

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Civil

Laboratoire Matériaux de Génie Civil & Environnement (LMGCE)

Mémoire de projet de fin d'études
pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état en Génie Civil

**Etude de la durabilité des bétons à
base de Poudre de verre**

LADAYCIA Haifa
RIGHI Yanis

Sous la direction de M. Abderrahim BALI, Prof
Mme Messaouda CHERRAK, MC B

Présenté et soutenu publiquement le (08/07/2020)

Composition du Jury :

Président	M. Abdallah LARIBI,	MC B	ENP
Promoteur	M. Abderrahim BALI,	Prof.	ENP
Co-promotrice	Mme Messaouda CHERRAK,	MC B	ENP
Examinateur	M. Ramdane BOUTEMEUR,	MA A	ENP
Examinatrice	Mme Nadjia BAUCHE,	MA A	ENP

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Civil

Laboratoire Matériaux de Génie Civil & Environnement (LMGCE)

Mémoire de projet de fin d'études
pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état en Génie Civil

**Etude de la durabilité des bétons à
base de Poudre de verre**

LADAYCIA Haifa
RIGHI Yanis

Sous la direction de M. Abderrahim BALI, Prof
Mme Messaouda CHERRAK, MC B

Présenté et soutenu publiquement le (08/07/2020)

Composition du Jury :

Président	M. Abdallah LARIBI,	MC B	ENP
Promoteur	M. Abderrahim BALI,	Prof.	ENP
Co-promotrice	Mme Messaouda CHERRAK,	MC B	ENP
Examineur	M. Ramdane BOUTEMEUR,	MA A	ENP
Examinatrice	Mme Nadjia BAUCHE,	MA A	ENP

ملخص:

الخرسانة هي أكثر مواد البناء استخداماً في العالم. ومع ذلك، فإن إنتاج إسمنت بورتلاند، وهو عنصر أساسي من العناصر الخرسانية، يؤدي إلى إطلاق كمية كبيرة من ثاني أكسيد الكربون (غازات الدفيئة)، وكجزء من التنمية المستدامة للبناء، أصبح استبدال جزء من الأسمنت بإضافات إسمنتية أمراً ضرورياً للحد من الأثر البيئي للأسمنت. إن مسحوق الزجاج هو إضافة إسمنتية جديدة. وقد أظهر استخدامه في الخرسانة نتائج ملموسة للغاية من حيث مقاومة الضغط بفضل خصائصه البوزولانية. ولتقييم الأثر الإيجابي للمسحوق الزجاجي، أجريت دراسة للاستدامة على أساس أحد العوامل الهامة للمتانة التي هي النفاذية. وهي ظاهرة تسلسل سوائل إلى الخرسانة محملة أحيانا بعوامل خارجية عدوانية مما يؤدي إلى تدهور الخرسانة. إن الهدف من هذا العمل التجريبي هو تحسين أداء مسحوق الزجاج كبديل جزئي للأسمنت على خواص الخرسانة وأثره على نفاذيتها. وقد تم الحصول على نتائج جد مهمة على الخرسانة التي تضم مسحوق الزجاج بمعدل استبدال 20 % لـ $E/L=0.5$.

الكلمات الدالة :

الخرسانة، إضافات إسمنتية، مسحوق الزجاج، المتانة، نفاذية المياه، المسامية.

ABSTRACT :

Concrete is the most widely used construction material in the world. However, the production of Portland cement, an essential component of concrete, leads to the release of a significant amount of CO₂ (greenhouse gases). However, as part of the sustainable development of construction, the partially replacement of the cement by cementitious additions has become necessary in order to limit the environmental impact of the cement. Glass powder is a new alternative cementitious addition. Its use in concrete has shown very appreciable results in terms of compressive strength due to its pozzolanic properties. To assess the positive effect of the glass powder, a sustainability study has been undertaken based on one of the important factors of durability, which is permeability. It consists of a phenomenon of infiltration into the concrete of fluids usually loaded with aggressive external agents leading to the deterioration of the concrete. The objective of the present experimental work is the valorization of glass powder as a partial substitute for cement and its effect on the properties of concrete and its permeability. Interesting results were obtained on concretes incorporating glass powder at a 20% substitution rate for an $E/L=0.5$.

Key Words:

Concrete, cementitious additions, glass powder, durability, water permeability, porosity.

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 l'émission d'une quantité importante de CO₂ (gaz à effet de serre), et dans le cadre du développement durable de la construction, le remplacement d'une partie du ciment par des ajouts cimentaires est devenu nécessaire afin de limiter l'impact environnemental de ce dernier. La poudre de verre constitue un nouvel ajout cimentaire alternatif. Son utilisation dans les bétons a montré des résultats très appréciables vis-à-vis de la résistance à la compression grâce à ses propriétés pouzzolaniques. Pour apprécier l'effet positif de la poudre de verre, une étude de la durabilité a été effectuée en se basant sur l'un des facteurs importants de la durabilité qui est la perméabilité. Elle consiste en un phénomène d'infiltration dans le béton de fluides parfois chargés d'agents extérieurs agressifs entraînant la détérioration du béton. Ce travail expérimental, a pour objectif la valorisation de la poudre de verre comme substituant partiel du ciment et l'étude de son effet sur les propriétés du béton et sur sa perméabilité. Des résultats intéressants ont été obtenus sur des bétons incorporant de la poudre de verre à un taux de substitution de 20% pour un E/L=0.5.

Mots clés :

Béton, ajouts cimentaires, poudre de verre, durabilité, perméabilité à l'eau, porosité.

REMERCIEMENTS

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

Nous voudrions exprimer toute notre reconnaissance à Monsieur Abderrahim BALI Professeur et directeur de laboratoire à l'Ecole Nationale Polytechnique de nous avoir fait l'honneur de diriger nos travaux du présent projet de fin d'études en tant que promoteur principal. Nous le remercions chaleureusement pour sa confiance, son soutien, ses connaissances scientifiques ainsi que sa qualité d'encadrement.

Nous tenons à remercier vivement notre Co-promotrice Madame CHERRAK Messaouda Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique pour tous ses conseils, sa disponibilité, sa patience, sa gentillesse, son suivi de prêt durant notre travail et l'intérêt constant qu'elle a bien voulu montrer pour mener à bien ce projet.

Nous adressons également nos remerciements les plus chaleureux à Monsieur Skender Zakaria, Docteur à l'Université de MEDEA pour son aide combien précieuse et sa présence avec nous, surtout dans la partie pratique de ce travail malgré les conditions sanitaires difficiles.

Nous remercions Monsieur OULD HAMOU Malek, Chef de département du Génie Minier d'avoir mis à notre disposition le matériel nécessaire pour le broyage du verre.

Nous tenons à remercier vivement Madame SEKHRI Samia, Ingénieur de laboratoire, Monsieur G.Ahmed, Technicien du laboratoire, ainsi Madame ELGUERGUARI Sihem secrétaire du département pour leur soutien indéfectible.

Nos remerciements s'adressent également à M. A.Laribi, M. R.Boutemour, Mme. N.Baouche, honorables membres de notre jury, pour avoir accepté d'évaluer ce travail de mémoire de fin d'études.

Nous tenons à adresser toute notre gratitude à tous les enseignants du département Génie Civil de l'Ecole Nationale Polytechnique, sans qui, nous n'aurions jamais atteint ce niveau.

DEDICACE

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes employés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère :

- ❖ *A mes chers parents, en témoignage de ma reconnaissance infinie pour toute la sollicitude dont ils m'ont fait 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*
- ❖ *A mes deux sœurs, mon beau-frère et mon neveu Adim, qui m'ont toujours soutenu et encouragé. Que dieu les protège et leur offre tout le bonheur*
- ❖ *A mes chers tantes Rachida et Yasmina, qui n'ont pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection*
- ❖ *A ma grand-mère, mes oncles et mes tantes. Que Dieu leur donne une longue et joyeuse vie*
- ❖ *A la mémoire de mon grand-père, que Dieu incha'allah l'accueille en son vaste paradis.*
- ❖ *A tous les cousins, les cousines et les amis que j'ai connu jusqu'à maintenant. Plus précisément : Islem, Adelane, Abdeslam, Amine, Zinou, Houda, Fatima, Kenza et Imene. Merci pour leurs amours et leur encouragement.*
- ❖ *Sans oublier mon binôme Haifa pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.*

RIGHI Yanis

DEDICACE

- ❖ *A mes chers parents, pour leur appui, leur amour et leurs prières tout au long de mes études.*
- ❖ *A la mémoire de ma grande mère j'aurai tant aimé que vous soyez présente.*
- ❖ *A mon cher frère Houssam et mes chères sœurs Anfel, Imen et Nedjela pour leur encouragement et leur soutien moral.*
- ❖ *A mon cher fiancé je te remercie pour ton soutien inconditionnel durant mes études. Ton amour et ton affection remplissent mes jours de bonheur.*
- ❖ *A mes chers petits neveux et nièces Anas, Salah, Ouais, Ilyes, Noorcine et Line, votre joie et votre gaieté me comblent de bonheur.*
- ❖ *A mes amis, Adelane, Yanis et Mia, en souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble.*

LADAYCIA Haifa

TABLE DES MATIERES :

LISTE DES TABLEAUX :	11
LISTE DES FIGURES :	12
Introduction générale :	13
Chapitre 1 : Généralités sur le béton	15
1.1 Introduction :	16
1.2 Constituants du béton :	17
1.2.1 Le ciment :	17
1.2.2 L'eau :	17
1.2.3 Les granulats :	18
1.3 Interface pâte – granulat :	18
1.4 Critères de classification des bétons :	18
1.5 Méthode de formulation du béton :	19
1.5.1 Méthode Dreux-Gorisse :	19
1.5.1.1 Dosage en Ciment et en Eau :	20
1.5.1.2 Courbe granulaire de référence :	22
1.5.1.3 Proportion des granulats :	23
1.5.1.4 Masse de granulats :	23
1.5.2 Méthode de Faury :	24
1.5.3 Méthode d'Abrams :	25
1.5.4 Méthode de Valette :	26
1.5.5 Méthode de Bolomey :	27
1.5.6 Méthode de Joisel :	28
1.6 Conclusion :	29
Chapitre 2 : La durabilité des bétons	30
2.1 Introduction :	31
2.2 Définition des indicateurs de durabilité :	31
2.3 Classification des indicateurs de durabilité :	32
2.3.1 Indicateurs de durabilité généraux :	32
2.3.1.1 La porosité :	32
2.3.1.2 La perméabilité :	33
2.3.1.3 Diffusion ionique :	35
2.3.2 Indicateurs de durabilité spécifiques :	35

2.3.2.1	Indicateurs chimiques microscopiques (relatifs aux constituants du béton) :	
	35	
2.3.2.2	Indicateur global et macroscopique (relatif au béton durci) :.....	35
2.4	Les caractéristiques du béton contrôlant la durabilité :.....	36
2.4.1	Influence des propriétés intrants du béton :.....	36
2.4.1.1	Type de ciment :.....	36
2.4.1.2	Type de granulats :.....	36
2.4.1.3	Ajouts minéraux :.....	36
2.4.2	Influence des propriétés physico-chimiques et des paramètres de formulation du béton :	36
2.4.2.1	Résistance à la compression et à la traction :.....	36
2.4.2.2	Choix du rapport Eau/Ciment (E/C) ou Eau/Liant (E/L) :.....	37
2.4.2.3	Caractéristiques des vides d'air :.....	37
2.5	Classes d'exposition en fonction des actions dues à l'environnement :.....	37
2.6	Le béton en milieux agressifs (Attaque externe du béton) :.....	39
2.6.1	Attaque des sulfates :.....	39
2.6.2	Attaque par les chlorures :.....	40
2.6.3	Carbonatation :.....	40
2.6.4	Lixiviation (dissolution) :.....	41
2.6.5	Réaction Alkali-silicat :.....	41
2.6.6	Les attaques bactériennes et biochimiques :.....	42
2.7	Conclusion :.....	42
Chapitre 3 : Les ajouts cimentaires		43
3.1	Introduction :	44
3.2	Description des additions minérales :.....	44
3.2.1	Les pouzzolanes :	45
3.2.2	Le laitier de haut fourneau :.....	45
3.2.3	Les fumées de silice :	46
3.2.4	La cendre volante :.....	47
3.2.5	Les fillers calcaire :	48
3.2.6	La poudre de verre :.....	49
3.3	Conclusion :.....	49
Chapitre 4 : La poudre de verre		50
4.1	Introduction :	51

4.2	Définition de la poudre de verre :.....	51
4.3	Propriétés du verre :.....	51
4.3.1	Propriétés physiques :.....	51
4.3.2	Propriétés chimiques :.....	52
4.4	Classification du verre dans le diagramme ternaire :.....	53
4.5	Le recyclage du verre :.....	54
4.6	Valorisation de verre dans le béton :.....	56
4.7	Comportement du verre dans un milieu cimentaire :.....	56
4.8	Réaction alcali-silice du verre :.....	57
4.9	Activité pouzzolanique de la poudre de verre :.....	57
4.10	L'effet de la taille des particules de verre :.....	58
4.11	L'influence de poudre de verre sur les propriétés des bétons :.....	59
4.11.1	A l'état frais :.....	59
4.11.2	A l'état durci :.....	59
4.12	Effet du verre sur la durabilité :.....	61
4.12.1	La perméabilité du béton :.....	61
4.12.2	La porosité :.....	62
4.12.3	La résistance à la réaction alcalis silice :.....	63
4.12.4	Retrait de séchage :.....	63
4.13	Comparaison du verre à d'autres ajouts cimentaires (les cendres volantes) :.....	64
4.14	Les avantages environnementaux et économiques de l'utilisation de la poudre de verre :	64
4.15	Conclusion :.....	65
Chapitre 5 : Procédé expérimental		66
5.1	Introduction :.....	67
5.2	Caractérisation des matériaux utilisés :.....	68
5.2.1	Méthodes de caractérisation physico-chimique :.....	68
5.2.1.1	La granulométrie :.....	68
5.2.1.2	Masse volumique :.....	68
5.2.1.3	Détermination de la surface spécifique par la méthode Blaine :.....	68
5.2.2	Les matériaux utilisés :.....	69
5.2.2.1	La poudre de verre :.....	69
5.2.2.2	Le ciment :.....	69
5.2.2.3	Le sable :.....	69

5.2.2.4	Les graviers :.....	70
5.2.2.5	Eau de gâchage :.....	70
5.2.3	Détermination de la composition du béton :.....	70
5.3	Procédure de confection des éprouvettes et mode de conservation :.....	71
5.4	Essais de caractérisation du béton :.....	73
5.4.1	A l'état frais :.....	73
5.4.1.1	Affaissement au cône d'Abrams :.....	73
5.4.1.2	Masse volumique apparente :.....	74
5.4.2	A l'état durci :.....	74
5.4.2.1	Résistance en compression :.....	74
5.4.2.2	Résistance en traction (Essai de fendage) :.....	75
5.4.2.3	L'absorption d'eau par immersion :.....	76
5.4.2.4	L'absorption d'eau par capillarité :.....	78
5.4.2.5	Essai de perméabilité à l'eau :.....	79
5.5	Conclusion :.....	80
Chapitre 6 : Résultats et interprétations.....		81
6.1	Introduction :.....	82
6.2	Propriétés à l'état frais :.....	82
6.2.1	Résultats de l'essai d'affaissement :.....	82
6.2.2	Détermination de la masse volumique :.....	83
6.3	Propriétés à l'état durci :.....	84
6.3.1	Résultats de l'essai de compression :.....	84
6.3.2	Résultats de l'essai de fendage :.....	85
6.4	Durabilité du béton :.....	86
6.4.1	Résultats de l'essai d'absorption d'eau par immersion :.....	86
6.4.2	Résultats de l'essai d'absorption d'eau par capillarité :.....	88
6.4.3	La perméabilité à l'eau :.....	89
6.5	Conclusion :.....	90
Conclusion générale :.....		91
Recommandations et perspectives :.....		92
BIBLIOGRAPHIE :.....		93
ANNEXE :.....		98

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau 1.5.1 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire G [24].	20
Tableau 1.5.2 : Correction en pourcentage sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale D des granulats [19].	21
Tableau 1.5.3: Valeur du terme correcteur K [24].	22
Tableau 1.5.4: Compacité du béton en fonction du diamètre maximal D et du mode de serrage [24].	24
Tableau 1.5.5 : Valeur de A [19].	25
Tableau 1.5.6 : Valeurs optimales d'après Abrams du module de finesse des compositions granulaires des bétons courants [19].	26
Tableau 1.5.7 : Valeur de A [20].	28
Tableau 2.5.1 : Classe d'exposition [8].	38
Tableau 2.5.2 : Classe d'exposition [8].	39
Tableau 3.2.1 : Propriétés physiques et composition chimique moyenne de laitier haut – fourneau [3].	46
Tableau 3.2.2 : Composition chimiques de la fumée de silice [31].	47
Tableau 3.2.3 : Propriétés physiques et composition chimique moyenne des cendres volantes [3].	48
Tableau 4.3.1 : Composition chimique de différents types de verre [32].	52
Tableau 4.5.1 : Capacité de recyclage en Algérie [22].	55
Tableau 4.5.2 : La quantité des déchets de verre et le pourcentage de recyclage des différents pays [32].	55
Tableau 5.2.1 : Masse volumique des différents constituants du béton.	68
Tableau 5.2.2 : Caractéristiques physiques de la poudre de verre.	68
Tableau 5.2.3 : Composition du béton (kg/m^3).	70
Tableau 5.4.1 : Définition des classes de consistance selon la norme [8].	73
Tableau 5.4.2 : Seuil pour l'essai de perméabilité à l'eau [von Beton 1991].	80
Tableau 6.2.1 : Affaissement des deux mélanges de béton.	82
Tableau 6.2.2 : Masse volumique des deux bétons.	83
Tableau 6.3.1 : Résultats de l'essai de compression.	84
Tableau 6.3.2 : Résultats de l'essai de traction.	85
Tableau 6.4.1 : Calcul de l'absorption des deux mélanges de béton.	86
Tableau 6.4.2 : Calcul de la porosité des deux mélanges de béton.	86
Tableau 6.4.3 : L'absorption capillaire des deux mélanges de béton.	88
Tableau 6.4.4 : La hauteur de pénétration des deux mélanges de béton.	89

LISTE DES FIGURES :

Figure 1.1.1 : Divers utilisation du béton [16].	16
Figure 1.5.1: Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir [19].	21
Figure 1.5.2: Schéma de principe de la courbe granulaire de référence pour un béton dont les granulats ont un diamètre maximum D_{max} inférieur ou égale 20mm [25].	22
Figure 1.5.3: Utilisation de la courbe granulaire de référence [25].	23
Figure 1.5.4 : Courbe optimale [20].	27
Figure 2.3.1: Représentation du matériau poreux imperméable et perméable [14].	33
Figure 4.4.1 : Classification des ajouts cimentaires selon leur composition chimique [38].	53
Figure 4.7.1 : Indices d'activité pouzzolanique du verre utilisé dans des conditions différentes [4].	57
Figure 4.10.1 : l'utilisation de verre recyclé selon la taille de ses particules [32].	58
Figure 4.11.1 : Résistance à la compression des bétons à 56 et 91 jours [45].	60
Figure 4.12.1 : Perméabilité a l'eau des bétons à 91 jours [45].	61
Figure 4.12.2 : Pourcentage des vides des bétons a 56 jours en fonction du rapport E/L [45].	62
Figure 5.1.1 : Organigramme élaborant le procédé expérimental.	67
Figure 5.2.1 : Broyeur à boulet.	69
Figure 5.3.1 : Lavage et étuvage des matériaux.	71
Figure 5.3.2 : Malaxage des différents constituants.	71
Figure 5.3.3 : Coulage des éprouvettes cubiques et cylindriques.	72
Figure 5.3.4 : Identification des éprouvettes.	72
Figure 5.4.1 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams [2].	74
Figure 5.4.2 : Essai de compression.	75
Figure 5.4.3 : Essai de fendage.	76
Figure 5.4.4 : Immersion des éprouvettes dans le bac à eau.	77
Figure 5.4.5 : La dessiccation des éprouvettes après immersion.	77
Figure 5.4.6 : Essai d'absorption d'eau par capillarité.	78
Figure 5.4.7 : Essai de perméabilité à l'eau.	79
Figure 5.4.8 : Fendage de l'éprouvette.	79
Figure 6.2.1 : Effet de la poudre de verre sur l'affaissement.	82
Figure 6.2.2 : Effet de la poudre de verre sur la masse volumique.	83
Figure 6.3.1 : Effet de la poudre de verre sur la résistance en compression.	84
Figure 6.3.2 : Effet de la poudre de verre sur la résistance en traction.	85
Figure 6.3.3 : Eprouvette après fendage.	86
Figure 6.4.1 : Effet de la poudre de verre sur l'absorption par immersion.	87
Figure 6.4.2 : Effet de la poudre de verre sur la porosité.	87
Figure 6.4.3 : L'absorption d'eau par capillarité en fonction du temps.	88
Figure 6.4.4 : Effet de la poudre de verre sur la perméabilité à l'eau.	89

Introduction générale :

Actuellement, lorsque l'on conçoit et construit un ouvrage d'art ou une structure du génie civil, un des aspects du cahier des charges est la durée d'exploitation de cet ouvrage. Par exemple, les enceintes de confinements des réacteurs de centrales nucléaires sont prévues pour une utilisation de quarante ans. Le pont Vasco de Gama à Lisbonne doit pouvoir tenir cent ans avant que la corrosion des armatures ne soit visible à la surface des piles. Le viaduc de Millau est prévu pour un service d'un siècle, et le tunnel sous la Manche 120 ans. Pouvoir garantir une durée de vie d'un ouvrage implique en particulier de pouvoir garantir l'intégrité du matériau composant l'ouvrage pendant cette durée de vie.

Les exigences de durabilité encouragent davantage l'utilisation des ajouts cimentaires supplémentaires classiques courants tels que les cendres volantes, le laitier granulé de haut fourneau (LGHF) et les fumées de silice. La performance et l'influence de ces ajouts classiques sur les principales propriétés rhéologiques, mécaniques et la durabilité du béton sont largement étudiées. Ces ajouts favorisent une réduction considérable de la perméabilité du béton et par conséquent une amélioration de sa résistance aux attaques chimiques [Al-Amoudi et al, 1994, Yan et al, 2007]. Certains béton incorporent un volume assez élevé des ajouts cimentaires en remplacement partiel du ciment afin d'améliorer la stabilité, d'augmenter le maintien de la fluidité et de limiter le dégagement de chaleur. Par ailleurs, d'autres produits alternatifs ayant un potentiel pouzzolanique et/ou hydraulique émergent de plus en plus. On retrouve, notamment la poudre de verre (PV).

L'utilisation du verre mixte comme substituant de ciment dans le béton peut être une voie intéressante pour réduire la dégradation de l'environnement et attirer l'attention des pouvoirs publics afin de développer une réelle politique de gestion des déchets de façon générale et aller vers leur recyclage. L'étude proposée dans le cadre de ce mémoire est d'explorer le potentiel d'utilisation de verre finement broyé dans le béton comme ajout cimentaire alternatif.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de la valorisation de la poudre de verre comme ajout au ciment et de l'étude de son effet sur le comportement physique et mécanique du béton et surtout sur la durabilité de ce dernier.

Pour mener à bien ce travail, le mémoire a été structuré en une introduction, six chapitres et une conclusion.

Le premier chapitre renferme des généralités sur les bétons ainsi que les constituants adaptés pour leurs formulations

Le deuxième chapitre introduit la notion de durabilité et ses différents indicateurs ainsi que les caractéristiques de béton et les facteurs externes qui influencent sa durabilité.

Dans le troisième chapitre, une synthèse de l'effet des additions minérales (filler calcaires, pouzzolane, laitier de haut fourneau, et de la fumée de silice...) sur les différentes caractéristiques des bétons afin d'éclairer en particulier la façon dont elles contribuent à l'activité liante du ciment.

Le quatrième chapitre met l'accent sur les travaux déjà réalisés sur le verre comme substituant de ciment Portland.

Le cinquième chapitre décrit le programme expérimental réalisé pour cette étude, ainsi que la caractérisation des matériaux.

Le sixième chapitre comprend la présentation et l'analyse des résultats obtenus à l'état frais et à l'état durci.

Finalement, une conclusion générale résume les différents points d'impact du verre finement broyé dans le béton, et des perspectives pour de futures investigations.

Chapitre 1 :

Généralités sur le béton

1.1 Introduction :

Connu depuis l'antiquité romaine, le béton a été employé en complément ou en substitution de la pierre, le matériau a connu un réel essor dans son association avec l'acier dans le béton armé. La complémentarité, à la fois mécanique et chimique, entre ces deux matériaux, a permis de construire de façon économique et fiable les ouvrages nécessaires à toutes les activités humaines, notamment des immeubles d'habitation, des ponts, des routes, des barrages...etc.

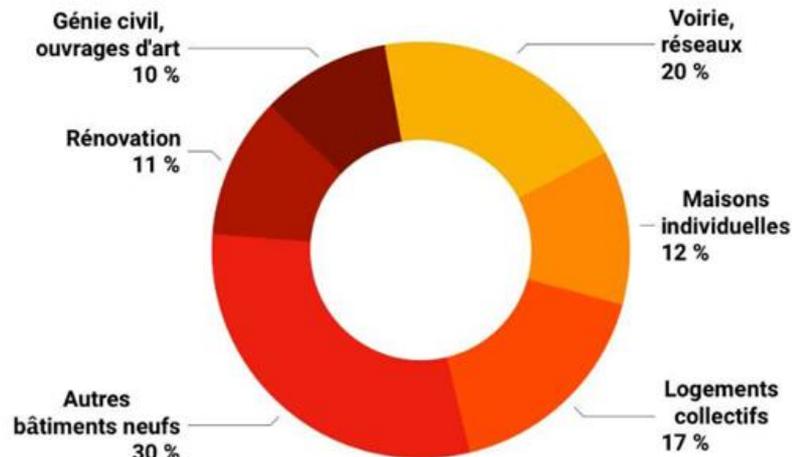


Figure 1.1.1 : Divers utilisation du béton [16].

Le béton est un mélange hétérogène, en proportions diverses, de granulats de ciment, d'eau, éventuellement d'additions minérales (remplaçant parfois partiellement le ciment), souvent d'adjuvants et parfois de fibres. Ce mélange, qui est mis en place sur le chantier ou en usine à l'état frais, peut adopter des formes très diverses parce qu'il est maniable ; il durcit progressivement pour former finalement un monolithe.

La réaction chimique qui permet au béton de ciment de faire prise est lente : à peine 50% de la résistance mécanique finale au bout de 7 jours. La valeur prise comme référence dans les calculs de résistance est celle obtenue à 28 jours (80% de la résistance finale).

C'est le matériau de construction le plus utilisé au monde : on estime que sa production annuelle correspond à environ une tonne par habitant de notre planète. Ce succès est dû à plusieurs facteurs : le béton est un matériau économique, fabriqué à partir de ressources le plus souvent locales ; il est résistant, durable, isolant thermique et phonique ; il participe à l'architecture par les formes, les textures, les teintes qu'il permet d'obtenir ; il est facile à mettre en œuvre et s'associe bien avec l'acier.

Dans ce qui suit, nous rappelons les différents constituants d'un matériau cimentaire, ainsi que leurs propriétés. Nous présentons ensuite quelques méthodes de formulation de ces matériaux. Nous abordons par la suite l'étude des indicateurs de durabilités.

1.2 Constituants du béton :

Le béton est un matériau hétérogène multiphasique poreux constitué d'un mélange de granulats et d'une pâte, elle-même constituée à partir de ciment, d'eau et éventuellement d'ajouts. Chaque constituant joue un rôle bien défini. Les granulats constituent le squelette en principe inerte du béton, lui confèrent sa compacité, participent à sa résistance mécanique et atténuent les variations volumiques (retrait) lors du durcissement. La pâte de ciment est le siège des réactions d'hydratation des constituants qui conduisent aux processus de prise et de durcissement et la transforment en matrice liante. Le béton, matériau évolutif, connaît des transformations physicochimiques et structurales tout au long de sa vie.

1.2.1 Le ciment :

Le ciment anhydre est obtenu par mélange homogène d'argile et de calcaire, ou d'autres matériaux (des ajouts) contenant de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer, cuits à haute température (température de clinkérisation, à 1450 °C) puis broyés. Elle est le constituant à l'origine de la cohésion du béton, elle représente 20% à 50% du volume total du béton et se caractérise par sa capacité à s'hydrater avec de l'eau et à former une matrice solide qui lie les granulats entre eux.

Tous les ciments courants contiennent du clinker Portland (mélange de calcaire et d'argile) qui assure la fonction liante. Cependant, En fonction des résistances et de la durabilité souhaitées, on peut envisager d'utiliser des ciments à base d'additifs divers (fumée de silice, cendres volantes, laitiers de haut fourneau...).

La composition chimique des quatre phases et leurs pourcentages dans le cas du ciment Portland normal sont donnés comme suit :

- Le silicate tricalcique C_3S (50 à 70 %)
- Le silicate bicalcique C_2S (15 à 30 %)
- Aluminate tricalcique C_3A (5 à 10 %)
- Alumino ferrite tetracalcique C_4AF (de 5 à 15 %)

1.2.2 L'eau :

L'eau est indispensable à la fabrication du béton. C'est d'elle que dépendent en grande partie la cohésion et la résistance de ce matériau de construction omniprésent. Associée au ciment, l'eau remplit deux fonctions : d'une part elle sert à l'hydratation du ciment et d'autre part elle permet la fluidification de la pâte. On utilise pour la confection des bétons l'eau potable du robinet.

1.2.3 Les granulats :

Les granulats constituent une phase généralement inerte au sens où ils ne participent pas à la réaction d'hydratation du ciment. Néanmoins, certaines interactions chimiques avec la pâte de ciment peuvent être préjudiciables au béton comme la réaction alcali-granat. Les granulats participent grandement à la résistance mécanique du béton et leur fraction volumique est de 50% à 80% du volume total du béton. Ils sont caractérisés par leurs courbes granulométriques.

1.3 Interface pâte – granulat :

Dans un béton, la liaison qui s'établit au cours de l'hydratation entre la matrice cimentaire et les granulats qu'elle enrobe, se traduit par une zone de pâte hydratée particulière appelée « auréole de transition ». Cette interface présente une porosité plus importante que le reste de la matrice ; les pores, plus grossiers dans cette zone, deviennent un réseau de cheminement privilégié pour les transferts. Salih (1987) a montré que la perméabilité de l'interface est plus grande que celle de la matrice. Les pores, plus grossiers dans cette zone, forment une faiblesse structurelle. L'épaisseur de cette zone augmente avec le diamètre du granulat et avec la quantité d'eau d'hydratation (c'est-à-dire avec le rapport E/C). La nature et la porosité des granulats peuvent aussi influencer l'auréole de transition. L'interface pâte/granat possède un rôle majeur dans le comportement du béton.

1.4 Critères de classification des bétons :

Les ouvrages que l'on construit aujourd'hui en béton armé ont des propriétés très disparates tant par leur destination que par leurs dimensions, leur durée de vie ..., toute étude de composition de béton doit en tenir compte. Il convient donc d'en définir avec une grande clarté le cahier des charges qui contient les critères de la composition du béton souhaité en fonction de l'usage envisagé de l'ouvrage prévu. Quatre critères se distinguent et doivent être retenus [Dreux et Festa. 1998].

- La dimension maximale des granulats d'un béton D_{max} : correspond à la dimension maximale du plus gros granulat considéré séparément, choisi de manière à assurer le bétonnage correct des éléments en béton armé et précontraint.
- La résistance mécanique du béton : dépend principalement de la nature du ciment, rapport eau/ciment et le rapport granulat/sable. Pour l'étude de tout projet de construction il est impératif de prévoir au préalable la résistance du béton avec lequel sera construit l'ouvrage. Cette valeur est fonction de la nature de l'ouvrage et des sollicitations auxquelles il sera sujet (ouvrage d'art, bâtiment industriel, habitation, stockage, en région sismique, neigeuse...).

- Agressivité du milieu ambiant (durabilité) : La présence de risques environnementaux agressifs (eaux agressives, fortes teneur en gaz carbonique, milieux acides, présence de chlorures, ...) et les conditions d'exploitation spécifiques (revêtement de fours ou incendies, conditions météorologiques extrêmes : gels sévères) sont des considérations qui conditionnent la durée de vie de l'ouvrage, et donc la composition du béton. En vue de l'objectif de durabilité, le choix de la classe de résistance du béton est en fonction de l'agressivité du milieu, elle est d'autant plus élevée que le milieu est plus agressif. Cela signifie que l'exigence de durabilité peut parfois déterminer la résistance à prendre.
- La consistance (ouvrabilité) : l'ouvrabilité d'un béton correspond à son aptitude à se mettre en place, compte tenu de son utilisation dans un ouvrage donné et en fonction des moyens de mise en œuvre et de ses propres caractéristiques. La consistance est souvent mesurée par le cône d'Abrams (affaissement ou étalement), mais elle peut également être mesurée à l'aide du maniabilimètre, à la table à secousse, plasticimètre.... L'ouvrabilité est, pour le béton, une qualité fondamentale qui doit être très sérieusement prise en compte dans l'étude de composition et de mise en œuvre.

1.5 Méthode de formulation du béton :

Les méthodes de composition aboutissent à des dosages « volumétriques » ou de préférence « pondéraux », le passage de l'un à l'autre pouvant toujours se faire, si nécessaire, par la connaissance de la masse volumique des granulats. Ces méthodes dont on retiendra 2 archétypes :

- Celle qui consiste à obtenir une granularité « continue » ;
- Celle qui consiste à obtenir une granularité « discontinue ».

Plusieurs méthodes ont été développées. Même s'il reste beaucoup d'empirisme, toutes reposent sur les mêmes principes, dont notamment :

1.5.1 Méthode Dreux-Gorisse :

C'est une méthode pratique qui simplifie et rend la formulation du béton plus pragmatique. Elle consiste à rechercher conjointement la résistance à la compression et l'ouvrabilité désirée à partir des données de base essentielles pour la formulation du béton telles que la dimension des granulats (D). La méthode de formulation de Dreux-Gorisse permet de déterminer les quantités optimales de matériaux (eau E, ciment C, sable S, gravillon g) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges. Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton. Il faut déterminer au préalable le rapport C/E, C et E, le mélange optimal à minimum de vides, la compacité du béton et les masses des granulats.

1.5.1.1 Dosage en Ciment et en Eau :

On commence par évaluer le rapport C/E en fonction de la résistance moyenne souhaitée f_c , on utilise pour cela une formule des études de Bolomey :

$$f_c = G * \sigma_c * \left(\frac{C}{E} - 0.5\right)$$

Avec :

f_c (Mpa) : résistance moyenne souhaité tel que $f_c=f_{c28}+15\%$

G : coefficient granulaire fonction du serrage du béton, de la dimension maximale du granulat et de leur qualité (Tableau 1.5.1)

C (Kg/m³) : dosage en ciment

E (litre/m³) : dosage en eau

σ_c (Mpa) : classe de résistance moyenne réelle du ciment

Tableau 1.5.1 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire G [24].

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Fins (D<16mm)	Moyens (25 < D < 40mm)	Gros (D >63mm)
Excellente	0,55	0,6	0,65
Bonne-Courante	0,45	0,5	0,55
Passable	0,35	0,4	0,45
Ces valeurs supposent que le serrage sera effectué dans de bonnes conditions (par vibration en principe).			

La connaissance ou l'évolution du f_c , G et σ_c permet de calculer la valeur de C/E, ce rapport devient alors une donnée du problème.

Par l'intermédiaire de l'abaque de la figure 1.5.1, on déduit le dosage en ciment C en fonction du C/E et de la plasticité désirée.

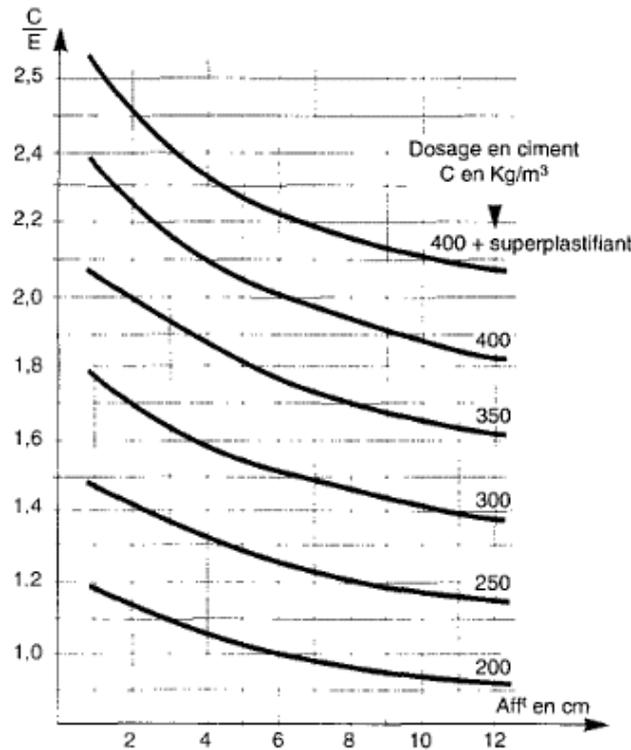


Figure 1.5.1: Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir [19].

La quantité d'eau de gâchage s'en déduit alors immédiatement. Elle sera ultérieurement corrigée expérimentalement pour obtenir la plasticité désirée (affaissement au cône).

Toutefois, pour une appréciation un peu moins aléatoire, on fera une première correction en fonction de la dimension des granulats, pour tenir compte de leurs surfaces spécifiques, en appliquant la correction indiquée dans le tableau 1.5.2.

Tableau 1.5.2 : Correction en pourcentage sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale D des granulats [19].

Dimension maximale des granulats D en mm	5	8 à 10	12,5 à 16	20 à 25	30 à 40	50 à 63,5	80 à 100
Correction sur le dosage en eau (en %)	+ 15	+ 9	+ 4	0	-4	-8	-12

1.5.1.2 Courbe granulaire de référence :

D'abord, on représente les courbes granulaires des granulats utilisés sur un graphique granulométrique normalisé. Ensuite la courbe granulaire de référence correspondant au mélange des granulats est schématisée par une ligne brisée (au point A) tracée sur le même graphe. Son origine basse (point O) est à 0% de tamisât pour la dimension 0.08mm correspondant théoriquement aux plus petits grains de sable. Et son extrémité haute (point B) à 100% pour la dimension D_{max} , correspondant aux plus gros granulats utilisés.

Son point de brisure (point A) a pour coordonnées :

$X = D/2$ pour $D < 20\text{mm}$ (milieu du segment limité $d=5\text{mm}$ et D pour $D > 20\text{mm}$)

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p$$

Avec :

K : coefficient à choisir dans le tableau 1.5.3

K_s : coefficient tenant compte du module de finesse du sable M_f ; $K_s = 6 \cdot M_f - 15$

K_p : coefficient de pompabilité pour le cas où le béton doit être de qualité pompable, on peut prendre en général : $K_p = +5$ à $+10$ (%)

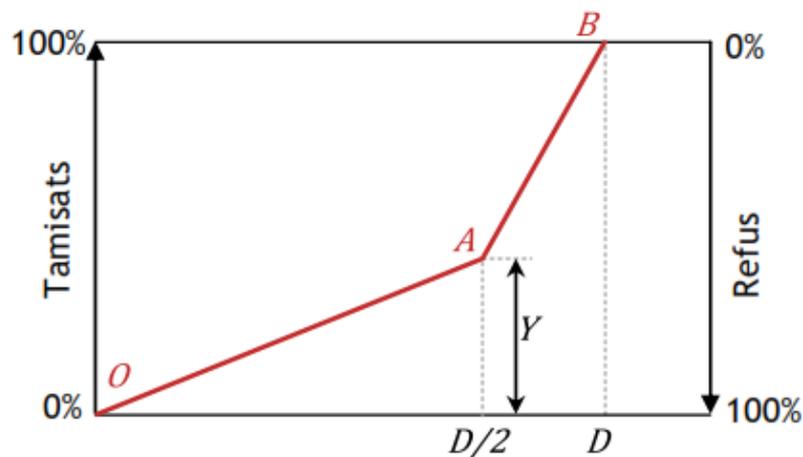


Figure 1.5.2: Schéma de principe de la courbe granulaire de référence pour un béton dont le D_{max} est inférieur ou égale 20mm [25].

Tableau 1.5.3: Valeur du terme correcteur K [24].

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

1.5.1.3 Proportion des granulats :

La figure 1.5.3 présente la méthode d'utilisation de la courbe granulaire de référence afin de déduire les pourcentages des granulats utilisés. Le segment A'B' relie le point A' à 95% de tamisât cumulés d'un granulat avec le point B' à 5% de tamisât cumulés de la courbe granulométrique du granulat directement supérieur en dimension.

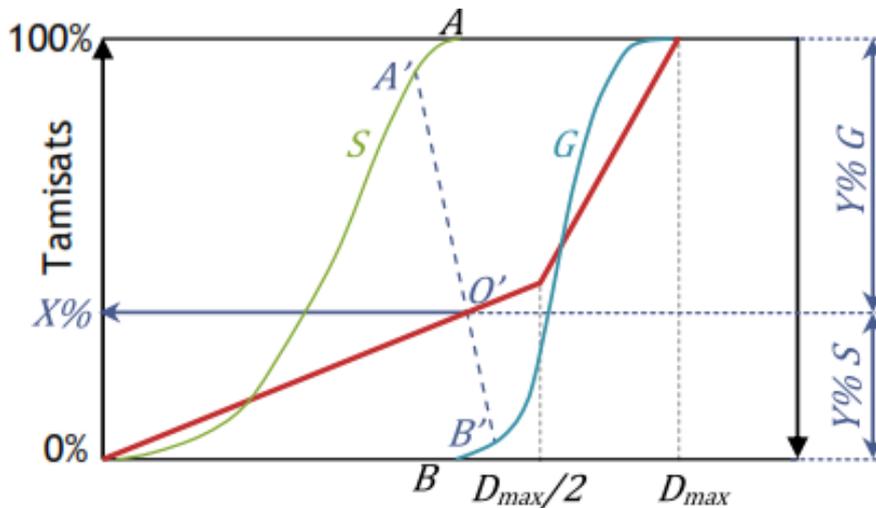


Figure 1.5.3: Utilisation de la courbe granulaire de référence [25].

1.5.1.4 Masse de granulats :

Il convient alors de faire appel à la notion de « coefficient de compacité » du béton. On définit celui-ci comme le rapport entre la somme des volumes absolus des constituants solides (granulats et ciment) et le volume de béton correspondant mis en œuvre que l'on prend ici égal à 1000 litres.

On a donc :

$$\gamma = \frac{V_g + V_c}{1000}$$

Avec V_g et V_c volumes absolus (en litres) des granulats d'une part et du ciment d'autres part dans un mètre cube de béton.

La connaissance du dosage en ciment C déjà fixé permet le calcul de V_c en supposant que la masse volumique du ciment est de 3.1 Kg/litre. Le choix de la valeur de γ dans le tableau 1.5.4, permet de calculer le volume absolu V_g de l'ensemble des granulats.

L'acquisition du pourcentage de chacun des constituants permet alors de calculer leurs volumes absolus respectifs en litres pour un mètre cube de béton. La connaissance de la masse volumique de chacun d'eux dans la formule de composition qui est alors complètement définie et qui, par addition des masses des différents constituants, donne la masse volumique théorique du béton frais.

Tableau 1.5.4: Compacité du béton en fonction du diamètre maximal D et du mode de serrage [24].

Consistance	Serrage	Dimension D des granulats en mm						
		D = 5	D = 10	D = 16	D = 25	D = 40	D = 63	D = 100
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

NOTA :

- Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés, sinon il conviendra d'apporter les :
 - ❖ Sable roulé et gravier concassé = -0,01.
 - ❖ Sable et gravier concassé = -0,03.
- Pour les granulats légers on pourra diminuer de 0,03 les valeurs de γ qui correspondent ici à des granulats denses ordinaires.

Pour un dosage en ciment $\neq 350 \text{Kg/m}^3$ on apportera le terme correctif suivant : $\frac{C-350}{5000}$

1.5.2 Méthode de Faury :

Faury proposa une nouvelle loi de granulation de type continu, il s'est inspiré pour cela de la théorie de Caquot relative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen.

La loi de granulation qui en découle est une loi fonction de $5\sqrt{d}$. La courbe granulométrique idéale conduisant à la compacité maximale est alors théoriquement une droite, cependant Faury a distingué les grains fins et moyens ($< D/2$), des gros grains ($> D/2$) et la pente de la droite n'est pas la même pour chacune de ces deux catégories. On trace pour l'ensemble du mélange, ciment compris une courbe granulométrique de référence qui est composée de deux droites, si l'on opère sur un graphique gradué, en abscisse, en $5\sqrt{d}$.

L'abscisse du point de rencontre de ces deux droites est fixé à $D / 2$ et son ordonnée Y est donnée par une formule tenant compte de la grosseur D du granulat et comportant certains paramètres dont la valeur est une valeur tabulée en fonction de types des granulats (roulés ou concassés) et de la puissance du serrage (simple piquage ou vibration plus ou moins intense). Y , se calcule par la formule suivante :

$$Y = A + 17\sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0.75}$$

A : valeur tabulée. Tableau 1.5.5

B : varie de 1 à 2 selon que le béton ferme ou mou.

D : est exprimé en dimension de passoire.

R : est le rayon moyen du moule.

Tableau 1.5.5 : Valeur de A [19].

	Sables et graviers roulés usuels	Sables roulé et graviers de broyage usuels	Sables et graviers de broyages usuels
Consistance très fluide mise en œuvre sans serrage	32 et au-dessus	34 et au-dessus	38 et au-dessus
Consistance fluide pour faible serrage	30-32	32-34	36-38
Consistance molle pour serrage moyen	28-30	30-32	34-36
Consistance ferme pour serrage soigné	26-28	28-30	32-34
Consistance très ferme pour serrage puissant	24-26	26-28	30-32
Consistance de terre humide serrage très puissant	22-24	24-26	28-30
Serrage exceptionnellement puissant	Au-dessous du 22 (à déterminer dans chaque cas)	Au-dessous du 24 (à déterminer)	Au-dessous du 28 (à déterminer)

1.5.3 Méthode d'Abrams :

C'est une règle de mélange basée sur l'obtention d'un certain module de finesse global pour le mélange de granulats à partir de la connaissance des modules de finesse des granulats à employer.

Le module de finesse du mélange est choisi de manière que les vides dans ces mélanges soient, en principe, réduits au minimum.

Les modules optimaux pour le béton de granulats roulés, déterminés expérimentalement par Abrams, sont indiqués dans le tableau suivant en fonction du dosage en ciment et de la dimension D du granulat le plus gros.

Tableau 1.5.6 : Valeurs optimales d'après Abrams du module de finesse des compositions granulaires des bétons courants [19].

Dosage en ciment Kg/m ³	Dimension maximale D des granulats						
	10	15	20	25	30	40	60
275	4,05	4,45	4,85	5,25	5,60	5,80	6,00
300	4,20	4,60	5,00	5,40	5,65	5,85	6,20
350	4,30	4,70	5,10	5,50	5,73	5,88	6,30
400	4,40	4,80	5,20	5,60	5,80	5,90	6,40

La règle du mélange d'Abrams permet de calculer les pourcentages relatifs des granulats de modules de finesse M_{f1} et M_{f2} pour obtenir un module M_f choisi pour le mélange.

$$\text{Proportion } S_1 = \frac{M_f - M_{f1}}{M_{f1} - M_{f2}}$$

$$\text{Proportion } S_2 = \frac{M_{f1} - M_f}{M_{f1} - M_{f2}}$$

Tout réside donc sur le choix judicieux du module de finesse du mélange à réaliser. Nous nous inspirons de cette méthode mais plus particulièrement pour l'étude de la granularité des sables.

1.5.4 Méthode de Valette :

R.Valette a mis au point une méthode essentiellement expérimentale mais qui nécessite cependant un certain nombre de calculs préparatoires. Cette méthode est souvent désignée par « dosage des bétons à compacité maximale » ou « dosage des bétons à minimum de sable » ou « dosage des bétons à granularité discontinue ». La méthode Valette proprement dite est quelquefois utilisée avec certaines variantes. Dans les cas les plus courants on parlera en général d'un béton binaire : un sable et un gravier présentant le plus souvent une certaine discontinuité (par exemple : sable 0/5 et gravier 16/25).

On calcule d'abord le dosage de sable et de ciment devant donner en principe le mortier plein avec un minimum de ciment, ce dosage s'obtient en mesurant les vides du sable mouillé et en calculant le dosage en ciment permettant de remplir le volume des vides du sable par un volume égal de pâte pure de ciment.

On ajoute en suite le maximum de gravier mouillé compatible avec une ouvrabilité permettant un moulage correct et une mise en œuvre facile dans les conditions du chantier.

On obtient alors le béton plein à minimum de sable et le moins dosé en ciment.

1.5.5 Méthode de Bolomey :

La méthode de Bolomey a le mérite d'avoir ouvert la voie aux études de béton. Toutefois, elle ne peut être appliquée qu'aux granulats dont la masse volumique absolue est comprise entre 2,5 et 2,7 t/m³, ce sont d'ailleurs les granulats les plus courants.

On se réfère dans ce cas aux courbes granulométriques des constituants secs. Un mélange quelconque de ces constituants à des proportions définies a lui aussi une courbe granulométrique. En fonction des quantités des constituants secs à mettre en œuvre on a une infinité de mélanges donc une infinité de courbes granulométriques. Le problème est de trouver qui correspond à un bon béton pour le travail à exécuter, cette courbe sera dite "courbe optimale".

Le principe de la méthode consiste à :

- Déterminer la courbe optimale du mélange des éléments secs,
- Calculer les pourcentages de ces constituants qui permettent de donner un mélange sec dont la courbe soit aussi voisine que possible de la courbe optimale,
- Déduire la composition d'un mètre cube de béton.

La courbe optimale:

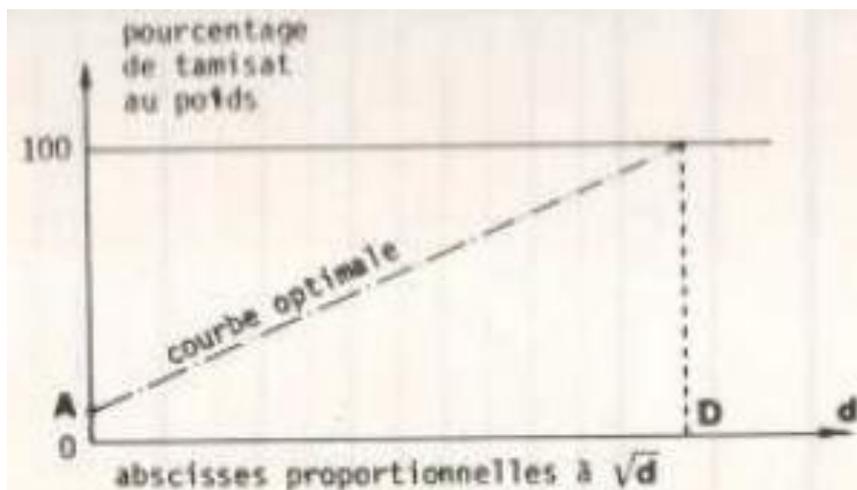


Figure 1.5.4 : Courbe optimale [20].

$$P = A + (100 - A) \sqrt{d/D}$$

A et D sont des constantes.

L'équation est sous la forme d'une droite : $y = a + b\sqrt{x}$ qui passe par les points : $d = 0$ et $P = A$; $d = D$ et $P = 100$

A : représente le pourcentage d'éléments très fins contenus dans le mélange sec, éléments qui ont une incidence sur la maniabilité du béton. La valeur de cette constante dépend de la consistance souhaitée pour le béton et de la provenance des granulats.

Tableau 1.5.7 : Valeur de A [20].

Consistance du béton	Granulats roulés	Granulats concassés
Béton damé	6 /8	8 /10
Béton armé	10	12 / 14
Béton coulé	12	14 /16

D : est la dimension du tamis qui serait tout juste suffisante pour laisser passer la totalité des granulats.

1.5.6 Méthode de Joisel :

Inspirée comme celle de FAURY de la théorie de CAQUOT, la méthode JOISEL est plus généralisant. Il considère que la loi de granulation conduisant à la compacité maximale est fonction de ${}^m\sqrt{d}$, où « m » dépend de la compacité avec laquelle se serre un granulat de dimensions uniforme suivant les moyens de serrage, « m » peut alors varier de 3 à 10.

En utilisant ${}^m\sqrt{d}$ comme graduation des abscisses, Joisel utilisa une courbe de référence de forme linéaire.

Comme dans la méthode de Faury, on aboutit donc en principe à une granularité continue sauf bien entendu si les granulats dont on dispose en pratique présentent une discontinuité. Toutefois, pour éviter cette cassure de la droite de référence au point d'abscisse $D/2$, Joisel a déterminé l'échelle de l'intervalle $\frac{D}{2}/D$ de façon à n'avoir qu'une simple et unique droite, c'est l'avantage de cette méthode

Comme pour les méthodes Faury et Valette le dosage en ciment déterminé par cette méthode est le dosage minimal correspondant théoriquement sur le plan granulométrique, à la compacité maximale : ce dosage est généralement nettement inférieur ($150-200\text{kg}/\text{m}^3$) au dosage nécessaire ou exigé.

Une correction doit être apportée dans ce sens.

1.6 Conclusion :

La qualité d'un béton dépend de ses constituants qui ont une influence sur son comportement à l'état frais et ses caractéristiques mécaniques à l'état durci.

Les différentes méthodes de composition du béton sont tout à fait adaptées pour comparer des formulations en fonction de la variation des caractéristiques d'un composant du mélange comme la classe du ciment ou la granulométrie des granulats.

Ces méthodes ont fait depuis longtemps leurs preuves pour les bétons courants et disposent d'un retour d'expérience positif important.

Chapitre 2 :

La durabilité des bétons

2.1 Introduction :

La durabilité des structures en béton est maintenant devenue un point important, y compris dans l'approche normative des ouvrages, ne serait-ce que parce que les réparations ont un coût non négligeable. Ainsi, les Eurocodes (règles européennes de construction) définissent la notion de durée d'utilisation de projet, durée pour laquelle la structure doit être dimensionnée de sorte que sa détérioration n'abaisse pas ses performances au-dessous de celles qui sont escomptées, compte tenu de l'environnement et du niveau de maintenance prévu.

La porosité est l'indicateur le plus utilisé, d'une part, parce qu'elle est facile à mesurer, d'autre part, parce qu'elle quantifie l'espace dans lequel se produisent les transferts d'espèces agressives (chlorures et CO_2 par exemple). En revanche, cette propriété ne donne aucune indication sur la capacité réelle du matériau à laisser ces espèces pénétrer sa porosité. En ce sens, la perméabilité, propriété du matériau régissant le transfert par perméation selon la loi de Darcy, est un indicateur de durabilité plus fin que la porosité.

2.2 Définition des indicateurs de durabilité :

Il s'agit de paramètres relatifs au matériau constitutif, qui apparaissent comme fondamentaux pour l'évaluation et la prédiction de la durabilité du matériau et de la structure vis-à-vis d'un ou de plusieurs processus de dégradation. Ils interviennent par exemple dans les équations régissant les phénomènes et figurent parmi les données d'entrée des modèles de prédiction de la durée de vie. Cette première condition permet d'assurer leur pertinence théorique. Une seconde condition doit en outre être vérifiée : ces paramètres doivent être facilement quantifiables à partir d'essais de laboratoire pratiqués sur éprouvettes, selon des modes opératoires bien définis et validés. Les méthodes d'essai doivent de plus présenter une reproductibilité, une précision, une simplicité et une rapidité adéquates.

Plus la résistance du béton augmente contre les phénomènes de transport, plus la durabilité augmente. Les transferts dans une pièce de béton durci s'établissent par l'intermédiaire : d'un réseau poreux, qui apparaît normalement dans la structuration de la pâte au cours de son hydratation. D'un réseau de fissure qui résulte lui-même du fonctionnement normal de certaines structures en béton armé (dalle, poutre). Dans ce cas la capacité de pénétration de ces agents dans le béton facilite la détérioration de la structure.

Il existe plusieurs organismes de normalisation ou sociétés techniques qui publient des normes ou des recommandations sur la plupart des aspects touchant la technologie du béton. Les plus connus sont :

- CSA (Canadian Standards Association)
- ASTM (American Society for Testing and Materials)
- CCDG (Cahier des Charges et Devis Généraux)
- ACI (American Concrete Institute)

2.3 Classification des indicateurs de durabilité :

Deux catégories d'indicateurs sont à distinguer. La première est celle des indicateurs de durabilité généraux, qui sont valables pour différents types de dégradation (corrosion des armatures ...etc.). La deuxième catégorie est celle des indicateurs spécifiques relatifs à un processus de dégradation donné, par exemple l'alcali réaction ou le gel.

2.3.1 Indicateurs de durabilité généraux :

2.3.1.1 La porosité :

La porosité d'un matériau caractérise l'importance des vides (connectés ou non) qu'il contient. Elle est définie par le rapport entre le volume des pores, et le volume total. Les pores interconnectés forment un espace continu dans le milieu poreux et participent au transport de matière à travers le matériau. La porosité de la pâte de ciment hydraté dépend fortement du rapport E/C car ce dernier gouverne directement l'espacement initial entre les grains de ciment.

La phase poreuse du béton peut être séparée en quatre types de vides : les pores de gel, les pores capillaires, les bulles d'air entraîné et les vides de compaction.

Les pores de gel sont ceux ayant la plus petite taille avec un diamètre de l'ordre de quelques nanomètres. Ils correspondent aux interstices laissés entre les feuillettes, et aux espaces vides laissés entre les particules et autres formes solides. Les pores de gel forment toujours un réseau de vides interconnectés. De plus, la porosité du gel est fixe et égale à environ 28% soit un peu moins du tiers du volume total du gel. Cette valeur est indépendante du rapport E/L et des conditions d'hydratation.

À une échelle supérieure, les vides capillaires représentent le volume de la pâte occupé initialement par l'eau de gâchage, et qui n'est pas rempli par les hydrates. Ces pores ont des formes variables, et [Neville 2000] rapporte que leur diamètre médian est d'environ 1,3 μm . Ils forment au départ (début de l'hydratation) un système de vides interconnectés distribués aléatoirement dans la pâte. Ce système de pores capillaires est le principal responsable de la perméabilité dans la pâte durcie, et de sa vulnérabilité au gel-dégel [Neville 2000]. Dans les pâtes denses où l'hydratation est suffisamment avancée, le système de pores capillaires est bloqué de sorte que l'inter-connectivité ne subsiste qu'entre les vides du gel. Pour avoir cette condition, la pâte doit avoir un rapport E/L assez faible et la période de cure doit être assez longue et adéquate [Neville 2000].

Les bulles d'air entraîné sont créées par l'ajout au mélange d'un adjuvant entraîneur d'air, qui a également pour rôle de stabiliser le réseau de vides sphériques ayant un diamètre compris entre 1 μm et 200 μm .

Enfin, les vides de compaction sont engendrés par une mise en place inadéquate, une mauvaise consolidation du matériau, ou une formulation inadéquate. Leur forme est donc indéfinie et leur taille peut être de l'ordre du centimètre.

La porosité est une propriété volumétrique représentant le contenu des pores qui ne sont pas nécessairement interconnectés, alors que la perméabilité est une propriété d'écoulement qui caractérise la facilité avec laquelle un matériau poreux se laisse traverser par un fluide (figure 2.3.1). Plus la porosité diminue, plus les propriétés mécaniques augmentent et plus la perméabilité diminue.

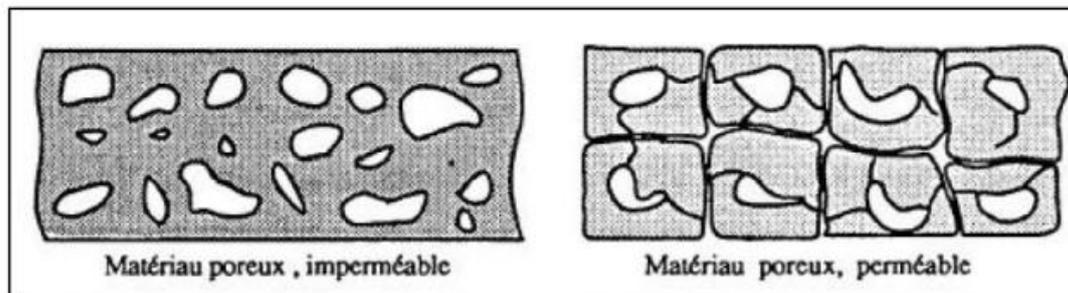


Figure 2.3.1: Représentation du matériau poreux imperméable et perméable [14].

2.3.1.2 La perméabilité :

La perméabilité est une grandeur physique relative au déplacement d'un fluide sous l'effet d'un gradient de pression. Elle dépend de la taille des espaces poreux dans lesquels s'écoule le fluide ainsi que leur interconnexion. La perméabilité est une propriété d'écoulement qui caractérise la facilité avec laquelle un matériau poreux se laisse traverser par un fluide.

Un béton perméable ouvre la porte aux différents agents agressifs extérieurs qui sont la principale cause de la corrosion des armatures et de la dégradation du béton. À l'inverse, un béton étanche ou très peu perméable est un béton durable.

Suivant la nature du fluide, on distingue la perméabilité à l'eau et la perméabilité au gaz.

- **Perméabilité à l'eau :**

Le type de perméabilité dépend de la nature des actions agressives pouvant affectées le béton. La perméabilité à l'eau est le principal facteur influençant sur la résistance au gel-dégel du béton [Pigeon et al, 1987 ; Power, 1949], la résistance à l'écaillage et la pénétrabilité des ions chlorure [Marchand et al., 1994], les mécanismes de la corrosion et l'attaque par les sulfates [Metha, 1986].

La perméabilité à l'eau est étroitement liée aux caractéristiques de la structure des pores de la pâte de ciment ou de l'interface pâte-granulat. Les pâtes de ciment les plus imperméables sont ceux ayant une porosité totale faible composée de pores capillaires fins, résultant de faible rapport Eau/Ciment (E/C). La perméabilité à l'eau de la pâte de ciment, du mortier ou du béton peut être significativement réduite par simple réduction du rapport E/C. Dans la pratique, il est généralement admis qu'avec une valeur de la perméabilité à l'eau inférieure à 5×10^{-14} m/s, le béton peut être considéré comme imperméable [Aitcin, 1993]. Cependant, un très faible rapport E/C n'est pas le seul moyen de produire un béton très imperméable. L'utilisation de super-plastifiant et des ajouts minéraux tels que la fumée de silice, les cendres volantes, la poudre de verre, peuvent contribuer à abaisser la perméabilité à l'eau ($<10 \times 10^{-14}$ m/s) du béton même pour un rapport E/L de 0,45 [Armaghani, v1991].

Un béton de faible perméabilité à l'eau est généralement un béton plus durable puisque plusieurs processus de détérioration peuvent s'initier seulement si l'eau extérieure chargée d'agents agressifs pénètre dans la masse du béton.

- **Perméabilité aux gaz :**

Comme le cas de la perméabilité à l'eau, la perméabilité à l'air des bétons à faibles rapports E/C est aussi très faibles due à la finesse et à la discontinuité du réseau de pores capillaires dans la pâte de ciment durcie. L'effet bénéfique du faible rapport E/C sur la perméabilité à l'air est particulièrement notable durant les 7 premiers jours de cure humide initiale. La perméabilité à l'air est affectée par la durée de cure. Une cure humide prolongée réduit la perméabilité à l'air, du fait qu'elle favorise la formation des produits d'hydratation additionnelle qui remplissent les pores favorisant leur affinement par segmentation. C'est principalement les 7 premiers jours de cure humide qui produisent la plus importante réduction de la perméabilité à l'air [Gagne et al, 1993]. Il convient de souligner que la perméabilité à l'air est beaucoup moins sensible à la durée de cure pour les bétons de faible rapport E/C. Ceci constitue un avantage pratique important puisque les bétons à faible rapport E/C seront peu affectés par une mauvaise cure initiale.

La perméabilité à l'air est un paramètre majeur de la durabilité des bétons armés dans la mesure où, celle-ci contrôle la teneur en oxygène et en dioxyde de carbone disponible dans le béton d'enrobage protégeant les barres d'armature. Une faible perméabilité à l'air est très bénéfique parce qu'elle permet de réduire soit l'oxygène pouvant alimenter la formation des produits expansifs ou soit le CO₂ et par conséquent les risques de carbonatation qui peuvent accélérer les processus de corrosion par destruction de la couche protectrice des armatures. Les phénomènes d'efflorescence et de carbonatation sont souvent contrôlés par la teneur en CO₂ disponible qui dépend de la perméabilité à l'air [Scholin et Hilsdorf, 1989].

2.3.1.3 Diffusion ionique :

La diffusion est un mode de transport des espèces chimiques sous l'effet d'un gradient de concentration. La diffusivité dans un matériau poreux ne dépend pas de la taille des pores, elle ne dépend que de leur interconnexion.

La diffusion ionique est le déplacement des ions en solution sous l'effet de leur agitation thermique. Cette agitation produit des collisions aléatoires entre les particules qui a pour effet de les disperser vers des régions de la solution où la concentration est plus faible [Samson2005]. Autrement dit, il s'agit d'un mouvement d'ions des régions à haute concentration vers des régions à faible concentration.

2.3.2 Indicateurs de durabilité spécifiques :

Selon le processus de dégradation considéré, il peut s'avérer nécessaire de compléter le panel d'indicateurs généraux par des indicateurs spécifiques à ce processus à titre d'exemple, pour la prévention des dégradations dues au gel, les caractéristiques du réseau de bulles d'air (en particulier le facteur d'espacement : demi-distance entre deux bulles voisines) semblent être un indicateur spécifique pertinent. En effet, ces caractéristiques peuvent se révéler au moins aussi importantes que les caractéristiques du réseau poreux, vis-à-vis du gel, selon le type de béton considéré et la quantité d'air entraîné. Dans le cas de la prévention des dégradations dues à l'alcali-réaction, les indicateurs spécifiques, concernent deux échelles d'observation :

2.3.2.1 Indicateurs chimiques microscopiques (relatifs aux constituants du béton) :

Ça concerne la quantité de silice libérée par les granulats en fonction du temps (cinétique), pour l'évaluation de la réactivité des granulats et la concentration en alcalins équivalents. Le moyen le plus simple d'accéder à cet indicateur est d'effectuer un bilan des alcalins. Le recours à cet indicateur n'est nécessaire que dans le cas de granulats peu réactifs.

2.3.2.2 Indicateur global et macroscopique (relatif au béton durci) :

C'est la déformation de gonflement d'éprouvettes en béton « essai de performance » d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali réaction. Cet indicateur est requis seulement dans certains cas.

2.4 Les caractéristiques du béton contrôlant la durabilité :

2.4.1 Influence des propriétés intrants du béton :

2.4.1.1 Type de ciment :

Exemples : Certains types de ciment offrent de meilleures performances en présence d'eau de mer ou de granulats potentiellement réactifs. En milieu marin, il peut être nécessaire d'utiliser un ciment type 50 à faible teneur en C_3A , car la réaction de C_3A avec de l'eau est très violente et mène au raidissement immédiat de la pâte, connu sous le nom de prise rapide.

Pour limiter les risques de réaction alcalis-granulats on peut choisir un ciment à faible teneur en alcalis, car ce phénomène d'alcali-réaction résulte de l'action des alcalins solubles (oxyde de sodium Na_2O et oxyde de potassium K_2O) du béton sur une certaine forme de silice réactive, en présence d'eau.

2.4.1.2 Type de granulats :

Certains granulats sont gélifs, c'est-à-dire qu'ils sont sensibles à l'action des cycles de gel-dégel. Il faut donc éviter de les utiliser dans les bétons exposés au gel. Il existe aussi des granulats qui peuvent réagir avec les alcalis du ciment pour former des produits expansifs qui peuvent faire fissurer le béton (réaction alcalis-granulats). Il existe des essais d'acceptation qui permettent d'identifier les granulats potentiellement réactifs.

2.4.1.3 Ajouts minéraux :

Les ajouts minéraux peuvent modifier considérablement le comportement du béton exposé à un environnement donné. Ils peuvent parfois améliorer ou diminuer la durabilité du béton. Les effets sont fonction du type et du dosage de l'ajout minéral.

2.4.2 Influence des propriétés physico-chimiques et des paramètres de formulation du béton :

2.4.2.1 Résistance à la compression et à la traction :

Une résistance à la compression élevée est généralement un indice de bonne qualité du béton, Elle est généralement le signe d'un rapport E/C (eau/ciment) faible qui produit généralement une pâte de ciment durcie de meilleure qualité (porosité et perméabilité plus faibles). Une bonne résistance à la traction est souhaitable pour la résistance au gel. La résistance à la compression peut être utilisée pour spécifier un niveau de maturité minimal avant la première exposition en milieu agressif (résistance minimale à 28 jours).

2.4.2.2 Choix du rapport Eau/Ciment (E/C) ou Eau/Liant (E/L) :

Le rapport E/C est un paramètre fondamental qui contrôle la plupart des propriétés physico-chimiques du béton. Le E/C exerce un rôle prépondérant dans presque tous les mécanismes de destruction qui peuvent affecter le béton. Du point de vue de la durabilité, une réduction du E/C est presque toujours bénéfique car elle entraîne une diminution de :

- Porosité de la pâte de ciment hydraté
- Perméabilité de la pâte et du béton

2.4.2.3 Caractéristiques des vides d'air :

La production d'un bon réseau de bulles d'air entraînées et d'un bon facteur d'espacement nécessaires pour obtenir un béton durable face aux cycles de gel-dégel.

2.5 Classes d'exposition en fonction des actions dues à l'environnement :

Les actions dues à l'environnement sont réparties en classes d'exposition dans les tableaux 2.5.1 et 2.5.2. Les exemples sont donnés à titre informatif.

Le choix des classes d'exposition dépend des dispositions en vigueur là où le béton est utilisé. Cette classification des expositions n'exclut pas la prise en compte des conditions particulières existant là où le béton est utilisé, ni l'application de mesures de protection telles que l'utilisation d'acier inoxydable ou de tout autre métal résistant à la corrosion, ni l'utilisation de revêtements protecteurs du béton ou des armatures.

Le béton peut être soumis à plusieurs des actions décrites au Tableaux 2.5.1 et 2.5.2 ; dans ce cas, les conditions environnementales auxquelles il est soumis, peuvent nécessiter d'être exprimées sous la forme de combinaison de classes d'exposition.

Tableau 2.5.1 : Classe d'exposition [8].

Désignation de la classe	Description de l'environnement	Exemples informatifs illustrant le choix des classes d'exposition
1. Aucun risque de corrosion ni d'attaque		
X0	Béton non armé et sans pièces métalliques noyées : toutes les expositions sauf en cas de gel/dégel, d'abrasion et d'attaques chimiques.	
	Pour le béton armé ou avec des pièces métalliques noyées : Très sec	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est très faible.
2. Corrosion induite par carbonatation		
Lorsque le béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées est exposé à l'air et à l'humidité, les différentes classes d'exposition sont classifiées ci après :		
NOTE On entend par condition d'humidité celle du béton recouvrant les armatures ou les pièces métalliques noyées, mais, dans de nombreux cas, cette humidité peut être considérée comme le reflet de l'humidité ambiante. Dans ces cas-là, une classification fondée sur les différents milieux ambiants peut être appropriée ; il peut ne pas en être de même s'il existe un barrière entre le béton et son environnement.		
XC1	Sec ou humide en permanence	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est faible. Béton submergé en permanence dans de l'eau
XC2	Humide, rarement sec	Surfaces de béton soumises au contact à long terme de l'eau. Un grand nombre de fondations
XC3	Humidité modérée	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est moyen ou élevé. Béton extérieur abrité de la pluie.
XC4	Alternance d'humidité et de séchage	Surfaces soumises au contact de l'eau, mais n'entrant pas dans la classe d'exposition XC2.
3. Corrosion induite par les chlorures, ayant une origine autre que marine		
Lorsque le béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées est soumis au contact d'une eau ayant une origine autre que marine, contenant des chlorures, y compris des sels de déverglaçage, les différentes classes d'exposition sont classées comme suit :		
NOTE A propos des conditions d'humidité, voir aussi la section 2 de ce tableau.		
XD1	Humidité modérée	Surfaces de bétons exposées à des chlorures transportés par voie aérienne.
XD2	Humide, rarement sec	Piscines. Béton exposé à des eaux industrielles contenant des chlorures.
XD3	Alternance d'humidité et de séchage	Éléments de ponts exposés à des projections contenant des chlorures. Chaussées. Dalles de parc de stationnement de véhicules.

Tableau 2.5.2 : Classe d'exposition [8].

Désignation de la classe	Description de l'environnement	Exemples informatifs illustrant le choix des classes d'exposition
4. Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer		
Lorsque le béton contenant une armature ou des pièces métalliques noyées est soumis au contact des chlorures présents dans l'eau de mer ou à l'action de l'air véhiculant du sel marin, les différentes classes d'exposition sont :		
X51	Exposé à l'air véhiculant du sel marin, mais pas en contact direct avec l'eau de mer	Structures sur ou à proximité d'une côte.
X52	Immergé en permanence	Éléments de structures marines.
X53	Zones de marnage, zones soumises à des projections ou à des embruns	Éléments de structures marines.
5. Attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage		
Lorsque le béton est soumis à une attaque significative due à des cycles de gel/dégel alors qu'il est mouillé, les différentes classes d'exposition sont :		
XF1	Saturation modérée en eau sans agent de déverglaçage	Surfaces verticales de bétons exposées à la pluie et au gel.
XF2	Saturation modérée en eau avec agents de déverglaçage	Surfaces verticales de bétons des ouvrages routiers exposées au gel et à l'air véhiculant des agents de déverglaçage.
XF3	Forte saturation en eau, sans agent de déverglaçage	Surfaces horizontales de bétons exposées à la pluie et au gel.
XF4	Forte saturation en eau, avec agents de déverglaçage ou eau de mer.	Routes et tabliers de pont exposés aux agents de déverglaçage et surfaces de bétons verticales directement exposées aux projections d'agents de déverglaçage et au gel : Zones des structures marines soumises aux projections et exposées au gel.

2.6 Le béton en milieux agressifs (Attaque externe du béton) :

2.6.1 Attaque des sulfates :

Les ions sulfates sont présents de façon naturelle dans certains sols et eaux souterraines, au contact du béton on parle alors, des attaques sulfatiques, L'utilisation du pluriel pour évoquer la dégradation du béton par les sulfates n'est pas anodine ni accessoire, car il y a une réelle multiplicité des attaques, tant au niveau des origines que des manifestations du phénomène. Lorsque les sulfates proviennent du milieu environnant les attaques sulfatiques sont dites externes.

Les conséquences de la pénétration des sulfates dans le béton sont la formation de gypse, d'ettringite.

En l'absence d'ions sulfate, l'hydratation du C_3A produirait un phénomène de prise rapide du ciment en formant directement des aluminates hydratés. En présence de sulfate, cette réaction est remplacée par une réaction plus lente, qui se déroule en deux étapes.

Dans la première étape, l'aluminate tricalcique et le gypse se dissolvent rapidement. Les ions ainsi produits se combinent pour donner instantanément des cristaux d'ettringite lorsque la solution devient sursaturée. Dans ce cas, l'ettringite primaire qui se forme n'est pas nocive pour le béton.

Dans la deuxième étape l'ettringite dite tardive ou différée qui se forme, nocive car provoquant un gonflement et à terme, une désagrégation du matériau durci, les sulfates ayant une origine interne ou externe.

La formation de l'ettringite différée peut schématiquement se résumer comme suit :

- formation de gypse dit " tardif " qui résulte d'une substitution entre la portlandite Ca(OH)_2 et les sulfates solubles ;
- puis réaction entre le gypse "tardif" et les aluminates de calcium du ciment.

2.6.2 Attaque par les chlorures :

L'exposition du béton aux chlorures a deux origines principales : l'eau de mer et les sels de déverglaçage, les deux environnements ont pour conséquence commune la corrosion des armatures du béton armé. Leurs intensités varient suivant les caractéristiques du béton et de l'environnement : taux de saturation, concentration en chlorures, température.

La présence d'ions chlorure entraîne une corrosion localisée particulièrement préjudiciable, par piqûres de l'acier, et donc une perte de résistance mécanique du matériau. La rouille entraîne dans ce cas des gonflements et un éclatement du béton (formation d'épaufrures sur les ouvrages).

2.6.3 Carbonatation :

Un climat doux et tempéré, un environnement urbain, constituent un environnement agressif qui pourra affecter la durabilité des structures, c'est bien la durabilité du béton armé qui est considérée non directement celle du béton. En effet si la carbonatation entraîne des modifications notables dans la structure du matériau, elle n'altère pas systématiquement ses propriétés mécaniques et de transfert. Il semble même qu'elle conduise à une augmentation de la résistance en compression et du module d'élasticité, cependant le matériau deviendrait plus fragile [Chang et Chen, 2005].

En revanche, Le dioxyde de carbone (CO_2) présent dans l'air, pénètre sous forme gazeuse dans le béton par le réseau poreux ou par les fissures, il se dissout dans la solution interstitielle et réagit avec la Portlandite Ca(OH)_2 et les silicates de calcium hydratés pour former des carbonates de calcium CaCO_3 .

Cette réaction abaisse le pH de la solution interstitielle du béton jusqu'aux environs de 9. Ce qui conduit à la dépassivation des armatures lorsque le front de carbonatation atteint ces dernières, Le gonflement des produits d'oxydation des armatures qui en résulte pourra entraîner l'éclatement du béton d'enrobage.

2.6.4 Lixiviation (dissolution) :

La lixiviation ou « lessivage » du béton concerne tous les ouvrages immergés. En effet, la solution interstitielle du béton est fortement basique et chargée en ions calcium et alcalins, à la différence de la plupart des eaux en contact avec le béton, qui imposent donc un fort gradient de concentrations.

Le phénomène de lixiviation est d'autant plus intense que l'eau en contact avec le béton est peu minéralisée et acide. La lixiviation conduit à une fuite du calcium ce qui a pour conséquence la dissolution des hydrates de la matrice cimentaire principalement la Portlandite, ce phénomène permet la pénétration d'éléments par diffusion comme les ions sulfates, magnésium, chlorures, carbonates ... [Guillon, 2004].

2.6.5 Réaction Alkali-silicat :

La réaction alcali-silice est une pathologie des bétons qui se caractérise au niveau local par l'attaque des ions hydroxydes et la déstructuration du réseau siliceux contenu dans les granulats réactifs. Ce phénomène se produit en deux étapes : attaque des liaisons silanols et coupure des ponts siloxanes. Les alcalins et les ions calcium équilibrent les charges négatives engendrées par la rupture des liaisons du réseau siliceux. Ces réactions conduisent à la formation de produits silico-alcalins (gels) et/ou silico-calco-alcalins (C-K-S-H) riches en eau caractéristiques des alcalis-réactions.

Au voisinage des sites réactifs, des cristallisations d'ettringite secondaire peuvent se former, la précipitation de l'ettringite pourrait être expliquée par deux phénomènes complémentaires :

- l'ouverture de fissures par la réaction Alkali-Granulat permet des arrivées d'eau propices à l'apparition de l'ettringite différée.
- la consommation des alcalins par le gel siliceux est compensée par une solubilisation de la chaux (pour maintenir le pH), un nouvel équilibre thermodynamique de la solution interstitielle se crée alors, pouvant éventuellement induire une précipitation d'ettringite si les composants de la solution interstitielle le permettent.

2.6.6 Les attaques bactériennes et biochimiques :

Les bétons utilisés dans les infrastructures d'assainissement les systèmes d'égouts et les pipelines sont sujet en plus des attaques habituelles à des attaques chimiques et bactériennes, ces attaques peuvent être très dangereuses et nécessitent une grande attention.

La corrosion de ces infrastructures ont été sujet de débat depuis des décennies, avec un peu de consensus sur les méthodes de conception et de spécifications pour répondre de façon optimale aux exigences environnementales et leurs durées de service [Attiobe et Rizkalla, 1988 ; Yamanaka et Al, 2004].

L'effluent n'est pas en lui-même particulièrement agressif pour le béton sauf érosion, par contre, la flore bactérienne chimiotrophes qui s'y développe oxyde le sulfure d'hydrogène H_2S en acide sulfurique H_2SO_4 qui lui par contre est très agressif.

2.7 Conclusion :

La durabilité d'un béton est intimement liée à ses propriétés de transport qui définissent des chemins préférentiels par lesquels des agents extérieurs potentiellement agressifs pourraient y pénétrer et accentuer les processus de dégradations prématurées du béton. Ces propriétés jouent un rôle primordial dans les diverses formes de dégradations des bétons en constituant un pont entre les agents extérieurs agressifs et les mécanismes de dégradations précoces d'un béton. L'importance capitale de ces propriétés dans la durabilité des bétons nous incite à leur accorder une attention particulière lors de la formulation des bétons.

Chapitre 3 :

Les ajouts cimentaires

3.1 Introduction :

Les ajouts minéraux sont largement utilisés en substitution partielle du ciment portland à travers le monde .Ils proviennent de sources naturelles (pouzzolane, calcaire) ou de sous-produits industriels (laitier, cendres volantes...), leur valorisation présente plusieurs avantages : économiques, écologiques et technologiques.

L'utilisation des ajouts minéraux en remplacement du clinker est très bénéfique, car en plus des économies d'énergie et de la diminution du CO₂, les ajouts peuvent améliorer les propriétés du béton, en augmentant sa compacité et en changeant sa microstructure. Les ajouts minéraux tel que le laitier du haut fourneau, les cendres volantes, la fumée de silice... etc, sont les matériaux les plus fiables pour leurs qualités où la réaction pouzzolanique améliore la résistance des bétons ainsi que leurs durabilité.

Les normes s'accordent pour définir comme « fines » les éléments passant à travers un tamis de 80µm. On adopte aussi le terme « filler » pour désigner les éléments bruts de concassage inférieurs à 80µm. Il s'agit donc de produits fins obtenus par fragmentation pouvant d'ailleurs contenir des éléments de pollution [Motureux&Harain, 1980].

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.

3.2 Description des additions minérales :

D'une manière générale, les additions minérales se scindent en deux familles :

- les additions de type I dites inertes comme les fillers calcaires,
- les additions de type II dites actives comme la fumée de silice, le laitier de haut fourneau, les cendres volantes ou le métakaolin.

3.2.1 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 possédants des propriétés liantes.

La pouzzolane naturelle 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. Tandis que la pouzzolane artificielle est un produit de même composition que la pouzzolane naturelle mais ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques, elle peut être d'origine d'argiles ou de schistes.

La réaction pouzzolanique est définie comme la réaction entre les phases actives de la pouzzolane avec de la chaux. La quantité de matière amorphe détermine généralement la réactivité des pouzzolanes naturelles. La réaction pouzzolanique est évaluée par la consommation de la chaux dans un mélange de chaux-pouzzolane ou la mesure de la silice et l'alumine soluble dans l'acide. Selon [Ramezani pour 2014 ; Lea's, 2004], il y a plusieurs paramètres influençant cette activité pouzzolanique, La nature des phases actives et leurs proportions, la finesse des pouzzolanes, le rapport chaux/ pouzzolane dans le mélange, la durée et la température de cure.

L'utilisation de la pouzzolane se limite seulement au secteur de l'industrie cimentaire, qui l'utilise comme ajout actif à des taux de 15 à 20 % dans la fabrication des ciments composés.

3.2.2 Le laitier de haut fourneau :

Le laitier des hauts fourneaux, ou 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.

Plusieurs études ont montrées que le béton incorporant du laitier résiste mieux à l'action des eaux agressives, il a une bonne résistance aux sulfates surtout pour les taux de remplacement élevés et peuvent résister au cycle gel/dégel, grâce à :

- La réduction de la perméabilité ;
- La diminution de la chaux libre (laquelle faciliterait la désagrégation sous la modification de volumes dus à la présence d'eau alternativement congelé et liquide).

De plus, le laitier a un effet bénéfique sur les réactions alcalis-silice, ces dernières décroissent avec l'augmentation de la teneur en laitier due à la fixation par ce dernier des ions sodium.

Le laitier de haut fourneau granulé est principalement utilisé comme addition pour liants hydrauliques, dans la production de ciment ou la fabrication de bétons.

Tableau 3.2.1 : Propriétés physiques et composition chimique moyenne de laitier haut –fourneau [3].

Propriétés physiques		Composition chimique moyenne (%)	
Masse volumique	2700-3000 kg/m ³	SiO ₂	29-38
Surface spécifique de Blaine	≥ 3000 cm ² /g	Al ₂ O ₃	13-24
		CaO	38-48
Granularité classique	$d_{50} \approx 10 \mu m$	MgO	≤ 6
	$d_{max} < 40 \mu m$	K ₂ O	0.9
Morphologie	Particules anguleuses	Sulfates ≤ 2	≤ 2

3.2.3 Les fumées de silice :

Les fumées de silice sont des sous-produits de la fabrication de silicium. La taille moyenne de leurs particules est d'environ 0,1 μm. Elles sont de très petites particules qui peuvent être de 30 à 100 fois plus fines que les grains de ciment Portland.

Elles peuvent avoir deux effets dans le système cimentaire où elles sont incorporées : un effet de remplissage des espaces vides entre les grains de ciment occupés généralement par l'eau, et un effet pouzzolanique obtenu grâce à la structure amorphe, à la très haute teneur en silice et à la grande surface spécifique des fumées de silice. La fumée de silice réagit avec la portlandite produite par l'hydratation des silicates de calcium du ciment Portland pour former un silicate de calcium hydraté.

La fumée de silice permet de réduire considérablement la perméabilité à l'eau du béton. Le remplacement de 10% du ciment par de la fumée de silice rend pratiquement imperméable à l'eau un béton fabriqué avec un rapport E/L de 0,45, ce qui nous permet d'avoir un béton avec une bonne résistance aux cycles gel-dégel, à la pénétrabilité des ions chlorures et les attaques aux sulfates.

Tableau 3.2.2 : Composition chimiques de la fumée de silice [31].

Composés	Silicium (gris)	Ferrosilicium (gris)	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	2.9	0.6	1.2

3.2.4 La cendre volante :

La cendre volante est un résidu de combustion qui se mélange aux particules fines et aux gaz formant la fumée. Dans un contexte industriel, la cendre volante vient principalement de la combustion du charbon.

La Norme ASTM C618 – 80 regroupe les cendres volantes en deux grandes classes suivant leur composition chimique :

- **La classe F** riche en oxyde (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ > 70 %) avec une teneur faible en chaux (CaO < 10 %). Elle est qualifiée de silico-alumineuse ;
- **La classe C** riche en chaux (CaO > 10 %) avec une teneur en oxyde (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ > 50%). Elle est qualifiée de silico-calcaire.

L'utilisation des cendres volantes dans le béton permet d'atteindre plusieurs objectifs :

- Réduire la quantité de ciment utilisée et donc diminuer les coûts
- Réduire la chaleur d'hydratation en retardant et en ralentissant l'hydratation du ciment ce qui permet d'éviter les fissurations par retrait thermique des ouvrages massifs
- Améliorer la maniabilité du béton en raison de leur sphéricité et de leur très petite dimension ce qui influe sur la rhéologie des pâtes de ciment, donc l'ajout de cendres peuvent jouer un rôle de plastifiant
- Améliorer la durabilité et les performances mécaniques à long terme du fait de leur activité pouzzolanique et leur effet filler

Lorsque les cendres volantes, entre 7 et 28 jours, initient leur activité pouzzolanique, la porosité de la matrice commence à décroître. Compte tenu du délai de réaction des cendres, c'est avec le temps que le béton aux cendres deviendra plus imperméable qu'un béton classique.

Tableau 3.2.3 : Propriétés physiques et composition chimique moyenne des cendres volantes [3].

Propriétés physiques		Composition chimique moyenne (%)		
Masse volumique	$\approx 2900 \text{ kg/m}^3$	SiO_2	Silico-alumineuse 21-37	Silico-calcaire 44-58
Surface spécifique de Blaine	$2200 - 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$	Al_2O_3	41-61	20-24
Granularité classique	$d_{50} \approx 33 \mu\text{m}$ $d_{max} < 100 \mu\text{m}$	Fe_2O_3	4-13	5-9
Morphologie	Particules sphériques	CaO	0-4.9	5.2-11.3

3.2.5 Les fillers calcaire :

Les produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométrie contrôlée, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns obtenus par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basalte, bentonite, cendres volantes C). Les fillers se différencient les uns des autres par :

- Leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qu'ils contiennent ;
- Leur finesse, la forme des grains et leur état de surface ;
- Leur dureté, leur porosité.

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine.

Les différents résultats montrent que les fillers calcaires ajoutés à un ciment Portland peuvent jouer plusieurs rôles :

- Un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe granulométrique (bétons ouvrables retenant mieux l'eau);
- Rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle ;
- Rôle chimique et physique conduisant à l'accélération de l'hydratation du C_3A et à la formation de carboaluminates : germes de cristallisation et points d'ancrage des hydrates.

3.2.6 La poudre de verre :

La poudre de verre est obtenue en broyant à une certaine finesse le verre récupéré des différentes décharges. La composition chimique de cette poudre montre qu'elle a une large quantité de silicate et une bonne quantité de calcium. Avec sa structure amorphe, le verre a la capacité d'être une pouzzolane ou même un matériau cimentaire. Ce nouveau matériau cimentaire sera décrit avec plus de détails dans les chapitres qui suivront.

Cette poudre de verre fait l'objet de l'étude de ce projet.

3.3 Conclusion :

Les ajouts cimentaires peuvent être actifs ayant une réaction pouzzolanique, 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 influence sur plusieurs propriétés du béton à l'état frais (maniabilité et le ressuage) et à l'état durci (résistance et durabilité).

Chapitre 4 :

La poudre de verre

4.1 Introduction :

Le verre est un matériau issu d'un mélange de sable siliceux, de chaux ou de soude porté à de très hautes températures (fusion). Le mélange devient transparent, fluide, puis après refroidissement, il se solidifie mais reste généralement fragile.

Ce matériau a l'avantage d'être recyclé à l'infini, chaque année des tonnes de produits de verrerie se retrouvent dans les décharges ou jetés dans la nature sans aucun respect de l'écologie. Ces déchets constituent en effet une menace majeure sur notre environnement car ces produits mettront beaucoup de temps pour se dégrader si on ne les traite pas convenablement. A l'heure actuelle, de nombreuses associations tirent la sonnette d'alarme pour attirer l'attention des pouvoirs publics et les citoyens sur le danger que ces déchets peuvent causer à la nature.

4.2 Définition de la poudre de verre :

La poudre de verre est obtenue en broyant à une certaine finesse le verre récupéré. Lorsqu'elle est incorporée au béton en remplacement d'une portion de ciment, la poudre de verre se lie avec les éléments de la chaux en vertu de ses propriétés pouzzolaniques.

4.3 Propriétés du verre :

4.3.1 Propriétés physiques :

La transparence : mais il peut être opaque ou opalescent.

La dureté : seuls les diamants et le carbure de tungstène le rayent. Le verre le plus dur est le verre de Bohême par contre le cristal est le plus tendre.

La densité : elle dépend des composants ; elle est d'environ 2,5. Cela signifie qu'un mètre cube pèse environ deux tonnes et demie ou qu'une feuille d'un mètre carré et d'un millimètre d'épaisseur pèse 2,5 kg.

La résistance et l'élasticité : la cassure du verre est liée à sa flexion et à sa résistance au choc. Il casse là où le métal se tord. Contrairement, sa résistance à la compression est importante : il faut une pression de 10 tonnes pour briser un centimètre cube de verre.

L'imperméabilité : elle est extrêmement grande mais le verre reste poreux pour certains liquides comme le kérosène.

4.3.2 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 ordinaire contient généralement près de 70 % de SiO_2 .

Le tableau 4.3.1 donne les différentes compositions chimiques du verre en général (bouteilles et les vitres). Le point de ramollissement à hautes températures est utilisé dans la fabrication des outils de cuisson et matériels de laboratoire.

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 4.3.1. Avec sa structure amorphe, le verre a la capacité d'être une pouzzolane ou même un matériau cimentaire.

Tableau 4.3.1 : Composition chimique de différents types de verre [32].

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

4.4 Classification du verre dans le diagramme ternaire :

Le diagramme de phase $\text{CaO-SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ est très important du point de vue technologique, car il est utilisé par l'industrie du ciment Portland, des ciments alumineux, des réfractaires, des verres et aussi par les métallurgistes au moment de l'ajustement de leur laitier. Le diagramme est basé sur une représentation triangulaire qui utilise les propriétés du triangle de **Rooseboom**.

En fonction de la composition chimique de chaque matériau, en se basant sur la quantité de la chaux, de la silice et de l'alumine, on peut classer plusieurs ajouts cimentaires utilisés dans le domaine du béton. La figure 4.4.1 montre le classement du verre par rapport au ciment Portland et aux autres ajouts cimentaires utilisés comme additifs au ciment, que ce soit dans des mélanges binaires, ternaire ou quaternaire.

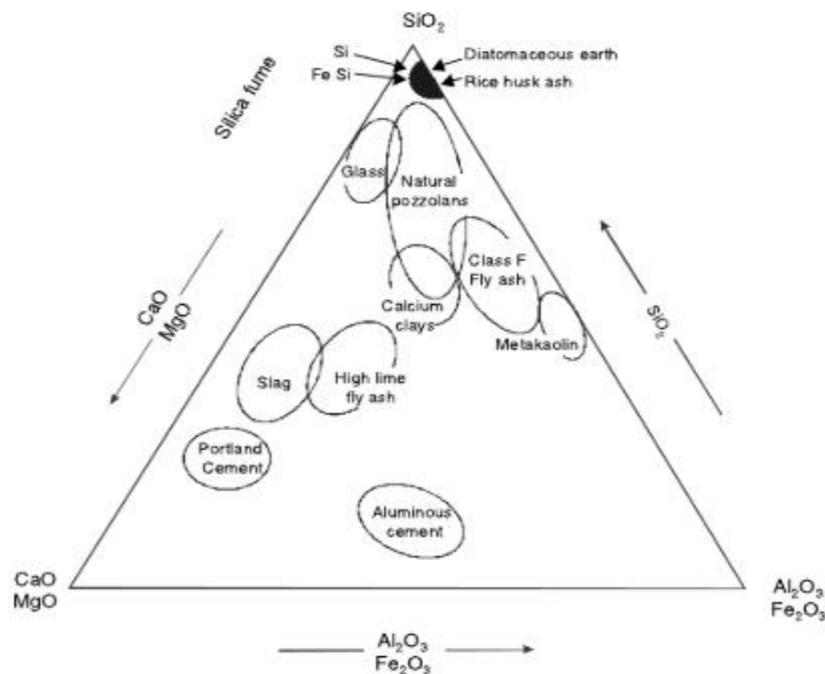


Figure 4.4.1 : Classification des ajouts cimentaires selon leur composition chimique [38].

4.5 Le recyclage du verre :

La gestion des déchets de verre est un problème grandissant. Les Américains ne parviennent pas à réutiliser leur verre post-consommation – 11 millions de tonnes par an. Seulement un tiers de ce verre est recyclé, le reste étant abandonné dans les décharges. Alors même que le verre est recyclable à 100 %, l'étude affirme que de plus en plus de villes américaines abandonnent leur programme de recyclage, principalement pour des raisons financières : trier le verre est complexe et coûteux, et les débouchés sont insuffisants.

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.

Au Canada, Tricentris (organisme de tri au Québec) annonce aujourd'hui que la poudre de verre est enfin reconnue comme ajout cimentaire par le Groupe CSA (Canadian Standards Association). Cette nouvelle norme CSA-A3000 est accueillie comme une victoire et un privilège, mais aussi comme la consécration de près d'une décennie de travail acharné.

Depuis 2010, Tricentris est impliqué dans la valorisation du verre au Québec. C'est en collaboration avec la Société de valorisation et de commercialisation de l'Université de Sherbrooke (SOCPRA) et du professeur Arezki Tagnit-Hamou, de la Faculté de Génie de l'Université de Sherbrooke, qu'a été développé cet écomatériau novateur. Produit depuis 2013 à l'usine de micronisation du verre de Tricentris, la première usine en son genre en Amérique du Nord, le VERROX® est la seule poudre de verre faite à 100% de verre post-consommation provenant de la collecte sélective.

Tout en offrant une deuxième vie pour le verre du Québec, la poudre de verre permet d'améliorer les performances du béton en le rendant plus résistant et plus durable. Cet ajout cimentaire vient remplacer des parts de ciment dans les formulations des bétons et trouve son utilisation dans la conception des trottoirs, des bordures, des pavés et du mobilier urbain, enfin, dans toutes les infrastructures où il y a du béton.

Bien qu'elle ait déjà été utilisée dans plusieurs réalisations municipales et projets de démonstration, l'introduction de la poudre de verre dans la norme CSA permet aujourd'hui de revêtir la chaussée et aller vers une utilisation à très grande échelle. « *Depuis 2013, les nombreux essais in situ réalisés avec le VERROX® dans les ouvrages ont contribué, par les résultats obtenus, à soutenir la normalisation de la poudre de verre* » comme le souligne Dominique Bégin, directeur de l'usine de micronisation du verre de Tricentris.

En Algérie, La composition des déchets solides produits se caractérise par une part très significative des produits organiques avec un taux moyen de 72%. Quant au plastique, il ne représente que 10% de ces déchets et 9,3 % pour le papier/carton, 4,14% pour le chiffon et autres, 3,2% pour les métaux et 1,36% pour le verre. La capacité de recyclage de ces déchets est donnée dans le tableau 4.5.1.

Tableau 4.5.1 : Capacité de recyclage en Algérie [22].

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

Malgré tous ces efforts, le taux de recyclage des déchets de verre est très faible dans le monde entier. Le tableau 4.5.2 donne la quantité des déchets de verres ainsi que le pourcentage de la partie recyclée dans différents pays.

Tableau 4.5.2 : La quantité des déchets de verre et le pourcentage de recyclage des différents pays [32].

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

Concernant l'Algérie aucune statistique sur le recyclage du verre n'est disponible.

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 apporter une solution importante et pratique pour l'impact environnemental des déchets de verre à cause de ses propriétés physiques et chimiques qui sont presque similaires à celles du ciment et d'autres ajouts cimentaires.

4.6 Valorisation de verre dans le béton :

Le verre est un matériau à plusieurs vies et peut être recyclé plusieurs fois. Cependant, il est nécessaire que le verre provenant de la collecte sélective soit préalablement séparé en fonction de la couleur pour être transformé en calcin (débris de verre) pour de nouveau être utilisé dans la fabrication d'emballage en verre. La plupart du temps, le verre récolté est un produit mixte et sa réutilisation peut devenir difficile. Dans ce cas-là, il est employé pour d'autres applications (abrasif routier, laine de verre, filtrations municipales...) ou stocké en décharge.

L'utilisation du verre dans le béton ne date pas d'aujourd'hui. Plusieurs chercheurs [MEYER et coll., 1997 ; 1998 ; POLLY et coll., 1998 ; PANCHAKARLA et coll., 1996 ; JIN et coll., 2008 ; PREZZI et coll., 1997] ont eu l'initiative de l'utilisation du verre comme substituant aux granulats. Le remplacement était dans plusieurs cas en substitution totale ou partielle des gros granulats ou de granulats fins. Les travaux menés par plusieurs chercheurs [SsHI et coll., 2004 ; SHEN et coll., 2006 ; DYER et coll., 2001 ; PARK., 2002] ont été focalisés sur le phénomène de la réaction alcalis silice. Le contrôle de la réaction alcalis silice par la diminution de la taille des granulats a conduit plusieurs autres chercheurs [SHAYAN et coll., 2004- 2006] à utiliser le verre comme substituant du ciment portland sous forme de poudre. Les premiers travaux datent de 1973, lorsque la pouzzolanité du verre était étudiée par PATTENGIL et coll., [1973].

4.7 Comportement du verre dans un milieu cimentaire :

Le verre incorporé dans les bétons peut manifester plusieurs types de comportement, essentiellement en fonction de sa granularité, une granularité grossière tend à provoquer un phénomène d'alcali-réaction générateur de désordres, alors qu'un verre fin développe une action bénéfique identifiable à une réaction pouzzolanique.

La figure 4.7.1 rassemble les résultats de quelques travaux effectués entre les années 2000 et 2008 qui traitent de l'activité pouzzolanique du verre. L'indice d'activité est défini comme étant le rapport de la résistance du mélange avec ajout de verre à la résistance du mélange témoin.

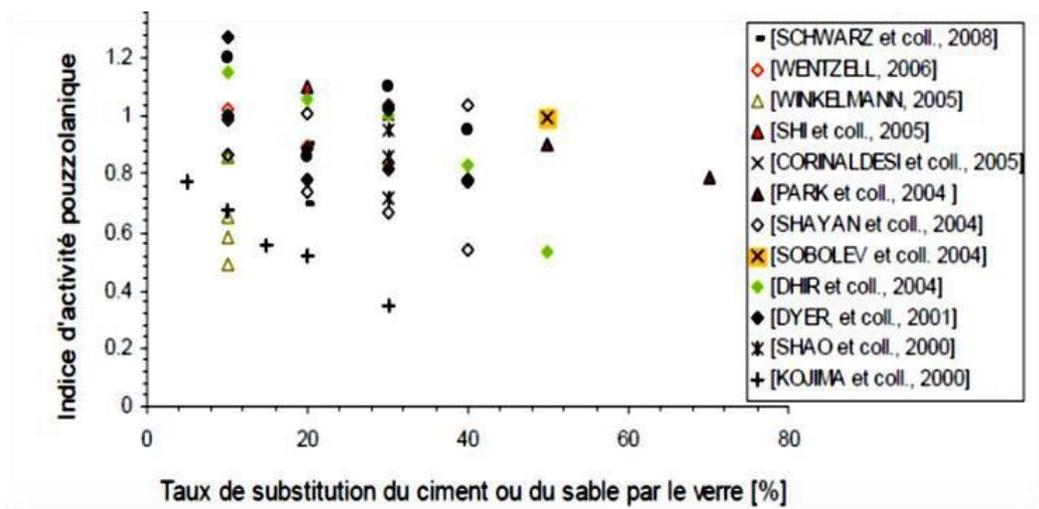


Figure 4.7.1 : Indices d'activité pouzzolanique du verre utilisé dans des conditions différentes [4].

4.8 Réaction alcali-silice du verre :

Le remplacement partiel du granulat naturel ou du ciment par le verre dans les bétons, améliore ses propriétés mécaniques notamment les résistances en compression.

Toutefois, certains travaux conseillent l'utilisation de ce matériau en prenant certaines précautions.

Effectivement, les bétons à base de verre sont confrontés à un problème lié à leur durabilité. La silice du verre en combinaison avec les alcalins du ciment donne naissance à des produits gonflants qui entraînent l'endommagement des bétons.

La réaction alcali -silice du verre dépend de différents paramètres. Il est rapporté dans la littérature que le processus de la réaction alcali -silice en général et des granulats de verre est un phénomène complexe influencé par plusieurs facteurs.

4.9 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.

La résistance ne commence à s'améliorer qu'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.

4.10 L’effet de la taille des particules de verre :

Les réactions alcali granulats (RAG) ont limité l’utilisation des déchets de verre en tant que granulats dans le béton, cette réaction aura lieu en présence des déchets de verre amorphe et la solution dans les pores du béton. En plus des RAG, l’utilisation des bouteilles de verre concassée limite la taille et la forme des particules. Le maximum d’une dimension est l’épaisseur de la bouteille ce qui donne naissance à des particules aplaties, affectant ainsi l’ouvrabilité du béton. Afin de limiter les RAG, plusieurs traitements sont utilisés : mécanique et chimique. Il s’agit de réduire la particule de verre par broyage. Des études ont montré que seules les particules < 38 µm développent des propriétés pouzzolaniques et procurent au béton des résistances mécaniques appréciables dépassant celles obtenues sur des bétons à 100 % ciment Portland.

Selon la taille des particules du verre recyclé, de nombreuses études ont été faites afin de valoriser les déchets de verre dans l’industrie du ciment et du béton (remplacement d’agrégats, de sable, ou du ciment). La figure 4.10.1 montre la répartition de ces derniers.

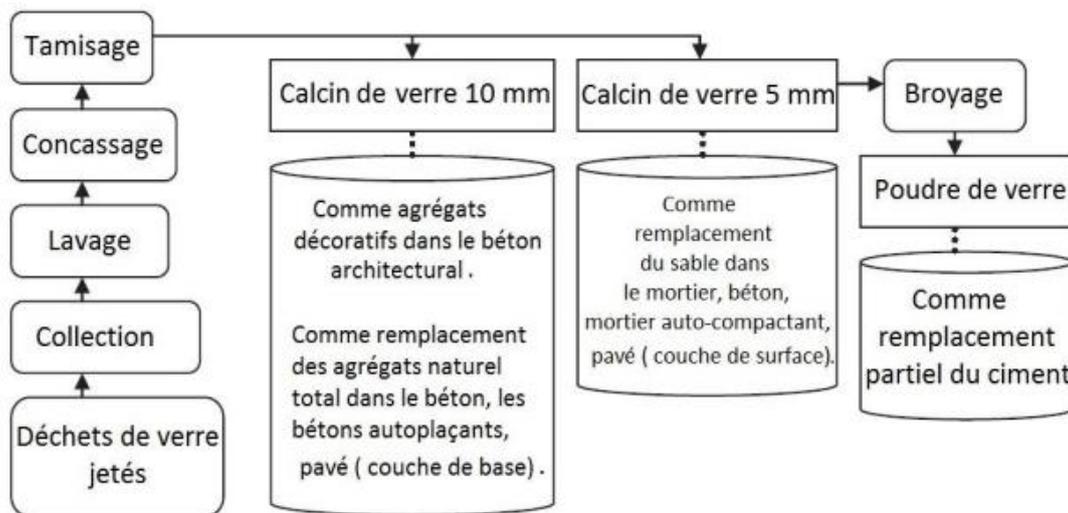


Figure 4.10.1 : l’utilisation de verre recyclé selon la taille de ses particules [32].

4.11 L'influence de poudre de verre sur les propriétés des bétons :

4.11.1 A l'état frais :

L'utilisation de la poudre de verre (PV) comme ajout cimentaire a fait l'objet de plusieurs recherches depuis plus d'une vingtaine d'années [N. Schwarz (2008); R. Idir et al., 2011; Y. Shao et al.,(2000); A.Shayan (2004) et Y. Xu (2001); T. Shi et al, (2005); A.Taha, (2008); A. Zidol, (2009)]. Ses effets sur l'ouvrabilité, les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons sont exposés dans les paragraphes suivants.

L'effet de la PV sur l'ouvrabilité des bétons frais dépend de plusieurs facteurs, notamment, de sa finesse de mouture. A. Zidol (2009) a étudié l'effet de la finesse de la PV sur les performances à l'état frais et à l'état durci des bétons (ordinaire, haute performance et autoplaçant). Il s'avère qu'une finesse semblable à celle du ciment soit une valeur optimale pour l'obtention d'une ouvrabilité acceptable. Pour un béton ordinaire ayant un rapport E/C = 0,5, l'incorporation de 20 % de poudre de verre diminue le seuil de cisaillement de 32 % et la porosité de 21% en comparaison avec un béton témoin (100% ciment). De plus, la demande en superplastifiant diminue à mesure qu'augmente le pourcentage de remplacement du ciment par la poudre de verre. L'absorption quasi nulle de la poudre de verre constitue aussi un facteur de diminution du dosage de super-plastifiant requis pour un étalement donné.

4.11.2 A l'état durci :

Il est démontré que la poudre de verre a une pouzzolanicité similaire, voire supérieure à celle des cendres volantes. De ce fait, cet ajout alternatif contribue aux gains de résistances mécaniques et de durabilité dans le temps. Les études sur le béton ordinaire montrent que l'on peut incorporer jusqu'à 30 % de PV en remplacement partiel du ciment.

A.Shayan et Y. Xu (2001), ont étudié la performance de la poudre de verre comme un matériau pouzzolanique dans le béton. La finesse de la PV que les auteurs australiens ont utilisé est le double de celle du ciment Portland, soit 800 m²/kg. Les bétons étudiés sont formulés afin d'atteindre une résistance à la compression de 40 Mpa à 28 jours.

Le remplacement partiel du ciment est de 20 – 30 % de PV et 10 % de FS (fumée de silice). Le béton témoin est dosé à 380 kg/m³ de ciment. Il s'avère qu'avec 20 % de PV, la résistance visée à 28 jours est atteinte. Cependant avec 30 % de PV ce n'est qu'à partir de 90 jours que la résistance atteint 55 MPa.

Ablam ZIDOL a montré dans une étude sur la poudre de verre qu'à 56 jours tout comme à 91 jours, tous les bétons incorporant des ajouts développent des résistances équivalentes voire supérieures à celles des bétons témoins pour presque tous les rapports E/L étudiés, sauf pour E/L = 0,35, où les résistances des bétons avec ajouts sont toujours inférieures à celle du témoin. La réaction pouzzolanique des ajouts est principalement responsable de l'augmentation importante aux âges avancés de la résistance des bétons avec ajouts.

Les résistances des bétons avec ajouts ayant E/L faible qui sont toujours inférieures à celle du témoin reflètent une contribution négligeable de l'effet filler d'une part et la limitation de la poursuite optimale de la réaction pouzzolanique due à un manque d'eau libre disponible d'autre part. Puisque cette réaction résulte de la combinaison de la silice vitreuse à la chaux (la portlandite) en présence d'eau [Dron et Voinovitch, 1982]. Alors qu'un rapport E/L faible implique, une porosité initiale et une quantité d'eau libre faibles.

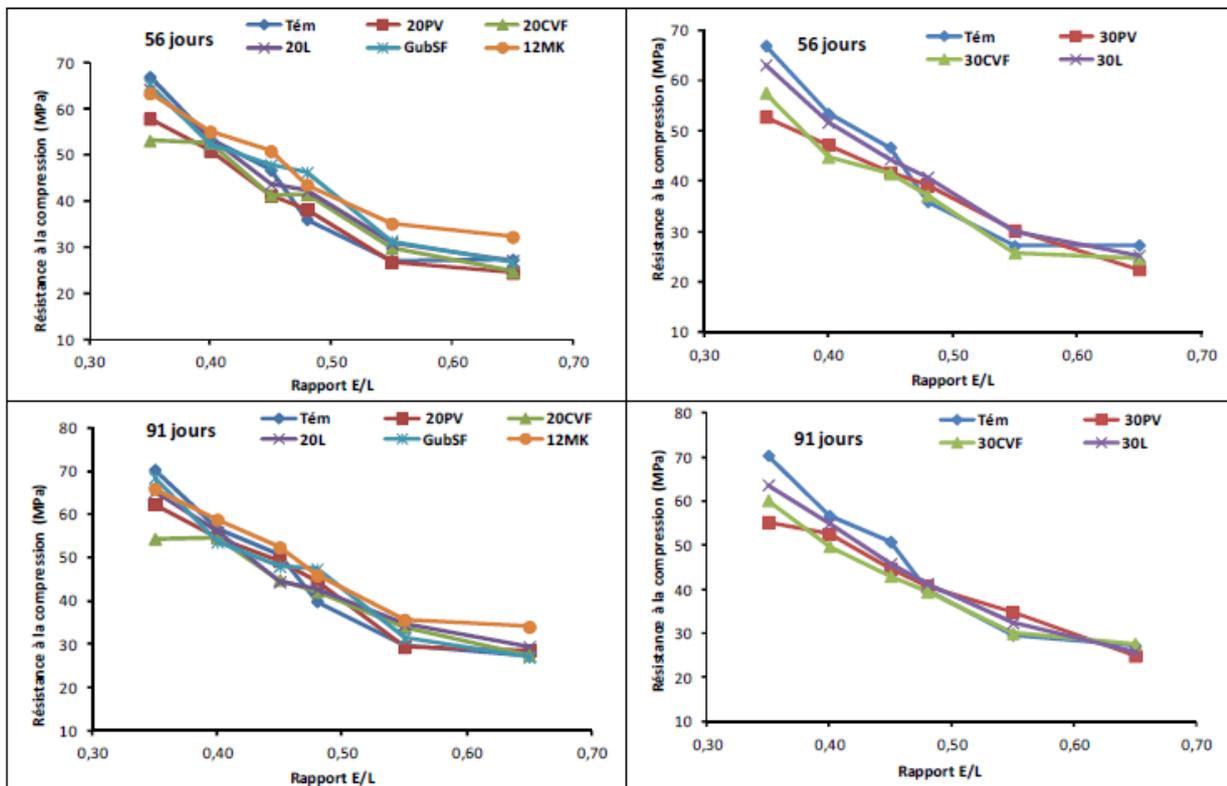


Figure 4.11.1 : Résistance à la compression des bétons à 56 et 91 jours [45].

4.12 Effet du verre sur la durabilité :

Dans cette partie, on décrira l'effet du verre sur la durabilité suivant les résultats recueillis de la littérature :

4.12.1 La perméabilité du béton :

A l'état durci le béton contient des pores. La liaison entre ces pores provoque un chemin préférentiel pour le passage des liquides, des gaz ou des ions potentiellement agressifs.

L'utilisation des ajouts cimentaires comme substituant du ciment tel que rapporté par BAMFORTH et coll., [1993] donne lieu à une réduction substantielle de la perméabilité des bétons. Il convient à signaler aussi que seulement les travaux de SHAYAN et coll., [2004] qui ont rapporté que l'utilisation de 20 % de verre broyé de finesse $800 \text{ m}^2/\text{kg}$ diminue la perméabilité du béton. Ils concluent que la perméabilité du béton est faible après 380 jours de mûrissement selon ASTM C1202.

La perméabilité à l'eau présentée sur la figure 4.12.1 rapporté par ZIDOL Ablam montre de façon évidente une augmentation de la perméabilité avec le rapport E/L pour les différents types de béton. Pour chaque rapport E/L la perméabilité à l'eau est plus élevée dans les bétons témoins comparativement aux bétons contenant des ajouts cimentaires.

Les faibles perméabilités observées dans les bétons contenant les ajouts reflètent l'effet pouzzolanique et l'effet filler des ajouts cimentaires.

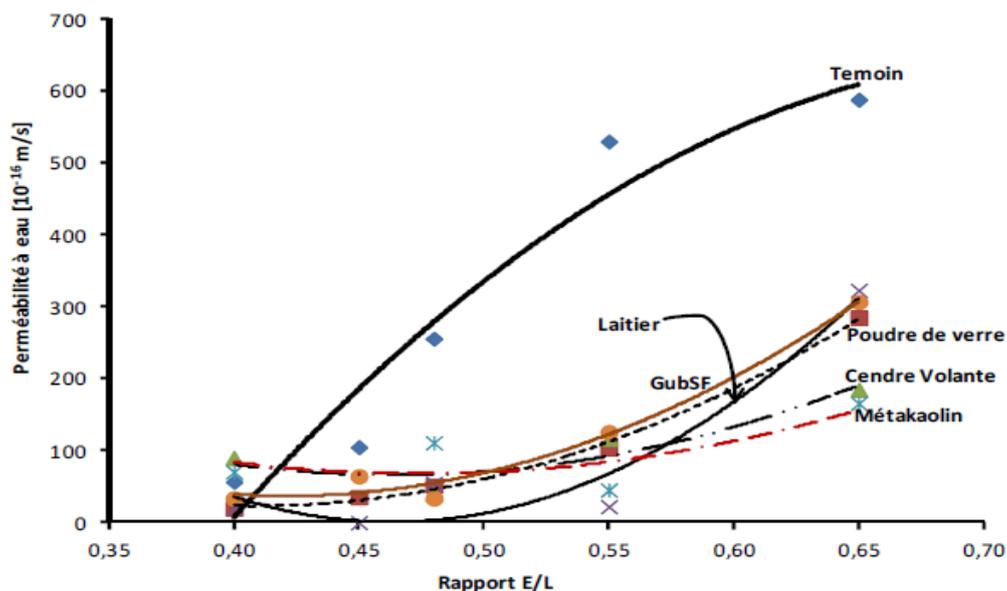


Figure 4.12.1 : Perméabilité à l'eau des bétons à 91 jours [45].

4.12.2 La porosité :

D’après les résultats de l’essai de porosité déterminés selon ASTM C642 et présentes sur la figure 4.12.2, A. ZIDOL a montré qu’il y avait une augmentation des vides avec le rapport E/L pour les différents bétons incorporant ou non un ajout cimentaire. Pour un rapport E/L donné les vides sont de même ordre de grandeur pour tous les bétons incorporant ou non les différents ajouts cimentaires avec les valeurs plus élevées dans les bétons incorporant la cendre volante et les plus faibles valeurs dans les bétons témoin. Quel que soit le rapport E/L, tous les bétons incorporant les ajouts présentent des vides légèrement supérieurs à celui des bétons de référence. Cela est expliqué par l’effet de dilution résulte de la substitution du ciment par les ajouts cimentaires. Puisque la substitution partielle du ciment par les ajouts occasionne une augmentation du rapport E/C effectif dans ces bétons générant une porosité initiale importante fortement contrôlée par le rapport E/C. Ces légères augmentations de la porosité des bétons en présence des ajouts sont en parfaite corrélation avec leurs résistances à la compression qui sont généralement inférieures à celle du témoin à jeune âge. Cependant, la réaction pouzzolanique des ajouts favorise à long terme la densification de la matrice par la production de CSH supplémentaire permettant de réduire la porosité quasiment dans le même ordre de grandeur que celle des bétons de référence.

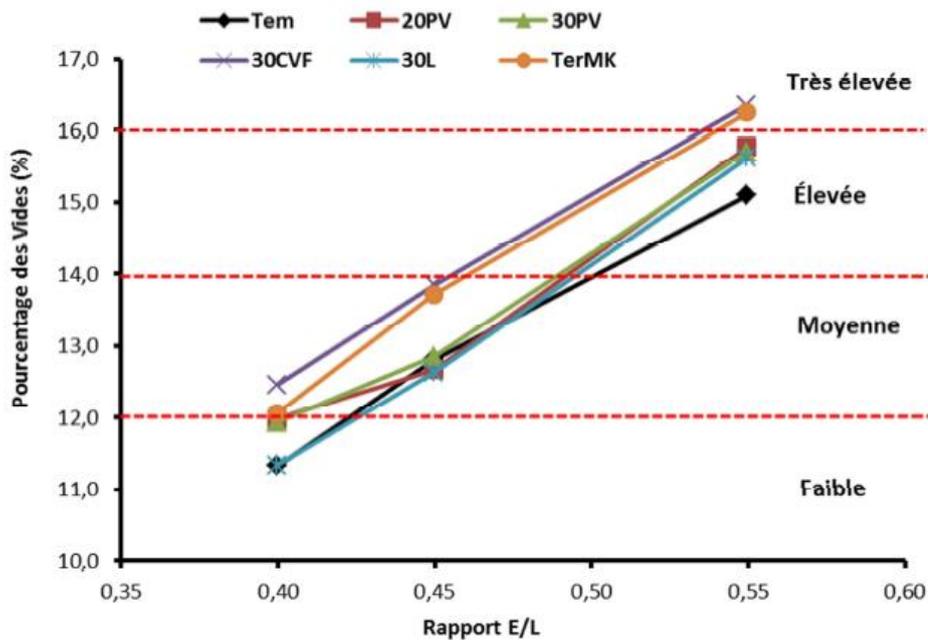


Figure 4.12.2 : Pourcentage des vides des bétons à 56 jours en fonction du rapport E/L [45].

4.12.3 La résistance à la réaction alcalis silice :

Cette réaction forme un gel visqueux qui a tendance à gonfler en présence d'eau (hydrophile) tout en générant des contraintes de tension au sein des granulats en cause et sur la pâte de ciment environnante.

L'utilisation des ajouts cimentaires ont tendance à contrôler la réaction alcalis silice due essentiellement à leurs effet pouzzolanique [FOURNIER., 1997 ; LANE et coll., 1999].

Le contrôle de la réaction alcalis silice dépend de la composition chimique de l'ajout, de son pourcentage de substitution et de la vitesse de sa réactivité. Le pourcentage doit dépasser les 10% dans le cas de la fumée de silice [FOURNIER et coll., 1995], 50 % et plus dans le cas du laitier et entre 10 et 15% pour le métakaolin [RAMLOCHANA et coll., 1999].

SHI et coll., [2004] confirment que le remplacement du ciment par 20 % de poudre de verre réduit l'expansion de plus de 50 % par rapport à un mortier de référence. Notamment, CHAYAN et coll., [2004] rapporte que l'expansion peut être contrôlée par l'utilisation d'une poudre de finesse Blaine de 800 m²/kg.

4.12.4 Retrait de séchage :

Le retrait de séchage est causé par le départ d'eau emprisonnée dans les pores. Son départ cause un déséquilibre dans le béton qui se traduit alors par un retrait. Il est très présent dans le cas des bétons usuels à rapport E/L (Eau/Liant) élevé.

L'utilisation des ajouts cimentaires dans des proportions élevées augmente le retrait [NEVILLE., 2000]. À un rapport E/L constant, la substitution de ciment par une proportion élevée de cendres volantes augmente le retrait d'environ 20% et pouvant atteindre les 60% dans le cas d'une teneur très élevée du laitier de haut fourneau [BROOKS et coll., 1992]. La fumée de silice augmente aussi le retrait à long terme [SELLEVOLD et coll., 1992].

SHAYAN et coll., [2004] montrent dans leur étude que l'incorporation de 20% de poudre de verre en substitution de ciment (finesse de 800m²/kg) résulte à un retrait inférieure à la limite de la norme australienne (0,075% à 56 jours).

4.13 Comparaison du verre à d'autres ajouts cimentaires (les cendres volantes) :

La cinétique de la réaction du verre est plus rapide que celle des cendres volantes qui ne réagissent qu'après une à plusieurs semaines, lorsque la concentration des alcalins dans la solution interstitielle est devenue suffisante. En effet, dans le cas du verre, il apporte lui-même les alcalins nécessaires au déclenchement de la réaction. Par exemple, une substitution de 30% du ciment dans les bétons affiche une meilleure résistance en compression que ceux confectionnés avec de la cendre volante.

Des auteurs ont montré qu'à trois jours de cure, la résistance des mortiers comportant 20% de verre en remplacement de ciment est 70% plus importante que celle des mortiers confectionnés avec de la cendre volante. Cela pourrait s'expliquer notamment par les alcalins qui sont disponibles plus rapidement et en plus grand nombre dans le cas du verre qu'ils ne le sont dans celui de la cendre volante.

4.14 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 :

- 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.

4.15 Conclusion :

L'utilisation des déchets dans la production du ciment et du béton en tant qu'ajouts cimentaires peut sauvegarder les ressources naturelles, 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.

Ces ajouts cimentaires finement broyés ont une influence plus au moins marquée sur les caractéristiques physico – mécaniques des liants en fonction de leur composition minéralogique, leur finesse et leur pourcentage. Nous traitons à partir de cette étude l'influence de l'addition de 20% de la poudre de verre broyé sur le comportement physique et mécanique du béton.

Chapitre 5 :

Procédé expérimental

5.1 Introduction :

La caractérisation des propriétés physico-chimiques de matériaux cimentaires est d'une importance cruciale puisque ces propriétés impactent directement le comportement des bétons, des mortiers autant à l'état frais qu'à l'état durci.

Ce chapitre a pour objectif de présenter de manière synthétique l'ensemble du contexte expérimental qui a servi de support à ce mémoire. On s'intéresse à la présentation des matériaux et des méthodes utilisées pour réaliser les différents essais expérimentaux.

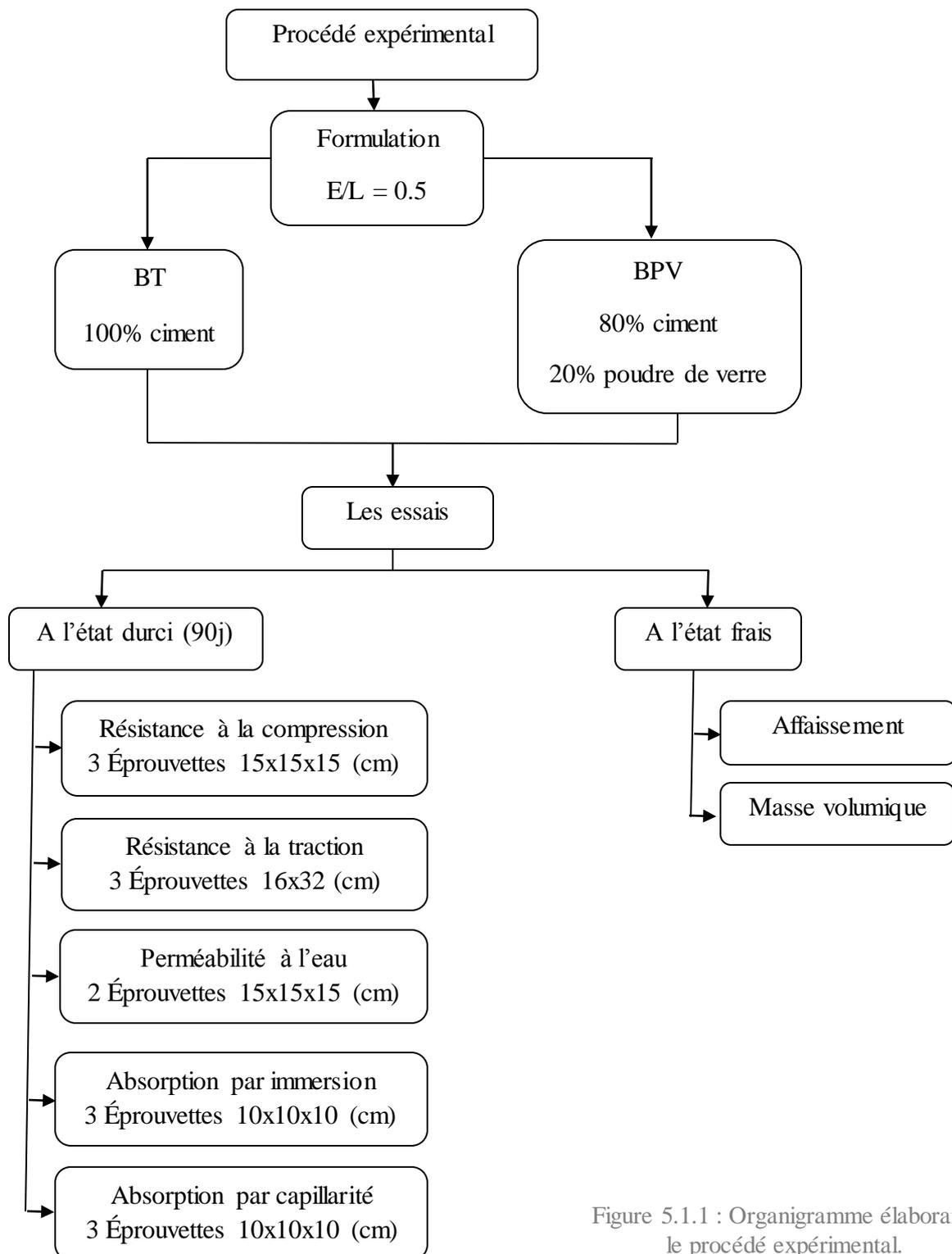


Figure 5.1.1 : Organigramme élaborant le procédé expérimental.

5.2 Caractérisation des matériaux utilisés :

5.2.1 Méthodes de caractérisation physico-chimique :

5.2.1.1 La granulométrie :

L'analyse granulométrique selon la norme NF EN 933-2. Permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs de différentes familles de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale supérieure ou égale à 63 μ m. A l'exclusion des fillers. L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis. Le résultat de cette analyse se trouve en annexe.

5.2.1.2 Masse volumique :

Tableau 5.2.1 : Masse volumique des différents constituants du béton.

Matériaux	Masse volumique absolue (t/m ³)	Masse volumique apparente (t/m ³)
Gravier 15/25	2.500	1.160
Gravillon 8/15	2.542	1.300
Sable fin	2.531	1.500
Sable grossier	2.632	1.724
Poudre de verre		1.330

5.2.1.3 Détermination de la surface spécifique par la méthode Blaine :

La surface spécifique est le rapport de la surface de solide en contact avec le milieu extérieur à la masse. La méthode Blaine permet de calculer la surface spécifique d'une poudre selon la norme EN 196-6. Le principe consiste à mesurer le temps de passage d'une certaine quantité d'air à travers un lit de poudre d'une hauteur connue.

Cet essai s'est effectué au niveau du Laboratoire de l'Université de Médéa.

Tableau 5.2.2 : Caractéristiques physiques de la poudre de verre.

Paramètres	Surface S Blaine (m ² /Kg)
La poudre de verre	218.4

5.2.2 Les matériaux utilisés :

5.2.2.1 La poudre de verre :

On a collecté et broyé du verre de diffèrent provenance. Pour obtenir une poudre, on a utilisé tout d'abord un concasseur (broyage grossier), puis par la suite un broyeur à boulet du département du Génie Minier (broyage fin), et enfin on a tamisé la poudre en retenant seulement les particules inférieures à 100 μm (dimension des plus petites ouvertures de tamis disponibles).

La poudre obtenue a été passé par un tamis de **100 μm** . Et donc les dimensions de ces particules sont inférieures à **100 μm** .



Figure 5.2.1 : Broyeur à boulet.

5.2.2.2 Le ciment :

Le ciment utilisé est de types : ciment Portland au calcaire (CEM II/B 32,5N) provenant de la cimenterie de LAFARGE.

5.2.2.3 Le sable :

Le sable utilisé dans cette étude provient de la carrière de KEDDARA. Le sable est le constituant du squelette granulaire qui a le plus d'impact sur les qualités du béton, Il joue un rôle primordial. Il doit propre et ne pas contenir d'éléments nocifs. Il convient de se méfier de la présence de sables granitiques, de micas en paillettes, d'argiles, de sulfates...

Dans notre formulation on a procédé au mélange des deux sables (disponible au niveau du Laboratoire) : le sable grossier d'un module de finesse de 3.46, et le sable fin (sable de dune) d'un module de finesse de 0.6.

Les proportions sont calculées par la règle d'Abrams :

$$\text{Proportion } S_1 = \frac{M_f - M_{f2}}{M_{f1} - M_{f2}} = \frac{2.5 - 0.6}{3.46 - 0.6} = 33.57\%$$

$$\text{Proportion } S_2 = \frac{M_{f1} - M_f}{M_{f1} - M_{f2}} = \frac{3.46 - 2.5}{3.46 - 0.6} = 66.43\%$$

Tels que : $M_{f1} = 3.46$, $M_f = 2.5$, $M_{f2} = 0.6$.

Donc : $S_{grossier} = 66.43\%$, $S_{fin} = 33.57\%$.

5.2.2.4 Les graviers :

Pour la confection de nos bétons, les graviers concassés de classe 8/15 et 15/25 utilisés sont d'origine de la carrière de KEDDARA.

5.2.2.5 Eau de gâchage :

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

5.2.3 Détermination de la composition du béton :

Dans notre travail on a utilisé la méthode pratique de DREUX-GORISSE :

Tableau 5.2.3 : Composition du béton (kg/m³).

Matériaux	Unité	Volume par 1m ³		Volume pour une coulée 58l	
		Tem.	20 PV	Tem	20 PV
Ciment	Kg	380	304	22.04	17.63
Poudre de verre	Kg	-	76	-	4.41
Eau	Kg	190	190	11.02	11.02
Granulat 15/25	Kg	848.02	848.02	49.18	49.18
Granulat 8/15	Kg	241.47	241.47	14.00	14.00
Sable fin 0/5	Kg	201.44	201.44	11.69	11.69
Sable grossier 0/5	Kg	432.92	432.92	25.11	25.11

5.3 Procédure de confection des éprouvettes et mode de conservation :

Pour la confection des 12 éprouvettes, une gâchée de 58 litres de béton par la formulation de Dreux est réalisée de la manière suivante :

- Préparation des matériaux (lavage et étuvage).
- Introduction des gravillons, du ciment et du sable successivement dans la cuve du malaxeur,
- Malaxage à sec pour l'homogénéisation pendant deux minutes,
- Introduction de la totalité de l'eau de gâchage dans la cuve du malaxeur et malaxage pendant une minute,
- Arrêt du malaxeur 30 secondes pour vérifier les propriétés d'ouvrabilité, le cycle se termine par un malaxage de deux minutes.



Figure 5.3.1 : Lavage et étuvage des matériaux.



Figure 5.3.2 : Malaxage des différents constituants.

Le béton frais est coulé dans des moules préalablement huilés et vibrée par une aiguille vibrante maintenue verticalement, sans entrer en contact avec le fond ou les parois du moule figure 5.3.3.



Figure 5.3.3 : Coulage des éprouvettes cubiques et cylindriques.

Les moules sont protégés contre les chocs, les vibrations et la dessiccation et conservés dans une salle de conservation humide ($T= 20^{\circ}\text{C}$, $\text{HR}= 95 \pm 5\%$), puis démoulés après 24 heures.

Les éprouvettes ont été soigneusement marquées sans endommagement de façon claire et durable, en indiquant la date du coulage et la nature de l'éprouvette (béton témoin BT ou contenant 20% de poudre de verre BPV20), pour permettre de garantir l'identification depuis le prélèvement jusqu'à l'essai.



Figure 5.3.4 : Identification des éprouvettes.

Enfin, les éprouvettes ont été entreposées dans l'eau à une température de $20\text{ C} \pm 2\text{ C}$, jusqu'au moment de l'essai (90j).

Ce processus de conservation des matériaux dans des conditions de température et d'humidité relative permet de garantir une teneur en eau importante permettant l'amélioration d'hydratation du système (ciment et addition). En effet, des travaux ont montré l'influence de la condition de cure sur les propriétés hydrauliques des additions minérales [Bier, 1986 ; Balayssac et al., 1995 ; Saillio, 2012 ; Qiang et al., 2013].

5.4 Essais de caractérisation du béton :

5.4.1 A l'état frais :

5.4.1.1 Affaissement au cône d'Abrams :

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams est le plus couramment employé pour caractériser la consistance du béton sur chantier. Cet essai est effectué conformément aux prescriptions de la norme NF EN 12350-2. Dans cet essai, la consistance est appréciée par l'affaissement que connaît un cône de béton soumis à son propre poids. La norme NF EN 206 définit cinq classes de consistance. Ces classes sont définies en fonction de l'affaissement mesuré : ferme, plastique, très plastique, fluide et très fluide. Tableau 5.4.1.

Tableau 5.4.1 : Définition des classes de consistance selon la norme [8].

Classe de consistance	Affaissement (mm)
S₁ (Ferme)	10 à 40
S₂ (Plastique)	50 à 90
S₃ (Très plastique)	100 à 150
S₄ (Fluide)	160 à 210
S₅ (Très fluide)	> ou = 220

Le béton est introduit dans le moule tronconique métallique sans fond, de 300 mm de haut, 200 mm de diamètre en sa partie inférieure et de 100 mm en sa partie supérieure. Le cône posé sur une plaque d'appui rigide et plate est rempli de trois couches de béton frais et chaque couche est piquée 25 coups. Après avoir arasé le bord supérieur du moule, celui-ci est retiré en 3 secondes par une remontée verticale et régulière, puis l'on mesure, aussitôt après, l'affaissement Figure 5.4.1.

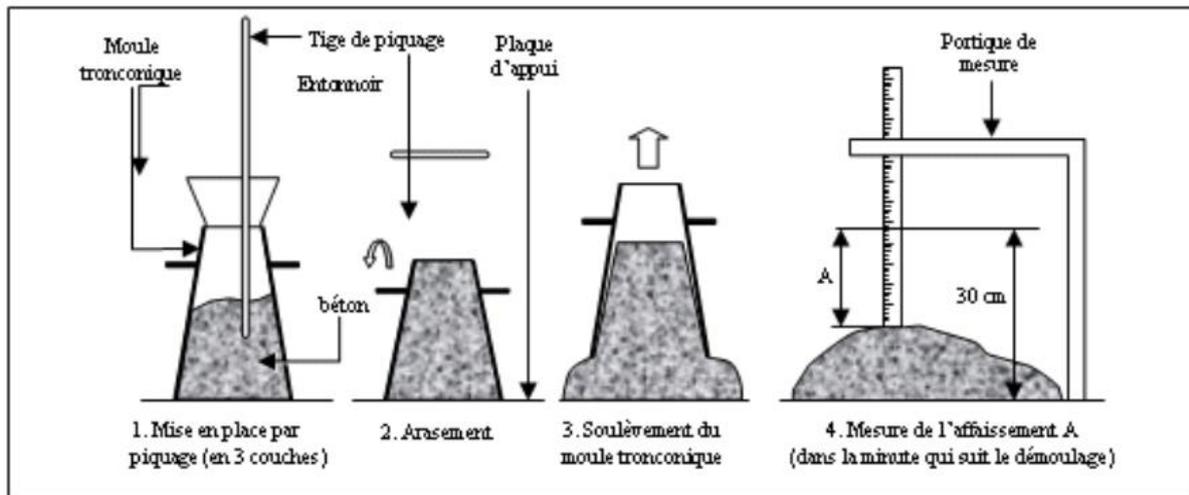


Figure 5.4.1 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams [2].

5.4.1.2 Masse volumique apparente :

L'essai de détermination de la masse volumique apparente à l'état frais du béton suit la référence normative NF EN 12350-6. Pour chaque formulation, nous avons mesuré la masse volumique apparente du béton frais en remplissant un récipient après le malaxage. La masse volumique apparente est donnée par l'équation suivante :

$$\rho = \frac{M_2 - M_1}{V}$$

Où :

- ρ (kg/m³) : masse volumique du béton frais,
- M_1 (kg) : masse du récipient,
- M_2 (kg) : masse du récipient plus la masse de béton contenu dans le récipient,
- V (m³) : volume du récipient.

5.4.2 A l'état durci :

5.4.2.1 Résistance en compression :

La préparation et positionnement des éprouvettes pour l'essai de résistance en compression sont réalisés suivant les prescriptions de la norme NF EN 12390-3. Le but de l'essai est de vérifier que les résistances de toutes les formulations ont atteint au moins les valeurs requises par la norme NF EN 206.

L'essai est pratiqué sur trois éprouvettes cubique de dimensions (150 x 150 x 150) mm³. Les éprouvettes sont soumises à une charge verticale d'une presse de capacité maximale de 300 tonnes pilotée en force. La vitesse de mise en charge est de 0,5MPa/s conformément à la norme NF EN 12390-3. Figure 5.4.2



Figure 5.4.2 : Essai de compression.

La résistance à la compression est donnée par l'équation suivante :

$$f_{c,cube} = \frac{F}{A_c}$$

Où :

- f_c (MPa) : la résistance en compression,
- $F(N)$: la charge maximale,
- A_c (mm²) : l'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée.

5.4.2.2 Résistance en traction (Essai de fendage) :

La préparation et positionnement des éprouvettes pour l'essai de résistance en traction par fendage sont réalisés suivant les prescriptions de la norme NF EN 12390-6. L'éprouvette est soumise sur toute sa génératrice à un effort de compression appliqué sur une zone étroite. Les contraintes de traction orthogonales qui en résultent provoquent la rupture de l'éprouvette par traction.

L'essai est pratiqué sur trois éprouvettes cylindriques de dimensions ($\text{Ø}160 \times h320$) mm^2 . Les éprouvettes sont soumises à une charge verticale sans choc et croissante de façon continue jusqu'à la rupture. La presse de capacité maximale de 300 tonnes pilotée en force. La vitesse de mise en charge est de 0,05 MPa/s conformément à la norme NF EN 12390-6. Figure 5.4.3



Figure 5.4.3 : Essai de fendage.

La résistance à la traction est donnée par l'équation suivante :

$$f_{ct} = \frac{2 * F}{\pi * L * d}$$

Où :

- f_{ct} (MPa) : la résistance en traction par fendage
- F (N) : la charge maximale
- L (mm) : la longueur de la ligne de contact de l'éprouvette
- d (mm) : le diamètre nominal de l'éprouvette

5.4.2.3 L'absorption d'eau par immersion :

L'essai d'absorption d'eau par immersion totale est réalisé suivant les prescriptions de la norme NBN B 15-215 : 1989. Le but de l'essai est de calculer le coefficient d'absorption du béton et d'en déduire la porosité de ce dernier.

L'essai est effectué sur trois éprouvettes cubiques de dimensions (100 x 100 x 100) mm^3 . Les éprouvettes sont immergées dans un bac à eau à 20 ± 2 °C durant 48h, avant la pesée, elles sont essuyées avec une peau de chamois humide de manière à la débarrasser de son eau superficielle figure 5.4.4.



Figure 5.4.4 : Immersion des éprouvettes dans le bac à eau.

Ces éprouvettes sont mises dans une étuve à 105 ± 5 °C figure 5.4.5, et pesées une fois les 24h écoulé pour en déduire la masse sèche.



Figure 5.4.5 : La dessiccation des éprouvettes après immersion.

L'absorption d'eau par immersion A_{bs} est exprimée en pour-cent de la masse sèche et calculée par la relation suivante :

$$A_{bs} = \frac{m_{humide} - m_{sèche}}{m_{sèche}} * 100$$

Avec :

- M_{humide} : la masse humide de l'éprouvette après immersion ;
- $M_{sèche}$: la masse sèche de l'éprouvette après séchage à l'étuve.

Pour en déduire la porosité, il suffit de multiplier l'absorption d'eau par immersion (en %) par la masse spécifique sèche de ce béton, exprimée en kg/dm^3 .

5.4.2.4 L'absorption d'eau par capillarité :

L'essai d'absorption d'eau par capillarité est réalisé suivant les prescriptions de la norme NBN B 15-217 : 1984. Le but de l'essai est de calculer le coefficient d'absorption capillaire du béton et d'en déduire la vitesse d'ascension.

L'essai est effectué sur trois éprouvettes cubiques de dimensions (100 x 100 x 100) mm³. Les éprouvettes séchées et pesées auparavant sont trempées dans 5mm d'eau et pesées à un intervalle de 3, 6, 24 et 72h. figure 5.4.6

L'absorption d'eau par capillarité est égale à l'augmentation de masse après absorption rapportée à la section de la face en contact avec l'eau, exprimée en kg/dm².

$$\text{Coef. d'absorption capillaire} = \frac{m_{\text{humide}} - m_{\text{sèche}}}{S} * 100$$

Avec :

- M_{humide} : la masse humide à chaque pesée ;
- $M_{\text{sèche}}$: la masse sèche de l'éprouvette après séchage à l'étuve ;
- S : la surface en contact avec l'eau.



Figure 5.4.6 : Essai d'absorption d'eau par capillarité.

5.4.2.5 Essai de perméabilité à l'eau :

L'essai de la perméabilité à l'eau est réalisé suivant les prescriptions de la norme NF EN 12390-8, qui consiste à appliquer de l'eau sous pression sur une surface du béton durci. Après rupture de l'éprouvette par fendage, la profondeur de pénétration de l'eau est mesurée figure 5.4.7.



Figure 5.4.7 : Essai de perméabilité à l'eau.

L'essai est pratiqué sur deux éprouvettes cubique de dimensions $(150 \times 150 \times 150) \text{ mm}^3$, ces éprouvettes sont placées dans le dispositif d'essai et lui sont appliqués une pression d'eau de 5bars pendant 72 h.

Ensuite, l'éprouvette est retirée du dispositif d'essai en essayant la face de l'éprouvette soumise à la pression pour éliminer toute eau en excès. Cette face est placée vers le bas, puis, fendre l'éprouvette en deux moitiés, perpendiculairement à la face exposée à l'eau sous pression figure 5.4.8.



Figure 5.4.8 : Fendage de l'éprouvette.

Dès que la zone fendue est suffisamment sèche pour qu'il soit possible de discerner le front de pénétration de l'eau, on mesure la profondeur maximale de pénétration.

Tableau 5.4.2 : Seuil pour l'essai de perméabilité à l'eau [von Beton 1991].

Pénétration d'eau (mm)	Perméabilité à l'eau
< 30	Faible
30 – 60	Moyenne
> 60	Elevée

5.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents matériaux utilisés dans le cadre de cette étude, ainsi que le détail de formulation utilisée pour la réalisation de notre campagne expérimentale : études des propriétés physiques et mécaniques.

Pour qualifier les performances des différents bétons, de nombreux essais ont été réalisés, certains sont liés au domaine physico-mécanique, comme les essais de résistance à la compression et à la traction indirecte et d'autres concernent les propriétés de transfert avec les essais d'absorption du béton par immersion totale, absorption par capillarité et de la perméabilité à l'eau.

Chapitre 6 :

Résultats et interprétations

6.1 Introduction :

Dans le présent chapitre, nous allons présenter tous les résultats obtenus sur les bétons échantillonnés, en commençant par l'état frais, puis par l'état durci et pour finir par les indicateurs de durabilité.

6.2 Propriétés à l'état frais :

6.2.1 Résultats de l'essai d'affaissement :

Tableau 6.2.1 : Affaissement des deux mélanges de béton.

Type de béton	BT	BPV
Affaissement (mm)	8,50	8,00
Pourcentage de chute (%)	5,88	

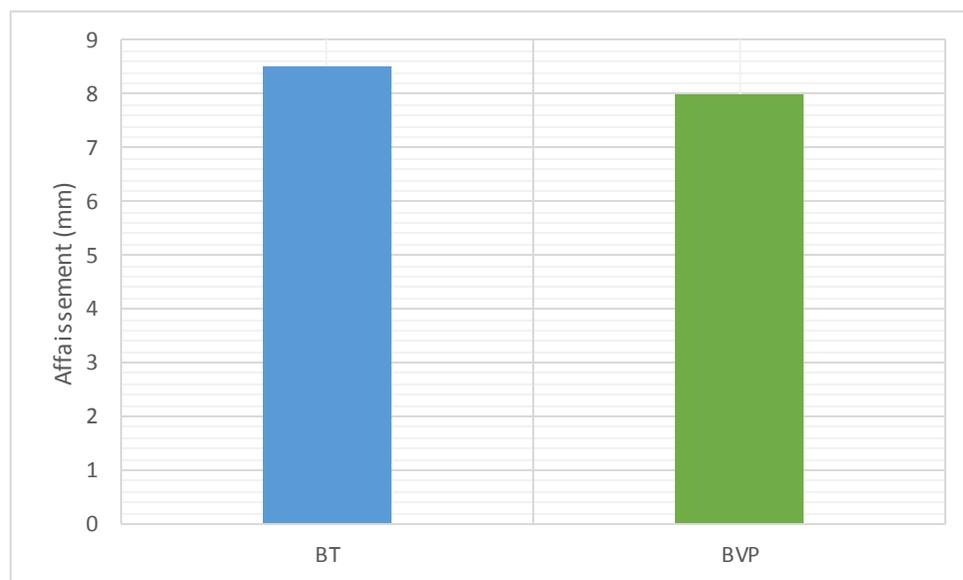


Figure 6.2.1 : Effet de la poudre de verre sur l'affaissement.

Les résultats enregistrés sont récapitulés dans le tableau 6.2.1, et représentés par la figure 6.2.1.

Dans notre étude, pour une teneur en poudre de verre de 20% l'ouvrabilité a diminué de 5.88%. Passant de 8.5 cm pour le BT à 8 cm pour le BPV. Cette réduction peut être expliquée par la finesse de la poudre de verre qui induit une augmentation de la surface spécifique du mélange, conduisant à une demande en eau supplémentaire pour son mouillage.

Cependant, cette perte de maniabilité reste faible et le béton de poudre de verre garde la même classe que le béton témoin (Classe S2 : béton plastique).

Des études ont montrés que le pourcentage utilisé et la finesse du matériau ont une très grande influence sur le comportement du béton frais. Il convient de choisir le pourcentage adéquat d'un cas à l'autre. Les travaux menés par **SHAO et coll, [2000]** montrent une diminution de 18% de l'affaissement dans un béton contenant 30% de la poudre de verre dont la finesse est élevée.

6.2.2 Détermination de la masse volumique :

Tableau 6.2.2 : Masse volumique des deux bétons.

Type de béton	BT	BPV
Masse volumique (t/m ³)	2,302	2,330
Pourcentage de chute (%)	-1,22	

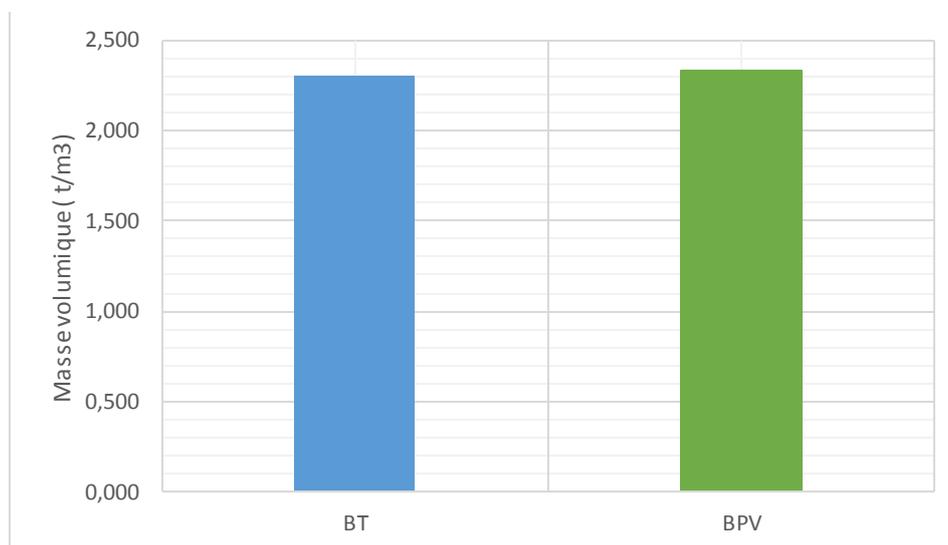


Figure 6.2.2 : Effet de la poudre de verre sur la masse volumique.

Les résultats enregistrés sont récapitulés dans le tableau 6.2.2, et représentés par la figure 6.2.2.

Dans notre étude, pour une teneur en poudre de verre de 20% la masse volumique a augmenté de 1.22% par rapport au béton témoin. Cette augmentation n'est pas significative, ce qui montre que le verre broyé n'influence pas de manière considérable sur la masse volumique du béton.

Notant que le béton ordinaire généralement employé pour les chaussées, les bâtiments et les autres ouvrages a une masse volumique de l'ordre de 2.200 à 2.400 t/m³. La masse volumique du béton varie en fonction de la quantité et de la densité des granulats, des quantités d'air emprisonné ou entraîné, du dosage en eau et en liants.

6.3 Propriétés à l'état durci :

6.3.1 Résultats de l'essai de compression :

Tableau 6.3.1 : Résultats de l'essai de compression.

Type de béton	BT	BPV
Résistance à la compression (Mpa)	38,73	34,42
Pourcentage de chute (%)	11,13	

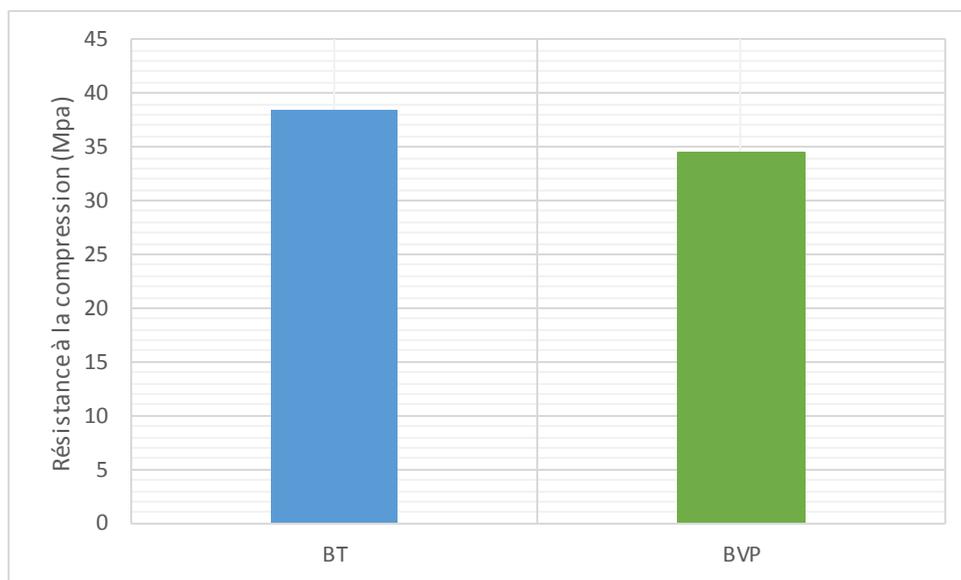


Figure 6.3.1 : Effet de la poudre de verre sur la résistance en compression.

Le résultat est obtenu par l'écrasement de trois éprouvettes cubique de dimensions (150 x 150 x 150) mm³, conformément à la norme **NF EN 12390-3**. Les résultats sont récapitulés dans le tableau 6.3.1, et représentés par la figure 6.3.1.

La résistance à la compression à 90 jours du béton à base de 20% de poudre de verre ayant une finesse de 218.4 m²/kg présente une diminution de 11.13% par rapport au béton témoin. Au regard de notre finesse, moins importante que celles des études évoquées, la variation de la résistance à la compression peut être considérée comme similaire à ce qui est mentionné dans la littérature.

Malgré la réduction de 20% de ciment la résistance à la compression reste appréciable, le pouvoir pouzzolanique de la poudre de verre lui permet de consommer la portlandite issue de la réaction d'hydratation du ciment. Ce qui donne naissance à des nouveaux C-S-H qui font densifier d'avantage la matrice cimentaire et occupent les pores libres, cela rend la structure compacte et donc résistante.

Des études réalisées par [Zidol, 2009] sur des bétons incorporant de la poudre de verre ayant une finesse différentes de 374 m²/kg et 436m²/kg formulés avec un rapport de E/L de 0.55 et incorporant 20% et 30% de la poudre de verre, ont montré que la résistance en compression de ces bétons à 91 jours varie de 94% à 103% de celle du témoin.

6.3.2 Résultats de l'essai de fendage :

Tableau 6.3.2 : Résultats de l'essai de traction.

Type de béton	BT	BPV
Résistance à la traction (Mpa)	3,37	3,22
Pourcentage de chute (%)	4,45	

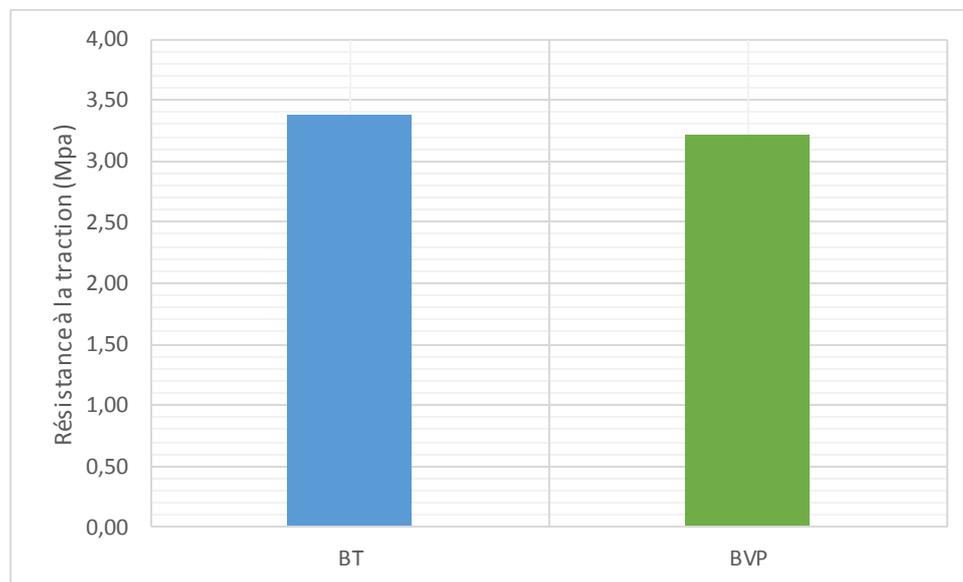


Figure 6.3.2 : Effet de la poudre de verre sur la résistance en traction.

Les valeurs des résistances en traction mesurées par l'essai dit Brésilien décrit dans le chapitre (5) sont récapitulées dans le tableau 6.3.2, et représentées par la figure 6.3.2.

Dans notre travail, la résistance à la traction à 90jours du béton à base de 20% de poudre de verre ayant une finesse de 218.4 m²/kg présente une diminution de 4.45% par rapport au béton témoin.

Cette chute suit l'évolution des résultats obtenus par l'essai de compression car la résistance à la traction représente approximativement 1/10 de la résistance à la compression, et confirme également l'influence de la finesse de la poudre de verre dans l'élaboration de la réaction pouzzolanique.

L'essai nous a également permis d'observer une bonne adhésion pâte-granulat par le non-arrachement des graviers figure 6.3.3. Donc la poudre de verre n'a pas d'influence nocive sur cette adhésion.



Figure 6.3.3 : Eprouvette après fendage.

6.4 Durabilité du béton :

6.4.1 Résultats de l'essai d'absorption d'eau par immersion :

Tableau 6.4.1 : Calcul de l'absorption des deux mélanges de béton.

Type de béton	BT	BPV
Absorption (%)	4,73	4,54
Pourcentage de chute (%)	4,02	

Tableau 6.4.2 : calcul de la porosité des deux mélanges de béton.

Type de béton	BT	BPV
Porosité (%)	11,07	10,87
Pourcentage de chute (%)	1,81	

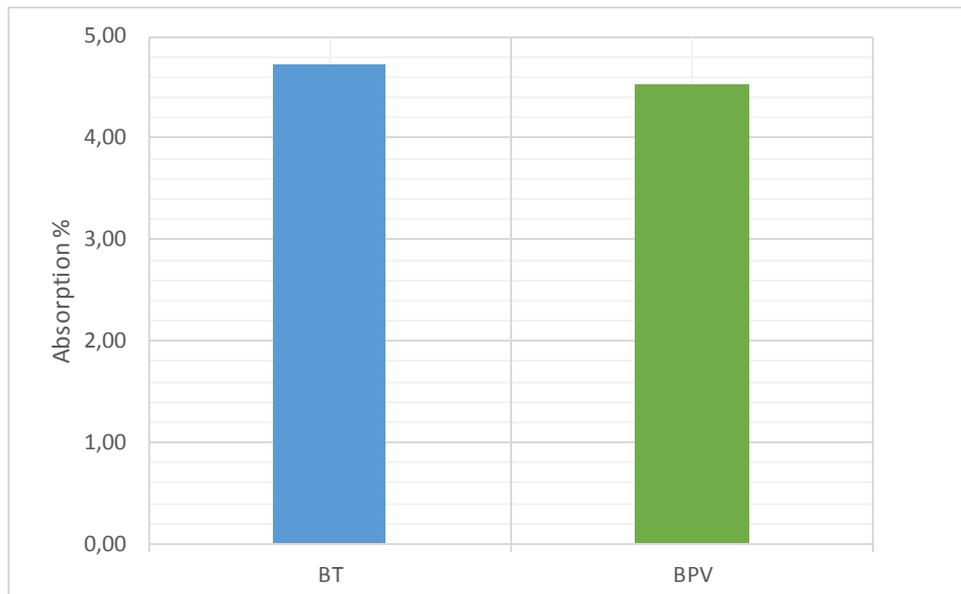


Figure 6.4.1 : Effet de la poudre de verre sur l'absorption par immersion.

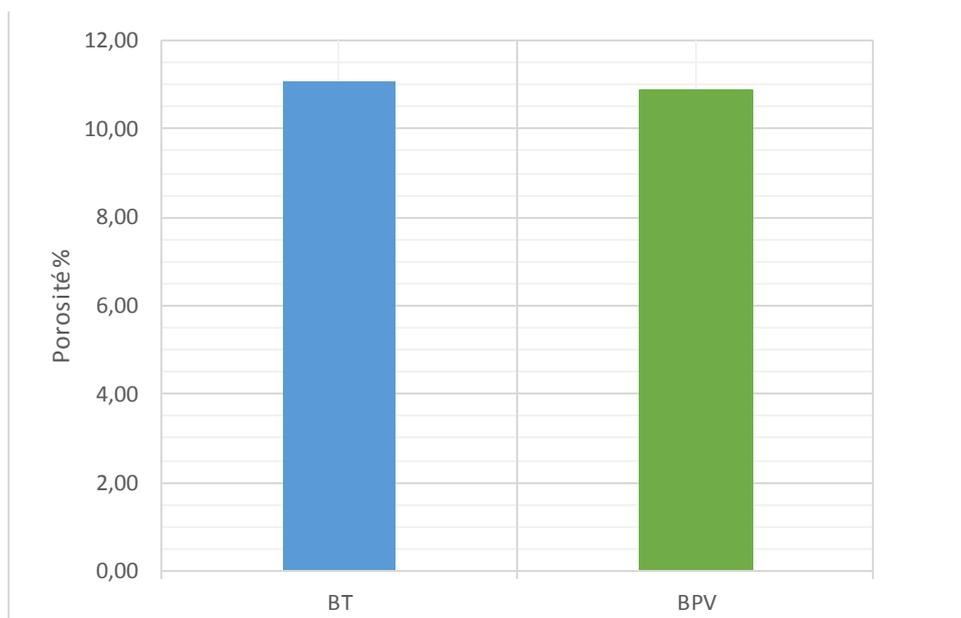


Figure 6.4.2 : Effet de la poudre de verre sur la porosité.

Les résultats enregistrés obtenus par l'essai d'immersion sont récapitulés dans les tableaux 6.4.1 et 6.4.2, et représentés par les figures 6.4.1 et 6.4.2.

L'absorption d'eau par immersion est représentative de la porosité et est utilisée comme indicateur de la qualité du béton [De Schutter&Audenaerk, 2004 et Ployaert, 2009].

La présence de la poudre de verre a permis d'avoir une diminution de porosité de l'ordre de 1.81%. Ce gain est principalement dû à la réaction pouzzolanique de la poudre de verre qui favorise à long terme la densification de la matrice par la production de CSH supplémentaire permettant de réduire la porosité. Ce pourcentage reste relativement faible à cause de la finesse

de notre poudre. Néanmoins, le béton incorporant 20% de poudre de verre a montré une meilleure qualité de béton en termes de durabilité.

Des études menées par Danivola, [2012] ont montré une augmentation de la fine porosité en présence de la poudre de verre au déterminent des pores grossiers. La diminution de la taille des pores en présences de l'ajout cimentaire se serait étroitement liée au remplissage progressif des grands pores par les produits d'hydratation due essentiellement à un effet de la réaction pouzzolanique de ces particules. Des observation similaire ont été rapportées aparPandey et al., 2000 ; Poon et al., [1997] et [1997] cités par chindaprasirt et al., [2007].

L'incorporation des ajouts cimentaires modifie significativement la microstructure du système cimentaire. Le pourcentage des macropores se voit significativement réduit alors que celui des mesopores ou des pores plus fin augmente considérablement [Johari et al. 2011 ; Ye et al. 2011].

6.4.2 Résultats de l'essai d'absorption d'eau par capillarité :

Tableau 6.4.3 : L'absorption capillaire des deux mélanges de béton.

Abs, Capillaire (Kg/m ²)	3h	6h	24h	72h
BT	1,83	2,57	4,5	6,27
BPV	2,2	2,73	4,17	5,3
Pourcentage de chute (%)	-20,22	-6,23	7,33	15,47

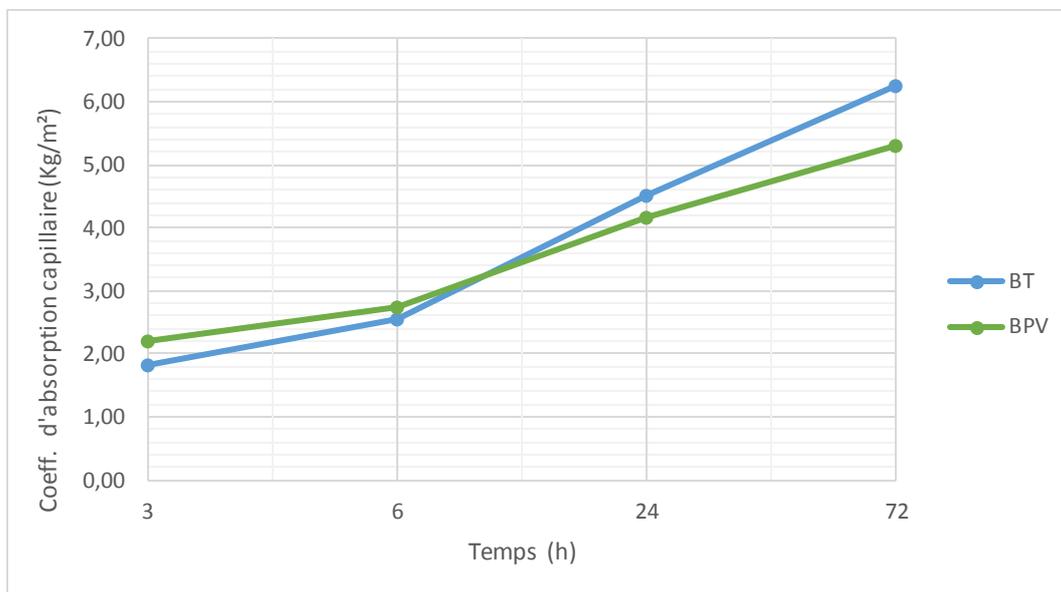


Figure 6.4.3 : L'absorption d'eau par capillarité en fonction du temps.

Les résultats enregistrés sont récapitulés dans le tableau 6.4.3, et représentés par la figure 6.4.3.

La quantité d'eau absorbée au bout de trois heures par unité de surface est retenue comme grandeur représentative de volume des plus gros capillaires présents dans la zone de peau, ces capillaires étant les plus efficaces.

La première partie des courbes située entre 0 et 3 h, traduit le remplissage des plus gros pores. On peut caractériser ces gros pores à partir de l'absorption initiale.

La deuxième partie des courbes qui se prolonge au-delà de 06h caractérise le remplissage des capillaires internes, ce processus de remplissage fait intervenir des plus gros capillaires au plus fins.

Avant les premières 24 heures la variation de l'absorption capillaires reste très proche entre le béton témoin et le béton avec poudre de verre ce qui montre que l'absorption des gros pores des deux bétons est similaire.

Après 24h on observe une diminution de l'absorption capillaire dans le béton incorporant la poudre de verre.

A 72h le gain en absorption capillaire est de 15,47%.

L'absorption des pores décroît en fonction de la compacité du béton, qui explique la diminution de l'absorption capillaire dans le béton incorporant la poudre de verre. Les fillers de verre contribuent au remplissage des pores en réduisant leur absorption.

6.4.3 La perméabilité à l'eau :

Tableau 6.4.4 : La hauteur de pénétration des deux mélanges de béton.

Type de béton	BT	BPV
Hauteur de pénétration (mm)	42,50	41,50
Pourcentage de chute (%)	2,35	

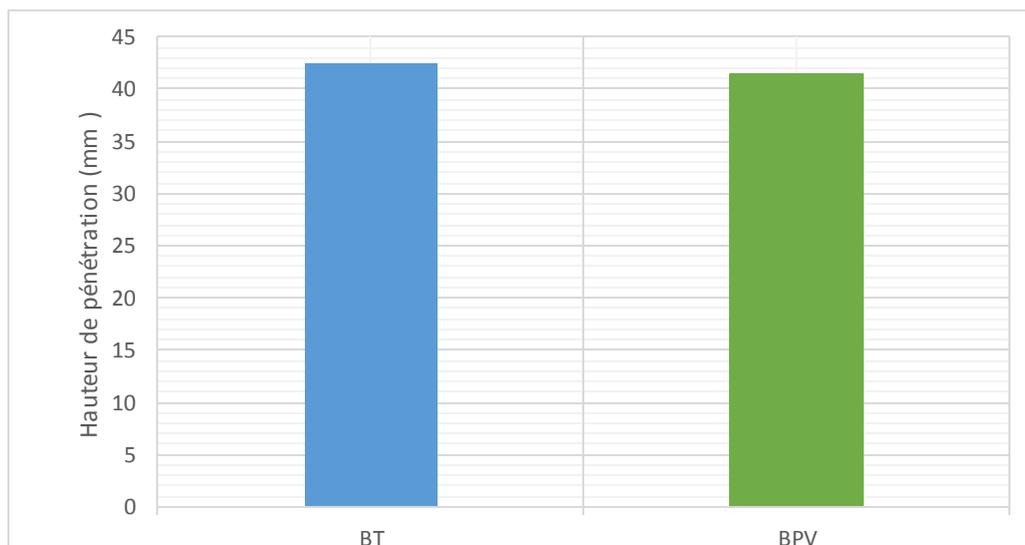


Figure 6.4.4 : Effet de la poudre de verre sur la perméabilité à l'eau.

Dans notre travail, une réduction de 2.35% de la perméabilité a été remarquée. Ces résultats sont en accord avec ceux de Zidol Ablam [45].

Cette diminution est en étroite corrélation avec l'effet filler et l'activité pouzzolanique qui transforment substantiellement les caractéristiques du réseau poreux par l'affinage des pores et des grains. Puisque le processus de la perméabilité à l'eau s'effectue sous forme d'écoulement sous pression en phase liquide et par conséquent fortement contrôlé par la connectivité des pores.

L'utilisation des ajouts cimentaires comme substituant du ciment tel que rapporté par BAMFORTH et coll., [1993] donne lieu à une réduction substantielle de la perméabilité des bétons. Les travaux de SHAYAN et coll., [2004] ont rapportés également que l'utilisation de 20 % du verre broyé de finesse 800m²/kg diminue la perméabilité du béton. Ils concluaient que la perméabilité du béton est faible après 380 jours de murissement selon ASTM C1202.

6.5 Conclusion :

À cause de la finesse, la poudre de verre ajoutée au béton par substitution partielle de 20% de ciment a fait chuter sa résistance à la compression. Néanmoins par cette même formulation, les paramètres définissant la durabilité (perméabilité et porosité) sont améliorés, ce qui répond effectivement aux objectifs de cette étude.

La chute de résistance peut être corrigée par une augmentation de finesse.

Conclusion générale :

L'utilisation des ajouts cimentaires dans le béton reste toujours bénéfique. Actuellement, ces matériaux de substitution partielle ont d'excellentes performances comparativement à celle du béton au ciment tout seul. La disponibilité des ajouts cimentaires présente un grand avantage dans la confection du béton. Leur prix dépend de plusieurs facteurs notamment le transport qui est un paramètre prépondérant dans le choix de l'ajout. Il est très important de développer de nouveaux matériaux cimentaires locaux pour diminuer les frais de transport et l'impact de la pollution de l'air provoquée par les cimenteries (émission de CO₂).

De ce fait, le béton peut devenir plus résistant éventuellement et de plus en plus durable et écologique.

Dans ce projet, nous avons utilisé la poudre de verre comme ajout cimentaire alternatif dans le béton. Le verre est introduit en substitution partielle de 20% de ciment Portland.

Les propriétés à l'état frais, les propriétés mécaniques ainsi que la durabilité de béton ont été étudiées sur des bétons de rapport E/L=0,5.

Le but de cette recherche est d'étudier l'effet du verre finement broyé tout seul. À la lumière des résultats obtenus, il est possible de conclure l'étude par les points suivants :

- L'étude des propriétés du béton à l'état frais montre que le verre broyé n'influence pas de manière considérable la maniabilité du béton ordinaire, et maintient la même classe de consistance.
- La masse volumique du béton avec poudre de verre est pratiquement identique à celle du béton de référence.
- La résistance à la compression du BPV est de 34.42 Mpa, réduite de 11%. De même, la résistance à la traction est de 3.22Mpa réduite par 4.4%. Ces résultats restent très satisfaisants en vue de la substitution de 20% de ciment.
- La finesse de la poudre de verre a une influence directe sur les propriétés pouzzolaniques du liant. Une finesse plus poussée (de l'ordre de 440 m²/Kg) peut produire au liant des propriétés pouzzolaniques satisfaisantes induisant ainsi l'augmentation de la résistance à la compression et la résistance à la traction à long terme.
- La poudre de verre broyé tout seul diminue la perméabilité du béton et la porosité par affinage des pores et donc améliore sa durabilité.

Recommandations et perspectives :

La poudre de verre recèle incontestablement des performances indéniables pour son utilisation adéquate dans les matériaux de construction. Cependant, cette étude suggère d'autres pistes d'investigations pour décortiquer davantage le comportement du matériau qui est la poudre de verre et garantir ses performances tant dans les conditions de laboratoire que dans celles d'in situ.

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

- L'étude de la variation de la finesse, le E/L et le pourcentage de substitution
- L'étude de l'usage des adjuvants en présence de poudre de verre
- L'influence des autres facteurs tels que les sulfates, les acides et les réactions alcali-granulat sur la durabilité des bétons avec poudre de verre
- L'étude du comportement des bétons à base de poudre de verre au feu
- L'étude de la durabilité des bétons tertiaire incorporant la poudre de verre et un ajout local (fine calcaire, fumée de silice...).

A la lumière des résultats obtenus, nous souhaitons aussi que l'Etat Algérien participe à la valorisation de la gestion des déchets notamment les déchets de verre non biodégradable.

La gestion des déchets est devenue un impératif économique, sociétal et environnemental nécessitant une réelle prise en charge d'urgence. Afin de contribuer à la protection de notre planète contre l'émission des gaz à effet de serre Elle peut contribuer significativement à l'augmentation du niveau d'emploi, elle est même capable d'absorber un grand nombre de chômeurs et s'ouvrir sur un nouveau monde industriel.

BIBLIOGRAPHIE :

1. Abdalla, Aly Hussein. *Optimisation et Performance des Bétons Incorporant de la Poudre de Verre Comme un Remplacement Partiel du Ciment Portland* [en ligne]. Mémoire de Maitrise : Génie civil. Sherbrooke (Québec) : Université de Sherbrooke, 2012. [Consulté le 12/03/2020]. Disponible sur : <http://hdl.handle.net/11143/6146>
2. ALADDIN, Fayçal. *Propriétés à l'état frais, à l'état durci et durabilité des bétons incorporant du verre finement broyé* [en ligne]. Mémoire de Maitrise : Génie civil. Sherbrooke (Québec) : Université de Sherbrooke, 2009. [Consulté le 12/03/2020]. Disponible sur : <http://savoirs.usherbrooke.ca/handle/11143/1558>
3. ALLAHYARI, Ilgar. *Approche performantielle des bétons : vers une meilleure caractérisation des indicateurs de durabilité* [en ligne]. Thèse de Doctorat : Génie Civil. Toulouse : Université Toulouse III Paul Sabatier, 2016. [consulté le 25/03/2020]. Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01561587/document>
4. BELOUADAH, Messaouda. *Etude de l'influence de la nature des fillers sur les propriétés des bétons à base des matériaux locaux à l'état frais et à l'état durcis et soumis aux hautes températures* [en ligne]. Thèse de Doctorat : Matériaux. M'sila : Université Mohamed Boudiaf, 2018. Disponible à l'adresse : <http://dspace.univ-msila.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/6837/these%20finale%5D.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
5. BENCHEIKH, Amel. *Contribution à la caractérisation d'un ciment à base du laitier +5 % de calcaire* [en ligne]. Mémoire de Master : Génie Civil. M'sila: Université Mohamed Boudiaf, 2016. disponible à l'adresse : <http://dspace.univ-msila.dz:8080/xmlui/handle/123456789/612>
6. CHAID, Rabah. ZEROUB, Hamid. RANGEARD, Damien. Indicateurs de durabilité des bétons avec ajout de poudre de verre en milieu marin. *Algérie équipement* [en ligne]. 2015, vol. 9, n°56, pp.17-25. Disponible sur : <http://www.entp.edu.dz/revue/files/article/56/article%203.pdf>
7. CLAUDE, Ployaert. Le béton un matériau pour des constructions étanches ? [en ligne]. In : *Betonica*. [consulté le 13/06/2020]. Disponible sur : http://www.betonica.be/media/presentaties/constructions_etanches/2_Claude_Ployaert-Beton_etanche.pdf
8. COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, *Béton : partie 1 : Spécification, performances, production et conformité*. NF EN 206-1, 2000. Paris : AFNOR, 2002.

9. COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, *Essai pour béton durci : Partie 1 : Forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules*. NF EN 12390-1, 2000. Paris : AFNOR, 2001.
10. COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, *Essai pour béton durci : Partie 2 : Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance*. NF EN 12390-2, 2000. Paris : AFNOR, 2001.
11. COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, *Essai pour béton durci : Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes*. NF EN 12390-3, 2001. Paris : AFNOR, 2003.
12. COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, *Essai pour béton durci : Partie 6 : Résistance en traction par fendage d'éprouvettes*. NF EN 12390-6, 2000. Paris : AFNOR, 2001.
13. COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, *Essai pour béton durci : Partie 8 : Profondeur de pénétration d'eau sous pression*. NF EN 12390-8, 2000. Paris : AFNOR, 2001.
14. *Cours de béton armé et précontraint : GCI 714– Durabilité et réparation du béton* [en ligne]. Sherbrooke (Québec) : Université de SHERBROOKE, 27 p .Disponible sur : https://cours-examens.org/images/Etudes_superieures/Ingeniorat_Genie_civil/4_annee/Beton_arme_et_precontraint/Durabilite/Chap1.pdf
15. CUVELIER, David. *Les indicateurs de durabilité : Essais et seuils*, Lille, 16 Octobre 2013. [en ligne]. Disponible sur : http://www.cotita.fr/IMG/pdf/10-__DC_Essais_et_seuil.pdf
16. DELUZARCHE, Céline. *Béton* [en ligne]. [consulté le 21/04/2020]. Disponible sur : <https://www.futura-sciences.com/maison/definitions/batiment-beton-5834/>
17. DIVET, Loïc. Etat des connaissances sur les causes possibles des réactions sulfatiques internes au béton. *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées* [en ligne]. 2000, n°227, pp. 71-84. Disponible sur : https://www.ifsttar.fr/collections/BLPCpdfs/blpc_227_71-84.pdf
18. DJADI, Boualem. MEDAR, Mohamed Amine. *Valorisation des déchets de verre dans la fabrication des granulats légers : Application dans les matériaux isolants*. Mémoire de Master : Génie de Matériaux. BOUMERDES : Université M'hamed Bougara, 2016. Disponible sur : <http://dlibrary.univ-boumerdes.dz:8080/jspui/handle/123456789/3696>
19. DREUX, Georges. *Nouveau guide du béton et de ses constituants*. Paris : EYROLLES, 1998, 403 p. ISBN 2-212-10231-3.

20. GHOMARI, Fouad. *Matériaux de Construction : Les méthodes de formulation du Béton*. Tlemcen : Université Aboubekr Belkaid ,55 p. Disponible sur : <https://ft.univ-tlemcen.dz/assets/uploads/pdf/departement/gc/Methodes-de-composition-du-beton.pdf>

21. HADDAD, Kahina. *Caractérisation des paramètres influençant la durabilité des matériaux cimentaires à base de matériaux de recyclages* [en ligne]. Thèse de Doctorat : Structures et matériaux. Tizi-Ouzou : Université Mouloud Mammeri, 2018. Disponible à l'adresse : <https://dl.ummo.dz/bitstream/handle/ummo/1812/Th%C3%A8se%20de%20Doctorat%20Kahina%20HADDAD%202018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

22. HAKMI, Mohamed Amine, HAMDANI, Mohamed Tarek. *Valorisation des déchets en verre dans l'industrie des briques réfractaires* [en ligne]. Mémoire de Licence : Génie des matériaux. Saida : Université Dr Moulay Tahar, 2012. Disponible sur : https://pmb.univ-saida.dz/buscopac/doc_num.php?explnum_id=311

23. HAMAMI, Ameer El Amine. *Vers une prédiction de la perméabilité au gaz à partir de la composition des matériaux cimentaires* [en ligne]. Thèse de Doctorat : Génie Civil. La Rochelle : Université de La Rochelle, 2009. Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00422681/document>

24. HAMMACHA, Abdel karim. SADOUDI, Elyassa. *Etude comparative théorique et expérimentale des différentes méthodes de composition des bétons*. Mémoire d'Ingénierat : Génie Civil. Alger : Ecole Nationale Polytechnique, 2001, 166p.

25. HORSIN MOLINARO, Hélène. JOURDAIN, Xavier. *Formulation d'un béton ordinaire* [en ligne]. Paris : Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay, 2018, 14 p. [consulté le 23/05/2020]. Disponible sur : <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr/sti/files/ressources/pedagogiques/10328/10328-formulation-dun-beton-ordinaire-ensps.pdf>

26. INFOCUMENTS. *Béton* [en ligne]. [consulté le 21/04/2020]. Disponible sur : <https://www.infociments.fr/glossaire/beton>

27. Ir C. Ployaert. Durabilité des bétons par la maîtrise de l'absorption d'eau [en ligne]. In : *febelcem*. [consulté le 13/06/2020]. Disponible sur : https://www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/dossiers-ciment-2008/fr/T2-Fr-durabilite-des-betons-absorption-eau.pdf

28. ISA, Hauwa. The need for waste management in the glass industries. *Scientific Research and Easy 3* [en ligne]. 2008, pp. 276-279. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/237294059_The_need_for_waste_management_in_the_glass_industries_A_review

29. IZEMMOUREN, Ouarda. *Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des briques de terre comprimée* [en ligne]. Thèse de Doctorat : Génie Civil. Biskra : Université Mohamed Khider, 2016. Disponible à l'adresse : http://thesis.univ-biskra.dz/2793/1/thèse_154_2016.pdf
30. JANI, Yahya. HOGLAND, William. Waste glass in the production of cement and concrete. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2 [en ligne]. 2014, pp. 1767-1775. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/261103380_Waste_glass_in_the_production_of_cement_and_concrete_-_A_review
31. LEGHREIB, Mekki El Islam. TAMOUST, Aissam. *Etude des bétons à la poudre de verre*. Mémoire d'Ingénieur : Génie Civil. Alger : Ecole Nationale Polytechnique : 2015, 97 p.
32. LEGHRIB, Mekki Nour El Islam. *Durabilité des bétons à la poudre de verre : étude de carbonatation*. Mémoire de Master : Génie Civil. Alger : Ecole Nationale Polytechnique, 2015, 68 p.
33. LEKDIM, Fatima. *Etude de la durabilité des bétons armés confectionnés à partir des sables de concassage* [en ligne]. Mémoire de Magistère : Matériaux et structures. Bejaïa : Université Abderrahmane Mira, 2011. Disponible à l'adresse : <http://univ-bejaia.dz/dspace/123456789/9865>
34. LING, Tung-Chai. POON, Chi-Sun. WONG, Hau-Wing. Management and recycling of waste glass in concrete products: current situations in Hong Kong. *Resources, Conservation and Recycling* [en ligne]. 2013, vol. 70, pp. 25-31. Disponible sur : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344912001917>
35. Living Circular. *Du verre recyclé dans le béton* [en ligne]. Disponible sur : <https://www.livingcircular.veolia.com/fr/industrie/du-verre-recycle-dans-le-beton>
36. MERDAS, Abdelghani. *Cours de matériaux de construction II : Chapitre I : Les bétons* [en ligne]. Sétif : Université Ferhat Abbas, 15p. [consulté le 21/04/2020]. Disponible sur : <https://ft.univ-setif.dz/externe/departements/gc/Chapitre-I-les-Betons-MDC-II.pdf>
37. OUALIT, Mehena. *Indicateur de durabilité du béton dans le contexte Algérien* [en ligne]. Mémoire de Magistère : Matériaux de structure. Boumerdes : Université M'Hamed Bougara, 2009. Disponible à l'adresse : <http://dlibrary.univ-boumerdes.dz:8080/bitstream/123456789/1332/1/Oualit%20Mehena.pdf>
38. PIERRE-CLAUDE, Aïtcin. *Binders for Durable and Sustainable Concrete: Modern Concrete Technology*. CRC Press, 2007, 528 p. ISBN 978-0415385886.

39. SALIK, Chakib. *Techniques expérimentales sur les bétons incorporant la poudre de verre*. Thèse d'Ingénieur : Génie Civil. Alger : Ecole Nationale Polytechnique, 2016, 82 p.
40. SOUCHU, Philippe. *L'utilisation des cendres volantes dans le béton* [en ligne]. Disponible sur : <http://doc.lerm.fr/lutilisation-cendres-volantes-beton/>
41. TAMOUST, Aissam. *Durabilité des bétons à la poudre de verre : Etude de la pénétrabilité des ions chlorures*. Mémoire de Master : Génie Civil. Alger : Ecole Nationale Polytechnique, 2015, 42 p.
42. TOPÇU, İlker Bekir. CANBAZ, Mehmet. Properties of concrete containing waste glass. *Cement and Concrete Research*. 2004, vol.34, n°2, pp. 267–274. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/223665038_Properties_of_concrete_containing_waste_glass
43. TORRENTI, Jean-Michel. *BETON* [en ligne]. [consulté le 21 avril 2020]. Disponible sur : <http://www.universalis.fr/encyclopedie/beton/>
44. Tricentris. *Une solution concrète pour le recyclage du verre* [en ligne]. Disponible sur : <https://www.tricentris.com/une-solution-concrete-pour-le-recyclage-du-verre-tricentris-enfin-recompense/>
45. ZIDOL, Ablam. *Durabilité en milieux agressifs des bétons incorporant la poudre de verre*. Thèse de Doctorat : Génie Civil. Sherbrooke (Québec) : Université de SHERBROOKE, 2014, 216 p.
46. ZOUBIRI, Amina. *Comportement du béton à base de la poudre de verre à hautes températures Effet de l'âge* [en ligne]. Mémoire de Master : Génie Civil. M'sila : Université Mohamed Boudiaf, 102 p. disponible sur : <http://dspace.univ-msila.dz:8080/xmlui/handle/123456789/611>

ANNEXE :

1. Résultat de l'analyse granulométrique :

- **Sable de dune :**

Tableau 01 : Etude granulométrique du sable de dune.

tamis (mm)	refus de chaque tamis (g)	refus cumulés de chaque tamis en (g)	refus cumulés de chaque tamis en (%)	tamisât cumulés en (%)
5	0	0	0	100
2,5	0	0	0	100
1,25	0	0	0	100
0,63	0	0	0	100
0,315	5,7	5,7	1,9	98,1
0,16	169,4	175,1	58,37	41,63
0,08	93,7	268,8	89,6	10,4
fines	17,4	286,2	95,4	4,6

- **Sable grossier :**

Tableau 2 : Etude granulométrique du sable grossier.

tamis (mm)	refus de chaque tamis (g)	refus cumulés de chaque tamis en (g)	refus cumulés de chaque tamis en (%)	tamisât cumulés en (%)
5	2,3	2,3	0,77	99,23
2,5	86,7	89	29,67	70,33
1,25	87,1	176,1	58,70	41,30
0,63	53,4	229,5	76,50	23,50
0,315	31,3	260,8	86,93	13,07
0,16	20,4	281,2	93,73	6,27
0,08	13	294,2	98,07	1,93
fines	5,1	299,3	99,77	0,23

- **Gravier 8/15 :**

Tableau 03 : Etude granulométrique du gravier 8/15.

tamis (mm)	refus de chaque tamis (g)	refus cumulés de chaque tamis en (g)	refus cumulés de chaque tamis en (%)	tamisât cumulés en (%)
25	0	0	0,00	100,00
16	50	50	2,50	97,50
14	175	225	11,25	88,75
12,5	195	420	21,00	79,00
10	460	880	44,00	56,00
8	530	1410	70,50	29,50
6,3	435	1845	92,25	7,75
4	145	1990	99,50	0,50
<4	10	2000	100,00	0,00

- **Gravier 15/25 :**

Tableau 04 : Etude granulométrique du gravier 15/25.

tamis (mm)	refus de chaque tamis (g)	refus cumulés de chaque tamis en (g)	refus cumulés de chaque tamis en (%)	tamisât cumulés en (%)
25	7	7	0,14	99,86
16	475	482	9,64	90,36
14	1770	2252	45,04	54,96
12,5	2060	4312	86,24	13,76
10	470	4782	95,64	4,36
8	125	4907	98,14	1,86
6,3	50	4957	99,14	0,86
4	20	4977	99,54	0,46
<4	20	4997	99,94	0,06

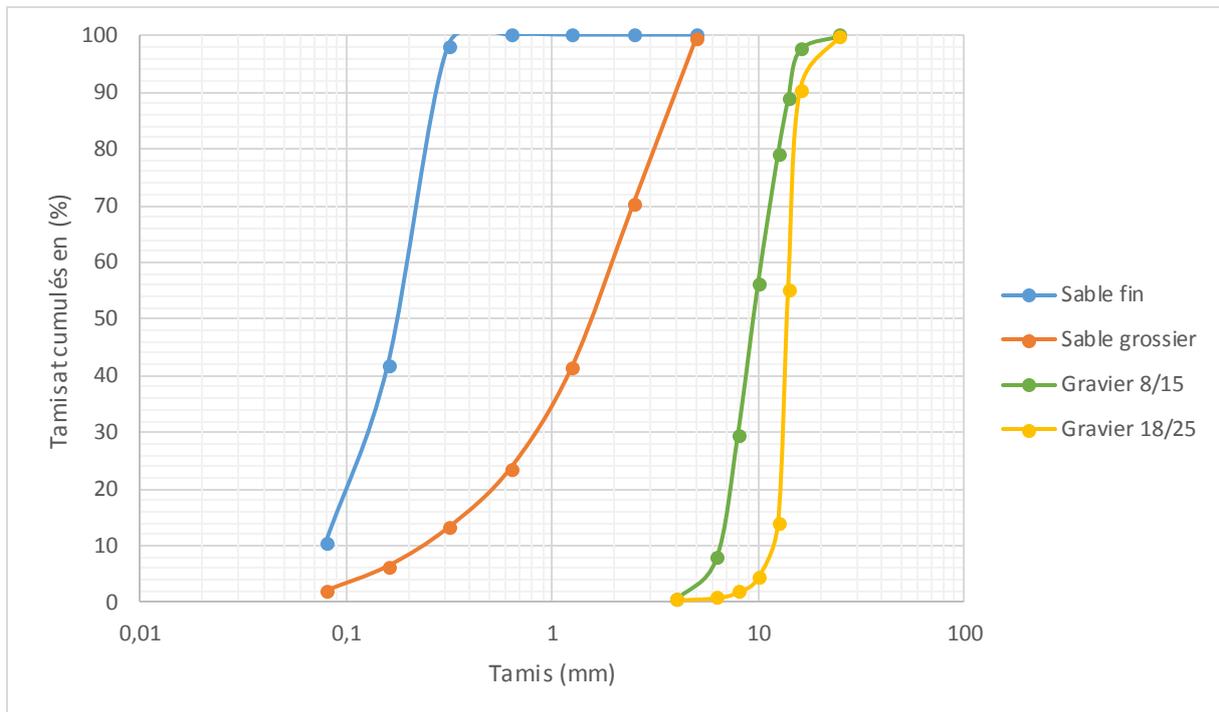


Figure 01 : Courbe granulométrique des constituants.