

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
École Nationale Polytechnique



Département de Génie Civil
Laboratoire Matériaux de Génie Civil et Environnement
En collaboration avec : LAFARGE - HOLCIM
Centre de Développement de la Construction (CDL)

Mémoire de projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'État en Génie Civil

Thème

Étude de Durabilité de Béton à Poudre Réactive (BPR) à base de poudre de verre

Présenté par

Rym Nihad SALAKDJI & Selsabila BETTACHE

Encadré par

Dr. Messaouda CHERRAK
M. Hamid ZEROUB

Soutenu le : 29 Juin 2025

Composition du Jury

Président du jury	Pr. BENAZZOUZ B.K.	Professeur	ENP
Encadrante	Dr. CHERRAK M.	MCA	ENP
Co-Encadrant	Mr. ZEROUB H.	TSM	LAFARGE-HOLCIM
Examineur	Mr. BOUZOUALEGH M.	MAA	ENP
Invité	Pr. BALI A.	Professeur	ENP

ENP 2025

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
École Nationale Polytechnique



Département de Génie Civil
Laboratoire Matériaux de Génie Civil et Environnement
En collaboration avec : LAFARGE - HOLCIM
Centre de Développement de la Construction (CDL)

Mémoire de projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en Génie Civil

Thème

Étude de Durabilité de Béton à Poudre Réactive (BPR) à base de poudre de verre

Présenté par

Rym Nihad SALAKDJI & Selsabila BETTACHE

Encadré par

Dr. Messaouda CHERRAK
M. Hamid ZEROUB

Soutenu le : 29 Juin 2025

Composition du Jury

Président du jury	Pr. B.K. BENAZZOUZ	Professeur	ENP
Encadrante	Dr. M. CHERRAK	MCA	ENP
Co-Encadrant	Mr. H. ZEROUB	TSM	LAFARGE-HOLCIM
Examineur	Mr. M. BOUZOUALEGH	MAA	ENP
Invité	Pr. A. BALI	Professeur	ENP

ENP 2025

Dedicaces

To my mother, who always believed I was meant for something big, even when I doubted it myself. You prayed for me, lifted me in ways I didn't always see, and gave us the best you could. You taught me that love isn't loud, it's in the actions, the small sacrifices, the quiet care, the warmth in every meal.

To my father, who probably still doesn't fully understand what I do, but chose to be proud anyway. Your love may not be spoken, but I've come to recognize it in your presence, your quiet pride, and in all those exhausting rides back and forth from school, long before I could drive. You got tired with me, and that matters more than I can ever express.

... to the light you both insisted I turn on when I worked in the dark,

To Neyla, Ifyes, and Yasser, thank you for always being there in your own way.

To Ifyes, for finding the green glass (a.k.a. Heineken bottles) like a true older bro.

To Lamar and Mayyar, for the hugs that gave me more energy than sleep ever could. You reminded me that life is bigger than stress, and softer than spreadsheets.

To Abzz, Yasmine, and Zissa, the constants of my life. You were always there, sometimes (let's be honest, most of the time) loud, sometimes quietly existing, but always at the right time. Thank you for the random conversations, the peaceful silences, and just being your wonderfully chaotic, reassuring selves.

To Imene, my timeline friend, we lived the same chaos on parallel paths, until we clicked, trauma-bonded, and shared laughs in the middle of exhaustion. Thank you for meeting my chaos with calm and grace.

To Melissa, the classmate I love the most (and more than that, for sure). We cried together, laughed at the absurdity of everything, and got through emotional meltdowns like seasoned warriors. Thank you for being the softness in a very sharp, concrete-filled world.

To my favorite dentist, Amina, a friendship that bloomed out of nowhere, like it was always meant to. We clicked instantly in the middle of academic chaos. You're a real-life angel, and I'm so proud of the brilliant, kind soul you are.

To Nini, my ultimate binôme, from panic sessions to gossip breaks, from "we're quitting" to "okay but one last revision," we did it all side by side. Thank you for being the calm to my chaos, the sarcasm to my stress, and the best teammate I could've asked for on this wild ride.

To little Sibile, the wide-eyed kid who believed she'd conquer the world someday. I don't know if you'd be proud of who I am now, but I hope you'd smile a little. You dreamed big, and I'm still trying.

And to 18-year-old Selsabila, the strongest version of me. The one who held on when things got heavy, who kept showing up when giving up felt easier.

***I love you.** Without your quiet strength, your stubborn heart, and your belief in just one more step, I wouldn't be here today.*

*We laughed, cried, and somehow... we survived.
If that's not a miracle, I don't know what is.*

Selsabila

Dedicaces

To my mother who pushed me to keep going when I was at my lowest. To my sister, Sana, who guided me like the big sister she is, with clarity, and more wisdom than I could ever ask for. To my little brother, Abdou, whom I am so proud of the man he's growing up to be. To my father who shows his love and pride in the small gestures.

To my dearest and my best friend, Nour, who saw me at my lowest and at my heights, who was and still always there, shoulder ready, heart open. From our wild teenage dreams to the depths of prepa, and now into the chaos of our twenties. You've never left. Thank you.

To all my girls: my aunts, cousins, and classmates. Thank you for the shared tears and laughter, the moments of doubt, of pride, of chaos, of gossip. You made this journey softer.

To my binôme, Sibile, who has been my partner in everything. Seven days out of seven for three whole years. From the dust and concrete of civil engineering to the colors, fabrics, scissors, and runways of fashion. Thank you for helping me rebuild myself, and for pushing me to chase a dream I once feared was too much.

To 17-year-old Nihad who thought it couldn't possibly get worse. And to 23-year-old Rym who's walking out of it. I love you. I'm proud of you. Thank you for surviving when it was unbearable, for standing up every time you fell. You nailed it.

Rym

Remerciements

Avant toute chose, nous exprimons notre profonde gratitude à **Dieu** Tout-Puissant, source de force, de courage et de patience, pour nous avoir permis de mener à bien ce travail malgré les difficultés.

Nous tenons à adresser nos remerciements les plus sincères à **Mme Messaouda CHERRAK**, encadrante de ce mémoire, pour sa disponibilité, sa bienveillance et ses conseils précieux. C'était un réel honneur d'être accompagnées par une enseignante aussi compétente, humaine et investie. Merci pour votre confiance, vos encouragements, et la générosité avec laquelle vous avez partagé vos connaissances. Travailler sous votre encadrement fut une expérience aussi enrichissante que stimulante.

Nos remerciements vont également à **M. Hamid ZEROUB**, co-encadrant de ce projet et Directeur du Support Technique au Centre de Développement de la Construction de LAFARGE. Merci pour votre accompagnement constant, votre expertise, et le temps que vous avez consacré à notre travail. Vos conseils éclairés, votre enthousiasme et votre confiance ont été des moteurs essentiels dans la progression de ce mémoire. Ce fut un privilège d'apprendre à vos côtés.

Nous souhaitons également remercier les membres du jury: Monsieur **BENAZZOUZ** pour avoir assuré la présidence et Monsieur **BOUZOUALEGH** en tant qu'examineur.

Nos remerciements vont aussi à l'ensemble du personnel du département Génie Civil, ainsi que toute l'équipe pédagogique de l'École Nationale Polytechnique, pour la qualité de leur enseignement et leur accompagnement tout au long de notre parcours.

Une mention particulière à **M. Ahmed GHARNAT**, technicien du laboratoire, pour sa précieuse assistance et sa disponibilité durant nos essais expérimentaux.

Nous adressons également nos remerciements à Monsieur **Zakaria SKENDER** de l'Université de Médéa, pour son aide précieuse lors de la réalisation de certains essais expérimentaux, ainsi que pour sa disponibilité et ses explications claires.

Enfin, merci à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Votre aide, vos mots, et votre soutien moral ont compté bien plus que vous ne l'imaginez.

الملخص

خرسانة المساحيق الفعالة هي مادة معروفة بمتانتها وخصائصها الميكانيكية المتميزة. ومع ذلك، فإن تركيبها تعتمد على نسبة عالية من الأسمنت والمواد المضافة باهظة الثمن، مما يؤدي إلى آثار بيئية واقتصادية كبيرة. ولمعالجة هذه القضايا، تبحث هذه الدراسة في الاستبدال الجزئي للأسمنت بمسحوق الزجاج المستخرج من النفايات، بهدف التوصل إلى حل أكثر استدامة وفعالية من حيث التكلفة. تم تطوير ثلاثة تركيبات من خرسانة المساحيق الفعالة، حيث يحل مسحوق الزجاج محل 0 % و 15 % و 30 % من الأسمنت.

الهدف الرئيسي هو تقييم تأثير هذا الاستبدال على الديمومة، المتانة والخواص الميكانيكية لخرسانة المساحيق الفعالة، من خلال دراسة تجريبية تتضمن اختبارات على نفاذية الماء والغاز، المسامية، الامتصاص الشعيري، نفاذية أيونات الكلوريد، وكذلك قوة الضغط والانحناء.

إن استخدام مسحوق الزجاج لا يقلل من تكلفة الإنتاج والبصمة الكربونية لخرسانة المساحيق الفعالة فحسب، بل يساهم أيضًا في تحسين بعض خصائص الديمومة، بما في ذلك تقليل المسامية بنسبة 22.7 %، وتقليل الانكماش بنسبة 10.4 %

الكلمات المفتاحية: مسحوق الخرسانة التفاعلية، مسحوق الزجاج، الديمومة، النفاذية، خفض التكاليف، تثمين النفايات، التنمية المستدامة.

Abstract

Reactive Powder Concrete (RPC) is a material known for its outstanding mechanical properties and durability. However, its formulation relies on a high cement content and costly admixtures, which leads to significant environmental and economic impacts. To address these issues, this study investigates the partial replacement of cement with waste-derived glass powder, aiming for a more sustainable and cost-effective solution. Three RPC formulations were developed, with glass powder replacing 0%, 15%, and 30% of the cement. The main objective is to assess the effect of this substitution on the durability and mechanical properties of RPC, through an experimental study including tests on water and gas permeability, porosity, capillary absorption, chloride ion penetration, as well as compressive and flexural strength. The use of glass powder not only reduces the production cost and carbon footprint of RPC, but also contributes to the improvement of certain durability characteristics, including a 22.7% decrease in porosity, and a 10.4% reduction in shrinkage.

Keywords: Reactive Powder Concrete, glass powder, durability, permeability, cost reduction, waste valorization, sustainable development.

Résumé

Le béton de poudre réactive (BPR) est un matériau aux performances mécaniques et à la durabilité remarquables, mais dont la formulation repose sur une forte teneur en ciment et en ajouts coûteux, ce qui engendre un impact environnemental et économique important. Pour pallier ces inconvénients, cette étude explore le remplacement partiel du ciment par de la poudre de verre issue de déchets, dans une optique à la fois durable et économique. Trois formulations de BPR ont été développées, avec des taux de substitution de ciment par poudre de verre de 0 %, 15 % et 30 %. L'objectif principal est d'évaluer l'effet de cette substitution sur les propriétés de durabilité et les performances mécaniques du BPR, dans le cadre d'une étude expérimentale portant sur la perméabilité à l'eau et au gaz, la porosité, l'absorption capillaire, la pénétration des ions chlorure, ainsi que la résistance à la compression et à la flexion. L'utilisation de poudre de verre permet non seulement de réduire les coûts de production et l'empreinte carbone du BPR, mais contribue également à l'amélioration de certains indicateurs de durabilité, notamment une diminution de la porosité de 22,7 %, et une réduction du retrait de 10,4 %.

Mots-clés : Béton de poudre réactive, poudre de verre, durabilité, perméabilité, réduction des coûts, valorisation des déchets, développement durable.

Table des matières

Table des matières	
Liste des tableaux	
Liste des figures.....	
INTRODUCTION GÉNÉRALE	14
CHAPITRE 1 : Le Béton à Poudre Réactive (BPR)	17
1.1. Introduction	18
1.2. Historique et évolution des bétons	18
1.2.1. Béton Ordinaire (BO).....	18
1.2.2. Béton à Hautes Performances (BHP)	18
1.2.3. Béton ultra haute performances (BUHP).....	19
1.3. Béton à poudre réactive	19
1.4. Composition du Béton de Poudre Réactive (BPR).....	21
1.4.1. Ciment	21
1.4.2. Sable	22
1.4.3. Eau.....	22
1.4.4. Superplastifiant.....	22
1.4.5. Fibres métalliques.....	23
1.4.6. Ajouts cimentaires	23
1.5. Méthodes de formation du Béton à Poudre Réactive (BPR)	25
1.5.1. Formulation par optimisation granulométrique	25
1.5.2. Formulation expérimentale par essais itératifs	26
1.5.3. Formulation basée sur la rhéologie.....	26
1.5.4. Formulation combinée : méthode hybride.....	26
1.5.5. Optimisation statistique : réponse de surface (RSM)	27
1.6. Avantages et inconvénients du BPR.....	27
1.7. Le BPR mis en œuvre : ouvrages de référence.....	28
1.8. Vers un BPR plus durable : enjeux et pistes d'amélioration	31
1.9. Conclusion.....	32
CHAPITRE 2 : Les Déchets de Verre et la Poudre de Verre.....	33
2.2. Introduction	34
2.2. Nature et caractéristiques des déchets de verre	35
2.2.1. Origine des déchets de verre.....	35
2.2.2. Composition chimique du verre	36
2.3. Poudre de verre.....	38
2.3.1. Procédé de fabrication	38
2.3.2. Granulométrie et forme des particules.....	38
2.3.3. Propriétés chimiques et physiques.....	39
2.4. Valorisation de la poudre de verre dans les matériaux de construction.....	42
2.4.1. Intérêt environnemental	42
2.4.2. Comme Ajout Cimentaire (Poudre de Verre).....	43
2.4.3. Domaines d'application concrets.....	44
2.5. Effets sur les propriétés du béton	45
2.5.1. Résistance mécanique (à court et long terme)	46
2.5.2. Durabilité (Perméabilité et porosité)	47
2.5.3. Réaction alcali-silice (RAS/ASR)	48
2.6. Cas d'études et recherches précédentes	49
2.6.1. Études internationales.....	49

2.6.2.	Contexte algérien : Disponibilité du verre usagé et perspectives de valorisation.....	50
2.7.	Limites et précautions d'utilisation	51
2.7.1.	Réactivité alcali-silice (RAS)	51
2.7.2.	Retard de prise et faible réactivité initiale	51
2.7.3.	Variabilité chimique du verre recyclé	51
2.7.4.	Taux de substitution et ouvrabilité	52
2.7.5.	Coût énergétique du broyage.....	52
2.7.6.	Influence sur l'esthétique du béton.....	52
2.7.7.	Recommandations pratiques issues de la littérature	52
2.8.	Conclusion.....	53

CHAPITRE 3 : Effet de la Poudre de Verre sur la Durabilité des BPR54

3.1.	Introduction	55
3.2.	Définition de la durabilité et paramètres associés	55
3.2.1.	Porosité.....	56
3.2.2.	Perméabilité à l'eau	57
3.2.3.	Perméabilité au gaz	57
3.2.4.	Absorption capillaire	58
3.2.5.	Résistance à la pénétration des ions chlorure	59
3.3.	Influence des ajouts minéraux sur la durabilité	60
3.3.1.	Rôle de la fumée de silice.....	61
3.3.2.	Rôle du laitier de haut fourneau	62
3.3.3.	Rôle du quartz broyé	62
3.3.4.	Rôle de la poudre de verre verte.....	63
3.3.5.	Lien entre formulation et durabilité.....	64
3.4.	Conclusion.....	65

CHAPITRE 4 : Matériels et Méthodes66

4.1.	Introduction	67
4.2.	Plan expérimental	67
4.2.1.	Préparation des matériaux cimentaires secondaires.....	67
4.2.2.	Caractérisation des matériaux.....	67
4.2.3.	Formulation des mélanges.....	67
4.2.4.	Réalisation des essais expérimentaux.....	67
4.3.	Références Normatives des Essais	69
4.4.	Matériels et méthodes.....	70
4.4.1.	Essais de caractérisation	70
4.4.2.	Essais sur béton frais	73
4.4.3.	Caractérisation mécanique des bétons durcis	74
4.4.4.	Essais de durabilité	77
4.5.	Conclusion.....	80

CHAPITRE 5 : Caractérisation des Matériaux et Formulations des Bétons.....81

5.1.	Introduction	82
5.2.	Matériaux Utilisés	82
5.2.1.	Préparation de la poudre de verre	82
5.2.2.	Ciment gris	83
5.2.3.	Sable	84
5.2.4.	Fibre métallique.....	86

5.2.5.	Superplastifiant.....	87
5.2.6.	Quartz broyé (QB).....	88
5.2.7.	Fumée de silice (FS).....	88
5.2.8.	Laitier broyé (LB)	89
5.2.9.	Eau de gâchage.....	89
5.3.	Méthodologie de formulation des mélanges.....	90
	Constitution des formulations expérimentales	90
	Principes de calcul et ratios de formulation	90
5.4.	Fabrication et mise en place des BPR	91
5.4.1.	Malaxage	91
5.4.2.	Coulage.....	92
5.4.3.	Conservation.....	92
5.5.	Conclusion.....	93
CHAPITRE 6 : Résultats et Interprétations.....		94
6.1.	Introduction	95
6.2.	Caractéristiques à l'état frais	95
6.2.1.	Etalement au mini cône	95
6.2.2.	Masse volumique.....	96
6.3.	Caractérisations à l'état durci	96
6.3.1.	Résistance à la compression	96
6.3.2.	Résistance à la flexion.....	98
6.3.3.	Retrait.....	100
6.4.	Essais de durabilité.....	101
6.4.1.	Porosité.....	101
6.4.2.	Absorption par capillarité	102
6.4.3.	Perméabilité a l'eau	102
6.4.4.	Perméabilité au gaz	104
6.4.5.	Essai de migration des ions chlorure	105
6.5.	Conclusion.....	106
CONCLUSION GENERALE		107
BIBLIOGRAPHIE.....		110
ANNEXES		116
	Annexe A : Fiche Technique du Ciment Blanc utilisé.....	117
	Annexe B : Caractéristiques physico-chimique du Ciment	119
	Annexe C : Fiche Technique du Superplastifiant utilisé.....	120
	Annexe D : Fiche Technique de la fumée de silice utilisée	11721
	Annexe E : Fiche Technique du sable utilisé.....	11922

Liste des tableaux

Tableau 2.1: Composition de verre industriel (%en poids)(Bourahla I. & Bechar C.,2024)	36
Tableau 2.2: Pénétrabilité des ions chlorure d'un béton avec ajout de fine poudre de verre	47
Tableau 4.1 : Tableau de normes	69
Tableau 5.1 : Caractéristiques de Ciment Portland SARIE 52,5 NA 442- LAFARGE.....	84
Tableau 5.2 : Les caractéristiques physiques du sable.....	86
Tableau 5.3 : Les Caractéristiques des fibres métalliques	87
Tableau 5.4 : Les caractéristiques du superplastifiant MEDAFLOW RE 250	87
Tableau 5.5: Composition Chimique	90
Tableau 5.6 : Caractéristiques physiques.....	90
Tableau 5.7: Masses et proportions des constituants pour 1 m ³ de béton des trois formulations.	91
Tableau 6.1 : Etalements des trois bétons (cm)	95
Tableau 6.2: Masses volumiques des trois bétons	96
Tableau A.1 : Caractéristique physico-chimique du ciment.....	119

Liste des figures

Figure 1.1: Évolution historique du développement des BUHP (Mugahed A. et al., 2022)	19
Figure 1.2: Comparaison des courbes contrainte-déformation pour le béton à résistance normale (NSC), le béton haute performance (HPC) et le béton à poudre réactive (RPC) (Blais P.Y. & Couture M., 1999).....	20
Figure 1.3: Matières premières des bétons (Anish V. & Logeshwari J., 2024).....	21
Figure 1.4 : Microstructure de (a) laitier broyé, (b) cendres volantes, (c) fumée de silice et (d) quartz broyé (Porat N. et al., 2015) (Chougan M. et al., 2020)	24
Figure 1.5: Passerelle piétonne de Sherbrooke (Canada, 1997)	28
Figure 1.6: Pont de Saint-Pierre-la-Cour (France, 2001).....	29
Figure 1.7: Mars Hill Bridge (États-Unis, 2006)	29
Figure 1.8: Voie ferrée Qinghai-Tibet (Chine, 2006)	30
Figure 1.9: Pulaski Skyway – Réhabilitation (États-Unis, 2014–2016)	30
Figure 1.10: Djamaâ El Djazaïr (Algérie, 2019).....	31
Figure 2.1: Composition moyenne des déchets ménagers et assimilés DMA 4 saisons Algérie-2018/2019 (National Waste Agency, 2020).....	34
Figure 2.2: Déchets de verre ménager	35
Figure 2.3: Déchets de verre industriel	36
Figure 2.4: Classification des sédiments et du verre du point de vue de leur composition minéralogique de base dans le diagramme de Keil-Rankine (Bouchikhi, 2020).....	37
Figure 2.5 : Forme et taille de la particule de verre à 38 μm (Shao & al, 2000).	38
Figure 2.6: Expansion dans le temps d'éprouvettes de mortiers en fonction du diamètre des grains de verre (Meyer & Coll, 1997).....	39
Figure 2.7: Résultats d'essai d'expansion sur éprouvettes de mortiers avec du verre (Meyer & Coll, 1997)	40
Figure 2.8: Expansion des éprouvettes de mortiers avec des verres différentes couleurs (Yamada & Coll, 2005)	41
Figure 2.9: Image MEB d'une particule de verre montrant une formation RAS dans la frontière de la particule (Cyr, M. et al., 2012).....	41
Figure 2.10: Réaction Alkali-Silica se produisant à l'intérieur d'une particule de verre sodocalcique, tandis que la surface des particules est soumise à une réaction pouzzolanique (Leghreib, M. N. E. & Tamaoust, A., 2015).....	42
Figure 2.11: Production globale de ciment en millions de tonnes de 1990 à 2020 avec des projections pour 2030 (John E. et al., 2018)	43
Figure 2.12: Poudre de verre au MEB (Cyr, M. et al., 2012)	44
Figure 2.13: Valorisation des déchets de verre dans diverses applications de construction (Bouchikhi, 2020)	45
Figure 2.14: Comparaison de résistance entre la fumée de silice et la poudre de verre (Shayan, A. & Xu, A., 2004)	46
Figure 2.15: Diffusion des ions chlorure en fonction du rapport E/L pour différents bétons (Zidol, A., 2014)	48

Figure 2.16 : Perméabilité à l'oxygène d'un béton témoin et un béton contenant de la PV à 30% de substitution (Chaïd, R. et al., 2015)	48
Figure 3.1 : Porosité totale des échantillons après 28 jours d'hydratation (Dobiszewska M. & al., 2023)	56
Figure 3.2 : Profondeur de pénétration de l'eau dans le béton additionné de poudre de verre après 28 jours (Du, H. & Tan, K. H., 2014)	57
Figure 3.4 : Pourcentage d'absorption capillaire (Odero F. O. & al., 2023)	59
Figure 3.5 : Effet de la poudre de verre sur le coefficient de diffusion des ions chlorures dans le béton (Yu Z., Yang W., & Cai J., 2023)	60
Figure 3.6 : MEB des BPR avec différents dosages de fumée de silice (Beglarigale A. & al., 2014)	61
Figure 3.7 : L'influence du laitier sur la résistance en compression du béton (Zeghichi L. & al., 2007)	632
Figure 3.8 : Echelle de dureté minérale de Mohs	63
Figure 3.9 : Images au microscope électronique à balayage de la poudre de verre (Dobiszewska M. & al., 2023)	64
Figure 4.1: Organigramme expérimental	68
Figure 4.2 : Tamiseurs pour Granulométrie	70
Figure 4.3 : Essai équivalent de sable	71
Figure 4.4 : Essai de masse volumique par Pycnomètre	71
Figure 4.5 : Essai au bleu de méthylène	72
Figure 4.6 : Broyeur à boulets	72
Figure 4.7 : Refus sur tamis 45 µm	73
Figure 4.8 : Essai d'étalement	74
Figure 4.9 : Masse volumique sur béton frais	74
Figure 4.10 : Essai de compression	75
Figure 4.11 : Essai de flexion	75
Figure 4.12 : Essai de retrait	76
Figure 4.13 : Essai de porosité	77
Figure 4.14 : Essai absorption capillaire	77
Figure 4.15 : Essai perméabilité à l'eau	78
Figure 4.16 : Essai perméabilité au gaz	79
Figure 4.17 : Essai des ions chlorure	80
Figure 5.1 : Bouteilles de Verre utilisées	82
Figure 5.2 : Poudre de Verre	82
Figure 5.3 : Ciment Portland SARIE 52.5 R	84
Figure 5.4 : Sable utilisé (0- 1,25 mm), Afroquartz, Tébessa	85
Figure 5.5 : La courbe granulométrique du sable	85
Figure 5.6 : Fibres métalliques utilisées	86
Figure 5.7 : Superplastifiant utilisé	87
Figure 5.8 : Quartz broyé utilisé	88
Figure 5.9 : Fumée de silice utilisée	89
Figure 5.10 : Laitier Broyé	89

Figure 5.11 : Malaxage du BPR.....	92
Figure 6.1: Résultats de compression de 28, 56 et 90 jours des trois bétons.....	97
Figure 6.2 : Evolution de la résistance à la flexion des trois formulations à 28 et 90 jours	99
Figure 6.3 : Evolution du retrait des trois bétons (mm).....	100
Figure 6.4 : Porosité des trois formulations (%)	101
Figure 6.5 : coefficient de sorption ($\text{Kg}/\text{m}^2/\text{h}0.5$)	102
Figure 6.6 : Eprouvette du premier essai	103
Figure 6.7 : Eprouvette du deuxième essai	103
Figure 6.8 : Coefficient de perméabilité au gaz des trois bétons	104

Liste des Abréviations

BPR : Béton à Poudre Réactive

BPRT : Béton à Poudre Réactive Témoin (sans poudre de verre)

BPR15PV : Béton à Poudre Réactive avec 15 % de Poudre de Verre

BPR30PV : Béton à Poudre Réactive avec 30 % de Poudre de Verre

BO : Béton Ordinaire

BHP : Béton Haute Performances

BUHP : Béton à Ultra Hautes Performances

PV : Poudre de Verre

FS : Fumée de Silice

LB : Laitier Broyé

QZ : Quartz Broyé

RPC : Reactive Powder Concreate (équivalent anglophone du BPR)

E/L : Rapport Eau / Liant

MEB : Microscopie Électronique à Balayage

C-S-H : Silicate de calcium hydraté

RAS : Réaction Alkali-Silice

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Contexte et problématique

Dans un contexte mondial marqué par des préoccupations environnementales croissantes et des exigences de développement durable de plus en plus strictes, l'industrie de la construction est appelée à repenser en profondeur ses pratiques et les matériaux qu'elle utilise. Le béton, matériau de base des infrastructures modernes, soulève aujourd'hui de nombreuses interrogations en raison de son empreinte écologique significative, notamment en lien avec la fabrication du ciment, l'un de ses composants principaux.

En effet, le ciment est responsable de plus de 7 % des émissions mondiales de CO₂, contribuant ainsi directement à l'aggravation de l'effet de serre et au dérèglement climatique. Il s'agit du matériau manufacturé le plus utilisé au monde, et sa consommation pourrait encore augmenter de 12 à 23 % d'ici 2050 si aucune alternative durable n'est mise en place (Ecocem, 2023). Le secteur cimentier figure ainsi parmi les plus grands émetteurs de carbone à l'échelle mondiale. Sans réduction significative des émissions, il pourrait à lui seul compromettre l'atteinte des objectifs climatiques internationaux (Jiang, Y. & al, 2019).

Parallèlement à ces enjeux environnementaux, le coût économique constitue une autre contrainte majeure. Les bétons à poudre réactive (BPR), connus pour leurs performances mécaniques et leur durabilité exceptionnelles, sont formulés avec de très fortes teneurs en liant cimentaire, entre 800 et 1000 kg/m³, selon Richard et Cheyrezy (1995). Cette richesse en liant, bien qu'efficace sur le plan technique, engendre un coût de production élevé, limitant l'usage du BPR à des projets spécifiques ou à des applications très ciblées. Ainsi, une contradiction apparaît : comment concilier haute performance, durabilité environnementale et viabilité économique ? (Richard, P. & Cheyrezy, M., 1995) (Kou, S. C. & Xing, F., 2012).

Face à cette problématique, l'intégration de matériaux alternatifs, issus du recyclage, s'impose comme une piste prometteuse. Parmi eux, la poudre de verre, issue de la valorisation de déchets non valorisés, suscite un intérêt croissant. Plusieurs études ont démontré que cette dernière peut jouer un rôle multiple dans les matériaux cimentaires : en tant qu'ajout pouzzolanique, microfiller ou même comme réactif participant à la durabilité à long terme des bétons. Grâce à sa finesse et à sa composition riche en silice amorphe, elle contribue à densifier la matrice cimentaire et à améliorer les propriétés mécaniques et durables du béton (Jiang, Y. & al, 2019; Torres-Carrasco, M. & Puertas, F., 2015; Taha, B. & Nounu, G., 2008).

En outre, son incorporation partielle en substitution du ciment permettrait de réduire l'impact environnemental de la formulation tout en diminuant les coûts de production (Du, H. & Tan, K. H., 2014; Chand G. et al., 2025). Cela en fait une solution particulièrement pertinente dans le cadre des BPR, où la consommation de liant est traditionnellement très élevée. La valorisation de la poudre de verre dans ce contexte s'inscrit donc pleinement dans une démarche d'économie circulaire et de construction durable.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

But de la recherche

L'objectif principal de ce travail de recherche est de contribuer au développement d'un béton à poudre réactive (BPR) plus durable sur les plans environnemental et économique, en explorant l'intégration de la poudre de verre recyclée comme substitut partiel du ciment. En s'inscrivant dans une démarche de valorisation de déchets et d'optimisation des ressources, cette étude vise à évaluer l'impact de cette substitution sur les propriétés physico-mécaniques et durables du BPR. Plus précisément, l'analyse porte sur l'évolution de la résistance à la compression et à la flexion, ainsi que sur des paramètres représentatifs de la durabilité du matériau, tels que la porosité, l'absorption capillaire, la perméabilité et la stabilité dimensionnelle, en fonction de différents taux de substitution.

Ainsi, ce travail ambitionne de démontrer la faisabilité d'une formulation innovante de BPR, plus respectueuse de l'environnement, économiquement plus accessible, et adaptée aux enjeux actuels de la construction durable.

Plan du mémoire

Le mémoire est structuré en deux grandes parties :

La première partie constitue une revue bibliographique, organisée en trois chapitres :

1. Le premier chapitre présente les bétons à poudre réactive (BPR), en mettant l'accent sur leurs propriétés et leur durabilité.
2. Le deuxième chapitre est consacré aux déchets de verre et à la poudre de verre, avec un focus sur leurs caractéristiques, leur valorisation et leur utilisation dans le béton comme ajout cimentaire.
3. Le troisième chapitre explore les effets de la poudre de verre sur les propriétés du BPR, plus précisément en termes de durabilité et de performance à long terme.

La deuxième partie concerne l'étude expérimentale, répartie en trois chapitres :

4. Le quatrième chapitre décrit le programme expérimental et les méthodes de caractérisation.
5. Le cinquième chapitre détaille les matériaux utilisés et la formulation des mélanges de BPR avec et sans ajout de poudre de verre.
6. Le sixième chapitre présente les résultats expérimentaux et leur interprétation, en analysant l'impact de la substitution sur les propriétés physiques, mécaniques et durables du béton.

PREMIÈRE PARTIE :
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1 :
Le Béton à Poudre
Réactive (BPR)

1.1.Introduction

Le Béton à Poudre Réactive (BPR) représente une avancée majeure dans le domaine des matériaux de construction, avec une capacité à répondre aux exigences techniques de plus en plus strictes en matière de performance et de durabilité. Développé dans les années 1990, ce béton innovant se distingue par sa microstructure extrêmement dense et homogène, obtenue grâce à l'utilisation d'une formulation spécifique, incluant l'absence de granulats grossiers et l'intégration de minéraux ultra-fins. Il conjugue des propriétés mécaniques exceptionnelles, telles qu'une résistance à la compression pouvant atteindre 200 MPa, avec une durabilité remarquable, même dans des environnements extrêmes. En dépit de son coût de production élevé, le BPR représente une solution idéale pour des applications structurelles exigeantes, telles que les ponts, les coques minces et les infrastructures soumises à des conditions sévères.

1.2. Historique et évolution des bétons

1.2.1. Béton Ordinaire (BO)

Le béton ordinaire (BO), ou béton normal, constitue le matériau cimentaire le plus répandu dans les constructions classiques. Sa formulation repose sur un dosage simple de ciment, d'eau, de granulats et, parfois, d'adjuvants standards. Ce type de béton présente une résistance à la compression généralement comprise entre 20 et 50 MPa, et une résistance en traction/flexion allant de 2 à 5 MPa. Son module d'élasticité, avoisinant les 30 à 40 GPa, reste correct pour des structures usuelles, mais ses limites apparaissent dès que des exigences de durabilité accrues s'imposent. Le BO montre en effet une faible résistance à l'usure et une absorption d'eau élevée, ce qui le rend vulnérable aux environnements agressifs et aux cycles de gel/dégel. Bien que suffisant pour des ouvrages standards, le BO reste limité en termes de longévité, de compacité et de résistance aux sollicitations extrêmes (Yang H., 2022).

1.2.2. Béton à Hautes Performances (BHP)

Le béton à haute performance (BHP) se distingue par une formulation soignée incluant des adjuvants de nouvelle génération, comme les superplastifiants, et des additions minérales comme la fumée de silice, la cendre volante et le laitier. Ces choix techniques permettent d'obtenir une résistance à la compression allant de 60 à 100 MPa, et une résistance en traction/flexion entre 6 et 10 MPa, soit deux fois plus que celle du béton ordinaire. Son module d'élasticité, similaire au BO, s'accompagne toutefois d'une teneur en eau fortement réduite, ce qui favorise une microstructure plus dense et homogène. Sur le plan de la durabilité, le BHP affiche de nettes améliorations, il représente une solution adaptée aux ouvrages soumis à des contraintes sévères, tout en offrant une durabilité significativement supérieure à celle du béton ordinaire (Yang H., 2022).

1.2.3. Béton ultra haute performances (BUHP)

Le béton à ultra-haute performance (BUHP) sont des matériaux cimentaires modernes avec des performances mécaniques et de durabilité supérieures. Sa résistance à la compression varie entre 170 et 230 MPa, tandis que sa résistance en flexion peut atteindre 30 à 60 MPa, bien au-delà des capacités du béton ordinaire ou du BHP. Avec un module d'élasticité de 40 à 60 GPa, il présente une rigidité remarquable adaptée aux structures à forte exigence mécanique. Côté durabilité, le BUHP affiche une perméabilité extrêmement faible, avec un coefficient de diffusion des ions chlorure de seulement faible. Le BUHP résiste aussi très bien à l'usure et montre une très bonne tenue au gel/dégel. Grâce à sa formulation ultra-densifiée, renforcée par des fibres métalliques, le BUHP combine compacité, robustesse et longévité, ce qui en fait un matériau de choix pour les infrastructures critiques, les environnements extrêmes et les ouvrages de très longue durée de vie (Yang H., 2022).

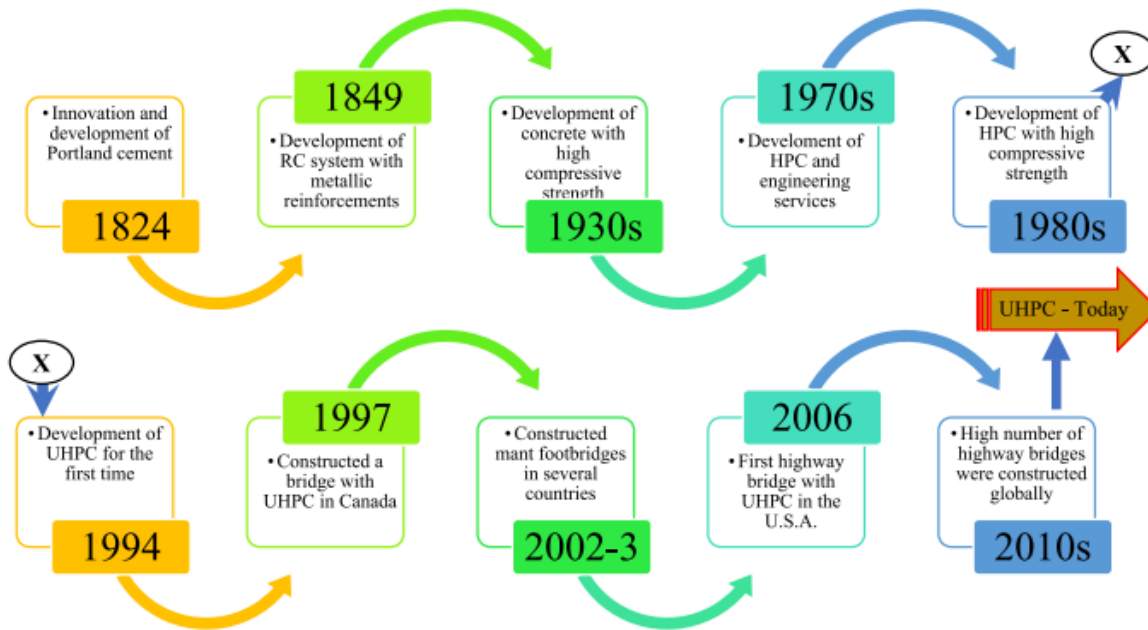


Figure 1.1: Évolution historique du développement des BUHP (Mugahed A. et al., 2022)

1.3. Béton à poudre réactive

Le Béton de Poudre Réactive (BPR), ou *Reactive Powder Concrete* (RPC), représente une évolution technologique majeure dans le domaine des matériaux cimentaires avancés. Ce béton innovant se caractérise par une formulation spécifique excluant les granulats grossiers, associée à un faible rapport eau/liant (autours de 0,2) et à l'incorporation d'additions minérales ultrafines comme la fumée de silice, le quartz et le laitier broyé. Ces composants permettent d'obtenir une microstructure extrêmement dense, faiblement poreuse, et quasi-imperméable. Cette densité

CHAPITRE 1 : Béton à Poudre réactive (BPR)

structurale assure au BPR des propriétés mécaniques remarquables, avec des résistances en compression qui peuvent dépasser les 200 MPa, et des résistances en flexion supérieures à 50 MPa, sans nécessiter systématiquement d'armatures classiques en acier.

En matière de durabilité, le BPR surpasse largement les bétons conventionnels et même les bétons à ultra hautes performances (BUHP), notamment grâce à sa très faible perméabilité aux agents agressifs tels que les chlorures, les sulfates ou le dioxyde de carbone. Cette caractéristique le rend particulièrement résistant aux phénomènes de corrosion des armatures, à la carbonatation, à la pénétration de l'eau sous pression, et aux cycles gel-dégel. De plus, l'ajout de fibres métalliques contribue à améliorer la ductilité, la ténacité et la résistance à la fissuration du BPR.

Ces propriétés exceptionnelles justifient l'emploi du BPR dans des ouvrages hautement techniques tels que les ponts à grande portée, les dalles minces, les coques structurales, les structures marines, les centrales nucléaires ou encore les éléments préfabriqués de haute précision. Le BPR est également prisé pour les constructions nécessitant une grande longévité avec un entretien minimal, dans des environnements agressifs ou à accès difficile. Sur le plan conceptuel, le développement du Béton à Poudre Réactive (BPR) marque une évolution significative par rapport au béton armé traditionnel. Contrairement à ce dernier, conçu principalement pour travailler en compression et nécessitant une armature pour reprendre les efforts de traction, le BPR est formulé pour constituer un matériau structural autonome, capable de résister efficacement à la fois à la compression et à la traction grâce à sa microstructure optimisée et à l'incorporation de fibres (Ahmed et al, 2021).

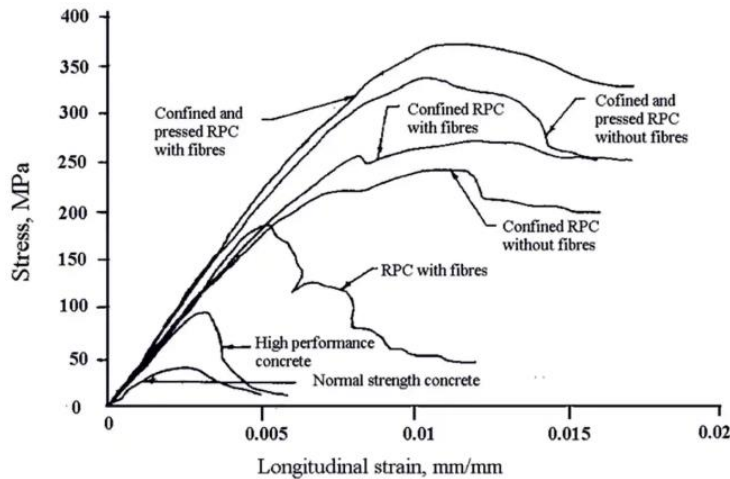


Figure 1.2: Comparaison des courbes contrainte-déformation pour le béton à résistance normale (NSC), le béton haute performance (HPC) et le béton à poudre réactive (RPC) (Blais P.Y. & Couture M., 1999)

1.4.Composition du Béton de Poudre Réactive (BPR)

Le Béton de Poudre Réactive (BPR) est un matériau cimentaire à hautes performances, conçu pour développer une microstructure extrêmement dense, sans granulats grossiers, et doté de propriétés mécaniques, physiques et chimiques remarquables. Cette performance résulte non seulement d'une formulation innovante, fondée sur l'optimisation granulaire, la réactivité chimique et la réduction drastique de la porosité, mais également de la qualité et du rôle spécifique de chacun de ses constituants.

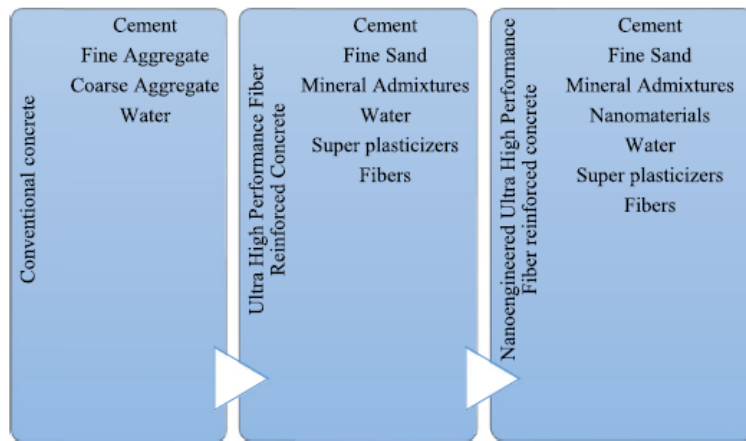


Figure 1.3: Matières premières des bétons (Anish V. & Logeshwari J., 2024)

1.4.1. Ciment

Le ciment constitue le liant hydraulique principal du Béton de Poudre Réactive (BPR). Il est généralement utilisé en dosage élevé, compris entre 900 et 1 200 kg/m³, afin de garantir une matrice extrêmement compacte et un développement rapide des résistances mécaniques. Cette quantité importante contribue à la densité globale du béton et à la réduction de la porosité capillaire. La finesse du ciment, bien que non explicitement précisée dans la source, est essentielle pour maximiser la surface réactive, favoriser la formation d'un gel C-S-H dense, et assurer une bonne interaction avec les ajouts minéraux comme la fumée de silice. Sanjuán et Andrade (2021) soulignent que l'optimisation du ciment dans le BPR permet d'atteindre des résistances en compression allant jusqu'à 200 MPa, en particulier lorsque le rapport eau/liant est maintenu très bas (< 0,2) et que le mélange est associé à des additions ultrafines et un superplastifiant efficace. Le rôle du ciment est donc fondamental dans la formulation du BPR, aussi bien pour ses performances mécaniques que pour la durabilité de la matrice, notamment en réduisant la teneur en portlandite libre, ce qui limite la vulnérabilité aux attaques chimiques et améliore la résistance à long terme du matériau (Sanjuán, M. Á. & Andrade, C., 2021).

1.4.2. Sable

Contrairement aux bétons ordinaires qui utilisent des granulats grossiers, le Béton de Poudre Réactive (BPR) repose sur une formulation sans gravier, où le sable fin constitue le squelette granulaire principal. Selon Sanjuán et Andrade (2021), ce sable est généralement un sable de quartz de haute pureté (riche en SiO_2), soigneusement lavé, séché et calibré, avec une taille maximale des particules inférieure à 600 μm . Cette granulométrie très fine permet un emboîtement optimal des grains, favorisant la compacité du matériau et réduisant significativement la porosité capillaire. En l'absence de gros granulats, le sable remplit entièrement la fonction structurale interne et permet une répartition homogène des contraintes dans la matrice cimentaire. Par ailleurs, la nature chimiquement inerte du quartz contribue à une stabilité à long terme, en empêchant notamment les réactions délétères telles que l'alcali-réaction. Ainsi, le sable n'est pas un simple filler dans le BPR, mais un élément structurant essentiel dans l'architecture granulaire du matériau, garantissant à la fois ses performances mécaniques et sa durabilité (Sanjuán, M. Á. & Andrade, C., 2021).

1.4.3. Eau

L'eau joue un rôle fondamental dans le processus d'hydratation du ciment, mais dans le cas du Béton de Poudre Réactive (BPR), sa quantité est rigoureusement contrôlée afin de garantir une compacité maximale de la matrice. D'après Sanjuán et Andrade (2021), le rapport eau/liant (E/L) est maintenu à un niveau extrêmement bas, généralement compris entre 0,16 et 0,20, ce qui est nettement inférieur aux valeurs observées dans les bétons ordinaires. Cette limitation volontaire de l'eau permet de réduire considérablement la porosité capillaire, d'améliorer la densité interne du matériau et donc d'en renforcer la durabilité, notamment face aux attaques chimiques, aux cycles gel/dégel et à la pénétration des agents agressifs. Toutefois, cette faible quantité d'eau rend le mélange très sec et difficile à mettre en œuvre, ce qui impose l'utilisation systématique de superplastifiants pour maintenir une bonne ouvrabilité sans compromettre les performances mécaniques ou la qualité de la microstructure. Ainsi, dans le BPR, l'eau n'est pas seulement un activateur d'hydratation, mais un paramètre de formulation critique qui influence directement les performances globales du matériau (Sanjuán, M. Á. & Andrade, C., 2021).

1.4.4. Superplastifiant

Dans le Béton de Poudre Réactive, le superplastifiant constitue un adjuvant fondamental pour garantir une mise en œuvre efficace malgré un rapport eau/ciment extrêmement faible. Sanjuán & Andrade (2021) précisent qu'un superplastifiant bien sélectionné permet non seulement une réduction significative du rapport eau/ciment, mais aussi une amélioration notable de la maniabilité du mélange. Il permet d'obtenir une pâte homogène et fluide, essentielle pour la compacité et la densité du matériau final. La teneur en superplastifiant varie entre 13 et 18 kg/m^3 , selon la formulation choisie. Ce dosage optimisé contribue directement à l'excellente ouvrabilité du

mélange tout en maintenant des performances mécaniques élevées, signature des bétons à très haute performance (Sanjuán, M. Á. & Andrade, C., 2021).

1.4.5. Fibres métalliques

Les fibres métalliques jouent un rôle structurant essentiel dans le Béton de Poudre Réactive, en renforçant sa capacité à résister aux efforts de traction, en limitant la fissuration, et en améliorant sa ténacité globale. Sanjuán & Andrade (2021) soulignent que l'incorporation de fibres en acier est indispensable pour exploiter pleinement le potentiel mécanique du BPR, notamment en ce qui concerne la résistance à la flexion et à la traction. Les fibres utilisées sont des fibres métalliques courtes et droites, ils agissent comme des ponts internes au sein du béton, retardant la propagation des fissures et conférant au matériau un comportement ductile, même après l'apparition de fissures initiales. Leur présence renforce également la résistance à l'impact, à la fatigue et améliore la durabilité face aux sollicitations mécaniques répétées, ce qui rend le BPR particulièrement adapté aux ouvrages soumis à des charges extrêmes ou dynamiques (Sanjuán, M. Á. & Andrade, C., 2021).

1.4.6. Ajouts cimentaires

a. Quartz broyé

Le quartz broyé agit principalement comme charge inertielle ultrafine dans le BPR. Bien qu'elle ne soit pas réactive chimiquement, il participe à la densification du squelette granulaire, ce qui permet de réduire les vides capillaires et d'optimiser la compacité. Selon Ge et al. (2023), son incorporation améliore la distribution granulométrique globale du mélange et permet d'obtenir une microstructure très homogène. La présence du quartz broyé dans les formulations de BPR contribue donc indirectement à l'augmentation de la durabilité, tout en servant de support solide à la matrice cimentaire réactive (Ge et al., 2022).

b. Fumée de silice

La fumée de silice est l'ajout cimentaire le plus influent dans la formulation du BPR. Son extrême finesse, sa surface spécifique extrêmement élevée (20 000 m²/kg), et sa très forte réactivité pouzzolanique lui permettent de remplir efficacement les vides interstitiels entre les particules de ciment, ce qui améliore considérablement la compacité de la matrice. D'après Ge et al. (2023), l'introduction de fumée de silice permet non seulement de réduire la porosité et la perméabilité, mais aussi de renforcer la résistance à la compression et à la flexion. En réagissant avec l'hydroxyde de calcium formé lors de l'hydratation du ciment, elle favorise la production secondaire de C-S-H, élément central de la résistance mécanique (Ge et al., 2022).

c. Laitier broyé

Le laitier de haut fourneau est un ajout cimentaire à réactivité latente, activée dans les milieux hautement alcalins comme celui du BPR. Son utilisation dans la formulation permet d'améliorer la durabilité globale, notamment en ce qui concerne la résistance aux agents chimiques agressifs tels que les chlorures et les sulfates. Il agit également comme un composant secondaire pouzzolanique, renforçant la densité du C-S-H formé. Sa contribution est particulièrement bénéfique dans les environnements marins ou exposés à de fortes variations climatiques, où la durabilité à long terme est cruciale (Ge et al., 2022).

d. Cendres volantes

Les cendres volantes sont souvent utilisées comme ajout secondaire dans les formulations de BPR à visée durable. Elles possèdent une réactivité pouzzolanique plus lente que la fumée de silice, mais leur effet est particulièrement notable sur le long terme. Ge et al. (2023) ont montré que l'ajout de cendres volantes permet de réduire l'absorption capillaire et l'indice de sorption, tout en maintenant des résistances mécaniques satisfaisantes. Elles contribuent également à une meilleure ouvrabilité du béton frais, ce qui facilite la mise en œuvre. Elles permettent aussi de réduire l'empreinte carbone du BPR, ce qui s'inscrit pleinement dans une démarche de construction durable (Ge et al., 2022).

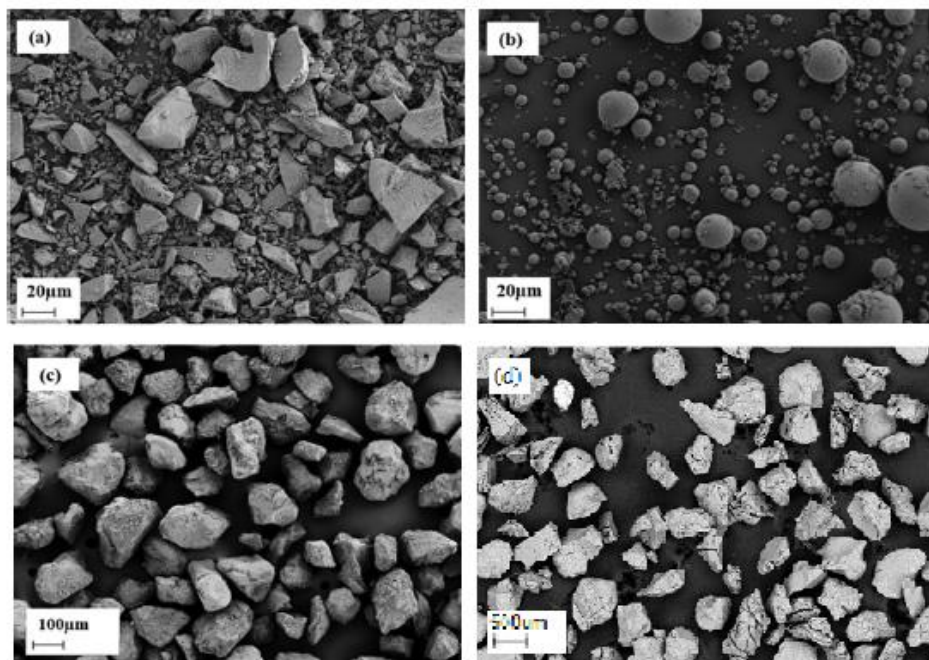


Figure 1.4 : Microstructure de (a) laitier broyé, (b) cendres volantes, (c) fumée de silice et (d) quartz broyé (Porat N. et al., 2015) (Chougan M. et al., 2020)

Outre les ajouts cimentaires classiques (fumée de silice, cendres volantes, laitier ou quartz broyé), d'autres matériaux peuvent être intégrés dans la formulation des BPR afin d'améliorer leurs performances ou de limiter leur impact environnemental. Parmi ces alternatives, on peut citer le métakaolin et l'argile calcinée, reconnus pour leur activité pouzzolanique et leur capacité à affiner la microstructure. Les cendres volcaniques naturelles présentent également un potentiel réactif intéressant, tandis que des ajouts inertes comme le calcaire finement broyé ou la poudre de marbre peuvent améliorer la compacité granulaire à moindre coût. Dans le cadre de notre travail, nous allons étudier la poudre de verre comme ajout cimentaire, dans une logique de valorisation de déchets, d'amélioration de la durabilité du BPR, et aussi de réduction du coût global du matériau.

1.5. Méthodes de formation du Béton à Poudre Réactive (BPR)

La formulation du Béton à Poudre Réactive (BPR) ne suit pas une méthode unique et universelle. En effet, plusieurs approches peuvent être adoptées selon les objectifs visés, les matériaux disponibles, ou encore les contraintes spécifiques d'un projet. Ces méthodes varient entre l'optimisation théorique de la compacité, les essais expérimentaux empiriques, ou encore des formulations adaptées à des procédés de mise en œuvre. Chacune de ces approches vise à atteindre les performances élevées caractéristiques du BPR en termes de résistance, durabilité et densité microstructurale.

1.5.1. Formulation par optimisation granulométrique

La méthode d'optimisation granulométrique consiste à ajuster la distribution des particules solides dans le mélange de BPR afin d'obtenir une compacité maximale et une microstructure extrêmement dense. Cette approche repose sur des modèles mathématiques de *packing*, comme le modèle d'Andreasen et Andersen, qui permet de concevoir une courbe granulométrique continue allant des particules les plus fines (fumée de silice) aux plus grossières (poudre de quartz). Dans leur étude, Peng et al. (2020) ont utilisé ce modèle pour formuler un BPR incorporant du laitier phosphoreux, et ont optimisé la composition du mélange en quatre étapes grâce à des outils numériques (Excel Solver et MATLAB). Cette optimisation a permis d'obtenir un béton aux performances exceptionnelles, atteignant plus de 180 MPa en compression et une excellente durabilité. La compacité ainsi obtenue réduit considérablement la porosité, améliore la résistance mécanique et diminue la quantité d'eau nécessaire à l'hydratation, rendant le matériau plus durable et performant, sans recours à un dosage excessif en ciment (Peng Y. et al., 2020).

1.5.2. Formulation expérimentale par essais itératifs

La méthode expérimentale par essais itératifs s'appuie sur une démarche pratique et progressive pour déterminer la composition optimale du BPR. Dans l'étude menée par Sarika S. et John E. (2015), treize mélanges différents de béton poudre réactive ont été élaborés successivement en ajustant les proportions de ciment, de fumée de silice, de granulats et d'adjuvants, jusqu'à obtenir la composition la plus performante. Les performances en termes de fluidité et de résistance en compression ont été évaluées à chaque itération. Ce procédé permet d'identifier empiriquement le dosage le plus ajusté pour atteindre des critères de maniabilité et de robustesse. L'avantage de cette approche est sa réactivité face aux résultats concrets : on ajuste les proportions de manière ciblée à chaque essai en fonction des écarts par rapport aux objectifs, ce qui aboutit à une formulation optimisée sans nécessiter de modèle théorique complexe (Sarika S. & John E., 2015).

1.5.3. Formulation basée sur la rhéologie

La méthode de formulation basée sur la rhéologie consiste à adapter le mélange du BPR pour qu'il soit facile à manipuler à l'état frais, tout en gardant ses hautes performances. Elle permet de contrôler la fluidité, la viscosité et la stabilité du béton avant qu'il ne durcisse. D'après Grzeszczyk (2024), l'ajout de poudres très fines comme la fumée de silice ou le quartz broyé, combiné à un superplastifiant, aide à obtenir un béton fluide mais dense, même avec très peu d'eau. Pour cela, on réalise des tests avec des appareils spéciaux (appelés rhéomètres) qui mesurent à quel point le béton commence à couler, à quelle vitesse il s'écoule, et comment il réagit quand on le met en mouvement.

L'auteur recommande de mélanger les composants par étapes, en respectant un ordre précis (poudres, puis eau, puis superplastifiant), pour bien disperser les particules et éviter les défauts comme l'affaissement ou la séparation des matériaux. L'objectif est d'obtenir un béton fluide lors de sa mise en œuvre, mais stable quand il est au repos, avec une structure très compacte. Cette méthode est essentielle pour les usages où le béton doit avoir un comportement parfaitement maîtrisé à l'état frais, comme le béton autoplaçant ou l'impression 3D (Grzeszczyk S., 2024).

1.5.4. Formulation combinée : méthode hybride

La formulation hybride du BPR repose sur l'association de méthodes analytiques et d'intelligence artificielle pour optimiser plusieurs propriétés du béton en même temps. Dans leur étude, Chen et al. (2023) ont développé une approche innovante combinant un réseau de neurones artificiels (ANN) et un algorithme génétique (GA) afin de prédire et d'optimiser la composition du béton de manière efficace. Le réseau de neurones apprend à partir d'une base de données expérimentale (compositions, résistances, coûts, etc.), tandis que l'algorithme génétique explore automatiquement différentes combinaisons possibles pour trouver celle qui offre le meilleur équilibre entre performance mécanique et coût économique. Grâce à cette méthode, les auteurs ont obtenu des modèles très fiables (avec un coefficient de corrélation R^2 supérieur à 0,95), capables de réduire les erreurs de prédiction et d'éliminer le besoin de nombreux essais expérimentaux. Cette approche est particulièrement adaptée aux formulations complexes comme le BPR, où il est crucial de concilier résistance, durabilité, maniabilité et rentabilité (Chen F. et al., 2023).

1.5.5. Optimisation statistique : réponse de surface (RSM)

La méthode de la surface de réponse (RSM) est une technique de plan d'expériences visant à optimiser une formulation de béton en analysant l'influence simultanée de plusieurs paramètres sur les performances visées. Dans l'étude de Bektimirova et al. (2019), neuf formulations de RPC destinées à des pieux de stockage d'énergie ont été élaborées, faisant varier deux variables : la teneur en fumée de silice (SF) et le rapport eau/liant (w/b). Un plan d'expérience de type Central Composite Design a été employé pour construire un modèle prédictif de la résistance à la compression. Les résultats ont permis d'identifier que la combinaison optimale est obtenue pour environ 20,5 % de fumée de silice et un rapport w/b de 0,20, permettant d'atteindre la résistance maximale mesurée. Cette approche statistique a permis de réduire le nombre d'essais, tout en offrant un moyen rigoureux et précis pour ajuster la formulation du BPR, en alliant efficacité technique, gain de temps et optimisation économique. (Bektimirova U. et al., 2019).

1.6. Avantages et inconvénients du BPR

1.6.1. Avantages du Béton à Poudres Réactives (BPR)

Le Béton à Poudres Réactives présente de nombreux atouts, notamment :

- Très haute résistance mécanique : atteignant jusqu'à 200 MPa en compression, bien supérieure aux bétons traditionnels.
- Excellente durabilité : sa porosité très faible le rend quasiment imperméable aux agents agressifs (chlorures, sulfates, cycles gel/dégel).
- Ductilité améliorée : grâce à l'incorporation de fibres métalliques, le BPR résiste mieux à la fissuration fragile.
- Esthétique soignée : sa finesse permet des finitions lisses et un rendu architectural élégant.
- Longévité : sa stabilité dans le temps réduit considérablement les besoins en maintenance.
- Fabrication sans granulats grossiers : ce qui facilite sa mise en œuvre dans des structures de géométrie complexe ou très fine.
- Compatibilité avec la préfabrication : le BPR est particulièrement adapté aux éléments préfabriqués de haute précision et de grande qualité.
- Optimisation des ressources : la possibilité d'intégrer des ajouts issus de déchets industriels (verre, laitier, cendres...) améliore son bilan environnemental.
- Réduction de l'empreinte carbone par durabilité accrue : même si sa fabrication est énergivore, sa très longue durée de vie peut compenser cet impact initial.

1.6.2. Limitations du Béton à Poudres Réactives (BPR)

Malgré ses performances exceptionnelles, le BPR présente certaines limitations qu'il est important de prendre en compte :

- Peu de retour d'expérience à grande échelle : son utilisation reste encore limitée dans certaines régions ou types de projets.
- Coût élevé : les matériaux utilisés (fumée de silice, superplastifiants, fibres métalliques) sont plus chers que ceux des bétons ordinaires, ce qui augmente le coût global.
- Mise en œuvre exigeante : sa formulation nécessite un dosage très précis et un malaxage rigoureux ; une erreur peut fortement dégrader les performances finales.
- Retrait autogène important : dû à la très faible quantité d'eau, le BPR peut présenter un retrait élevé au jeune âge, nécessitant des cures soigneuses.
- Peu adapté au coulage sur chantier : il est plus souvent utilisé en préfabrication en raison de la complexité de mise en œuvre in situ.

1.7. Le BPR mis en œuvre : ouvrages de référence

1.7.1. Passerelle piétonne de Sherbrooke (Canada, 1997)

Construite en 1997 au Québec par Bouygues Travaux Publics, en collaboration avec Lafarge (RPC Ductal), la passerelle piétonne de Sherbrooke constitue le premier ouvrage au monde réalisé en Béton de Poudre Réactive. D'une longueur de 60 mètres, elle est composée de six dalles minces préfabriquées de seulement 30 mm d'épaisseur, affichant une résistance à la compression pouvant atteindre 200 MPa (Lafarge North America, 2009).



Figure 1.5: Passerelle piétonne de Sherbrooke (Canada, 1997)

1.7.2. Pont de Saint-Pierre-la-Cour (France, 2001)

Réalisé en 2001 dans le cadre de la modernisation du réseau ferroviaire français, le pont de Saint-Pierre-la-Cour constitue l'un des premiers exemples d'application structurelle du Béton de Poudre Réactive en France. L'ouvrage repose sur dix poutres préfabriquées en RPC précontraint, conçues pour franchir une voie ferrée (AFGC, 2009).



Figure 1.6: Pont de Saint-Pierre-la-Cour (France, 2001)

1.7.3. Mars Hill Bridge (États-Unis, 2006)

Construit en 2006 par Lafarge North America, le pont de Mars Hill est le premier pont routier aux États-Unis à intégrer le Béton de Poudre Réactive, marquant ainsi son introduction dans le domaine des infrastructures publiques américaines. L'utilisation de dalles préfabriquées en BPR a permis une réduction significative des délais de construction tout en assurant une durabilité remarquable (Lafarge North America, 2009).



Figure 1.7: Mars Hill Bridge (États-Unis, 2006)

1.7.4. Voie ferrée Qinghai-Tibet (Chine, 2006)

Ouverte en 2006, la ligne ferroviaire Qinghai-Tibet relie Golmud à Lhasa sur une distance de 1 956 km, traversant le plateau tibétain à plus de 4 000 mètres d'altitude. Réalisé entre 2001 et 2006 par China Railway Qingzang Group, ce projet constitue la ligne ferroviaire la plus haute du monde. Le Béton de Poudre Réactive y a été employé pour la construction

CHAPITRE 1 : Béton à Poudre réactive (BPR)

de ponts ferroviaires, de tabliers et de fondations soumis à des conditions climatiques extrêmes, telles que les cycles gel-dégel, les variations thermiques intenses et la faible pression atmosphérique (Qing-Zang Railway Company, 2018)



Figure 1.8: Voie ferrée Qinghai-Tibet (Chine, 2006)

1.7.5. Pulaski Skyway – Réhabilitation (États-Unis, 2014–2016)

Le Pulaski Skyway est un viaduc routier emblématique de près de 5 kilomètres, reliant Newark à Jersey City, dans l'État du New Jersey. Construit dans les années 1930, cet ouvrage a fait l'objet d'une réhabilitation entre 2014 et 2016, au cours de laquelle le Béton de Poudre Réactive a été utilisé pour renforcer le tablier sans avoir à remplacer l'ensemble de la structure. Grâce à ses propriétés mécaniques élevées et à son excellente capacité d'adhésion aux matériaux existants, le BPR a permis une mise en œuvre rapide et durable, tout en garantissant une compatibilité parfaite avec les éléments anciens. Cette intervention a permis d'assurer une durabilité estimée à plus de 75 ans (Foden A. J. & McDonagh M. D., 2016).



Figure 1.9: Pulaski Skyway – Réhabilitation (États-Unis, 2014–2016)

1.7.6. Djamaâ El Djazaïr (Algérie, 2019)

Inaugurée en 2019, la Grande Mosquée d'Alger (Djamaa el Djazaïr) constitue le troisième plus grand complexe religieux au monde et abrite le minaret le plus haut jamais construit, culminant à 265 mètres. Réalisée par Bouygues Travaux Publics en collaboration avec Lafarge (RPC Ductal), cette structure prestigieuse intègre plus de 23 000 m² de panneaux en Béton de Poudre Réactive

préfabriqué, utilisés pour les façades, la coupole, les corniches et d'autres éléments architecturaux. Le choix du BPR s'est imposé pour sa durabilité en milieu marin, sa légèreté (environ 65 kg/m²), ainsi que pour la qualité esthétique (Ductal by Holcim).

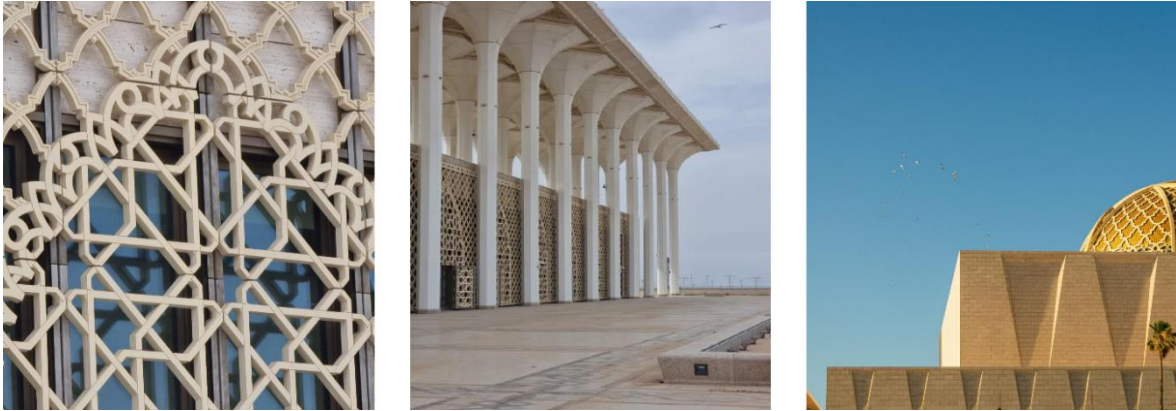


Figure 1.10: Djamaâ El Djazaïr (Algérie, 2019)

1.8. Vers un BPR plus durable : enjeux et pistes d'amélioration

Dans le cadre de notre projet de fin d'études, nous avons choisi d'explorer des formulations de Béton à Poudre Réactive (BPR) intégrant de la poudre de verre comme ajout cimentaire. Concrètement, une partie du ciment est remplacée par cette poudre issue du recyclage de déchets de verre. Ce choix s'inscrit dans une démarche à la fois écologique, visant à réduire l'empreinte carbone liée à la production du ciment, et scientifique, cherchant à exploiter le potentiel pouzzolanique du verre finement broyé. À cela s'ajoute une dimension économique non négligeable : en valorisant un déchet abondant et peu coûteux, cette approche permet de réduire le coût global du matériau, souvent pointé comme une limite du BPR. Au fil des chapitres suivants, nous analyserons en détail l'impact de cette substitution sur les performances du BPR, à la fois mécaniques (résistance à la compression et à la flexion), physiques (porosité, absorption, perméabilité) et durables (perméabilité et résistance aux agents agressifs). La durabilité du matériau restera le fil conducteur de notre démarche expérimentale, avec pour objectif de proposer un BPR performant, plus respectueux de l'environnement et économiquement plus viable.

1.9. Conclusion

Le Béton à Poudre Réactive (BPR) s'affirme comme une solution innovante et performante dans le domaine des matériaux de construction. Grâce à sa composition optimisée et à sa microstructure dense, il offre des performances mécaniques et une durabilité nettement supérieure à celles des bétons ordinaires et à hautes performances. Ses propriétés exceptionnelles en font un matériau privilégié pour des applications structurelles soumises à des conditions extrêmes, telles que les environnements marins ou les zones exposées à des agents chimiques agressifs, notamment les ions chlorures et sulfates.

Dans le cadre de ce travail, nous allons explorer une voie de formulation alternative visant à intégrer de la poudre de verre recyclée comme substitut cimentaire. Cette approche s'inscrit dans une logique de valorisation de déchets, de réduction de l'empreinte carbone et de maîtrise des coûts de production.

Bien que le BPR reste aujourd'hui limité par son coût élevé et exigences précises liées à sa mise en œuvre, l'introduction de matériaux alternatifs et recyclés permettrait de réduire son coût et de favoriser une utilisation plus large du BPR. Avec des choix de formulation plus responsables, le BPR a le potentiel de dépasser ses limites actuelles et de devenir une solution fiable pour des infrastructures durables, résistantes et adaptées aux enjeux climatiques et techniques d'aujourd'hui.

CHAPITRE 2 :

Les Déchets de Verre et la Poudre de Verre

2.1. Introduction

Dans un contexte mondial où la gestion des déchets et la préservation des ressources naturelles sont devenues des enjeux majeurs, le recyclage des matériaux représente une solution stratégique pour un développement durable. Parmi ces matériaux, le verre occupe une place particulière en raison de sa nature inerte, de sa recyclabilité quasi infinie et de son abondance en tant que déchet, notamment dans les secteurs domestique, industriel et du bâtiment.

En Algérie, selon les données de l'étude menée sur la composition moyenne des déchets ménagers assimilés DMA durant les quatre saisons de 2018/2019 (National Waste Agency, 2020), le verre représente 1,04 % des déchets générés. Bien que ce pourcentage semble modeste, il traduit tout de même une quantité importante à l'échelle nationale, souvent non valorisée. Cela souligne la nécessité d'une meilleure gestion et réutilisation de ce matériau, en particulier dans le secteur de la construction.

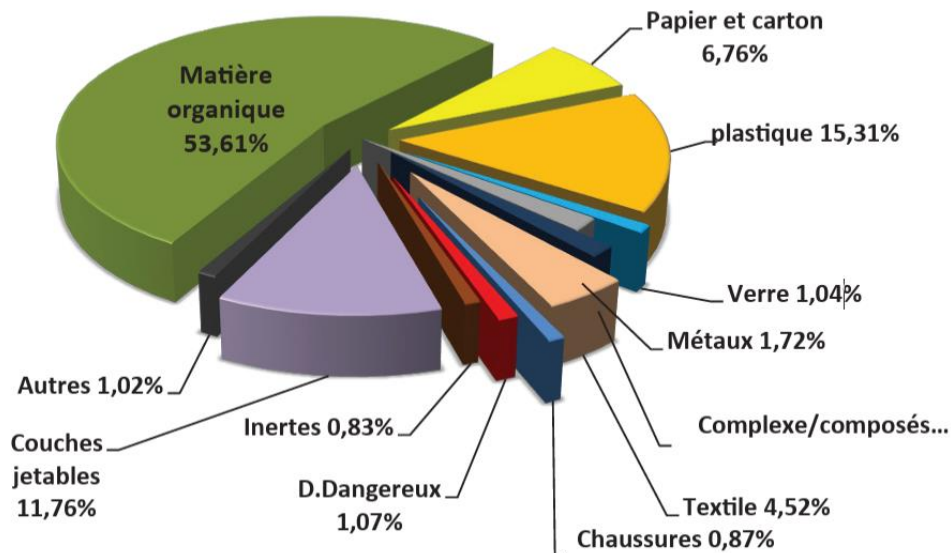


Figure 2.1: Composition moyenne des déchets ménagers et assimilés DMA 4 saisons Algérie- 2018/2019 (National Waste Agency, 2020)

Toutefois, une part significative du verre usagé n'est pas valorisée et finit enfouie ou rejetée dans l'environnement, constituant une perte économique et écologique. Face à cela, la valorisation des déchets de verre, notamment sous forme de poudre fine, émerge comme une alternative prometteuse dans le domaine de la construction, en particulier pour la substitution partielle du ciment dans les bétons. Cette démarche s'inscrit pleinement dans la logique d'un béton plus durable. Grâce à sa teneur élevée en silice amorphe (SiO_2), la poudre de verre, une fois finement broyée, peut développer une activité pouzzolanique notable. Plusieurs études ont démontré sa capacité à améliorer la microstructure des bétons, à réduire leur porosité et, dans certains cas, à renforcer leur durabilité.

Ce chapitre se propose donc d'examiner la nature des déchets de verre, leurs principales caractéristiques physico-chimiques, ainsi que les méthodes de traitement et de valorisation permettant leur intégration dans les matrices cimentaires. L'objectif est de mettre en lumière le potentiel de cette ressource encore sous-exploitée, tout en identifiant les contraintes techniques et les perspectives d'application dans le contexte algérien.

2.2. Nature et caractéristiques des déchets de verre

2.2.1. Origine des déchets de verre

Les déchets de verre utilisés dans les applications de génie civil proviennent principalement de deux sources distinctes :

a. Déchets de verre ménager

Les déchets de verre ménager englobent les résidus issus de la consommation domestique, tels que les bouteilles, bocaux et autres contenants en verre. Ces déchets sont généralement collectés via des systèmes de tri sélectif et peuvent être recyclés pour produire de nouveaux emballages en verre.



Figure 2.2: Déchets de verre ménager

b. Déchets de verre industriel

Les déchets de verre industriel proviennent de sources telles que les vitrages automobiles, les vitres d'immeubles, les miroirs et les écrans d'appareils électroniques. Ces verres peuvent contenir des additifs ou subir des traitements spécifiques, ce qui peut compliquer leur recyclage. Toutefois, après un traitement approprié, ils peuvent être broyés et utilisés comme ajout cimentaire.



Figure 2.3: Déchets de verre industriel

2.2.2. Composition chimique du verre

Le verre est un matériau amorphe principalement composé de silice (SiO_2), qui constitue la base du réseau vitreux. À cette structure s'ajoutent généralement des oxydes de sodium (Na_2O), de calcium (CaO), de magnésium (MgO), d'aluminium (Al_2O_3), et parfois de potassium (K_2O), en proportions variables selon la nature et l'origine du verre (Bouchikhi, 2020).

Le tableau ci-dessous illustre les compositions chimiques typiques de différents types de verre industriel, mettant en évidence la variation des teneurs en oxydes en fonction du type de verre.

Tableau 2.1: Composition de verre industriel (%en poids) (Bourahla I. & Bechar C., 2024)

Oxydes	Verre sodocalcique	Verre borosilicate	Verre vitrocéramique
SiO_2	69 - 74	70 - 87	50 - 80
CaO	5 - 12	-	0 - 8
MgO	0 - 6	0 - 8	0 - 8
BaO	-	-	0 - 8
B_2O_3	-	7 - 15	-
Li_2O	0 - 3	0 - 8	0 - 5
Al_2O_3	0 - 3	0 - 8	15 - 29
Na_2O	12 - 16	0 - 8	0 - 2
K_2O	0 - 1	-	0 - 2

CHAPITRE 2 : Les déchets de Verre et la Poudre de Verre

La teneur élevée en silice, souvent supérieure à 60 %, confère au verre une stabilité chimique importante, mais aussi un potentiel pouzzolanique notable lorsqu'il est finement broyé. En effet, sa structure désordonnée (non cristalline) favorise une bonne réactivité chimique en milieu alcalin, notamment lorsqu'il est introduit comme ajout cimentaire dans les liants hydrauliques.

Cette réactivité dépend de plusieurs facteurs, notamment :

- La finesse de broyage,
- La surface spécifique obtenue,
- La composition chimique détaillée du verre.

Une fois réduit en poudre, le verre amorphe riche en silice réactive (SiO_2) entre en réaction avec la portlandite (Ca(OH)_2), produite lors de l'hydratation du ciment. Cette réaction pouzzolanique conduit à la formation de produits secondaires, essentiellement des gels C-S-H (silicate de calcium hydraté), qui densifient la matrice cimentaire, réduisent la porosité et améliorent la durabilité globale du béton (Bouchikhi, 2020).

Afin de mieux situer le verre par rapport aux autres matériaux pouzzolaniques, on peut se référer au diagramme de Keil-Rankine, qui classe les matériaux selon leur composition minéralogique de base. Ce diagramme montre clairement que le verre se positionne dans la zone des matériaux riches en silice, ce qui justifie pleinement son intérêt comme ajout réactif dans des matrices cimentaires (Bouchikhi, 2020).

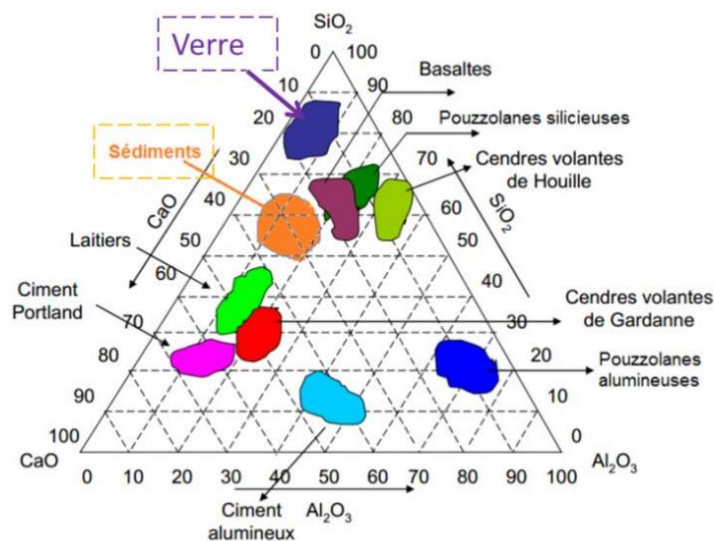


Figure 2.4: Classification des sédiments et du verre du point de vue de leur composition minéralogique de base dans le diagramme de Keil-Rankine (Bouchikhi, 2020)

2.3. Poudre de verre

2.3.1. Procédé de fabrication

La fabrication de la poudre de verre destinée à des applications cimentaires suit un processus rigoureux comprenant plusieurs étapes :

Collecte : Les déchets de verre sont récupérés à partir de diverses sources, notamment les emballages ménagers, les vitrages industriels et les équipements électroniques.

Tri : Les matériaux sont triés pour éliminer les impuretés telles que les métaux, les plastiques et les céramiques. Ce tri peut être effectué manuellement ou à l'aide de technologies avancées comme la séparation magnétique et la détection optique.

Broyage : Le verre est broyé pour obtenir des particules de taille réduite.

Tamisage : Les particules broyées sont tamisées pour atteindre la granulométrie souhaitée, généralement inférieure à 38 μm , afin d'assurer une réactivité pouzzolanique optimale (Leghreib, M. N. E. & Tamaoust, A., 2015).

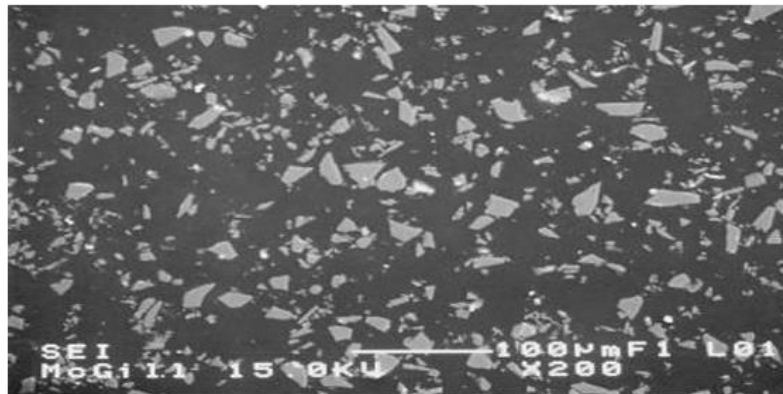


Figure 2.5 : Forme et taille de la particule de verre à 38 μm (Shao & al, 2000).

2.3.2. Granulométrie et forme des particules

La granulométrie et la morphologie des particules de poudre de verre jouent un rôle déterminant dans sa réactivité pouzzolanique. Des particules suffisamment fines, proches de la taille des grains de ciment, offrent une surface spécifique élevée, ce qui favorise les réactions avec la portlandite (Ca(OH)_2) pour former des gels C-S-H, contribuant ainsi à l'amélioration de la microstructure du béton (Idir, 2009).

En effet, plusieurs études ont mis en évidence l'influence directe de la taille des particules sur le développement de la RAS. L'expansion induite par cette réaction augmente généralement avec le diamètre des grains de verre. Une taille critique, dite "pessimum", correspond à la granulométrie pour laquelle l'expansion est maximale. Cette valeur varie selon les conditions expérimentales et les caractéristiques du verre, mais elle se situe généralement entre 0,25 mm et 2,36 mm (Jin & Coll, 2000) (Xie & Coll, 2003) (Yamada & Coll, 2005).

La maîtrise de la granulométrie est donc essentielle pour trouver un équilibre entre réactivité pouzzolanique et stabilité dimensionnelle du béton. Une réduction progressive de la taille du pessimum a également été observée au cours du temps : l'étude de Meyer et Coll (1997) a montré que cette taille passe de 300 μm à 75 μm entre 4 et 14 jours d'hydratation, soulignant l'importance d'un contrôle précis de la finesse dès la formulation (Meyer & Coll, 1997).

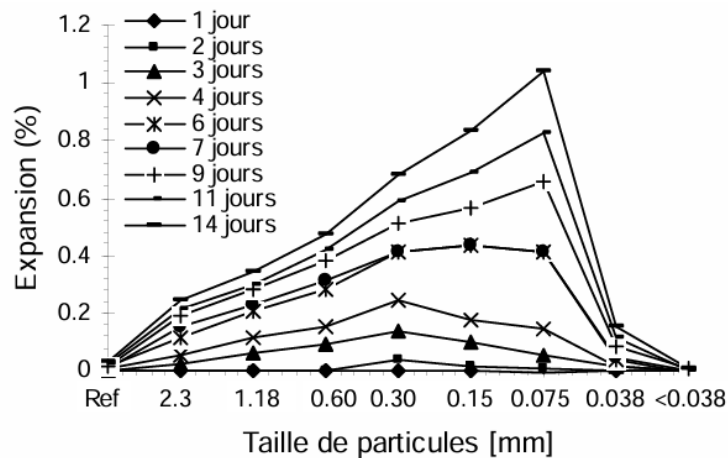


Figure 2.6: Expansion dans le temps d'éprouvettes de mortiers en fonction du diamètre des grains de verre (Meyer & Coll, 1997)

2.3.3. Propriétés chimiques et physiques

a. Stabilité chimique

La stabilité chimique de la poudre de verre dépend de sa composition et de sa finesse. Une poudre de verre bien préparée présente une bonne stabilité, réduisant les risques de réactions indésirables telles que la RAS (Idir, 2009).

Parmi les composants influents, l'oxyde de fer (Fe_2O_3) joue un rôle notable. Meyer et Coll ont démontré qu'une teneur plus élevée en Fe_2O_3 améliore significativement la stabilité du verre (Meyer & Coll, 1997). Dans leur étude, deux échantillons de verre ont été comparés : l'un contenant 2 % de Fe_2O_3 et l'autre 0,05 %. Les résultats ont montré une réduction de 85 % de l'expansion lorsque la teneur en Fe_2O_3 est passée de 0,05 % à 2 %, soulignant l'effet bénéfique de cet oxyde sur la limitation des réactions expansives.

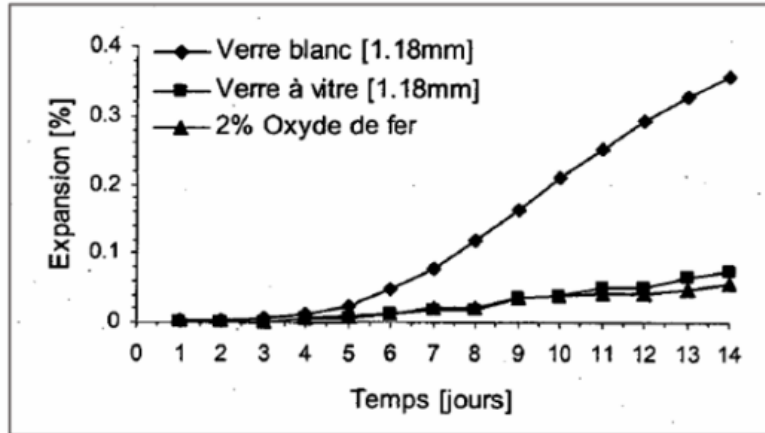


Figure 2.7: Résultats d'essai d'expansion sur éprouvettes de mortiers avec du verre (Meyer & Coll, 1997)

b. Couleur, finesse et activité pouzzolanique

• Effet de la couleur sur la réactivité

La couleur du verre varie selon sa source (transparent, vert, brun, etc.) et influence sa réactivité pouzzolanique. Des études telles que celles de Du & Tan (2014) ont montré que le verre vert présente une meilleure réactivité que le verre transparent ou brun. Cela serait lié à la présence de certains oxydes métalliques colorants (comme Fe_2O_3 ou Cr_2O_3) qui peuvent jouer un rôle dans les réactions pouzzolaniques (Du, H. & Tan, K. H., 2014).

Par ailleurs, la couleur du verre semble aussi impacter la microfissuration du béton :

- Le verre transparent est souvent associé à une formation accrue de microfissures.
- Le verre vert en génère moins.
- Le verre brun montre une très faible microfissuration (Du, H. & Tan, K. H., 2014).

Ces résultats suggèrent que le choix du type de verre (et donc sa couleur) peut contribuer à améliorer la durabilité du béton et limiter les risques de fissuration prématurée.

En outre, le pessimum, c'est-à-dire la taille critique des particules de verre à partir de laquelle les réactions alcali-silice (RAS) deviennent les plus agressives, dépend non seulement de la granulométrie, mais également de la couleur et du type de verre. D'après les travaux de Jin et coll. (2000) et Yamada et coll (2005), la couleur du verre influence fortement la taille de ce pessimum : elle passe de 600 μm pour le verre brun et blanc à 1,18 mm pour le verre vert, comme illustré dans la figure ci-dessous (Jin & Coll, 2000) (Yamada & Coll, 2005).

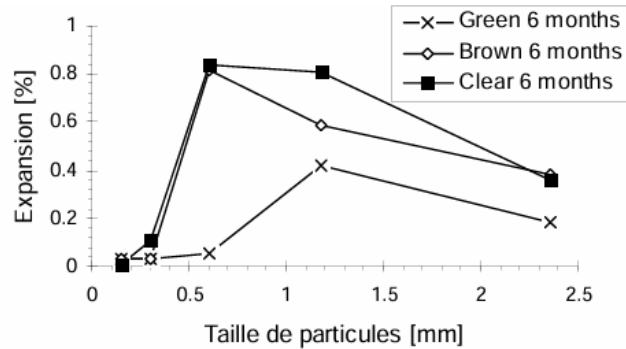


Figure 2.8: Expansion des éprouvettes de mortiers avec des verres différentes couleurs (Yamada & Coll, 2005)

• Effet de la finesse des particules sur l'activité pouzzolanique

La poudre de verre, riche en silice amorphe, présente un bon potentiel pouzzolanique. Toutefois, cette réactivité est généralement faible à jeune âge : elle libère peu d'ions sodium (Na^+) dans la solution, ce qui ralentit certaines réactions précoces, comme la formation d'ettringite, souvent associée au développement initial de la résistance mécanique. En conséquence, le béton contenant de la poudre de verre affiche des résistances relativement faibles avant 28 jours (Leghreib, M. N. E. & Tamaoust, A., 2015).

Après 28 jours, la résistance mécanique augmente de manière significative. Ce gain est principalement lié à la substitution progressive des ions calcium (Ca^{2+}) par les ions sodium (Na^+) dans la formation des gels C-S-H, renforçant ainsi la matrice cimentaire.

La finesse des particules influence fortement la nature de leur comportement dans le béton. Les grains de verre de grande taille, assimilés à des granulats, peuvent provoquer des réactions alcali-silice (RAS), susceptibles d'entraîner des fissurations internes et une dégradation progressive du matériau. Ces réactions se manifestent généralement au niveau des frontières des particules.

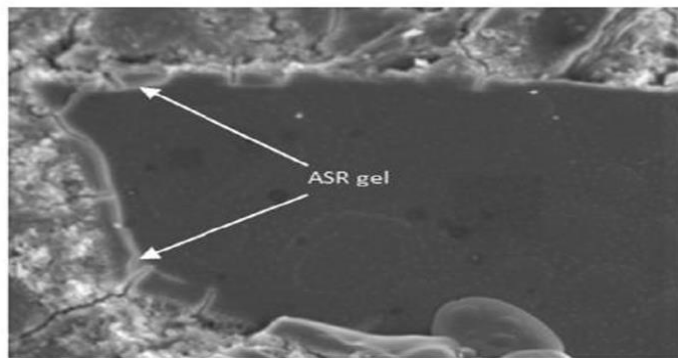


Figure 2.9: Image MEB d'une particule de verre montrant une formation RAS dans la frontière de la particule (Cyr, M. et al., 2012)

En revanche, lorsque le verre est broyé à une taille suffisamment fine, il adopte un comportement pouzzolanique bénéfique. Sa dissolution en milieu alcalin est alors facilitée, ce qui favorise sa réaction avec la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Cette interaction produit des gels C-S-H secondaires, qui améliorent à la fois la résistance mécanique et la durabilité du béton.

Ce double comportement, réaction pouzzolanique bénéfique en surface, mais risque d'expansion pathologique au cœur, a été bien mis en évidence par l'analyse microscopique.

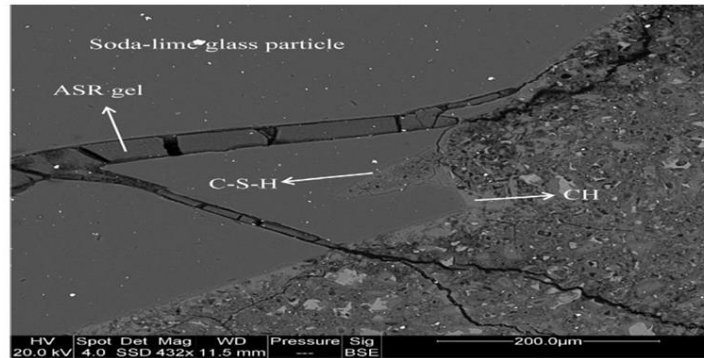


Figure 2.10: Réaction Alkali-Silice se produisant à l'intérieur d'une particule de verre sodocalcique, tandis que la surface des particules est soumise à une réaction pouzzolanique (Leghreib, M. N. E. & Tamaoust, A., 2015)

2.4. Valorisation de la poudre de verre dans les matériaux de construction

L'utilisation de la poudre de verre dans les matériaux cimentaires représente une solution innovante à la fois sur le plan écologique et économique. En substituant partiellement le ciment, cette pratique contribue à une construction plus durable et respectueuse de l'environnement tout en réduisant les coûts liés aux matériaux.

2.4.1. Intérêt environnemental

a. Réduction des déchets en décharge

Le verre constitue une part importante des déchets solides urbains, notamment dans les pays développés. Environ 7 à 10 % des déchets ménagers sont constitués de verre, dont une grande partie n'est pas recyclée efficacement. La valorisation de ces déchets sous forme de poudre dans les matériaux de construction permet de limiter leur accumulation en décharge, tout en réduisant les nuisances environnementales liées à leur inertie chimique (Shao & al, 2000).

b. Diminution des émissions liées au ciment

La production du ciment Portland est très énergivore et émet environ 0,8 tonne de CO₂ par tonne de ciment produite (Torres-Carrasco, M. & Puertas, F., 2015). En remplaçant une partie du ciment par de la poudre de verre (jusqu'à 30 % dans certains cas), on observe une réduction significative des émissions de gaz à effet de serre.

Des études ont montré que cette substitution permet non seulement de réduire les émissions de CO₂, mais également de limiter la consommation de combustibles fossiles et de matières premières vierges (calcaire, argile, etc.).

Cette problématique est d'autant plus critique que le ciment est aujourd'hui produit à très grande échelle, car il est indispensable à la formulation du béton, considéré comme le matériau artificiel le plus utilisé au monde en raison de ses propriétés hautement durables, flexibles et fiables, mais aussi grâce à son coût relativement faible.

La demande mondiale en béton ne cesse de croître, entraînant ainsi une hausse continue de la production de ciment et, par conséquent, de son empreinte environnementale. (Figure 2.11)

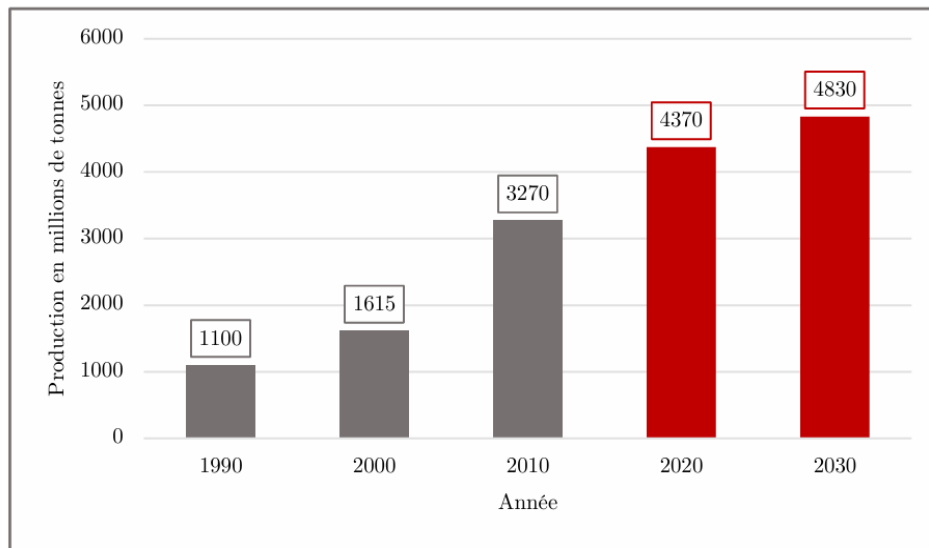


Figure 2.11: Production globale de ciment en millions de tonnes de 1990 à 2020 avec des projections pour 2030 (John E. et al., 2018)

2.4.2. Comme Ajout Cimentaire (Poudre de Verre)

La poudre de verre est aujourd'hui reconnue comme un ajout cimentaire innovant, écologique et prometteur, grâce à sa forte teneur en silice amorphe. Cette caractéristique lui confère un potentiel pouzzolanique significatif, ce qui permet une réaction chimique bénéfique avec la chaux libre issue de l'hydratation du ciment, formant ainsi des produits cimentaires secondaires qui améliorent la compacité et la durabilité du béton.

En tant que matériau secondaire, la poudre de verre s'avère utile non seulement en substitution partielle du ciment Portland, mais aussi en tant que précurseur dans la fabrication de géopolymères, ou encore pour la production de ciments écologiques et d'agréats légers artificiels (Jiang, Y. & al, 2019) . Cette polyvalence confirme son intérêt dans le développement de formulations plus durables et innovantes dans le secteur de la construction.

Son incorporation dans le béton permet non seulement de réduire les émissions de CO₂ liées à la fabrication du clinker, mais également de valoriser efficacement des déchets de verre, tout en améliorant les performances mécaniques et la durabilité du matériau final.

Enfin, la poudre de verre, issue du broyage fin de déchets vitreux, est un matériau peu absorbant dont la forte teneur en silice amorphe réagit favorablement dans le milieu alcalin du béton. Cette propriété en fait un ajout cimentaire particulièrement pertinent dans les nouvelles approches de formulation de bétons durables (Figure 2.12).

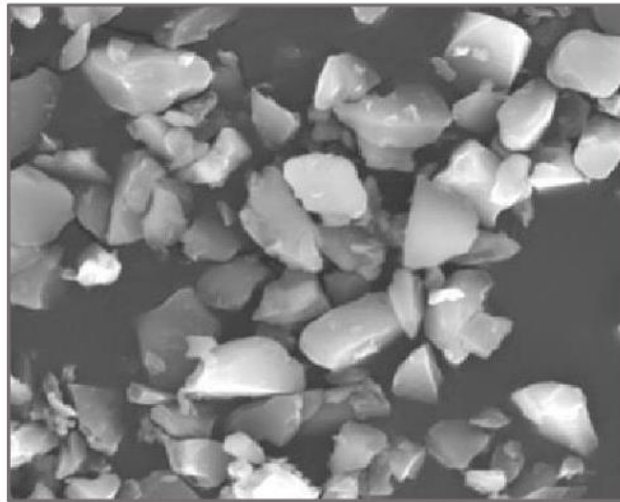


Figure 2.12: Poudre de verre au MEB (Cyr, M. et al., 2012)

2.4.3. Domaines d'application concrets

De nombreuses études ont été réalisées à grande échelle ou dans des conditions climatiques réelles pour observer la durabilité des ouvrages intégrant du verre recyclé. Ces travaux démontrent que la poudre de verre peut être utilisée dans une grande variété de formulations cimentaires, avec des résultats prometteurs sur les plans mécanique, esthétique et environnemental.

La figure 2.13 illustre quelques exemples d'applications dans lesquelles le verre est couramment utilisé.

- Bétons Ultra-Hautes Performances (BUHP) : comme la construction d'une passerelle intégrant du verre broyé ;
- Mortiers à base de verre : où la poudre est utilisée en remplacement partiel du ciment;
- Béton AutoPlaçant (BAP) : grâce à la finesse de la poudre de verre qui contribue à la compacité ;
- Béton Ordinaire (BO) : utilisé notamment dans les trottoirs et dalles ;
- Technique Routière (TR) : sous forme de remblais ou d'enrobés intégrant du verre broyé.

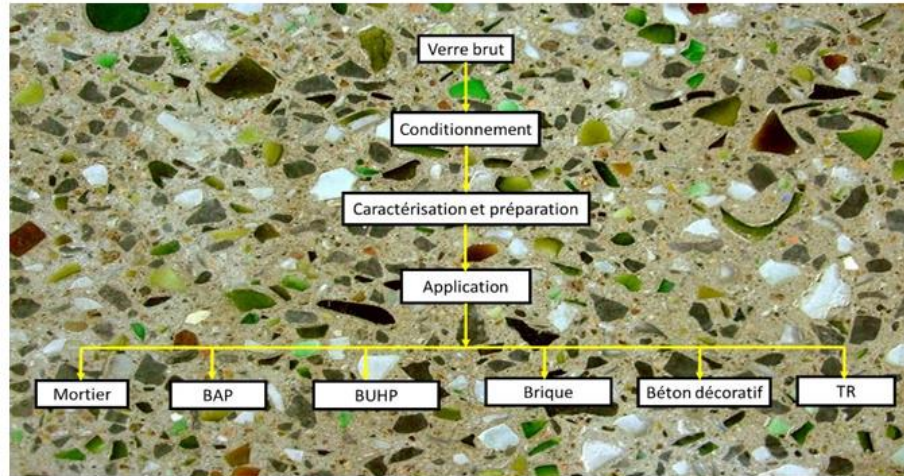


Figure 2.13: Valorisation des déchets de verre dans diverses applications de construction (Bouchikhi, 2020)

Ces cas montrent que la valorisation de la poudre de verre ne se limite pas à un usage théorique ou expérimental, mais qu'elle peut réellement s'intégrer dans des applications variées du secteur de la construction.

2.5. Effets sur les propriétés du béton

L'incorporation de poudre de verre finement broyée comme ajout cimentaire dans le béton influence de manière significative ses propriétés mécaniques, sa durabilité, ainsi que sa résistance aux réactions pathologiques telles que la réaction alcali-silice (RAS). Ces effets dépendent fortement de la finesse de la poudre, du taux de substitution, et de la composition chimique du verre.

2.5.1. Résistance mécanique (à court et long terme)

- À court terme (7 à 28 jours) :

Le remplacement partiel du ciment par de la poudre de verre peut entraîner une légère diminution de la résistance mécanique, notamment lorsque la poudre utilisée présente une faible réactivité, en particulier si la granulométrie dépasse $75\text{ }\mu\text{m}$, ou lorsque le taux de substitution excède 20 %. Cette baisse de performance initiale s'explique principalement par la réactivité pouzzolanique relativement lente de la poudre de verre par rapport à celle du clinker, retardant ainsi la formation précoce des produits cimentaires contribuant à la résistance (Chand G. et al., 2025).

- À long terme (90 jours et plus) :

Les travaux de Shayane et al (2004) ont mis en évidence que le remplacement de 30 % du ciment par de la poudre de verre permet d'atteindre, à long terme, des résistances à la compression supérieures à celles obtenues avec 10 % de fumée de silice ou 20 % de poudre de basalte pulvérisée, comme le montre la figure 2.14 (Shayan, A. & Xu, A., 2004).

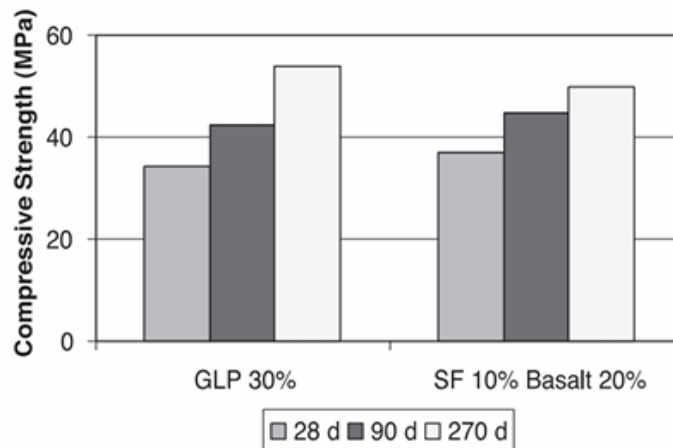


Figure 2.14: Comparaison de résistance entre la fumée de silice et la poudre de verre (Shayan, A. & Xu, A., 2004)

Cette amélioration s'explique principalement par la formation progressive de gels C–S–H secondaires, issus de la réaction pouzzolanique entre la silice amorphe contenue dans la poudre de verre (SiO_2) et la chaux libre (Ca(OH)_2) libérée lors de l'hydratation du ciment. De manière générale, plusieurs études concordantes (Shi & Zheng, 2007 ; Taha & Nounu, 2008) confirment que des taux de substitution modérés, compris entre 10 % et 20 %, permettent également d'améliorer significativement la résistance mécanique à long terme du béton, soulignant ainsi le potentiel durable de la poudre de verre en tant qu'ajout cimentaire (Taha, B. & Nounu, G., 2008).

2.5.2. Durabilité (Perméabilité et porosité)

L'incorporation de poudre de verre dans le béton contribue significativement à l'affinement de sa microstructure, à la fois par effet filler, comblant les pores capillaires grâce à la finesse des particules, et par la formation secondaire de gels C–S–H issus de la réaction pouzzolanique avec la chaux libre. Cette double action permet de réduire la porosité globale du matériau et d'en améliorer la compacité.

Plusieurs études confirment que cette densification de la matrice a un impact direct sur la perméabilité du béton. Par exemple, Chaïd et al (2015) ont montré qu'un béton contenant 30 % de poudre de verre finement broyée (8000 cm²/g) présentait une pénétrabilité aux ions chlorure nettement inférieure à celle d'un béton de référence sans ajout. La charge électrique totale mesurée après 6 heures était de 507,6 coulombs pour le béton modifié, contre 1900,8 coulombs pour le béton témoin (voir Tableau 2.2), ce qui indique une excellente résistance à la pénétration des ions agressifs.

Tableau 2.2: Pénétrabilité des ions chlorure d'un béton avec ajout de fine poudre de verre (Chaïd, R. et al., 2015)

Type de béton	Somme des charges en coulomb passées après 6 heures
Reference (0% PV)	1900,8
30% PV	507,6

Ces résultats sont corroborés par Zidol (2014), qui a comparé différents ajouts cimentaires et a observé que la poudre de verre à 20 % offrait la meilleure performance en termes de résistance à la diffusion des ions chlorure, notamment à 56 jours. De manière analogue, Du et Tan (2014) rapportent une diminution de 54 % à 80 % de la pénétrabilité à l'eau pour des taux de substitution en poudre de verre variant entre 15 % et 60 % (Du, H. & Tan, K. H., 2014). Cette amélioration est attribuée non seulement à la réaction pouzzolanique, mais également à une meilleure répartition des fines et à une réduction de la connectivité des pores.

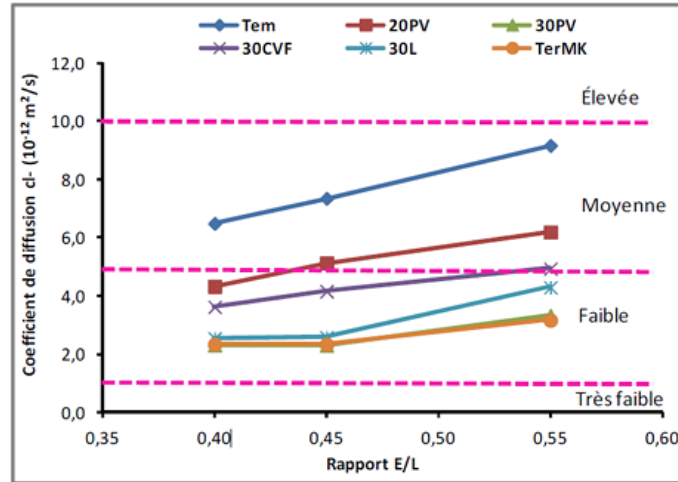


Figure 2.15: Diffusion des ions chlorure en fonction du rapport E/L pour différents bétons (Zidol, A., 2014)

Enfin, la perméabilité au gaz, et en particulier à l'oxygène, est également réduite de manière significative. Selon Chaïd et al. (2015), un béton contenant 30 % de poudre de verre présente une structure plus dense et discontinue, limitant la migration des fluides et conférant au matériau un comportement quasi-imperméable (voir Figure 2.16) (Chaïd, R. et al., 2015).

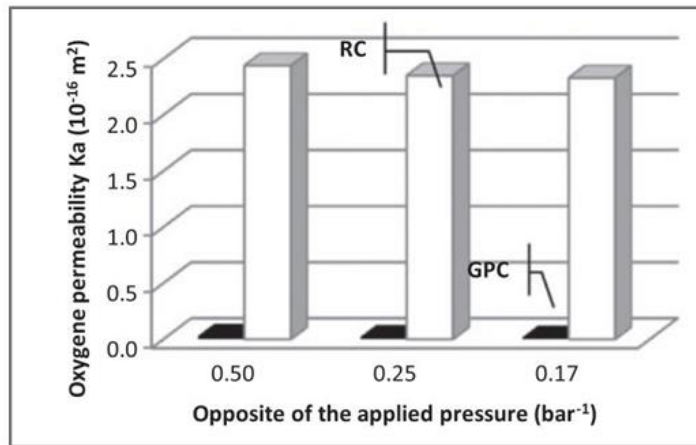


Figure 2.16 : Perméabilité à l'oxygène d'un béton témoin et un béton contenant de la PV à 30% de substitution (Chaïd, R. et al., 2015)

2.5.3. Réaction alcali-silice (RAS/ASR)

a. Risque accru avec le verre en granulats

L'utilisation du verre comme substitut des granulats dans le béton peut entraîner un risque élevé de réaction alcali-silice, surtout lorsqu'il est utilisé sous forme de granulats grossiers ou insuffisamment broyés. Des études ont montré qu'au-delà de 300 µm, la silice amorphe du verre réagit avec les alcalis du ciment, formant un gel expansif responsable de fissurations (Jin & Coll,

2000) (Shayan, A. & Xu, A., 2004). Cependant, ce risque diminue fortement avec une finesse accrue. Shi & Zheng (2007) et Tagnit-Hamou et al. (2010) ont démontré qu'une poudre de verre très fine ($< 75 \mu\text{m}$) peut même jouer un rôle inhibiteur de l'ASR, grâce à son activité pouzzolanique (Shi, C. & Zheng, K., 2007) (Idir, R. et al., 2010).

b. Réduction significative du risque avec la poudre de verre

En revanche, plusieurs études ont montré qu'une mouture fine du verre (taille $< 75 \mu\text{m}$) modifie radicalement son comportement vis-à-vis de l'RAS. Finement broyée, la poudre de verre développe une activité pouzzolanique, consommant progressivement les alcalis et la portlandite (Ca(OH)_2) libérés lors de l'hydratation du ciment. Ce mécanisme réduit la concentration en espèces alcalines libres, limitant ainsi la formation du gel expansif (Shi, C. & Zheng, K., 2007; Idir, 2009)

Les recherches de Shayan et al. (2004), Tagnit (2006) confirment que la poudre de verre, contrairement au verre en granulats, diminue considérablement l'expansion associée à l'RAS. Ils concluent que :

« La poudre de verre finement broyée agit comme inhibiteur de l'ASR en réagissant avec les alcalis au lieu d'y être sensible. » (Idir, R. et al., 2010).

c. Effets synergiques avec d'autres ajouts cimentaires

De plus, l'association de la poudre de verre avec d'autres ajouts pouzzolaniques comme les cendres volantes ou le laitier de haut fourneau permettrait de renforcer davantage la mitigation de l'ASR, notamment dans les milieux fortement alcalins (Idir, R. et al., 2010). Ce comportement est similaire à celui observé avec d'autres additions minérales qui améliorent la durabilité des bétons par raffinement de la microstructure et réduction de l'alcalinité libre.

2.6. Cas d'études et recherches précédentes

2.6.1. Études internationales

L'emploi de la poudre de verre comme addition cimentaire fait l'objet de nombreuses recherches à l'échelle mondiale, soulignant des bénéfices notables pour la durabilité et la performance mécanique du béton.

- Shi et Zheng (2007) ont montré qu'un taux de substitution de 20 % de ciment par de la poudre de verre fine ($< 75 \mu\text{m}$) améliore progressivement la résistance mécanique à long terme (90 jours et plus), en raison d'un phénomène pouzzolanique continu (Shi, C. & Zheng, K., 2007)

- Taha et Nounu (2008) rapportent une diminution significative de la perméabilité et une densification accrue de la microstructure, contribuant à une meilleure protection contre les sulfates et les chlorures (Taha, B. & Nounu, G., 2008).
- Du et Tan (2013/2014) ont observé que la couleur du verre influe sur la réactivité : le verre vert, riche en oxydes métalliques, induit moins de microfissures que le verre clair. En outre, à des tailles micrométriques ($< 75 \mu\text{m}$), le risque de réaction alcali-silice est quasi nul (Du, H. & Tan, K. H., 2014).
- Selon Aygün (2021), l'utilisation de poudre de verre finement broyée (micronisée) dans des bétons auto-plaçants contribue à un meilleur comportement à l'état frais, à une augmentation de la compacité et à des améliorations durables au-delà de 28 jours (Aygün, 2021).
- Zhu et al. (2023) ont mené une étude approfondie sur des bétons auto-plaçants écologiques contenant jusqu'à 30 % de poudre de verre finement broyée ($< 135 \mu\text{m}$). Ils confirment une progression tardive mais constante de la résistance mécanique, dépassant parfois celle d'un béton classique après 180 jours, en raison d'un effet pouzzolanique soutenu (Zhu, J. & al, 2023).

2.6.2. Contexte algérien : Disponibilité du verre usagé et perspectives de valorisation

L'Algérie génère une quantité significative de déchets de verre, principalement sous forme de bouteilles, flacons et vitrages, issus des ménages et des industries agroalimentaires. Malgré ce potentiel, la filière de valorisation du verre reste encore peu développée à l'échelle nationale.

Selon le Rapport sur l'état de la gestion des déchets en Algérie (2020), la quantité annuelle valorisée de verre est estimée à seulement 41 724 tonnes, soit l'un des volumes les plus faibles parmi les différents types de déchets. Le taux de valorisation reste limité à environ 30 %, concentré majoritairement sur le réemploi de bouteilles ou flacons dans les industries verrières ou pharmaceutiques. Ces déchets sont récupérés soit dans des centres de tri, soit directement au niveau des établissements industriels (National Waste Agency, 2020).

Sur le plan économique, le verre usagé représente une valeur modeste, estimée à environ 300 millions de dinars, ce qui en fait une matière peu attractive pour les recycleurs locaux, souvent découragés par l'absence de circuits viables ou de débouchés industriels durables.

Cette situation est principalement due à un manque d'infrastructures adaptées au recyclage du verre, ainsi qu'à une faible intégration des matériaux recyclés dans le secteur du BTP. Pourtant, des perspectives de développement existent. La Stratégie Nationale de Gestion Intégrée des Déchets (National Waste Agency, 2020), prévoit, d'ici 2035, un objectif de valorisation de plus de 60 % des déchets du secteur BTP, notamment sous forme de gravats ou remblais recyclés après tri

et concassage. Cette orientation ouvre la voie à une intégration plus systématique du verre usagé, y compris sous forme de poudre dans les bétons innovants.

Une meilleure collaboration entre les collectivités locales, les centres de tri et les acteurs du BTP pourrait permettre le développement de projets pilotes de valorisation du verre, contribuant ainsi à la double ambition de réduction de l'impact environnemental et de promotion de matériaux de construction durables dans le contexte algérien.

2.7. Limites et précautions d'utilisation

Bien que l'incorporation de la poudre de verre dans les matériaux cimentaires présente des avantages significatifs sur les plans environnemental et mécanique, son utilisation soulève plusieurs contraintes techniques et nécessite la mise en œuvre de précautions spécifiques pour garantir la durabilité et la performance des bétons.

2.7.1. Réactivité alcali-silice (RAS)

L'un des principaux risques est la réaction alcali-silice (RAS), un phénomène pathologique résultant de l'interaction entre les alcalis du ciment (Na^+ , K^+) et la silice amorphe du verre, menant à la formation d'un gel expansif responsable de microfissures et de gonflements dans la matrice cimentaire (Shao & al, 2000) (Idir, 2009), (Bouchikhi, 2020).

Le risque d'ASR est particulièrement élevé lorsque le verre est utilisé sous forme de granulats grossiers ($> 100 \mu\text{m}$). Pour limiter ce phénomène, plusieurs recherches recommandent de broyer finement la poudre de verre à une granulométrie inférieure à $75 \mu\text{m}$, seuil à partir duquel l'activité pouzzolanique prend le dessus sur l'RAS (Meyer & Coll, 1997) (Idir, 2009).

2.7.2. Retard de prise et faible réactivité initiale

En raison de sa faible activité pouzzolanique à court terme, notamment avant 28 jours, la poudre de verre peut provoquer un retard de prise ainsi qu'un ralentissement du développement des résistances mécaniques (Shao & al, 2000). Ce phénomène est accentué par la finesse extrême de certaines particules, qui interagissent plus lentement avec les produits d'hydratation du ciment.

2.7.3. Variabilité chimique du verre recyclé

La composition chimique du verre recyclé peut varier considérablement selon son origine, notamment en termes de teneurs en Na_2O , K_2O ou Fe_2O_3 , ce qui influe directement sur :

- Le comportement chimique global,
- Le risque de réaction RAS,

- Et les performances mécaniques finales (Du, H. & Tan, K. H., 2014), (Leghreib, M. N. E. & Tamaoust, A., 2015) (Jiang, Y. & al, 2019).

2.7.4. Taux de substitution et ouvrabilité

Des études indiquent que des taux de substitution supérieurs à 30 % peuvent entraîner une perte notable de performance, tant au niveau de la résistance à la compression que de l'ouvrabilité du béton (Chand G. et al., 2025).

En revanche, une substitution entre 10 % et 30 % de ciment par de la poudre de verre < 75 µm permet de concilier performance mécanique et durabilité (Jiang, Y. & al, 2019).

2.7.5. Coût énergétique du broyage

Bien que la granulométrie fine soit essentielle pour l'activation pouzzolanique et la maîtrise de l'RAS, elle nécessite un broyage intensif, générant un coût énergétique non négligeable qui peut affecter la rentabilité globale du procédé.

2.7.6. Influence sur l'esthétique du béton

La présence de verre coloré (vert, brun, bleu) peut altérer la teinte finale du béton, ce qui peut être perçu comme une contrainte dans certaines applications architecturales, mais également comme un atout esthétique dans des contextes décoratifs (Du, H. & Tan, K. H., 2014). Le choix du type de verre doit donc être adapté selon l'usage prévu : béton structurel, décoratif ou préfabriqué.

2.7.7. Recommandations pratiques issues de la littérature

Pour optimiser l'utilisation de la poudre de verre dans les bétons, les recommandations suivantes sont généralement admises :

- Taux de substitution optimal : entre 10 et 30 % de poudre de verre finement broyée.
- Granulométrie impérative < 75 µm pour éviter l'ASR et activer l'effet pouzzolanique.
- Combinaison avec d'autres ajouts : L'efficacité est renforcée lorsqu'elle est utilisée avec des cendres volantes ou du laitier, améliorant la compacité et la durabilité (Taha, B. & Nounu, G., 2008), (Torres-Carrasco, M. & Puertas, F., 2015).
- Choix du verre recyclé : privilégier les verres contenant moins d'alcalis (ex: verre vert) pour réduire les risques d'RAS (Leghreib, M. N. E. & Tamaoust, A., 2015)

2.8. Conclusion

L'utilisation des déchets de verre, notamment sous forme de poudre de verre (PV), représente une solution prometteuse et durable pour le secteur de la construction. En tant que matériau pouzzolanique secondaire, la poudre de verre permet non seulement de réduire la quantité de déchets mis en décharge, mais aussi de diminuer la consommation de clinker dans le ciment, contribuant ainsi à la réduction des émissions de CO₂.

Les différentes sections de ce chapitre ont mis en évidence :

- L'origine, le traitement et les caractéristiques physico-chimiques des déchets de verre transformés en poudre ;
- Leur valorisation dans le béton, soit en tant que granulats ou en tant qu'ajout cimentaire, selon la granulométrie ;
- Les avantages environnementaux et économiques liés à leur intégration dans les matériaux de construction ;
- Les effets observés sur les propriétés du béton, en particulier en termes de résistance mécanique, durabilité, et réduction de la réaction alcali-silice (RAS), lorsque la taille des particules est bien maîtrisée ;
- Les limites et précautions à considérer afin d'assurer une performance optimale du béton contenant de la poudre de verre.

Dans le cadre du béton à poudre réactive (BPR), la substitution partielle du ciment par la poudre de verre suscite un intérêt particulier. Grâce à sa finesse, sa composition riche en silice amorphe, et sa contribution à une microstructure plus dense, la poudre de verre est susceptible d'améliorer la durabilité, la résistance mécanique à long terme, et la compacité du BPR.

CHAPITRE 3 :
Effet de la Poudre de
Verre sur la
Durabilité des BPR

3.1. Introduction

La durabilité des matériaux de construction représente aujourd'hui un enjeu majeur dans le domaine du génie civil, en raison des impératifs environnementaux croissants et des exigences de performance à long terme des structures. Dans ce contexte, le béton, bien qu'étant un des matériaux les plus utilisés dans le monde, soulève des préoccupations importantes, notamment en lien avec la production de ciment Portland, fortement émettrice de CO₂. Ainsi, la recherche d'alternatives durables passe par l'intégration d'ajouts minéraux capables d'améliorer à la fois les propriétés mécaniques et la durabilité des bétons, tel que la poudre de verre (Semmana, O. et al., 2025)

Le Béton à Poudre Réactive (BPR), aussi appelé *Reactive Powder Concrete (RPC)*, s'inscrit dans cette logique d'innovation. Il se caractérise par une microstructure dense, une faible porosité, et des performances mécaniques et durables supérieures aux bétons traditionnels, notamment grâce à l'utilisation d'ajouts fins comme la fumée de silice, le quartz et le laitier. Sa formulation optimisée, à faible rapport eau/liant, permet de réduire significativement la perméabilité aux agents agressifs et d'augmenter sa résistance à la pénétration des chlorures et au vieillissement en milieux agressifs (Sanjuán, M. Á. & Andrade, C., 2021) (Chadli M., 2019).

Récemment, la poudre de verre, issue du recyclage de déchets, a été explorée comme ajout cimentaire alternatif. Elle présente des propriétés pouzzolaniques notables, améliore la résistance aux agents chimiques, réduit la porosité et la perméabilité, et contribue à la valorisation de déchets verriers dans une logique d'économie circulaire. Sa combinaison avec une matrice BPR pourrait ainsi renforcer davantage les performances de durabilité, en créant une synergie entre les ajouts réactifs et la microstructure ultra compacte du béton (Semmana, O. et al., 2025).

L'objectif de ce chapitre est donc d'explorer les différents paramètres influençant la durabilité des BPR modifiés par l'ajout de poudre de verre verte. Nous présenterons d'abord les indicateurs classiques de durabilité, avant d'analyser l'effet des ajouts minéraux et les mécanismes microstructuraux associés.

3.2. Définition de la durabilité et paramètres associés

La durabilité d'un béton désigne sa capacité à résister aux agressions physiques, chimiques et mécaniques au cours de son cycle de vie, tout en maintenant ses propriétés fonctionnelles. Ce concept prend une place centrale dans les formulations modernes, surtout face à l'évolution des conditions climatiques et à l'urbanisation croissante. Les formulations à haute performance, comme les Bétons à Poudre Réactive (BPR), visent justement à renforcer cette durabilité en optimisant la densité de la matrice, la compacité granulaire et la réactivité chimique (Chadli M., 2019) (Sanjuán, M. Á. & Andrade, C., 2021).

L'évaluation de la durabilité repose sur plusieurs paramètres clés, selon Semmana O. (2025), la durabilité des bétons intégrant de la poudre de verre dépend essentiellement de l'évolution de la porosité, de la perméabilité, de l'absorption capillaire, et de la résistance aux attaques chimiques

telles que la pénétration des ions chlorure. Ces paramètres sont interdépendants et influencés par la nature des ajouts, la finesse des particules, ainsi que par la densité du réseau de gels formé lors de l'hydratation (Semmana, O. et al., 2025).

Dans les BPR, ces indicateurs sont d'autant plus critiques qu'ils conditionnent directement la performance à long terme du matériau, notamment dans des environnements marins, urbains pollués ou exposés à des cycles gel/dégel. Leur contrôle repose sur une formulation rigoureuse, notamment sur le choix des ajouts minéraux tels que la fumée de silice, le laitier et la poudre de verre, qui influencent à la fois la microstructure et la chimie interne du béton (Chadli M., 2019) (Semmana, O. et al., 2025).

3.2.1. Porosité

La porosité est l'un des paramètres les plus déterminants de la durabilité. Elle représente le volume total des vides dans le béton, pouvant contenir de l'eau ou des gaz. Une porosité élevée facilite la pénétration des agents agressifs (eau, CO_2 , ions chlorure, sulfates), ce qui accélère les mécanismes de dégradation du béton.

Les Bétons à Poudre Réactive (BPR) présentent une porosité très réduite, grâce à l'élimination des granulats grossiers, à l'utilisation de fines particules actives comme la fumée de silice et le quartz broyé, ainsi qu'à un rapport eau/liant très faible ($< 0,22$) (Chadli M., 2019). Cette formulation dense permet la création d'une matrice à très haute compacité, avec des pores capillaires peu nombreux, de petite taille et faiblement interconnectés.

L'incorporation de poudre de verre broyée contribue également à la réduction de la porosité, à la fois par un effet filler, comblant les microvides, et par son activité pouzzolanique secondaire. Cette dernière permet la consommation progressive de la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et la formation de gels C-S-H supplémentaires, densifiant davantage la matrice.

La figure 3.1 représente la distribution de la taille des pores pour trois mortiers (0, 10 et 20% de poudre de verre) en fonction de diamètre des pores. En augmentant la quantité de poudre de verre, la porosité passe de $0,58 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour le mortier témoin à $0,60 \text{ cm}^3/\text{g}$ et $0,66 \text{ cm}^3/\text{g}$ pour les mortiers contenant respectivement 10 % et 20 % de poudre de verre (soit environ 7 % et 12 % d'augmentation).

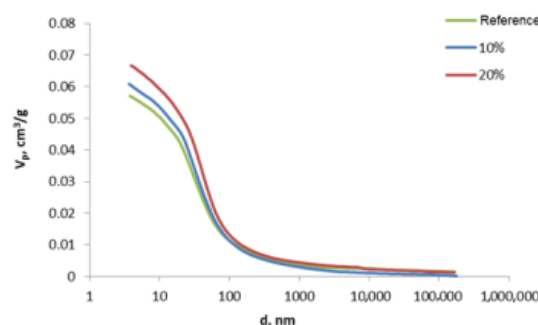


Figure 3.1 : Porosité totale des échantillons après 28 jours d'hydratation (Dobiszewska M. & al., 2023)

3.2.2. Perméabilité à l'eau

La perméabilité à l'eau est liée à la capacité du béton à laisser passer des fluides sous pression. Elle est directement influencée par la porosité, mais aussi par la connectivité des pores, leur taille et leur distribution. Une perméabilité élevée rend le béton vulnérable à l'infiltration d'eau, ce qui peut entraîner des cycles de gel/dégel, des réactions chimiques internes, et la migration d'agents corrosifs tels que les ions chlorure ou les sulfates.

Les formulations de Béton à Poudre Réactive (BPR) présentent des perméabilités extrêmement faibles, de l'ordre de 10^{-13} à 10^{-12} m/s, bien inférieures à celles des bétons à haute performance classiques, ce qui s'explique par leur compacité granulaire élevée et la réactivité chimique optimisée de leurs constituants ultra-fins (Sanjuán, M. Á. & Andrade, C., 2021).

L'ajout de poudre de verre dans le béton contribue à réduire la perméabilité hydraulique grâce à un effet de remplissage des pores capillaires, mais aussi par la formation secondaire de gels C-S-H, issus de la réaction pouzzolanique lente du verre broyé. D'après la revue de Semmana O. (2025), plusieurs études ont montré qu'une substitution de 15 à 20 % de ciment par la poudre de verre peut entraîner une réduction de la perméabilité à l'eau de 30 à 45 % en moyenne, selon la finesse de broyage ($< 45 \mu\text{m}$) et les conditions de cure. Ce comportement est particulièrement notable à partir de 28 jours, lorsque l'activité pouzzolanique du verre devient significative.

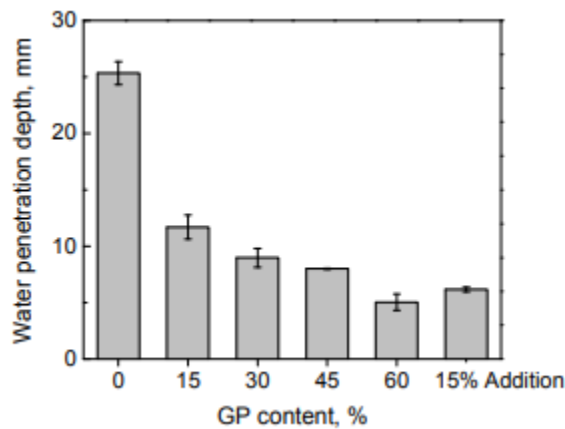


Figure 3.2 : Profondeur de pénétration de l'eau dans le béton additionné de poudre de verre après 28 jours (Du, H. & Tan, K. H., 2014)

La figure 3.2 représente la perméabilité des bétons en fonction de pourcentage de poudre de verre. La perméabilité diminue continuellement avec un pourcentage plus élevé en poudre de verre.

3.2.3. Perméabilité au gaz

La perméabilité au gaz, souvent mesurée par perméabilité à l'air, à l'oxygène ou l'azote, est un autre indicateur critique de la durabilité des bétons et elle permet d'évaluer la capacité des gaz à pénétrer dans la matrice cimentaire.

Les Bétons à Poudre Réactive (BPR), grâce à leur formulation très dense, leur micro-remplissage intensif et l'absence de pores interconnectés, présentent des niveaux de perméabilité au gaz extrêmement faibles. Cette barrière quasi hermétique offre une protection durable des armatures, en particulier dans des environnements sévères comme les zones côtières, marines ou industrielles, riches en agents agressifs (Chadli M., 2019).

Le rôle de la poudre de verre sur la perméabilité au gaz, bien que moins étudié que pour la perméabilité à l'eau, est de plus en plus reconnu dans la littérature. Selon Semmana O. (2025), les substitutions de ciment par de la poudre de verre à hauteur de 10 à 20 %, avec une granulométrie fine, permettent une réduction significative de la perméabilité à l'air (Semmana, O. et al., 2025).

Certaines études recensées par ces auteurs rapportent des diminutions de 15 à 35 % de la perméabilité à l'air dans des bétons modifiés avec de la poudre de verre fine, en particulier lorsque le taux de substitution reste modéré (≤ 20 %). Ce comportement s'explique par l'effet combiné filler + pouzzolane, qui améliore la densité de la matrice et limite la connectivité des pores.

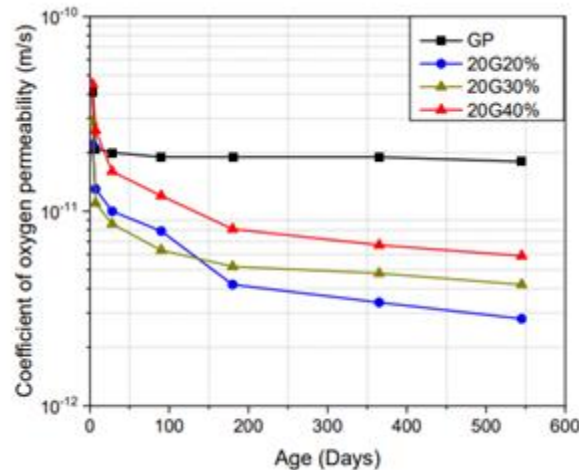


Figure 3.3 : Coefficient de perméabilité au gaz des mélanges pour divers taux d'incorporation de poudre de verre (Tariq S. & al., 2020)

La figure 3.3 représente l'effet de la poudre de verre sur le coefficient de perméabilité. Plus le taux de remplacement est faible, plus la résistance à la perméation est élevée.

3.2.4. Absorption capillaire

L'absorption capillaire correspond à la capacité du béton à absorber l'eau par succion, en raison des forces de tension de surface dans les pores capillaires. Ce mécanisme est particulièrement actif lors des premières expositions à l'humidité ou en présence d'agents agressifs, notamment dans les zones soumises à des variations climatiques importantes ou à des cycles gel/dégel.

Le Béton à Poudre Réactive (BPR), grâce à sa structure interne très dense, son réseau de pores fermés et un taux de saturation très faible, limite fortement cette absorption. Cette propriété est

essentielle pour prolonger la durée de vie des ouvrages exposés à l'humidité et pour réduire la migration des sels dissous, notamment les chlorures ou les sulfates (Sanjuán, M. Á. & Andrade, C., 2021).

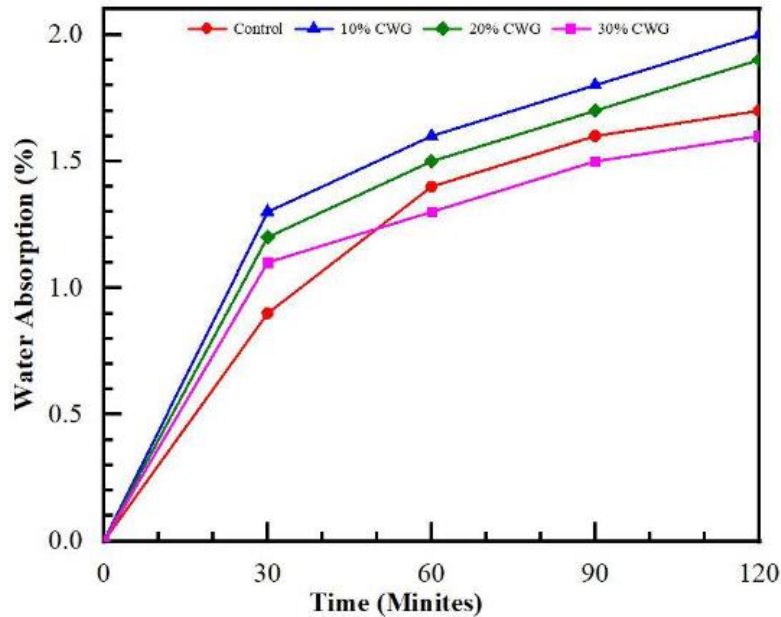


Figure 3.4 : Pourcentage d'absorption capillaire (Odero F. O. & al., 2023)

La figure 3.4 représente le pourcentage d'absorption d'eau en fonction du temps en minute. Les analyses expérimentales ont révélé que le mélange de 30% de poudre de verre offrait des caractéristiques mécaniques et physiques optimales. Le paramètre d'absorption capillaire a été réduit de 1,7% à 1,6% après 120 minutes d'exposition.

3.2.5. Résistance à la pénétration des ions chlorure

La pénétration des ions chlorure constitue l'un des mécanismes de dégradation les plus critiques dans le béton armé, notamment en milieu marin. Ces ions, une fois infiltrés dans la matrice cimentaire, atteignent les armatures et brisent la couche passive d'oxyde de fer, déclenchant la corrosion électrochimique des aciers. La vitesse de cette pénétration dépend fortement de la porosité capillaire, de la perméabilité, et de la connectivité des pores.

Les Bétons à Poudre Réactive (BPR), en raison de leur formulation ultra-dense, présentent une résistance remarquable à la pénétration des ions chlorure. Leurs coefficients de diffusion sont extrêmement faibles, de l'ordre de 10^{-13} à 10^{-12} m²/s, bien en dessous des valeurs typiques des BHP standards (Sanjuán, M. Á. & Andrade, C., 2021). Cette performance s'explique par l'absence de microfissures, la finesse des composants, et la très faible porosité résiduelle de la matrice.

L'ajout de poudre de verre dans ces formulations améliore encore cette résistance. Selon la revue systématique de Semmana O. (2025), plusieurs études ont démontré que des bétons contenant 15 à 20 % de poudre de verre présentaient une réduction de 15 à 40 % de la pénétration des ions chlorure par rapport aux témoins sans ajout (Semmana, O. et al., 2025).

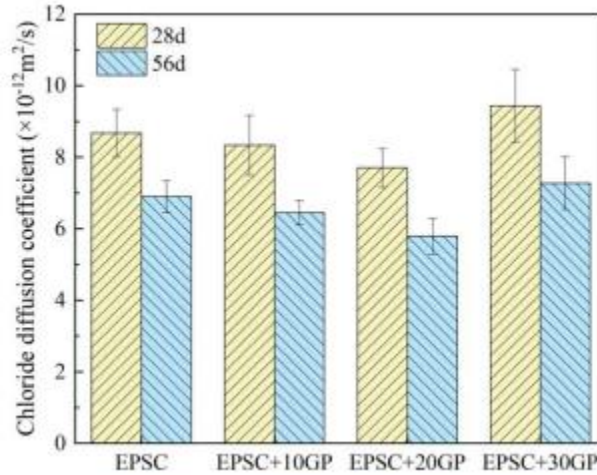


Figure 3.5 : Effet de la poudre de verre sur le coefficient de diffusion des ions chlorures dans le béton (Yu Z., Yang W., & Cai J., 2023)

La figure 3.5 présente le coefficient de diffusion des ions chlorure en m^2/s en fonction du pourcentage de la poudre de verre dans le mélange. L'histogramme montre que le coefficient de diffusion des ions chlorure dans un béton varie selon le taux de substitution du ciment par la poudre de verre. Ce coefficient diminue avec un minimum observé pour une substitution de 20 %, réduisant la diffusion des chlorures de 11,23 % (à 28 jours) et 14,57 % (à 56 jours) par rapport au béton témoin.

3.3. Influence des ajouts minéraux sur la durabilité

L'incorporation d'ajouts minéraux dans la formulation des bétons est une stratégie largement adoptée pour améliorer la durabilité, réduire l'empreinte environnementale liée à la production de ciment Portland, et optimiser les performances mécaniques et chimiques des bétons. Ces ajouts peuvent être d'origine industrielle (laitier, fumée de silice), naturelle (pouzzolanes) ou recyclée (poudre de verre), et jouent un rôle essentiel dans le comportement à long terme des matériaux cimentaires.

Les Bétons à Poudre Réactive (BPR) se distinguent précisément par une utilisation précise et ciblée de ces additions, dont les effets cumulatifs permettent de renforcer la compacité granulaire du béton, réduire la porosité et la perméabilité, et limiter la pénétration des agents agressifs (chlorures, CO_2 , sulfates), même en conditions sévères (Chadli M., 2019) (Sanjuán, M. Á. & Andrade, C., 2021).

La poudre de verre apparaît comme une addition alternative prometteuse, notamment dans une démarche de valorisation de déchets et d'économie circulaire. Elle présente à la fois un effet

physique de remplissage et une réactivité pouzzolanique progressive, qui contribuent à l'amélioration de la durabilité du béton à moyen et long termes (Semmana, O. et al., 2025).

Cette section examine donc le rôle respectif des principaux ajouts utilisés dans les BPR, fumée de silice, laitier de haut fourneau, quartz broyé, et poudre de verre recyclée, ainsi que leur impact sur les indicateurs de durabilité présentés précédemment.

3.3.1. Rôle de la fumée de silice

La fumée de silice est un sous-produit ultra fin généré lors de la fabrication du silicium ou du ferro-silicium dans les fours à arc électrique. Elle est constituée de particules sphériques amorphes de SiO_2 , de très faible diamètre ($< 1 \mu\text{m}$), avec une surface spécifique exceptionnelle pouvant atteindre $20\,000 \text{ m}^2/\text{kg}$. Cette finesse extrême lui confère des propriétés pouzzolaniques très élevées, qui lui permettent de réagir rapidement avec la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) issue de l'hydratation du ciment, pour former des gels C-S-H secondaires plus denses, contribuant ainsi à la diminution de la porosité et à l'amélioration de la compacité de la matrice cimentaire.

Dans les formulations de Béton à Poudre Réactive (BPR), la fumée de silice joue un double rôle essentiel :

- Remplissage physique : grâce à sa finesse extrême, elle comble les micro-vides entre les particules de ciment et de quartz, permettant d'atteindre une compacité maximale du squelette granulaire.
- Réaction chimique : elle participe activement à la consommation de la portlandite et à la formation des gels C-S-H, ce qui augmente la densité et la résistance de la matrice.

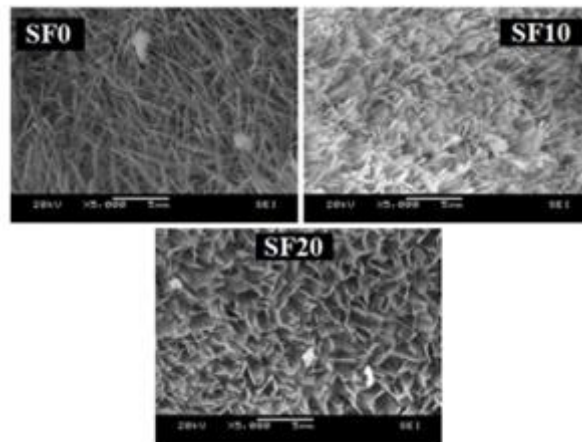


Figure 3.6 : MEB des BPR avec différents dosages de fumée de silice (Beglarigale A. & al., 2014)

La Figure 3.6 illustre l'impact de la fumée de silice sur la microstructure des produits d'hydratation. En l'absence de fumée de silice, (SF0), la structure du béton montre des cristaux riches en calcium, qui rendent le matériau moins solide. Avec l'ajout de fumée de silice, (SF10 et

SF20), ces cristaux se transforment en formes plus stable, ce qui rend le béton plus compact et plus résistant.

3.3.2. Rôle du laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit issu de la fabrication de la fonte dans les aciéries. Lorsqu'il est refroidi, il se transforme en un matériau vitreux qui, après broyage fin, peut être utilisé comme ajout cimentaire.

Selon Chadli (2019), l'utilisation du laitier dans les Bétons à Poudre Réactive (BPR) permet de renforcer progressivement la densité de la matrice, grâce à la formation de gels d'hydratation supplémentaires. Sa réaction étant plus lente que celle de la fumée de silice, il agit en profondeur, à moyen terme, en comblant les pores résiduels, ce qui améliore la compacité globale du béton (Chadli M., 2019).

Semmana O. (2025) confirment que le laitier est un ajout efficace pour réduire la porosité, améliorer la résistance aux attaques acides et sulfatées, et augmenter la durabilité à long terme. Combiné à d'autres ajouts comme la fumée de silice ou la poudre de verre, il joue un rôle complémentaire dans la protection progressive et durable du béton, en renforçant la microstructure au fil du temps (Semmana, O. et al., 2025).

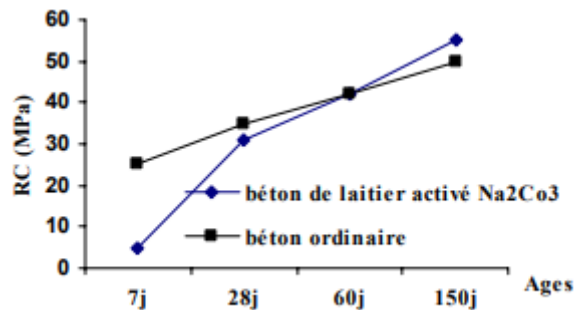


Figure 3.7 : L'influence du laitier sur la résistance en compression du béton (Zeghichi L. & al., 2007)

La figure 3.7 représente l'évolution de la résistance en compression du béton ordinaire et avec laitier aux différents âges. L'activation alcaline du laitier permet une amélioration significative de la résistance à long terme du béton. Cette amélioration est principalement due à la formation en grande quantité de silicates de calcium hydratés (C-S-H), qui densifient la matrice cimentaire en réduisant la taille des pores.

3.3.3. Rôle du quartz broyé

Le quartz broyé, utilisé dans les Bétons à Poudre Réactive (BPR), est un ajout minéral inerte sur le plan chimique, c'est-à-dire qu'il ne participe pas aux réactions d'hydratation ou pouzzolaniques. Toutefois, il joue un rôle physique fondamental dans l'optimisation de la microstructure du béton.

Grâce à sa granulométrie finement contrôlée et à sa dureté élevée (7 sur l'échelle de Mohs), le quartz broyé permet d'optimiser le squelette granulaire, en remplissant les interstices entre les particules de liant (ciment, fumée de silice, laitier), et de renforcer la densité globale du matériau, ce qui réduit significativement la connectivité des pores et, par conséquent, la perméabilité aux fluides et aux gaz.

Mohs scale of mineral hardness	
talc	1
gypsum	2
calcite	3
fluorite	4
apatite	5
orthoclase	6
quartz	7
topaz	8
corundum	9
diamond (bort)	10

Figure 3.8 : Echelle de dureté minérale de Mohs

3.3.4. Rôle de la poudre de verre verte

La poudre de verre verte est obtenue par broyage fin de déchets verriers. Elle est composée majoritairement de silice amorphe (SiO_2 à 60–70 %), accompagnée d'oxydes de sodium (Na_2O), de calcium (CaO) et de potassium (K_2O). À l'état pulvérisé, cette poudre présente un potentiel pouzzolanique notable, à condition que sa taille de particule soit inférieure à 45 μm , ce qui permet une réactivité suffisante dans un milieu alcalin.

Elle peut être utilisée en substitution partielle du ciment Portland, typiquement entre 10 et 30 %, et offre un double avantage : technique (renforcement de la durabilité) et environnemental (valorisation de déchets et réduction des émissions de CO_2 liées au clinker).

Selon Semmana O. (2025), les effets positifs de la poudre de verre sur la durabilité sont nombreux:

- Réduction de la porosité totale et connectée grâce à un effet filler immédiat et à la formation secondaire de gels C-S-H, issus de la réaction pouzzolanique lente ;
- Diminution de la perméabilité à l'eau et à l'air, notamment après 28 jours de cure, lorsque l'activité réactive du verre devient plus prononcée ;
- Amélioration de la résistance à la pénétration des ions chlorure, à condition que la finesse soit contrôlée et que le taux de substitution n'excède pas 20 % ;

Dans les formulations de Béton à Poudre Réactive, la poudre de verre représente donc une option prometteuse en remplacement partiel du ciment. Elle agit à la fois comme remplisseur physique et comme ajout réactif, renforçant la durabilité du matériau tout en contribuant à une démarche de construction durable.

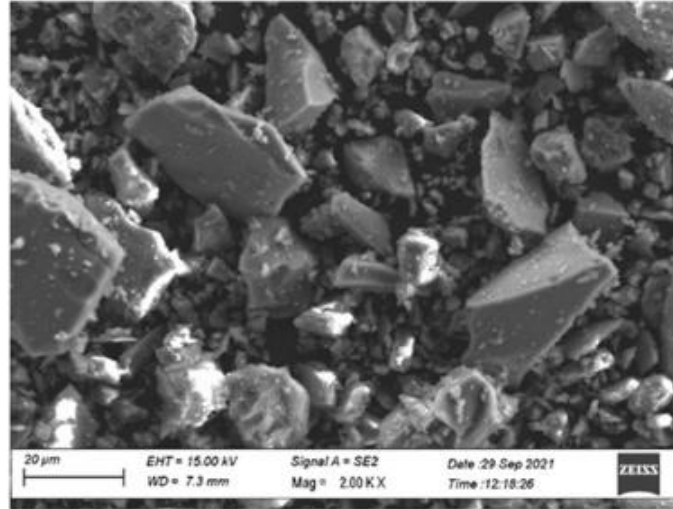


Figure 3.9 : Images au microscope électronique à balayage de la poudre de verre (Dobiszewska M. & al., 2023)

3.3.5. Lien entre formulation et durabilité

La formulation du béton est un paramètre déterminant dans l'atteinte des objectifs de durabilité, notamment dans les BPR où chaque ingrédient est soigneusement calibré. Deux éléments jouent un rôle central : le rapport eau/liant (E/L) et la nature des ajouts minéraux.

Un rapport E/L faible ($< 0,20$), caractéristique des BPR, permet une réduction significative de la porosité capillaire, une réduction de la connectivité des pores et une perméabilité extrêmement faible, condition essentielle pour bloquer l'entrée des agents agressifs.

Par ailleurs, la combinaison d'ajouts réactifs (fumée de silice, laitier, poudre de verre) avec des granulats fins (comme le quartz broyé) permet de densifier la matrice cimentaire et de former un squelette granulaire optimisé, dans lequel chaque particule contribue à combler les vides, ralentir la migration des fluides, et renforcer la stabilité chimique interne.

Comme le soulignent Sanjuán et Andrade (2021), la synergie entre les ajouts minéraux est un facteur clé :

- la fumée de silice agit de manière très réactive dès les premières heures, en produisant rapidement des gels C-S-H secondaires ;
- le laitier, avec son activité hydraulique latente, contribue à moyen terme à renforcer la microstructure ;
- la poudre de verre, plus lente, intervient à plus long terme via sa pouzzolanité progressive.

Cette complémentarité temporelle assure une protection continue et évolutive de la matrice, en maintenant la densité interne et en minimisant les risques de dégradation différée.

Ainsi, la durabilité du BPR repose autant sur les propriétés individuelles des composants que sur la cohérence globale de la formulation, où chaque choix technique participe à la performance à long terme.

3.4. Conclusion

L'étude de la durabilité des bétons à poudre réactive (BPR), enrichis en ajouts minéraux, et notamment en poudre de verre verte recyclée, met en évidence l'importance cruciale d'une formulation optimisée pour garantir la pérennité des ouvrages exposés à des environnements agressifs. Comme l'ont montré les recherches de Chadli M. (2019) et de Sanjuán et Andrade (2021), la durabilité ne dépend pas uniquement de la résistance mécanique initiale, mais surtout de la capacité du béton à résister durablement à la pénétration de l'eau, des gaz, et des agents chimiques, sans dégradation progressive de sa structure interne (Chadli M., 2019) (Sanjuán, M. Á. & Andrade, C., 2021).

Les indicateurs étudiés dans ce chapitre, porosité, perméabilité à l'eau et au gaz, absorption capillaire, et résistance aux ions chlorure, constituent des critères essentiels pour évaluer la durabilité en conditions réelles. Ces paramètres sont fortement influencés par la qualité de la matrice cimentaire, elle-même déterminée par la nature, la réactivité et la finesse des ajouts minéraux utilisés.

L'introduction de poudre de verre verte comme ajout cimentaire alternatif représente une avancée à la fois technique et écologique. D'après Semmana O. (2025), une substitution de 15 à 20 %, associée à un broyage fin ($< 45 \mu\text{m}$), permet de réduire significativement la porosité, la perméabilité et l'absorption capillaire, tout en améliorant la résistance aux chlorures. Cette approche permet également de valoriser un déchet industriel et de réduire la part de clinker, s'inscrivant pleinement dans une démarche de construction durable (Semmana, O. et al., 2025).

Enfin, d'un point de vue microstructural, il est important de rappeler que les performances durables observées sont directement liées à la compacité du réseau de pores, à la finesse des hydrates formés, et à l'homogénéité de la matrice cimentaire. Les formulations BPR permettent précisément d'atteindre une microstructure dense, fermée et stable, limitant les risques de dégradation interne et garantissant une durée de vie prolongée des ouvrages.

DEUXIÈME PARTIE :
ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

CHAPITRE 4 :
Matériels et Méthodes

4.1. Introduction

Ce chapitre présente l'ensemble de la démarche expérimentale mise en œuvre dans le cadre de cette étude. Il débute par l'organigramme général des essais réalisés, permettant d'avoir une vue d'ensemble de la stratégie adoptée. Ensuite, un rappel des principales normes utilisées est proposé, afin de garantir la conformité des protocoles aux standards reconnus.

Enfin, les différents essais effectués sont décrits en détail, qu'ils concernent l'état frais ou durci du Béton à Poudre Réactive (BPR). Ces essais visent à évaluer les propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des différentes formulations testées, en particulier l'effet de la poudre de verre sur le béton.

4.2. Plan expérimental

L'étude expérimentale s'est déroulée selon une démarche structurée en quatre étapes principales.

4.2.1. Préparation des matériaux cimentaires secondaires

Tout d'abord, les matériaux cimentaires secondaires (verre, quartz et laitier de haut fourneau) ont été préalablement broyés afin d'obtenir une finesse compatible avec leur utilisation dans des bétons à poudre réactive (BPR).

4.2.2. Caractérisation des matériaux

Une caractérisation des matériaux a été effectuée, incluant l'analyse du sable, (granulométrie, équivalent sable, masse volumique et bleu de méthylène). Ainsi que la mesure de la finesse des matériaux broyés, (poudres de verre, de laitier et de quartz).

4.2.3. Formulation des mélanges

La troisième étape a consisté en la formulation de trois mélanges de béton de poudres réactives (BPR) : un béton de référence sans poudre de verre (BPRT), un béton avec 15 % de substitution du ciment par de la poudre de verre (BPR15), et un autre avec 30 % (BPR30).

4.2.4. Réalisation des essais expérimentaux

Enfin, des essais ont été réalisés à la fois à l'état frais et à l'état durci. À l'état frais, l'étalement et la masse volumique ont été évalués. Et à l'état durci, les essais se sont répartis en deux catégories :

- La caractérisation physique, comprenant la résistance à la compression, à la flexion et le retrait ;
- Les essais de durabilité, portant sur l'absorption capillaire, la porosité, ainsi que la perméabilité à l'eau, au gaz et aux ions chlorure.

CHAPITRE 4 : Matériels et Méthodes

L'organigramme suivant résume ce plan expérimental détaillé :

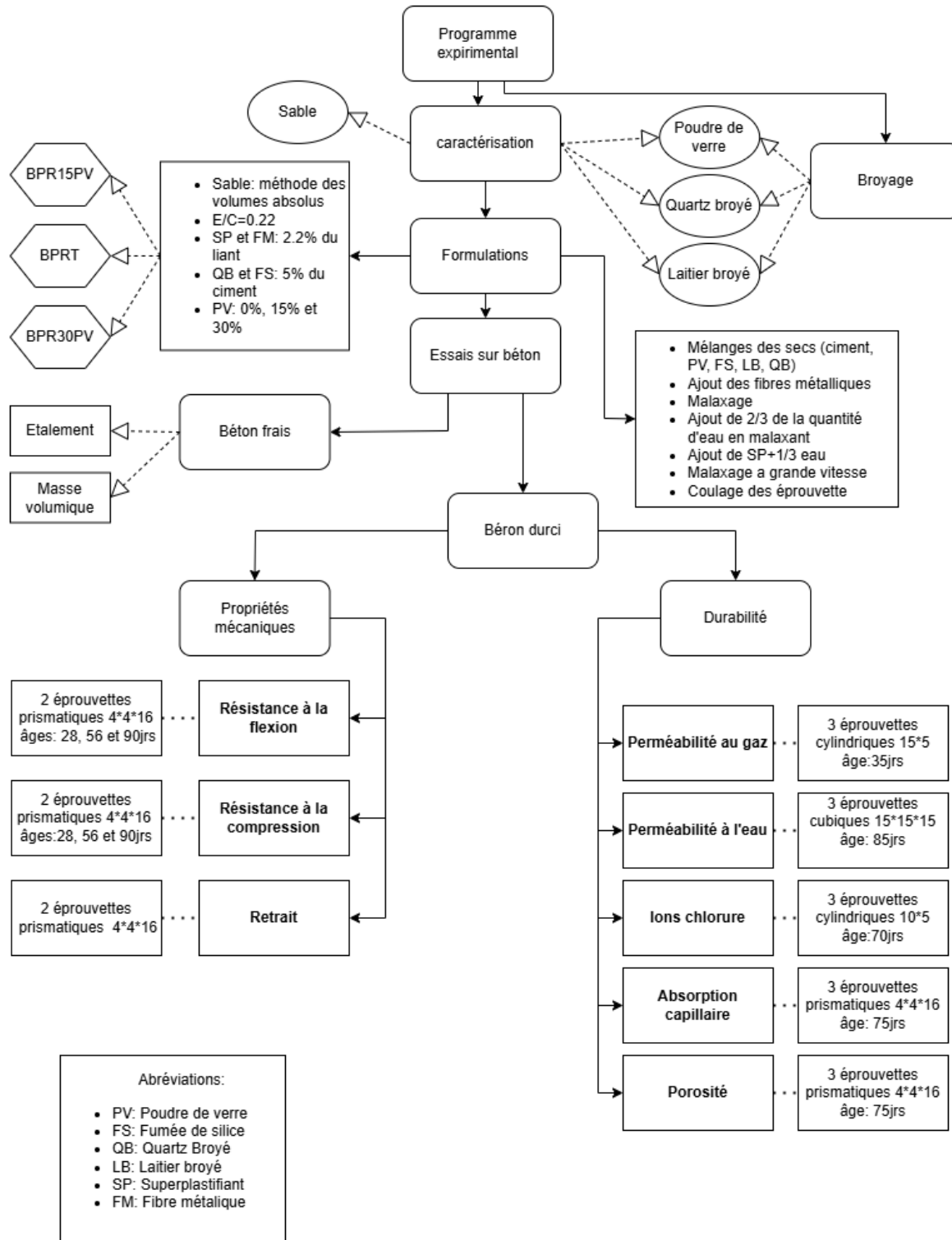


Figure 4.1: Organigramme expérimental

4.3. Références Normatives des Essais

Le tableau ci-après présente une synthèse structurée de l'ensemble des étapes expérimentales menées dans le cadre de ce travail. Il détaille, pour chaque phase de l'étude, les essais réalisés ainsi que les normes correspondantes qui ont été suivies afin de garantir la rigueur et la fiabilité des résultats obtenus.

L'application de ces normes permet d'assurer une méthodologie conforme aux exigences scientifiques et techniques en vigueur, tout en facilitant la reproductibilité des protocoles expérimentaux.

Chaque série d'essais mentionnée dans ce tableau fera l'objet d'un développement approfondi dans les chapitres suivants, afin d'en expliciter les objectifs, de décrire les méthodes mises en œuvre et d'interpréter les résultats observés à la lumière des performances attendues du matériau.

Tableau 4.1 : Tableau de normes

Phases		Essai	Normes
Caractérisation des matériaux		Granulométrie	NF EN 12620
		Equivalent sable	NF EN 933-8
		Absorption et masse volumique	NF EN 1097-6
		Bleu de méthylène	NF EN 933-9
		Refus de tamis 45 μ m	ASTM C430
Béton à l'état frais		Etalement	NF EN 12350-8
		masse volumique	ASTM C 138
Béton à l'état durci	Caractérisation physique	Résistance à la flexion	NA 234
		Résistance à la compression	NA 234
		Retrait de séchage	NF P15-433
	Durabilité	Absorption capillaire	NF EN 13057
		Perméabilité à l'eau	BS EN 12390-8
		Perméabilité au gaz	Réf E0651
		Essai de chlorure	ASTM C 1202
		Porosité	NF P 18-459

4.4. Matériels et méthodes

4.4.1. Essais de caractérisation

a. Granulométrie (NF EN 12620)

L'essai de granulométrie permet d'évaluer la répartition des tailles de particules dans le sable 0/1 utilisé. Il consiste à faire passer un échantillon de sable sec à travers une série de tamis à mailles décroissantes, puis à mesurer la masse retenue sur chaque tamis. Cette méthode donne une idée précise de la courbe granulométrique du sable. L'objectif est de vérifier que le sable respecte les exigences normatives, notamment en ce qui concerne la proportion de fines. Ces paramètres influencent directement la maniabilité du béton, sa compacité, ainsi que sa performance globale, en particulier dans le cadre des bétons à poudre réactive (BPR), où chaque composant doit être finement contrôlé.



Figure 4.2 : Tamiseurs pour Granulométrie

b. Equivalent de sable (NF EN 933-8)

L'essai d'équivalent de sable permet d'estimer la propreté du sable 0/1 en quantifiant la proportion de fines argileuses qu'il contient. Une teneur élevée en fines indique la présence d'impuretés susceptibles d'altérer la qualité du béton, en affectant sa maniabilité, son adhérence et sa durabilité. Cet essai est particulièrement important dans le cadre des bétons à haute performance comme BPR, où la qualité des matériaux influence fortement le comportement du mélange. Un bon équivalent de sable reflète un sable propre, adapté aux exigences de la formulation.



Figure 4.3 : Essai équivalent de sable

c. Absorption et Masse Volumique (NF EN 1097-6)

Cet essai permet de déterminer deux propriétés essentielles du sable : sa masse volumique réelle, qui correspond à la densité des grains solides hors vides, et son coefficient d'absorption d'eau, exprimé en pourcentage de la masse sèche. Ces deux paramètres jouent un rôle important dans le calcul des dosages en eau et en liant lors de la formulation du béton. Une absorption élevée peut fausser le rapport eau/liant si elle n'est pas prise en compte, tandis que la masse volumique réelle permet d'ajuster précisément les proportions de matériaux pour obtenir un béton homogène et performant, en particulier dans le cadre des bétons à poudre réactive.



Figure 4.4 : Essai de masse volumique par Pycnomètre

d. Bleu de Méthylène (NF EN 933-9)

L'essai au bleu de méthylène permet d'évaluer la teneur en éléments fins actifs présents dans le sable, tels que les argiles ou les limons. Ces particules, lorsqu'elles sont en excès, peuvent altérer l'adhérence entre la pâte cimentaire et les granulats, et nuire à la durabilité du béton. Pour des bétons spécifiques comme le BPR, contrôler ce paramètre est crucial afin d'assurer la qualité et la longévité du matériau.

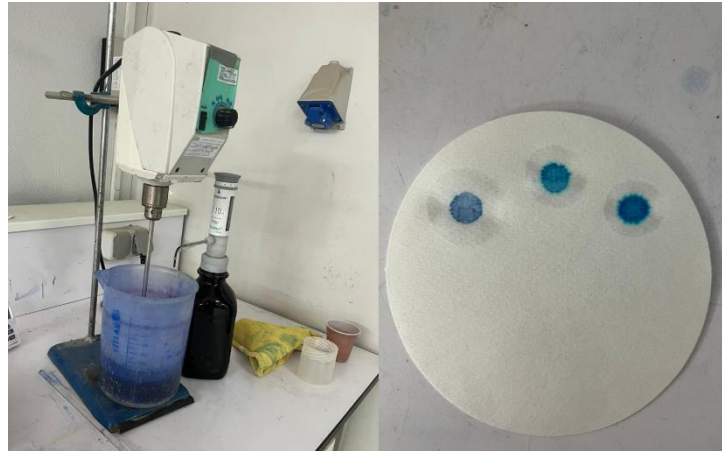


Figure 4.5 : Essai au bleu de méthylène

e. Opération de broyage

Pour atteindre la finesse requise des poudres, un broyage mécanique a été effectué à l'aide d'un broyeur cylindrique rotatif à boulets, d'une largeur de 1 mètre et d'un diamètre de 0,48 mètre. Ce dispositif permet de réduire efficacement la taille des particules solides en fines poudres. Les matériaux broyés sont le verre, le laitier granulé de haut fourneau et le sable quartzeux. La quantité de boulets dans le broyeur est un paramètre crucial : un remplissage excessif réduit l'efficacité du broyage, car les boulets ne sont plus suffisamment entraînés par la force centrifuge. En général, le volume de remplissage ne doit pas dépasser un tiers du volume total du broyeur.

Le broyage du verre a été réalisé en plusieurs séquences de 20 minutes chacune, à une vitesse d'environ 56 tours par minute, entrecoupées de périodes de repos, afin d'obtenir une poudre suffisamment fine et homogène pour une utilisation dans le BPR.



Figure 4.6 : Broyeur à boulets

f. Refus du tamis 45 μm (ASTM C430)

L'essai de refus au tamis 45 μm permet d'évaluer la finesse des matériaux poudreux en mesurant la fraction de particules dont la taille dépasse 45 microns. Cette caractéristique est déterminante, car elle influence directement la réactivité des poudres, notamment les cinétiques d'hydratation et la prise du liant dans les bétons à haute performance comme le BPR. Dans cette étude, le pourcentage de refus à 45 μm a été déterminé pour les trois poudres utilisées : poudre de verre, quartz broyé et laitier broyé. L'objectif visé pour ces matériaux est un pourcentage de refus inférieur à 15 %, afin de garantir une bonne finesse et une réactivité adaptée aux exigences du BPR.



Figure 4.7 : Refus sur tamis 45 μm

4.4.2. Essais sur béton frais

a. Essai d'étalement au mini cône (NF EN 12350-8)

L'essai d'étalement, ou *slump flow*, permet d'évaluer la fluidité du béton dans des conditions non confinées, en mesurant sa capacité à s'écouler sous l'effet de son propre poids. Il est particulièrement adapté aux bétons autoplacants ou à haute performance, comme le BPR. L'essai repose sur l'utilisation d'un mini-cône placé au centre d'une plaque rigide. Le cône est rempli d'une seule coulée, sans vibration ni compactage, puis rapidement retiré à la verticale. Le diamètre moyen de l'étalement est ensuite mesuré à l'aide de deux lectures perpendiculaires.

Un diamètre élevé traduit une meilleure fluidité, ce qui facilite la mise en œuvre du béton et son remplissage des coffrages, en particulier dans les zones densément ferraillées.

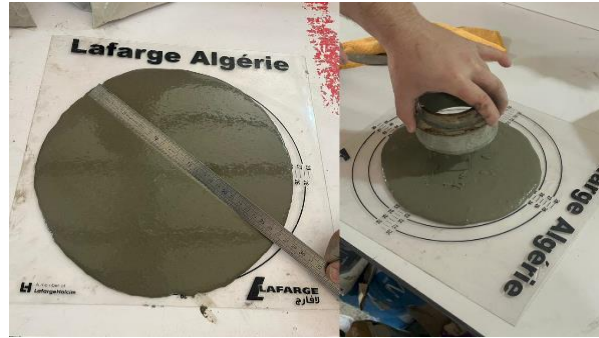


Figure 4.8 : Essai d'étalement

b. Masse volumique (ASTM C 138)

La masse volumique du béton frais permet d'évaluer la densité globale du mélange, en tenant compte l'ensemble de ses constituants, y compris l'air emprisonné. Pour les bétons classiques, elle se situe généralement entre 2200 et 2400 kg/m³, selon la nature des granulats, le taux d'air et la formulation du béton.

L'essai consiste à remplir un récipient de volume connu avec du béton frais, puis à le peser. La masse volumique est obtenue en divisant la masse mesurée par le volume du récipient. Cette mesure est essentielle pour vérifier la conformité du mélange à la formulation prévue.



Figure 4.9 : Masse volumique sur béton frais

4.4.3. Caractérisation mécanique des bétons durcis

a. Résistance à la compression (NA 234)

La résistance à la compression est parmi les propriétés les plus représentatives de la performance mécanique du béton. Elle permet d'évaluer la capacité du matériau à supporter des charges sans se rompre, ce qui est essentiel pour juger de sa fiabilité en service.

CHAPITRE 4 : Matériels et Méthodes

Dans cette étude, des essais ont été réalisés à 28, 56 et 90 jours afin de suivre l'évolution de la résistance au fil du temps.



Figure 4.10 : Essai de compression

b. Résistance à la flexion (NA 234)

Le Béton à Poudre Réactive (BPR) se distingue par une résistance à la flexion nettement supérieure à celle des bétons classiques, ce qui lui confère un comportement mécanique plus ductile et performant.

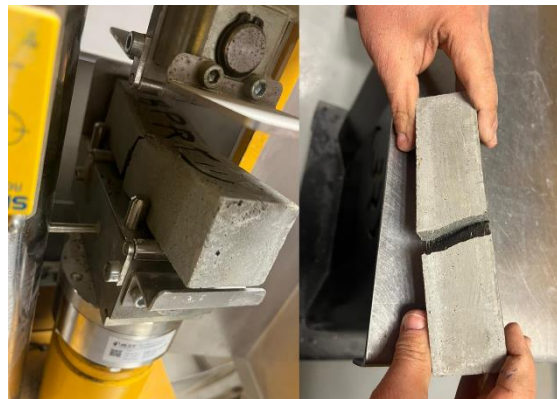


Figure 4.11 : Essai de flexion

Pour évaluer cette propriété, des éprouvettes prismatiques de dimensions 4×4×16 cm ont été soumises à des essais de traction par flexion à 28, 56 et 90 jours. L'application progressive de la charge permet de mesurer la résistance maximale du matériau avant rupture. Cette donnée est essentielle pour comprendre la capacité du béton à résister aux sollicitations en traction dans les structures.

c. Retrait (NF P15-433)



Figure 4.12 : Essai de retrait

L'essai de retrait a pour objectif d'évaluer la variation dimensionnelle du béton au cours du temps, exprimée sous forme de contraction (retrait) ou, plus rarement, d'expansion. Cette mesure se fait par comparaison entre la longueur d'une éprouvette à un instant donné t , et sa longueur de référence l_0 .

Les essais sont réalisés sur des éprouvettes prismatiques normalisées de dimensions $4 \times 4 \times 16$ cm. Celles-ci sont munies de plots en laiton à chaque extrémité, permettant l'installation de billes métalliques en contact direct avec le comparateur lors des relevés. Contrairement à d'autres essais, les éprouvettes de retrait ne sont pas conservées dans l'eau, mais placées en chambre humide afin de permettre une perte progressive d'humidité vers l'extérieur et ainsi reproduire le phénomène réel de retrait par dessiccation.

4.4.4. Essais de durabilité

a. Porosité (NF P 18-459)

L'essai de porosité vise à quantifier le volume de vide présent dans le béton durci, c'est-à-dire la proportion d'espace non occupé par la matière solide. Il s'agit d'un paramètre fondamental pour évaluer la qualité et la durabilité d'un béton, en particulier pour les bétons à haute performance comme le BPR, où une faible porosité est directement liée à une meilleure compacité, une moindre perméabilité, et une résistance accrue aux agents agressifs extérieurs. L'essai est généralement réalisé sur des éprouvettes séchées à $105 \pm 5^\circ\text{C}$ pendant 24h, afin d'éliminer toute trace d'humidité, puis les échantillons sont saturés dans l'eau pendant 48h. La différence de poids indique la porosité du béton.

Une faible porosité est un indicateur de bonne qualité du béton, traduisant une formulation bien optimisée et une microstructure dense.



Figure 4.13 : Essai de porosité

b. Absorption capillaire (NF EN 13057)

L'essai d'absorption capillaire permet d'évaluer la capacité du béton durci à absorber l'eau par capillarité, c'est-à-dire par migration de l'eau à travers les pores interconnectés du matériau en l'absence de pression extérieure. Cet essai est essentiel pour estimer la vulnérabilité du béton face à la pénétration de l'humidité et aux agents agressifs dissous, particulièrement dans les environnements exposés ou humides. Il prend une importance particulière dans le cas du BPR, où la maîtrise de la porosité capillaire est cruciale pour garantir la durabilité à long terme.



Figure 4.14 : Essai absorption capillaire

L'essai est réalisé sur des éprouvettes préalablement séchées dans l'étuve à 50°C pendant 24h afin

d'éliminer toute trace d'humidité. Une fois refroidies, les éprouvettes sont placées verticalement, avec une seule face en contact avec l'eau, sur une profondeur de 2 ± 1 millimètres. L'élévation progressive de l'eau par capillarité est mesurée à intervalles réguliers à l'aide de pesées successives. La variation de masse est ensuite utilisée pour calculer le coefficient d'absorption capillaire.

Un coefficient faible d'absorption capillaire traduit une faible connectivité des pores, ce qui est recherché pour les bétons exposés aux cycles d'humidité-séchage, aux chlorures ou au gel.

c. Perméabilité à l'eau (BS EN 12390-8)

L'essai de perméabilité à l'eau vise à évaluer la capacité du béton à résister à la pénétration de l'eau sous pression, un paramètre fondamental pour juger de sa durabilité, notamment dans les environnements exposés à l'humidité ou à des cycles d'humidification-séchage. Pour ce faire, des éprouvettes cubiques de dimensions $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ sont utilisées. Une face du cube est exposée à une pression d'eau constante de 5 bars, appliquée à l'aide d'un compresseur d'air, et cette pression est maintenue pendant une durée de 72 heures. Une fois ce délai écoulé, les éprouvettes sont fendues en deux, la profondeur maximale de pénétration de l'eau est ensuite mesurée sur la surface de rupture. Cette profondeur permet d'estimer l'imperméabilité du béton : plus elle est faible, plus le matériau est dense et résistant à la migration de l'eau. Cet essai est particulièrement important dans le cas du Béton à Poudre Réactive (BPR), où la faible perméabilité constitue l'un des critères de performance majeurs.



Figure 4.15 : Essai perméabilité à l'eau

d. Perméabilité au gaz (méthode de Cembureau)

L'essai de perméabilité au gaz permet de mesurer la capacité d'un béton à laisser passer un gaz sous pression, généralement de l'air ou de l'azote. Cet essai est un paramètre clé pour juger sa durabilité face aux agressions extérieures. Il est particulièrement pertinent dans le cas des bétons

CHAPITRE 4 : Matériels et Méthodes

à haute performance comme le BPR, où une faible perméabilité est recherchée pour garantir une excellente tenue dans le temps.

L'essai se réalise sur des éprouvettes cylindriques 15*5cm². Le coefficient de perméabilité est calculé en fonction de la pression appliquée, du débit mesuré, des dimensions de l'éprouvette, et des caractéristiques du gaz utilisé.

Des valeurs faibles de perméabilité indiquent une structure interne dense et peu poreuse, ce qui est le signe d'un béton bien formulé et durable.



Figure 4.16 : Essai perméabilité au gaz

e. Essai de migration des ions chlorure (ASTM C 1202)

Cet essai permet d'évaluer la capacité du béton à résister à la pénétration des ions chlorure, qui sont l'un des principaux agents responsables de la corrosion des armatures. Contrairement aux méthodes à long terme, cette technique accélérée repose sur la mesure du courant électrique traversant une éprouvette saturée placée entre deux solutions spécifiques. Les éprouvettes utilisées sont des cylindres de 10x5cm. Avant l'essai, elles sont conditionnées par saturation sous vide, puis immergées dans de l'eau dégazée afin d'uniformiser leur état de saturation.

L'essai réalisé par monsieur Zakaria SKENDER au laboratoire de l'Université de Médéa, consiste à appliquer une différence de potentiel de 60 volts pendant 6 heures entre les deux faces de l'éprouvette, placées respectivement en contact avec une solution de chlorure de sodium (NaCl) et une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH). Le courant électrique généré est enregistré tout au long de l'essai, et la charge électrique totale transférée (exprimée en coulombs) est calculée. Cette charge permet de déterminer indirectement la perméabilité du béton aux ions chlorure.

Une charge élevée indique une forte perméabilité, tandis qu'une charge faible témoigne d'un béton plus résistant à la pénétration des agents agressifs. Cet essai est largement utilisé dans les études

de durabilité, notamment pour comparer différentes formulations de béton ou pour contrôler la qualité des matériaux destinés aux environnements exposés aux sels.



Figure 4.17 : Essai des ions chlorure

4.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'ensemble de la démarche expérimentale mise en œuvre pour évaluer les performances du Béton à Poudre Réactive (BPR) avec incorporation de poudre de verre. Un ensemble varié d'essais a été détaillé, portant sur des aspects complémentaires. Certains visent à caractériser les propriétés physiques et mécaniques, comme la masse volumique, la maniabilité, la résistance à la compression ou à la flexion. D'autres se concentrent sur les propriétés de durabilité, à travers des essais tels que la porosité, la perméabilité à l'eau et au gaz, l'absorption capillaire et encore la pénétration des ions chlorure.

Ces différents essais expérimentaux constituent une base solide pour analyser, comparer et comprendre les performances des formulations testées. Les résultats obtenus seront analysés et discutés dans le chapitre suivant, afin d'en tirer des conclusions sur l'influence de la poudre de verre sur les propriétés des BPR.

CHAPITRE 5 :

Caractérisation des

Matériaux et

Formulations des

Bétons

5.1. Introduction

Ce projet de fin d'études s'inscrit en complément des travaux réalisés l'année précédente par Bourahla et Bechar (2024), qui ont porté sur le développement de formulations optimisées de bétons à poudre réactive (BPR) incorporant de la poudre de verre en tant que substitut partiel au ciment. Leur étude expérimentale a permis de définir une composition performante en termes de propriétés mécaniques, en explorant les effets de différents pourcentages de remplacement du ciment par de la poudre de verre (Bourahla I. & Bechar C., 2024).

Leur démarche d'optimisation, axée principalement sur les caractéristiques à l'état frais et durci, a constitué une base solide pour notre propre travail. En nous appuyant sur les formulations établies par leurs recherches, nous avons poursuivi l'étude en nous focalisant cette fois-ci sur la durabilité de ces bétons innovants. L'objectif de notre étude est ainsi d'évaluer le comportement à long terme des BPR contenant de la poudre de verre, en réalisant une série d'essais normalisés liés à la durabilité, tels que la porosité, la perméabilité, et la résistance à la pénétration des chlorures.

Ce chapitre est donc consacré à la présentation des formulations utilisées dans notre étude. Il détaille les matériaux utilisés, les proportions adoptées pour chaque formulation, ainsi que la méthode de calcul des quantités nécessaires pour l'élaboration des mélanges. Trois formulations ont été retenues, à savoir un béton témoin sans poudre de verre, et deux formulations expérimentales intégrant respectivement 15 % et 30 % de poudre de verre en remplacement partielle du ciment.

5.2. Matériaux Utilisés

5.2.1. Préparation de la poudre de verre

La poudre de verre utilisée dans cette étude provient du recyclage de bouteilles en verre vert (Figure 5.1), principalement ramassées sur une plage algérienne en l'espace de deux heures. Plus de 30 kg de verre ont été collectés, incluant des bouteilles intactes et d'autres partiellement souillées de boue. Après tri, plus de 90 % des bouteilles ont été conservées, les plus polluées ayant été éliminées.



Figure 5.1 : Bouteilles de Verre utilisées

Afin d'assurer une pureté maximale, indispensable à l'obtention de résultats fiables, les bouteilles ont été lavées à plusieurs reprises, désétiquetées, puis séchées. Le taux d'impuretés résiduelles (étiquettes et boue récalcitrante) a ainsi été réduit à moins de 1 % de la masse totale.

La phase de broyage a été réalisée au laboratoire de développement de la construction (CDL) de Holcim - Lafarge Algérie, à l'aide d'un broyeur adapté.

Le broyage a été effectué en 10 cycles de 20min. À chaque 20 minute, un échantillon de poudre a été prélevé pour mesurer le refus au tamis de 45 μm . L'opération a été arrêtée lorsque le refus a atteint 10,6 %, seuil jugé satisfaisant pour l'intégration dans le béton selon la norme ASTM C430.

Enfin, les fines de verre obtenues ont été tamisées à 1 mm, puis incorporées dans les mélanges de béton, conformément à la formulation établie.

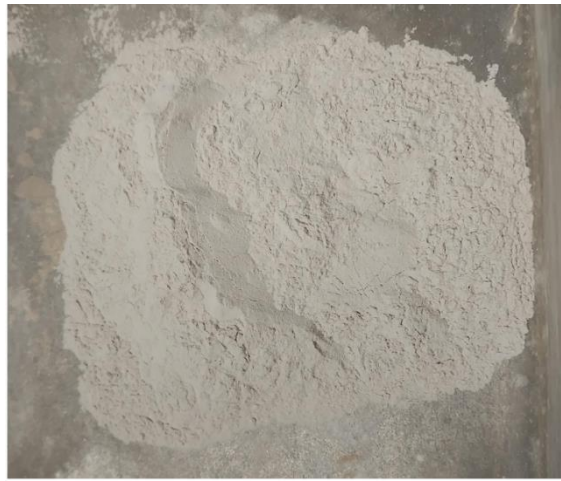


Figure 5.2 : Poudre de verre

5.2.2. Ciment gris

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment Portland SARIE 52.5 R, produit par la cimenterie Lafarge Algérie et conforme à la norme algérienne NA 442 (2013). Il s'agit du ciment gris le plus résistant disponible sur le marché national, se caractérisant par une résistance très élevée à jeune âge, une faible rétractation, ainsi qu'une excellente compatibilité avec différents adjuvants (plastifiants, retardateurs, accélérateurs, etc.). Grâce à sa prise rapide, il est parfaitement adapté aux bétons à très faible rapport E/C, comme les bétons à poudre réactive (BPR), ainsi qu'à des applications spécifiques telles que la préfabrication et le bétonnage par temps froid.



Figure 5.3 : Ciment Portland SARIE 52.5 R

Les propriétés et les caractéristiques techniques de ce ciment sont détaillées dans le tableau 5.1 suivant :

Tableau 5.1 : Caractéristiques de Ciment Portland SARIE 52,5 NA 442- LAFARGE

Analyse chimique	Perte au feu (%) (NA 5042)	6±1
	Teneur en sulfates (SO ₃) (%)	3.0±0.5
	Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	max 5
	Teneur en Chlorures (%) (NA 5042)	max 0.1
Composition minéralogique du Clinker (Bogue)	C3S (%)	60-70
	Aluminates tricalciques C3A (%)	8±2
Temps de prise à 20° [NA 230]	Début de prise (min)	160±60
	Fin de prise (min)	220±60
Résistance à la compression	2 jours (Mpa)	≥20.0
	28 jours	≥52.5
Propriétés physiques	Consistance normale de la pâte de ciment (%)	25.0-31.0
	Finesse suivant la méthode de Blaine (NA 231)	3500-5000
	Retrait a 28 jours en (µm/m)	< 1000
	Expansion en mm	< 3

5.2.3. Sable

Dans cette étude, un sable siliceux de type Afroquartz a été utilisé pour toutes les formulations. Ce sable, d'origine algérienne (Tébessa), est fourni par la société Afro Quartz, spécialisée dans l'extraction et le traitement de sable riche en silice. Le matériau a été tamisé à 1,25 mm pour garantir une granulométrie fine, conformément aux recommandations de Richard & Cheyrezy (1995) et De Larrard & Sedran (1994), qui privilégient l'usage de sables à base de silice pour la fabrication des BUHP.



Figure 5.4 : Sable utilisé (0- 1,25 mm), Afroquartz, Tébessa

Les propriétés physiques du sable, telles que la masse volumique réelle, Perte au tamis et le coefficient d'absorption d'eau à 24 h, ont été déterminées au laboratoire CDL. Ces paramètres sont essentiels, car ils influencent directement le comportement rhéologique du béton, sa formulation en eau, ainsi que ses performances mécaniques. (Tableau 5.2)

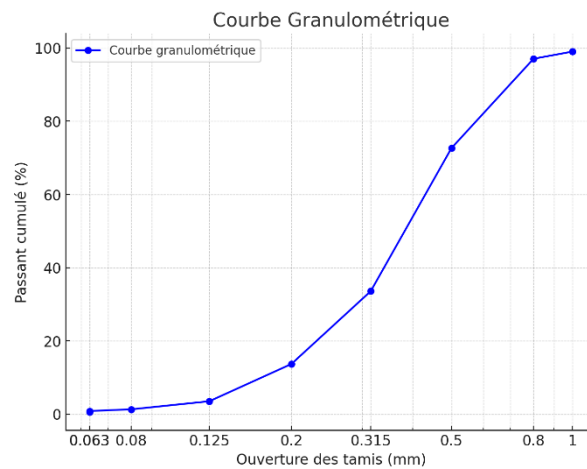


Figure 5.5 : La courbe granulométrique du sable

Tableau 5.2 : Les caractéristiques physiques du sable

Essai	Résultat
Indice de bleu de méthylène (MB)	0,25
Équivalent de sable (ES) %	86,56
Teneur en eau naturelle %	0,4
Coefficient d'absorption %	12,5
Masse volumique réelle g/cm ³	1,96
Masse volumique absolue g/cm ³	2,6
Masse volumique SSD g/cm ³	2,2
Perte au tamis %	0,54

5.2.4. Fibre métallique

Les fibres métalliques sont incorporées directement dans la matrice du béton, conférant au matériau une meilleure homogénéité dans sa réponse mécanique. Grâce à leur forme, leurs dimensions et leurs propriétés mécaniques spécifiques, elles jouent un rôle crucial dans le comportement du béton sous contrainte et déformation.

Leur efficacité en tant qu'élément de renforcement dépend essentiellement de leur capacité d'ancrage, de leur résistance à la traction, ainsi que de leur module d'élasticité (module d'Young).



Figure 5.6 : Fibres métalliques utilisées

CHAPITRE 5 : Caractérisation des Matériaux et Formulations des Bétons

Les caractéristiques techniques des fibres métalliques utilisées dans cette étude, disponibles au Centre de Développement de Lafarge (CDL), sont présentées dans le Tableau 5.5

Tableau 5.3 : Les Caractéristiques des fibres métalliques

Nature	Forme	Longueur	Diamètre
Fil d'acier tréfilé sans revêtement	Lisse	13 mm	0,2 mm

5.2.5. Superplastifiant

L'ajout d'un superplastifiant à haut pouvoir réducteur d'eau dans la formulation des bétons permet de réduire significativement la quantité d'eau de gâchage, et par conséquent le rapport E/C, tout en conservant une excellente maniabilité.

Dans cette étude, le superplastifiant utilisé est le ViscoCrete TEMPO-12, un adjuvant fabriqué par l'entreprise Sika.



Figure 5.7 : Superplastifiant utilisé

Grâce à ses propriétés spécifiques, ce produit permet la formulation de bétons et mortiers à haute performance, comme présenté dans le Tableau 5.4

Tableau 5.4 : Les caractéristiques du superplastifiant

Aspect	Couleur	PH	Densité	Teneur en chlore
Liquide	Brun clair à foncé	4.5 ± 1.0	$1,06 \pm 0,01$	$< 0.1\%$

5.2.6. Quartz broyé (QB)

Le quartz broyé est une poudre fine issue du broyage d'un sable à forte teneur en silice ($\text{SiO}_2 > 98\%$), couramment utilisée dans l'industrie du verre. Sa granulométrie moyenne se situe entre 10 et 15 μm .

Afin d'atteindre la finesse souhaitée, le quartz, provenant de Tébessa, a été soumis à six cycles de broyage de 20 minutes, jusqu'à obtenir un refus de tamis de 6 %.

Dans la formulation des bétons à hautes performances réactifs (BPR), le quartz broyé joue un rôle clé en tant que charge minérale complémentaire, notamment dans les applications à hautes températures ($T > 90^\circ\text{C}$). Il contribue à la résistance du matériau sous contrainte thermique. En revanche, en l'absence de traitement thermique, son apport reste limité en raison de son inertie chimique.



Figure 5.8 : Quartz broyé utilisé

Les propriétés physiques et chimiques du quartz broyé sont présentées dans les Tableaux 5.5 et 5.6.

5.2.7. Fumée de silice (FS)

La fumée de silice utilisée dans cette étude est une poudre fine de couleur grise foncée, composée majoritairement de silice amorphe ultrafine. Elle est issue de l'industrie de production du silicium ou de ses alliages, et répond aux exigences des normes NF P 18-502 et pr NF EN 13263-1. Le produit utilisé est commercialisé sous le nom de *SikaFume*, une silice active micronisée importée, fournie par Sika.



Figure 5.9 : Fumée de silice utilisée

Ses caractéristiques physico-chimiques sont présentées dans les Tableaux 5.5 et 5.6

5.2.8. Laitier broyé (LB)

Le laitier granulé de haut fourneau utilisé dans cette étude, fourni par SIDER El Hadjar à Annaba, est employé comme ajout cimentaire. Il est obtenu par un refroidissement rapide à l'eau, suivi d'une chute dans un bassin, ce qui permet de vitrifier la phase liquide. Ce matériau se présente sous forme de sable gris clair, avec une granulométrie initiale variant de 0 à 5 mm.

Pour atteindre la finesse souhaitée, il a été soumis à huit cycles de broyage de 20 minutes, jusqu'à obtention d'un refus de tamis de 9 %.



Figure 5.10 : Laitier Broyé

Sa composition chimique est détaillée dans les Tableaux 5.5 et 5.6.

5.2.9. Eau de gâchage

L'eau utilisée pour la confection des mélanges de béton et mortier provient du réseau de distribution du laboratoire (eau du robinet). Aucune analyse physico-chimique spécifique n'a été réalisée, mais l'eau est considérée comme propre et exempte d'impuretés susceptibles d'altérer les réactions d'hydratation ou les propriétés mécaniques du béton.

CHAPITRE 5 : Caractérisation des Matériaux et Formulations des Bétons

Tableau 5.5: Composition Chimique

Composition Chimique										
(%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	SO_3	CL-	Na_2O	P.A.F
FS	94	1	1	0,4	1	1	1,5	0,06	0,6	-
LB	35,88	8,38	0,56	30,96	4,54	0,62	1,55	0,01	0,41	2,79
QB	94,33	1,171	1,044	0,184	0,386	0,04	0,04	0,012	0,001	0

Tableau 5.6 : Caractéristiques physiques

Caractéristiques physiques	Masse volumique apparente (g/cm^3)	Masse volumique absolue (g/cm^3)	Surface spécifique (cm^2/g)
Fumée de silice (FS)	0.646	1.56	23000
Laitier broyé (LB)	0.697	2.60	7277.29
Quartz broyé (QB)	0.800	2.63	5714.719

5.3. Méthodologie de formulation des mélanges

Constitution des formulations expérimentales

Après avoir finement broyé le verre, la poudre de verre a été utilisée en substitution partielle du ciment pour formuler trois bétons contenant respectivement 0 %, 15 % et 30 % de verre. Des essais ont été réalisés à l'état frais et durci afin de caractériser les performances et la durabilité de ces bétons modifiés par l'ajout de poudre de verre.

Les trois formulations de béton à poudre réactive (BPR) étudiées sont :

- BPRT : béton à poudre réactive témoin sans poudre de verre,
- BPR15PV : béton à poudre réactive avec 15% de poudre de verre,
- BPR30PV : béton à poudre réactive avec 30% de verre.

Principes de calcul et ratios de formulation

La masse totale du liant (ciment + poudre de verre) est maintenue constante à 900 kg/m³ dans toutes les formulations. Autrement dit, une partie du ciment est remplacée en masse équivalente par de la poudre de verre, sans modifier la quantité totale de liant dans le mètre cube de béton.

Les proportions de l'eau, du superplastifiant (SP) et le laitier broyé (LB) sont exprimées par rapport à la masse totale du liant, car ces matériaux influencent le comportement global de la pâte cimentaire et dépendent donc de la quantité totale de liant réactif.

CHAPITRE 5 : Caractérisation des Matériaux et Formulations des Bétons

En revanche, la fumée de silice (FS), les fibres métalliques (FM), et le quartz broyé (QB) sont dosés par rapport à la masse du ciment uniquement. Cela s'explique par leur rôle spécifique : ils sont conçus pour interagir directement avec le ciment Portland, en optimisant ses propriétés, notamment la compacité, la microstructure et la durabilité.

Une fois tous les matériaux fixés, la masse du sable est ensuite calculée à l'aide de la méthode des volumes absolus. Cette méthode consiste à déterminer la quantité de sable nécessaire pour compléter le volume total du béton à 1 m³, en tenant compte du volume occupé par chaque constituant solide, ainsi que de leur masse volumique absolue, afin de garantir une formulation volumétriquement équilibrée.

Tableau 5.7: Masses et proportions des constituants pour 1 m³ de béton des trois formulations

Masses et proportions des constituants pour 1 m ³ de béton des trois formulations										
Formulation		Ciment	Sable	PV	Eau	LB	FM	SP	FS	QB
BPR1	Proportion	1	1,18	-	0,22	0,1	0,0022	0,0022	0,05	0,05
	En kg/m ³	900	1065	-	198	90	20	20	45	45
BPR15PV	Proportion	0,85	1,38	0,15	0,22	0,1	0,0022	0,0022	0,05	0,05
	En kg/m ³	765	1055	135	198	90	20	20	38,25	38,25
BPR30PV	Proportion	0,7	1,66	0,3	0,22	0,1	0,0022	0,0022	0,05	0,05
	En kg/m ³	630	1046	270	198	90	20	20	31,5	31,5

5.4.Fabrication et mise en place des BPR

5.4.1. Malaxage

La mise en œuvre du BPR ne nécessite pas l'utilisation d'équipements de malaxage haute performance. Les malaxeurs pour béton ordinaire ou mortier sont tout à fait adaptés.

Pour toutes les éprouvettes (prismatiques 4×4×16 cm³, cubiques 15×15×15 cm³, et cylindriques 10×5 cm² et 15×5 cm²), le même mélange a été préparé dans un malaxeur à mortier de 10 litres de la marque Controlab.

La séquence de malaxage, respectée avec une précision de ± 1 seconde, est la suivante :

- Introduction des matériaux secs (ciment, sable, PV, LB, QB, FS) dans le malaxeur.
- Malaxage à sec pendant 2 minutes.
- Ajout des fibres métalliques (FM), puis malaxage pendant 1 minute.
- Incorporation de 2/3 de l'eau, suivie d'un malaxage de 3 minutes.

CHAPITRE 5 : Caractérisation des Matériaux et Formulations des Bétons

- Ajout progressif du reste de l'eau préalablement mélangée au superplastifiant, puis malaxage jusqu'à obtention d'une pâte homogène et fluide (environ 5 minutes).

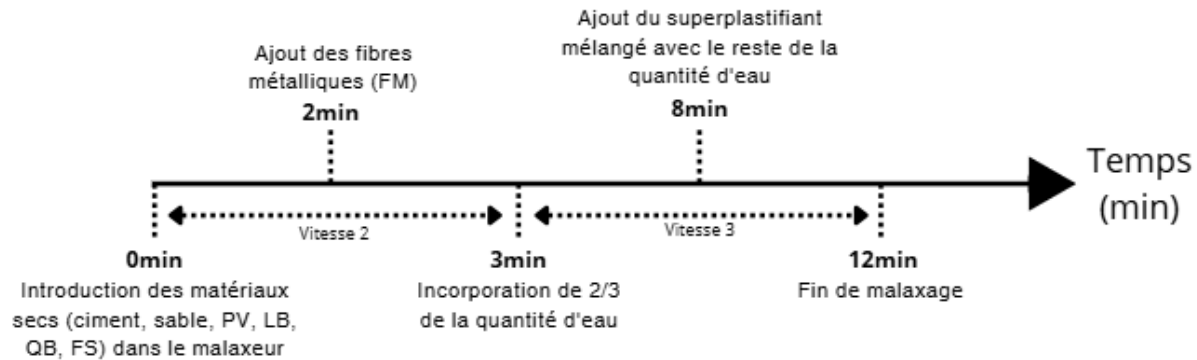


Figure 5.11 : Malaxage du BPR

5.4.2. Coulage

Le béton fraîchement préparé est mis en place par simple coulage, en une seule fois et sans vibration. Les moules sont préalablement graissés afin de faciliter le démoulage.

5.4.3. Conservation

Les éprouvettes ont été conservées dans leurs moules pendant les premières 24 heures. Après démoulage :

- Celles destinées aux essais de retrait ont été placées dans une salle à 50 % d'humidité.
- Le reste des éprouvettes a été immergé dans l'eau dans la salle de conservation jusqu'aux échéances des essais (28, 56 et 90 jours).

5.5. Conclusion

Ce chapitre a détaillé l'ensemble des matériaux utilisés ainsi que la méthodologie adoptée pour la formulation des bétons à poudre réactive (BPR). Divers constituants soigneusement sélectionnés ont été intégrés, notamment : le ciment Portland SARIE 52.5 R, un sable quartzeux, de la poudre de verre recyclée issue de bouteilles vertes, du quartz broyé, du laitier de haut fourneau, de la fumée de silice, des fibres métalliques et un superplastifiant de type MEDAFLOW RE 250.

Trois formulations distinctes ont été élaborées, en maintenant constante la masse totale du liant hydraulique, avec des taux de substitution progressive du ciment par la poudre de verre : 0 %, 15 % et 30 %. Chaque composant a été dosé de manière rationnelle en fonction de son rôle spécifique, afin de garantir un enrobage optimal des grains, une bonne ouvrabilité et une microstructure dense et performante.

Les protocoles de fabrication, de malaxage, de mise en œuvre et de conservation des éprouvettes ont été appliqués avec rigueur pour assurer la fiabilité et la reproductibilité des résultats. Ces formulations serviront de base à l'évaluation expérimentale des propriétés à l'état frais, à l'état durci, ainsi que de la durabilité du BPR modifié, objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 6 :

Résultats et

Interprétations

6.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation, à l'analyse et à l'interprétation des résultats obtenus dans le cadre du programme expérimental. Les essais décrits précédemment ont permis d'évaluer l'effet de la substitution partielle du ciment par de la poudre de verre finement broyée sur diverses propriétés du béton à poudre réactive (BPR), en présence d'autres ajouts minéraux tels que la fumée de silice, le quartz broyé et le laitier.

Les résultats, correspondant aux trois formulations étudiées, BPRT, BPR15PV et BPR30PV, sont organisés selon deux états du béton : à l'état frais et à l'état durci. Les interprétations proposées visent à mieux comprendre les effets observés, notamment sur les performances de durabilité, et à évaluer l'influence globale de la poudre de verre dans ce type de béton innovant.

6.2. Caractéristiques à l'état frais

6.2.1. Etalement au mini cône

L'essai d'étalement permet d'évaluer la maniabilité du béton à l'état frais. Les valeurs obtenues pour les trois formulations sont présentées dans le tableau 6.1 ci-dessous :

Tableau 6.1 : Etalements des trois bétons (cm)

Béton	Etalement (cm)
BPRT	28
BPR15PV	27
BPR30PV	29

L'essai d'étalement a permis d'évaluer la maniabilité des différents bétons. Les valeurs obtenues sont respectivement de 28 cm pour le béton de référence (BPRT), 27 cm pour le béton contenant 15 % de poudre de verre (BPR15PV) et 29 cm pour celui contenant 30 % de poudre de verre (BPR30PV). Ces résultats indiquent une maniabilité globalement équivalente entre les trois formulations, avec une légère amélioration à 30 % de substitution.

Ces observations sont en accord avec celles rapportées par Tagnit-Hamou, Soliman et Omran (2016), qui ont observé un étalement compris entre 270 mm et 290 mm pour des bétons à ultra-hautes performances incorporant de la poudre de verre, avec un rapport eau/liant compris entre 0,225 et 0,250 (Tagnit-Hamou A. et al., 2016)

6.2.2. Masse volumique

La masse volumique du béton frais permet d'évaluer la densité globale du mélange, influencée par la nature et la proportion des constituants. Les résultats sont présentés dans le tableau 6.2.

Tableau 6.2: Masses volumiques des trois bétons

Formulation	Masse volumique (g/cm ³)
BPRT	2,40
BPR15PV	2,32
BPR30PV	2,38

La masse volumique du béton a légèrement varié selon les formulations. On note une valeur de 2,40 g/cm³ pour le béton de référence (BPRT), contre 2,32 g/cm³ pour BPR15PV, soit une diminution de 3,33 %. Et une masse volumique de 2,38 g/cm³ pour BPR30PV, soit une diminution de 0,83 % par rapport au béton de référence. Cette baisse peut être attribuée à la densité plus faible de la poudre de verre (environ 2500 kg/m³) comparée à celle du ciment (environ 3100 kg/m³). Le remplacement du ciment par un matériau plus léger diminue la masse globale du mélange.

Des résultats similaires ont été rapportés par Ibrahim (2023), qui a observé une chute progressive de la masse volumique avec l'augmentation du taux de substitution en poudre de verre, dans une plage allant de 2,35 à 2,45 g/cm³, soit des réductions pouvant atteindre 4 % selon les formulations testées (Ibrahim K. I. M., 2023).

6.3. Caractérisations à l'état durci

6.3.1. Résistance à la compression

L'évaluation de la résistance à la compression a été réalisée sur les trois formulations de béton à poudre réactive (BPR) aux âges de 28, 56 et 90 jours. L'ensemble des essais a été conduit au Laboratoire Central des Matériaux de Cosider à Dar El Beida Alger, conformément aux normes techniques en vigueur.

Les premiers âges, à 28 et 56 jours, donnent un aperçu du comportement à court et moyen termes, tandis que les résultats à 90 jours fourniront une vision plus complète du potentiel à long terme de chaque formulation. Les résultats sont présentés dans la figure 6.1 ci-dessous.

CHAPITRE 6 : Résultats et Interprétations

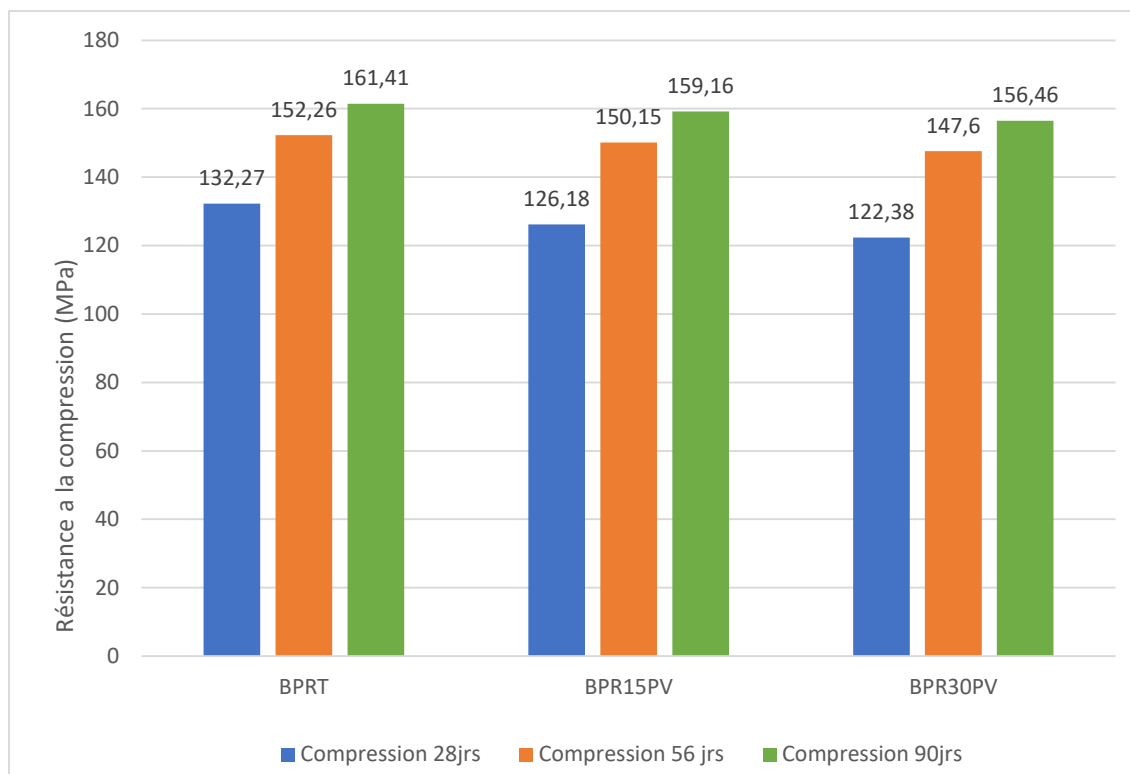


Figure 6.1: Résultats de compression de 28, 56 et 90 jours des trois bétons

Les résultats montrent que la résistance à la compression augmente avec le temps pour toutes les formulations :

- À 28 jours, la formulation BPRT affiche une résistance de 132,27 MPa, contre 126,18 MPa pour BPR15PV et 122,38 MPa pour BPR30PV. Le taux de chute de résistance à la compression est de 4.6% et 7.5% pour les bétons BPR15PV et BPR30PV, respectivement.

Cette baisse peut être attribuée à la réactivité pouzzolanique lente de la poudre de verre. À ce stade, le verre n'a pas encore pleinement réagi pour former les produits cimentaires secondaires tels que les C-S-H.

- À 56 jours, l'écart de performance entre les différentes formulations tend à se réduire. Le béton témoin (BPRT) atteint une résistance de 152,26 MPa, tandis que les formulations avec poudre de verre affichent 150,15 MPa pour BPR15PV et 147,60 MPa pour BPR30PV. Les résistances de BPR15PV et BPR30PV sont donc inférieures respectivement de 1,38 % et 3,06 % par rapport à BPRT. La réduction de ces taux traduit le rétrécissement de l'écart avec le temps et la convergence de la résistance à la compression vers celle du témoin, démontrant la progression du gain de résistance dans les bétons contenant de la poudre de verre.

Cette évolution peut être expliquée par la réaction pouzzolanique de la poudre de verre qui se manifeste dans le temps, à long terme. Avec le temps, les particules de verre amorphes réagissent avec la portlandite (Ca(OH)_2) formée lors de l'hydratation du ciment, produisant des hydrates de silicate de calcium supplémentaires (C-S-H), qui viennent renforcer la matrice du béton.

- À 90 jours, toutes les formulations continuent de gagner en résistance, confirmant l'évolution favorable des performances mécaniques à long terme. Le béton de référence (BPR) atteint une résistance de 161,41 MPa. Les bétons contenant de la poudre de verre affichent respectivement 159,16 MPa pour BPR15PV et 156,46 MPa pour BPR30PV. Par rapport au béton témoin, cela représente une baisse de 1,39 % pour BPR15PV et de 3,07 % pour BPR30PV. L'écart de résistance s'est stabilisé à partir de ce stade. Cela suggère que la réaction pouzzolanique de la poudre de verre a atteint une efficacité optimale entre 28 et 56 jours, avec un ralentissement progressif du rattrapage ensuite.

Cette faible différence confirme la convergence progressive des résistances au fil du temps, traduisant la montée en efficacité de la réaction pouzzolanique de la poudre de verre.

Les résultats montrent que la résistance à la compression augmente régulièrement avec le temps pour toutes les formulations, confirmant le développement progressif des propriétés mécaniques des bétons étudiés.

L'évolution observée met en évidence que, bien que l'ajout de poudre de verre réduise légèrement la résistance initiale à la compression, les formulations modifiées atteignent des performances mécaniques significatives à moyen et long terme.

L'étude de Zeybek et al. (2022), a également rapporté une diminution progressive de la résistance en augmentant le taux de substitution en poudre de verre. Ces données sont conformes avec les résultats trouvés (Zaybek et al., 2022).

Ainsi, malgré une baisse initiale modérée des résistances, les formulations contenant de la poudre de verre présentent une performance compétitive, proche de celle du béton de référence à 90 jours. Cela suggère que la poudre de verre, même à des taux élevés de 30 %, constitue une alternative viable, économique et écologique pour la substitution du ciment dans les bétons à poudre réactive, tout en maintenant des propriétés mécaniques satisfaisantes.

6.3.2. Résistance à la flexion

Des essais de flexion ont été réalisés afin d'évaluer le comportement mécanique des différentes formulations de BPR sous sollicitation de traction indirecte. Ces essais permettent de mieux comprendre la tenue du béton face aux efforts de flexion, qui peuvent être critiques dans certaines applications structurales. Les éprouvettes utilisées sont prismatiques, et les essais ont été conduits conformément aux normes en vigueur.

CHAPITRE 6 : Résultats et Interprétations

Les résultats obtenus pour les formulations BPRT, BPR15PV et BPR30PV sont présentés dans la figure 6.2 ci-dessous. Ils permettent de mettre en évidence l'influence de la substitution partielle du ciment par la poudre de verre sur la résistance à la flexion, en complément de la résistance à la compression étudiée précédemment.

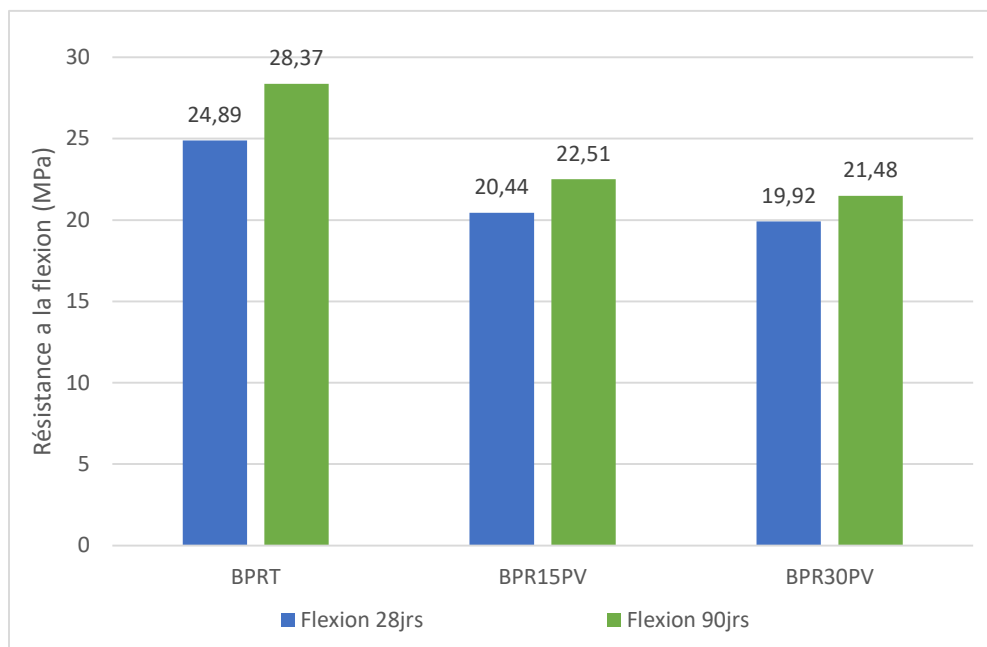


Figure 6.2 : Evolution de la résistance à la flexion des trois formulations à 28 et 90 jours

- À 28 jours, la formulation témoin BPRT présente une résistance à la flexion de 24,89 MPa, tandis que les formulations BPR15PV et BPR30PV atteignent respectivement 19,92 MPa et 20,44 MPa. Cela représente une diminution de 20,0 % pour BPR15PV et 17,9 % pour BPR30PV par rapport au béton témoin.
- À 90 jours, on observe une progression de la résistance à la flexion pour toutes les formulations. Le béton de référence (BPRT) atteint une résistance de 28,37 MPa, tandis que BPR15PV et BPR30PV affichent respectivement 22,51 MPa et 21,48 MPa. Par rapport au béton témoin, cela représente une diminution de 20,6 % pour BPR15PV et de 24,3 % pour BPR30PV.

Ces résultats sont en accord avec les observations de Zeybek et al. (2022), qui ont également noté une diminution de la résistance à la flexion lorsque le ciment est partiellement remplacé par de la poudre de verre. Leur étude montre que plus le taux de substitution augmente, plus la flexion diminue, en raison de la dilution de la matrice cimentaire et de la modification de la microstructure. Cela confirme que, bien que la poudre de verre puisse légèrement influencer la flexion, elle demeure compatible avec la formulation de bétons à haute performance, à condition d'un bon contrôle de la composition (Zaybek et al., 2022).

6.3.3. Retrait

Les essais de retrait ont été menés afin d'évaluer la déformation volumique des différentes formulations de BPR au jeune âge, un paramètre essentiel pour juger du risque de fissuration et de durabilité à long terme. Pour cela, des éprouvettes prismatiques de dimensions $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ ont été utilisées. Elles ont été conservées à l'air libre, dans des conditions de température ambiante contrôlée à $20 \pm 2^\circ\text{C}$, et ce, sans humidification externe, afin de reproduire un environnement de cure à sec.

Les mesures ont été réalisées régulièrement jusqu'à 40 jours afin de suivre l'évolution temporelle du retrait dans les différentes formulations. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 6.3, et permettent de comparer l'influence de la poudre de verre sur le comportement au retrait du BPR.

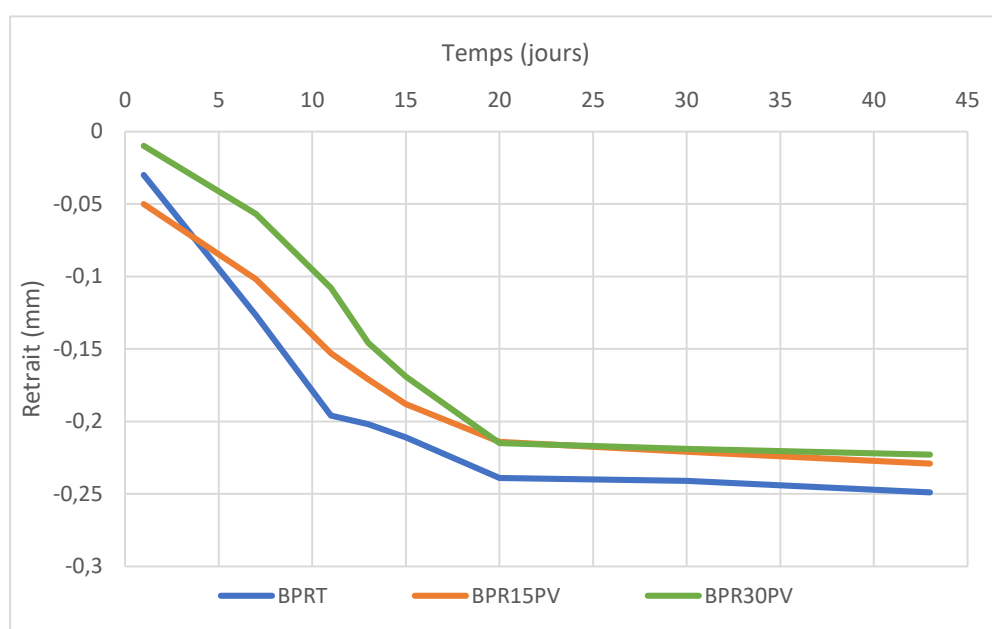


Figure 6.3 : Evolution du retrait des trois bétons (mm)

Les résultats du suivi du retrait montrent une diminution progressive pour l'ensemble des formulations au cours du temps. Le béton de référence (BPRT) présente le retrait le plus important, atteignant $-0,249 \text{ mm}$ à 43 jours. En comparaison, les formulations contenant de la poudre de verre affichent des retraits réduits : $-0,229 \text{ mm}$ pour BPR15PV, soit une diminution de 8,0 %, et $-0,223 \text{ mm}$ pour BPR30PV, correspondant à une réduction de 10,4 % par rapport au béton témoin.

Ces résultats sont cohérents avec les travaux de Chen et al. (2022), qui ont mis en évidence une réduction significative du retrait de séchage dans les composites cimentaires fibrés lorsque la poudre de verre est utilisée en remplacement partiel du ciment. Leur étude montre qu'à 56 jours, l'ajout de 25 % de poudre de verre permet une diminution de près de 40 % du retrait par rapport à la formulation témoin. Cette amélioration est attribuée à deux mécanismes complémentaires : d'une part, les particules fines de verre combler les pores du matériau, et d'autre part, la réaction pouzzolanique avec la portlandite améliore la structure poreuse de la matrice.

Ces observations confirment le potentiel de la poudre de verre pour limiter les déformations différées et améliorer la stabilité dimensionnelle des bétons à haute performance (Chen X. et al., 2022)

6.4. Essais de durabilité

6.4.1. Porosité

L'essai de porosité a été réalisé pour les trois formulations de béton, comme illustré dans la figure 6.4.

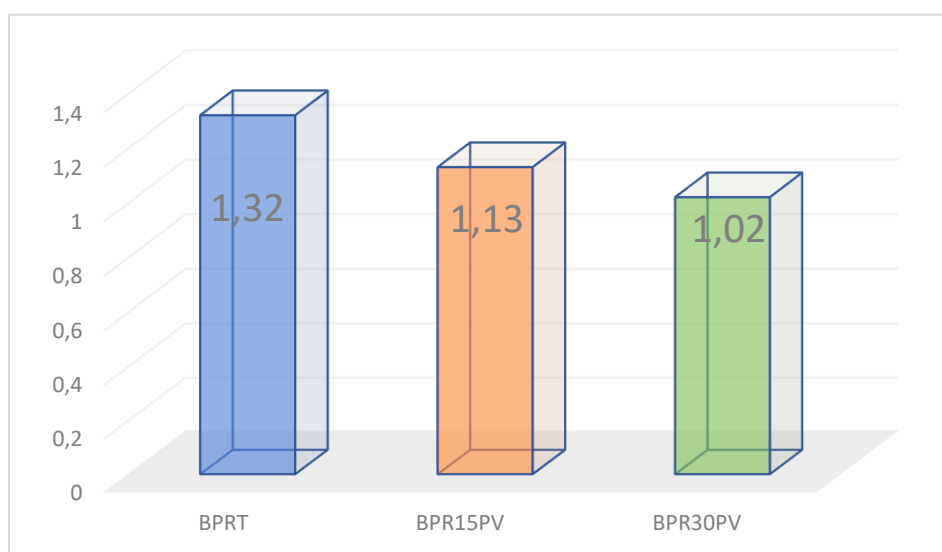


Figure 6.4 : Porosité des trois formulations (%)

Les résultats obtenus révèlent une diminution progressive de la porosité avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par la poudre de verre. Le BPR15PV affiche une porosité de 1,13 %, soit une baisse d'environ 14,4 % par rapport au béton témoin (1,32 %), tandis que le BPR30PV atteint 1,02 %, correspondant à une réduction de 22,7 %.

Ces résultats s'inscrivent dans la tendance observée par Suryaningrat et al. (2018), qui indiquent que les formulations de BPR les plus denses peuvent atteindre des porosités aussi faibles que 1%. Ces niveaux de porosité très bas sont directement liés à une meilleure résistance mécanique et une durabilité accrue, l'augmentation de la teneur en poudre de verre contribue à une réduction notable de la porosité, renforçant ainsi la performance et la durabilité des bétons à poudre réactive (Suryaningrat E. R. et al., 2018)

6.4.2. Absorption par capillarité

L'essai d'absorption capillaire a été mené afin d'évaluer la capacité des différentes formulations de BPR à absorber l'eau par effet de capillarité sur une durée de 24 heures. Les résultats sont présentés dans la figure 6.5.

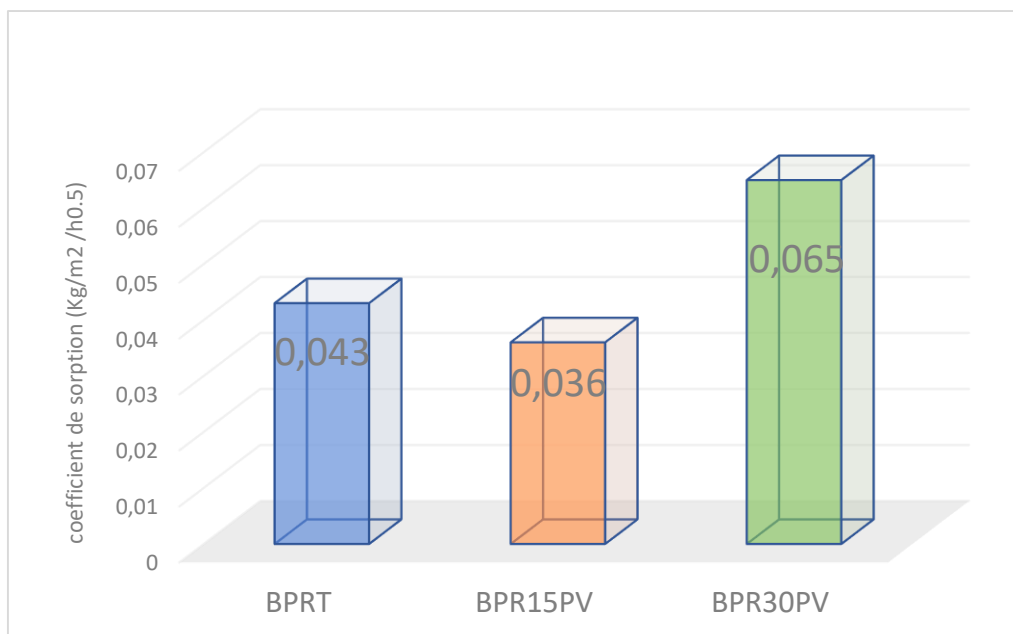


Figure 6.5 : coefficient de sorption ($\text{Kg/m}^2/\text{h}^{0.5}$)

Les résultats de l'essai d'absorption capillaire montrent une variation notable entre les différentes formulations. Le béton témoin présente un coefficient de sorption de $0,043 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0.5}$. En comparaison, la formulation BPR15PV affiche une valeur réduite de $0,036 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0.5}$, soit une diminution de 16,3 % par rapport au béton de référence. Et la formulation BPR30PV enregistre une valeur plus élevée de $0,065 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0.5}$, soit une augmentation de 51,2% par rapport à BPRT. Cette hausse pourrait indiquer une densité microstructurale moins homogène, possiblement due à un taux de substitution trop élevé perturbant l'optimisation de la pâte cimentaire.

Ces valeurs se situent dans l'ordre de grandeur observé par Abbas S. et al. (2015), qui ont mesuré des coefficients de sorption entre $0,0631 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0.5}$ et $0,0432 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0.5}$ pour des bétons ultra-haute performance (Abbas et al., 2015)

6.4.3. Perméabilité a l'eau

L'essai de perméabilité à l'eau a été mené selon les conditions standards sous une pression de $5 \pm 1 \text{ bar}$ pendant une durée de 72 heures. Les éprouvettes testées (BPRT, BPR15PV, et BPR30PV) n'ont présenté aucune pénétration visible de l'eau, même après la période d'exposition complète. Ainsi, la profondeur de pénétration mesurée est de 0 mm pour les trois formulations.

CHAPITRE 6 : Résultats et Interprétations

L'essai a été réalisé à deux reprises. Lors de la première tentative, nous n'avons pas réussi à casser l'éprouvette en deux pour mesurer la profondeur de pénétration, en raison de sa résistance élevée. Pour pouvoir observer la zone exposée à l'eau, nous avons donc refait l'essai, et cette fois, la coupe a été effectuée à l'aide de la scie du laboratoire, permettant une coupe nette et une observation directe de la surface interne : aucune trace d'humidité n'a été détectée.

La figure 6.6 illustre l'éprouvette issue du premier essai : elle présente une fissuration sans rupture complète.

La figure 6.7 montre l'éprouvette du deuxième essai découpée en deux à l'aide de la scie.



Figure 6.6 : Eprouvette du premier essai

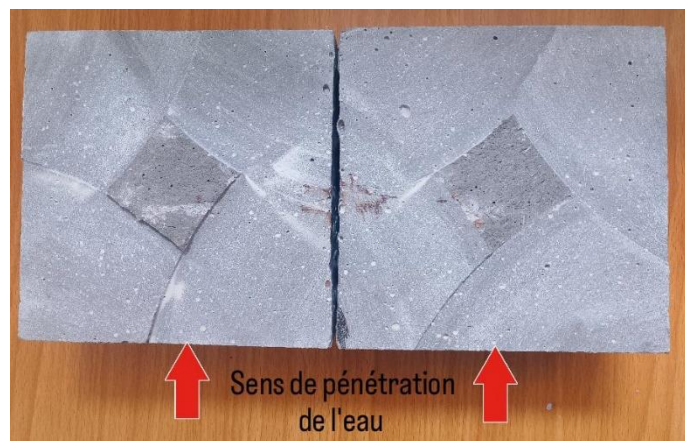


Figure 6.7 : Eprouvette du deuxième essai

Ces résultats mettent en évidence l'imperméabilité remarquable des bétons à poudre réactive utilisés dans ce travail. Ce comportement est en grande partie attribuable à :

- La très faible porosité capillaire,
- La compacité extrême de la matrice cimentaire,
- La présence de fines réactives (fumée de silice, poudre de verre, quartz et laitier broyé) qui remplissent efficacement les vides microscopiques.

La présence de poudre de verre, même à des taux de substitution de 15 % et 30 %, n'a pas altéré la performance en termes d'imperméabilité à l'eau, ce qui confirme l'efficacité de cet ajout minéral dans le contexte de BPR.

Par comparaison, Konieczna et al. (2021) ont mesuré une profondeur de pénétration d'eau comprise entre 10 et 15 mm dans un béton à haute performance (BHP) après 56 jours de cure, soulignant ainsi le niveau supérieur de performance atteint les bétons à poudre réactive (Konieczna K. et al., 2021)

6.4.4. Perméabilité au gaz

L'essai de perméabilité au gaz a été réalisé à l'aide de l'appareil d'essai Cembureau, en appliquant une pression contrôlée sur les éprouvettes et en utilisant de l'Azote. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 6.8.

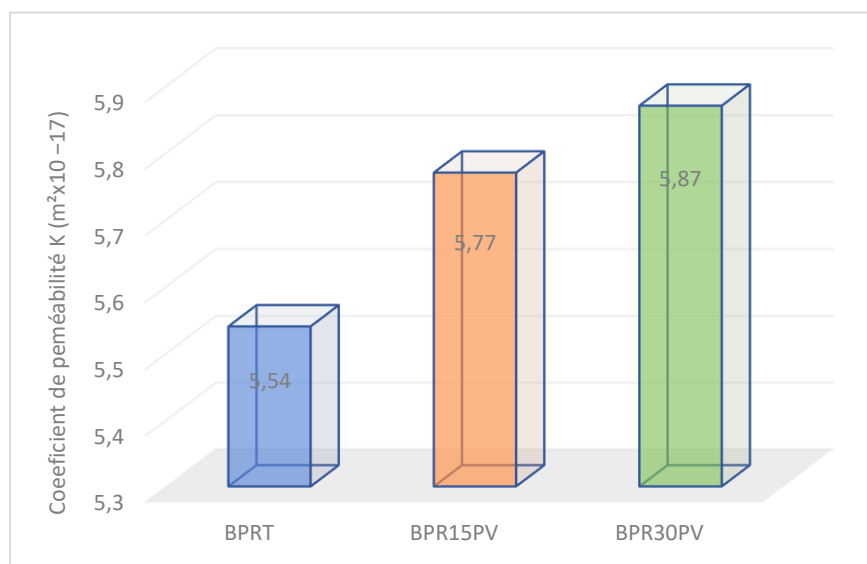


Figure 6.8 : Coefficient de perméabilité au gaz des trois bétons

Les résultats présentés dans la figure 6.8 montrent une légère augmentation du coefficient de perméabilité au gaz avec l'ajout de poudre de verre. Le béton témoin (BPRT) affiche une perméabilité de $5,54 \times 10^{-17} \text{ m}^2$, tandis que la formulation BPR15PV atteint $5,77 \times 10^{-17} \text{ m}^2$, soit une augmentation d'environ 4,2 %. Le béton BPR30PV présente la perméabilité la plus élevée, à $5,87 \times 10^{-17} \text{ m}^2$, correspondant à une hausse d'environ 6,0 % par rapport à BPRT.

Malgré cette hausse modérée, les trois formulations se situent dans la plage des bétons à ultra haute performance (BUHP), comme l'indique l'AFGC (2004), qui classe les BUHP riches en fumée de silice et atteignant 120 MPa dans une plage de perméabilité au gaz allant jusqu'à 10^{-19} m². Dans cette optique, des valeurs de l'ordre de 10^{-17} m² restent très faibles, et témoignent d'une compacité élevée de la matrice (AFGC, 2004).

Ainsi, bien que l'ajout de poudre de verre entraîne une très légère augmentation de la perméabilité au gaz, il ne compromet pas la performance globale du matériau. La poudre de verre demeure compatible avec une formulation BPR durable, en maintenant une microstructure dense et peu perméable aux gaz.

6.4.5. Essai de migration des ions chlorure

L'essai de migration des ions chlorure a été réalisé par Mr. Zakaria SKENDER à l'Université de Médéa, afin d'évaluer la perméabilité des différentes formulations de BPR face à la pénétration des agents chlorure. Pour les trois bétons étudiés, BPRT, BPR15PV et BPR30PV, la valeur du courant est restée constante à 0,01 A pendant toute la durée de l'essai (6 heures), ce qui correspond à une charge totale de 216 Coulombs pour chaque formulation. Étant donné que le diamètre réel des éprouvettes était de 100 mm, un ajustement de la charge a été effectué à l'aide de la formule :

$$Q_s = Q_x \times \left(\frac{95}{x}\right)^2$$

Ce calcul donne une charge corrigée de 194,94 Coulombs, indiquant une très faible perméabilité aux ions chlorure pour les trois bétons selon la norme ASTM C1202. Il est important de noter que l'ajout de poudre de verre, jusqu'à 30 % de substitution, n'a pas eu d'impact négatif sur la résistance à la pénétration des ions chlorure, confirmant ainsi que ce type de substitution peut être envisagé sans compromettre la durabilité face aux agents agressifs. Ces faibles valeurs traduisent une microstructure dense, typique des BPR riches en additions minérales réactives telles que la fumée de silice, le laitier et la poudre de verre (ASTM International, 2019).

6.5. Conclusion

Ce chapitre a présenté et analysé les résultats expérimentaux relatifs aux trois formulations de Béton à Poudre Réactive (BPR), dont deux incluent une substitution partielle du ciment par de la poudre de verre. L'ensemble des essais menés à l'état frais et durci a permis d'évaluer de manière comparative l'influence de cet ajout sur les propriétés physiques, mécaniques et de durabilité du béton.

Les résultats ont montré une légère diminution des résistances mécaniques lorsque le taux de poudre de verre augmente. Cependant, ces résistances évoluent positivement avec le temps et tendent à converger vers celles du béton témoin à 90 jours.

Sur le plan de la durabilité, les formulations modifiées ont montré des performances supérieures, notamment en termes de porosité, de retrait et de perméabilité au gaz. Ces résultats soulignent l'intérêt de la poudre de verre en tant qu'ajout minéral capable d'améliorer la compacité de la matrice cimentaire et de renforcer la résistance du matériau aux agents extérieurs.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

À l'issue de cette étude expérimentale, trois formulations de béton à poudre réactive (BPR) incorporant de la poudre de verre ont été analysées afin d'évaluer leur comportement à l'état frais, durci ainsi que leur durabilité. Les résultats obtenus permettent de dresser un bilan détaillé de l'effet de la substitution partielle du ciment par de la poudre de verre sur les propriétés globales du matériau. Les principaux enseignements tirés de cette recherche sont résumés ci-dessous.

- À l'état frais, l'ouvrabilité des mélanges reste comparable, ce qui montre que l'ajout de poudre de verre ne nuit pas à la maniabilité du béton.
- La masse volumique des formulations tend à diminuer légèrement avec l'introduction de la poudre de verre, traduisant une densité marginalement réduite du matériau, sans altération significative de sa compacité globale.
- Les résultats en compression confirment une progression régulière des résistances avec le temps pour toutes les formulations. Bien que une hausse du taux de remplacement du ciment par la poudre de verre induit une diminution graduelle des performances comparativement au béton de référence, les bétons modifiés atteignent des résistances mécaniques satisfaisantes à long terme, illustrant l'effet pouzzolanique différé de la poudre de verre.
- Les résultats en flexion montrent également une augmentation continue de la résistance pour l'ensemble des formulations. Toutefois, l'augmentation du taux de substitution du ciment par la poudre de verre entraîne une réduction progressive des performances par rapport au béton témoin. Cette baisse reste modérée, et les bétons modifiés conservent des niveaux de résistance à la traction indirecte acceptables à long terme, confirmant que la poudre de verre peut être intégrée sans compromettre significativement le comportement en flexion du matériau.
- Le suivi du retrait indique que les formulations contenant de la poudre de verre présentent des déformations différées réduites, ce qui confirme son rôle bénéfique sur la stabilité dimensionnelle des BPR.
- En ce qui concerne la porosité, une tendance à la diminution est observée avec l'augmentation du taux de poudre de verre. Cela traduit une amélioration de la compacité interne et une microstructure plus fermée.
- Les essais d'absorption capillaire montrent que toutes les formulations, y compris celles modifiées, conservent des niveaux d'absorption très faibles, caractéristiques des bétons à poudre réactive.
- Les résultats de perméabilité à l'eau révèlent une imperméabilité remarquable pour l'ensemble des bétons formulés, soulignant la compacité extrême du matériau, même en présence de poudre de verre.
- La perméabilité au gaz demeure très faible pour l'ensemble des formulations, traduisant la densité élevée des BPR. L'introduction de poudre de verre n'altère pas cette performance, et les légères variations observées suggèrent un maintien de la compacité du réseau poreux, même à des taux de substitution élevés.
- Enfin, l'essai de perméabilité aux ions chlorure confirme que l'ajout de poudre de verre ne compromet pas la capacité du BPR à résister à la pénétration des agents agressifs. Tous les bétons testés se situent dans une classe de perméabilité très faible, ce qui reflète leur excellente durabilité.

CONCLUSION GENERALE

En conclusion, l'intégration de la poudre de verre dans les formulations de BPR permet de maintenir une excellente performance mécanique, tout en améliorant plusieurs aspects de la durabilité, notamment la porosité, l'absorption capillaire et la résistance à la pénétration des fluides. Ces résultats confirment le potentiel de la poudre de verre comme ajout minéral réactif dans la conception de BPR durables et performants.

D'après notre étude, une substitution partielle du ciment jusqu'à 30 % peut être envisagée sans compromettre les performances du béton. Ce taux, déjà conséquent, pourrait même être augmenté dans de futures recherches, ouvrant des perspectives très intéressantes tant sur le plan technique, qu'environnemental et économique.

En effet, remplacer une partie du ciment par de la poudre de verre permet non seulement de réduire la consommation de ciment, une matière première coûteuse et fortement émettrice de CO₂, mais aussi de valoriser un déchet abondant et peu exploité. Cette double action contribue à la lutte contre le réchauffement climatique, en réduisant l'empreinte carbone de l'industrie du béton, tout en s'inscrivant dans une démarche d'économie circulaire.

Par ailleurs, l'utilisation de la poudre de verre dans les BPR pourrait contribuer à démocratiser l'emploi de ce matériau à très haute performance, dont l'usage reste encore marginal en raison de son coût élevé. Si cette substitution permet de réduire son prix de revient, tout en conservant ses performances exceptionnelles, le BPR pourrait devenir une alternative plus accessible et durable pour le génie civil de demain.

Au regard des résultats expérimentaux obtenus, notamment en ce qui concerne les performances en durabilité, il serait pertinent d'envisager une augmentation du taux de substitution du ciment par de la poudre de verre. En effet, les différents essais menés ont démontré que cette substitution n'entraîne pas de dégradation des propriétés durables du matériau ; au contraire, elle contribue à l'amélioration de plusieurs paramètres clés, tels que la réduction de la porosité, la diminution du retrait et une meilleure résistance à la pénétration des gaz. Ces observations suggèrent que des taux de substitution plus élevés pourraient être explorés dans de futurs travaux, dans l'objectif d'optimiser à la fois la durabilité, l'impact environnemental et le coût global des BPR.

Enfin, des études complémentaires seront nécessaires pour explorer des taux de substitution plus élevés, et évaluer leurs effets sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et durables du BPR, ainsi que leur impact économique global.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- Abbas, S. et al. (2015). Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.017>
- AFGC - Association Française de Génie Civil (2004). Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages. <https://www.afgc.asso.fr/app/uploads/2007/10/Indicateurs-durabilite.pdf>
- AFGC - Association Française de Génie Civil. (2009). Le Ductal : matériau d'avenir, le pont de Saint-Pierre-la-Cour. La Technique Française du Béton. Récupéré de <https://www.afgc.asso.fr/app/uploads/2009/12/03-Saint-Pierre-la-Cour.pdf>
- Ahmed, S. et al. (2021). Impact of using different materials, curing regimes, and mixing procedures on compressive strength of reactive powder concrete – A review. Journal of Building Engineering, 44, Article 103238. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103238>
- Anish, V., & Logeshwari, J. (2024). A review on ultra high performance fibre reinforced concrete with nanomaterials and its applications. Journal of Engineering and Applied Science, 71(25). <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00357-8>
- ASTM International. (2019). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration (ASTM C1202-19). ASTM International.
- Aygün, B. F. (2021). An overview of the impact of using glass powder on mechanical, durability properties in self-compacting concrete. Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies, 6(3), 116–123. <https://doi.org/10.29187/jscmt.2021.67>
- Beglarigale, A. et al. (2014). Autoclaved reactive powder concrete: The effects of steel microfibers and silica fume dosage on the mechanical properties. Usak University Journal of Material Sciences, 3(1), 7–14.
- Bektimirova, U. et al. (2019). Optimization of compressive strength of reactive powder concrete for an energy storage pile application using response surface method. In R. K. Agarwal & Y. Tan (Eds.), Materials Science Forum (Vol. 950, pp. 117–122). Trans Tech Publications. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.950.117>
- Blais, P. Y., & Couture, M. (1999). Precast, prestressed pedestrian bridge – world's first reactive powder concrete structure. PCI Journal, 44(5), 60–71. <https://doi.org/10.15554/PCIJ.09011999.60.71>
- Bouchikhi, A. (2020). Optimisation de la valorisation des déchets de verre et de sédiments dans des liants recomposés : Activation – Formulation de mortiers – Stabilisation physico-chimique (Doctoral thesis, École nationale supérieure Mines Télécom Lille Douai, France). <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03279034>
- Bourahla, I., & Bechar, C. (2024). Formulation d'un béton de poudre réactive (BPR) à base de poudre de verre (Mémoire de projet de fin d'études, École Nationale Polytechnique, Alger). <http://repository.enp.edu.dz/jspui/handle/123456789/11091>
- Chadli, M. (2019). Étude des performances des bétons de poudres réactives fibrés (Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie). <http://thesis.univ-biskra.dz/4281/>

BIBLIOGRAPHIE

- Chaïd, R., Kenai, S., Zeroub, H., & Jauberthie, R. (2014). Microstructure and permeability of concrete with glass powder addition conserved in the sulphatic environment. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 19(2), 219–237. <https://doi.org/10.1080/19648189.2014.939310>
- Chand, G., Achintha, M., & Wang, Y. (2025). Challenges and opportunities in using high percentage waste glass powder as cement replacement in concrete. *Materials Circular Economy*, 7, Article 19. <https://doi.org/10.1007/s42824-025-00173-w>
- Chen, F. et al. (2023). Advancing concrete mix proportion through hybrid intelligence: A multi-objective optimization approach. *Materials*, 16(19), 6448. <https://doi.org/10.3390/ma16196448>
- Chen, X., Chen, H., & Tan, W. (2022). Effect of glass powder on the mechanical and drying shrinkage of glass-fiber-reinforced cementitious composites. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01587. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01587>
- Chougan, M. et al. (2020). The influence of nano-additives in strengthening mechanical performance of 3D printed multi-binder geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 250, 118928. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118928>
- Cyr, M., Idir, R., & Poinot, T. (2012). Properties of inorganic polymer (geopolymer) mortars made of glass cullet. *Journal of Materials Science*, 47(6), 2782–2797. <https://doi.org/10.1007/s10853-011-6107-2>
- Dobiszewska, M. et al. (2023). Effect of glass powder on the cement hydration, microstructure and mechanical properties of mortar. *Materials Proceedings*, 13(1), 40. <https://doi.org/10.3390/materproc2023013040>
- Du, H., & Tan, K. H. (2014). Waste glass powder as cement replacement in concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 12(11), 468–477. <https://doi.org/10.3151/jact.12.468>
- Ductal par Holcim. (2019). Grande Mosquée d’Alger : application de Ductal® sur façades, minaret et coupole. Ductal (groupe Holcim). <https://www.ductal.com/fr/grande-mosquee-dalger>
- Ecocem. (2023). Ciment : plus d’ambitions pour moins d’émissions [Rapport]. Ecocem. https://www.ecocemglobal.com/wp-content/uploads/2023/03/FR-06445-Ecocem-%E2%80%93-State-of-the-Cement-Nation-Report-V8_FR.pdf
- Foden, A. J., & McDonagh, M. D. (2016). Benefits of ultra-high performance concrete for the rehabilitation of the Pulaski Skyway. *International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete*, 1(1), Article 91. <https://doi.org/10.21838/uhpc.2016.91>
- Ge, W. et al. (2023). Study on the workability, mechanical property and water absorption of reactive powder concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01777. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01777>
- Grzeszczyk, S. (2024). Rheology of reactive powder concrete mix – a review. *Cement Wapno Beton*, 29(4), 302–323. <https://doi.org/10.32047/CWB.2024.29.4.4>
- Ibrahim, K. I. M. (2023). The effect of using glass powder as cement substitution and its mixing method on the concrete characteristics. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 8(1), Article 27. <https://doi.org/10.1007/s41024-023-00272-8>

BIBLIOGRAPHIE

- Idir, R. (2009). Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique (Thèse de doctorat, INSA Toulouse ; cotutelle avec l'Université de Sherbrooke, Québec, Canada). <https://www.researchgate.net/publication/50193650>
- Idir, R., Cyr, M., Tagnit-Hamou, A. (2010). Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1309–1312. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.030>
- Jiang, Y. et al. (2019). A critical review of waste glass powder – Multiple roles of utilization in cement-based materials and construction products. *Journal of Environmental Management*, 242, 440–449. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.098>
- Jin, Z. & coll (2000). Expansion of bars in mortars prepared by substituting sand with glass cullet. In M. A. Rodrigues (Éd.), *Proceedings of the 5th International Conference on Concrete Technology and Design* (pp. 112–118). Associação Portuguesa de Engenharia (Lisbon, Portugal).
- John, E., Matschei, T., & Stephan, D. (2018). Nucleation seeding with calcium silicate hydrate – A review. *Cement and Concrete Research*, 113, 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.07.003>
- Konieczna, K., Chilmon, K., & Jackiewicz-Rek, W. (2021). Investigation of mechanical properties, durability and microstructure of low-clinker high-performance concretes incorporating ground granulated blast furnace slag, siliceous fly ash and silica fume. *Applied Sciences*, 11(2), 830. <https://doi.org/10.3390/app11020830>
- Kou, S. C., & Xing, F. (2012). The effect of recycled glass powder and reject fly ash on the mechanical properties of fibre-reinforced ultrahigh performance concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2012, Article ID 263243, 8 pages. <https://doi.org/10.1155/2012/263243>
- Lafarge North America. (2009, octobre). Executive summary: Completed North American Ductal® bridges. Federal Highway Administration. https://www.fhwa.dot.gov/hfl/innovations/uhpc_bridges_in_north_america.cfm
- Leghreib, M. N. E., & Tamaoust, A. (2015). Étude des bétons à la poudre de verre (Mémoire de Projet de Fin d'Études, École Nationale Polytechnique, Département de Génie Civil, Alger). Récupéré de <http://repository.enp.edu.dz/xmlui/handle/123456789/2659>
- Meyer, & Coll. (1997). Expansion dans le temps d'éprouvettes de mortiers en fonction du diamètres des grains de verre.
- Mugahed, A. et al. (2022). Recent trends in ultra-high performance concrete (UHPC): Current status, challenges, and future prospects. *Construction and Building Materials*, 352, 129029. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129029>
- National Waste Agency. (2020). Rapport sur l'état de la gestion des déchets en Algérie [Rapport]. National Waste Agency. <https://and.dz/rapport-sur-letat-de-la-gestion-des-dechets-en-algerie/>
- Odero, F. O., Omondi, B., & Wamalwa, C. (2023). Effect of glass powder on durability performance of hardened concrete in aggressive environment. *Andalasian International Journal of Applied Science, Engineering and Technology*, 3(3), 149–157. <https://doi.org/10.25077/aijaset.v3i3.106>

BIBLIOGRAPHIE

- Peng, Y. et al. (2020). Optimization for mix proportion of reactive powder concrete containing phosphorous slag by using packing model. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 18(9), 481–492. <https://doi.org/10.3151/jact.18.481>
- Porat, N. et al. (2015). Re-examination of common extraction and purification methods of quartz and feldspar for luminescence dating. *Ancient TL*, 33(1), 22–30. <https://doi.org/10.26034/la.atl.2015.487>
- Qing-Zang Railway Company (China Railway Qingzang Group Co., Ltd.). (2018). Qinghai–Tibet Railway: 2018 operational report [Rapport annuel]. China Railway Qingzang Group.
- Richard, P., & Cheyrezy, M. (1995). Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1501–1511. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00144-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2)
- Sanjuán, M. Á., & Andrade, C. (2021). Reactive powder concrete: Durability and applications. *Applied Sciences*, 11(12), 5629. <https://doi.org/10.3390/app11125629>
- Sarika, S., & John, E. (2015). A study on properties of reactive powder concrete. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4(11), 110–114.
- Semmana, O. et al. (2025). A systematic review of the strength, durability, and microstructure properties of concrete incorporating glass powder. *Engineering Reports*, 7(1), e70002. <https://doi.org/10.1002/eng2.70002>
- Shao, Y. et al. (2000). Studies on concrete containing ground waste glass. *Cement and Concrete Research*, 30(1), 91–100. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00213-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00213-6)
- Shayan, A., et Xu, A. (2004). Value-added utilisation of waste glass in concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(1), 81–89. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00251-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00251-5)
- Shi, C., & Zheng, K. (2007). A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. *Resources, Conservation & Recycling*, 52(2), 234–247. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.01.013>
- Suryaningrat, R. E., Mushthofa, M., Gruyaert, E., & De Belie, N. (2019). Quantitative analysis on porosity of reactive powder concrete based on automated analysis of back-scattered-electron images. *Cement and Concrete Composites*, 96, 152–166. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.10.019>
- Tagnit-Hamou, A., Soliman, N., & Omran, A. (2016). Green Ultra-High-Performance Glass Concrete. In *First International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete (Vol. 1, Article 35)*. Université de Sherbrooke. <https://doi.org/10.21838/uhpc.2016.35>
- Taha, B., & Nounu, G. (2008). Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement. *Construction and Building Materials*, 22(5), 713–720. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.019>
- Tariq, S. et al. (2020). Durability of high volume glass powder self compacting concrete. *Applied Sciences*, 10(22), Article 8058. <https://doi.org/10.3390/app10228058>
- Torres-Carrasco, M., & Puertas, F. (2015). Waste glass in the geopolymer preparation: Mechanical and microstructural characterisation. *Journal of Cleaner Production*, 90, 397–408. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.074>

BIBLIOGRAPHIE

- Xie, Z., Xiang, W., & Xi, Y. (2003). Effect of aggregate particle size on alkali-silica reaction expansion: evidence of the pessimum phenomenon in glass cullet mortars. *Cement and Concrete Research*, 33(6), 825–833
- Yamada, K., Tanimura, M., & Shimoyama, Y. (2005). Expansion of mortar specimens using different colored glasses. *Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Melbourne, Australia, 2005.
- Yang, H. (2022). A review of research into the interface properties of ultra high performance concrete and normal concrete. *Journal of Engineering Research and Reports*, 23(11), 45–53.
- Yu, Z., Yang, W., & Cai, J. (2023). Effect of glass powder on mechanical properties and durability of modified polystyrene particle concrete. *Materials Research Express*, 10(9), 095101. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/acf759>
- Zeybek, Ö. et al. (2022). Influence of replacing cement with waste glass on mechanical properties of concrete. *Materials*, 15(21), 7513. <https://doi.org/10.3390/ma15217513>
- Zeghichi, L., Mezghiche, B., & Merzougui, A. (2007). L'influence de l'activation du laitier sur le comportement mécanique des bétons. *Lebanese Science Journal*, 8(2), 105–115.
- Zhu, J. et al. (2023). Experimental study on long-term mechanical properties and durability of waste glass added to OPC concrete. *Materials*, 16(17), 5921. <https://doi.org/10.3390/ma16175921>
- Zidol, A. (2014). Durabilité en milieux agressifs des bétons incorporant la poudre de verre (Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Canada). <http://hdl.handle.net/11143/5954>

ANNEXES

Annexe A : Fiche Technique du Ciment Blanc utilisé



50kg

سريع
SARIE



ALGÉRIE

LAFARGE
لافارج



Ciment Portland au calcaire

NA442 CEM II/A-L 52,5 N

AVANTAGES PRODUIT



LE CIMENT GRIS LE PLUS RÉSISTANT DU MARCHÉ ALGÉRIEN :

- Ciment de classe de résistance très élevée avec un faible retrait.
- Résistance élevée à jeune âge.
- Compatibilité accrue avec les différents adjuvants (plastifiants, retardateurs de prise, accélérateurs de prise et de durcissement...).

PARFAITEMENT ADAPTÉ À LA PRÉFABRICATION LÉGÈRE:

- Augmentation de la productivité :
 - Durcissement rapide.
 - Augmentation de la production journalière.
 - Gain en surface de stockage.
- Réduction du taux de casse.

IDÉAL POUR LES BÉTONNAGES PAR TEMPS FROID:

- *Sarie* résiste mieux au cycle gel/dégel qu'un ciment courant.
- Grâce à sa prise rapide, *Sarie* est recommandé pour le travail par temps froid.

DOMAINES D'APPLICATION :



- Préfabrication lourde et légère.
- Infrastructures (fondations) et éléments de superstructures nécessitant un décoffrage rapide permettant d'optimiser les délais de réalisation.
- Bétonnage par temps froid.
- Tous travaux techniques nécessitant des résistances élevées à jeune âge et de hautes performances.



ANNEXES

La composition et les caractéristiques du ciment Sare sont conformes aux normes en vigueur, la NA 442-2013.



DOSAGES

	Ciment 	Sable (sec) 	Gravillons (sec) 	Eau (litres) 
Dosage pour béton	X 1 	+ X8 	+ X11 	+ 25 L
	Ciment 	Sable moyen (sec) 	Gravillons (sec) 	Eau (litres) 
Dosage pour bloc	X 1 	+ X10 	+ X18 	+ 20 à 25 L

Ces formules sont communiquées à titre indicatif dans le cas de l'absence d'une formule étudiée par un laboratoire spécialisée.

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

• Analyses chimiques

	Valeur
Perte au feu (%) (NA 5042)	6 ± 1
Teneur en sulfates (SO ₃) (%)	3.0 ± 0.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	Max 5
Teneur en Chlorures (%) (NA 5042)	Max 0.1

• Temps de prise à 20° (NA 234)

	Valeur
Début de prise (min)	160 ± 60
Fin de prise (min)	220 ± 60

• Composition hypothétique du clinker (Bogue)

	Valeur
C3S (%)	60 - 70
Aluminates tricalciques C3A (%)	8 ± 2

• Résistance à la compression

	Valeur
2 jours (MPa)	≥ 20.0
28 jours (MPa)	≥ 52.5

• Propriétés physiques

	Valeur
Consistance Normale de la pâte de ciment (%)	25.0-31.0
Finesse suivant la méthode de Blaine (NA 231)	3500-5000
Retrait à 28 jours en µm/m	<1000
Expansion en mm	< 3

Ces données sont communiquées à titre indicatif et sont susceptibles de changer en fonction des paramètres de production.

CONSIGNES DE SÉCURITÉ

1- PROTÉGEZ VOTRE PEAU : Portez les équipements adaptés dans vos chantiers: casques, lunettes, gants genouillères, chaussures et vêtements de sécurité.

2- MANUTENTION : levez le sac en pliant les genoux et en gardant le dos droit.



MEMBRE DE
HOLCIM

Conditionnement:



LAFARGE ALGÉRIE

Bureau n°02, 16ème étage, tour Geneva,
les Pins maritimes, Mohammadia, Alger.
tél: + 213 (0) 21 98 54 54
Fax: + 213 (0) 23 92 42 94
www.lafargealgerie.com
dz.satisfaction-clients@lafargeholcim.com
Tél: 021 98 55 55



Annexe B : Caractéristiques physico-chimique du Ciment

Tableau A.1 : Caractéristique physico-chimique du ciment

Caractéristiques	Normes	Résultats	Exigences NA 442	Unité
SiO₂	NA 5042	19,27	/	%
Al₂O₃		4,41	/	%
Fe₂O₃		2,87	/	%
CaO		62,39	/	%
K₂O		0,45	/	%
Na₂O		0,15	/	%
Na₂O-Equ		0,08	/	%
Perte au feu	NA 5042	2,03	/	%
Teneur en MgO		3,14	/	%
Teneur en SO₃	NA 5042	2,41	≤ 3,5	%
Chlorure (Cl⁻)	NA5042	0,04	≤ 0,10	%
SSB	NA231	4121	/	cm²/g
I S T	NA230	143	≥ 60	min
F S T		203	/	min
Expansion	NA230	1,00	≤ 10	mm

Annexe C : Fiche Technique du Superplastifiant utilisé



NOTICE PRODUIT

Sika® ViscoCrete® TEMPO-12

Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi.

INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

Sika® ViscoCrete® TEMPO-12 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.

DOMAINES D'APPLICATION

- Sika® ViscoCrete® TEMPO-12 permet la fabrication de bétons plastiques à autoplacants transportés sur de longues distances et pompés.
- Dans les bétons autoplacants, Sika® ViscoCrete® TEMPO-12 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.

CARACTÉRISTIQUES / AVANTAGES

Sika® ViscoCrete® TEMPO-12 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

- longue rhéologie (>2h),
- robustesse à la ségrégation,
- qualité de parement.

AGRÈMENTS / NORMES

Marquage CE et NF selon la norme NF EN 934-2 tab 3.1 et 3.2.
PV CNERIB : DTEM/108/2017

DESCRIPTION DU PRODUIT

Conditionnement	• Fût de 230 kg • Cubi de 1100 kg • Vrac
Durée de Conservation	12 mois dans son emballage d'origine intact.
Conditions de Stockage	A l'abri du gel. En cas de gel accidentel, le produit retrouve ses qualités d'origine une fois dégelé lentement et réhomogénéisé.
Aspect / Couleur	Liquide brun clair à foncé
Densité	1,06 ± 0,01
Valeur pH	4,5 ± 1,0
Teneur Totale en Ions Chlorure	≤ 0,1 %
Équivalent Oxyde de Sodium	≤ 1 %

Annexe D : Fiche Technique de la fumée de silice utilisée



PRODUCT DATA SHEET

SikaFume® DS

DENSIFIED SILICA FUME

DESCRIPTION

SikaFume® DS is a concrete additive in powder form based on silica fume technology. It is used as a high effective additive for the production of high quality concrete.

USES

SikaFume® DS is used in :

- High performance concrete
- Structural concrete
- Precast concrete
- Shotcrete applications

And other fields of concrete construction where great demands are required on the durability and quality of fresh and hardened concrete.

CHARACTERISTICS / ADVANTAGES

SikaFume® DS contains extremely fine (0.15µm) latently reactive silicon dioxide. The presence of this substance gives following advantages:

- Improved internal cohesion
- Water retention and increased density when set
- Improved pumping properties
- Improved durability
- Improved water tightness
- Improved surface finish
- Increased resistance to abrasion
- Reduced chloride diffusion
- Improved ultimate strength

SikaFume® DS contains no chloride or other potentially corrosive substances.

APPROVALS / STANDARDS

IS 15388, ASTM C1240

PRODUCT INFORMATION

Chemical Base	SiO ₂ content	> 85%
	Alkalies as Na ₂ O	< 1.5 %
	Loss on ignition	< 4 %
	Moisture content	<3 %
	Specific surface area	>15 m ² /gm
Packaging	20 kg bag	
Appearance / Colour	Grey to dark grey powder	
Shelf Life	24 months from date of production if stored properly in undamaged unopened, original sealed packaging.	
Storage Conditions	Store in dry conditions at temperatures between +5°C and +40°C. Protect from direct sunlight and frost.	
Bulk Density	> 500 kg/m ³ Densified	

Annexe E : Fiche Technique du Sable utilisé



FICHE TECHNIQUE DU PRODUIT

Sika® Sable de quartz 0.1 - 0.6 mm

Sable de quartz

DESCRIPTION DU PRODUIT

Sable de saupoudrage, granulométrie 0.1 - 0.6 mm.

EMPLOI

Sable de saupoudrage pour les revêtements Sikafloor® à base de résines synthétiques.

AVANTAGES

- Composant du système de nombreux revêtements Sikafloor®
- Chimiquement inerte
- Facile à mélanger avec de la résine
- Durable et résistant aux intempéries

INFORMATIONS SUR LE PRODUIT

Base chimique	Sable de quartz	
Conditionnement	Sac:	25 kg
Conservation	En emballage d'origine non entamé: 24 mois à partir de la date de production	
Conditions de stockage	Température de stockage entre +5 °C et +30 °C. Entreposer au frais et au sec.	
Aspect/Couleurs	Gris	