72.61	72.20	78.6
Al_2O_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_2O_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	0.46
Na_2O	0.19	13.64	13.75	13.52	13.12	12.85	0.42
K_2O	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 (PAF)	1.9	-	-	-	0.22	0.36	7.6

La structure non biodégradable gêne étroitement la mise des déchets de verre en décharges ; aussi l'industrie du ciment et du béton peuvent fournir une solution adéquate pour une gestion environnemental de ces déchets.

De nombreuses études ont été faites à propos de l'utilisation des déchets de verre dans l'industrie du ciment et du béton. Dans certains travaux ils ont été utilisés comme agrégats, dans d'autres comme ajouts cimentaire. Certaines études ont même essayé de combiné les deux c.à.d. comme agrégats et ajout cimentaire dans le même mélange.



Figure 2.2.4:L'application actuelle et potentielle de produits en béton avec verre dans la construction. (26)

2.6. L'utilisation des déchets de verre comme remplacement de ciment

L'utilisation des déchets de verre comme agrégats dans la production des bétons est très limitée et n'a pas produit de résultats satisfaisants à cause des réactions Alkali-Silica (RAS) entre le ciment et les agrégats en verre mais aussi à cause des performances produites. Les propriétés pouzzolaniques du verre à suscité la curiosité d'utiliser le verre comme ajout cimentaire ou matériau cimentaire dans la production du béton. Il faut noter aussi que les propriétés pouzzolaniques sont étroitement liées aux tailles des particules du verre.

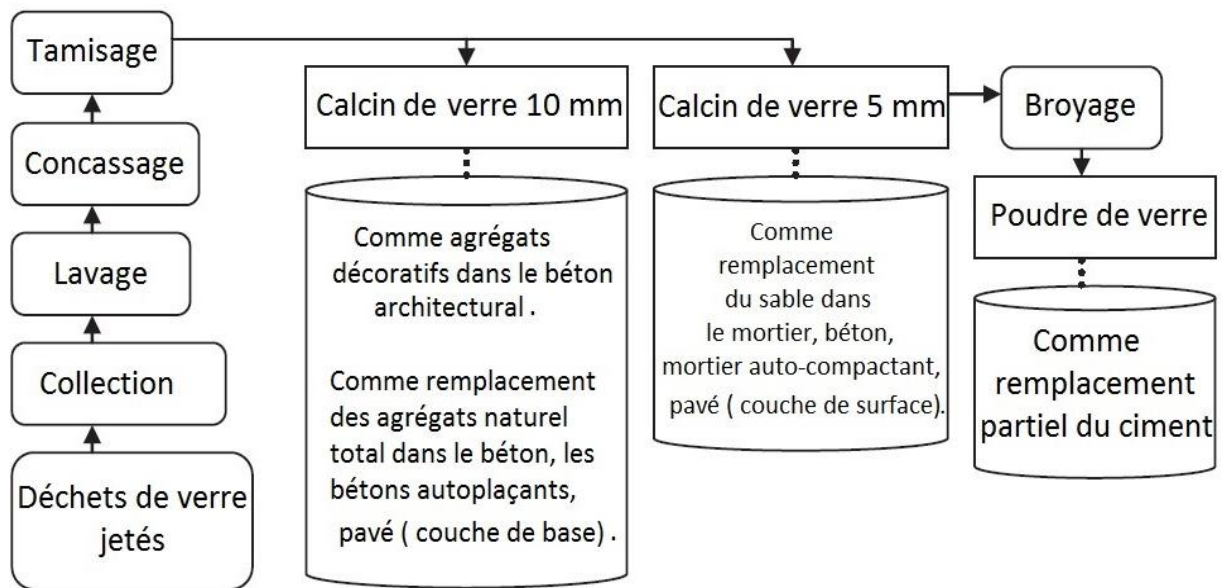


Figure 2.5: Les étapes de recyclage des déchets de verre en des matériaux cimentaires et granulaires (26)

2.7. L'effet des tailles des particules du verre :

Toutes les études menées jusqu'à présent sont d'accord sur le fait que la taille des particules du verre a une influence directe sur le ciment et le béton, seules les particules $< 38 \mu\text{m}$ développent des propriétés pouzzolaniques et procurent au béton des résistances mécaniques appréciables dépassant celles obtenues sur des bétons à 100 % ciment Portland.

Il a été également observé que les expansions RAS sont remarquablement réduites avec la diminution des tailles de particules de verre. Cette diminution contribue aussi à l'amélioration des caractéristiques mécaniques des bétons notamment la résistance à la compression, à la flexion et à la traction. (27)

2.8. Poudre de verre et son influence dans le béton

Dans ce qui va suivre on s'intéressera à la poudre de verre et notamment à la réaction pouzzolanique induite par cette dernière. Il faut savoir que les dimensions des particules de verre ont une relation directe avec l'activité pouzzolanique qui n'est obtenue que pour des particules très fines. Il faut aussi noter que la présence de la poudre de verre dans le béton renforce les propriétés plastiques de ce dernier et cela est dû à l'amélioration de la texture mais aussi à la forme des particules du verre.

Chapitre 2: Matériau Cimentaire alternatif : la poudre de verre

2.8.1. Pourcentage de substitution du ciment

L'utilisation de la poudre de verre demeure bien moins chère que le ciment, elle réduit la densité du béton et lui permet d'atteindre des résistances appréciables à moyen et long terme. Cette utilisation doit rester modérée, un ajout très important peut s'avérer néfaste au béton notamment en ce qui concerne l'ouvrabilité qui diminue avec la réduction du module de finesse. Un pourcentage de 10 à 20 % de la poudre de verre de la masse totale du ciment est cependant un dosage adéquat et permettrait d'obtenir des résultats satisfaisants. (28)

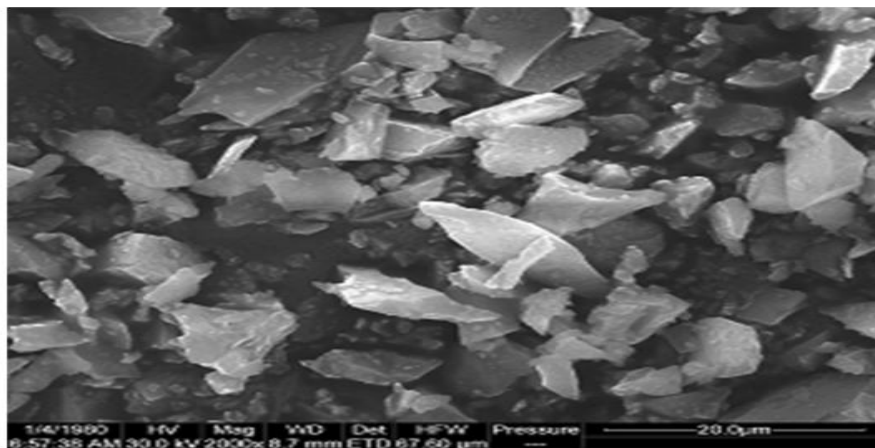


Figure 2.6:Morphologie de la poudre de verre (29)

La poudre de verre offre au béton une meilleure résistance à la compression à moyen et à long terme mais aussi une bonne résistance à la flexion, et une amélioration du module d'élasticité ainsi qu'une nette diminution du retrait. En incorporant de la poudre de verre dans le béton cela contribuera à la diminution de la ségrégation et une bonne ouvrabilité du béton.

2.8.2. L'activité pouzzolanique de la poudre de verre

Le béton contenant de la poudre de verre n'atteint pas les résistances souhaitées à jeune âge, la poudre de verre libère seulement une petite fraction des ions de sodium (Na^+) dans la solution et cette quantité est insuffisante pour accélérer les premières réactions et former l'ettringite et ainsi augmenter la résistance du ciment les premiers temps, néanmoins la résistance commence à s'améliorer considérablement après 28 jours suite à la substitution des ions de calcium (Ca^{2+}) par ces mêmes ions de sodium (Na^+) dans la formation du C-S-H gel. (30)

Pour que la poudre de verre ait une activité pouzzolanique elle doit être finement broyée de telle sorte que le D_{max} de la poudre soit inférieur à 38 μm selon la norme ASTM C618, es

Chapitre 2: Matériau Cimentaire alternatif : la poudre de verre

particules de dimensions supérieures sont susceptibles de causer les réactions Alkali-Silica que nous définirons par la suite.

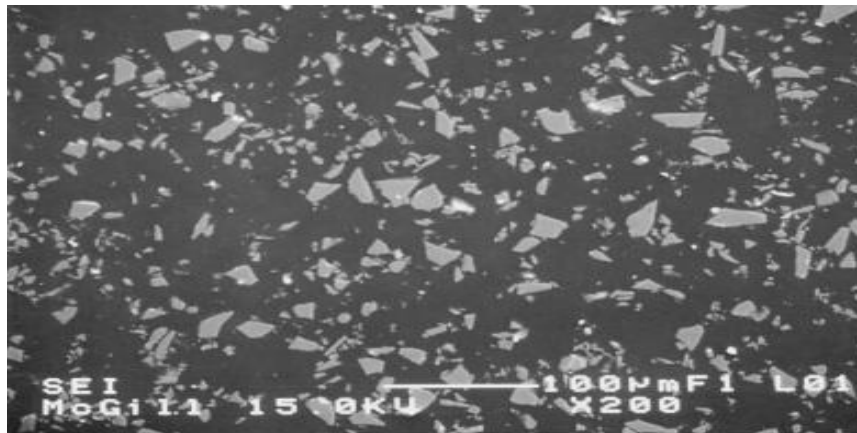


Figure 2.2.7:Forme et taille de la particule de verre à 38 µm. (27)

Pour qu'un matériau ait une activité pouzzolanique, la pâte (matériau + Chaux) doit avoir une résistance minimale de l'ordre de 4.1MPa après 7 jours de cure dans une température de 54°C et après 21 jours additionnels d'immersion dans une eau de 23°C. Il faut aussi ajouter à cela une surface de Blaine supérieure à 400(m²/Kg). (27)

2.8.3. Les réactions Alkali-Silica (RAS)

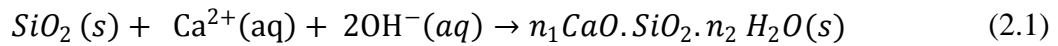
Plusieurs études ont été menées sur les Réactions Alkali-Silica (ASR) qui sont susceptibles non seulement de rompre les liaisons entre les liants et les agrégats notamment en milieu humide, mais de créer aussi des pressions internes capables de produire l'expansion et la dégradation du béton par rupture du ciment.

La présence massive des Alcalins provoque les RAS s'ils réagissent avec la Silice présente dans la solution, bien que la poudre de verre contienne plus d'alcalins que le ciment les expansions RAS sont moins que celles du ciment, cela peut s'expliquer par le fait que les alcalins présents dans la poudre de verre sont consommés dans la formation du C-S-H dans la réaction pouzzolanique qui se fait bien avant les RAS.

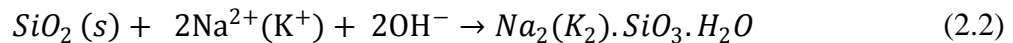
En fonction de plusieurs facteurs, notamment la teneur en calcium, la taille des particules, et l'alcalinité, la silice dissoute va se polymériser en gel expansif, s'hydrater en C-S-H, ou une combinaison des deux. Un mécanisme théorique suggère qu'à tout moment dans un béton contenant soit des granulats réactifs ou un matériau pouzzolanique, le gel de la RAS et le C-S-H, peuvent être trouvés. Selon ce mécanisme, la disponibilité des ions de calcium en combinaison

Chapitre 2: Matériau Cimentaire alternatif : la poudre de verre

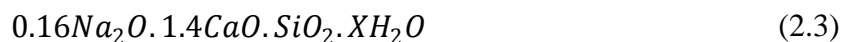
avec un taux relativement élevé des formations C-S-H favorisera la réaction pouzzolanique, et au fil du temps, tout produit de la RAS prendra la forme du C-S-H. Lorsqu'elle réagit comme une pouzzolane la poudre de verre se comportera comme indiqué dans l'équation (2.1), et le produit sera un type de silicate de calcium hydraté.



Lorsque la réaction du verre produit un gel RAS, l'équation chimique est similaire, néanmoins, le calcium peut être substitué par le sodium, le potassium ou autres alcalins comme c'est le cas dans l'équation (2.2).



Le produit final est probablement semblable à un précipité de la composition donnée dans l'équation (2.3), avec l'existence d'une matrice de silicate de calcium hydraté avec un rapport Na_2O / SiO_2 proche de 0.19.



La poudre de verre contribue au changement de concentration des ions d'hydroxyde (OH^-) considérés comme la cause directe de la réduction des expansions dues aux RAS.

Ce système peut être à l'origine de la variabilité dans les propriétés de gonflement des produits RAS. Le mécanisme qui permet une distinction entre les produits pouzzolaniques et les produits RAS peut être simplement la quantité d'agrégat ou la taille des particules de la source de silice. La facilité avec laquelle les ions calcium peuvent atteindre la réaction pouzzolanique conduit à un produit plus stable et une expansion réduite. (31)

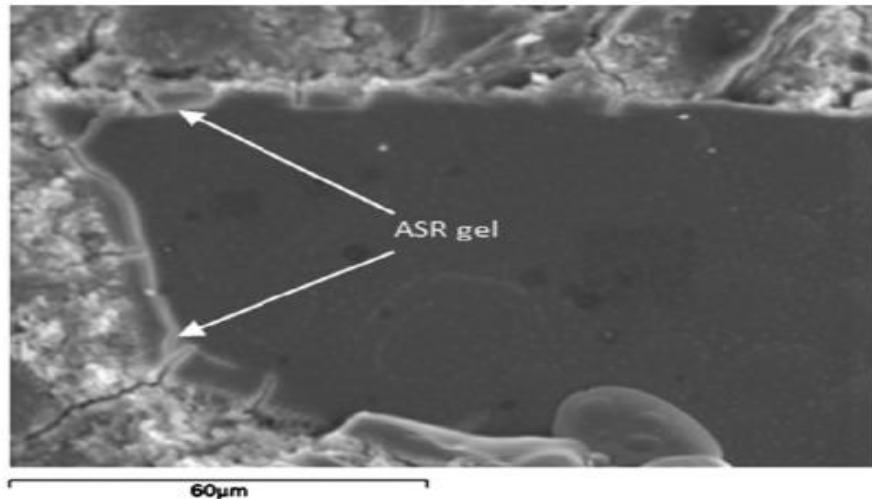


Figure 2.8: Image MEB d'une particule de verre montrant une formation RAS dans la frontière de la particule (32)

La surface extérieure des particules de la poudre de verre, où précipite le $Ca(OH)_2$, subit une réaction pouzzolanique. Tandis que la surface interne des particules (les microfissures internes) subit une détérioration par les ASR. (33)

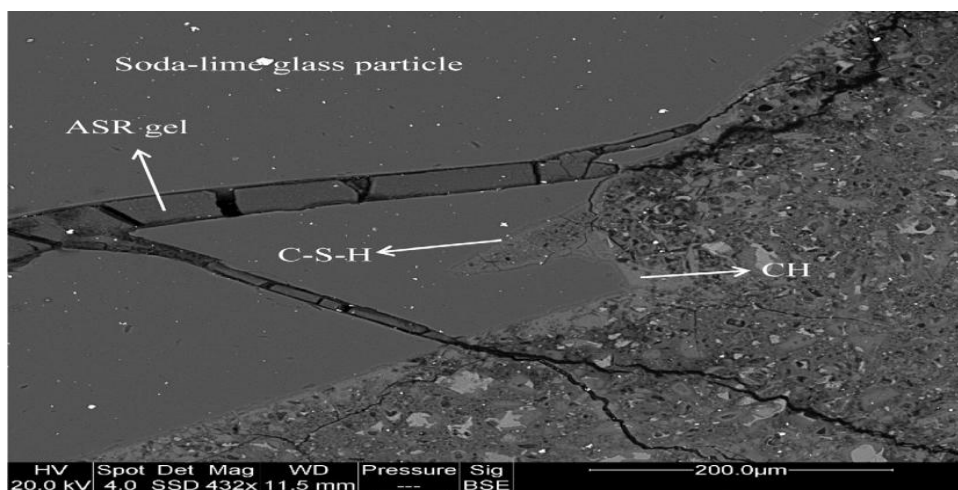


Figure 2.9: Réaction Alkali-Silica se produisant à l'intérieur d'une particule de verre sodocalcique, tandis que la surface des particules est soumise à une réaction pouzzolanique. (33)

La taille du verre et sa couleur ont une grande influence sur les réactions ASR, un broyage très fin et une utilisation du verre de couleur verte peut nettement améliorer la résistance à la réaction Alkali-Silica grâce à l'oxyde de chrome (Cr_2O_3) ajouté lors de la fabrication des bouteilles vertes. (34)

Chapitre 2: Matériau Cimentaire alternatif : la poudre de verre

Pour éviter les réactions (RAS) on doit respecter les précautions suivantes :

- Utiliser une poudre de verre dont le D_{max} est inférieur à 38 μm (Plus la poudre de verre a un $D_{max} < 38 \mu m$ plus son activité pouzzolanique est importante).
- Utiliser une poudre de verre riche en silicates SiO_2 et contient de faibles quantités d'oxyde de calcium CaO.
- Utiliser une poudre de verre de couleur verte qui est riche en oxyde de chrome, ce dernier a un effet réductif sur les RAS.

2.8.4. La réaction pouzzolanique de la poudre de verre dans le béton

Une réaction pouzzolanique est le résultat d'interaction entre un matériau siliceux amorphe (la poudre de verre, la fumée de silice, les cendres volantes ...) et l'hydroxyde de calcium, cette réaction conduit à la formation d'hydrates de silicate de calcium (C-S-H) comme produit principal. (35)

La différence entre la résistance à la compression au jeune âge entre un béton à la poudre de verre et un béton ordinaire (celle du béton ordinaire est plus importante) est due à la vitesse lente de la réaction pouzzolanique par rapport à la vitesse d'hydratation et ceci à cause de plusieurs facteurs.

Les facteurs qui influencent la vitesse des réactions pouzzolaniques sont les suivants :

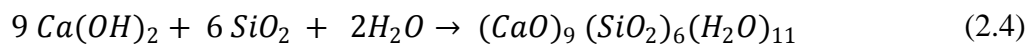
- La composition et la cristallinité de l'ajout ;
- La taille des particules des ajouts (la finesse) ;
- Le PH de la solution interstitielle ;
- Les conditions de prise (la température et l'humidité) ;

Le taux de dissolution de la silice amorphe est le facteur principal pour la détermination de la vitesse de la réaction pouzzolanique. La poudre de verre libère une petite fraction de ses alcalis dans les pores. L'activation alcaline peut améliorer la cinétique de la réaction pouzzolanique. L'activation alcaline peut améliorer la cinétique de la réaction pouzzolanique. (35)

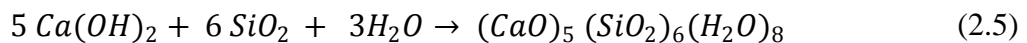
Chapitre 2: Matériau Cimentaire alternatif : la poudre de verre

Le CSH peut avoir plusieurs composition et structures. Le facteur important, qui influe la composition et les propriétés du CSH résultant, est la concentration des éléments réactives dans la solution interstitielle et particulièrement le calcium (Ca) et la silice (Si).

Si le système est riche en Calcium (durant l'hydratation du ciment) le CSH produit est similaire au Jennite comme montré dans l'équation (2.4) :



Cependant dans un système où la concentration du Calcium est faible et la concentration du Si est élevée (durant la réaction pouzzolanique) le CSH produit est similaire au tobermonite , équation (2.5)



Durant les premières étapes de la réaction pouzzolanique la masse de la poudre de verre réagit par unité de CH consommé est faible ceci entraine la formation d'un CSH avec un rapport Ca/Si élevé (c.-à-d. un C-S-H avec une faible cristallinité). (33)

2.8.5. La perméabilité aux chlorures

La poudre de verre réduit la perméabilité des ions chlorure, et ainsi elle réduit le risque de corrosion des armatures. Ceci peut être expliqué par le fait que la poudre de verre est amorphe et elle contient beaucoup de silice, ce que permet la réduction de la pénétration des ions chlorures. Cette diminution en perméabilité est due :

- à l'amélioration de l'hydratation au jeune âge induite par la poudre de verre.
- à l'hydratation secondaire à partir de 90 jours (effet retardé).

Chapitre 2: Matériau Cimentaire alternatif : la poudre de verre

2.8.6. Effet de la température de durcissement sur les propriétés d'hydratation de la poudre de verre dans les matériaux à base de ciment (29)

La température de durcissement a des effets non négligeables sur les propriétés d'hydratation de la poudre de verre. Une haute température de durcissement est bénéfique pour le développement de la résistance à la compression pour les pâtes de ciment avec poudre de verre parce qu'elle peut à la fois, favoriser l'hydratation du ciment et la réaction pouzzolanique de verre simultanément.

La température de durcissement relativement élevée peut en partie compenser la baisse de la résistance due à un surdosage de la poudre de verre.

Lors de la réaction pouzzolanique de la poudre de verre une partie de l'hydroxyde de calcium (CH) est consommée, la teneur en CH diminue avec l'augmentation de la quantité de poudre de verre, d'où une haute température de durcissement peut contribuer à améliorer la réaction pouzzolanique en permettant une meilleure consommation du CH.

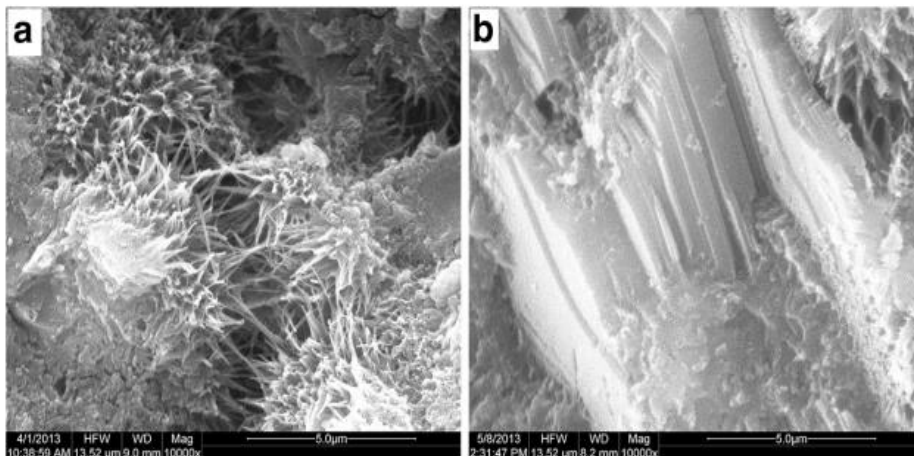


Figure 2.10: Image MEB du béton sans poudre de verre à l'âge de 28 jours (a/ 20 °C et b °40) (29)

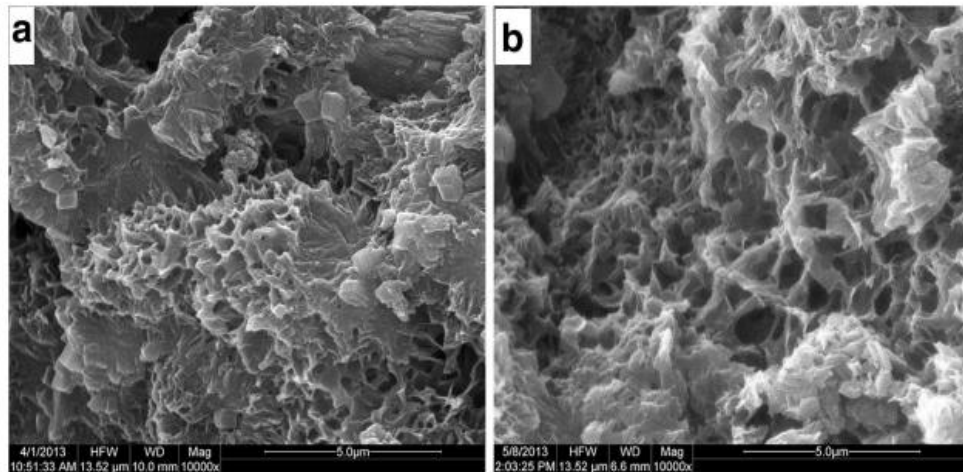


Figure 2.11: Image MEB du béton avec 20 % de poudre de verre à l'âge de 28 jours (a-20 °C et b - 40°C) (29)

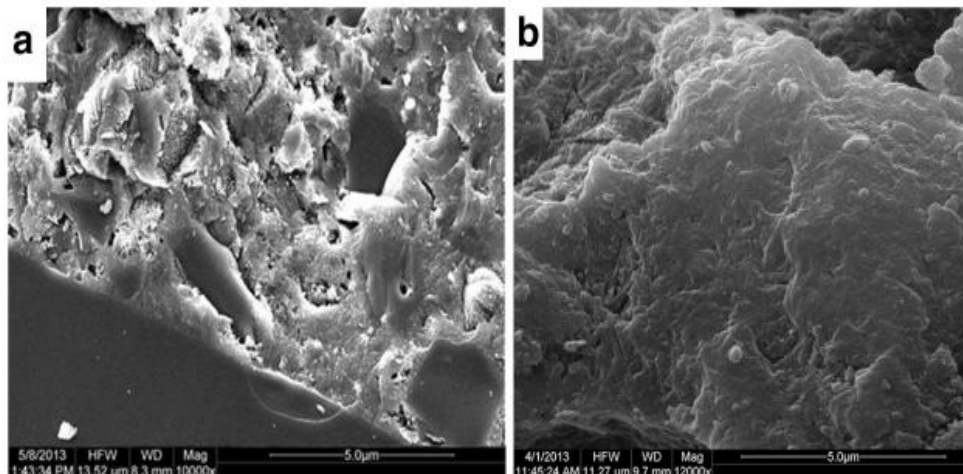


Figure 2.12: Image MEB du béton avec 40 % de poudre de verre à l'âge de 28 jours (a-20 °C et b - 40°C) (29)

La microstructure de la pâte de ciment contenant de la poudre de verre sous une haute température est plus dense car la réaction pouzzolanique y est favorisée. Une grande quantité de gel C-S-H existe. Les particules de la poudre de verre non hydratée vont jouer le rôle de micro-agrégats et ne généreront pas des risques RAS.

Une haute température de durcissement est bénéfique pour l'activation pouzzolanique de la poudre de verre. Elle peut fournir une base théorique pour l'application de la poudre de verre dans les produits préfabriqués en béton, béton de masse ou même la construction en béton élaboré pendant la saison chaude.

2.9. Comparaison entre la poudre de verre et les cendres volantes

A titre comparatif on a pu constater que l'activité pouzzolanique de la poudre de verre est meilleure que celle des cendres volantes, La poudre de verre contient des quantités de SiO_2 , CaO , Na_2O , est plus importantes et de faibles quantités d' Al_2O_3 .

Pour un remplacement de l'ordre de 10% et entre 14 et 28 jours la teneur en eau non évaporée de la pâte de ciment contenant de la poudre de verre est plus grande que celle de la pâte de ciment renfermant des cendres volantes, ce qui améliore l'hydratation de cette dernière du fait de la faible absorption de l'eau de la poudre de verre entre 14 et 28 jours.

Entre 28 et 90 jours la teneur en eau non évaporée de la pâte du ciment renfermant des cendres volantes augmente grâce à la seconde hydratation par contre la teneur en eau non évaporée de la pâte de ciment contenant de la poudre de verre reste presque la même. (35)

On peut déduire que la poudre de verre améliore l'hydratation principalement au début contrairement à la cendre volante qui améliore l'hydratation un peu plus tard. Ceci est dû à la teneur élevée en Alcalins dans les verres sodocalciques, cela procurera au béton ainsi élaboré une meilleure résistance à moyen terme que celui conçu avec des cendres volantes.

2.10. Les avantages environnementaux et économiques de l'utilisation de la poudre de verre

La réutilisation des déchets de verre dans la production du ciment et du béton présente de nombreux avantages:

- Réduction des coûts d'élimination des déchets, qui sont susceptibles d'augmenter en raison de la taxe appliquée par les décharges.
- Protection de l'environnement en économisant de grandes quantités de matières premières chaque année.
- Prolongement de la vie de nos sites de décharge, et conservation des campagnes.
- Economie d'une quantité importante d'énergie et réduction de l'émission des gaz à effet de serre et d'autres polluants atmosphériques émis lors de la fabrication du clinker.
- Accroissement de la sensibilisation du public au problème des déchets et des avantages du recyclage.
- Offre de nombreuses autres utilisations de produits recyclés à base de verre, sans compromis sur le coût ou la qualité.



Figure 2.13: le Tri de verre dans le processus de recyclage (source : www.syndicatvaldeloir.fr)

Les avantages économiques de la réutilisation des déchets de verre recyclés en production de ciment et de béton peuvent aussi être très importants. Aux États-Unis, la redevance de déversement aux sites d'enfouissement varie généralement de 40 \$ à 100 / tonne de déchets, tandis que les agrégats de béton coûtent environ \$ 5-15 / tonne. Les matériaux cimentaires supplémentaires coûtent environ 30-80 \$ / tonne. Le coût de broyage peut varier de 15 \$ à 30 / tonne en fonction de l'échelle de production.

2.11. Conclusion

Les études menées montrent qu'il existe un grand potentiel pour l'utilisation des déchets de verre dans le béton sous de nombreuses formes, à savoir comme agrégat fin, agrégat grossier et poudre de verre. Cette dernière forme fournira beaucoup plus de possibilités pour une valeur ajoutée et un amortissement des coûts, bien qu'elle puisse être utilisée comme une substitution à des matériaux coûteux tels que la fumée de silice, les cendres volantes et le ciment. L'utilisation de la poudre de verre finement broyé dans le béton réduira considérablement les Réaction Alkali-Silica (RAS). Un gain en résistance significatif dans le béton a été observé lors de l'utilisation de la poudre de verre. Les examens des microstructures ont également montré que la poudre de verre produit une matrice dense et améliore les propriétés de durabilité du béton. Des substitutions du ciment jusqu'à 23 % en poudre de verre peuvent être élaborées sans effets néfastes sur le matériau à long terme.

Chapitre 3

Objectif et méthodologie expérimentale

3.1. Introduction

Cette étude a pour objectif de formuler plusieurs bétons à base des différents ajouts et montrer l'influence de ces ajouts sur leurs comportements à l'état durci (caractéristiques physico-mécaniques). Nous décrivons dans ce qui suit les matériaux et essais tels que réalisés par Ablam ZIDOL (Université de Sherbrooke). Nous donnerons par la même occasion les matériaux et quelques essais réalisés au sein du laboratoire du département de génie civil de l'ENP. Les résultats obtenus serviront à titre comparatifs.

L'objectif réel de ce travail est de valoriser les matériaux cimentaires alternatifs dans le béton notamment la poudre de verre par rapport aux ajouts cimentaires dits classiques tels que les cendres volantes, le laitier etc ... Le taux de substitution varie entre 20 et 30% de la masse totale du liant.

Une caractérisation de tous les matériaux utilisés pour confectionner les bétons étudiés est donnée à savoir :

- Sable;
- Granulats;
- Ciment ;
- Laitier des hauts fourneaux ;
- Cendres volantes ;
- Poudre de verre ;
- Superplastifiant ;
- Entraîneur d'air ;
- Réducteur d'eau ;

3.2. Caractérisation des matériaux utilisés (36)

3.2.1. Le sable

Le sable utilisé pour les différents bétons est propre et présente les caractéristiques suivantes :

Tableau 3.1: Caractéristiques physiques du sable

CARACTERISTIQUES	
Densité	2.65
Coefficient Absorption	1.39 %
Module de finesse	2.5

3.2.2. Les granulats

Les granulats utilisés sont propres et présentent les propriétés suivantes :

Tableau 3.2: Caractéristiques physiques des granulats

CARACTERISTIQUES	
Densité	2.74
Coefficient Absorption	0.40
Diamètre gros granulat	20 mm

3.2.3. Le ciment

C'est un ciment canadien équivalent au CEMI (CPA) de finesse Blaine de $382 \text{ m}^2/\text{kg}$ et de densité de 3,15. La composition chimique d'un tel ciment est présentée au tableau (3.3).

Tableau 3.3:Composition chimique du ciment en %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PAF
20.43	4.7	2.92	62.39	1.81	3.53	0.95	0.18	2.51

3.2.4. Eau de gâchage

L'eau utilisée pour la formulation du béton est une eau potable des robinets.

3.2.5. Caractéristiques des ajouts cimentaire

3.2.5.1. Le laitier du haut fourneau

a- Description

Le laitier de haut fourneau est un déchet industriel broyé utilisé comme ajout cimentaire qui permet de confectionner de très bons bétons; il permet d'obtenir des bétons :

- ❖ Durables à résistances mécaniques élevées ;
- ❖ Résistants aux agressions chimiques et atmosphériques.



Figure 3.1: Le laitier du haut fourneau en poudre
(source : http://french.alibaba.com/promotion/promotion_ground-granulated-blast-furnace-slag-powder-promotion-list.html)

b- Caractéristiques techniques

Le laitier présente des propriétés qui sont résumées au tableau (3.4)

Tableau 3.4: Caractéristiques techniques du laitier

Densité	2,89
Finesse Blaine (m ² /kg)	526
Diamètre moyen (µm)	8,4

Chapitre 3: Objectif et méthodologie expérimentale

c- Propriétés et effets

Grâce à ses propriétés le laitier de haut fourneau permet :

❖ *Sur béton frais*

- ✓ D'améliorer la cohésion ;
- ✓ D'éviter le ressuyage et la ségrégation.

❖ *Sur béton durci*

- ✓ D'augmenter les résistances mécaniques ;
- ✓ D'obtenir des bétons possédant une excellente imperméabilité ;
- ✓ D'augmenter la résistance à l'érosion et à l'abrasion ;
- ✓ D'obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques ;
- ✓ D'améliorer la durabilité du béton.

d- Mode d'emploi

Le laitier doit être mélangé à sec avec le ciment, avant l'ajout de l'eau de gâchage, pendant une minute au moins. Après ajout de l'eau de gâchage on mélange encore pendant deux minutes au minimum. On malaxe ensuite jusqu'à homogénéisation du béton.

Tableau 3.5: Composition chimique du laitier de haut fourneau en %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PAF
37.79	7.83	0.66	40.33	10.32	0.65	0.44	0.19	0.81

3.2.5.2. les cendres volantes

a-Définition

Les cendres volantes sont des résidus industriels des centrales thermiques au charbon. Il existe cependant plusieurs types de cendres volantes selon qu'elles contiennent peu ou beaucoup de calcium, sous forme de CaO combiné aux silico-aluminates ou de chaux libre. En général, les cendres provenant de la combustion de la houille sont pauvres en chaux et sont appelées cendres de classe F, ou silico-alumineuses. Les cendres provenant de lignite sont riches en chaux et appartiennent à la classe C, ou calcique et sulfo-calciques.

Chapitre 3: Objectif et méthodologie expérimentale

Les cendres volantes de classe C sont principalement caractérisées par une haute teneur en oxyde $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$, supérieur à 50 % et par une teneur en CaO supérieure 10 %. Certaines de ces cendres volantes sont hydrauliques en plus de leur action pouzzolanique. Les cendres volantes de classe F sont principalement caractérisées par une haute teneur en oxyde $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$, supérieure à 70 % et par une teneur en CaO faible inférieur à 10 %. Les cendres volantes entrant dans cette catégorie n'ont pas de pouvoir liant proprement dit mais plutôt un potentiel pouzzolanique. (37) Les cendres volantes utilisées dans cette étude sont des cendres volantes classe F.



Figure 3.2: Les cendres volantes en poudre (source : http://www.crusherinc.com/fr/concasseur-de-pierre/images/fly_ash.jpg)

b- Caractéristiques techniques

Les cendres volantes présentent des propriétés qui sont résumées au tableau (3.6)

Tableau 3.6: Caractéristiques techniques des cendres volantes

Densité	2,36
Finesse Blaine (m^2/kg)	450
Diamètre moyen (μm)	9,2

c- Propriétés et effets

Grâce à leurs propriétés, les cendres volantes permettent :

❖ *Sur béton frais*

- ✓ D'améliorer la cohésion et la maniabilité;
- ✓ D'éviter le ressuyage et la ségrégation.

❖ *Sur béton durci*

- ✓ D'augmenter la compacité d'où les résistances mécaniques ;
- ✓ D'obtenir des bétons possédants une excellente imperméabilité ;
- ✓ D'obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques ;
- ✓ D'améliorer la durabilité du béton.

d- Mode d'emploi

Les cendres volantes doivent être mélangées à sec avec le ciment, avant l'ajout de l'eau de gâchage. Leurs propriétés chimiques sont données au tableau (3.7).

Tableau 3.7: Composition chimique des cendres volante en %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PAF
49.92	27.61	12.28	3.71	0.93	0.30	1.82	0.35	1.90

3.2.5.3. La poudre de verre

a-Description

Le verre est un matériau ou un alliage dur, fragile et transparent à la lumière visible. Il est constitué le plus souvent d'oxyde de silicium (silice SiO₂, le constituant principal du sable) et de fondants. Parmi tous les types de verre, le plus courant est le verre sodocalcique. Du point de vue physique, le verre est un matériau amorphe (c'est-à-dire non cristallin) présentant le phénomène de transition vitreuse. La poudre de verre est un ajout cimentaire obtenu par broyage du verre mixte (déchets de verre de différentes couleurs). (36)



Figure 3.3: La poudre de verre

b- Caractéristiques techniques

Les principales caractéristiques du verre sont résumées au tableau (3.8)

Tableau 3.8: Caractéristiques Techniques de la poudre de verre

Densité	2,54
Finesse Blaine (m ² /kg)	440
Diamètre moyen (µm)	10,9

c- Mode d'emploi

La poudre de verre doit être mélangée à sec avec le ciment, avant l'ajout de l'eau de gâchage.

Leurs propriétés chimiques sont données au tableau (3. 9)

Tableau 3.9: Composition chimique de la poudre de verre en %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PAF
72.66	1.57	0.39	11.41	1.24	0.07	0.54	12.89	0.38

3.2.6. Caractéristiques des adjuvants

➤ *le superplastifiant (PLASTOL 5000)*

Le superplastifiant utilisé dans la présente étude est le **PLASTOL 5000**. Le PLASTOL 5000 est un superplastifiant liquide pour le béton à base de polycarboxylate à haut degré de réduction d'eau. PLASTOL 5000 augmente les résistances initiale et ultime du béton. PLASTOL 5000 peut être utilisé pour augmenter l'affaissement du béton ou pour réduire de façon significative la demande en eau pour un affaissement particulier. PLASTOL 5000 peut être ajouté à l'usine ou au chantier et est compatible avec les autres adjuvants. PLASTOL 5000 ne contient pas d'ions de chlorure ajoutés (voir fiche technique en annexe A1)

➤ *L'entraîneur d'air (AIREX-L)*

AIREX-L est une solution liquide d'hydrocarbures utilisée comme agent entraîneur d'air pour le béton qui est conforme à la norme ASTM C 260. Lorsque AIREX-L est ajouté au mélange de béton, il produit un réseau de bulles d'air microscopiques qui demeure très stable dans le béton. L'entraînement d'air produit grâce à AIREX-L améliore la mise en place, la maniabilité et la durabilité du béton tout en minimisant le ressuage et la ségrégation. (voir fiche technique en annexe A2).

➤ *Le réducteur d'eau (EUCON DX)*

EUCON DX est un adjuvant liquide réducteur d'eau, prêt à l'emploi et qui renforce le béton. Il s'agit d'une solution aqueuse constituée d'acides hydroxycarboxyliques et d'un catalyseur qui procure une meilleure hydratation du liant (voir fiche technique en annexe A3).

3.3. Essai de compression (ASTM C39)

Les essais de compression ont été faits sur des éprouvettes cylindriques (100 mm × 200 mm) conformément à la norme ASTM C39. Cette norme requiert des échantillons de béton préparés qui seront placés sur la plaque inférieure d'une machine d'essai de compression et soigneusement alignés avec l'axe de charge (centré entre les plaques comme montré dans la figure). Lorsqu'un technicien commence un essai, une charge doit être appliquée sans choc à une vitesse de contrainte conforme à la norme. L'application de la force doit se poursuivre après le point de charge maximale jusqu'à ce que l'éprouvette montre une rupture bien définie. Les résultats seront bien détaillés dans le chapitre suivant.

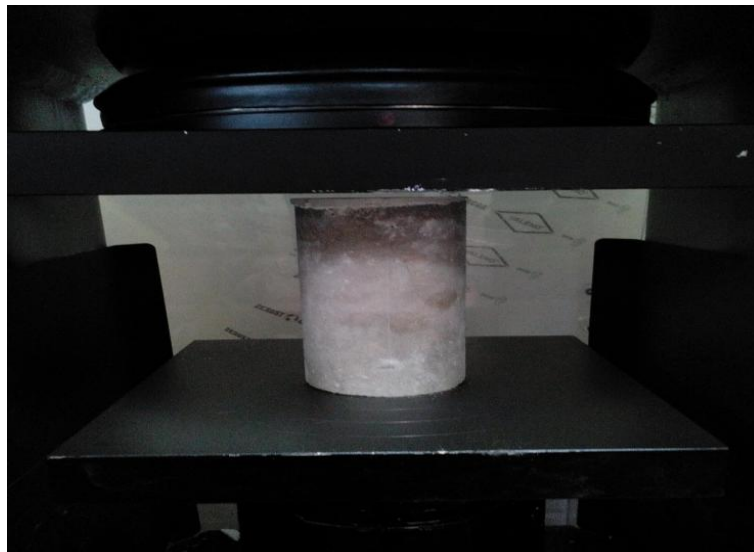


Figure 3.4: Essai de compression suivant la norme ASTM C39

3.4. Béton avec poudre de verre réalisé dans notre laboratoire

A titre indicatif on a essayé de reprendre la formulation de Ablam Zidol en optant pour un rapport de $E/L=0.55$ avec un dosage en ciment de 350 kg/m^3 pour un béton ordinaire et un béton avec une incorporation de 20 % de poudre de verre (Voir Annexe B) . Pour cela, on a collecté et broyé du verre de bouteilles vertes au laboratoire de génie minier de l'ENP. Le broyage d'une quantité de 1.7 Kg de poudre de verre nous a pris 3 jours vu qu'on n'a pas utilisé un véritable broyeur mais un concasseur d'abord pour ensuite procéder par un tamisage en retenant seulement les particules inférieures à $40 \mu\text{m}$ (dimension des plus petites ouvertures de tamis disponibles).

3.4.1. Caractérisation des matériaux utilisés

Les essais d'identification sur les matériaux utilisés ont donné les résultats suivants:

Chapitre 3: Objectif et méthodologie expérimentale

3.4.1.1. Granulats

Les granulats utilisés sont des granulats provenant de la carrière de Keddara et présentent les caractéristiques suivantes :

Tableau 3.10 : L'analyse granulométrique du gravier.

Poids de l'échantillon : 2000 g				
Ouverture des tamis (mm)	Poids (g)		Teneurs (%)	
	Refus	Refus cumulé	Refus cumulé	Tamisât cumulé
20	0	0	0	0
16	74	74	3.7	3.7
12.5	440	514	22	25.7
10	432	946	21.6	47.3
8	632	1578	31.6	78.9
6.3	344	1922	17.2	96.1
5	72	1994	3.6	99.7
2.5	6	2000	0.3	100

Tableau 3.11 : L'analyse granulométrique du sable.

Poids de l'échantillon : 2000 g				
Ouverture des tamis (mm)	Poids (g)		Teneurs (%)	
	Refus	Refus cumulé	Refus cumulé	Tamisât cumulé
5	10	10	0.5	0.5
2.5	366	376	18.3	18.8
1.25	528	904	26.4	45.2
0.63	436	1340	21.8	67
0.315	276	1616	13.8	80.8
0.16	146	1762	7.3	88.1
0.08	126	1888	6.3	94.4
Fond	112	2000	5.6	100

Chapitre 3: Objectif et méthodologie expérimentale

Tableau 3.12 : Masse volumique apparente des granulats.

Granulats	Gravier	Sable
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.295	1.43

Tableau 3.13 : Masse volumique absolue des granulats.

Granulats	Gravier	Sable
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.48	2.53

Tableau 3.14 : Résultat de l'essai de LA.

Critère	Valeur	Spécification
LA (%)	15	15-20 bon à moyen

Tableau 3.15 : Le module de finesse.

Critère	Valeur	Spécifications
Module de finesse (Mf)	3.0	2.8 < Mf < 3.2 sable grossier

Tableau 3.16 : Résultat de l'essai ES.

ES (%)	75	70 ≤ ES < 80 Sable propre - à faible pourcentage de fines argileuses Convenant Parfaitement pour les bétons de haute qualité.
--------	----	---

Chapitre 3: Objectif et méthodologie expérimentale

3.4.1.2. Ciment

Le ciment utilisé est un ciment CPJ (CEM II) provenant de la cimenterie de Meftah et présente les caractéristiques suivantes :

Tableau 3.17: Caractéristiques physiques du ciment

CARACTERISTIQUES	RESULTATS		UNITES
Consistance normale	28,2		%
Début de prise <<Dp>>	134		Mn
Fin de prise <<Fp>>	250		Mn
Densité	3,07		g/cm ³
SSB	3826		cm ² /g
Retrait	03 jours	181	µm /m
	07 jours	389	
	28 jours	600	

Tableau 3.18: Caractéristiques mécaniques du ciment

Resistance (MPa)	2j	7j	28j
Flexion	5,45	7,58	9,24
Compression	25,61	39,82	50,7

Chapitre 3: Objectif et méthodologie expérimentale

Tableau 3.19: Composition chimique

Elément	%
SiO ₂	19,16
Al ₂ O ₃	4,27
Fe ₂ O ₃	3,11
CaO	61,03
MgO	1,98
K ₂ O	0,50
Na ₂ O	0,06
SO ₃	2,14
CaOL	0,808
Cl ⁻	0,02234
Insolubles	1,09
P.A.F	7,45

Tableau 3.20: Composition minéralogique

Elément	%
C3S	56
C2S	20
C3A	05
C4AF	13
CaOL	01
Gypse	05
Calcaire	15

3.4.1.3. La poudre de verre :

La poudre de verre utilisée est issue du broyage du verre des bouteilles vertes, le diamètre maximal de ses particules est inférieur à 40 µm.

3.4.1.4. Eau de gâchage :

L'eau utilisée pour le gâchage est une eau potable du robinet de la ville d'Alger.

3.4.2. Confection et conservation des éprouvettes pour essais de compression

Six (6) éprouvettes cylindriques 100mm×200mm (3 éprouvettes témoins et 3 éprouvettes contenant la poudre de verre) ont été confectionnées dans le laboratoire de génie civil.

Chapitre 3: Objectif et méthodologie expérimentale

3.4.2.1. Préparation et remplissage des moules:

Les échantillons ont été serrés en trois couches.

3.4.2.2. Serrage du béton

Le serrage a été effectué manuellement à l'aide d'une tige de piquage, les coups appliqués par cette tige ont été uniformément repartis sur toute la section du récipient, il faut veiller à ce que la tige de piquage ne vienne pas en contact brutal avec le fond du récipient lors du serrage de la première couche, et ne pénètre pas sensiblement dans une couche précédente, Le béton doit être soumis à au moins 25 coups par couche, Après serrage de chaque couche, afin d'éliminer les bulles d'air emprisonné.

3.4.2.3. Arasement

Le béton se trouvant au dessus du bord supérieur du moule doit être enlevé au moyen d'une taloche, par un mouvement de sciage de l'extérieur vers l'intérieur, puis la surface doit être soigneusement arasée.

3.4.2.4. Marquage

Les éprouvettes doivent être marquées sans endommagement de façon claire et durable.

3.4.2.5. Conservation des éprouvettes:

Avant démoulage, les éprouvettes sont restées dans le moule protégées contre les chocs, les vibrations et la dessiccation pendant 24h à la température de $20\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$

Après démoulage, les éprouvettes ont été entreposées dans l'eau jusqu'au moment de l'essai, à une température de $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$. et marqué soigneusement en indiquant la date de l'essai et la nature de l'éprouvette (témoin ou contenant 20% de poudre de verre)

3.4.3. L'Essai de Compression (selon la norme ASTM C39)

Des essais de compressions conformément à la norme ASTM C39 à 28 jours sur ces éprouvettes ont été effectués, avant de commencer l'essai on a procédé par un surfaçage des éprouvettes en

Chapitre 3: Objectif et méthodologie expérimentale

utilisant une couche très mince de plâtre en remplacement du souffre (nouvelle méthode appliquées de nos jours) , et après pour la préparation et positionnement des éprouvettes on a :

- Essuyer les plateaux de la machine et retirer toute particule ou corps étranger.
- Centrer l'éprouvette sur le plateau inferieur avec une précision de $\pm 1,6\text{mm}$

Pour la mise en charge on a :

- Sélectionné une vitesse constante de chargement égale à 0.5 MPa/s .
- Appliqué la charge sans choc et l'accroitre de façon continue à la vitesse constante sélectionnée jusqu'a la rupture de l'éprouvette.
- Enregistré la contrainte maximale obtenue directement d'après la lecture sur la machine.

Les résultats obtenus seront présentés et discutés dans le prochain chapitre.

3.5. Conclusion

L'analyse des données a permis de collecter différents résultats qu'on interprétera au chapitre suivant consacré à leur traitement en traçant des courbes et des histogrammes pour montrer l'influence des paramètres étudiés.

Les essais réalisés au sein de notre laboratoire ont également permis d'avoir quelques résultats à propos de la résistance des bétons incorporant la poudre de verre à la compression.

Chapitre 4
Présentation
et Interprétation
des résultats

4.1. Introduction

Les essais réalisés dans le cadre de ce projet de recherche ont produit de nombreux résultats. Il est à signaler qu'il était question que des étudiants de l'ENP se rendent à l'Université de Sherbrooke (Canada) dans le cadre de la convention existant entre les deux institutions. Ce déplacement de trois à quatre mois aurait permis aux stagiaires d'effectuer différents essais sur plusieurs sortes de bétons et d'interpréter les résultats obtenus. Malheureusement n'ayant pu bénéficier de ce stage qui hélas était programmé, nous avons tenu à réaliser notre projet de fin d'études sur le thème qui nous a proposé en exploitant et interprétant les résultats obtenus par Ablam ZIDOL étudiant en Génie civil à l'Université de Sherbrooke. Les essais et résultats de A. ZIDOL sont présentés dans ce chapitre avec référence en annexes lorsque nécessaire. On s'intéressera essentiellement à la poudre de verre et son comportement au jeune âge et à long terme en indiquant les effets de la variation du rapport (E/L) et aussi l'influence du temps sur le développement des résistances ainsi que celle des adjuvants et leur contribution au gain de la résistance au jeune âge.

Nous avons exploité les résultats bruts de Zidol et nous avons procédé nous-mêmes à les représenter sous forme de courbes et diagrammes respectifs et à les interpréter.

4.2. Résultats des essais de compression (selon la norme ASTM C 39)

Les essais de compression ont été faits sur des éprouvettes cylindriques (100 mm × 200 mm) les résultats obtenus seront illustrés dans des histogrammes et des courbes tirés des tableaux (voir annexe C) et présentés en premier lieu en fonction de l'âge et dans une seconde étape en fonction du rapport (E/L).

Chapitre 4: Présentation et interprétation des résultats

4.2.1. En variant le temps

➤ Pour un rapport $E/L=0.65$

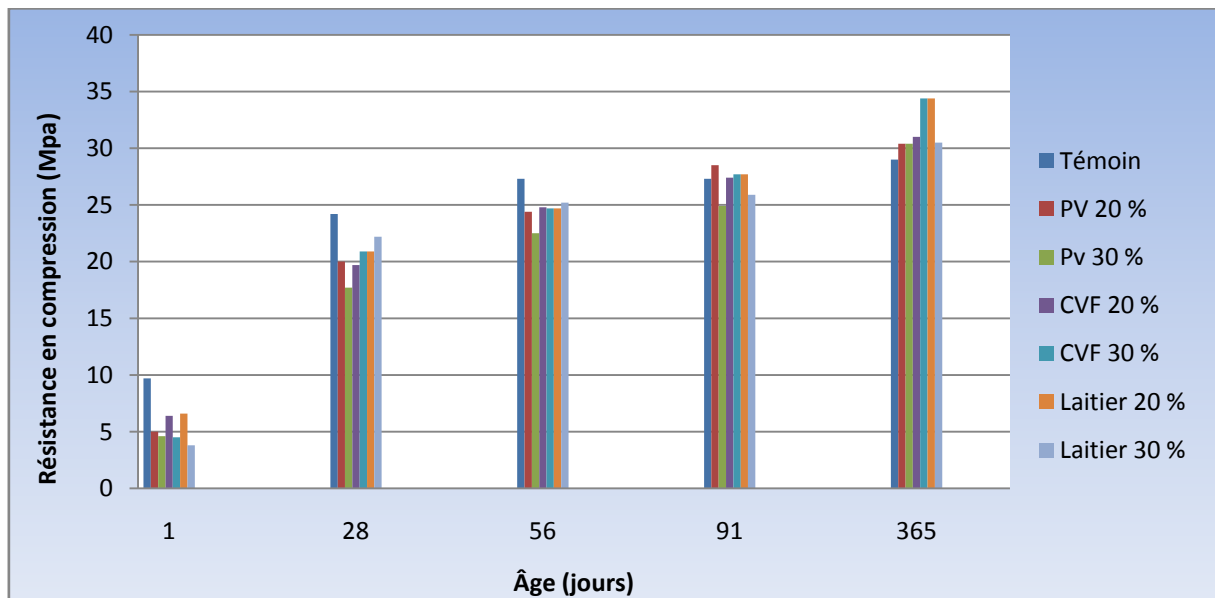


Figure 4.1.a : Histogrammes des résistances à la compression des différents bétons ($E/L=0.65$)

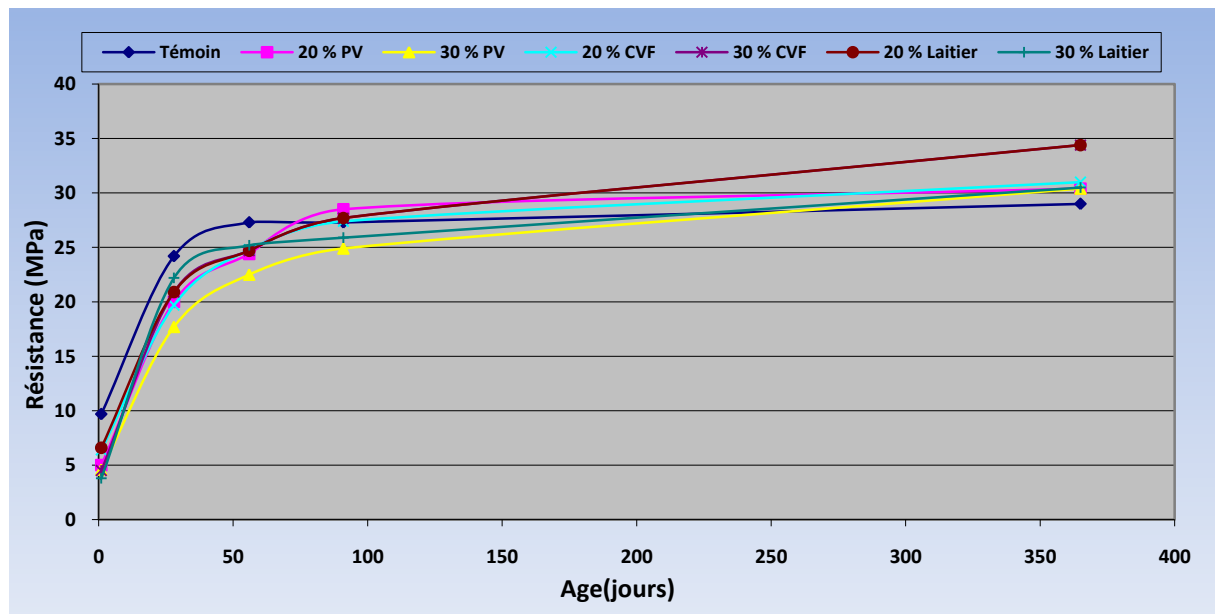


Figure 4. 1.b: Courbes des résistances à la compression des différents bétons ($E/L = 0,65$)

- Le comportement mécanique du béton avant 91 jours avec un remplacement du ciment de l'ordre de 20% de poudre de verre est meilleur que celui d'un béton avec un remplacement de 30%, mais à long terme on remarque que les résistances des deux sont presque les mêmes.

Chapitre 4: Présentation et interprétation des résultats

- Le comportement du béton avec 20% de poudre de verre et celui d'un béton avec 20 % de cendres volantes (classe F) sont presque similaires.

➤ Pour un rapport $E/L=0.55$

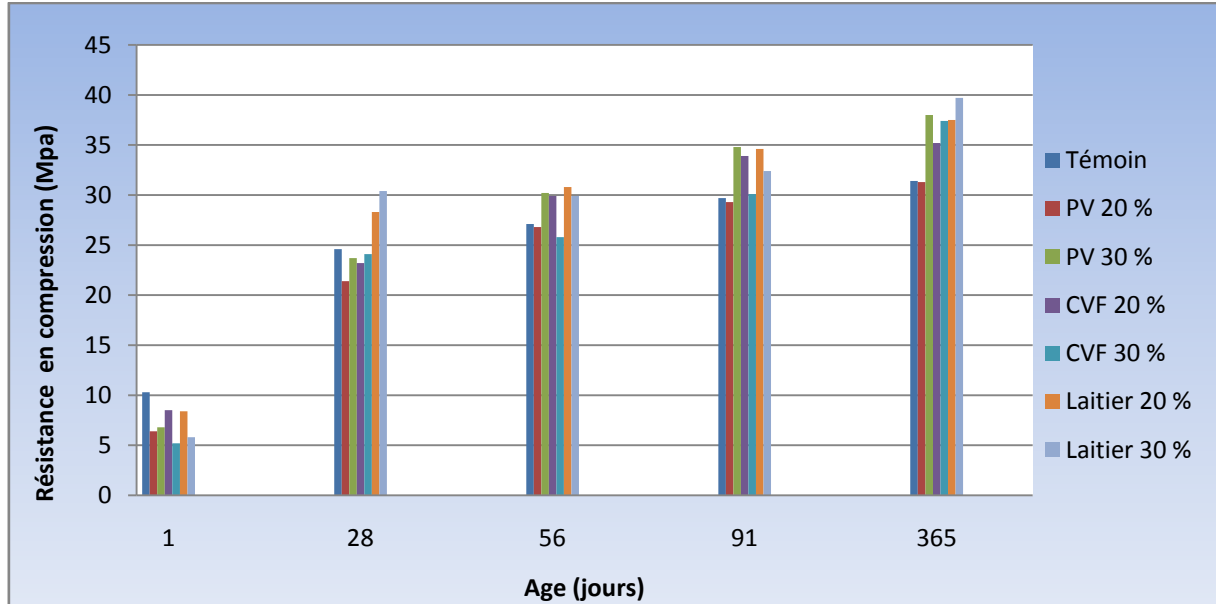


Figure 4.2.a: Histogrammes des résistances à la compression des différents bétons ($E/L = 0,55$)

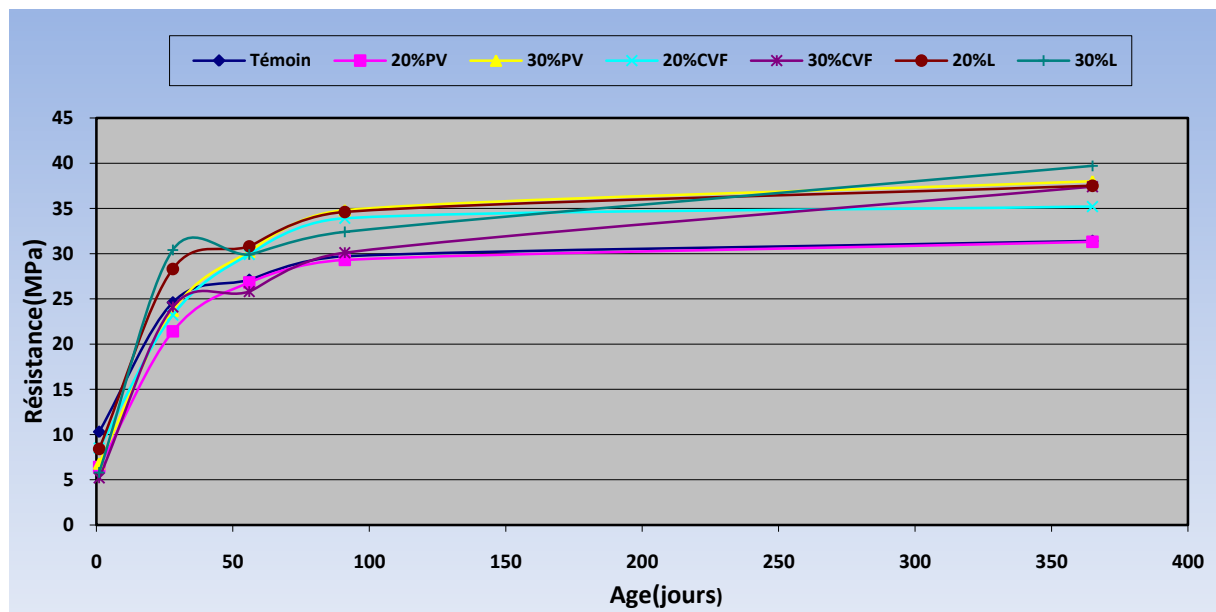


Figure 4. 2.b: Courbes des résistances à la compression des différents bétons ($E/L = 0,55$)

Chapitre 4: Présentation et interprétation des résultats

- Le comportement mécanique avant 91 jours et à long terme du béton avec un remplacement du ciment à hauteur de 30% par de la poudre de verre est meilleur que celui d'un béton avec un remplacement de 20%.
- Le comportement du béton avec 30% de poudre de verre et celui d'un béton avec 30% de cendres volantes (classe F) sont presque similaires.

➤ *Pour un rapport E/L compris entre 0.35 et 0.48*

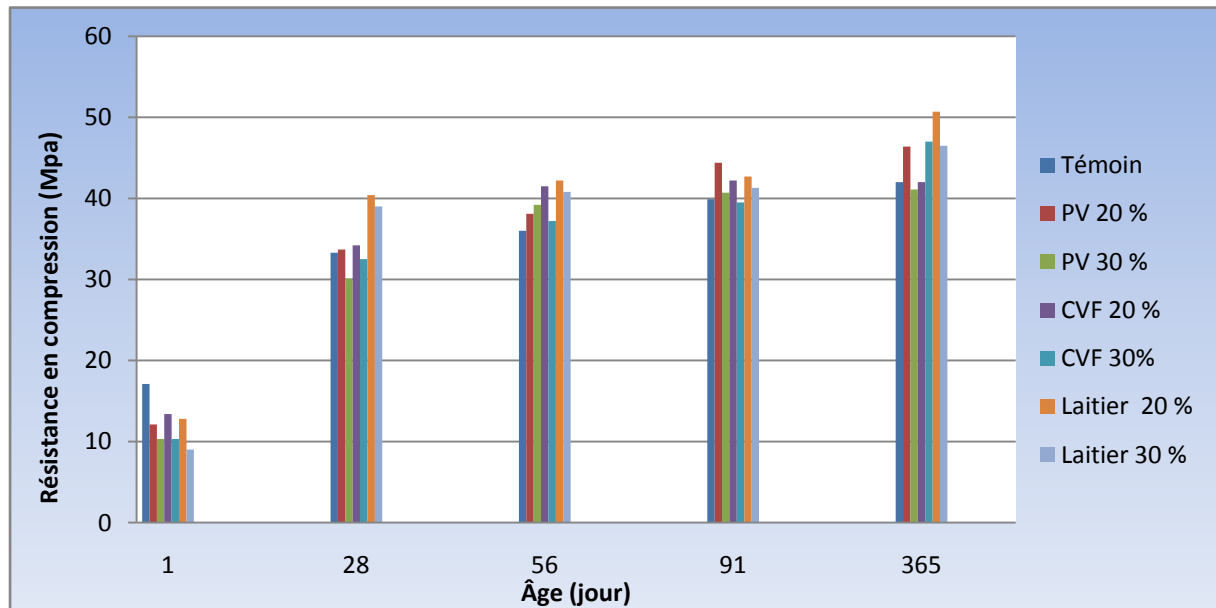


Figure 4.3.a: Histogrammes des résistances à la compression des différents bétons (E/L = 0,48)

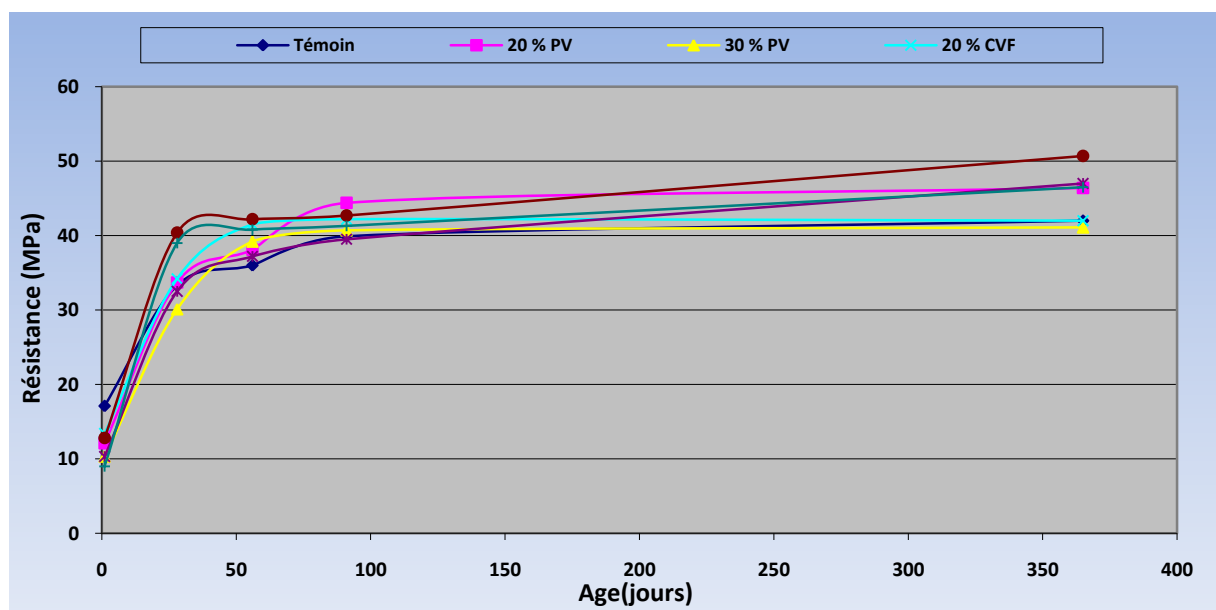


Figure 4.3.b : Courbes des résistances à la compression des différents bétons (E/L = 0,48)

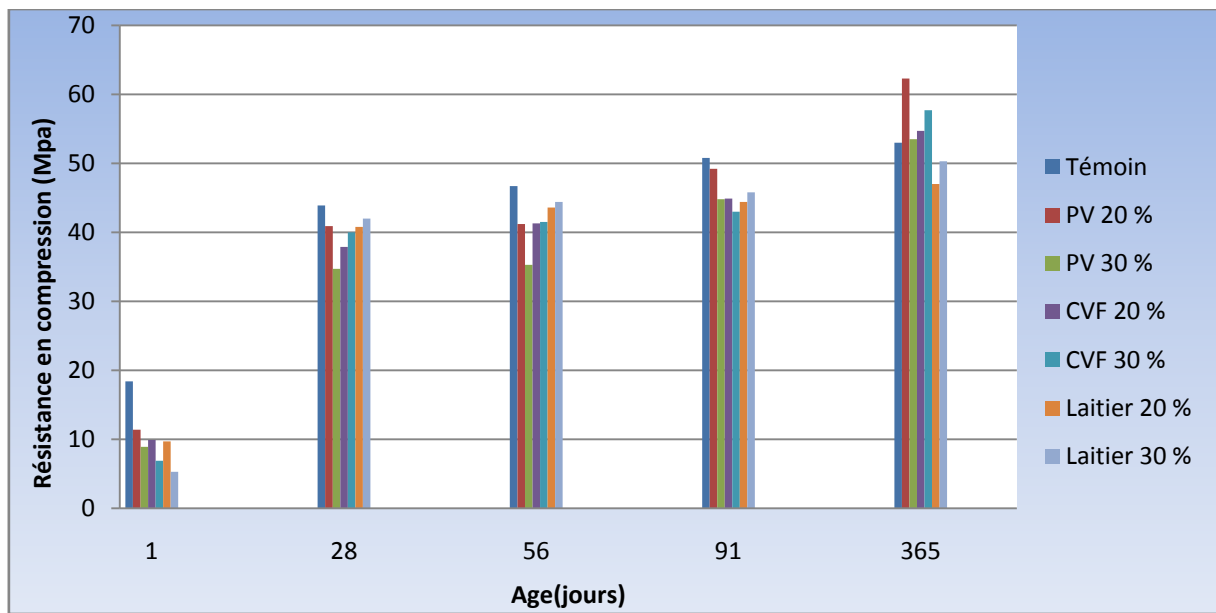


Figure 4.4.a: Histogrammes des résistances à la compression des différents bétons (E/L = 0,45)

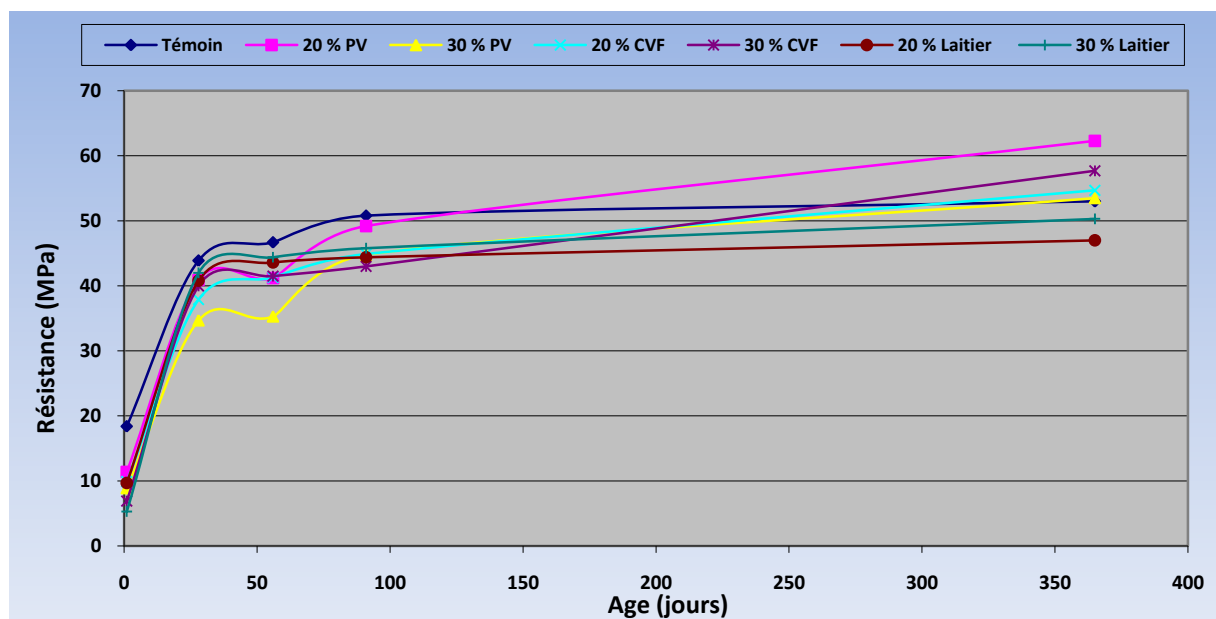


Figure 4.4.b: Courbes des résistances à la compression des différents bétons (E/L = 0,45)

Chapitre 4: Présentation et interprétation des résultats

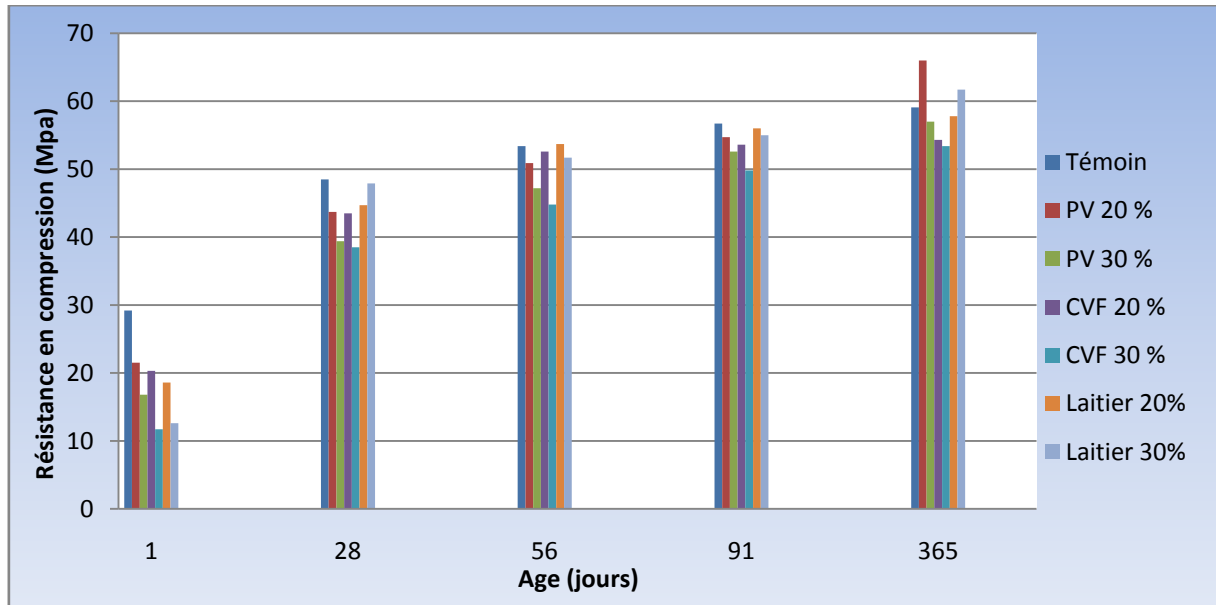


Figure 4.5.a: Histogrammes des résistances à la compression des différents bétons (E/L = 0,40)

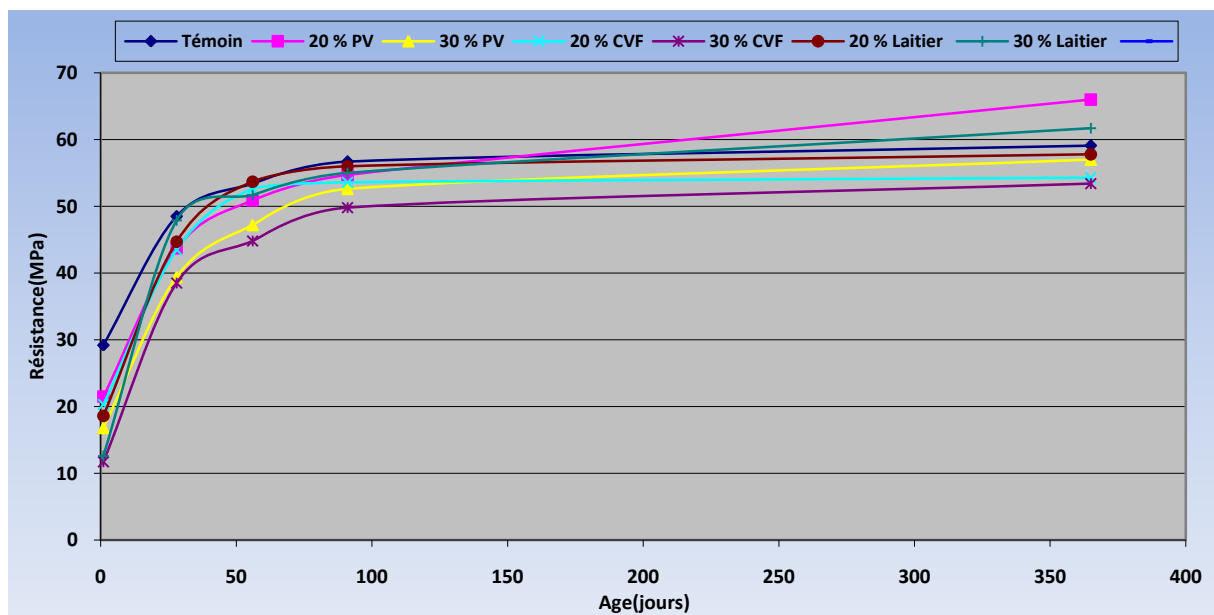


Figure 4.5. b: Courbes des résistances à la compression des différents bétons (E/L = 0,40)

Chapitre 4: Présentation et interprétation des résultats

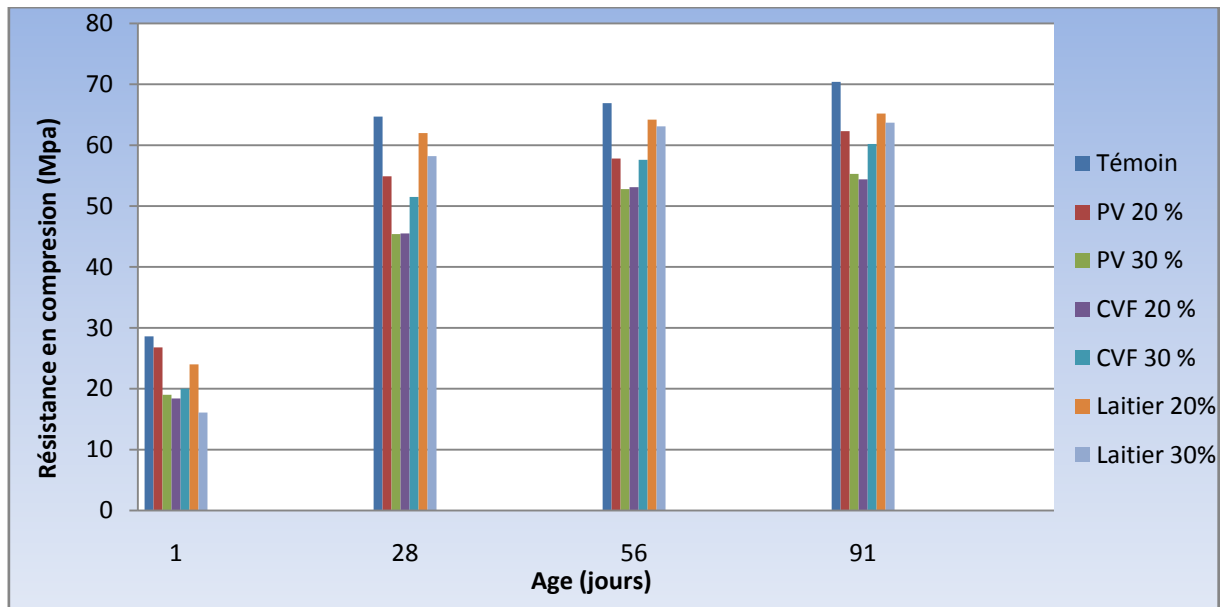


Figure 4.6.a: Histogrammes des résistances à la compression des différents bétons (E/L = 0,35)

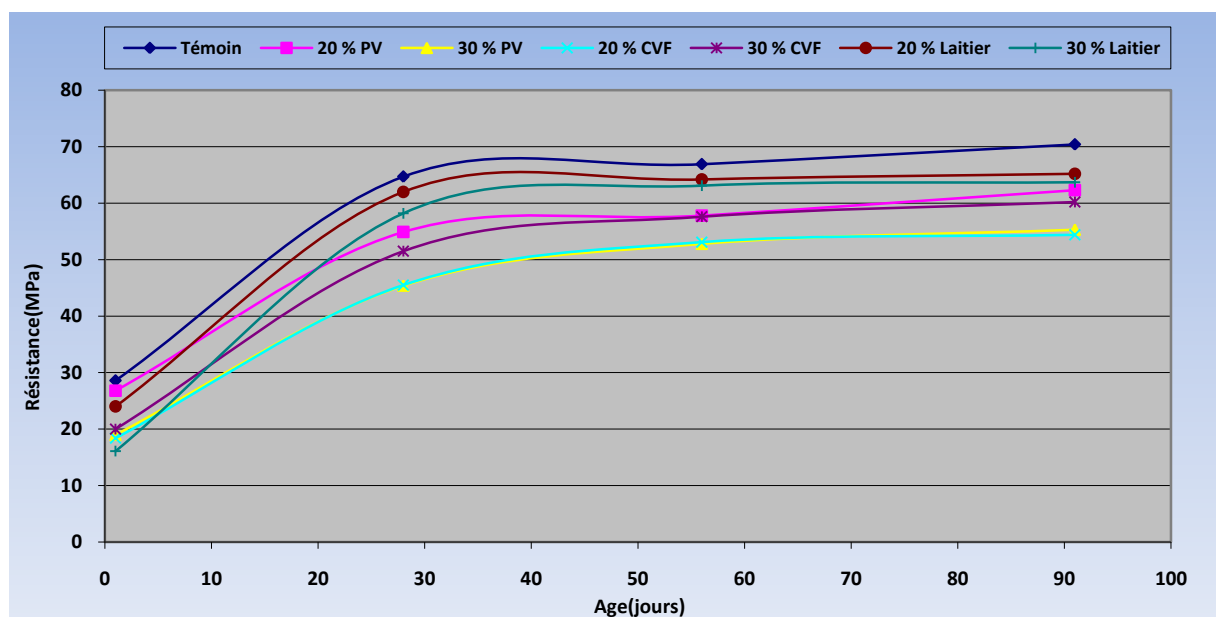


Figure 4.6. b: Courbes des résistances à la compression des différents bétons (E/L = 0,35)

- le comportement mécanique au jeune âge et à long terme du béton avec un remplacement du ciment de l'ordre de 20% par de la poudre de verre est meilleur que celui d'un béton avec une substitution de 30% en poudre de verre.
- L'incorporation de 20% de poudre de verre et en utilisant un E/L=0.35 donnent un béton dont la résistance à la compression est la plus élevée à 91 jours

Chapitre 4: Présentation et interprétation des résultats

- Pour un remplacement de 20% et un E/L compris entre 0.40 et 0.45 on note que la résistance du béton élaboré mesurée entre 120 jours et 365 jours est légèrement élevée par rapport aux autres bétons (béton témoin et les bétons à base de différents ajouts : cendres volantes classe F ou laitier).
- Pour un rapport E/L= 0.48 la résistance du béton avec laitier est supérieure à celle du béton avec poudre de verre à long terme. Par contre pour un rapport $E/L \leq 0.45$ la résistance du béton avec poudre de verre est supérieure à celle du béton avec laitier.

4.2.2. En variant le rapport (E/L)

➤ Pour $t=1$ jour

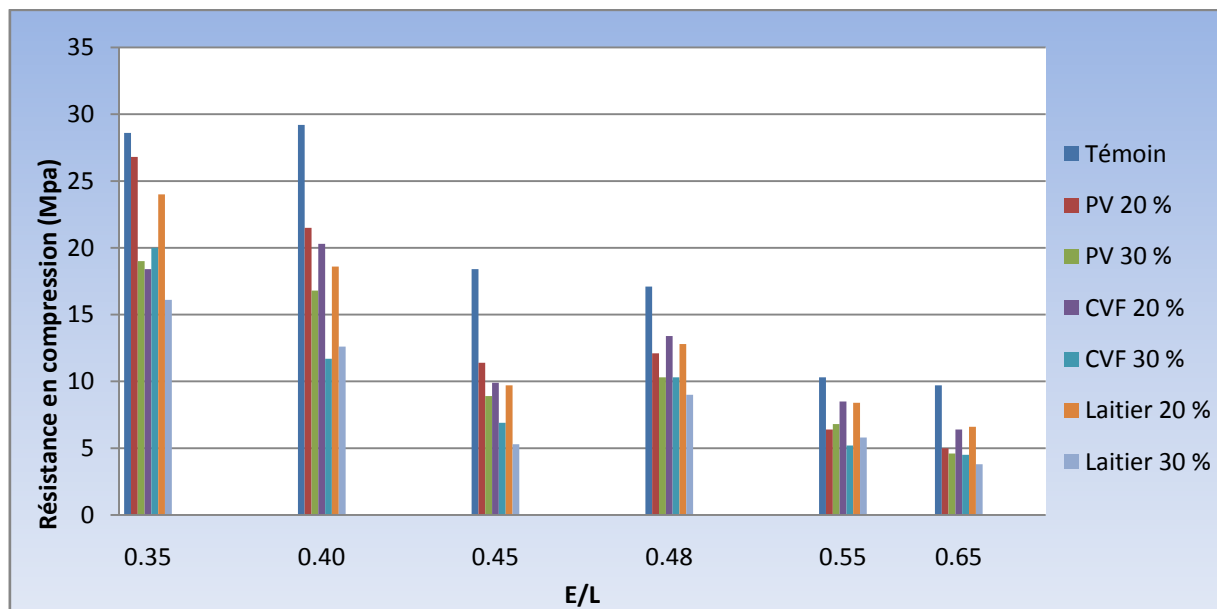


Figure 4.7.a : Histogrammes des résistances à la compression des différents bétons (t=1 jour)

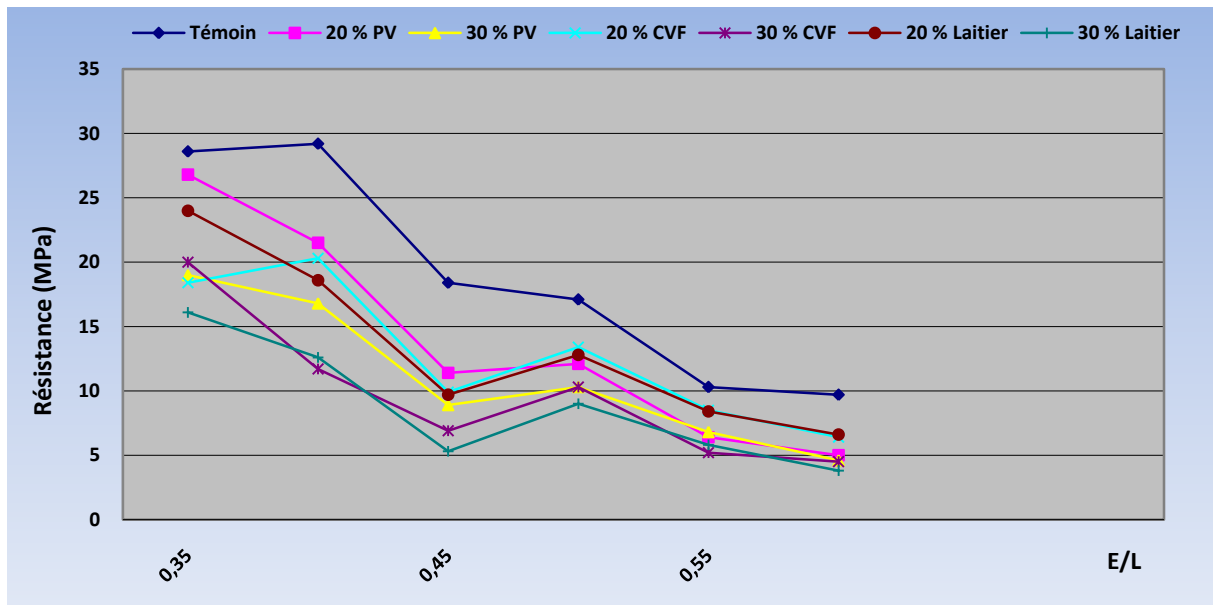


Figure 4.7. b: Courbes des résistances à la compression des différents bétons ($t=1$ jour)

- Les résistances des bétons contenant (20% et 30%) de poudre de verre diminuent avec l'augmentation de E/L et inversement en diminuant (E/L). La résistance augmente jusqu'à atteindre ses valeurs maximales pour un rapport E/L de l'ordre de 0.35, cela est aussi observé pour les autres bétons avec différents ajouts.
- Le béton à la poudre de verre (20%) a un comportement presque similaire que celui d'un béton à base de 30 % des cendres volantes (classe F) pour des grands rapports E/L (supérieur à 0.48) mais pour des rapports relativement petits Le béton à la poudre de verre (20%) se comporte mieux et présente une meilleure résistance.
- Le béton à base de (20%) de laitier a des résistances presque similaires au béton à base de (20%) des cendres volantes classe F ,sauf pour un rapport $E/L = 0.35$ où la résistance du béton avec laitier est nettement meilleure.
- Le béton témoin présente la meilleure résistance par rapport aux autres bétons quelque soit le rapport E/L .
- Le rapport $E/L = 0.48$ représente un cas particulier où les résistances des bétons avec ajouts cimentaires dépassent celles des bétons avec $E/L = 0.45$.
- Les résistances des bétons avec 20 % de poudre de verre pour différents E/L varient entre 4 et 27 MPa

Chapitre 4: Présentation et interprétation des résultats

➤ Pour $t = 28$ jours

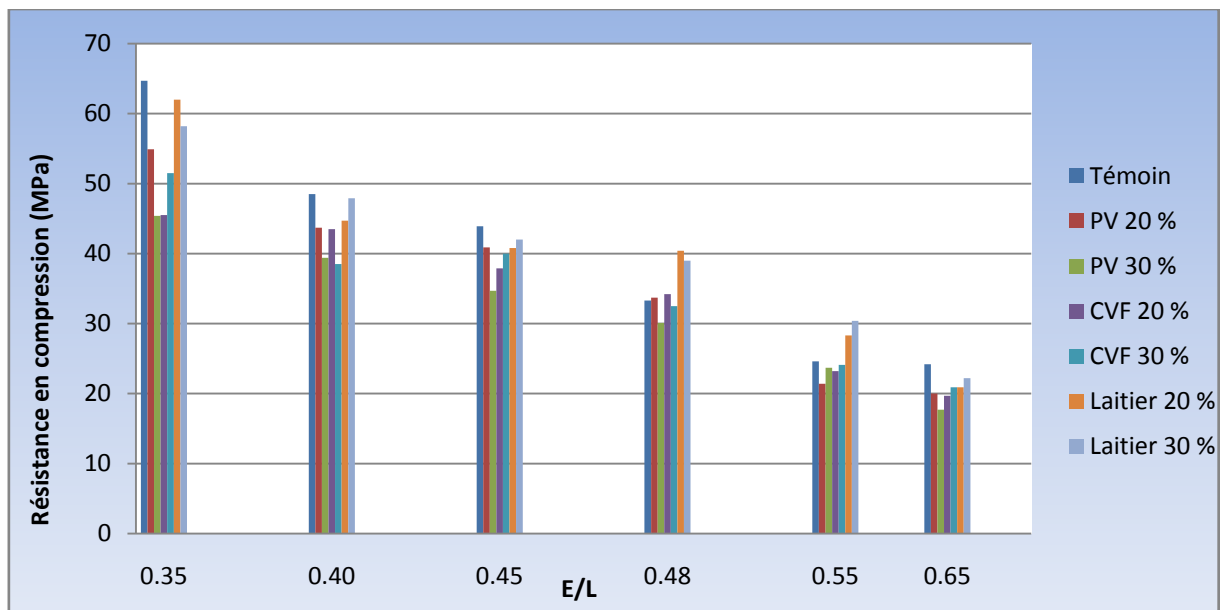


Figure 4.8.a: Histogrammes des résistances à la compression des différents bétons (t=28 jours)

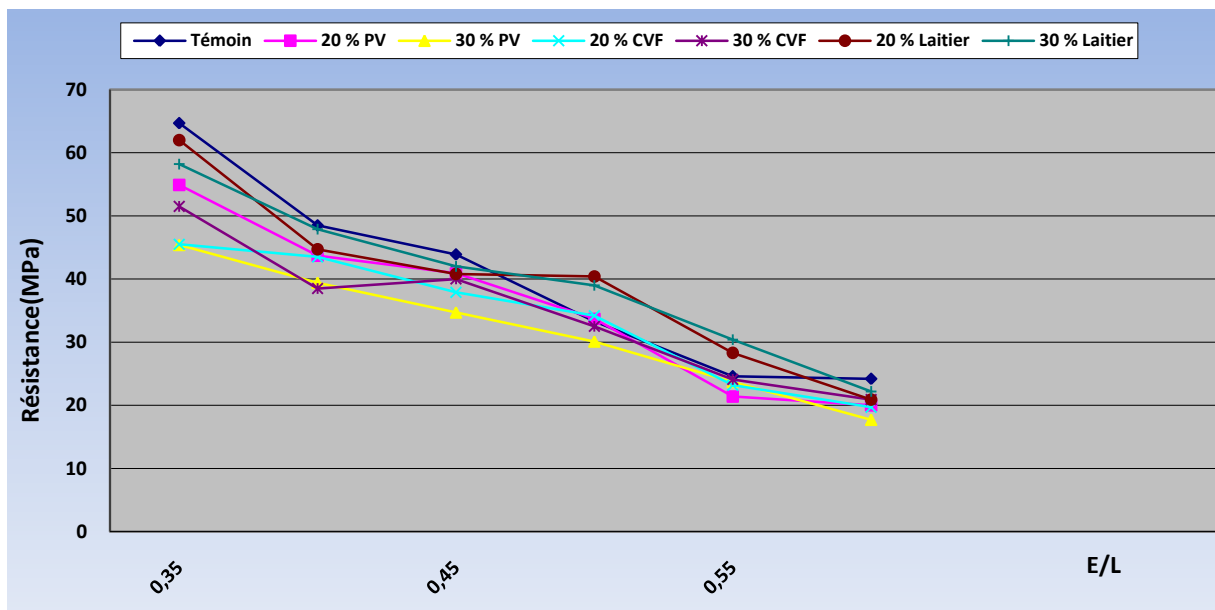


Figure 4.8.b: Courbes des résistances à la compression des différents bétons (t=28 jours)

- Le béton témoin a la meilleure résistance pour différents rapports de E/L sauf pour les rapports $E/L = 0.48$ et $E/L = 0.55$.
- Pour un E/L de l'ordre de 0.55 le béton avec 30 % de poudre de verre ajouté, a une meilleure résistance que celle avec 20 % seulement.

Chapitre 4: Présentation et interprétation des résultats

- Le béton avec 20 % de cendres volantes (classe F) a un comportement presque similaire à celui avec 20 % de poudre de verre sauf pour un rapport E/L de l'ordre de 0.35.
- Pour un rapport de E/L égal à 0.55 et 0.48 le béton avec laitier comme ajout cimentaire présente la meilleure résistance.
- Pour le rapport E/L = 0.55 et E/L = 0.35 les bétons avec 20 % de cendres volantes classe F ont des résistances similaires à celle du béton avec 30 % de poudre de verre.
- Les résistances des bétons avec 20 % de poudre de verre varient entre 20 et 54 MPa pour les différents rapports de E/L.

➤ Pour t = 56 jours

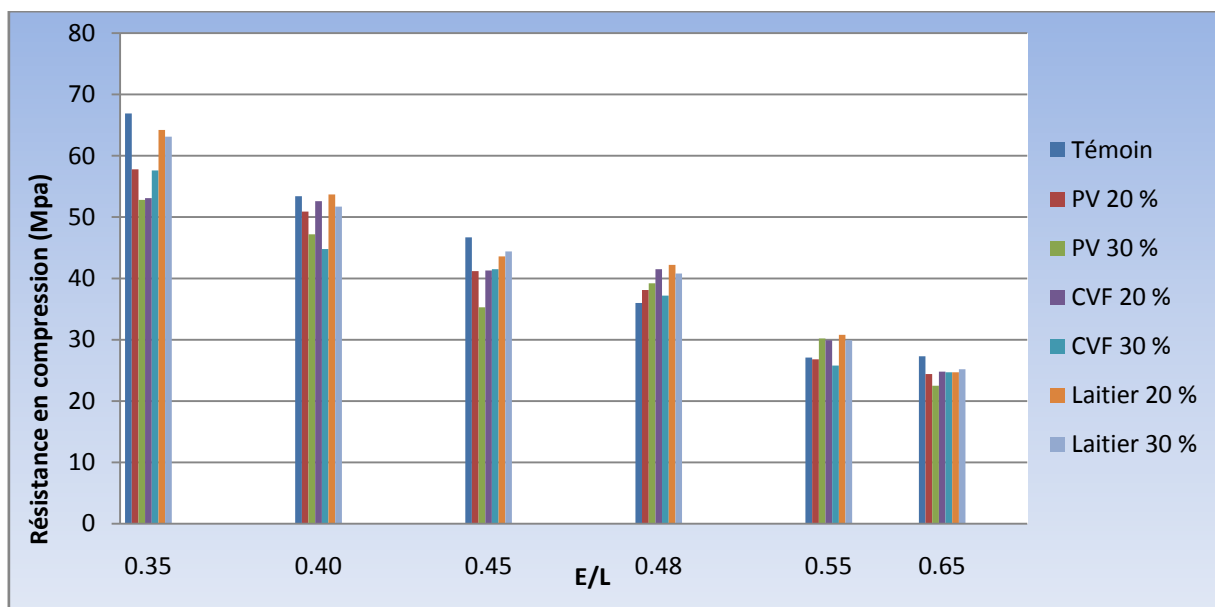


Figure 4.9.a: Histogrammes des résistances à la compression des différents bétons (t=56 jours)

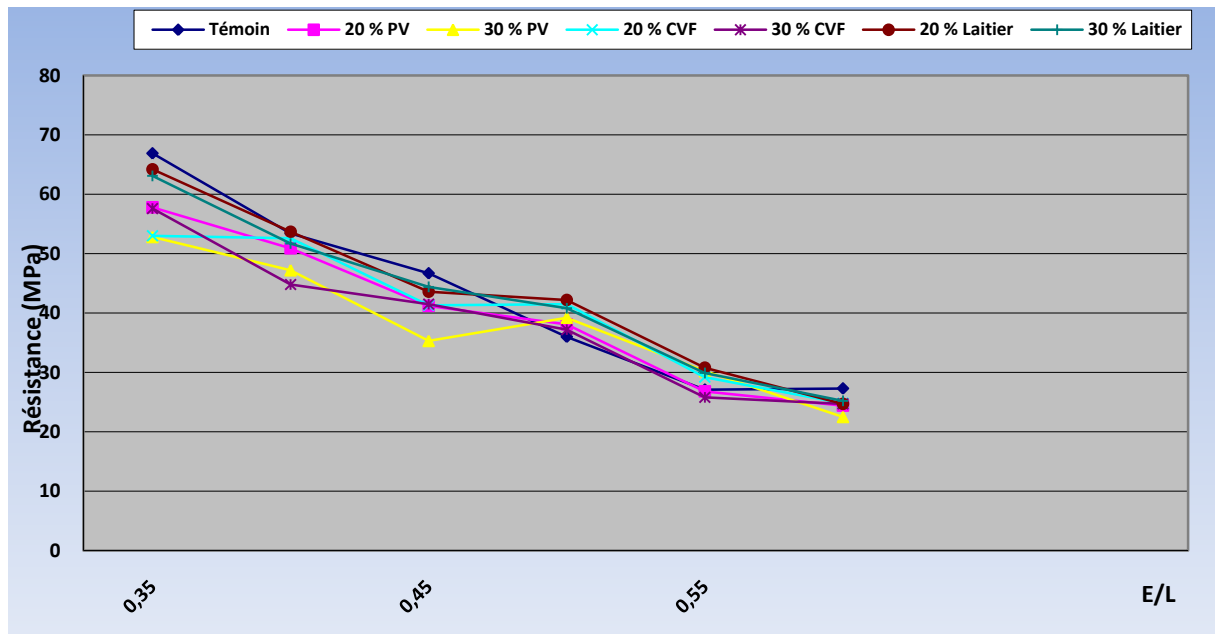


Figure 4.9. b: Courbes des résistances à la compression des différents bétons (t=56 jours)

- Le béton témoin a la meilleure résistance pour différents rapports de E/L sauf pour les rapports $E/L = 0.48$ et $E/L = 0.55$.
- Pour un rapport de $E/L = 0.65$ les différents bétons avec ajouts cimentaires ont tous presque les mêmes résistances.
- Pour un E/L de l'ordre de 0.55 et 0.48 le béton avec 30 % de poudre de verre ajouté, a une meilleure résistance que celle avec 20 % seulement.
- Pour un rapport d'E/L égal à 0.55 et 0.48 le béton avec 20 % de laitier comme ajout cimentaire présente la meilleure résistance.
- Pour le rapport $E/L = 0.55$ et $E/L = 0.35$ les bétons avec 20 % de cendres volantes (classe F) ont des résistances similaires à celle du béton avec 30 % de poudre de verre.
- Les résistances des bétons avec 20 % de poudre de verre varient entre 24 et 57 MPa.

Chapitre 4: Présentation et interprétation des résultats

➤ Pour $T=91$ jours

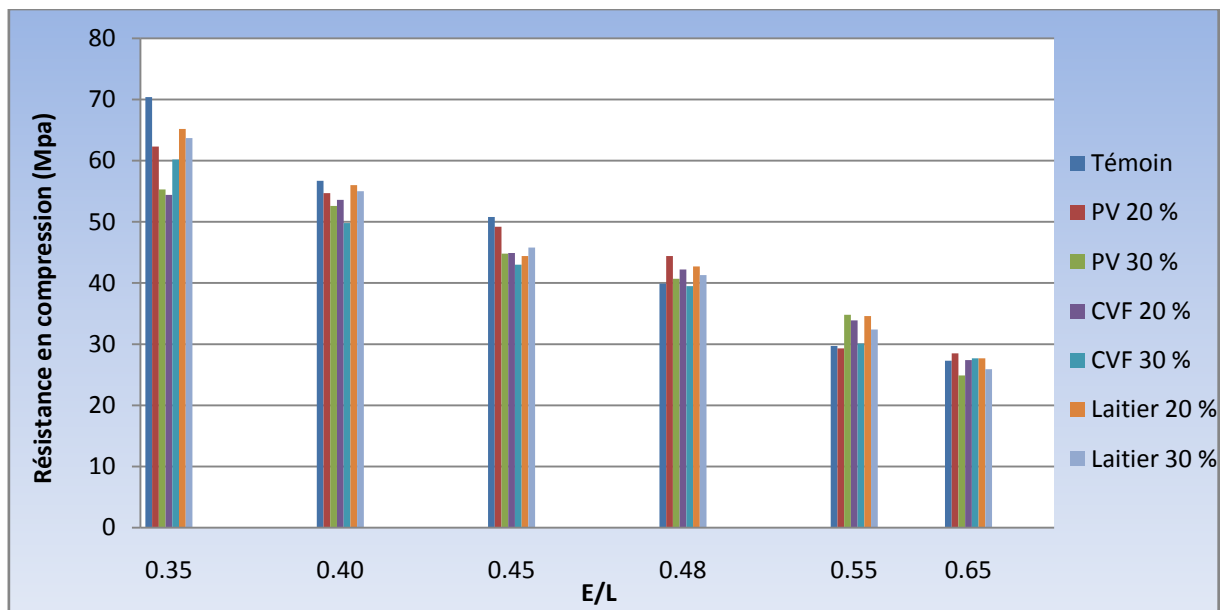


Figure 4.10.a: Histogrammes des résistances à la compression des différents bétons($t=91$ jours)

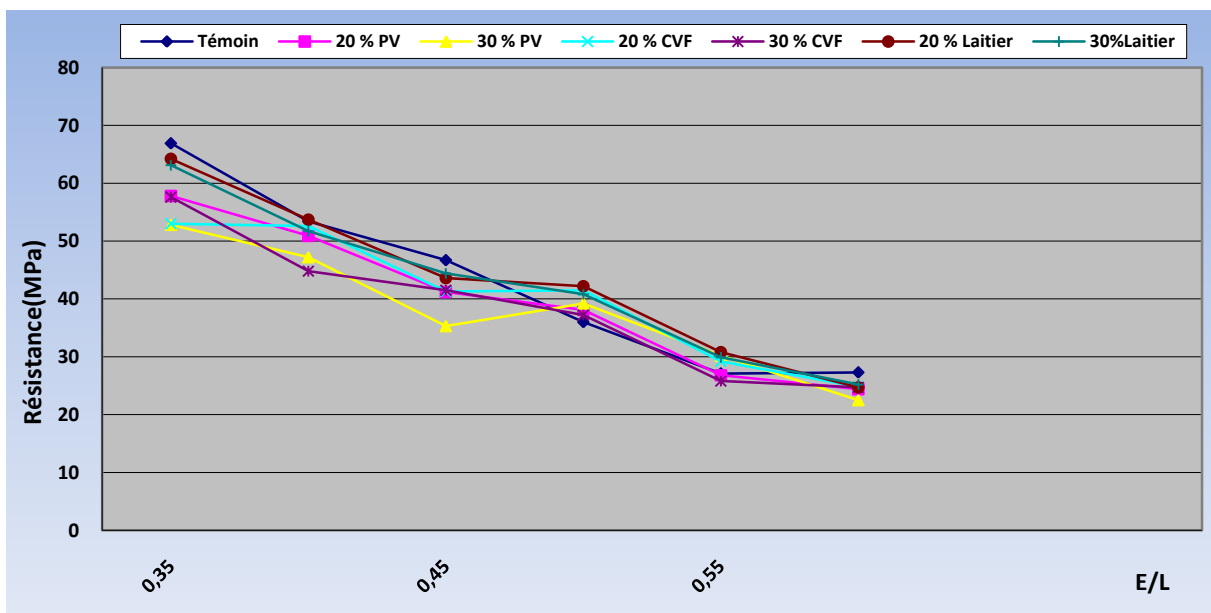


Figure 4.10. b: Courbes des résistances à la compression des différents bétons ($t=91$ jours)

- Les résistances des bétons à la poudre de verre (20% et 30%) augmentent lorsque le rapport (E/L) diminue, elles atteignent leurs valeurs maximales pour un rapport E/L de l'ordre de 0,35.

Chapitre 4: Présentation et interprétation des résultats

- La résistance du béton incorporant (20%) de poudre de verre est supérieure à celle d'un béton avec 30% de remplacement, pour $E/L=0.35$; 0.40 ; 0.45 ; 0.48 et 0.65.
- Le béton contenant (30%) de poudre de verre a un comportement presque similaire à celui d'un béton avec 20 % des cendres volantes (classe F) pour les différents rapports E/L .
- Pour des rapport E/L inférieurs à 0.45 la résistance du béton témoin est supérieur à celle des autres bétons par contre pour des rapports supérieurs ou égal à 0.45 la résistance du béton témoin est cependant inférieure.
- La résistance du béton avec 20% de poudre de verre est inférieure à celle d'un béton avec 20% et 30% du laitier pour des rapports $E/L = 0.35$; 0.40 et 0.55, elle est cependant supérieure pour des rapports $E/L=0.45$; 0.48 et 0.65.
- Les comportements des différents bétons sont presque similaire pour un rapport $E/L = 0.65$.
- Les résistances pour différents rapports E/L des bétons avec 20 % de poudre de verre se situent entre 28 et 63 MPa.

4.3. Interprétation des résultats

4.3.1. Influence du rapport Eau/Liant (E/L)

Le paramètre le plus communément utilisé pour prévoir la résistance en compression est le rapport eau/liant. La résistance d'un béton bien compacté apparait comme étant inversement proportionnelle au rapport eau/liant. L'évolution des résistances à la compression en fonction du rapport E/L est schématisée par les figures (4.1-4.6).

Ces figures montrent que la diminution du rapport E/L influe significativement la résistance en compression. On constate pour le BPV 20% avec un rapport ($E/L = 0,35$) un gain de résistance en compression de 18 %, 57 %, 55%, 76% et 81% par rapport aux BPV20% avec les rapport ($E/L = 0,4$), ($E/L = 0,45$), ($E/L = 0,48$), ($E/L = 0,55$) et ($E/L = 0,65$) respectivement à 1 jour.

A 28 jours, le BPV20% ($E/C = 0,35$) présente des augmentations en résistance de 20 , 25, 38, 61 et 64% par rapport aux BPV 20% avec rapports E/L de 0.40, 0.45, 0.48, 0.55 et 0,65 respectivement.

Chapitre 4: Présentation et interprétation des résultats

Les mesures réalisées à l'échéance de 90 jours fournissent quant à elles une résistance supérieure pour le BPV20% avec un rapport ($E/L = 0,35/ 62.3$ MPa) par rapport à celles des rapports ($E/L = 0,4/ 54.7$ MPa) , ($E/L = 0,45/ 49.2$ MPa), ($E/L = 0,48/ 44.4$ MPa), ($E/L = 0,55/ 29.3$ MPa) et ($E/L = 0,65/ 28.5$ MPA).

Cette amélioration de résistance est due principalement à la diminution de la quantité d'eau libre, à l'augmentation de la quantité de liant et à l'utilisation du superplastifiant et des entraîneurs d'air. Il en résulte donc une grande densification du gel. De plus, la présence de fines (les ajouts dont le D_{max} est inférieur à $38\mu m$) permet un meilleur arrangement de la structure granulaire et donc autorise l'obtention d'une plus grande compacité par rapport au béton ordinaire.

4.3.2. Influence de l'âge

L'évolution des résistances à la compression en fonction du temps est schématisée par les figures (4.7- 4.10).

Avant 28 jours l'évolution de la résistance des bétons à base des ajouts (poudre de verre, cendres volantes ...etc) est lente par rapport au béton ordinaire qui atteint presque 80% de sa résistance maximale ceci est due principalement à :

- La diminution de la quantité de ciment (une diminution de 20% ou 30%) dans les bétons à base d'ajouts ce qui implique un taux d'hydratation faible par rapport au BO (seuls les 80% ou 70% du liant qui vont s'hydrater).
- La formation d'une couche acide autour des grains de l'ajout cimentaire incorporés empêchant ce dernier de s'hydrater

Après 28 jours l'évolution de la résistance des bétons à base des ajouts (poudre de verre, cendres volantes ou le laitier) devient plus rapide par rapport au BO qui reste presque stable ceci est du due principalement à la portlandite ($Ca(OH)_2$) : la portlandite libérée pendant l'hydratation du ciment Portland a un caractère basique va dissoudre cette couche acide et tentera de la neutraliser, elle entre ainsi en réaction (la réaction pouzzolanique) avec les composants de l'ajout (sa partie vitreuse), pour former le CSH secondaire C'est une réaction retardée car l'action pouzzolanique des ajouts cimentaires est lente et ne se produit que tardivement.

Chapitre 4: Présentation et interprétation des résultats

4.3.3. Influence des adjuvants

Le réducteur d'eau, constitué d'acides hydroxycarboxyliques et d'un catalyseur procure une meilleure hydratation du liant.

L'entraîneur d'air est ajouté au mélange du béton, il produit un réseau de bulles d'air microscopiques qui demeurent très stable dans le béton, il améliore la mise en place, la maniabilité et la durabilité du béton tout en minimisant le ressuage et la ségrégation.

Le superplastifiant augmente les résistances initiale (au jeune âge) et rend possible la production de béton avec un faible rapport eau/liant ce qui explique l'ajout du superplastifiant pour les rapports ($E/L = 0.35$ et $E/L=0.40$).

4.3.4. Influence de la nature d'ajout cimentaire

L'évolution de la résistance des bétons à base de laitier est plus rapide par rapport aux autres bétons avec ajouts cimentaires cela est due au fait que le laitier a presque la même composition chimique que le ciment.

Les bétons avec poudre de verre n'atteignent pas de grandes résistances au jeune âge par rapport aux bétons ordinaires mais produisent des résistances satisfaisantes à moyen et à long terme, cela est du au fait que les réactions pouzzolaniques tardent à avoir lieu et ne se déclencherons qu'après la première hydratation du ciment.

4.4. Discussion des résultats des essais réalisés au sein de notre laboratoire

Nous avons réalisé quelques essais au niveau du laboratoire de Génie civil de l'ENP à titre comparatif. Nous avons broyé du verre à 40 micron et nous l'avons incorporé dans le béton à 20% de substitution au ciment et confectionné des éprouvettes avec des matériaux algériens.

Les essais de compression sur les éprouvettes cylindriques ont donné les résultats suivants après avoir pris la moyenne de trois (3) éprouvettes :

Tableau 4.1: Résultats des essais de compression

Composition	0 % PV (100 % Ciment)	20 % PV (80% Ciment)
Résistance en compression	22.51 Mpa	21.1 Mpa

Chapitre 4: Présentation et interprétation des résultats

En se référant aux travaux de [Zidol,2014], on remarque que les résultats obtenus d'après nos essais sont presque identiques avec juste un léger décalage du probablement à la différence des propriétés et les conditions de stockage des matériaux utilisés .

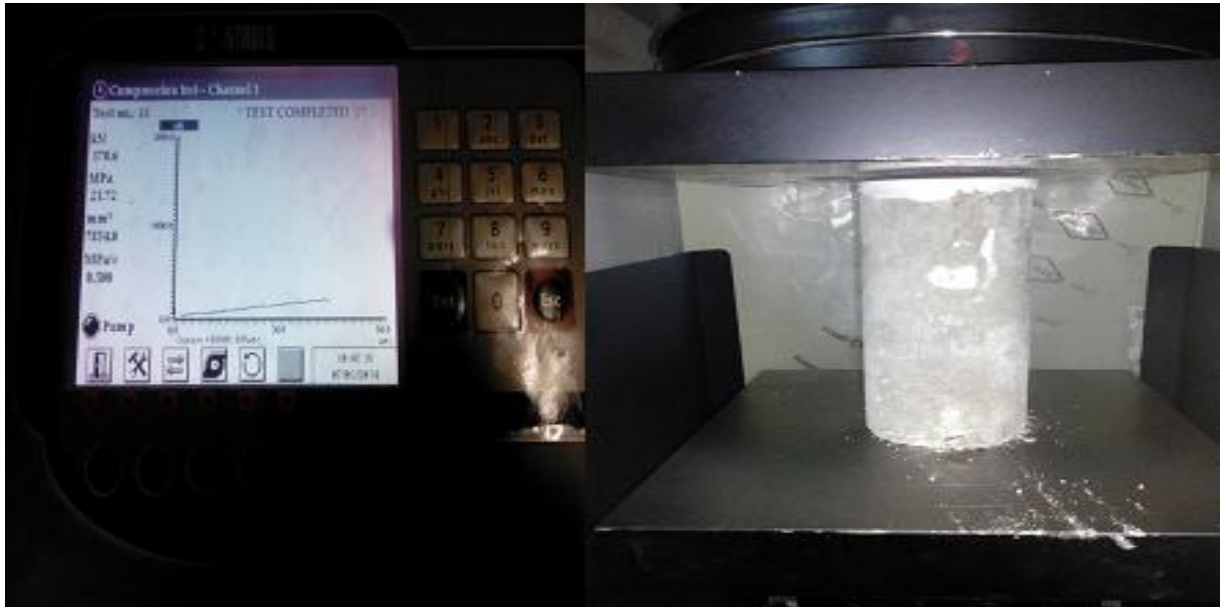


Figure 4.11: Essai de compression sur les éprouvettes cylindriques (200 mm ×100mm)

Il faut aussi signaler que le ciment que nous avons utilisé n'est pas un ciment portland à 100 % (CEMI) mais un CEMII (Ciment CPJ qui contient déjà des ajouts) et malgré cela, les résistances obtenues pour notre béton avec poudre de verre sont presque similaires aux résistances obtenues lors de l'utilisation du ciment 100 % clinker par Zidol.



Figure 4.12: Les Eprouvettes cylindriques après l'essai de compression

Chapitre 4: Présentation et interprétation des résultats

Grâce aux réactions pouzzolaniques relativement tardives, on prédit un gain important en résistance à moyen terme pour les bétons avec poudre de verre, l'ajout des superplastifiant peut rester envisageable pour atteindre les résultats recherchés à jeune âge.

4.5. Conclusion

D'après les résultats obtenus on peut déduire que le comportement mécanique des bétons avec poudre de verre est similaire aux bétons avec cendres volantes (classe F), l'effet des réactions pouzzolaniques des matériaux cimentaires induisant la seconde hydratation du liant n'est apparente qu'à moyen terme. Il faut aussi noter que le laitier réagit légèrement avant les autres ajouts cimentaires grâce à sa composition chimique.

La résistance à la compression est inversement proportionnelle au rapport (E/L) et l'incorporation des adjuvants est fortement recommandée pour atteindre les résistances souhaitées au jeune âge.

Conclusion générale

Conclusion générale

Etant donné que la réutilisation du verre mixte contenant plusieurs couleurs pour la fabrication de nouveaux verres n'est actuellement pas économiquement viable il est devenu primordial de rechercher d'autres débouchés que le stockage ou l'enfouissement en décharges. L'une des applications envisageables est sa valorisation dans la fabrication des ciments et des bétons.

L'utilisation des ajouts cimentaires dans le béton est très bénéfique. Actuellement, ces matériaux de substitution partielle, de par leur disponibilité et leurs effets, ont d'excellentes performances comparativement à celles du béton au ciment tout seul. L'incorporation des ajouts cimentaires dans le béton présente un grand avantage en terme de performances et d'économie. De ce fait, le béton peut devenir moins onéreux, plus résistant et de plus en plus durable et écologique.

Ce travail avait pour but de montrer les interactions susceptibles d'exister entre la poudre de verre et le ciment ainsi que ses conséquences sur la résistance à la compression au jeune âge et à long terme, une étude comparative a été établie entre les autres ajouts cimentaires et la poudre de verre dans le but de valoriser l'utilisation de cette dernière comme un nouveau ajout cimentaire alternatif.

D'après les résultats des essais et études menés on a pu déduire que :

01- Compte tenu de la non biodégradabilité des déchets de verre et les problèmes rencontrés par les décharges pour s'en débarrasser , l'utilisation de ces déchet dans l'industrie du ciment et du béton peut fournir des solutions environnementales et économiques très pratiques pour valoriser ces types de déchets.

02- La quantité optimale de la poudre de verre dépend du rapport E/L, la résistance à la compression dépend aussi de ce rapport, elle est inversement proportionnelle à E/L et donne des résultats satisfaisants pour des rapports relativement bas.

03- Le point de saturation (la quantité optimale) de la poudre de verre varie en fonction de la composition chimique et minéralogique du ciment et elle dépend aussi de la finesse de la poudre utilisée.

Conclusion générale

04- L'incorporation de la poudre de verre dans le béton réduit la chaleur d'hydratation : L'hydratation de la pâte de ciment est accompagnée d'une élévation de la température. Retardant et ralentissant l'hydratation du ciment, la poudre de verre a un effet bénéfique sur l'évolution de la chaleur d'hydratation, donc elle permet d'éviter les fissurations par retrait thermique des ouvrages massifs.

05- Compte tenu de sa finesse, la poudre de verre peut être utilisée pour corriger les sables dépourvus d'éléments fins. Contribuant à la compacité des bétons, elle peut de ce fait collaborer à l'amélioration de leur durabilité.

06- L'augmentation du taux de remplacement réduit la résistance à la compression au jeune âge et à long terme. Une substitution variant de 10 à 23 % reste tolérable, un passage à des pourcentages de remplacement élevés peut générer des réactions alcali-silica affectant ainsi les propriétés du béton.

07- La poudre de verre et les cendres volantes (classe F) ont des effets presque similaires sur la résistance à la compression du béton au jeune âge et à long terme, cela est vrai pour le même taux de remplacement, cependant le béton avec poudre de verre développe des résistances relativement précoces par rapport au béton avec cendres volantes à cause de la deuxième hydratation latente qui se produit dans les bétons avec poudre de verre avant celle aux cendres volantes.

08- Le béton avec ajout donne de bonnes résistances mécaniques à la compression à long terme ; cela est dû essentiellement à l'activité pouzzolanique des ajouts qui contribue essentiellement à une diminution de la silice pour donner des hydrosilicates de calcium (C-S-H) secondaires.

09- Le facteur important qui participe à l'amélioration de la résistance est la compacité de la structure. Celle-ci résulte de la diminution du besoin d'eau avec l'introduction d'ajout d'une part et de la réaction pouzzolanique d'autre part, qui remplace la portlandite par un (C-S-H) secondaire.

Conclusion générale

10- La réaction pouzzolanique des trois ajouts (cendres volantes, laitier et poudre de verre) est retardée. Cependant celle du laitier commence légèrement avant les autres, ceci est dû à la composition chimique du laitier qui est presque similaire à celle du ciment.

11- L'incorporation des ajouts cimentaires réduit sensiblement la quantité de ciment nécessaire pour produire un béton résistant. La substitution contribue largement dans la réduction des coûts.

12- l'utilisation des déchets de verre dans l'industrie du ciment et du béton peut varier d'un objectif à un autre. En effet, ces déchets peuvent être utilisés comme agrégats, ajouts cimentaire ou les deux en même temps dans le même mélange.

13- La taille des particules du verre a une influence directe sur les propriétés pouzzolaniques du liant. Seules les particules ayant un diamètre maximum inférieur à 38µm peuvent produire au liant des propriétés pouzzolaniques satisfaisantes induisant ainsi l'augmentation de la résistance à la compression à moyen et long terme.

14- L'incorporation des superplastifiants peut aider non seulement à compenser le retard enregistré par le béton avec la poudre de verre pour atteindre de bonnes résistances au jeune âge, mais elle permet aussi d'obtenir des bétons à hautes performances à moyen et long terme.

Recommendations
et
perspectives

Recommandations et perspectives

Le béton avec la poudre de verre est considéré comme un matériau nouveau, plusieurs recherches sont en cours. Nous recommandons ainsi de poursuivre et d'approfondir les recherches sur :

- L'influence du changement climatique sur les bétons avec poudre de verre
- La durabilité des bétons avec poudre de verre
- L'étude économique des bétons avec poudre de verre
- La détermination au préalable du point de saturation de la poudre de verre pour avoir une bonne composition.
- L'étude des bétons ternaires (poudre de verre+ ciment CPJ)

Ajouter à cela, un respect de la composition chimique et minéralogique du ciment par l'industrie cimentaire ne sera que bénéfique pour assurer la compatibilité ciment/ajout.

A la lumière des résultats obtenus, nous souhaitons aussi que les autorités publiques puissent investir dans la gestion des déchets notamment les déchets de verre non recyclable pour faciliter leur valorisation.

La gestion des déchets est devenue un impératif économique, sociétal et environnemental nécessitant une réelle prise en charge d'urgence. Elle peut contribuer significativement à la création de nouveaux emplois, elle pourrait aisément réduire le chômage et s'ouvrir sur un nouveau monde industriel.

Bibliographie

Bibliographie

1. Zeroub.H, *Valorisation du verre dans l'élaboration de béton durable*, thèse de magister de l'université M'hamed Bougara, Boumerdes, 2012.
2. Neville.A, *Propriétés des bétons*, Edition EYROLLES (version traduite par le CRIB Sherbrooke), 2000.
3. Chaid.R, *Formulation, caractérisation et durabilité des BHP aux ajouts cimentaires locaux*, 2006.
4. Naway.E.G, P.E., C.Eng .*Concrete Construction Engineering*, Deuxième édition, The State University of New Jersey New Brunswick, New Jersey (2008 .
5. Tebbal.N, Rahmouni.Z, *Etude paramétrique de l'effet du dosage en super plastifiant sur la performance d'un béton à haute performance*, Séminaire International Innovation et Valorisation en génie Civil et Matériaux de Construction ,10-275, Rabat, Maroc, 2011.
6. Zeroual.S, *Impact de l'addition de la poussière "CKD" sur les caractéristiques physiques et mécaniques des mortiers et béton*.
7. Platel.D, *Impact de l'architecture macromoléculaire des polymères sur les propriétés physico-chimiques des coulis de ciment*, thèse de doctorat de l'université Pierre et Marie Curie, 2005.
8. Tagnit-Hamou.A, *Microstructure et physico-chimie des ciments et des bétons*, chapitre 8 : GCI 712(Durabilité et réparation du béton) , département Génie civile, Université de Sherbrooke-Canada, Avril 2009.
9. ERCE – CTC-Est - GRANITEX, *Journée d'information "Ciments , bétons , adjuvants*, 2004.
10. Aitcine.P-C, *Béton à hautes performances*, Université de Sherbrooke ,Edition EYROLLES, (2000).
11. http://www.sustainableprecast.ca/fr/precast_sustainability/scm/.
12. Chaid.R et al , *Effet de l'ajout calcaire sur la durabilité des bétons.*, *Lebanese Science Journal*, Vol. 11, No. 1, 2010. .

Bibliographie

13. Venaut.M, *La pratique des ciments, mortiers et bétons – Tome 1 : « Caractéristiques des liants et des bétons, mise en oeuvre des coulis et mortiers » - édition2 – Collection Moniteur. 1989.*
14. Aitcin. P-C et al , *Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't », concrete international, pp 45-52 – Mai 1994. .*
15. Kerbouche.A, *Influence des ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques des bétons,memoir de magister .UST Oran ,2009.*
16. Aitcin.P-C, *les propriétés minéralogiques des sables de laitier de haut fourneau de fonte thomas et leur utilisation dans les mortiers en béton ». Revue des matériaux de construction,1968.*
17. Topcu.IB, Canbaz. M ,*Properties of concrete containing waste glass. Cement and Concrete Research 34 (2004) 267–274.*
18. WSDTED, *Washington State Department of Trade and Economic Development, Glass Feedstock Evaluation Project., (1993)USA.*
19. Samtur H , *Glass recycling and reuse. University of Wisconsin, National Science Foundation,(1974), NTIS PB239674.*
20. Ahmed.I, *Use of waste materials in highway construction. Purdue University,(1991), FHWA/INJHRP-91/3.*
21. Phillips JC et al ,*Reuse glass aggregate in Portland cement concrete,Proceedings of the Third Mineral Waste Utilization Symposium,(1972), US Bureau of Mines, Chicago,Illinois.*
22. Din Z. *The Physical Chemistry of Silicates (in Chinese). 1979, Chinese Construction Industry Press,,Beijing, China.*
23. Zachariasen WH. *The atomic arrangement in glass. J Am Chem Soc 1932;54:3841–51.*
24. Isa.H.,*The need for waste management in the glass industries: a review, Scientific Research and Easy 3 (2008) 276-279.*
25. Jani.Y, Hogland, *Waste glass in the production of cement and concrete, Journal of Environmental Chemical Engineering 2 (2014) 1767- 1775.*


Bibliographie

26. Ling, T. C. et al., *Management and recycling of waste glass in concrete products : current situations in Hong Kong, Resources, Conservation and Recycling* 70 (2013) 25-31.
27. Shao et al., *Studies on concrete containing ground waste glass, Cement and Concrete Research* 30 (2000) 91–100.
28. Shayan A, Xu A. *Value-added utilisation of waste glass in concrete. Cement and Concrete Research* 36 (2006) 457 – 468.
29. Shuhua Liu et al., *Effect of curing temperature on hydration properties of waste glass powder in cement-based materials, Akade'miai Kiado', Budapest, Hungary 2014.*
30. Dhir, R. K., and Dyer, T. D. (1999). "Suitability of glass cullet for use as a cement component in concrete." *Final Rep. for EPSRC WMR3 Programme.*
31. Taha, B., Nounu, G., *Using lithium nitrate and pozzolanic glass powder, Cement & Concrete Composites* 30 (2008) 497–505.
32. Serpa D, Santos Silva A, de Brito J, Pontes J, Soares D. *ASR of mortars containing glass. Constr Build Mater* 2013;47:489–95.
33. Maraghechi, H. et al., *Pozzolanic reactivity of recycled glass powder at elevated temperatures: Reaction stoichiometry, reaction products and effect of alkali activation, Cement & Concrete Composites* 53 (2014) 105–114.
34. Taha, B., Nounu, G., *Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement Construction and Building Materials* 22 (2008) 713–720.
35. Shi, C. et al., *Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders, Cement and Concrete Research* 35 (2005) 987–993.
36. Zidol, A., *Durabilité en milieux agressifs des bétons incorporant la poudre de verre, Thèse de doctorat de l' université de Sherbrooke, (2014).*
37. *Info Ciment*, *Note trimestrielle d'information du Centre d'Etudes et de Services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de Construction, Décembre 2003.*

Annexes

Annexe A : Fiches techniques des adjuvants

A1- PLASTOL 5000



PLASTOL 5000/5000 SCC

ADJUVANT SUPERPLASTIFIANT

DESCRIPTION

PLASTOL 5000 est un superplastifiant liquide pour le béton à base de polycarboxylate à haut degré de réduction d'eau. PLASTOL 5000 augmente les résistances initiale et ultime du béton. PLASTOL 5000 peut être utilisé pour augmenter l'affaissement du béton ou pour réduire de façon significative la demande en eau pour un affaissement particulier. PLASTOL 5000 peut être ajouté à l'usine ou au chantier et est compatible avec les autres adjuvants. PLASTOL 5000 ne contient pas d'ions de chlorure ajoutés.

DOMAINES D'APPLICATION

- Béton à haute performance
- Béton autoplaçant (BAP)
- Béton préfabriqué
- Béton avec un faible rapport eau/liant
- Applications nécessitant des résistances à court terme élevées
- PLASTOL 5000 SCC doit être utilisé au lieu du PLASTOL 5000 dans le cas des bétons autoplaçants

CARACTÉRISTIQUES/AVANTAGES

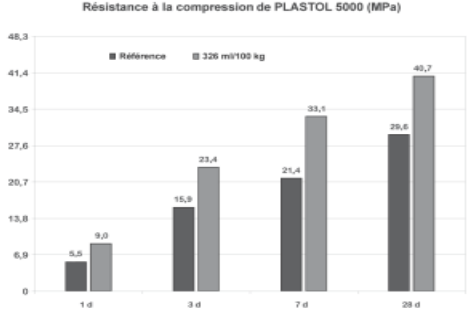
- Rend possible la production de béton avec un faible rapport eau/liant
- Réduit les coûts de la main-d'oeuvre lorsqu'utilisé dans un béton autoplaçant
- Réduit les coûts d'énergie grâce à des résistances à court terme élevées
- Réduit les coûts de la main-d'oeuvre grâce à des temps de prise régularisés

DONNÉES TECHNIQUES

Données relatives à la performance

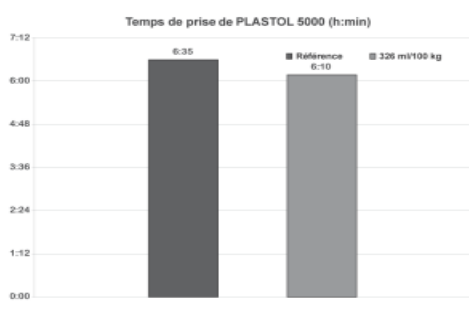
Les résultats d'essai suivants ont été obtenus en utilisant les exigences typiques de formulation de la norme ASTM C 494, 307 kg/m³ (517 lb/vg³) de liant et une teneur en air similaire (± 0,5 %). Ces résultats ont été obtenus en laboratoire avec des matériaux et des formulations qui satisfont aux exigences de la norme ASTM C 494. Des changements de matériaux et de formulations peuvent affecter l'efficacité des dosages de PLASTOL 5000.

Résistance à la compression de PLASTOL 5000 (MPa)



Temps	Référence (MPa)	326 ml/100 kg (MPa)
1 d	5,5	9,0
3 d	15,9	23,1
7 d	21,4	33,1
28 d	28,5	49,7

Temps de prise de PLASTOL 5000 (h:min)



Temps	Référence (h:min)	326 ml/100 kg (h:min)
Temps de prise	6:35	6:10

SUPERPLASTIFIANTS

PLASTOL 5000/5000 SCC

Format principal n° :
03 3000 03 4000 03 7000

EMBALLAGE

PLASTOL 5000 est offert en vrac, en contenants de 1000 litres, en barils de 205 litres et en seaux de 20 litres.

DURÉE DE CONSERVATION

Un ans dans son contenant d'origine non ouvert.

SPÉCIFICATIONS/CONFORMITÉS

Entièrement conforme aux exigences des normes :

- ASTM C 494, adjuvants de type F, et AASHTO M 194, adjuvants de type F
- ASTM C 1017, adjuvants de type I

Le produit est certifié à la norme ANSI/NSF STD 61.

MODE D'EMPLOI

PLASTOL 5000 peut être ajouté à l'eau de gâchage initiale ou directement sur le béton fraîchement dosé, puis mélangé pendant approximativement 5 minutes ou 70 tours. Toutefois, les meilleurs résultats ont été observés lorsqu'il est ajouté directement sur le béton fraîchement dosé. Le produit ne doit pas entrer en contact avec du liant sec ou d'autres adjuvants avant que ces derniers ne soient bien mélangés à la gâchée de béton.

PLASTOL 5000 est typiquement utilisé à des dosages de 200 à 980 ml par 100 kg de liant. D'autres dosages sont acceptables si des essais préalables sont réalisés et que des confirmations sont obtenues quant à la performance désirée avec les matériaux précis qui seront utilisés.

Pour toutes les applications de béton, y compris le béton autoplaçant (BAP), le dosage de PLASTOL 5000 SCC variera en fonction de la formulation, des matériaux locaux et des besoins particuliers du producteur de béton. Des formulations d'essai devraient être effectuées afin de vérifier la performance à l'état plastique et durci avec des matériaux locaux. Si la granulométrie des matériaux n'est pas optimale pour un BAP, un modificateur de viscosité pourrait être utilisé pour améliorer la qualité du mélange. Veuillez contacter votre représentant Euclid afin d'obtenir des recommandations relatives aux formulations d'essai et aux dosages.

PLASTOL 5000 est compatible avec la plupart des adjuvants, y compris les agents entraîneurs d'air, les accélérateurs, la plupart des réducteurs d'eau, les retardateurs, les réducteurs de retrait, les inhibiteurs de corrosion, les modificateurs de viscosité et la silice micronisée; toutefois, chaque matériau devrait être ajouté au béton séparément.

PRÉCAUTIONS/LIMITATIONS

- PLASTOL 5000 doit être maintenu à l'abri du gel; toutefois, le gel et le dégel subséquent n'endommagent pas le matériau si ce dernier a été mélangé vigoureusement. Ne jamais agiter avec de l'air ou avec une lance à air.
- Le béton doit être protégé du gel jusqu'à ce qu'il atteigne une résistance minimale de 7 MPa.
- Si le béton contenant PLASTOL 5000 est remalaxé sur le chantier, il est recommandé de vérifier la teneur en air du béton afin de s'assurer qu'elle est conforme aux exigences de l'ouvrage.
- Toujours consulter la fiche signalétique avant l'utilisation.



Euclid Canada

2835, boul. Grande Allée • Saint-Hubert (Québec) J4T 2R4
Tél. : 450-465-1303 • Sans frais : 1-800-667-0920 • Téléc. : 450-465-2140
www.euclidchemical.com

An **RPM** Company



A2- AIREX-L

The Euclid Chemical Company



EUCLID CANADA

AIREX-L

AGENT ENTRAÎNEUR D'AIR POUR LE BÉTON

DESCRIPTION

AIREX-L est une solution liquide d'hydrocarbures utilisée comme agent entraîneur d'air pour le béton qui est conforme à la norme ASTM C 260. Lorsque AIREX-L est ajouté au mélange de béton, il produit un réseau de bulles d'air microscopiques qui demeure très stable dans le béton. L'entraînement d'air produit grâce à AIREX-L améliore la mise en place, la maniabilité et la durabilité du béton tout en minimisant le ressuage et la ségrégation.

CARACTÉRISTIQUES/AVANTAGES

AIREX-L peut être utilisé dans tous les bétons de masse volumique normale ainsi que dans les bétons à faible affaissement pour lesquels une résistance aux cycles de gel/dégel est requise. AIREX-L est formulé spécifiquement pour faciliter l'entraînement d'air dans les bétons à faible affaissement et à affaissement nul.

DONNÉES TECHNIQUES

Caractéristiques physiques

Densité relative (25 °C)..... 1,007

Solides % 5,0

pH..... 11,0

Veuillez consulter votre représentant Euclid pour de plus amples renseignements ou pour de l'assistance technique.

EMBALLAGE

AIREX-L est offert en vrac et en contenants de 1000, 205 ou 20 litres.

DURÉE DE CONSERVATION

Deux ans dans son contenant d'origine non ouvert.

SPÉCIFICATIONS/CONFORMITÉS

- AIREX-L est conforme aux exigences de la norme ASTM C 260.
- AIREX-L est approuvé par les ministères des Transports du Québec et de l'Ontario.

MODE D'EMPLOI

Pour le béton à affaissement normal, utiliser un minimum de 15 ml/100 kg de liants.

Pour le béton sec (affaissement de 0 à 50 mm), utiliser un minimum de 100 ml/100 kg de liants.

Pour le béton compacté au rouleau (BCR), utiliser de 300 à 500 ml/100 kg de liants.

AIREX-L doit être ajouté au mélange avec l'eau de gâchage ou séparément des autres adjuvants. Le malaxage du béton doit assurer une dispersion adéquate des adjuvants. La quantité d'AIREX-L requise afin d'obtenir la teneur en air spécifiée peut être influencée par les facteurs suivants :

- Température ambiante et du béton
- Types de liant
- Additifs minéraux
- Qualité des granulats
- Granulométrie du sable
- Affaissement du béton
- Équipement de malaxage

PRÉCAUTIONS/LIMITATIONS

- Protéger du gel.
- AIREX-L est un produit non réglementé SIMDUT.
- Toujours consulter la fiche de données de sécurité avant l'utilisation.

AIREX-L est efficace et compatible avec la gamme des adjuvants Euclid. Lorsqu'EUCON 37, EUCON 537 ou PLASTOL 5000 est ajouté au béton, il est recommandé d'utiliser AIREXTRA en remplacement d'AIREX-L afin d'assurer un réseau de bulles d'air plus stable et d'améliorer la performance du béton.

2835, boul. Grande Allée • Saint-Hubert (Québec) J4T 2R4
1-800-667-0920 tél. • 450-465-2140 téléc.


www.euclidchemical.com

ENTRAÎNEURS D'AIR

AIREX-L

FORMAT PRINCIPAL N° :
03 30 00 03 40 00
03 70 00

A3- EUCON DX



EUCON DX

ADJUVANT RÉDUCTEUR D'EAU – ASTM C 494 TYPE A

DESCRIPTION

EUCON DX est un adjuvant liquide réducteur d'eau, prêt à l'emploi et qui renforce le béton. Il s'agit d'une solution aqueuse constituée d'acides hydroxycarboxyliques et d'un catalyseur qui procure une meilleure hydratation du liant.

CARACTÉRISTIQUES/AVANTAGES

- EUCON DX procure une réduction de 5 à 10 % de la quantité d'eau totale dans le mélange, en fonction de la quantité et des caractéristiques du liant.
- EUCON DX est particulièrement recommandé avec du ciment Portland à très faible teneur en sulfates.
- La synergie engendrée par l'utilisation d'EUCON DX avec un agent entraîneur d'air comme AIREXTRA diminue la quantité d'eau.
- EUCON DX a très peu d'effet sur le volume d'air piégé.
- EUCON DX augmente généralement la résistance en compression de 15 à 25 %.
- Pour les bétons haute performance, EUCON DX est utilisé en combinaison avec des superplastifiants.
- EUCON DX est tout indiqué pour des liants autres que le ciment Portland (fumées de silice, cendres volantes, laitier de haut fourneau). Il procure une meilleure maniabilité et une hydratation exceptionnelle.
- EUCON DX est également recommandé lorsqu'une augmentation du ressuage du béton est souhaitable.

DONNÉES TECHNIQUES

Résistances à la compression* MPa			Caractéristiques physiques	
Âge	Référence	EUCON DX		
3 d	17,3	22,5	Densité relative (25 °C)	1,150
7 d	21,1	26,5	Solides	28,5 %
28 d	25,8	31,0	pH	8,5

*Selon les résultats de la qualification à la norme ASTM C 494.
Veuillez contacter votre représentant Euclid afin d'obtenir de plus amples renseignements ou de l'assistance technique.

EMBALLAGE

EUCON DX est offert en vrac et en contenants de 1000, 205 ou 20 litres.

DURÉE DE CONSERVATION

Un an dans son contenant d'origine non ouvert.

SPÉCIFICATIONS/CONFORMITÉS

- EUCON DX satisfait aux exigences de la norme ASTM C 494 Type A.
- EUCON DX est approuvé par le ministère des Transports du Québec.

MODE D'EMPLOI

EUCON DX devrait idéalement être ajouté au mélange dans les secondes suivant le contact de l'eau avec le liant. Cela maximisera le gain de maniabilité et assurera une meilleure dispersion des particules du liant. Le produit ne doit pas entrer en contact avec du liant sec. Toujours l'ajouter séparément des autres adjuvants.

Le dosage peut varier de 150 à 250 ml/100 kg de liant. Type A : 185 ml/100 kg de liant. EUCON DX peut être utilisé et est compatible avec tous les adjuvants Euclid.

RÉDUCTEURS D'EAU

EUCON DX

Format principal n° :
03 3000 03 4000 03 7000

PRÉCAUTIONS/LIMITATIONS

- Protéger du gel.
- EUCON DX est un produit non réglementé SIMDUT.
- Toujours consulter la fiche signalétique avant l'utilisation.



Euclid Canada

2835, boul. Grande Allée • Saint-Hubert (Québec) J4T 2R4
Tél. : 450-465-1303 • Sans frais : 1-800-667-0920 • Téléc. : 450-465-2140
www.euclidchemical.com

An **RPM** Company



Annexe B : Composition des bétons

Tableau B1: Compositions des bétons avec E/L = 0,65 et un dosage total en liant de 300kg/m³

Composition par m ³ des bétons ayant E/L = 0,65								
Matériaux	Unité	Tem	20 % PV	30 % PV	20 % CVF	30 % CVF	20 % Laitier	30 % Laitier
Ciment	Kg	300	240	210	240	210	240	210
Poudre de verre	Kg	0	60	90	-	-	-	-
Cendres volantes classe F	Kg	-	-	-	60	90	-	-
Laitier	Kg	-	-	-	-	-	60	90
Eau	Kg	195	195	195	195	195	195	195
Sable 0 - 5 mm	Kg	674	662	656	658	649	670	668
Granulat 5 - 14 mm	Kg	856	856	856	856	856	856	856
Granulat 10 - 20 mm	Kg	214	214	214	214	214	214	214
Entraîneur d'air (Airex-L)	ml/100Kg	38	37	19	89	96	40	52

Annexes

Tableau B2: Compositions des bétons avec E/L = 0,55 et un dosage total en liant de 350kg/m³

Composition par m ³ des bétons ayant E/L = 0,55								
Matériaux	Unité	Tem	20 % PV	30 % PV	20 % CVF	30 % CVF	20 % Laitier	30 % Laitier
Ciment	Kg	350	280	245	280	245	280	245
Poudre de verre	Kg	0	70	105	-	-	-	-
Cendres volantes classe F	Kg	-	-	-	70	105	-	-
Laitier	Kg	-	-	-	-	-	70	105
Eau	Kg	192.5	192.5	192.5	192.5	192.5	192.5	192.5
Sable 0 - 5 mm	Kg	639	625	618	619	609	634	631
Granulat 5 - 14 mm	Kg	856	856	856	856	856	856	856
Granulat 10 - 20 mm	Kg	214	214	214	214	214	214	214
Entraîneur d'air (Airex-L)	ml/100Kg	57	50	29	83	114	51	60

Annexes

Tableau B3: Compositions des bétons avec E/L = 0,48 et un dosage total en liant de 360 kg/m³

Composition par m ³ des bétons ayant E/L = 0,48								
Matériaux	Unité	Tem	20 % PV	30 % PV	20 % CVF	30 % CVF	20 % Laitier	30 % Laitier
Ciment	Kg	360	288	252	288	252	288	252
Poudre de verre	Kg	0	72	10	-	-	-	-
Cendres volantes classe F	Kg	-	-	-	72	108	-	-
Laitier	Kg	-	-	-	-	-	72	108
Eau	Kg	172.8	172.8	172.8	172.8	172.8	172.8	172.8
Sable 0 - 5 mm	Kg	683	668	661	663	652	677	675
Granulat 5 - 14 mm	Kg	856	856	856	856	856	856	856
Granulat 10 - 20 mm	Kg	214	214	214	214	214	214	214
Entraîneur d'air (Airex-L)	ml/100Kg	56	49	50	86	123	62	74
Réducteur d'eau (EDX)	ml/100Kg	198	198	150	250	250	198	250

Annexes

Tableau B4: Compositions des bétons avec E/L = 0,45 et un dosage total en liant de 360kg/m³

Composition par m ³ des bétons ayant E/L = 0,45								
Matériaux	Unité	Tem	20 % PV	30 % PV	20 % CVF	30 % CVF	20 % Laitier	30 % Laitier
Ciment	Kg	375	300	262.5	300	262.5	300	262.5
Poudre de verre	Kg	0	75	112.5	-	-	-	-
Cendres volantes classe F	Kg	-	-	-	75	112.5	-	-
Laitier	Kg	-	-	-	-	-	75	112.5
Eau	Kg	168.75	168.75	168.75	168.75	168.75	168.75	168.75
Sable 0 - 5 mm	Kg	681	666	658	660	69	675	672
Granulat 5 - 14 mm	Kg	856	856	856	856	856	856	856
Granulat 10 - 20 mm	Kg	214	214	214	214	214	214	214
Entraîneur d'air (Airex-L)	ml/100Kg	59	53	65	101	119	83	89
Réducteur d'eau (EDX)	ml/100Kg	237	237	237	237	240	296	326

Annexes

Tableau B5: Compositions des bétons avec E/L = 0,40 et un dosage total en liant de 400kg/m³

Composition par m ³ des bétons ayant E/L = 0,40								
Matériaux	Unité	Tem	20 % PV	30 % PV	20 % CVF	30 % CVF	20 % Laitier	30 % Laitier
Ciment	Kg	400	320	280	320	280	320	280
Poudre de verre	Kg	0	80	120	-	-	-	-
Cendres volantes classe F	Kg	-	-	-	80	120	-	-
Laitier	Kg	-	-	-	-	-	80	120
Eau	Kg	160	160	160	160	160	160	160
Sable 0 - 5 mm	Kg	690	673	664	666	654	683	679
Granulat 5 - 14 mm	Kg	856	856	856	856	856	856	856
Granulat 10 - 20 mm	Kg	214	214	214	214	214	214	214
Entraîneur d'air (Airex-L)	ml/100Kg	89	94	111	78	178	139	144
Superplastifiant (Plastol 5000)	ml/100Kg	2.33	2.18	2.00	2.22	2.11	2.22	250

Annexes

Tableau B6: Compositions des bétons avec E/L = 0,35 et un dosage total en liant de 430kg/m³

Composition par m ³ des bétons ayant E/L = 0,35								
Matériaux	Unité	Tem	20 % PV	30 % PV	20 % CVF	30 % CVF	20 % Laitier	30 % Laitier
Ciment	Kg	430	344	301	344	301	344	301
Poudre de verre	Kg	0	86	192	-	-	-	-
Cendres volantes classe F	Kg	-	-	-	86	129	-	-
Laitier	Kg	-	-	-	-	-	86	129
Eau	Kg	150.5	150.5	150.5	150.5	150.5	150.5	150.5
Sable 0 - 5 mm	Kg	691	672	662	665	652	683	679
Granulat 5 - 14 mm	Kg	856	856	856	856	856	856	856
Granulat 10 - 20 mm	Kg	214	214	214	214	214	214	214
Entraîneur d'air (Airex-L)	ml/100Kg	103	93	134	145	134	98	103
Superplastifiant (Plastol 5000)	ml/100Kg	2.67	2.22	1.78	1.78	1.89	2.00	2.22

Annexe C : Résistance à la compression des différents bétons

Tableau C1 : Résistance à la compression (E/L = 0,65)

Âge (jours)	Résistance à la compression (E/L = 0,65) en (MPa)						
	Témoin	Poudre de verre %		Cendres Volantes (F) %		Laitier %	
		20 PV	30 PV	20 CVF	30 CVF	20 L	30 L
1	9,7	5,0	4,6	6,4	4,5	6,6	3,8
28	24,2	20,0	17,7	19,7	20,9	20,9	22,2
56	27,3	24,4	22,5	24,8	24,7	24,7	25,2
91	27,3	28,5	24,9	27,4	27,7	27,7	25,9
365	29,0	30,4	30,4	31,0	34,4	34,4	30,5

Tableau C2 : Résistance à la compression (E/L = 0,55)

Âge (jours)	Résistance à la compression (E/L = 0,55) en (MPa)						
	Témoin	Poudre de verre %		Cendres Volantes (F) %		Laitier %	
		20 PV	30 PV	20 CVF	30 CVF	20 L	30 L
1	10,3	6,4	6,8	8,5	5,2	8,4	5,8
28	24,6	21,4	23,7	23,2	24,1	28,3	30,4
56	27,1	26,8	30,2	29,9	25,8	30,8	29,9
91	29,7	29,3	34,8	33,9	30,1	34,6	32,4
365	31,4	31,3	38,0	35,2	37,4	37,5	39,7

Annexes

Tableau C3 : Résistance à la compression (E/L = 0,48)

Âge (jours)	Résistance à la compression (E/L = 0,48) en (MPa)						
	Témoin	Poudre de verre %		Cendres Volantes (F) %		Laitier %	
		20 PV	30 PV	20 CVF	30 CVF	20 L	30 L
1	17,1	12,1	10,3	13,4	10,3	12,8	9,0
28	33,3	33,7	30,1	34,2	32,5	40,4	39,0
56	36,0	38,1	39,2	41,5	37,2	42,2	40,8
91	39,9	44,4	40,7	42,2	39,5	42,7	41,3
365	42,0	46,4	41,1	42,0	47,0	50,7	46,5

Tableau C4 : Résistance à la compression (E/L = 0,45)

Âge (jours)	Résistance à la compression des (E/L = 0,45) en (MPa)						
	Témoin	Poudre de verre %		Cendres Volantes (F) %		Laitier %	
		20 PV	30 PV	20 CVF	30 CVF	20 L	30 L
1	18,4	11,4	8,9	9,9	6,9	9,7	5,3
28	43,9	40,9	34,7	37,9	40,0	40,8	42,0
56	46,7	41,2	35,3	41,3	41,5	43,6	44,4
91	50,8	49,2	44,8	44,9	43,0	44,4	45,8
365	53,0	62,3	53,5	54,7	57,7	47,0	50,3

Annexes

Tableau C5 : Résistance à la compression (E/L = 0,40)

Âge (jours)	Résistance à la compression (E/L = 0,40) en (MPa)						
	Témoin	Poudre de verre %		Cendres Volantes (F) %		Laitier %	
		20 PV	30 PV	20 CVF	30 CVF	20 L	30 L
1	29,2	21,5	16,8	20,3	11,7	18,6	12,6
28	48,5	43,7	39,4	43,5	38,5	44,7	47,9
56	53,4	50,9	47,2	52,6	44,8	53,7	51,7
91	56,7	54,7	52,6	53,6	49,8	56,0	55,0
365	59,1	66,0	57,0	54,3	53,4	57,8	61,7

Tableau C6 : Résistance a la compression (E/L = 0,35)

Âge (jours)	Résistance à la compression des (E/L = 0,35) en (MPa)						
	Témoin	Poudre de verre %		Cendres Volantes (F) %		Laitier %	
		20 PV	30 PV	20 CVF	30 CVF	20 L	30 L
1	28,6	26,8	19,0	18,4	20,0	24,0	16,1
28	64,7	54,9	45,4	45,5	51,5	62,0	58,2
56	66,9	57,8	52,8	53,1	57,6	64,2	63,1
91	70,4	62,3	55,3	54,4	60,2	65,2	63,7