

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Civil  
Laboratoire Matériaux de Génie Civil et Environnement  
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

***Formulation d'un béton de poudre réactive  
(BPR) à base de poudre de verre***

**Présenté par**

Imen BOURAHLA & Chahla Nourhene BECHAR

**Sous la direction de**

Dr. Messaouda CHERRAK

Dr. Hamid ZEROUB

**Présenté et soutenu publiquement le 02/07/2024**

**Composition du jury :**

Président du jury	Pr. Abdelkrim BOURZAM	Professeur	ENP
Encadrante	Dr. Messaouda CHERRAK	MCA	ENP
Co-Encadrant	Dr. Hamid ZEROUB	TSM	LAFARGE
Examineur	Dr. Brahim-Khalil BENZAOUZ	MCA	ENP
Invité	Pr. Abderrahim BALI	Professeur	ENP



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Civil  
Laboratoire Matériaux de Génie Civil et Environnement  
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

***Formulation d'un béton de poudre réactive  
(BPR) à base de poudre de verre***

**Présenté par**

Imen BOURAHLA & Chahla Nourhene BECHAR

**Sous la direction de**

Dr. Messaouda CHERRAK

Dr. Hamid ZEROUB

**Présenté et soutenu publiquement le 02/07/2024**

**Composition du jury :**

Président du jury	Pr. Abdelkrim BOURZAM	Professeur	ENP
Encadrante	Dr. Messaouda CHERRAK	MCA	ENP
Co-Encadrant	Dr. Hamid ZEROUB	TSM	LAFARGE
Examineur	Dr. Brahim-Khalil BENAZZOUZ	MCA	ENP
Invité	Pr. Abderrahim BALI	Professeur	ENP

# Dédicaces

*Ce projet de fin d'études est dédié à toutes les personnes incroyables qui ont rendu ce voyage possible.*

*À mon père, qui a fait d'innombrables sacrifices pour que je puisse étudier et atteindre mes rêves. Papa, merci pour tout. Ta force, ton soutien, tes conseils et pour toujours croire en moi m'ont toujours inspiré et donné la motivation de continuer.*

*À ma mère, qui était là pour moi depuis le tout début. Maman, ton amour et ton soutien inconditionnel m'ont porté dans les moments les plus difficiles. Merci pour ton écoute, tes conseils et pour toujours croire en moi.*

*À mes deux petites sœurs Maria et Malak, vous êtes ma vie. Votre énergie et vos sourires m'ont toujours donné de la joie et de la motivation. Et pour mon frère Badro, merci d'avoir toujours été là pour me faire rire et me soutenir. Je suis tellement fier d'être votre grande sœur.*

*À ma copine Lynda, merci d'avoir été mon rocher tout au long de ce parcours. Et à mes besties Sérine et Samira, même si nos chemins ont pris des directions différentes, je n'oublierai jamais les moments précieux que nous avons partagés. Merci pour votre soutien et votre amitié qui comptent tant pour moi.*

*Aux personnes merveilleuses que j'ai rencontrées au cours de mon parcours : Hiba, Lilia, Madina, Ikram, Manel, Medjdou, Smail, Ricci, Brahim, Fouad, ainsi qu'à ma famille élargie, un immense merci. Je suis tellement reconnaissant pour votre aide et votre soutien.*

*Et bien sûr à la meilleure binôme Imen, avec qui j'ai partagé chaque étape depuis le début de notre chemin. Ton énergie, ta persévérance et ton amitié ont rendu ce voyage tellement plus agréable. Ensemble, nous avons surmonté les défis et voici le fruit de notre travail.*

*Ce projet vous est dédié, avec tout mon amour et ma gratitude.*

*Chahla*

# Dédicaces

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce projet par leur amour, leur soutien et leurs encouragements.*

*À ma maman, pour son amour inconditionnel, sa patience infinie et ses encouragements constants qui m'ont portée jusqu'ici. Tu es ma source d'inspiration et de force. Merci de croire en moi, de m'encourager à persévérer et d'être toujours à mes côtés. Ce projet est dédié à toi.*

*À mon papa, pour son soutien indéfectible qui a été une source inestimable de force tout au long de ce parcours.*

*À ma grande sœur Nesrine, modèle de détermination et d'accomplissement. Je suis profondément reconnaissante de t'avoir toujours à mes côtés. Merci du fond du cœur pour tout ce que vous avez fait et continuez à faire pour moi.*

*À ma petite sœur Houria, ainsi qu'à mes frères Younes et Mouhamed Anis, pour leur amour et leur compréhension précieuse qui ont été essentiels à chaque étape de ce chemin.*

*À ma meilleure amie Sonia, complice de tous les instants, pour ta fidélité et ton soutien inconditionnels. Ta présence lumineuse a rendu ce chemin bien plus joyeux.*

*À mes amies Rania, Yasmine, Manel, Ikram, Wilad, Lynda, qui ont partagé avec moi des rires, des larmes et des moments précieux. Votre amitié est un trésor que je garde précieusement dans mon cœur.*

*Enfin, à ma précieuse binôme Chahla, bien plus qu'une partenaire de projet : une source d'inspiration constante. Ton amitié précieuse, ta sincérité, ton soutien et ton calme au milieu des défis ont été indispensables. Merci d'avoir été à mes côtés et d'avoir rendu ce voyage inoubliable et cette réussite possible.*

***Jmen***

# *Remerciements*

Tout d'abord, nous tenons à remercier Dieu tout puissant de nous avoir donné le courage, la force et la patience pour surmonter les défis et accomplir nos objectifs.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à **Mme Messaouda CHERRAK**, encadrante de ce travail, à qui nous sommes profondément reconnaissants pour le temps précieux qu'elle nous a consacré ainsi que pour ses précieux conseils. C'est un plaisir pour nous d'avoir été encadrés par notre chère enseignante et nous avons grandement apprécié ses qualités pédagogiques et scientifiques, sa franchise et sa sympathie. Travailler avec elle a été une expérience enrichissante. Nous lui souhaitons une vie pleine de réussite et de bonheur, tant pour elle que pour ses proches.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à **Mr Hamid ZEROUB**, Co-encadrant de ce projet et Directeur du Support Technique au Centre de Développement de la Construction de l'entreprise LAFARGE. Ce travail n'aurait jamais pu aboutir sans son soutien inestimable. Nous avons eu la chance d'apprendre énormément grâce à lui, et nous lui sommes reconnaissants pour son dévouement constant envers nos travaux. Ses conseils avisés et son accompagnement attentif ont été essentiels à la réussite de ce mémoire. Son dynamisme et sa confiance en nous ont été des sources d'inspiration et de motivation inépuisables.

Nous tenons à exprimer ma profonde gratitude envers les membres du jury, **Mr Abdelkrim BOURZAM**, d'avoir accepté d'assumer la présidence de notre jury. Nous souhaitons également adresser nos chaleureux remerciements à notre examinateur **Mr Brahim Khalil BENZAOUZ**, nous sommes profondément reconnaissant envers lui pour son excellence en tant qu'enseignant. Aussi **Mr Abderrahim BALI** qu'on vous remercie de votre présence lors de notre soutenance.

La réalisation de ce projet de fin d'études a été une occasion qui nous a permis d'échanger des connaissances avec les différentes personnes de Laboratoire ou nous tenons à remercier **Bilel, Nabil, Rafik, Remdane, Redouane, Samir, Houcine, Chalabi** et toute l'équipe de CDL. Leur bienveillance et leur soutien durant notre période de stage ont été d'une grande importance pour nous.

De plus, nous souhaitons exprimer notre reconnaissance à l'ensemble du personnel du département Génie Civil ainsi qu'à toute l'École Nationale Polytechnique. Leur enseignement et leur soutien ont été d'une importance capitale pour notre formation académique. En particulier, nous tenons à mentionner **M. Ahmed GHARNAT**, technicien du laboratoire de l'ENP.

## ملخص

تتميز الخرسانة المساحيق الفعالة بخصائص ميكانيكية استثنائية ومتانة عالية، مما يمثل تقدماً كبيراً في تكنولوجيا الخرسانة. ومع ذلك، فإن تكلفتها العالية وأثرها البيئي الكبير يرجع بشكل رئيسي إلى ارتفاع نسبة الأسمنت. إنتاج الأسمنت يستهلك الكثير من الطاقة وينتج انبعاثات عالية من ثاني أكسيد الكربون وغازات الدفيئة الأخرى، مما يسهم في تغير المناخ. للحد من هذا التأثير، أصبح من الضروري استبدال جزء من الأسمنت بمواد مضافة للأسمنت. في هذه الدراسة يتم استعمال مسحوق الزجاج المستخلص من نفايات الزجاج المطحونة ناعماً كبديل جزئي للأسمنت في هذه الخرسانة، وتقييم تأثيراته بنسبة استبدال 30% على الخصائص المادة في الحالة الطازجة و في حالة التصلب. الهدف هو تقليل البصمة البيئية لهذه الخرسانة مع الحفاظ على أدائه التقني أو تحسينه.

**الكلمات المفتاحية:** الخرسانة المساحيق الفعالة، مسحوق الزجاج المطحون ناعماً، التنمية المستدامة، تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون (CO<sub>2</sub>)، الخصائص الميكانيكية.

## Abstract

Reactive powder concrete (RPC) exhibits exceptional mechanical properties and durability, representing a significant advancement in concrete technology. However, its high costs and substantial environmental impact are primarily due to the high cement content. Cement production is energy-intensive and generates high emissions of CO<sub>2</sub> and other greenhouse gasses, contributing to climate change. To mitigate this impact, replacing a portion of cement with supplementary cementitious materials has become necessary. This study explores the valorization of finely ground glass powder derived from glass waste as a partial substitute for cement in RPC, evaluating its effects up to a 30% replacement rate on the material's fresh and hardened properties. The objective is to reduce the environmental footprint of RPC while maintaining or improving its technical performance.

**Key words:** Reactive powder concrete, glass powder, sustainable development, CO<sub>2</sub> reduction, mechanical properties.

## Résumé

Le béton de poudre réactive (BPR) présente des propriétés mécaniques et une durabilité exceptionnelles, représentant une avancée significative dans la technologie du béton. Cependant, ses coûts élevés et son impact environnemental important sont principalement dus à la forte teneur en ciment. La production de ciment est énergivore et génère des émissions élevées de CO<sub>2</sub> et d'autres gaz à effet de serre, contribuant ainsi au changement climatique. Pour réduire cet impact, le remplacement d'une partie du ciment par des ajouts cimentaires est devenu nécessaire. Cette étude explore la valorisation de la poudre de verre issue de déchets de verre finement broyés comme substitut partiel du ciment dans le BPR, évaluant ses effets jusqu'à un taux de remplacement de 30% sur les propriétés à l'état frais et à l'état durci du matériau. L'objectif est de réduire l'empreinte environnementale du BPR tout en maintenant ou améliorant ses performances techniques.

**Mots clés :** Béton de poudre réactive, poudre de verre, développement durable, réduction de CO<sub>2</sub>, propriétés mécaniques.

# Table des matières

Liste des tableaux.....	
Table des figures.....	
Liste des abréviations.....	
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE.....</b>	<b>15</b>
<b>CHAPITRE 1: Le béton de poudre réactive “BPR ”.....</b>	<b>19</b>
1.1 Introduction.....	20
1.2 Historique sur les bétons et évolution du BPR.....	20
1.2.1 Bétons Ordinaires.....	20
1.2.2 Bétons à ultra hautes performances.....	21
1.3 Définition de BPR.....	24
1.4 Composants du BPR.....	25
1.4.1 Ciment.....	25
1.4.2 Sable.....	27
1.4.3 Fibres métalliques.....	29
1.4.4 Adjuvants.....	30
1.4.5 Ajouts cimentaires.....	30
1.4.6 Eau.....	33
1.5 Caractérisations des BPR à L'état frais.....	33
1.6 Caractérisations des BPR à L'état durci.....	33
1.6.1 Propriétés physiques du BPR.....	33
1.6.2 Propriétés mécanique du BPR.....	34
1.6.3 Durabilité du béton de poudre réactive.....	37
1.7 Méthodes de formation du BPR.....	40
1.7.1 Les principes de base de formulation du BPR.....	40
1.7.2 Méthode de Bonneau pour la formulation du BPR.....	41
1.7.3 Exemple de formulation en Laboratoire.....	41
1.8 Domaines d'applications du BPR.....	42
1.9 Avantages et inconvénients.....	42
1.9.1 Avantages.....	42
1.9.2 Défis et limitations.....	43
1.10 Conclusion.....	44
<b>CHAPITRE 2 : Le Verre et la Poudre de Verre.....</b>	<b>45</b>
2.1 Introduction.....	46
2.2 Le Verre.....	46
2.2.1 Définition.....	47
2.2.2 Formation du verre.....	47
2.2.3 Constituants du verre.....	48
2.2.4 Propriétés du verre.....	48
2.2.5 Différents verres utilisés dans le bâtiment.....	50
2.3 La Poudre de Verre.....	52
2.3.1 Définition.....	52
2.3.2 Effets de la poudre de verre.....	52



2.3.3 Influence de la poudre de verre sur les caractéristiques des ciments.....	53
2.4 Influence de la Poudre de Verre sur les Propriétés du Béton.....	55
2.4.1 À l'état frais.....	55
2.4.2 À l'état durci.....	55
2.5 Exemples d'utilisation de la poudre de verre dans la construction.....	57
2.6 Conclusion.....	60
<b>CHAPITRE 3 : Effets de Poudre de verre sur le BPR.....</b>	<b>61</b>
3.1 Introduction.....	62
3.2 Influence de la poudre de verre sur les caractéristiques du BPR à l'état frais.....	62
3.3 Influence de la poudre de verre sur les caractéristiques du BPR à l'état durci.....	64
3.3.1 Influence de la poudre de verre sur la résistance à la compression.....	64
3.3.2 Influence de la poudre de verre sur la résistance à la flexion.....	66
3.3.3 Influence de la poudre de verre sur le module d'élasticité.....	66
3.3.4 Influence de la poudre de verre sur l'absorption d'eau.....	66
3.4 Conclusion.....	67
<b>CHAPITRE 4 : Programme expérimental et Matériaux Utilisés.....</b>	<b>68</b>
4.1 Introduction.....	69
4.2 Plan expérimental.....	69
4.3 Méthodes d'essais.....	71
4.3.1 Essais sur sable.....	71
4.3.2 Essais sur Poudre.....	73
4.3.3 Essais sur béton frais.....	75
4.3.4 Essais sur béton durci.....	76
4.4 Matériaux Utilisés.....	81
4.4.1 Poudre de verre finement broyée (PV).....	81
4.4.2 Ciment Blanc.....	82
4.4.3 Sable Blanc.....	83
4.4.4 Fibre métallique (FM).....	84
4.4.5 Superplastifiant (SP).....	84
4.4.6 Quartz broyé (QB).....	85
4.4.7 Fumées de silice (FS).....	85
4.4.8 Laitier broyé (LB).....	86
4.4.9 Eau.....	87
4.5 Conclusion.....	87
<b>CHAPITRE 5 : Formulation des BPR.....</b>	<b>88</b>
5.1 Introduction.....	89
5.2 Formulation.....	89
5.2.1 Optimisation du dosage de Laitier et de PV.....	90
5.2.2 Optimisation du dosage d'eau et d'adjuvant.....	91
5.3 Fabrication et mise en place des BPR.....	92
5.3.1 Malaxage.....	92
5.3.2 Coulage.....	93
5.3.4 Conservation.....	94
5.4 Conclusion.....	95

<b>CHAPITRE 6 : Résultats et Interprétations.....</b>	<b>96</b>
6.1 Introduction.....	97
6.2 Caractéristiques instantanées à l'état frais.....	97
6.3 Caractéristiques à l'état durci.....	98
6.3.1 Résistance à la Compression.....	98
6.3.2 Résistance à la Flexion.....	101
6.3.3 Résistance à la traction par fendage.....	104
6.3.4 Retrait à l'air des prismes de béton.....	106
6.3.5 Absorption d'eau.....	107
6.3.6 Absorption capillaire par immersion.....	108
6.4 Conclusion.....	109
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE.....</b>	<b>110</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>113</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>118</b>
Annexe A : Fiche Technique du Ciment Blanc utilisé.....	119
Annexe B : Caractéristiques physico-chimique du Ciment.....	120
Annexe C : Fiche Technique du Superplastifiant utilisé.....	120
Annexe D : Fiche Technique du Laitier utilisé.....	122

## Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Les composants chimiques du sable afroquartz.....	28
Tableau 1.2 : Influence du laitier sur les propriétés des matériaux cimentaires [Olga, 1996].....	32
Tableau 1.3 : Caractéristiques mécaniques des BPR [Richard_1995].....	34
Tableau 1.4 : Caractéristiques mécaniques des BPR [Dugat, 1995].....	34
Tableau 1.5 : Principales caractéristiques de durabilité du BPR 200 [Zenati ,2007].....	38
Tableau 1.6 : Formulation types de BUHP (Bonneau, 1997) (Alepari et al, 1997).....	41
Tableau 1.7 : Conception technique et architecturale du BPR.....	42
Tableau 2.1 : Composition des verres industriels (% en poids) [Verre, le matériau ; TBA1960 V1].....	48
Tableau 2.2 : Valeurs de densité des différents types de verre [Zhu, H., & Byars, E.A. 2004].....	48
Tableau 2.3 : Propriétés physiques du verre [Zhu, H., & Byars, E.A. 2004] [NF EN 1097-6].....	48
Tableau 2.4 : Propriétés à l'état frais des bétons avec la poudre de verre [shayan et coll, 2005].....	54
Tableau 3.1 : Propriétés à l'état frais des mélanges de BPR contenant de la PV [Nancy,2016].....	61
Tableau 4.1 : Récapitulatif des essais effectués.....	70
Tableau 4.2 : Caractéristiques de Ciment Portland MALAKI SUPER BLANC 52,5 NA 442 - LAFARGE.....	81
Tableau 4.3 : Les caractéristiques physiques du sable.....	82
Tableau 4.4 : Les Caractéristiques des fibres métalliques.....	83
Tableau 4.5 : Les caractéristiques du superplastifiant MEDAFLOW RE 250.....	84
Tableau 4.6 : Composition chimique et physique exprimée en % pondéraux des additions utilisées.....	85
Tableau 5.1 : L'Étalement mesuré à chaque mélange de mortier.....	90
Tableau 5.2 : Compositions des 3 formulations des BPR.....	91
Tableau 6.1 : Les caractéristiques des 3 BPR à l'état frais.....	96
Tableau A.1 : Caractéristiques physico-chimique du Ciment, Holcim, LAFARGE.....	120

## Table des figures

Figure 1.1 : Evolution des bétons depuis les années 1960.....	21
Figure 1.2 : Exemples de réalisations avec BUHP.....	22
Figure 1.3 : La passerelle piétonne à Sherbrooke (Québec, Canada), 1997.....	23
Figure 1.4 : Élévation de la passerelle.....	23
Figure 1.5 : Section courante.....	23
Figure 1.6 : La Grande Mosquée d'alger, Algérie; Ductal.....	24
Figure 1.7 : L'action «réduction d'eau» ou «l'effet fluidification» [Dakhmouche, 2009].....	30
Figure 1.8 : Microstructure de la Fumée de Silice.....	31
Figure 1.9 : Comportement du BPR en traction directe [Adeline, 1999].....	36
Figure 1.10 : Retrait autogène des échantillons simples et renforcés par des fibres métalliques [Loukili, 1999].....	37
Figure 1.11 Courbes de retrait du BPR [Adeline,1999].....	37
Figure 1.12 : Porosité comparée du BPR [Adeline, 1999].....	38
Figure 2.1 : Évolution de la production des Déchets Ménagers et Assimilés (DMA) en Algérie [Caractérisation DMA, 2014].....	46
Figure 2.2 : Composition moyenne nationale des Déchets Ménagers et Assimilés (DMA) en 2014 [Caractérisation DMA, 2014].....	46
Figure 2.3 : Structure du verre - Construction aléatoire.....	48
Figure 2.4 : Les différents verres utilisés dans le bâtiment.....	51
Figure 2.5 : Le verre et la poudre de verre.....	52
Figure 2.6 : Schéma technologique de préparation de la poudre de verre.....	52
Figure 2.7 : Résultats d'essai d'expansion sur éprouvettes de mortiers avec du verre [Meyer et al., 1997]..	53
Figure 2.8 : Activité pouzzolanique de différents ajouts cimentaires [Zeroub et al., 2015].....	54
Figure 2.9 : Chaleur d'hydratation totale du ciment avec et sans PV à une température constante 25°C pendant 72 heures [Xiaolin et al., 2014].....	55
Figure 2.10 : Comparaison de résistance entre la fumée de silice et la poudre de verre [Shayan et al., 2004].....	56
Figure 2.11 : Expansion due à la RAG sur des mortiers contenant des particules de verre de différentes tailles [Shayan et al., 2004].....	56
Figure 2.12 : Pénétrabilité des ions chlorure [Schwarz et al., 2008].....	57
Figure 2.13 : Projet MBAM, Montréal.....	58
Figure 2.14 : Résistance à la compression (MPa).....	58
Figure 2.15 : Résistance à la Traction (MPa).....	58
Figure 2.16 : Projet rue Poutrincourt, Montréal.....	59
Figure 2.17 : Boulevard Gouin est, Arrondissement Ahuntsic-Cartierville - 01 août 2014.....	59
Figure 2.18 : 16ème avenue, Arrondissement RDP-PAT - 15 août 2014.....	59
Figure 2.19 : Rue Chénier, Arrondissement Anjou - 25 septembre 2014.....	59
Figure 2.20 : Square Cabot 15% PV (début 2014 - fin 2015).....	59
Figure 2.21 : Rue CEDAR, De la rue Ramesay et chemin de la côte-des-Neiges Cabot ( 4000 m2).....	59
Figure 3.1 : L'influence du % de PV sur l'étalement du BPR [Zainab, 2022].....	63
Figure 3.2 : L'influence du % de PV sur l'étalement du BPR [Tran et al,2023].....	63
Figure 3.3 : Effet du PV sur la résistance à la compression à différents âges après durcissement normal (NC) et durcissement accéléré (HC) [Soliman et Tagnit, 2016].....	64
Figure 3.4 : Effet du PV sur la résistance à la compression à 28j [Tran et al,2023].....	64
Figure 3.5 : Influence de %PV sur la résistance à la compression en fonction de temps [Hussain et Aljalawi, 2022].....	65
Figure 3.6 : Résistance à la compression en fonction du pourcentage de %PV [Majid ,2022].....	65
Figure 3.7 : Influence de %PV sur la résistance à la flexion en fonction de temps [Hussain et Aljalawi,	

2022].....	66
Figure 3.8 : Module d'élasticité en fonction du % de PV [Majid , 2022].....	66
Figure 3.9 : Relation entre l'absorption (%) et l'âge pour le BPR [Hussain et Aljalawi, 2022].....	67
Figure 4.1 : Organigramme de plan expérimental.....	70
Figure 4.2 : Tamiseurs pour Granulométrie.....	72
Figure 4.3 : Mesure de l'équivalent de sable (ES) et l'équivalent de sable Visuel (ESV).....	72
Figure 4.4 : Essai de masse volumique réelle par Pycnomètre.....	73
Figure 4.5 : Essai au bleu de méthylène.....	73
Figure 4.6 : Broyeur à boulets.....	74
Figure 4.7 : Essais SSB.....	74
Figure 4.8 : Tamiseurs pour Refus.....	75
Figure 4.9 : Essai d'étalement au mini-cône.....	75
Figure 4.10 : Dimensions du mini-cône utilisé.....	76
Figure 4.11 : Mesure de la température du béton.....	76
Figure 4.12 : Écrasement des éprouvettes.....	77
Figure 4.13 : Essai de flexion à 3 points.....	78
Figure 4.14 : Essai de fendage (a) Schéma de principe (b) Diagramme des contraintes dans la section de l'éprouvette.....	78
Figure 4.15 : Essai de fendage sur éprouvette 70 x 160.....	78
Figure 4.16 : Appareillage pour la mesure du retrait.....	79
Figure 4.17 : Les éprouvettes et les plots de retrait en laiton.....	80
Figure 4.18 : Essai d'absorption d'eau par capillarité.....	80
Figure 4.19 : Bouteilles de Verre utilisés.....	81
Figure 4.20 : Poudre de verre à 6800 $cm^2/g$ .....	81
Figure 4.21 : CIM MALAKI SUPER BLANC 52.5 R.....	82
Figure 4.22 : Sable Blanc utilisé (0 - 1,25 mm), Afroquartz, Tébessa.....	83
Figure 4.23 : La courbe granulométrique du sable.....	84
Figure 4.24 : Fibres métalliques utilisées.....	84
Figure 4.25 : Superplastifiant utilisé.....	85
Figure 4.26 : Quartz broyé utilisé.....	85
Figure 4.27 : Fumé de silice utilisée.....	86
Figure 4.28 : Laitier Broyé.....	86
Figure 5.1 : Méthode de compacité.....	90
Figure 5.2 : Optimisation du dosage de Poudre de Verre dans le BPR30PV.....	90
Figure 5.3 : Optimisation du dosage de Laitier Broyé dans le BPR20L.....	91
Figure 5.4 : Optimisation du dosage de Laitier Broyé dans le BPR30PV.....	91
Figure 5.5 : Malaxeur utilisé.....	93
Figure 5.6 : Protocole de malaxage des BPR.....	93
Figure 5.7 : Moules et éprouvettes utilisés pendant les essais.....	94
Figure 5.8 : Les éprouvettes conservées dans l'eau.....	94
Figure 6.1 : L'ensemble des essais effectués sur les 3 BPR à l'état frais.....	97
Figure 6.2 : Evolution de la résistance à la compression des trois BPR en 2 , 28 et 75 jours.....	99
Figure 6.3 : Fissures causées par l'essai de compression sur les éprouvettes cubiques des 3 bétons (5x5x5 $cm^3$ ) à 2j, 28j et 75j.....	100
Figure 6.4 : Evolution de la résistance à la flexion des trois BPR en 2, 28 et 75 jours.....	101
Figure 6.5 : Fissures causées par l'essai de flexion sur les éprouvettes prismatiques 3 bétons (4x4x16 $cm^3$ ) à 2j, 28j et 75j.....	102
Figure 6.6 : La relation entre la résistance à la compression et la résistance à la flexion.....	103

Figure 6.7 : Evolution de la résistance à la traction par fendage des 3 BPR en 28 jours.....	104
Figure 6.8 : Comparaison de la résistance en traction obtenue par fendage et par flexion des BPR à 28 jours.....	105
Figure 6.9 : Fissures causées par l'essai de traction par fendage sur les éprouvettes cylindriques des 3 bétons (7x16 cm <sup>2</sup> ) à 28j.....	105
Figure 6.10 : Retrait à l'air des trois béton en fonction de temps.....	106
Figure 6.11 : Perte de masse des bétons en fonction du temps.....	107
Figure 6.12 : Capacité d'absorption d'eau des différentes formulations du BPRF.....	107
Figure 6.13 : Perméabilité capillaire des différentes formulations du BPR.....	108

## Liste des abréviations

**BPR** : Béton de Poudres Réactives.

**BO** : Béton ordinaire.

**BUHP** : Bétons à ultra hautes performances.

**BAP** : Béton autoplaçant.

**BHP** : Béton hautes performances

**BTHP** : Béton très hautes performances.

**BFUHP** : Béton fibré à ultra haute performance.

**PV** : Poudre de Verre.

**CIM** : Ciment.

**LB** : Laitier broyé.

**FM** : Fibres métalliques.

**FS** : Fumée de silice.

**E/C** : Le rapport Eau/Ciment.

**SSB** : Surface Spécifique Blaine.

**VB** : Valeur de bleu.

**RAS** : les Réactions Alkali-Silica.

**BPRT** : Béton de poudre réactive Témoin (Béton de référence).

**BPR20L** : Béton de poudre réactive avec addition de 20% de Laitier de haut fourneau.

**BPR30PV** : Béton de poudre réactive avec substitution de 30% de poudre de verre et addition de 10% de Laitier.

# ***INTRODUCTION GÉNÉRALE***



### Contexte et Problématique

Dans le domaine de la construction, le béton conventionnel ou ordinaire (BO) a longtemps été le matériau de référence le plus utilisé dans le monde. Cependant, il présente des inconvénients majeurs, tels que la corrosion de l'armature en acier et une résistance structurelle limitée, nécessitant des interventions de maintenance fréquentes. Face à ces défis, la recherche vers des bétons de plus en plus performants se poursuit depuis les années 1980. On trouve dans le monde entier un nombre croissant de réalisations en Bétons Hautes Performances (BHP 60 - 80 MPa) puis Très Hautes Performances (BTHP 80 - 100 MPa) en particulier généralisées pour les ouvrages d'art. Les Bétons de Poudre Réactive (BPR) ou Béton à Ultra Hautes Performances (BUHP > 150 MPa) présentent des propriétés remarquables de performances mécaniques, mais aussi de durabilité.

Le béton ultra-haute performance (BUHP) sous forme de béton de poudre réactive (BPR) est mondialement reconnu pour ses caractéristiques mécaniques supérieures, atteint fréquemment des résistances à la compression de 150 MPa, ainsi qu'une résistance à la flexion allant de 15 à 40 MPa. En outre, il possède une énergie de fracture pouvant atteindre 1200 J/m<sup>2</sup> et un module d'élasticité de 50 GPa, avec un fluage et un retrait à long terme insignifiants [Richard et Cheyrezy, 1995]. Le BPR est également remarquable pour sa capacité à résister aux cycles de gel-dégel et à l'écaillage sans présenter de dommages visibles, et il est pratiquement imperméable à la pénétration des ions chlorure.

Les premières recherches sur le béton de poudre réactive (BPR) ont été initiées en France et au Canada dans les années 1990, en se concentrant sur l'optimisation granulaire des compositions de ce type de béton. Bien que ces bétons soient prometteurs, leur application reste limitée et marginale, principalement en raison de leur coût élevé. À ce jour, ils ne sont utilisés que dans un nombre restreint de pays. La première utilisation notable du BPR a été la construction de la passerelle piétonnière de Sherbrooke en 1997, marquant une étape importante dans l'application de ce matériau innovant. Actuellement, les pays qui utilisent le BPR se réfèrent principalement aux recommandations françaises (AFGC - SETRA), issues du guide de conception des bétons ultra-haute performance (BUHP) publié en 2002.

Ces nouveaux types de béton ouvrent de nouvelles perspectives de construction, là où les bétons traditionnels ne répondent plus aux exigences techniques ou architecturales. Ils sont particulièrement adaptés pour les grands ouvrages, les bétons architecturaux, les environnements agressifs, le respect des paysages et les réparations nécessitant une réduction de poids. Sans nécessiter d'équipements spécifiques pour leur fabrication, ces bétons offrent des qualités exceptionnelles :

- Le béton de poudre réactive (BPR) présente une résistance à la compression jusqu'à quatre fois supérieure à celle des bétons conventionnels, permettant ainsi une réduction de l'épaisseur des éléments en béton.
- Il est autoplaçant et s'adapte facilement aux formes complexes des moules.
- Il permet de réduire ou d'éliminer le renforcement passif dans les éléments structuraux grâce à l'utilisation de fibres d'acier.

Le béton de poudre réactive (BPR) se distingue par une teneur en ciment élevée, allant de 800 à 1000 kg/m<sup>3</sup> [Richard et Cheyrezy, 1994; 1995].

Toutefois, la grande quantité de ciment utilisée impacte non seulement le coût de production et la consommation de ressources naturelles, mais également les conditions environnementales à travers les émissions de CO<sub>2</sub> et l'effet de serre. La fabrication du ciment requiert une importante quantité d'énergie, ce qui entraîne la libération massive de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et d'autres gaz à effet de serre. Au cours des deux derniers siècles, les niveaux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère ont augmenté d'environ 30 %, soulignant l'urgence de prendre des mesures pour atténuer cet impact environnemental.

Parmi les gaz à effet de serre, le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) est le plus connu, mais il n'est pas le plus nocif. Le méthane (CH<sub>4</sub>), par exemple, est beaucoup plus toxique pour l'environnement. La particularité du CO<sub>2</sub> réside dans les volumes émis, qui surpassent largement ceux de tout autre gaz polluant. De plus, le CO<sub>2</sub> reste dans l'atmosphère pendant environ cent ans, tandis que le méthane ne persiste qu'une douzaine d'années.

Face à ces enjeux, des chercheurs et des scientifiques du monde entier se mobilisent pour trouver des solutions visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique, tout en tenant compte des considérations économiques. Dans le but de produire un béton plus respectueux de l'environnement et de favoriser le concept de "béton durable", il est essentiel d'envisager la substitution d'une partie du ciment traditionnellement utilisé dans le BPR par d'autres matériaux locaux et écologiquement sûrs.

### **But de la recherche**

Dans le contexte actuel où la durabilité et la protection de l'environnement occupent une place centrale dans l'industrie de la construction à l'échelle mondiale, l'attention se porte de plus en plus sur le recyclage des déchets en vue de produire des matériaux de construction respectueux de l'environnement. Ces matériaux doivent non seulement bénéficier des avancées technologiques les plus récentes, mais également satisfaire à des critères écologiques rigoureux et être économiquement viables pour être largement adoptés.

Cependant, une proportion considérable de déchets de verre reste non recyclée en raison de divers facteurs tels que leur fragilité, leur coloration ou les coûts élevés associés à leur traitement. Ces déchets de verre sont souvent destinés à des sites d'enfouissement, ce qui est peu souhaitable étant donné leur caractère non biodégradable et leur impact environnemental. Le verre, réputé pour sa capacité de recyclage sans altération majeure de ses propriétés physiques et chimiques, a été l'objet d'études récentes visant à explorer son utilisation en tant qu'additif cimentaire alternatif ou comme granulats ultrafins dans le béton, en fonction de leur distribution granulométrique et de leur composition chimique.

La poudre de verre, obtenue par le broyage de déchets de verre non recyclés, est maintenant considérée comme une ressource innovante dans le domaine du béton. La poudre de verre (PV), caractérisée par une granulométrie typique de 38 à 45 µm, peut être intégrée en tant que matériau pouzzolanique dans le béton. Son incorporation, à des ratios similaires à ceux des ajouts issus de sous-produits (25 % et 50 %), améliore la porosité, la taille des pores et modifie la minéralogie des hydrates de ciment, contribuant ainsi à augmenter la durabilité globale du béton [Zidol et al., 2012].

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le principal objectif de cette recherche est de développer un BPR innovant, respectueux de l'environnement et durable utilisant le matériau de verre sous forme de poudre broyée. Cette recherche s'est concentrée sur 2 axes principaux :

- Exploration des effets des additifs minéraux tels que le laitier granulé, la poudre de verre sur les caractéristiques des bétons formulés.
- Évaluation des propriétés physiques et mécaniques des bétons incorporant des additifs et des matériaux utilisés.

### **Plan du mémoire**

La première partie est une synthèse bibliographique composée de 3 chapitres :

1. Le premier chapitre fournit une synthèse bibliographique sur les bétons à ultra hautes performances et les bétons de poudre réactive fibrés, en présentant les travaux antérieurs, les origines, l'évolution, les composants principaux, ainsi que les méthodes de caractérisation et de formulation. Il établit les bases pour comprendre en profondeur ce matériau innovant et ses applications dans la construction.
2. Le deuxième chapitre traite du verre et de la poudre de verre, en détaillant leurs propriétés, leur utilisation et leur impact sur la performance des matériaux composites dans lesquels ils sont intégrés.
3. Le troisième chapitre est consacré aux effets de la poudre de verre sur le béton de poudre réactive (BPR), en analysant son influence sur les propriétés mécaniques et durables de ce matériau.

La deuxième partie est consacrée à l'étude expérimentale et composée de 3 autres chapitres:

4. Le quatrième chapitre aborde le programme expérimental et les matériaux utilisés, avec des essais de caractérisation des matériaux ayant pour objectif de formuler 3 mélanges de béton de poudre réactive.
5. Le cinquième chapitre traite de la formulation des BPR et détaille la méthodologie de formulation de ces trois béton.
6. Le sixième et dernier chapitre, intitulé Résultats et Interprétations, est consacré à l'analyse et à l'interprétation des résultats du programme expérimental. Ce programme examine l'effet de la présence de poudre de verre, ainsi que d'autres ajouts, sur les propriétés des bétons formulés.

**PREMIÈRE PARTIE :**  
***SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE***

**CHAPITRE 1**  
***Le béton de poudre réactive***  
***“ BPR ”***

## 1.1 Introduction

Le Béton de Poudre Réactive (BPR) marque une avancée significative dans le domaine de la construction, offrant des performances mécaniques et de durabilités remarquables. Dans ce premier chapitre, nous explorerons les origines et l'évolution du BPR, ainsi que ses principaux composants, les méthodes de caractérisation et de formulation. En fournissant un aperçu complet de ce matériau novateur, nous évoquerons les bases nécessaires à une compréhension approfondie de ses propriétés et de ses applications dans l'industrie de la construction.

## 1.2 Historique sur les bétons et évolution du BPR

### 1.2.1 Bétons Ordinaires

Le béton se compose d'un mélange de granulats, dont les diamètres varient de centimètres à micromètres, d'un liant hydraulique généralement du ciment, et d'eau. Les bétons ordinaires sont typiquement caractérisés par un rapport E/C supérieur à 0,5 pour faciliter leur mise en place, avec une résistance mécanique variant entre 25 MPa et 42 MPa [Neville, 2000]. Tout comme les roches naturelles, le béton présente une grande résistance à la compression mais une faible résistance à la traction. C'est pourquoi son utilisation en tant que matériau de construction, qui remonte à l'époque romaine, n'a véritablement connu un essor qu'avec l'invention du béton armé. Dans ce dernier, des armatures, en acier, sont utilisées pour compenser sa faible résistance à la traction.

Les avancées dans le domaine du béton sont marquées par plusieurs événements historiques significatifs. L'ingénieur Bélidor (1737) a étudié la composition du béton et a introduit le terme "béton" dans son sens actuel. L'invention du ciment par Louis Vicat en 1817, celle du ciment Portland par Aspdin en 1824, et l'établissement des premiers fours par Pavin de Lafarge au Teil en 1830 ont établi les bases de l'essor du béton. Les premières cimenteries ont vu le jour en France entre 1850 et 1860, notamment dans le Boulonnais avec la Société des Ciments Français [CIM BETON, 1970]. L'invention du béton armé est généralement attribuée à Joseph Lambot, qui en 1848 a fait flotter une barque en ciment armé, et à Joseph Monier, qui en 1849 a construit indépendamment des bacs à fleurs en utilisant ce matériau [Picon, 1997 ; Bosc et al., 2001]. L'adoption du béton armé dans les structures s'est rapidement répandue en France, notamment grâce à l'influence de Joseph Monier, de François Hennebique et d'Armand Gabriel, ainsi que de l'ingénieur François Coignet, qui a développé le béton aggloméré destiné au moulage et au compactage sur place. Ce béton, composé de sable, de cendres, de scories, de charbon brûlé, de terre argileuse cuite et pilée, de chaux hydraulique naturelle et d'une faible quantité d'eau, a été utilisé par Coignet pour construire une vaste maison en béton aggloméré, encore visible au numéro 72 de la rue Charles Michels à Saint-Denis, au nord de Paris [Sablocrete, 1994].

À partir de 1906, une circulaire ministérielle a été émise, établissant des instructions concernant l'utilisation du béton armé, ce qui a pour la première fois codifié la conception et le calcul des ponts et des bâtiments avec ce matériau. Un tournant majeur est survenu vers 1930 avec l'invention du béton précontraint par Eugène Freyssinet, apportant ainsi un nouvel élan dans l'art de la construction. Cette innovation a constitué une véritable révolution, tant

par la concrétisation de la notion de précontrainte que par l'approfondissement de la compréhension du comportement mécanique et rhéologique du béton. La précontrainte a permis de maîtriser la distribution des contraintes dans la matière, exploitant ainsi la grande résistance à la compression du béton tout en évitant les défauts liés à sa faible résistance à la traction. La Société Technique pour l'Utilisation de la Précontrainte (S.T.U.P.) a largement diffusé les idées novatrices et les brevets d'Eugène Freyssinet, stimulant ainsi l'expansion de l'utilisation du béton précontraint dans le monde entier.

Les recherches entreprises depuis 1970 sur le béton, notamment sur ses constituants actifs tels que le ciment, les ultrafines et surtout les superplastifiants, ont conduit à une amélioration qualitative et quantitative considérable de ses propriétés. Aux États-Unis et au Japon, dans les années 1980, des bétons à hautes performances ont été développés et mis en œuvre, atteignant des résistances à la compression de 100 MPa, voire 140 MPa dans un immeuble à Seattle aux États-Unis. En France également, plusieurs ouvrages en béton à hautes performances ont été construits, comprenant des immeubles, des ponts, des centrales nucléaires, et d'autres structures.



Figure 1.1 : Evolution des bétons depuis les années 1960

## 1.2.2 Bétons à ultra hautes performances

Les premiers matériaux cimentaires à ultra hautes performances ont fait leur apparition dans les années 1970, avec les pâtes de ciment "Compacts" atteignant 640 MPa, et un rapport E/C de 0,21 soumis à un traitement thermique à 250 °C et pressés à 345 MPa, selon les travaux de Roy et ses collègues [Roy et al, 1973]. Par la suite, ces matériaux ont été développés au Danemark dans les années 1980 avec les "Densified Small Particles" proposés par Bache, offrant une résistance de 270 MPa avec un E/C de 0,18 [Bache, 1981]. Ce développement a été suivi en 1987 par l'introduction du "Compact Cement Composite", donnant naissance à la technologie CRC (Compact Reinforced Concrete).

Les BUHP sont des matériaux à matrice cimentaire, de résistance à la compression supérieure à 150 MPa. Ces matériaux sont additionnés de fibres métalliques (BFUP) en vue d'obtenir un comportement ductile en traction. Ils se caractérisent aussi par leur fort dosage en liant et la sélection particulière des granulats [AFGC, 2002]. Du point de vue de leur formulation, ils se caractérisent par [Richard et al, 1995] :

- Un rapport E/C très faible  $\leq 0,2$
- L'emploi de sable fin afin d'améliorer l'homogénéité
- Une augmentation de la compacité, par optimisation du squelette granulaire.
- L'amélioration possible de la microstructure par traitement thermique après la prise
- L'emploi de fibres métalliques pour augmenter la ductilité.

De plus, l'absence de gros granulats dans les BUHP (Bétons Ultra-Hautes Performances) permet la réalisation d'éléments de parement extrêmement fins, avec une épaisseur pouvant

aller jusqu'à 15 mm [Cheyrezy, 1998]. De nombreuses réalisations exemplaires ont émergé en France, en Allemagne et en Asie. Parmi les plus célèbres, on peut citer :

- Les quelques 2000 poutres qui composent la tour de refroidissement de la centrale électrique de Cattenom en France (1997-1998).
- Le pont de Bourg-lès-Valence, premier pont réalisé à l'aide de cinq poutres préfabriquées en BUHP et assemblées in situ au moyen de béton coulé (2000-2001).
- La passerelle piétonne de Sakata Mirai, au Japon (en Ductal), d'une portée de 50 m (2002).



Figure 1.2 : Exemples de réalisations avec BUHP

### ➤ Béton de poudre réactive

Un BUHP qui se caractérise par une faible valeur de porosité et par de petits agrégats de taille maximale inférieure à 600  $\mu\text{m}$  est appelé Bétons de Poudres Réactives (BPR).

Le béton à poudres réactives (BPR) est une avancée significative dans le domaine des matériaux de construction. Il a été inventé par Pierre Richard en 1990 et est considéré comme l'ancêtre des bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP).

La première application du BPR, également connu sous le nom de Ductal, a eu lieu lors de la construction de la passerelle piétonne à Sherbrooke (Québec, Canada) en 1997 (Figure 1.2). En France, la première utilisation du Ductal a été pour la réalisation des poutrelles de renforcement d'un aéroréfrigérant de la centrale nucléaire de Cattenom en 1998, suite à la publication de la recommandation provisoire de l'AFGC en 2002.



Figure 1.3 : La passerelle piétonne à Sherbrooke (Québec, Canada), 1997

La construction de la passerelle au-dessus de la rivière Magog a été conçue pour répondre aux exigences spécifiques du site. L'ouvrage présente une longueur totale de 120 mètres et se

compose d'une travée centrale de 60 mètres réalisée en BPR et de quatre travées d'accès en béton à haute performance (BHP).

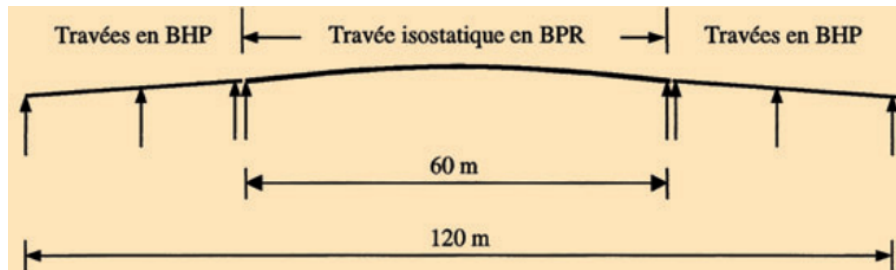


Figure 1.4 : Élévation de la passerelle

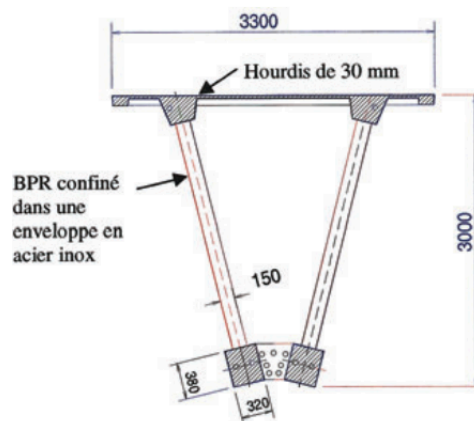


Figure 1.5 : Section courante

Quelques exemples réels de projets dans lesquels le béton de poudre réactive (BPR) a été utilisé :

- Tunnel de la Manche, Europe, 1994 : Le tunnel sous la Manche reliant le Royaume-Uni à la France utilise du BPR pour ses revêtements intérieurs en raison de sa résistance à l'abrasion et à l'usure. Le BPR offre une durabilité supérieure dans des environnements exigeants comme les tunnels.
- Pont Vasco da Gama, Portugal, 1998 : Ce pont est l'un des plus longs d'Europe et utilise du BPR dans sa construction pour ses éléments préfabriqués. Le BPR permet de créer des éléments structurels légers et résistants, ce qui facilite l'assemblage et réduit les coûts de construction.
- Pont de la Baie de Hangzhou, Chine, 2008 : Ce pont est l'un des plus longs du monde et a été construit en utilisant du BPR pour ses éléments structurels. Le BPR permet de soutenir les charges lourdes sur de longues portées, ce qui en fait un matériau idéal pour la construction de ponts.
- Tour Burj Khalifa, Dubaï, 2009-2010 : La tour Burj Khalifa, le plus haut bâtiment du monde, utilise du BPR dans sa structure pour assurer sa solidité et sa stabilité. Le BPR permet de créer des éléments structurels élancés et résistants, ce qui est essentiel pour la construction de gratte-ciel.



- Musée du Louvre Abu Dhabi, Émirats arabes unis, 2017 : Le musée du Louvre Abu Dhabi utilise du BPR dans sa structure pour créer des éléments architecturaux élégants et durables. Le BPR offre une grande liberté de conception et permet de réaliser des formes complexes et esthétiques.
- La Grande Mosquée d'Alger, 2019 : qui combine design moderne et authenticité, où le Ductal a été utilisé pour les façades entourant le minaret, la couverture de la coupole de la salle de prière, la cour intérieure et le revêtement des bâtiments.



Figure 1.6 : La Grande Mosquée d'Alger, Algérie; Ductal

### 1.3 Définition de BPR

Le béton à poudres réactives (BPR) est un matériau à matrice cimentaire qui a été inventé en 1990 par Pierre Richard. Dans ce matériau, la quantité, la nature, la morphologie et le dosage des différents composants granulaires sont optimisés pour obtenir des propriétés mécaniques élevées et une durabilité améliorée. Ce béton composite à base de ciment à ultra-hautes performances remplace les agrégats grossiers traditionnels par du sable fin, ce qui permet d'atteindre une compacité optimale au sein de la matrice, réduisant ainsi au minimum la porosité et les vides internes. Cette compacité, combinée à une microstructure minutieusement contrôlée, confère au BPR une résistance à la compression, à la flexion et à la traction remarquables, surpassant souvent de loin celles des bétons traditionnels.

Ce qui distingue également le BPR des autres bétons, c'est l'utilisation de poudres réactives, telles que des fumées de silice ou des mélanges de ciment spéciaux, l'ajout de fumée de silice au ciment conduit à une augmentation des performances pour le BPR. Cette augmentation est due à la production supplémentaire de silicate de calcium hydraté (CSH) par réaction pouzzolanique. Ces poudres réactives confèrent au BPR une résistance accrue dès les premiers stades de prise, ainsi qu'une résistance à long terme exceptionnelle, lui permettant de résister aux charges les plus exigeantes et aux environnements les plus hostiles.

De plus, le BPR possède une ductilité élevée. Il est considéré comme l'ancêtre des bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP) et est commercialisé sous le nom de Ductal par des entreprises telles que Bouygues, Lafarge et Rhodia. Le BPR a été largement utilisé dans des ouvrages d'art et de génie civil à travers le monde, offrant des avantages en termes de résistance, de durabilité et de performances exceptionnelles.

L'ajout de fibres métalliques confère au BPR une ductilité qui le rend adapté à de nombreuses applications sans nécessiter de renforcement passif. De plus, le BPR est

largement utilisé dans des applications nécessitant des performances élevées telles que les infrastructures critiques, les ouvrages maritimes ou encore les éléments préfabriqués de pré- ou post-tension.

### **1.4 Composants du BPR**

#### **1.4.1 Ciment**

Le ciment est un liant hydraulique issu de clinker concassé et obtenu par association chimique de calcaire et d'argile à très haute température. Des additifs sont ensuite mélangés au clinker dans des proportions très précises, conférant au ciment ses propriétés uniques.

La composition classique du mélange cuit dans les fours des cimenteries est de 80% de calcaire et 20% d'argile. Les deux éléments sont préparés par broyage, cuits à très haute température, puis le produit obtenu (le clinker) est à nouveau broyé.

Les additifs au clinker permettent d'optimiser la prise et les propriétés mécaniques du ciment (et donc du béton si le ciment est utilisé pour la production).

Il existe deux couleurs de ciment : blanc et gris. La plus courante est le gris, mais le blanc est également utilisé, notamment dans les bétons à usage esthétique et architectural. En effet, pour le BPR ou le Ductal, destinés à ces applications, on utilise du ciment blanc.

Ce type de ciment (ciment blanc) doit respecter les exigences définies par la norme NF P 15-301, intitulée Liants hydrauliques, Composition, spécifications et critères de conformité. Cette norme établit principalement les divers types de ciment, les composants, les classes de résistance, ainsi que les valeurs limites garanties. La couleur blanche de ces ciments résulte de la minimisation des minéraux colorants tels que les oxydes métalliques, dans les matières premières utilisées, ainsi que d'un processus de fabrication spécifique. Bien que la norme des ciments ne garantisse pas spécifiquement la blancheur, les producteurs s'engagent généralement à assurer un niveau de blancheur satisfaisant pour leurs clients.

##### **1.4.1.1 Caractéristiques**

Le ciment blanc, avec une composition chimique très similaire à celle des ciments gris, se distingue principalement par sa blancheur, résultant de sa très faible teneur en oxydes métalliques tels que le fer, le manganèse et le chrome. Contrairement au ciment gris classique, dont la couleur est due à la présence de ces minéraux, la fabrication du ciment blanc nécessite des matières premières d'une pureté exceptionnelle, notamment du calcaire blanc très pur, du sable siliceux sans argile et du kaolin. Pour éviter l'oxydation des métaux, notamment du fer, un processus de trempe est essentiel tout au long de la production, nécessitant un équipement spécialisé à chaque étape pour empêcher l'introduction accidentelle d'oxydes métalliques. Par exemple, des broyeurs munis de charges très résistantes telles que du corindon ou des billes d'acier à haute teneur en chrome sont utilisés pour assurer la pureté du ciment blanc.

### 1.4.1.2 Les différents types de ciment blanc

Le ciment blanc est un ciment Portland conforme à la norme NF EN 197-1. Il existe de nombreux types de ciment blanc aux propriétés différentes adaptés à diverses applications.

On peut distinguer deux types de ciment blanc :

**a. Les ciments blancs CEM I 52,5 et 42,5 (ciments Portland):**

Ce sont des ciments blancs haut de gamme. Ils sont constitués d'au moins 95 % de clinker (matière première ciment). Ils sont généralement livrés en vrac et sont utilisés par les centrales à béton et les usines d'éléments préfabriqués en béton.

**b. Les ciments blancs au calcaire CEM II 42,5 et 32,5 (ciments Portland composés):**

Ils sont obtenus par broyage de clinker et ajout de carbonate de calcium (calcaire). Ce sont des ciments blancs plus économiques et moins résistants. Ils sont généralement vendus en sacs et sont principalement utilisés pour les petits projets de maçonnerie.

### 1.4.1.3 Domaines d'emploi

Grâce à sa teinte blanche distinctive, le ciment blanc offre la possibilité de mettre en évidence les nuances des granulats dans les bétons apparents. La pâte elle-même peut être teintée à l'aide de pigments minéraux, permettant la création de bétons présentant une vaste gamme de teintes, aussi bien pour les structures de béton que pour les éléments architectoniques et les revêtements décoratifs.

La conception du béton doit être minutieusement étudiée en fonction des caractéristiques des granulats et des effets visuels recherchés. Dans le domaine des enduits extérieurs, une certaine confusion subsiste entre les enduits hydrauliques et les enduits plastiques, souvent perçus comme des produits concurrents bien qu'ils soient fréquemment complémentaires. Il convient en effet de distinguer 3 types d'enduits.

### 1.4.1.4 Précautions d'utilisation

Le ciment blanc est utilisé pour réaliser des produits ou des œuvres visibles dont la couleur et l'aspect sont déterminants. Il convient donc de respecter des règles de base pour assurer la régularité de la couleur et de l'aspect du béton apparent :

- Choisir et utiliser des granulats propres (sable et gravier) ne contenant aucune matière organique ni argile. Respecter les règles techniques en vigueur concernant le dosage du ciment.
- Assurer un dosage régulier des ingrédients mélangés en continu et un contrôle du volume d'eau de mélange. Tout changement entraînera une différence notable dans la couleur du béton durci.
- Bien mélanger le béton pour obtenir une parfaite uniformité.
- Utiliser des moules ou gabarits de nature adaptée. Assurez-vous qu'il est propre et imperméable.
- Pour les travaux en béton armé blanc, merci de respecter soigneusement l'enduit. Préférez les renforts de suspension plutôt que d'utiliser des cales.
- Soyez particulièrement prudent lors du coulage du béton. Adaptez les vibrations du béton à sa consistance pour une densité optimale sans ségrégation.

- Éviter un séchage prématuré par temps chaud ou venteux en faisant durcir le béton (eau pulvérisée, bâche humide, produit de cure...).

### 1.4.2 Sable

Le sable utilisé dans le béton est un granulat fin, constitué de particules de roche dont la taille varie de 0 à 4 mm. Il provient généralement de rivières (sable alluvionnaire) ou de carrières (sable concassé). Le sable est un élément important du béton car il comble les espaces entre les granulats grossiers (gravier), formant une matrice dense et solide, améliorant la maniabilité du béton et facilitant sa construction, tout en augmentant également la résistance du béton à la pression.

Il existe deux types principaux de sable pour béton qui sont :

#### a. Le sable naturel :

Le sable naturel, extrait des rivières ou des carrières, est principalement constitué de silice, bien qu'il puisse contenir d'autres minéraux tels que du calcaire ou du feldspath. Ses atouts résident dans sa disponibilité et son coût généralement plus bas que celui du sable artificiel. Cependant, ses inconvénients incluent la variabilité de sa composition et de sa granulométrie, ce qui peut affecter la qualité du béton produit.

#### b. Le sable artificiel :

Le sable artificiel est fabriqué par concassage de roches, ce qui lui confère une propreté et une composition généralement plus homogène que le sable naturel. Ses principaux avantages résident dans sa composition et sa granulométrie contrôlées, ce qui permet de produire un béton de meilleure qualité. Cependant, son principal inconvénient est son coût généralement plus élevé que celui du sable naturel.

Le choix entre le sable naturel et le sable artificiel dépend de plusieurs facteurs. Tout d'abord, la résistance souhaitée du béton est un critère déterminant : le béton à haute résistance préfère souvent le sable artificiel. Ensuite, la durabilité est prise en compte, notamment dans des environnements agressifs où le sable naturel peut s'avérer moins durable que son homologue artificiel. Enfin, l'esthétique joue également un rôle, car le sable naturel peut conférer au béton un aspect plus rustique, ce qui peut être préféré dans certains contextes.

On retrouve ce qu'on appelle **le sable blanc**, est un sable issu de l'érosion de roches quartziques et se distingue par sa pureté et sa composition chimique qui est stable.

Le sable blanc se distingue par plusieurs caractéristiques essentielles. Tout d'abord, sa pureté élevée en fait l'un des sables les plus purs disponibles sur le marché, ce qui le rend parfait pour des applications nécessitant une propreté impeccable. De plus, sa stabilité chimique le rend résistant aux attaques chimiques et aux conditions météorologiques adverses, assurant ainsi sa durabilité à long terme. En outre, le sable blanc est apprécié pour son aspect esthétique, sa couleur blanche et sa granulométrie fine lui conférant un attrait visuel distinctif, idéal pour une variété de projets où l'apparence joue un rôle important.

### 1.4.2.1 Propriétés physiques

Le sable blanc, tel que le sable, est un élément très recherché dans la fabrication du béton en raison de sa teinte claire et de ses caractéristiques physiques bien adaptées à une variété de projets de construction. Ses propriétés comprennent d'abord sa granulométrie, conforme à la norme NF EN 12620, avec une plage de 0 à 1,25 mm, le classant ainsi comme un sable fin.

Sa distribution granulométrique uniforme est essentielle pour assurer une bonne cohésion et une résistance adéquate du matériau. La couleur blanche du sable afroquartz est attribuée à sa forte teneur en silice ( $\text{SiO}_2$ ), un minéral naturellement blanc et transparent, influencée également par la présence d'autres minéraux comme le feldspath et le mica. Les grains de ce sable sont généralement anguleux à sub-anguleux, résultat de l'érosion des roches quartziques dont il est issu, ce qui impacte la porosité et la perméabilité du matériau. Sa densité apparente, aux environs de 2.65, est déterminée par sa granulométrie, sa forme et sa porosité. Le sable afroquartz présente une porosité d'environ 25 à 30%, affectant ainsi sa perméabilité et sa capacité de rétention d'eau. Enfin, sa résistance à la compression, située entre 70 et 80 MPa, est essentielle dans des applications où le sable est soumis à des charges importantes, telles que dans les bétons et les mortiers.

### 1.4.2.2 Propriétés chimiques

D'un point de vue chimique, le sable afroquartz est principalement composé de silice ( $\text{SiO}_2$ ), avec une pureté de plus de 98%. Cette haute teneur en silice lui confère des propriétés de dureté et de stabilité chimique, idéales pour la fabrication de bétons performants. Les autres éléments sont présents en quantités minimales, réduisant les risques de réactions néfastes dans le béton. Le tableau 1.1 détaille les principales composantes chimiques du sable afroquartz.

**Tableau 1.1** : Les composants chimiques du sable afroquartz

Composant	Symbole	Teneur
Silice	$\text{SiO}_2$	> 98%
Alumine	$\text{Al}_2\text{O}_3$	< 0,5%
Fer	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	< 0,1%
Calcium	CaO	< 0,5%
Magnésium	MgO	< 0,2%

### 1.4.2.3 Utilisations

Le sable blanc à granulométrie afroquartz trouve une multitude d'applications dans divers secteurs industriels et domestiques. Dans l'industrie du verre, il est utilisé pour la fabrication de verre plat, de verre creux et de fibres de verre. Pour le secteur du bâtiment, il intervient dans la production de mortiers, de bétons et d'enduits. Dans le domaine du filtrage, il est employé pour purifier l'eau et d'autres liquides. En outre, il est utilisé dans l'industrie du sablage pour nettoyer et décaper diverses surfaces. Sur le plan de l'aménagement paysager, il est essentiel dans la création de plages artificielles, de terrains de jeux et de dallages. Enfin, dans le domaine des sports et loisirs, il est indispensable en tant que sable de silice pour les terrains de golf, les pistes de saut à cheval et les terrains de beach-volley.

### 1.4.3 Fibres métalliques

Contrairement aux armatures traditionnelles, les fibres sont dispersées dans la masse du béton, ce qui permet de créer un matériau présentant un comportement homogène.

Les fibres ont des caractéristiques spécifiques, tant géométriques que mécaniques, et un comportement contrainte-déformation très différent selon leur nature. La capacité de renforcement d'une fibre dépend notamment de son ancrage, de sa résistance en traction et de son module d'Young. Les fibres sont bénéfiques uniquement lorsque le béton est soumis à des tractions supérieures à sa propre résistance. En cas d'apparition de fissures dans le béton, les fibres permettent de transmettre les efforts à travers celles-ci.

Parmi les fibres les plus couramment utilisées, on trouve les fibres métalliques [Norme NF en 14889-1] selon la nature des matériaux qui les composent comme : acier, inox et alliage amorphe.

Les fibres jouent un rôle important dans la prévention de la propagation des microfissures. Leur effet bénéfique varie selon le type de fibre utilisé et l'application spécifique dans la construction. Ces bénéfices incluent une meilleure cohésion du béton frais, une facilitation du moulage ou de la mise en place dans les coffrages, une déformabilité accrue avant la rupture, une résistance améliorée à la traction par flexion, une plus grande ductilité et résistance post-fissuration, ainsi qu'une réduction de la fissuration due au retrait. De plus, elles favorisent une répartition uniforme des fissures, augmentent la résistance aux chocs, à la fatigue et à l'usure, et améliorent la résistance à l'abrasion et au feu. Cependant, il convient de noter que chaque type de fibre n'offre pas nécessairement toutes ces améliorations simultanément.

Les propriétés mécaniques des fibres permettent une meilleure exploitation de la résistance naturelle du béton, facilitent la réalisation de pièces minces à grande échelle et offrent aux concepteurs une plus grande liberté architecturale. Leur utilisation présente de nombreux avantages pour le béton, notamment la gestion efficace de la fissuration, une mise en œuvre plus aisée et rapide, un renforcement homogène dans plusieurs directions, ainsi que la possibilité de remplacer partiellement ou totalement les armatures traditionnelles.

### 1.4.4 Adjuvants

Les adjuvants sont des composés chimiques ajoutés au béton pour améliorer ses caractéristiques à l'état frais ou à l'état durci. Ils se répartissent en plusieurs catégories. On distingue principalement les adjuvants accélérateurs ou retardateurs de prise, les adjuvants réducteurs d'eau (plastifiants) et les superplastifiants ou fluidifiants, ainsi que les agents entraîneurs d'air.

Les adjuvants réducteurs d'eau et les superplastifiants, comme leur nom l'indique, permettent de réduire la quantité d'eau de gâchage tout en maintenant une bonne maniabilité du béton à l'état frais. Selon leur structure moléculaire, ils peuvent agir en s'adsorbant sur les particules de ciment, réduisant ainsi les forces d'attraction intergranulaires par la diminution des forces de Van der Waals ou la diminution de l'énergie superficielle du matériau. Ils peuvent également créer des forces de répulsion, telles que l'encombrement stérique des molécules ou la répulsion électrostatique, car ces molécules sont généralement de charge négative.

Les agents entraîneurs d'air abaissent la tension superficielle de l'eau, facilitant ainsi la formation de bulles en réduisant l'énergie nécessaire pour créer des surfaces de contact air-eau. Leur rôle principal est de stabiliser les bulles d'air piégées par les turbulences générées par les pales du malaxeur et les particules fines et grosses. Ils sont particulièrement utilisés dans les climats froids, où ils sont nécessaires pour assurer la résistance aux cycles de gel et de dégel.

Les retardateurs et les accélérateurs influencent la cinétique d'hydratation et le temps de prise du béton.

Parlons de **superplastifiant** comme un adjuvant liquide, les superplastifiants sont des dispersants qui fonctionnent sur le même principe que les plastifiants réducteurs d'eau mais d'une façon plus efficace, telle qu'il est possible en principe de défloculer complètement les grains. Ce sont des polymères de synthèse fabriqués spécialement pour l'industrie du béton.

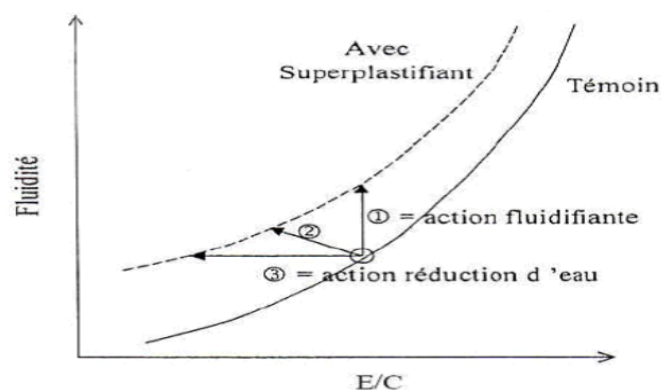


Figure 1.7 : L'action «réduction d'eau» ou «l'effet fluidification» [Dakhmouche, 2009]

### 1.4.5 Ajouts cimentaires

Les ajouts cimentaires gagnent en importance dans les compositions des bétons, donnant ainsi naissance à des liants de composition binaire, ternaire voire quaternaire. Leur utilisation remplit trois rôles principaux : ils contribuent à améliorer la durabilité des bétons grâce à

leurs effets pouzzolaniques ou de remplissage, ils réduisent la consommation de ciment Portland et, enfin, ils contribuent à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Parmi les divers ajouts disponibles sur le marché, on peut citer :

#### 1.4.5.1 Quartz broyé

Le quartz broyé, une poudre avec un diamètre moyen de 10 à 15  $\mu\text{m}$ , dérivée du broyage d'un sable très siliceux ( $\text{SiO}_2 > 98\%$ ) utilisé couramment dans la production de verre.

Selon Richard et Cheyrezy (1995), sa présence est indispensable pour ces traitements, dont les détails seront abordés ultérieurement. L'optimalité de sa réactivité est atteinte avec une granulométrie entre 5 et 25  $\mu\text{m}$ . Le dosage approprié vise à réaliser un rapport stœchiométrique optimal pour la conversion des hydrates amorphes en tobermorite, caractérisée par un rapport molaire C/S de 0,83, équivalent à un rapport silice/ciment de 0,62 [Richard et Cheyrezy, 1995].

Une étude de Taфраoui (2009) a révélé que l'incorporation de quartz broyé dans les BFUP (Bétons Fibrés à Ultra Haute Performance) soumis à des traitements thermiques n'entraîne pas une augmentation significative de la résistance à la flexion (+2,6%), mais favorise considérablement les résistances en compression (+8,2%), grâce à l'apparition de nouvelles phases hydratées à haute température.

#### 1.4.5.2 Fumées de silice

La fumée de silice est une poudre ultra fine issue de la production de silicium élémentaire ou d'alliages contenant du silicium dans les fours à arc électrique. Lorsque le quartz de haute pureté est réduit en silicium à une température d'environ 2000°C, cela génère de la vapeur de dioxyde de silicium qui, en s'oxydant et se condensant à basse température, forme la fumée de silice.

Les particules de fumée de silice sont extrêmement fines, formant une poudre noire grisâtre où plus de 95% des particules ont un diamètre inférieur à 1  $\mu\text{m}$ . Sa surface spécifique Blaine est d'environ 20 000  $\text{cm}^2/\text{g}$ , ce qui signifie que la fumée de silice est pratiquement cent fois plus fine qu'un ciment ordinaire.

En raison de cette extrême finesse et de sa forte teneur en silice amorphe, la fumée de silice est considérée comme un matériau pouzzolanique très efficace.

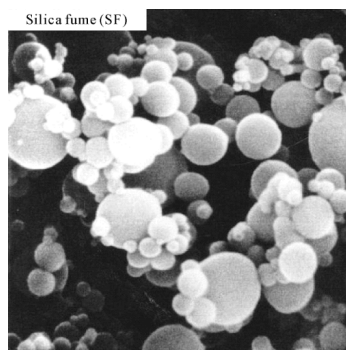


Figure 1.8 : Microstructure de la Fumée de Silice



La fumée de silice présente plusieurs avantages significatifs dans la fabrication du béton. Tout d'abord, ses performances à l'état frais améliorent la maniabilité du béton, réduisant ainsi les problèmes de ségrégation et permettant un transfert efficace par pompage sur de longues distances. De plus, sa nature thixotrope confère au béton une viscosité et une compacité lorsqu'il est au repos, mais il devient fluide sous pression, facilitant ainsi sa projection sur les parois sans perte de produit. En ce qui concerne ses performances à l'état durci, la fumée de silice optimise l'empilement granulaire, renforçant ainsi l'adhésion entre les constituants du béton et améliorant ses propriétés mécaniques, notamment en termes de résistance à la compression. Cette amélioration est directement proportionnelle à la quantité de fumée de silice ajoutée au ciment. De plus, l'utilisation de la fumée de silice réduit la porosité des bétons, limitant ainsi la pénétration d'agents agressifs tels que les acides, les sulfates, le dioxyde de carbone et les chlorures marins. En conséquence, elle renforce la durabilité du béton, en particulier dans des environnements contraignants tels que les ports, les aéroports, les plateformes industrielles et les ouvrages en bord de mer, en prévenant efficacement la corrosion.

### 1.4.5.3 Laitier

La littérature utilise diverses expressions pour désigner le coproduit de la fabrication de la fonte, telles que "laitier granulé", "laitier trempé" et "laitier vitreux". Lorsque la trempe se fait à l'eau, le laitier se présente sous forme d'un sable grossier de couleur jaune pâle à beige foncé, tandis que lorsqu'elle se fait à l'air, il prend plutôt la forme de granules poreux avec un diamètre moyen de 1 à 5 mm. Il se trouve donc dans un état thermodynamiquement instable (vitreux) et présente des propriétés hydrauliques [A.Brahma, 1992].

Le laitier, avec ses composants principaux de chaux (45 à 50 %), de silice (25 à 30 %), d'alumine (15 à 20 %) et environ 10 % de divers oxydes de magnésium et de manganèse, agit comme un liant efficace. Cependant, sa prise est souvent trop lente. Afin de pallier ce problème, on incorpore généralement une base, comme la chaux, en tant que catalyseur [G.Dreux, 1995].

En cas d'activation sulfatique des laitiers, les produits de l'hydratation du laitier sont le C-S-H et l'ettringite, tout comme lorsqu'on utilise de la soude comme activateur. L'hydratation du ciment Portland contient donc les 3 principaux activateurs du laitier : du gypse, de la chaux libérée par l'hydratation du  $C_3S$  et du  $C_2S$ , et des alcalis provenant des sulfates alcalins.

L'effet du laitier sur les propriétés du béton frais et durci est proportionnel à son pourcentage de substitution, ainsi qu'à sa finesse. En général, les laitiers doivent être broyés plus finement que le ciment Portland pour augmenter leur réactivité. L'ajout de laitier améliore la durabilité du béton, notamment en ce qui concerne la réaction alcali-granulats, les attaques aux sulfates et la résistance à l'eau de mer. Cependant, son seul inconvénient est qu'il diminue la résistance à très court terme du béton, surtout par temps froid.

**Tableau 1.2** : Influence du laitier sur les propriétés des matériaux cimentaires [Olga, 1996]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Affinement de la structure poreuse</li> <li>● Réduction de la chaleur d'hydratation</li> <li>● Diminution de la perméabilité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Retard de prise</li> <li>● Augmentation du retrait endogène</li> </ul>

### 1.4.6 Eau

L'eau est essentielle dans la fabrication du béton. Elle joue un rôle important dans sa maniabilité et est largement responsable de la cohésion et de la résistance de ce matériau de construction. De plus, elle est nécessaire pour l'hydratation du ciment, ce qui entraîne le durcissement et le développement des résistances du béton.

Cependant, l'eau est également à l'origine de problèmes qui, avec le temps, peuvent altérer le béton et réduire sa durabilité. Parmi ces problèmes, on trouve la pénétration des ions chlorures ou la carbonatation, qui peuvent entraîner des dommages au béton au fil du temps.

## 1.5 Caractérisations des BPR à L'état frais

Les BPR se distinguent à l'état frais par leur remarquable étalement, atteignant entre 250 et 400 mm sans tassement ni vibration excessive, grâce à leur faible viscosité et leur nature autoplaçante. Cette propriété facilite le coulage et le remplissage des coffrages, même pour des éléments complexes ou fortement armés, sans ségrégation des constituants. Leur maniabilité exceptionnelle permet une mise en œuvre facile et confortable, même pour des opérateurs peu expérimentés. Les BPR à l'état frais présentent une masse volumique comprise entre 2300 et 2500 kg/m<sup>3</sup> et un temps de prise généralement plus court que celui des bétons classiques, variant entre 2 et 4 heures selon la composition et les conditions ambiantes, sans nécessiter de température de curie élevée.

## 1.6 Caractérisations des BPR à L'état durci

### 1.6.1 Propriétés physiques du BPR

#### 1.6.1.1 Densité

La densité du BPR, également connu sous le nom de béton à haute performance, est généralement plus élevée que celle du béton conventionnel. Cela est dû à l'utilisation de matériaux plus fins et à un processus de fabrication contrôlé. La densité du BPR se situe dans une fourchette comprise entre 2,2 et 2,8. Une densité plus élevée indique généralement un béton plus robuste et durable. La densité est influencée par différents facteurs tels que le type de ciment utilisé, le rapport eau-ciment, et la présence de granulats. Il est essentiel de contrôler et de maintenir une densité appropriée pour assurer les performances souhaitées du béton.

Un béton à densité élevée offre une meilleure résistance aux attaques chimiques, à l'abrasion et aux intempéries. Elle influence également la capacité d'isolation thermique du béton, ce qui est vital pour les applications de construction soucieuses de l'efficacité énergétique.

### 1.6.1.2 Absorption d'eau

L'absorption d'eau du BPR est minimisée en raison de sa faible porosité. Cela signifie qu'il est moins susceptible d'absorber l'humidité, ce qui le rend idéal pour les applications où la durabilité et la résistance à l'humidité sont des facteurs essentiels, tels que les infrastructures exposées aux intempéries.

Resplendino et Petitjean rapportent des valeurs d'absorption à l'eau variant entre 1,5 et 5 % pour des bétons à ultra hautes performances (BUHP) [Resplendino, 2003]. De même, Lafarge a signalé une absorption à l'eau de 1,9 % pour un matériau Ductal [Lafarge, 2003].

## 1.6.2 Propriétés mécanique du BPR

Les propriétés mécaniques du béton de poudre réactive (BPR) sont étroitement liées à sa composition, notamment à l'utilisation de la fumée de silice dans sa formulation. La présence de la fumée de silice permet d'optimiser l'empilement granulaire des constituants du BPR, améliorant ainsi l'adhésion entre eux et influençant directement ses propriétés mécaniques.

Les propriétés mécaniques du BPR peuvent varier en fonction du traitement thermique qu'il subit. Avant ou sans traitement thermique, les propriétés mécaniques du BPR évoluent au cours du processus d'hydratation du ciment, de manière similaire aux bétons conventionnels. Dans ce cas, ces propriétés sont généralement caractérisées par leurs valeurs à 28 jours, qui représentent un indicateur de leur résistance et de leur performance à maturité.

### 1.6.2.1 Résistance à la compression et Module d'élasticité

Richard et Cheyrezy [Richard, 1995] ont été les premiers à étudier les propriétés mécaniques des BPR. Ils ont fabriqué des BPR 200 et BPR 800 avec des rapports E/C variant de 0,15 à 0,19. Leur étude s'est concentrée sur l'influence du pressage (avant et pendant la prise) et de l'ajout de fibres sur la résistance en compression des bétons. Les caractéristiques mécaniques mesurées sont résumées dans le tableau 1.3

**Tableau 1.3** : Caractéristiques mécaniques des BPR [Richard\_1995]

Caractéristiques	BPR 200	BPR 800	
Pressage avant la prise (MPa)	aucun	50	
Traitement thermique (°C)	20 - 90	250 - 400	
Résistance à la compression $f_c$ (MPa)	170 - 230	avec sable quartzeux	490 - 680
		avec fibre	650 - 810
Module d'élasticité E (GPa)	50 - 60	65 - 75	

Un an après ,des travaux ceux menés par Dugat [Dugat, 1996] ont permis la fabrication en laboratoire de BPR 200 de rapport E/C = 0,15 et BPR 800 de rapport E/C = 0,15, avec des tests mécaniques réalisés sur des éprouvettes cylindriques de dimensions spécifiques (respectivement 90 × 180 mm et 70 × 140 mm), dont les caractéristiques mécaniques sont présentés dans le tableau 1.4.

**Tableau 1.4** : Caractéristiques mécaniques des BPR [Dugat, 1995]

Caractéristiques	BPR 200	BPR 800
Traitement thermique (°C)	90	90 - 250
Résistance à la compression $f_c$ (MPa)	190 - 200	420 - 520
Module d'élasticité E (GPa)	60 - 66	60 - 74
Coefficient de Poisson statique n	0,22 - 0,24	0,19 - 0.28
Limite d'élasticité linéaire de la résistance ultime (%)	60	85

Typiquement, la résistance caractéristique à la compression à 28 jours varie entre 150 et 250 MPa sans aucun traitement thermique. Après traitement, elle atteint plus de 200 MPa dès l'âge de 4 jours, tandis que le module d'élasticité varie entre 40 et 80 GPa en fonction des formulations [Aboutir, 2019].

### 1.6.2.2 Résistance en flexion

Dans le cas des BUHP non fibrés, leur résistance à la flexion est souvent limitée à environ 20 MPa, caractérisée par une rupture fragile. Cette limitation entraîne un comportement mécanique linéairement élastique jusqu'à la rupture.

Cependant, l'introduction de fibres induit une augmentation substantielle de la résistance et améliore la ductilité du matériau. En effet, les BFUP sans pressage présentent une résistance à la flexion significativement améliorée, atteignant jusqu'à environ 60 MPa. [Richard et Cheyrezy, 1995] ont évalué les résistances en flexion des BPR 200 et BPR 800. Ces valeurs varient entre 30 et 60 MPa pour le BPR 200, et entre 45 et 141 MPa pour le BPR 800.

En 1996, [Dugat, 1996] a mesuré une résistance en flexion d'une éprouvette 4x4x16 d'un BPR 200 de 32 MPa.

### 1.6.2.3 Résistance à la traction direct

La résistance en traction est directement influencée par le dosage et l'orientation spécifique des fibres dans la zone sollicitée en traction. Ces paramètres sont quantifiés par un coefficient moyen d'orientation  $\alpha$ , qui s'étend de 0 (absence totale de fibres dans la direction de sollicitation) à 1 (toutes les fibres sont alignées dans la direction de sollicitation).

Généralement, cette caractéristique dépend à la fois de la quantité de fibres intégrées et de leur arrangement. Adeline (1999) a identifié 3 comportements distincts pour les éprouvettes (avec un rapport eau/ciment de 0,2) soumises à une traction directe, comme représenté dans

la figure 1.9 . Le premier type est associé à un faible dosage en fibres, tandis que les 2 autres types reflètent des BPR avec une orientation des fibres moyenne ou optimale, respectivement. [Adeline,1999].

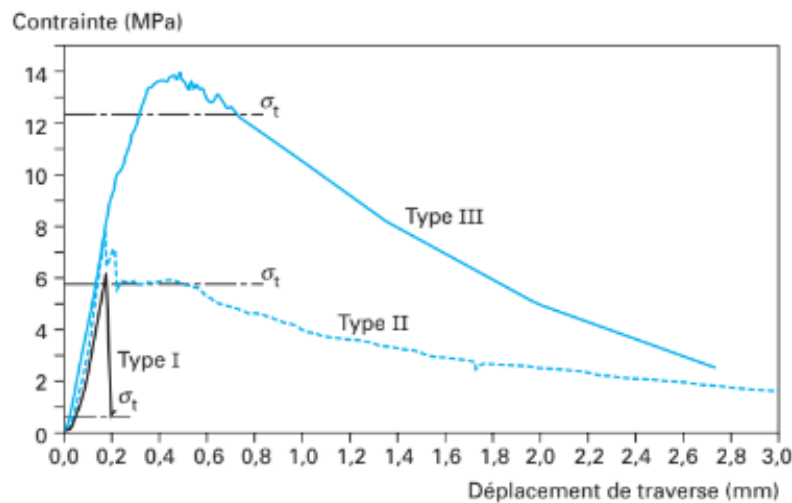


Figure 1.9 : Comportement du BPR en traction directe [Adeline, 1999]

#### 1.6.2.4 Retrait

Le retrait du béton se réfère à la déformation subie par un élément de béton sans aucune sollicitation mécanique externe, dans des conditions thermodynamiques constantes. Il se divise généralement en 2 catégories : le retrait dans des conditions sèches et le gonflement dans des conditions saturées.

En effet, ces variations dimensionnelles peuvent être à l'origine de fissures, de pertes de précontrainte, de redistributions de contraintes, voire, plus rarement, de l'effondrement de l'ouvrage. Plusieurs facteurs influent sur cette variation dimensionnelle, notamment la composition du béton, la qualité de ses composants, la taille des éléments et les conditions environnementales de stockage. Généralement cinq types de retrait sont identifiés : le retrait de séchage , le retrait plastique, le retrait endogène, le retrait thermique et le retrait de carbonatation.

L'étude de Loukili [Loukili , 1999 ] examine le phénomène de retrait autogène dans le béton de poudre réactive (BPR) comme présenté dans la figure 1.10. Les résultats montrent que le retrait autogène est très prononcé dans les premiers jours, atteignant 45% de la déformation finale après seulement un jour et 95% après dix jours. Après cette période, le retrait autogène du BPR reste pratiquement constant, tandis que celui de la matrice simple se poursuit lentement. Cette différence est attribuée à la présence de fibres métalliques dans le BPR, qui contribuent à limiter les microfissures et à maintenir la stabilité du matériau.

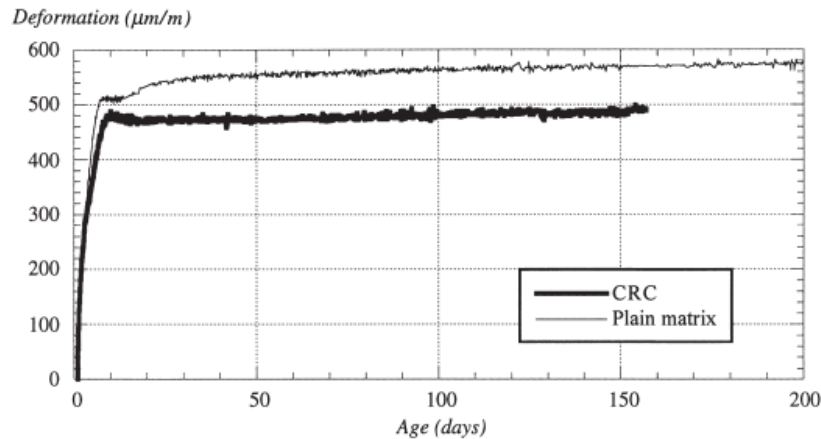


Figure 1.10 : Retrait autogène des échantillons simples et renforcés par des fibres métalliques [Loukili, 1999]

D'après Adeline (1999) . La forte valeur du retrait endogène ( $375 \times 10^{-6}$  déformations) est attribuable à la faible teneur en eau comme montré dans la figure 1.11 , amplifiant ainsi le phénomène déjà observé dans les BHP (bétons à haute performance). Le retrait total atteint environ  $500 \times 10^{-6}$  déformations [Adeline,1999].

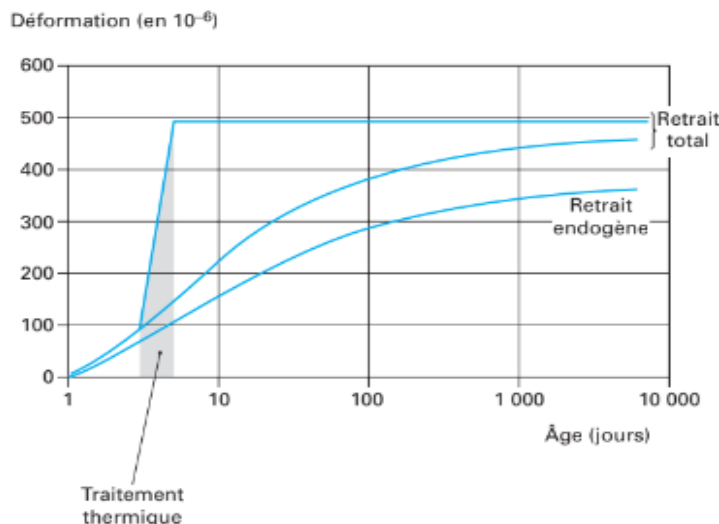


Figure 1.11 Courbes de retrait du BPR [Adeline,1999]

Le traitement thermique impacte significativement le retrait et le fluage : après traitement thermique, le BPR ne subit plus de retrait et les déformations de fluage se stabilisent très rapidement (en quelques jours) à une valeur très basse ( $k_{fl} < 0,2$ ). Cette particularité peut être avantageusement exploitée dans la conception de certaines structures.

### 1.6.3 Durabilité du béton de poudre réactive

La durabilité du BPR a été étudiée dès 1991, ce qui a permis de rassembler une quantité significative de données sur ses performances à long terme. L'origine de ses propriétés de durabilité réside dans la qualité de sa microstructure, influencée par l'application de deux principes fondamentaux : la suppression des gros granulats et l'amélioration des propriétés mécaniques de la pâte liante, ainsi que l'introduction de composants de différentes classes

granulaires. Cette approche réduit l'indice des vides global et la quantité d'eau nécessaire au mélange, favorisant ainsi une diminution de la porosité et une homogénéisation du matériau.

### 1.6.3.1 Porosité

La porosité du béton de poudre réactive fait référence à la quantité d'espaces vides ou de pores présents dans le matériau. Ces pores peuvent être remplis d'air, d'eau ou de gaz. Elle est significativement réduite par rapport au béton ordinaire. Les particules fines et la nature réactive des matériaux utilisés dans sa fabrication permettent de réduire les espaces vides à l'intérieur du matériau, améliorant ainsi sa résistance à la pénétration de l'eau, des sels et des agents agressifs.

La porosité dans le Béton de Poudre Réactive (BPR) est mesurée à l'aide d'un porosimètre à mercure, couvrant une plage de 6 nm à 100 µm. Cette mesure révèle une absence totale de porosité capillaire dans le BPR (voir Figure 1.12). Cette absence de porosité capillaire est significative car elle élimine l'un des principaux mécanismes de diffusion dans les matériaux à matrice cimentaire. Selon la méthode AFREM, la porosité accessible à l'eau du BPR est évaluée à 2 % [Adeline, 1999].

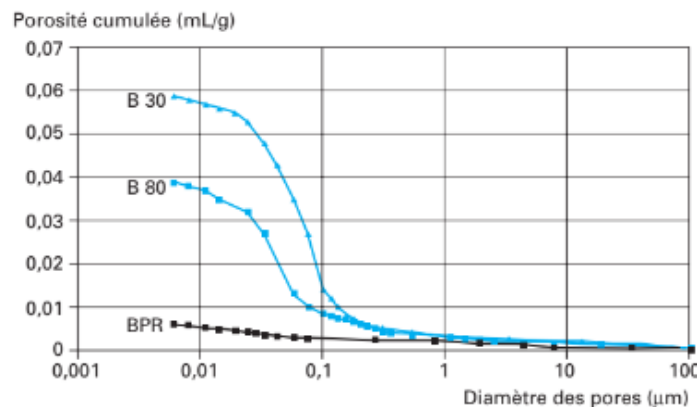


Figure 1.12 : Porosité comparée du BPR [Adeline, 1999]

### 1.6.3.2 Perméabilité et résistance aux cycles de gel-dégel

La très faible porosité et l'absence d'eau libre dans les pores capillaires du Béton de Poudre Réactive (BPR) ont des répercussions directes sur ses propriétés de perméabilité à l'air, de résistance au gel-dégel et d'abrasion, comme indiqué dans le tableau.

Comparé à un Béton à Hautes Performances (BHP) à air entraîné spécialement formulé pour résister au gel-dégel, le BPR affiche une plus grande résistance à ce phénomène. De plus, il est trois fois plus résistant à l'abrasion qu'un béton conventionnel selon les résultats de l'essai CNR [Zenati, 2007].

**Tableau 1.5** : Principales caractéristiques de durabilité du BPR 200 [Zenati ,2007]

<b>Porosité</b>	< 2 %
<b>Perméabilité à l'azote</b>	1 à 5 $10^{-20} m^2$
<b>Gel-dégel :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Module résiduel après 300 cycles</li> <li>● Perte de masse après 300 cycles</li> </ul>	100 % < 10 $g/cm^2$
<b>Abrasion (coefficient CNR)</b>	1.3
<b>Carbonatation :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Constante de carbonatation Kc</li> <li>● Pénétration sur 15 mm</li> </ul>	< 0.1 $mm/an^{0,5}$ > 12 000 ans
<b>Corrosion :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Coefficient de diffusion apparent</li> <li>● Coefficient de diffusion effectif</li> </ul>	Non mesurable 0.02

### 2.6.3.3 Résistance à la corrosion

Les facteurs qui pourraient déclencher la corrosion dans le BPR sont les suivants :

- La pénétration d'ions chlore.
- La carbonatation.
- La propagation de la corrosion des fibres métalliques à partir de la surface.

Les tests de diffusion et de migration accélérée des ions chlore ont confirmé une imperméabilité totale du BPR à ces agents (Tableau 1.5).

La carbonatation est négligeable. De plus, étant donné que le réseau de fibres n'est pas continu, la corrosion ne peut se propager aux fibres incluses dans la masse. [Zenati ,2007]

### 2.6.3.4 Résistance aux agents agressifs

La résistance du BPR aux agents agressifs, tels que l'eau de mer, l'eau distillée, le sulfate de calcium, l'acide acétique ou le sulfate de sodium, a été rigoureusement évaluée à travers des essais de flexion à 3 points. Ces essais ont été réalisés sur des échantillons immergés en permanence dans ces solutions corrosives pendant une période de 12 mois.

Les résultats ont démontré une réduction significative des performances, avec une baisse générale de 5 à 25 % par rapport aux échantillons non exposés. Cette diminution des performances peut être attribuée à l'interaction chimique entre les agents agressifs et les composants du BPR, ce qui peut altérer sa structure et compromettre sa résistance mécanique [Ladour, 2014].



### 1.6.3.5 Résistance au feu

En raison de sa faible porosité, le BPR n'offre pas une résistance au feu aussi élevée que les bétons traditionnels. Dans des conditions normales, sa résistance au feu est d'environ 15 minutes. Cependant, des formulations spéciales peuvent être utilisées pour améliorer cette résistance. Avec une formulation adaptée, la résistance au feu peut être portée à 60 minutes pour une structure non chargée et à 30 minutes pour une structure chargée. Pour obtenir des performances anti-feu encore plus élevées, des traitements ignifuges supplémentaires peuvent être nécessaires [Adeline,1999].

## 1.7 Méthodes de formation du BPR

Les méthodes de formation du **BPR** impliquent généralement l'utilisation de poudres fines telles que du sable, du ciment, du quartz et de la fumée de silice. Ces poudres sont mélangées dans des conditions similaires à celles des bétons classiques.

Le BPR est caractérisé par une forte teneur en fumée de silice et un faible rapport E/C, ce qui le rend plus résistant et durable. De plus, l'ajout de fibres métalliques confère au BPR une ductilité qui le rend adapté à diverses applications, y compris la réalisation de structures précontraintes par pré- ou post-tension.

Les études récentes se concentrent sur l'optimisation des compositions des BPR en fonction des ressources locales en granulats et ultra fines, ainsi que sur l'amélioration de leur résistance aux chocs et au feu.

### 1.7.1 Les principes de base de formulation du BPR

Dans les bétons ordinaires, le rapport eau sur liant (E/L) se situe généralement entre 0,4 et 0,6. Pour améliorer les performances du béton, ce rapport est réduit en dessous de 0,4 (généralement entre 0,3 et 0,35) grâce à l'incorporation d'un superplastifiant. Ce composant permet de disperser le liant de manière optimale, permettant ainsi une hydratation plus efficace du ciment avec moins d'eau. Dans certains cas, cet abaissement du rapport E/L peut être complété par l'ajout d'ultra fines telles que la fumée de silice, dont la taille est généralement cinq à dix fois plus petite que celle des grains de ciment, contribuant ainsi à une compacité accrue du matériau.

Pour atteindre un niveau encore plus élevé de performance avec les Bétons à Ultra-hautes Performances (BFUP), le rapport E/L est réduit à des valeurs inférieures à 0,25, souvent entre 0,16 et 0,2. Cette réduction est réalisée en augmentant la quantité de liant, tandis que la quantité totale d'eau reste relativement constante par rapport aux bétons traditionnels.

De plus, une proportion importante d'ultra fines, généralement sous forme de fumée de silice, est ajoutée, représentant environ 20% de la masse cimentaire. Cette combinaison permet d'obtenir une compacité extrême du matériau, garantissant des performances mécaniques et de durabilité exceptionnelles.

### **1.7.2 Méthode de Bonneau pour la formulation du BPR**

La méthode de Bonneau pour la formulation du BPR, proposée par Olivier Bonneau, se concentre sur l'optimisation du dosage des superplastifiants pour obtenir les meilleures performances du matériau. Cette méthode repose sur une approche systématique qui vise à déterminer le dosage optimal de superplastifiant nécessaire pour atteindre un équilibre entre la fluidité du béton et sa résistance mécanique.

L'objectif principal de la méthode de Bonneau est de minimiser les effets négatifs d'un excès de superplastifiant tout en maximisant les avantages qu'il apporte en termes de réduction du rapport eau/liant (E/L) et d'amélioration de la maniabilité du mélange. Pour ce faire, la méthode utilise des essais spécifiques pour évaluer les propriétés rhéologiques du BPR à différents dosages de superplastifiant.

La méthode de Bonneau repose sur une analyse approfondie de l'interaction entre les composants du BPR, notamment le ciment, la fumée de silice et le superplastifiant. En utilisant des modèles de prédiction basés sur la composition du mélange, elle permet de calculer un "Optimum Rhéologique en Superplastifiant" (ORS), c'est-à-dire la quantité de superplastifiant nécessaire pour obtenir les meilleures performances du matériau en termes de maniabilité et de résistance.

En ajustant le dosage de superplastifiant selon l'ORS déterminé, il est possible de minimiser les variations de comportement du béton tout en assurant une répartition homogène des fibres et des granulats dans le mélange. Cette approche permet d'obtenir un BPR avec des propriétés mécaniques et de durabilité optimisées, répondant ainsi aux exigences spécifiques des applications structurelles et architecturales les plus exigeantes.

### **1.7.3 Exemple de formulation en Laboratoire**

Dans le cadre des expérimentations en laboratoire, deux compositions types de Bétons à Ultra-Hautes Performances (BUHP) ont été mises en œuvre, telles que détaillées dans le tableau 1.6. L'une des formulations intègre du quartz broyé, tandis que l'autre ne contient pas cette composante. Par ailleurs, les 2 formulations sont renforcées par l'incorporation de fibres d'acier, visant ainsi à améliorer leurs propriétés mécaniques et leur résistance.

**Tableau 1.6 :** Formulation types de BUHP (Bonneau, 1997) (Alepari et al, 1997)

Matériaux	Sans quartz broyé		Avec quartz broyé	
	Proportions de la masse du Ciment	Masse (Kg/m <sup>3</sup> )	Proportions de la masse du Ciment	Masse (Kg/m <sup>3</sup> )
Ciment	1	934	1	750
Sable	1,1	1030	1,4	1050
Quartz broyé	/	/	0,32	240
Fumé de silice	0,25	234	0,30	225
Superplastifiant	0,014	13	0,018	13
Eau	0,23	215	0,20	150
Fibre métallique	0,024	187	0,02	150

## 1.8 Domaines d'applications du BPR

- **Structures de génie civil et Bâtiment :** Poutres précontraintes par pré ou post-tension, Dalles et passerelles piétonnes, Silos, réservoirs, cuves de rétention, Structures triangulées, Poutres et poteaux élancés, Planchers de grande portée, Création de pièces esthétiques, Panneaux de façade.
- **Réparation et réhabilitation d'ouvrages :** Renforcement parasismique de piles de ponts, Protection d'ouvrages soumis à l'érosion d'écoulement torrentiel, Renforcement de poteaux, Renforcement de tabliers d'ouvrages d'art à poutres, Renforcement structural de faible épaisseur.

## 1.9 Avantages et inconvénients

### 1.9.1 Avantages

Parmi les avantages du BPR, nous allons souligner ses bénéfices dans les domaines de la conception technique et architecturale :

**Tableau 1.7** : Conception technique et architecturale du BPR

Conception technique	Conception architecturale
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le BPR présente une résistance à la compression jusqu'à 4 fois supérieure aux bétons conventionnels.</li> <li>- Performance sismique améliorée grâce à sa ductilité.</li> <li>- Durabilité accrue.</li> <li>- La résistance aux conditions environnementales extrêmes, telles que les cycles de gel-dégel, les environnements marins et les conditions chimiques agressives.</li> <li>- Capacité à maintenir ses propriétés mécaniques élevées sur une longue période, assurant une durabilité à long terme des structures.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Finitions personnalisées et esthétique élégante.</li> <li>- Structures élancées et légères.</li> <li>- Capacité à réaliser des formes architecturales complexes.</li> <li>- Le BPR permet de réaliser des ouvrages avec des finitions très lisses et des formes complexes.</li> </ul>

D'autres avantages de la mise en œuvre et flexibilité :

- Autoplaçant et décoffrage rapide.
- Absence générale d'armatures passives, accélérant le travail sur le chantier.
- Capacité à être coulé dans des formes complexes et à réaliser des détails précis.
- Possibilité d'intégrer des éléments préfabriqués pour une construction rapide et efficace.

### 1.9.2 Défis et limitations

Le principal inconvénient du BPR réside dans son coût élevé, ce qui peut limiter son utilisation à grande échelle en raison de contraintes budgétaires, d'autres inconvénients :

- La fabrication et la mise en œuvre du BPR nécessitent un savoir-faire spécifique.
- Certains composants du BPR peuvent être moins facilement accessibles selon les régions.

## **1.10 Conclusion**

Ce chapitre a fourni une vue d'ensemble complète du Béton de Poudre Réactive (BPR), un matériau novateur aux performances exceptionnelles en termes de résistance et de durabilité. En comprenant ses origines, sa composition et ses caractéristiques, nous avons établi les fondations nécessaires pour apprécier pleinement les avantages et les applications potentielles du BPR dans l'industrie de la construction. Cette introduction ouvre la voie à des explorations plus détaillées de ses propriétés uniques et de son impact futur sur le secteur.

## **CHAPITRE 2**

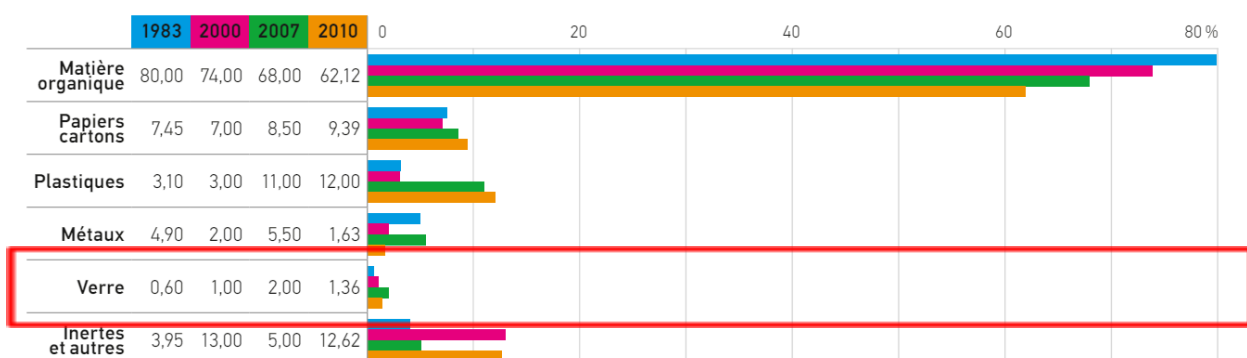
### ***Le Verre et la Poudre de Verre***

## 2.1 Introduction

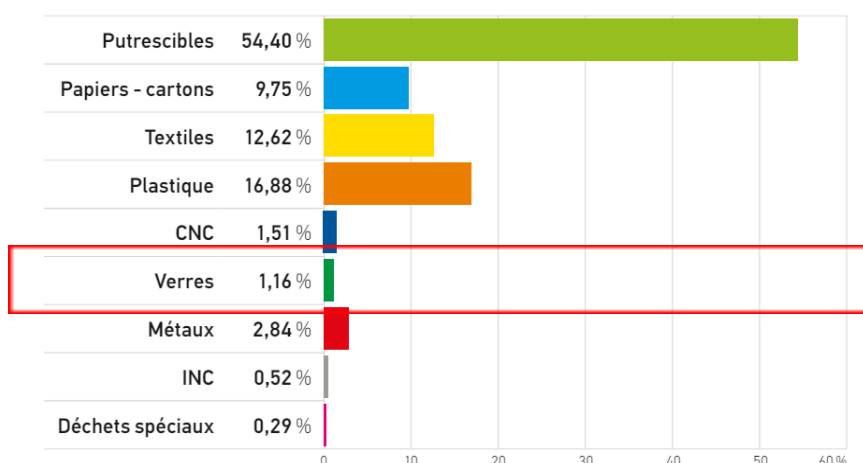
La récupération des déchets dans le domaine du génie civil revêt une grande importance, car les produits recherchés ne nécessitent pas des normes de qualité excessivement strictes. Le recyclage des déchets a des répercussions majeures sur l'environnement et l'économie. Ainsi, de nombreux pays utilisent divers déchets dans la construction, notamment dans la fabrication du ciment ou du béton, sous forme de poudres, de fibres ou d'agrégats.

Le verre est considéré comme un ancien matériau, il était déjà connu dans l'Antiquité, dès 3500 avant J.C en Égypte, mais son utilisation en tant que vitre ne s'est développée qu'à partir du 17ème siècle. L'industrie florissante de la miroiterie à Venise, puis en France, employait des techniques délicates et secrètes désormais obsolètes. Le verre est devenu un matériau essentiel en architecture, et son utilisation se répand de plus en plus dans la construction, prenant diverses formes telles que des vitres pour les baies, les toitures, les vitrines, des blocs pour les dallages, les cloisons, les murs.

Observons de près l'évolution significative du mode de vie et de consommation des ménages à travers le pays. Depuis 1980, on note un déclin marqué de l'utilisation de la matière organique au profit d'autres matériaux d'emballage, notamment le verre en Algérie, comme est montré dans la Figures 2.1, ainsi dans ce contexte d'une moyenne statistique par rapport aux trois zones représentant le territoire national (Corso - zone Nord, Bordj Bou Arreridj - zone semi-aride et Biskra - zone aride); Figure 2.2.



**Figure 2.1 :** Évolution de la production des Déchets Ménagers et Assimilés (DMA) en Algérie (en %) [Caractérisation DMA, 2014]



**Figure 2.2 :** Composition moyenne nationale des Déchets Ménagers et Assimilés (DMA) en 2014 (en %) [Caractérisation DMA, 2014]

## 2.2 Le Verre

### 2.2.1 Définition

Le verre est un matériau ou un alliage dur, cassant et transparent à la lumière visible. Il est principalement composé d'oxyde de silicium, qui est le principal constituant du sable. Le type de verre le plus communément utilisé est le verre sodocalcique. Du point de vue physique, le verre est amorphe, ce qui signifie qu'il n'a pas de structure cristalline. Sa structure microscopique est caractérisée par un important désordre structural, où il n'y a pas d'ordre à grande échelle, mais seulement un ordre à courte distance. On peut le comparer à un réseau tridimensionnel, semblable à celui d'un cristal, mais avec uniquement de l'ordre à courte distance. En comparaison, la silice cristalline (sous forme de Cristobalite) a une structure cristalline bien définie. Le verre est remarquable à bien des égards, que ce soit par sa structure ou ses propriétés. Il accompagne l'humanité à travers les siècles, étant présent à toutes les étapes de la vie quotidienne. Sa polyvalence en tant que matériau en a fait l'un des plus utilisés dans de multiples domaines, que ce soit à la maison (vaisselle, emballages, décoration, etc.), dans les transports (pare-brise, rétroviseurs, etc.), au bureau (écrans, photocopieuses, etc.) ou ailleurs. Lorsque les objets en verre deviennent inutilisables, ils sont considérés comme des déchets selon la loi française n° 75-633 du 15 juillet 1975 relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux. Le recyclage du verre offre une source de matière première secondaire pour de nombreuses applications, une idée qui remonte aux premières recherches sur l'incorporation du verre dans le béton dès les années 1960 [Shi et Zheng 2007].

### 2.2.2 Formation du verre

À travers l'histoire, plusieurs théories ont été avancées pour expliquer la formation des verres. Dès 1932, William Zachariasen a proposé une théorie qui permet de comprendre la structure du verre, souvent décrite comme un "réseau désordonné". Cette théorie repose sur des règles simples de comptabilité et de géométrie :

- a. Les atomes formateurs (comme Si, B, As, Ge...) sont de petite taille et ne peuvent être entourés que par un petit nombre d'atomes d'oxygène (3 ou 4), définissant ainsi la coordinence de l'atome formateur et induisant l'existence de directions privilégiées limitées (3 ou 4), assurant une structure lâche.
- b. Chaque atome d'oxygène est lié à un maximum de 2 atomes formateurs, ce qui signifie qu'il peut contribuer à 2 unités structurales.
- c. Les polyèdres formés par les atomes d'oxygène ne peuvent partager que leurs sommets, pas leurs arêtes ou leurs faces.
- d. Chaque polyèdre partage au moins 3 sommets avec d'autres polyèdres.

Ces éléments structuraux forment des motifs qui conduisent à la construction d'un réseau vitreux non régulier.



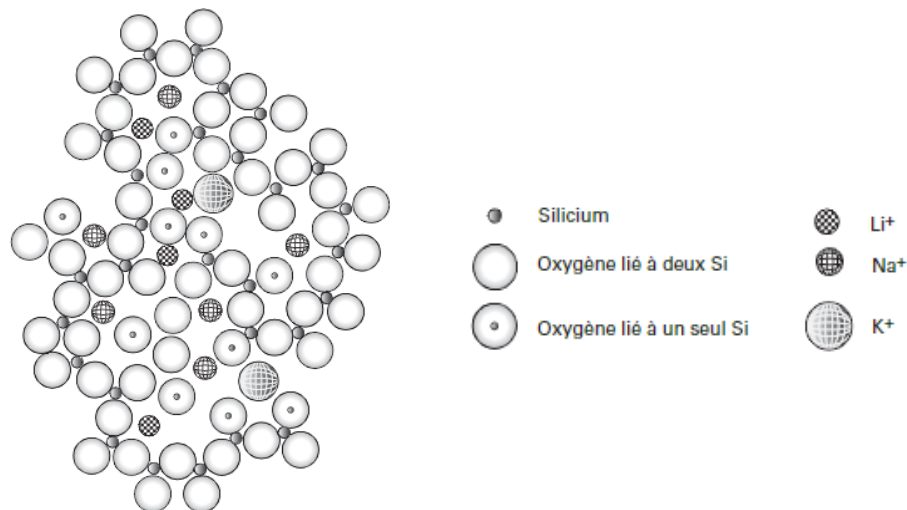


Figure 2.3 : Structure du verre - Construction aléatoire

### 2.2.3 Constituants du verre

La silice, constituant principal du verre, représente environ 70 % de sa masse. En tant qu'élément formateur du réseau, elle joue un rôle essentiel dans la dureté du verre. Son point de fusion est à 1 730°C. Le sable est sa principale source dans la fabrication du verre, avec les sables quartzeux contenant plus de 99 % de pureté. Un pourcentage élevé de silice entraîne un coefficient de dilatation plus faible, ce qui confère une plus grande résistance au verre.

En fait, la décomposition des matières pouvant être vitrifiées implique cinq principales familles d'éléments :

- **Les oxydes formateurs** : ils forment le squelette du verre, l'élément le plus important pour les verres industriels est le silicium, sa combinaison avec l'oxygène donne le SiO<sub>2</sub> (silice), aussi le bore, qui donne l'anhydride borique (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) qui augmente la fusibilité des verres tout en améliorant leur inaltérabilité, et le phosphore.
- **Les oxydes stabilisants** : ils modifient les propriétés physiques du verre, les plus fréquents sont l'oxyde de calcium CaO (chaux), l'oxyde de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), de zinc (ZnO) et la baryte (BaO).
- **Les oxydes fondants** : ils ont pour fonction de réduire la température de vitrification de plusieurs centaines de degrés Celsius (par exemple, de 1400°C dans le cas de la silice en tant qu'oxyde formateur).
- **Les oxydes affinant** : ils améliorent les teintes et la brillance du verre en diminuant la viscosité du verre, comme l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) en association avec la silice.
- **Les oxydes colorants** : ils teintent le verre dans la masse.

Quelques constituants secondaires, dont la proportion n'excède pas 1%, sont introduits pendant la fusion pour modifier la teinte ou les conditions de l'élaboration du verre, ce sont les oxydes métalliques colorants (exemple : oxyde de cuivre (CuO) pour la couleur verte).

### 2.2.4 Propriétés du verre

Les propriétés du verre sont déterminées par la proportion des différents constituants présents dans les matières premières. Ces propriétés impactent non seulement la qualité du

produit fabriqué, mais également au plus haut point les conditions de l'élaboration et de la mise en forme des produits.

**Tableau 2.1 :** Composition des verres industriels (% en poids) [Verre, le matériau ; TBA1960 V1]

Oxydes	Verre sodocalcique	Verre borosilicate	Verre vitrocéramique
SiO <sub>2</sub>	69 - 74	70 - 87	50 - 80
CaO	5 - 12	-	0 - 8
MgO	0 - 6	0 - 8	0 - 8
BaO	-	-	0 - 8
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	7 - 15	-
Li <sub>2</sub> O	0 - 3	0 - 8	0 - 5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0 - 3	0 - 8	15 - 29
Na <sub>2</sub> O	12 - 16	0 - 8	0 - 2
K <sub>2</sub> O	0 - 1	-	0 - 2

#### 2.2.4.1 Propriétés physiques

- **La densité :** La densité du verre est influencée par sa composition et, dans une certaine mesure, par son historique thermique. À l'état solide, le verre présente une faible dilatation thermique, et lorsqu'il commence à se ramollir (dans la zone de transformation), sa densité diminue rapidement.

**Tableau 2.2 :** Valeurs de densité des différents types de verre [Zhu, H., & Byars, E.A. 2004]

Type de verre	Quartz	Glasses	Armé	Creux/Pressé	au Plomb	Optiques
<b>Densité</b>	2,21	2,49	2,59	2,46	3,00	2,34

- **La porosité et l'absorption de l'eau :** Le verre est un matériau dense, imperméable et avec une faible absorption d'eau. Pour cela, le verre est un matériau utile pour de nombreuses applications, notamment les fenêtres, les portes et les bouteilles.

**Tableau 2.3 :** Propriétés physiques du verre [Zhu, H., & Byars, E.A. 2004] [NF EN 1097-6]

Granulat	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Absorption d'eau (%)	Porosité (%)
Le verre	2,31	1,34	0,03

#### 2.2.4.2 Propriétés mécaniques

Le verre est un matériau fragile qui ne tolère pas les changements de forme significatifs dus à la pression, aux chocs ou aux impacts. La grande dispersion des valeurs de résistance des

verres est liée à leur résistance. On suppose que dans la structure du verre, il existe des défauts de réseau qui agissent comme des points de faiblesse, réduisant ainsi considérablement la résistance locale. Même de légères rayures ou fissures peuvent considérablement diminuer la résistance du verre. La durée et la vitesse de l'effort exercé sur le verre ont une influence notable sur sa résistance.

### 2.2.4.3 Propriétés électriques

Contrairement aux métaux, les verres ne sont pas conducteurs d'électrons, mais ils conduisent les ions. Il est à noter que la constante diélectrique d'un verre ordinaire se situe entre 5 et 7. À l'état solide et sec, les verres sont d'excellents isolants et diélectriques. Cependant, dès que la surface du verre entre en contact avec la vapeur d'eau, même brièvement, la résistance électrique diminue et une conductivité superficielle apparaît, en particulier pour les verres riches en alcalis (tels que le sodium  $\text{Na}_2\text{O}$ , le potassium  $\text{K}_2\text{O}$ ) et le lithium ( $\text{Li}_2\text{O}$ ). À des températures comprises entre 200 et 300°C, la conductivité électrique du verre augmente fortement, et elle atteint des valeurs considérables à des températures élevées.

### 2.2.4.4 Propriétés chimiques

Étant donné que les verres sont des silicates minéraux, les produits organiques ont peu d'action sur eux, ce qui constitue un avantage par rapport à de nombreuses matières plastiques. En revanche, ils sont sensibles aux réactifs minéraux tels que l'eau, les acides et les bases. Il y a toujours des échanges chimiques entre l'eau et le verre. Les actions tels que  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ... sont relativement mobiles dans le réseau de silice, ce qui explique leur passage dans les solutions aqueuses en contact avec le verre. Les acides attaquent les verres en hydrolysant les liaisons oxygène-métal, mais l'attaque n'est généralement pas profonde car une pellicule de silice hydratée insoluble se forme. En revanche, les bases alcalines ont une action plus agressive car elles dissolvent la silice elle-même, détruisant ainsi les liaisons Si-O qui forment le réseau semi-organisé du verre. Ainsi, avec l'eau et les acides, il y a seulement échange de cations entre le verre et l'eau sans altération des liaisons Si-O, tandis qu'avec les bases, ces dernières sont attaquées, entraînant la destruction totale du verre.

## 2.2.5 Différents verres utilisés dans le bâtiment

### 2.2.5.1 Verres sodocalciques

Les verres sodocalciques sont la famille la plus couramment utilisée, représentant plus de 90% de la production de verre. Leur prédominance, composée principalement de silice, de calcium et de sodium, s'explique par des raisons économiques telles que le faible coût des matières premières et la température modérée de fabrication. Ils sont principalement utilisés dans la fabrication de vitrages, ainsi que dans la production de bouteilles et de flacons.

### 2.2.5.2 Verres borosilicates

Les verres borosilicatés, développés par Otto Schott vers 1880, ont apporté plusieurs améliorations significatives, notamment en élargissant la gamme des verres optiques grâce à l'introduction d'oxyde borique ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ). Ces verres se distinguent par leur capacité à supporter des températures élevées en raison de leur faible coefficient de dilatation, ce qui les qualifie de verre dur en raison de leur point de ramollissement élevé. Ils sont souvent utilisés

spécifiquement dans les vitrages de protection contre l'incendie et comme écrans de confinement des fumées.

### 2.2.5.3 Verres vitrocéramiques

Les verres vitrocéramiques se composent d'une phase vitreuse et d'une phase cristalline, dont la cristallisation est contrôlée. Le traitement thermique qui induit cette transformation en céramique semi-cristalline est appelé céramisation (Stookey a développé la première vitrocéramique vers 1954). La présence dans le verre d'agents de nucléation de nature variée est ce qui permet d'obtenir une vitrocéramique. Bien que les verres au lithium soient les plus courants, d'autres catalyseurs de nucléation comme l'oxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ) ou l'oxyde de zirconium ( $\text{ZrO}$ ) sont également utilisés. Ils partagent avec les borosilicates un faible coefficient de dilatation et une grande résistance aux chocs thermiques, ce qui les rend adaptés à une utilisation comme vitrages de protection contre le feu. On les trouve également dans la cuisine, utilisés comme plaques chauffantes ou ustensiles culinaires en verre.

### 2.2.5.4 Verres extra-clairs

La composition des verres se distingue par une très faible teneur en oxydes métalliques, notamment le fer, ce qui entraîne une coloration résiduelle très faible. Cette caractéristique leur confère une transmission lumineuse plus élevée que celle d'un verre clair ordinaire. En raison de cette propriété, ils sont souvent utilisés comme façade de magasins et choisis pour exposer des objets d'art.

Pour obtenir un verre extra-clair, on ajoute du bioxyde de manganèse ou du sélénium, ce qui permet d'éliminer toute coloration résiduelle causée par des traces d'oxydes colorants.

### 2.2.5.5 Verres teintés

Comme mentionné précédemment, le verre sodocalcique peut être coloré dans la masse en ajoutant des oxydes métalliques. Les teintes les plus couramment utilisées sont le vert, le gris et le bronze, bien que les variations dépendent du four et du fabricant. Voici quelques exemples de teintes :

- Oxyde de titane : Marron
- Oxyde de chrome : Jaune
- Oxyde de manganèse : Violet
- Oxyde de cobalt : Vert
- Oxyde de nickel : Bleu.



Figure 2.4 : Les différents verres utilisés dans le bâtiment

## 2.3 La Poudre de Verre

### 2.3.1 Définition

La poudre de verre, résultat du broyage du verre, est caractérisée par sa haute teneur en silice amorphe  $\text{SiO}_2$ . Cette particularité la rend particulièrement attrayante comme additif cimentaire dans la production de béton et lui confère des propriétés pouzzolaniques, où elle offre des avantages notables en termes de durabilité et de performance.



Figure 2.5 : Le verre et la poudre de verre

Son utilisation contribue à la valorisation des déchets de verre tout en réduisant l'impact environnemental associé à la production de ciment.

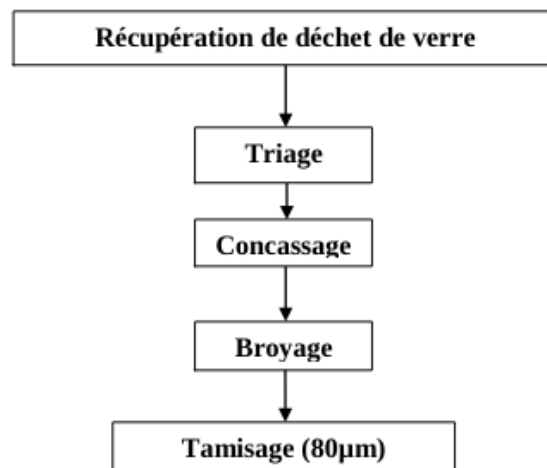


Figure 2.6 : Schéma technologique de préparation de la poudre de verre

### 2.3.2 Effets de la poudre de verre

#### 2.3.2.1 Effet de la couleur

Selon plusieurs études [Du et Tan, 2013 ; Pereira-de-Oliveira et al., 2012] ; [Karamberi et Moutsatsou, 2005], le verre de couleur verte présente une réactivité pouzzolanique plus élevée. Cette caractéristique pourrait être attribuée aux éléments de coloration qui participent à la réaction pouzzolanique, ainsi qu'aux différences structurales entre les différents types de verre.

D'autres recherches ont également révélé que les particules de verre transparent induisent davantage de microfissures, tandis que le verre vert en provoque très peu et que presque aucune microfissure n'a été observée dans les particules de verre brun [Du et Tan, 2013].

### 2.3.2.2 Effet de l'oxyde de fer $Fe_2O_3$

L'oxyde de fer ( $Fe_2O_3$ ) joue un rôle important dans la réactivité et les propriétés du verre. [Meyer et Baxter, 1997] ont démontré dans leur étude que la présence de l'oxyde de fer influençant significativement la manière dont le verre réagit à certaines conditions.

Ils ont comparé deux échantillons de verre : l'un contenant 2% de  $Fe_2O_3$  et l'autre contenant seulement 0,05% de  $Fe_2O_3$  comme présenté dans la figure 2.7. Leurs résultats ont montré une réduction de 85% de l'expansion du verre lorsque la teneur en  $Fe_2O_3$  passait de 0,05% à 2%. Cela démontre clairement l'effet bénéfique de l'oxyde de fer sur la stabilité du verre.

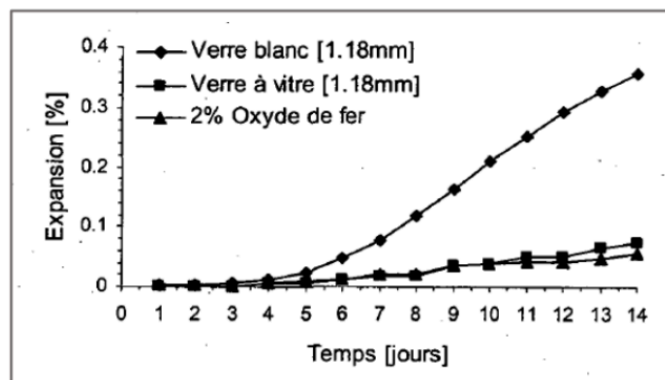


Figure 2.7 : Résultats d'essai d'expansion sur éprouvettes de mortiers avec du verre [Meyer et al., 1997]

### 2.3.2.3 Effet de la finesse des grains

La nature granulaire du verre intégré dans les bétons peut induire différents comportements. Les granulats de verre grossiers sont souvent associés à des réactions alcali-silice préjudiciables, entraînant des altérations dans la structure du béton.

En revanche, les particules de verre plus fines déclenchent une réaction pouzzolanique bénéfique. Ainsi, une plus grande Surface Spécifique Blaine (SSB) du verre est associée à une activité pouzzolanique accrue. Cette réaction contribue à améliorer les propriétés du béton en favorisant la formation de nouveaux minéraux dans la matrice cimentaire, ce qui renforce sa durabilité et sa résistance.

## 2.3.3 Influence de la poudre de verre sur les caractéristiques des ciments

### 2.3.3.1 Activité Pouzzolanique

La réaction pouzzolanique de la poudre de verre dans une matrice cimentaire implique la combinaison de la silice amorphe du verre avec la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment en présence d'eau. Des recherches menées par Shayan et al. (2004) ont montré que la poudre de verre de finesse Blaine élevée, jusqu'à  $8000 \text{ cm}^2/\text{g}$ , peut entraîner d'importantes réactions pouzzolaniques dans le mortier, permettant de remplacer jusqu'à 30 % du ciment dans certains mélanges de béton [Shayan et al., 2004].

D'autres études, telles que celles menées par Shi et al. (2005), ont examiné des poudres de verre de différentes finesse, variant de  $2640$  à  $5820 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Elles ont démontré que la réaction

pouzzolanique du verre est d'autant plus significative que sa finesse est élevée. De plus, une augmentation de la température de maturation des échantillons accélère l'activation de cette réaction, de même que celle des cendres volantes [Shi et al., 2005].

La réaction pouzzolanique de la poudre de verre semble être sensiblement influencée par le rapport eau/ciment du béton. En effet, les améliorations des propriétés du béton résultant de cette réaction sont plus remarquables dans les bétons ayant des rapports eau/ciment élevés que dans ceux ayant des rapports plus faibles. [Aladdine, 2009; Zidol, 2009].

[Zeroub et al, 2015] ont examiné l'activité pouzzolanique d'une poudre de verre présentant une surface spécifique d'environ 8 000 cm<sup>2</sup>/g et ont constaté que cet ajout cimentaire possède une activité pouzzolanique comparable à celle des cendres volantes, largement utilisées comme substitut cimentaire à l'échelle mondiale, comme le montre la figure 2.8 . L'activité pouzzolanique de la poudre de verre peut être évaluée en mesurant sa capacité à réagir avec l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)<sub>2</sub>) en présence d'eau pour former des produits de réaction cimentaires tels que les silicates de calcium hydratés.

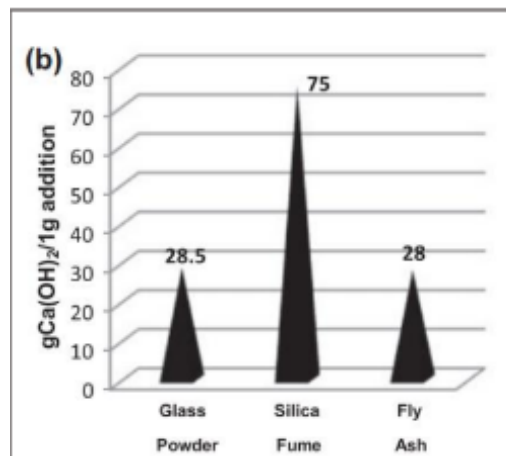
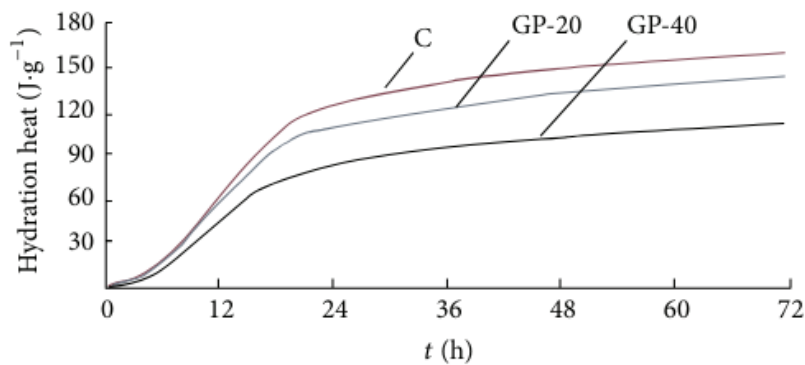


Figure 2.8 : Activité pouzzolanique de différents ajouts cimentaires [Zeroub et al., 2015]

Ceci permet la substitution de la poudre de quartz par la poudre de verre dans la composition des bétons ultra-hautes performances, ainsi que la substitution des liants cimentaires par cette dernière.

### 2.3.3.2 Chaleur d'hydratation

Dans l'étude menée par Xiaolin et al. (2015), il est démontré que l'incorporation de poudre de verre dans le béton entraîne une réduction significative de la chaleur d'hydratation. Cette baisse de température est attribuée au retardement et au ralentissement du processus d'hydratation du ciment, résultant de la présence de la poudre de verre. Ce phénomène revêt une importance capitale car il contribue à la prévention des fissurations induites par le retrait thermique, particulièrement critiques dans le contexte des ouvrages massifs en béton. Comme le montre la Figure 2.9 , la chaleur d'hydratation émise par une pâte de ciment contenant de la poudre de verre est nettement inférieure à celle d'une pâte de ciment classique.



**Figure 2.9** : Chaleur d'hydratation totale du ciment avec et sans PV à une température constante 25°C pendant 72 heures [Xiaolin et al., 2014]

## 2.4 Influence de la Poudre de Verre sur les Propriétés du Béton

### 2.4.1 À l'état frais

D'après l'étude de Shayan et ses collaborateurs en 2005, l'ajout de poudre de verre dans le béton semble entraîner une augmentation de la teneur en air et une diminution de l'affaissement, ainsi que de la masse volumique à l'état frais.

Le tableau 2.4 de cette étude montre la baisse de l'affaissement en fonction de l'augmentation du taux de remplacement de la poudre de verre, de même que la masse volumique à l'état frais.

**Tableau 2.4** : Propriétés à l'état frais des bétons avec la poudre de verre [shayan et coll, 2005]

Num de mélange	Description	Affaissement (mm)	Densité à 28 jours
Mix 1	Mélange de référence	70	2,408
Mix 2	10 % de PV	75	2,340
Mix 3	20 % de PV	65	2,393
Mix 4	30 % de PV	60	2,328

### 2.4.2 À l'état durci

#### 2.4.2.1 Résistance à la compression et la traction

Les recherches menées par Shayane et ses collègues (2004) ont révélé que substituer 30 % de poudre de verre conduit à des résistances à la compression à long terme supérieures à celles obtenues avec 10 % de fumée de silice et 20 % de poudre de basalte pulvérisée. Comme présenté dans la figure 2.10.



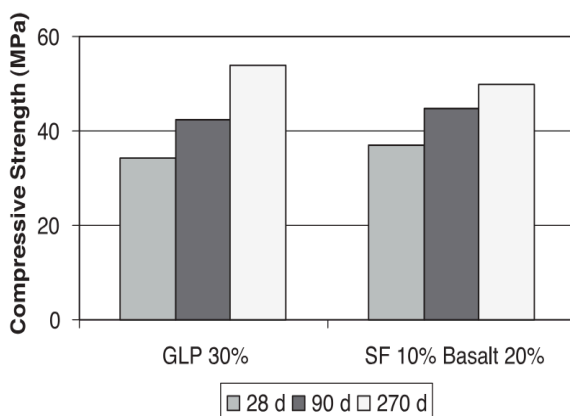


Figure 2.10 : Comparaison de résistance entre la fumée de silice et la poudre de verre [Shayan et al., 2004]

### 2.4.2.2 Réaction Alkali-Silice

La composition du verre, riche en silice amorphe et en alcalis, suggère qu'il peut entraîner d'importantes réactions alcali-silice (RAG), lorsqu'il est utilisé comme substitut partiel des granulats dans le béton. Cependant, lorsqu'il est finement broyé et utilisé comme additif cimentaire, cette caractéristique permet d'exploiter son effet pouzzolanique par le biais de la réaction avec la portlandite.

Les recherches menées par Shayan et al. (2004) ont démontré que l'utilisation du verre sous forme de granulats fins peut engendrer la réaction alcali-silice, tandis que sous forme de poudre, il réduit significativement l'expansion résultant de cette réaction, comme indiqué dans la figure 2.11 [Shayan et al., 2004]. D'autres études menées par Shayan et al. (2006) ont également montré une réduction de l'expansion due à la réaction alcali-silice avec l'utilisation de poudre de verre.

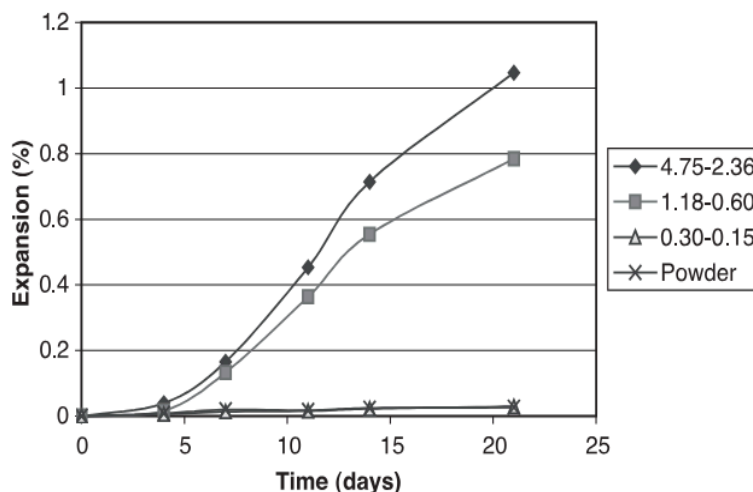


Figure 2.11 : Expansion due à la RAG sur des mortiers contenant des particules de verre de différentes tailles [Shayan et al., 2004]

### 2.4.2.3 Pénétrabilité des ions chlorure

L'ajout de poudre de verre entraîne une diminution de l'interconnectivité des pores, proportionnelle au taux de substitution. Cette réduction de la connectivité des pores est attribuée à l'accroissement de la tortuosité des pores, résultant de leur remplissage par des produits d'hydratation et de fines particules de verre non hydratées [Schwarz et al., 2007].

De façon significative, la poudre de verre réduit la pénétrabilité des ions chlore, ce qui peut contribuer à l'amélioration de la durabilité des bétons. Les mélanges contenant de la poudre de verre démontrent une résistance accrue à la pénétration des ions chlore, ce qui diminue les risques de corrosion des armatures de béton [Schwarz et al., 2008].

Les bétons identifiés 10 GP ou 10 GPR contiennent 10% de la poudre de verre et ayant des rapports E/L respectifs de 0,40 et 0,36.

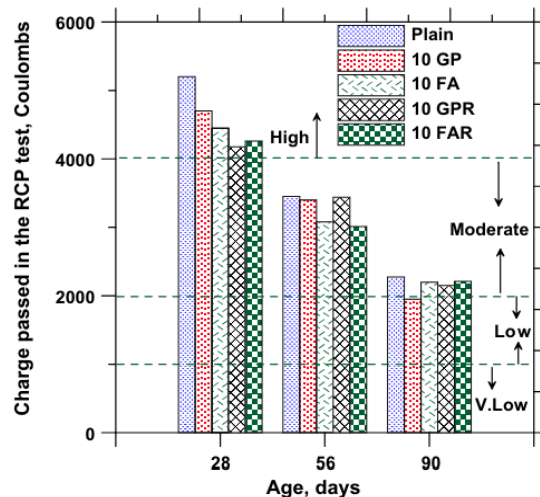


Figure 2.12 : Pénétrabilité des ions chlorure [Schwarz et al., 2008]

#### 2.4.2.4 Perméabilité à l'eau

L'incorporation de de poudre de verre finement broyée dans le béton a été associée à une diminution de sa perméabilité à l'eau , tandis que des taux de substitution de poudre de verre allant de 15 % à 60 % ont entraîné une réduction encore plus marquée, variant entre 54 % et 80 %. Cette réduction de la perméabilité à l'eau est attribuée à la fois à l'effet pouzzolanique de la poudre de verre et à son effet de remplissage, améliorant ainsi le compactage des fines dans la matrice du béton [Du et Tan, 2014].

#### 2.4.2.5 Perméabilité au gaz

L'incorporation de 30 % de poudre de verre dans le béton entraîne une diminution significative de la porosité. Cette réduction de la porosité conduit à une structure plus dense et à une déconnexion des pores existants, formant ainsi un milieu imperméable qui limite le transfert de fluides à l'intérieur du béton [Zeroub et al., 2015].

### 2.5 Exemples d'utilisation de la poudre de verre dans la construction

Plongeant dans une perspective innovante et durable, la Ville de Montréal s'est engagée dans une série de projets novateurs exploitant la poudre de verre recyclé dans diverses applications. À travers ces initiatives, Montréal se positionne à la pointe de l'ingénierie écologique, démontrant son engagement envers la réduction des déchets et la promotion de pratiques de construction plus durables. Cette présentation mettra en lumière certains des projets emblématiques réalisés par la Ville de Montréal, illustrant l'impact positif de

l'intégration de la poudre de verre dans ses infrastructures et ses projets urbains [la norme canadienne CSA A 2], [Université de SHERBROOKE], [Infrastructures Montréal] :

- 2011 - Projet MBAM (Musée des Beaux Arts de Montréal) :** En 2011, la Ville de Montréal a lancé le projet MBAM avec des objectifs clairs en tête. Ce projet visait à développer un béton architectural à la teinte plus claire, répondant ainsi à des critères esthétiques tout en réduisant l'empreinte environnementale. En utilisant la poudre de verre à hauteur de 10% du contenu cimentaire, le projet cherchait également à promouvoir une approche plus écologique dans la construction. Ces objectifs ont été mis en œuvre avec succès, témoignant de la volonté de Montréal d'innover dans ses pratiques de construction tout en adoptant des solutions durables.



Figure 2.13 : Projet MBAM, Montréal

- 2013 - Projet rue Poutrincourt :** En 2013, dans le cadre du Projet rue Poutrincourt de l'Arrondissement Ahuntsic-Cartierville, la Ville de Montréal a entrepris la création de trois sections de trottoirs utilisant différentes proportions de poudre de verre (PV) dans le béton : 10 %, 20 % et 25 %. Parallèlement, une section de trottoir a été aménagée en tant que béton témoin, selon le devis 3VM-10. Des essais approfondis ont été menés sur les bétons conditionnés, exposés à diverses conditions environnementales telles que des températures froides (5°C), des températures normalisées (23°C) et des températures chaudes (35°C), ainsi que dans des conditions ambiantes extérieures sur des dalles témoins. Ces tests visaient à évaluer les performances et les propriétés des différents mélanges de béton contenant de la poudre de verre, fournissant ainsi des données importantes pour guider les futures initiatives de construction durable de la ville.

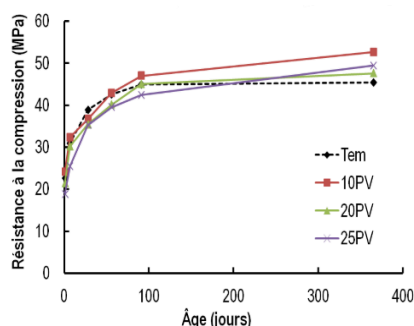


Figure 2.14 : Résistance à la compression (MPa)

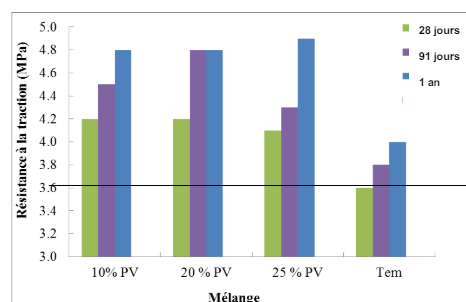


Figure 2.15 : Résistance à la Traction (MPa)

## CHAPITRE 2 : Le Verre et la Poudre de Verre



Figure 2.16 : Projet rue Poutrincourt, Montréal

### ● Projets 2014 :

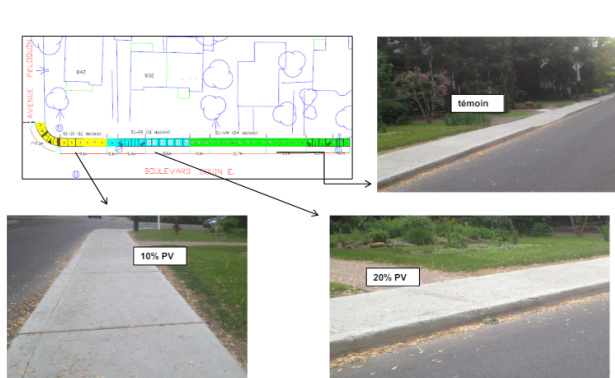


Figure 2.17 : Boulevard Gouin est, Arrondissement Ahuntsic-Cartierville - 01 août 2014

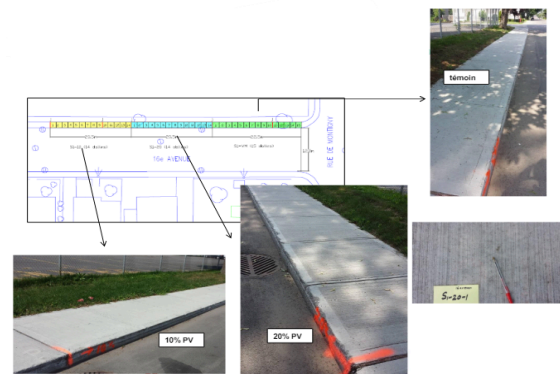


Figure 2.18 : 16ème avenue, Arrondissement RDP-PAT - 15 août 2014

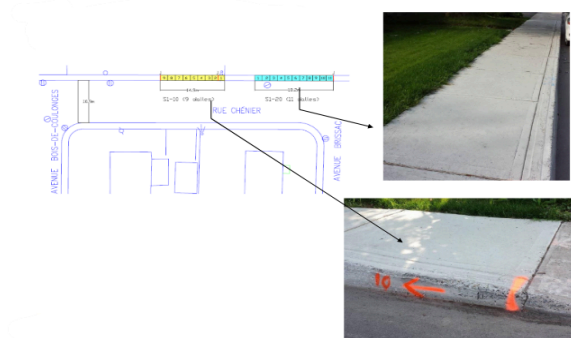


Figure 2.19 : Rue Chénier, Arrondissement Anjou - 25 septembre 2014



Figure 2.20 : Square Cabot 15% PV (début 2014 - fin 2015)

### ● Projets 2015 :



Figure 2.21 : Rue CEDAR, De la rue Ramesay et chemin de la côte-des-Neiges Cabot ( 4000 m<sup>2</sup>)

## 2.6 Conclusion

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

## **CHAPITRE 3**

### ***Effets de la Poudre de verre sur le BPR***

### 3.1 Introduction

Dans le vaste domaine des matériaux de construction, les bétons à poudre réactive (BPR) suscitent un intérêt croissant en raison de leurs performances exceptionnelles et de leur durabilité accrue. L'incorporation de poudre de verre dans les BPR ouvre de nouvelles perspectives prometteuses, mais nécessite une compréhension approfondie de son impact sur les propriétés mécaniques de ces matériaux innovants.

Ce chapitre se penche sur l'état de l'art de l'utilisation de la poudre de verre dans les BPR, mettant en lumière les résultats des recherches antérieures. Bien que ce domaine soit encore relativement peu exploré, les quelques études disponibles [Soliman et Tagnit, 2016 ; Zainab ,2022 ;Yan et al. , 2024 ; Majid ,2022 ] fournissent un aperçu des performances de ce béton.

Nous explorerons comment cette inclusion influence les caractéristiques des BPR à l'état frais et durci, offrant ainsi un cadre conceptuel pour notre propre analyse. En examinant les travaux antérieurs, nous éclairerons les opportunités et les défis associés à l'utilisation de la poudre de verre dans les BPR, ouvrant la voie à de nouvelles avancées dans l'industrie de la construction.

### 3.2 Influence de la poudre de verre sur les caractéristiques du BPR à l'état frais

D'après une étude menée par Nancy Ahmed SOLIMAN en 2016, différentes proportions de poudre de verre (0 %, 10 %, 20 %, 40 % et 50 %) ont été utilisées pour remplacer le ciment dans le BFUP. Avec une surface spécifique de la poudre de verre évaluée à 3800 cm<sup>2</sup>/g, les résultats de l'analyse ont montré que le remplacement du ciment par cette poudre de verre a légèrement amélioré la fluidité du mélange, grâce à la surface lisse et à l'absorption d'eau réduite des particules de poudre de verre. Les résultats de cette étude sont présentés dans le tableau 3.1.

**Tableau 3.1** : Propriétés à l'état frais des mélanges de BPR contenant de la PV [Soliman et Tagnit, 2016]

<b>PV dans le Béton (%)</b>	<b>Affaissement (mm)</b>	<b>Vides d'air (%)</b>	<b>Poids volumique (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Température de béton (°C)</b>
<b>0</b>	190	3,8	2458	34
<b>10</b>	195	3,8	2446	31
<b>20</b>	205	4,2	2426	28
<b>30</b>	210	4,1	2410	26
<b>40</b>	215	4,2	2394	25
<b>50</b>	220	4,7	2380	23

Une autre étude a également confirmé que l'augmentation du pourcentage de remplacement a entraîné une légère augmentation de la fluidité du béton. Comme le montre la figure 3.1, l'augmentation de l'écoulement résulte de la petite taille des particules de poudre de verre recyclé, en plus de la texture vitreuse et de la forme sphérique, ce qui améliore la maniabilité et réduit la friction entre les particules [Zainab, 2022].

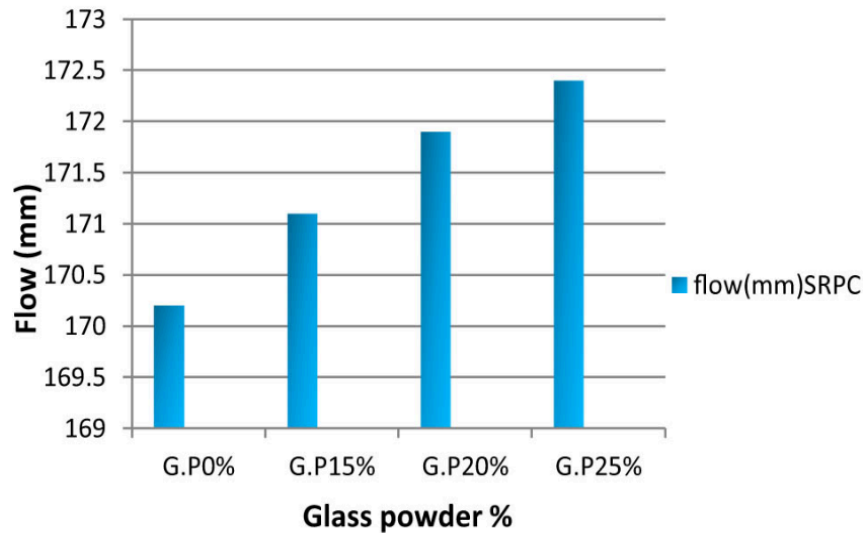


Figure 3.1 : L'influence du % de PV sur l'ouvrabilité du BPR [Zainab, 2022]

Cependant, une autre étude a conclu que l'augmentation de la proportion de poudre de verre réduit la maniabilité du béton (figure 3.2). Ces variations peuvent être expliquées par les différences de taille et de finesse des particules de poudre de verre utilisées dans cette recherche.[Tran et al,2023]

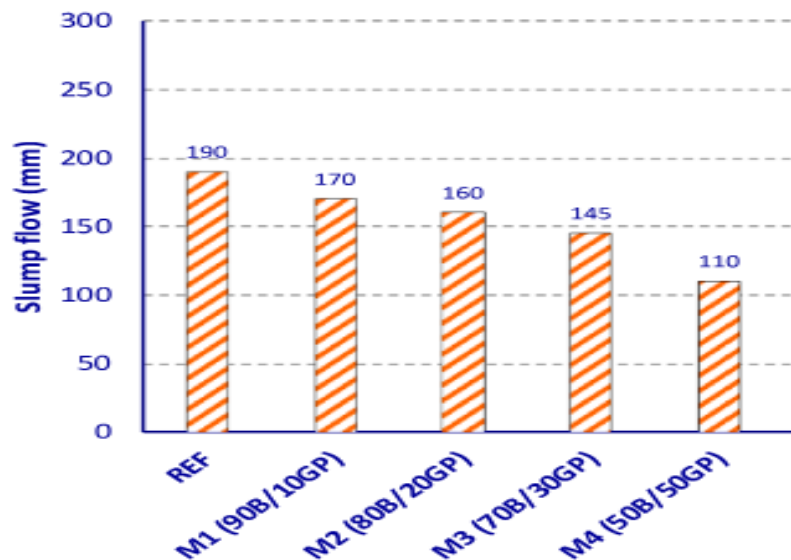


Figure 3.2 : L'influence du % de PV sur l'ouvrabilité du BPR [Tran et al,2023]



### 3.3 Influence de la poudre de verre sur les caractéristiques du BPR à l'état durci

#### 3.3.1 Influence de la poudre de verre sur la résistance à la compression

L'intégration de poudre de verre en substitution du ciment dans la formulation du béton de poudre réactive (BPR) diminue initialement sa résistance à la compression aux jeunes âges (figure 3.3). Cependant, à long terme, après 90 jours, cette résistance dépasse celle du béton de référence [Soliman et Tagnit, 2016].

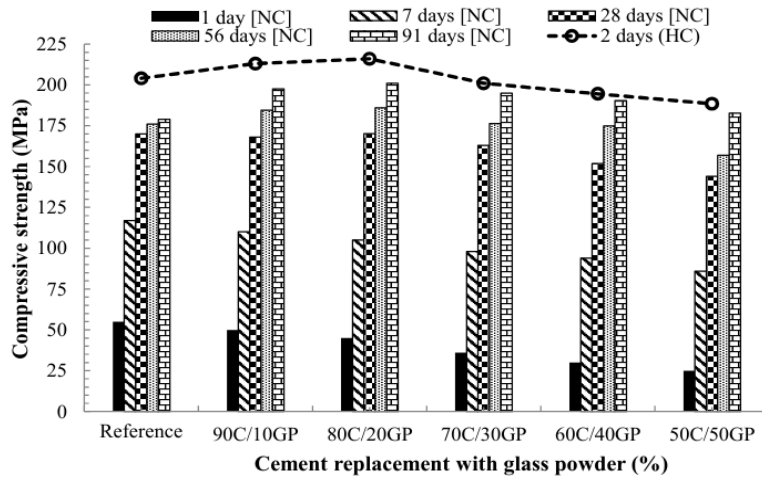


Figure 3.3 : Effet du PV sur la résistance à la compression à différents âges après durcissement normal (NC) et durcissement accéléré (HC) [Soliman et Tagnit, 2016]

Une étude réalisée par Tran et son équipe en 2023 a constaté que le remplacement partiel du ciment et de la fumée de silice (SF) par de la poudre de verre affecte la résistance à la compression des mélanges de béton. Les résultats montrent que les mélanges avec 10 % et 20 % de PV (90B/10GP et 80B/20GP) présentent une légère diminution de la résistance à la compression par rapport au mélange de référence, sous des conditions de cure standard (SC). En revanche, sous des conditions de cure à l'eau (WC), certains mélanges ont montré une amélioration de la résistance à la compression, comme indiqué dans la figure 3.4. [Tran et al,2023]

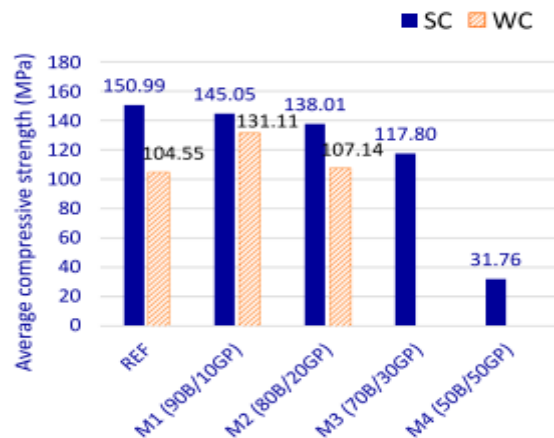


Figure 3.4 : Effet du PV sur la résistance à la compression à 28j sous deux régimes de cure : cure standard (SC) et Cure à l'eau (WC) [Tran et al,2023]

D'autre étude a révélé que l'incorporation de 20 % de poudre de verre recyclé dans le BPR a entraîné une augmentation significative de la résistance à la compression par rapport au mélange de référence même à 28 jours comme montré dans figure 3.5 [Hussain et Aljalawi, 2022].

Dans cette étude, le béton de référence avait initialement une teneur en ciment de 950 kg/m<sup>3</sup>, réduite par la suite par l'addition de poudre de verre. Il est notable que ce béton se caractérise par une concentration élevée de fibres métalliques, atteignant environ 235,7 kg/m<sup>3</sup>, ce qui représente environ 25 % de la quantité de ciment utilisée. Ces fibres sont principalement responsables de sa haute résistance à la compression et à la flexion.

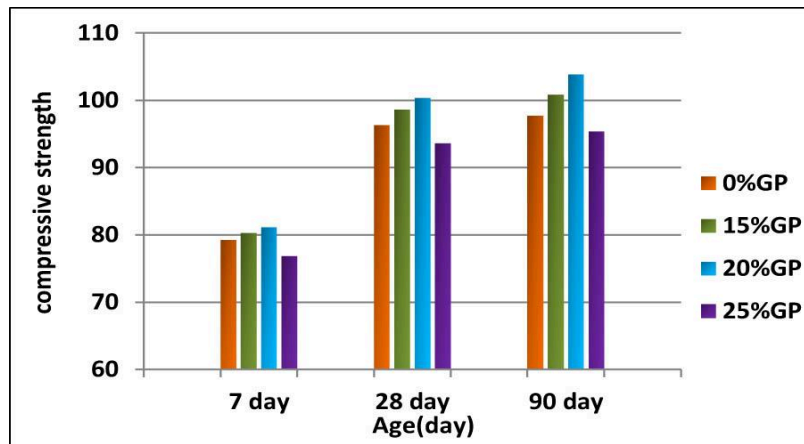


Figure 3.5 : Influence de %PV sur la résistance à la compression en fonction de temps [Hussain et Aljalawi, 2022]

Les résultats de l'étude menée par Majid en 2022 indiquent que la résistance à la compression augmente jusqu'à un remplacement de 25 % de poudre de verre, atteignant une résistance de 115 MPa à 7 jours comme montrée dans la figure 3.6 . Les performances de résistance à la compression les plus élevées ont été observées avec un remplacement de 25 % à 28 jours, atteignant 133 MPa. Il est à noter que ce béton se distingue par une concentration élevée de fibres métalliques, environ 154,2 kg/m<sup>3</sup>, représentant environ 20 % de la quantité de ciment utilisée, ainsi qu'un taux significatif de fumée de silice, environ 25 %. Ces deux matériaux jouent un rôle prépondérant dans sa haute résistance à la compression et à la flexion.

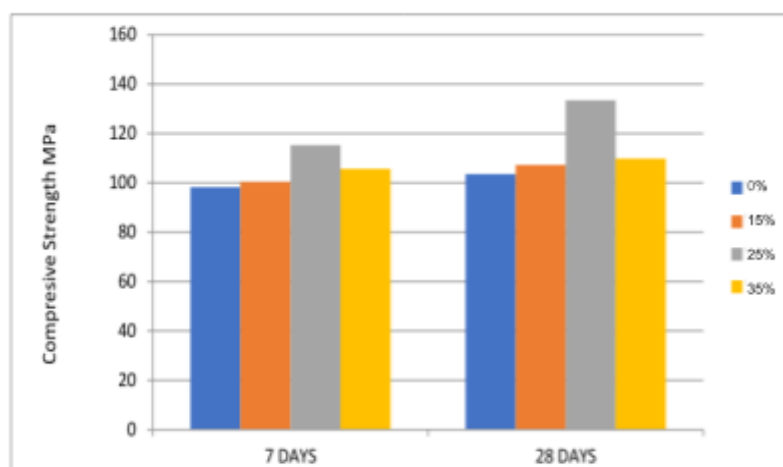


Figure 3.6 : Résistance à la compression en fonction du pourcentage de %PV [Majid ,2022]

### 3.3.2 Influence de la poudre de verre sur la résistance à la flexion

La résistance à la flexion du BPR est améliorée avec un taux de remplacement de 20 % de poudre de verre recyclé (figure 3.7) en raison de ses propriétés pouzzolaniques et de sa capacité à agir comme un micro-remplisseur, prolongeant ainsi la durée du traitement et favorisant l'hydratation continue du ciment [Hussain et Aljalawi, 2022].

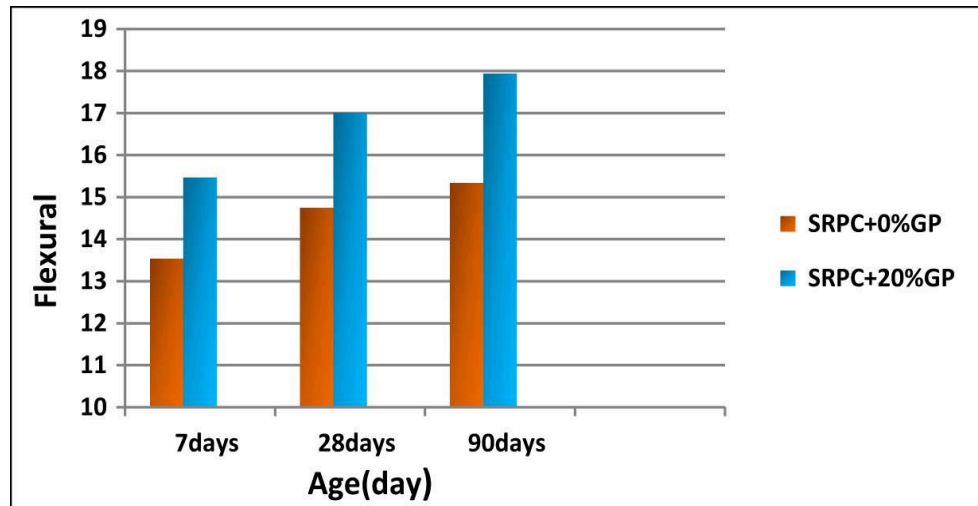


Figure 3.7 : Influence de %PV sur la résistance à la flexion en fonction de temps [Hussain et Aljalawi, 2022]

### 3.3.3 Influence de la poudre de verre sur le module d'élasticité

Le module d'élasticité du BPR varie de 35 GPa à 42 GPa en fonction du pourcentage de remplacement de la poudre de verre (figure 3.8), avec une valeur maximale de 42 GPa pour un remplacement de 25 % de la poudre de verre [Majid , 2022].

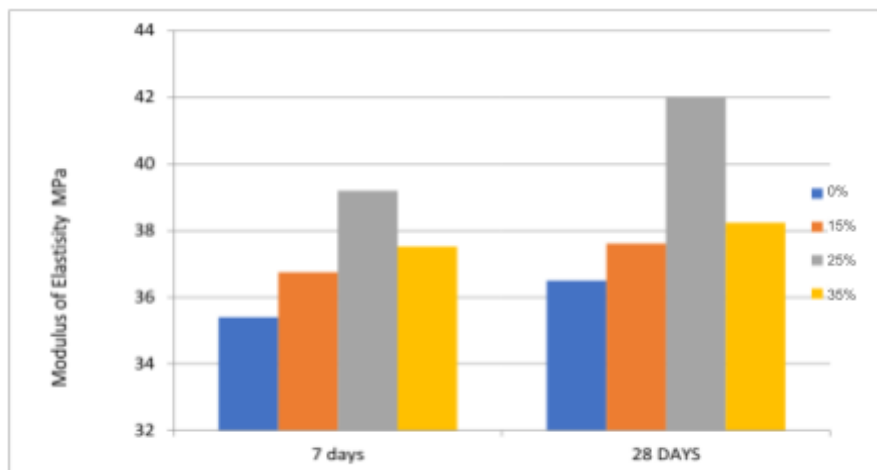


Figure 3.8 : Module d'élasticité en fonction du % de PV [Majid , 2022]

### 3.3.4 Influence de la poudre de verre sur l'absorption d'eau

Une réduction de l'absorption a été observée lorsque le taux de remplacement par de la poudre de verre recyclé était de 20 % par rapport aux mélanges de référence comme montrée dans la figure 3.9 [Zainab ,2022].

La diminution de l'absorption s'explique par le fait que la poudre de verre recyclé agit comme un matériau cimentaire supplémentaire, favorisant la formation d'une plus grande quantité de gel C-S-H. Ce gel remplit les espaces vides dans la matrice de béton qui seraient normalement remplis d'eau [Hussain et Aljalawi, 2022].

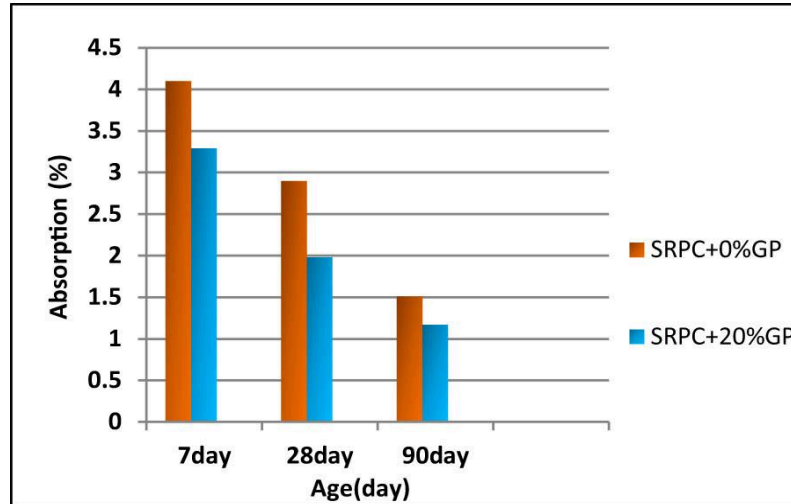


Figure 3.9 : Relation entre l'absorption (%) et l'âge pour le BPR [Hussain et Aljalawi, 2022]

### 3.4 Conclusion

Dans ce chapitre de la poudre de verre dans les bétons à poudre réactive (BPR), mettant en lumière ses effets sur les caractéristiques mécaniques des matériaux. Les résultats montrent également une augmentation significative de la résistance à la compression avec l'ajout de poudre de verre, en particulier jusqu'à un remplacement de 25 %. De plus, la résistance à la flexion et le module d'élasticité augmentent également avec l'ajout de poudre de verre, tandis que l'absorption d'eau diminue. Ces conclusions soulignent le potentiel de la poudre de verre comme matériau de substitution efficace dans les BPR, ouvrant la voie à des améliorations dans l'industrie de la construction.

**DEUXIÈME PARTIE :**  
***ETUDE EXPÉRIMENTALE***

**CHAPITRE 4**  
***Programme expérimental***  
***et Matériaux utilisés***

## 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons le plan expérimental de notre étude ainsi que la caractérisation des matériaux utilisés, notamment le ciment blanc, le sable blanc, le quartz broyé, la fumée de silice, le laitier et la poudre de verre. Notre objectif est de formuler 3 mélanges de BPR.

- Le premier servira de béton de référence.
- Le deuxième inclura une addition de pourcentage de laitier.
- Enfin, le troisième, consistera en un mélange avec du laitier et une substitution de ciment par de la poudre de verre.

Les pourcentages de ces ajouts seront déterminés dans le chapitre suivant.

## 4.2 Plan expérimental

- **Broyage** : Verre et laitier de haut fourneau broyés en premier.
- **Caractérisation** : Analyse détaillée du sable, ciment, quartz broyé, poudre de verre et laitier broyé.
- **Optimisation des mélanges** :
  - Premier mélange : Ciment et poudre de verre.
  - Deuxième mélange : Ciment et laitier.
  - Troisième mélange : Résultat du premier mélange et laitier.
- **Formulation des bétons** : Formulation des 3 mélanges de BPR.
- **Essais** :
  - État frais : Étalement et masse volumique.
  - État durci : Résistance à la compression, à la flexion, à la traction et mesure du retrait.

L'organigramme présenté dans la Figure 4.1 résume ce plan expérimental détaillé.

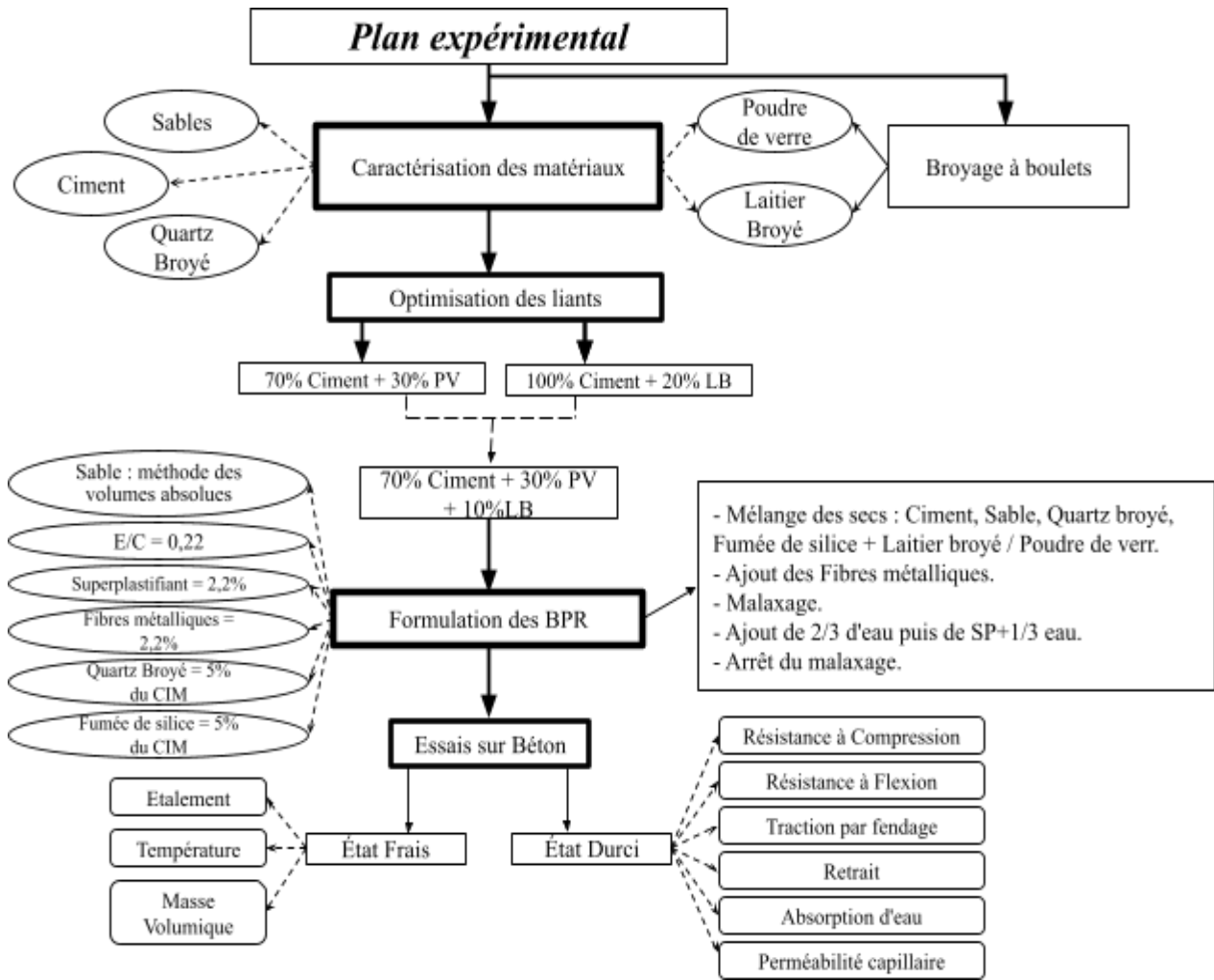


Figure 4.1 : Organigramme de plan expérimental

Le Tableau 4.1 récapitule ces phases en détaillant les essais réalisés et les normes correspondantes utilisées. Les essais menés à chaque phase sont ensuite décrits dans les sections suivantes pour une meilleure clarté et compréhension.

**Tableau 4.1** : Récapitulatif des essais effectués

<b>Phases</b>	<b>Essais</b>		<b>Normes</b>	
<b>Caractérisation des matériaux</b>	<b>Physique</b>		Granulométrie	NF EN 12620
			Finesse SSB	NF EN 196-6
			Masse volumique	NF EN 1097-6
			Absorption	NF EN 1097-6
			Bleu de méthylène	NF EN 933-9
			équivalent de sable	NF EN 933-8
<b>Essais d'optimisations</b>	<b>État frais</b>		Etalement	NF EN 12350-8
			Masse volumique	ASTM C 138
			Température	ASTM C 1064
	<b>État durci</b>	Résistance à la compression	NF EN 12390-3	
<b>Essais sur les éprouvettes</b>	<b>État frais</b>		Etalement	NF EN 12350-8
			Masse volumique	ASTM C 138
			Température	ASTM C 1064
	<b>État durci</b>	<b>Essais de caractéristiques</b>	Masse volumique	NF EN 206+A2
			Absorption d'eau	NF EN 206-1
		<b>Propriétés mécaniques</b>	Résistance à la compression	NF EN 12390-3
			Traction par flexion	NF EN 12390-5
			Traction par fendage	NF EN 12390-6
			Retrait de séchage	NF P15-433
		<b>Durabilité</b>	Absorption capillaire	ASTM C1585-11

## 4.3 Méthodes d'essais

### 4.3.1 Essais sur sable

Les essais de caractérisation du sable revêtent une importance capitale dans la préparation de BPR. Le sable, en tant que composant majeur de ce matériau de construction, influence significativement ses propriétés finales. Ainsi, évaluer avec précision diverses caractéristiques du sable telles que sa granulométrie, sa propreté et sa forme devient impératif pour assurer la qualité et la durabilité du béton produit.



### 4.3.1.1 L'analyse granulométrique (NF EN 12620)

L'analyse granulométrique vise à évaluer la répartition des tailles de particules dans le sable. Elle implique le tamisage du sable à travers une série de tamis de tailles progressives, suivi de la mesure des masses des fractions retenues sur chaque tamis (Figure 4.2). Cette méthode permet d'obtenir des informations détaillées sur la distribution granulométrique du sable, essentielles pour la formulation précise des mélanges de BPR.



Figure 4.2 : Tamiseurs pour Granulométrie

### 4.3.1.2 Equivalent de sable (NF EN 933-8)

L'équivalent de sable est une mesure de la propreté du sable, indiquant la proportion de fins indésirables par rapport au sable total. Il est évalué en comparant la capacité de filtration d'un échantillon de sable avec celle d'une solution standard (Figure 4.3). Un résultat élevé d'équivalent de sable indique un sable propre, ce qui est essentiel pour la qualité du béton.

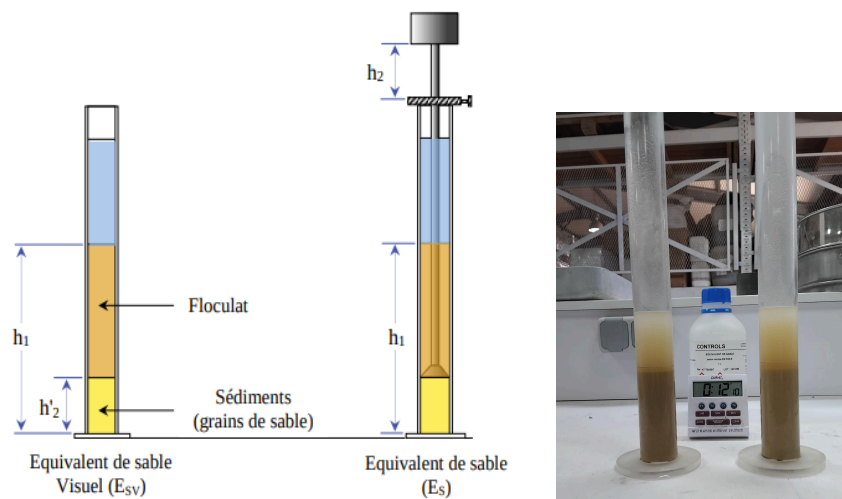


Figure 4.3 : Mesure de l'équivalent de sable (ES) et l'équivalent de sable Visuel (ESV)

### 4.3.1.3 Essai de masse volumique et coefficient d'absorption d'eau (NF EN 1097-6)

Cet essai vise à déterminer la masse volumique réelle et le coefficient d'absorption d'eau des granulats fins selon la norme NF EN 1097-6. Il permet d'évaluer la densité et la capacité

d'absorption d'eau du sable. Par la méthode du pycnomètre (Figure 4.4) qui nous permet de déterminer :

- $\rho_a$  : Masse volumique absolu
- $\rho_{rd}$  : Masse volumique réelle
- $\rho_{ssd}$  : Masse volumique saturée
- $W_A$  : Coefficient d'absorption d'eau



Figure 4.4 : Essai de masse volumique réelle par Pycnomètre

#### 4.3.1.4 Bleu de méthylène (NF EN 933-9)

L'essai au bleu de méthylène intervient pour détecter la présence de fines particules indésirables dans le sable, telles que d'argile. Cette méthode repose sur l'absorption du bleu de méthylène par les particules fines présentes dans le sable (Figure 4.5).

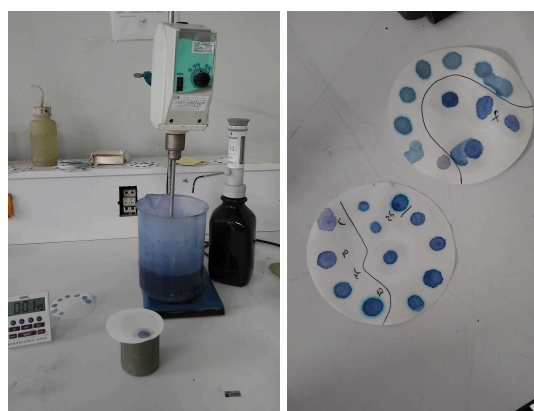


Figure 4.5 : Essai au bleu de méthylène

### 4.3.2 Essais sur Poudre

#### 4.3.2.1 Broyage de la poudre de verre

Pour obtenir une finesse SSB supérieure à  $6000 \text{ g/cm}^2$  pour la poudre de verre, le broyage a été effectué dans un broyeur à boulets d'une capacité maximale de 20 kg, avec une vitesse de rotation de 56 tours par minute (Figure 4.6). Le processus de broyage du verre est divisé en 6 séquences de broyage de 20 minutes chacune, entrecoupées de périodes de repos.



Figure 4.6 : Broyeur à boulets

Le taux de remplissage en boulets dans le broyeur influence directement son efficacité. Un remplissage excessif peut entraîner une adhérence insuffisante des boulets aux parois du broyeur en raison de la force centrifuge. En règle générale, le taux de remplissage du broyeur ne doit pas dépasser 30% à 35% de son volume. Dans cette étude, le broyeur a été rempli à 33% de son volume avec des boulets métalliques de différents diamètres (2 cm, 4 cm, 7 cm) pour obtenir la finesse désirée.

#### 4.3.2.2 La finesse de mouture SSB (NF EN 196-6)

La surface spécifique Blaine (SSB), correspond à la totalité de la surface des grains d'une poudre, définie par sa surface spécifique. Elle est déterminée par la méthode Blaine, une technique largement utilisée dans l'industrie cimentière, bien qu'elle soit plutôt empirique. Cette méthode ne mesure pas directement la finesse des produits, mais elle permet de contrôler efficacement la qualité du broyage de manière simple et rapide en usine. (Figure 4.7).

Le principe de la mesure repose sur la vitesse de passage d'un volume d'air à travers une pastille compacte de poudre. Le temps de passage est ensuite utilisé pour calculer la surface spécifique Blaine à l'aide d'une formule d'étalonnage. La formule de la méthode Blaine est donnée par :

$$SSB = \frac{K\sqrt{e^3}\sqrt{t}}{\rho(1-e)\sqrt{\eta}} \text{ (cm}^2\text{/g)}$$

Avec :

- K: Constante de l'appareil
- $\rho$  : Masse volumique absolue en g/cm
- e : Porosité
- $\eta$  : Viscosité de l'air à la température de l'essai en poise
- t : Temps de passage de l'air dans la couche de la poudre

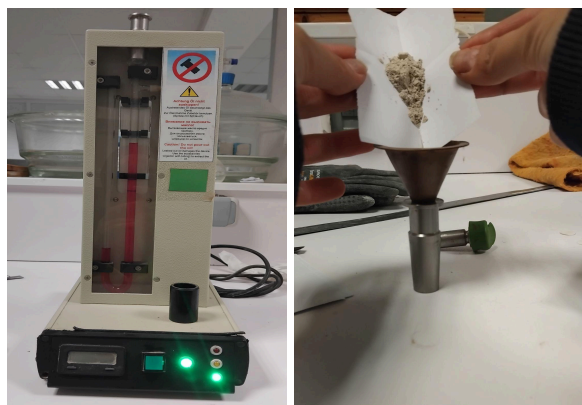


Figure 4.7 : Essais SSB

### 4.3.2.3 Essai de refus (ASTM C430)

L'essai de refus à 45  $\mu\text{m}$  est une méthode utilisée pour évaluer la finesse des ciments et des autres matériaux en poudre, tels que la poudre de verre. Il mesure le pourcentage de particules qui ne passent pas à travers un tamis de 45  $\mu\text{m}$  de diamètre (Figure 4.8). Cette mesure est importante car elle influence directement les propriétés de l'hydratation et de la prise du ciment.



Figure 4.8 : Tamiseurs pour Refus

Dans cette étude, le pourcentage de refus à 45  $\mu\text{m}$  a été mesuré pour quatre types de matériaux fins : ciment, quartz broyé, poudre de verre et laitier broyé. La procédure expérimentale a débuté par le placement de chaque type de matériau dans une étuve à 105°C pendant 24 heures pour éliminer toute humidité résiduelle. Ensuite, 30g de chaque poudre séchée ont été prélevés et déposés sur un tamis de 45  $\mu\text{m}$ . En activant la souffleuse, les particules fines ont été séparées du matériau, permettant ainsi de mesurer le pourcentage de refus à 45  $\mu\text{m}$ . Le pourcentage de refus à 45  $\mu\text{m}$  visé pour chaque poudre est inférieur à 20%.

### 4.3.3 Essais sur béton frais

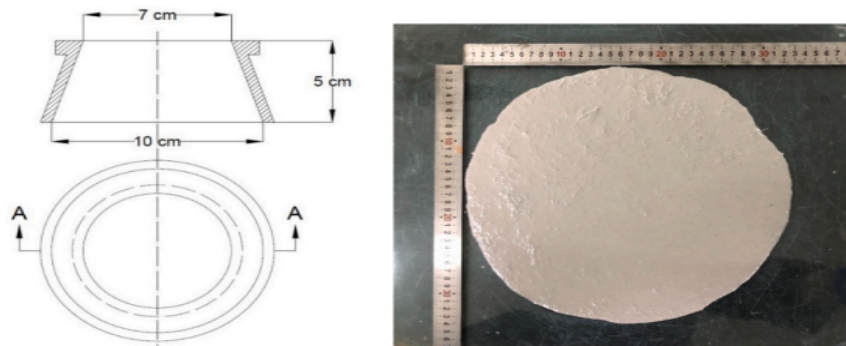
#### 4.3.3.1 Etalement au mini cône (NF EN 12350-8)

La mesure de la fluidité du béton dans des conditions non confinées repose sur l'essai d'étalement, également appelé "slump flow" (Figure 4.9), qui évalue la capacité du matériau à s'écouler. Pour ce faire, on utilise un dispositif comprenant un mini-cône positionné sur une plaque aux dimensions indiquées dans la figure 4.10. La procédure consiste à remplir le cône en une seule fois, puis à le soulever pour mesurer le diamètre moyen de l'écoulement résultant, en effectuant 2 mesures perpendiculaires. Un étalement plus important indique une meilleure fluidité du matériau, suggérant ainsi une facilité accrue de mise en œuvre et de répartition sur le chantier.

Un diamètre de 25/26 cm est recherché dans notre étude, ce qui indique une meilleure fluidité du matériau.



**Figure 4.9 :** Essai d'étalement au mini-cône



**Figure 4.10 :** Dimensions du mini-cône utilisé

#### 4.3.3.2 Masse volumique (ASTM C 138)

La masse volumique des bétons ordinaires utilisés dans diverses applications telles que les bâtiments, les chaussées et les ouvrages d'art se situe généralement entre 2200 et 2400 kg/m<sup>3</sup>. Cette masse volumique peut varier en fonction de la densité et de la qualité des granulats, ainsi que des quantités d'air occlus ou entraînés.

La mesure de la masse volumique est effectuée conformément à la norme ASTM C 138 . Elle consiste à peser le béton dans un volume défini, puis à diviser cette masse par le volume pour obtenir la masse volumique en kg/m<sup>3</sup>.

#### 4.3.3.3 Temperature (ASTM C 1064 )

La température joue un rôle significatif dans la rhéologie du béton, bien que son influence soit indirecte, car elle affecte la viscosité des matériaux. En ce qui concerne les bétons à l'état frais, la température peut accélérer la réaction d'hydratation du ciment, entraînant une perte rapide de maniabilité. La température est mesurée à l'aide d'un thermomètre électronique au thermomètre à mercure à contact (Figure 4.11), enfoncé à une profondeur d'au moins 7 cm dans le béton juste après avoir arrêté le malaxage, conformément à la norme ASTM C 1064.



**Figure 4.11 :** Mesure de la température du béton

### 4.3.4 Essais sur béton durci

L'étude se concentrera sur le comportement mécanique et la durabilité des différents types de bétons, à savoir les bétons témoins BPRT, ainsi que les bétons BPR20L et BPR30PV. Les essais seront réalisés conformément aux normes. Les éprouvettes testées auront des dimensions spécifiques : 50 x 50 x 50 mm pour les éprouvettes cubiques, 40 x 40 x 140 mm pour les éprouvettes prismatiques, et 70 x 160 mm pour les éprouvettes cylindriques.

#### 4.3.4.1 Résistance à la compression (NF EN 12390-3)

La résistance mécanique à la compression constitue l'aspect essentiel du béton durci, évaluée à des étapes essentielles de son processus de durcissement.

Dans le cadre de l'évaluation de cette résistance, des essais de compression sont menés sur des éprouvettes de BPR, ayant des dimensions de 50x50x50 mm, à des intervalles spécifiques de temps, à savoir à 2 jours, 28 jours et 90 jours.

Pour réaliser ces essais, des éprouvettes normalisées sont progressivement soumises à des charges jusqu'à ce qu'elles atteignent leur point de rupture (Figure 4.12). Ces résultats fournissent des indications précieuses sur les performances mécaniques du matériau dans des conditions d'utilisation réelles.



Figure 4.12 : Écrasement des éprouvettes

#### 4.3.4.2 Traction par flexion (NF EN 12390-5)

L'une des caractéristiques distinctives du BPR est sa résistance élevée à la flexion par rapport à d'autres types de béton.

Pour évaluer cette résistance, des éprouvettes prismatiques 40 x 40 x 160 mm sont formulées et soumises à des essais de traction par flexion à des intervalles spécifiques de temps, à savoir à 2 jours, 28 jours et 90 jours. Ces éprouvettes sont chargées jusqu'à rupture en appliquant une force à l'aide de rouleaux supérieurs et inférieurs (Figure 4.13). La charge maximale supportée pendant l'essai est enregistrée, ce qui permet de calculer la résistance à la flexion du matériau.

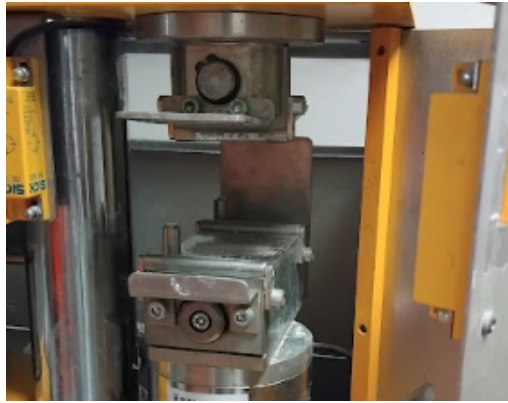


Figure 4.13 : Essai de flexion à 3 points

#### 4.3.4.3 Essai de fendage (NF EN 12390-6)

Pour évaluer la résistance en traction, l'essai de fendage, également appelé essai brésilien, est généralement réalisé sur des éprouvettes cylindriques conformément à la norme NF P 18-408. Lors de cet essai, une charge de compression centrée est appliquée sur l'éprouvette dans le plan médian passant par ses deux génératrices opposées.

Les contraintes induites entraînent la rupture selon un plan diamétral de l'éprouvette, comme illustré dans la Figure 4.14.



Figure 4.14 : Essai de fendage (a) Schéma de principe (b) Diagramme des contraintes dans la section de l'éprouvette



Figure 4.15 : Essai de fendage sur éprouvette 70 x 160

On obtient la résistance en traction avec l'équation suivante :

$$\sigma_t = \frac{2 * F_{rup\ moy}}{\pi * \phi * L}$$

avec :

- $F_{rup\ moy}$  : la charge maximale moyenne à la rupture en (KN).
- $L$  : la longueur de l'éprouvette (m).
- $\phi$  : diamètre de l'éprouvette (m).

#### 4.3.4.4 Essai de retrait (NF P15-433)

L'essai vise à évaluer la variation dimensionnelle, sous forme de contraction ou d'expansion, induite par le ciment sur des éprouvettes de béton. À différents moments ( $t$ ), on mesure la différence de longueur par rapport à une valeur de référence ( $t_0$ ), généralement prise après un temps de démoulage de 24 heures.

Pour réaliser cette mesure, un comparateur est ajusté à zéro sur une tige étalon en Invar de longueur  $L = 160$  mm comme montré dans la figure 4.16. La longueur de chaque éprouvette à un instant donné ( $t$ ) est déterminée en ajoutant la variation lue sur le comparateur ( $dl(t)$ ) à la longueur initiale ( $L$ ).

La variation de longueur à chaque temps ( $t$ ) est ensuite calculée comme suit :

$$\Delta l(t) = l(t) - l(t_0) = dl(t) - dl(t_0)$$

Les résultats de ces mesures sont ensuite moyennés sur les 3 éprouvettes issues du même moule.

Généralement, une variation de longueur négative ( $\Delta l(t)$ ) est observée lorsque les éprouvettes sont exposées à l'air, ce qui indique un retrait de l'éprouvette.



Figure 4.16 : Appareillage pour la mesure du retrait

Les moules utilisés dans cet essai sont équipés de plots de retrait en laiton, fixés au moule lors de la mise en place du mortier et ensuite détachés avant le démoulage (Figure 4.17). Après durcissement, les éprouvettes de dimensions 4x4x16 sont ainsi pourvues de plots à leurs 2 extrémités. Par la suite, ces éprouvettes sont conservées dans une salle dont l'humidité est maintenue à 50%.



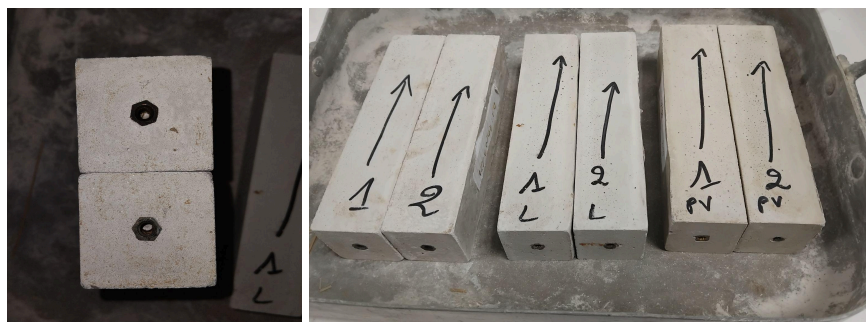


Figure 4.17 : Les éprouvettes et les plots de retrait en laiton

#### 4.3.4.5 Essai d’Absorption capillaire (ASTM C1585-11 )

L'évaluation de l'absorption par capillarité repose sur le test de succion capillaire, une méthode largement utilisée pour contrôler la pénétration de l'eau dans le béton. Conformément à la norme ASTM C1585-04, des éprouvettes prismatiques de dimensions 40x40x160 mm, âgées de 28 jours, sont sélectionnées pour cette évaluation. Après avoir été préalablement séchées dans une étuve pendant 24 heures, les éprouvettes sont revêtues d'une fine couche de résine sur leurs surfaces latérales afin de favoriser un écoulement unidirectionnel de l'eau. Placées dans un bain d'eau, sur des supports, seuls les premiers 1 cm de leurs bases sont immergés dans l'eau, comme le montre la Figure 4.18.

La masse des échantillons est mesurée à des intervalles réguliers après 1, 15 et 90 minutes d'absorption.

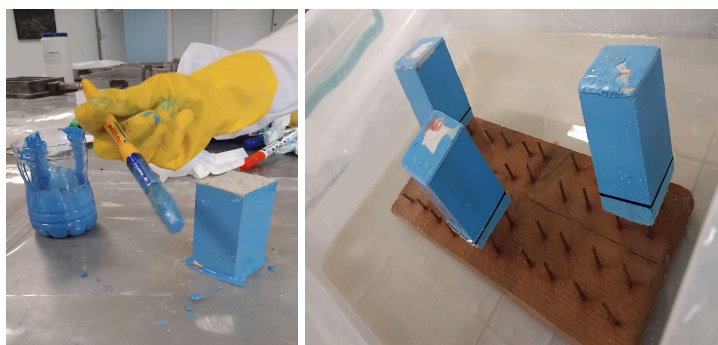


Figure 4.18 : Essai d’absorption d'eau par capillarité

#### 4.3.4.6 Essai de capacité d’absorption d’eau ( EN 206-1)

L'essai de capacité d'absorption d'eau offre une évaluation générale de la présence et de l'importance des vides dans le béton, ce qui permet d'apprécier sa compacité. Une meilleure compacité se traduit par une absorption d'eau réduite, ce qui améliore l'étanchéité du matériau.

Pour effectuer cet essai, les éprouvettes sont d'abord pesées après avoir été placées dans une étuve, puis retirées une fois leur poids stabilisé ( $m_s$ ). Ensuite, elles sont immergées complètement dans l'eau pendant 24 heures avant d'être retirées et pesées à nouveau ( $m_h$ ). La capacité d'absorption est calculée selon la formule :

$$Ab \% = \frac{m_h - m_s}{m_s} * 100$$

En général, un béton de qualité présente une absorption nettement inférieure à 10% en masse.

#### 4.3.4.7 Masse volumique du béton durci (NF EN 206+A2/CN)

L'essai consiste à mesurer la masse du béton durci et à la diviser par son volume pour obtenir la masse volumique. Selon la norme NF EN 206+A2/CN (2022), le béton est classé en trois catégories principales :

- Béton lourd : supérieur à 2600 kg/m<sup>3</sup>, utilisé pour des applications spécifiques.
- Béton de masse volumique normale : entre 2000 et 2600 kg/m<sup>3</sup>.
- Béton léger : entre 800 et 2000 kg/m<sup>3</sup>, utilisé lorsque le poids est une préoccupation.

### 4.4 Matériaux Utilisés

#### 4.4.1 Poudre de verre finement broyée (PV)

La poudre de verre est principalement issue du recyclage des déchets de verre provenant de bouteilles de couleur vert (Figure 4.19). Après collecte, ces déchets sont lavés et séchés. Le verre est broyé à l'aide d'un broyeur au laboratoire de développement de la construction (CDL) chez Holcim, Lafarge d'Algérie. La poudre grossière obtenue est ensuite concassée pour réduire son diamètre et optimiser la quantité à récupérer. Nous avons ensuite incorporé dans notre béton les fines tamisées (avec un tamis de 0.5 mm) pour les; Figure 4.20.



Figure 4.19 : Bouteilles de Verre utilisés

Le broyage a été arrêté après 6 séquences de 20 min et avoir mesuré une SSB de **6800 cm<sup>2</sup>/g** et un refus de **17%**.

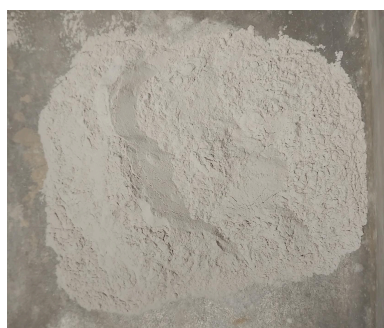


Figure 4.20 : Poudre de verre à 6800 cm<sup>2</sup>/g

### 4.4.2 Ciment Blanc

Les BPR sont des matériaux qui ont un rapport E/C (eau/ciment) très bas, ce qui signifie que leur comportement rhéologique est fortement influencé par la réactivité du ciment employé. Dans ce cas précis, le ciment utilisé est le ciment Portland MALAKI SUPER BLANC 52.5 R, produit par la cimenterie de LAFARGE, certifié et conforme à la norme Algérienne [NA442 - 2013], Européenne [EN197-1] et CE[0099/CPR/1025].



Figure 4.21 : CIM MALAKI SUPER BLANC 52.5 R

Les propriétés et les caractéristiques techniques de ce ciment sont détaillées dans le tableau 4.2 suivant :

Tableau 4.2 : Caractéristiques de Ciment Portland MALAKI SUPER BLANC 52,5 NA 442 - LAFARGE

<b>Analyses chimiques</b>	Perte au feu (%) [NA5042]	3 ± 1,5
	Teneur en Sulfates SO <sub>3</sub> (%)	3 ± 0,8
	Teneur en oxyde de Magnésium MgO (%)	2,5 ± 0,8
	Teneur en Chlorures [NA5042] (%)	< 0,1
<b>Composition minéralogique du Clinker (Bogue)</b>	C <sub>3</sub> S (%)	54 ± 3
	C <sub>3</sub> A (%)	10 ± 1
<b>Temps de prise à 20° [NA 230]</b>	Début de prise (min)	140 ± 40
	Fin de prise (min)	200 ± 40
<b>Résistance à la compression</b>	2 jours (MPa)	≥ 30
	28 jours (MPa)	≥ 52,5
<b>Propriétés physiques</b>	Consistance Normale (%)	28,5 ± 2
	Finesse SSB (cm <sup>2</sup> /g) [NA 231]	4000 - 5000
	Retrait à 28 jours (µm/m)	≤ 1000
	Blancheur (Y)	85 ± 2

### 4.4.3 Sable Blanc

De multiples études, telles que celles menées par Richard et Cheyrezy en 1995, ainsi que par De Larrard et Sedran en 1994, recommandent l'utilisation d'un sable fin à base de silice pour la fabrication des BFUP. Dans le cadre de cette étude, le sable utilisé dans toutes les formulations est un sable afroquartz passé au tamis de 1.25 mm, d'origine Tébessa et provenant de la société Afro quartz, une entreprise algérienne spécialisée dans l'extraction, le traitement, la préparation et la commercialisation de sable siliceux; Figure 4.22.



**Figure 4.22** : Sable Blanc utilisé (0 - 1,25 mm), Afroquartz, Tébessa

Le module de finesse ( $M_f$ ) est un critère essentiel pour évaluer la qualité du sable, tandis que la masse volumique d'un granulat joue un rôle fondamental dans les propriétés mécaniques des granulats et, par extension, dans les performances du béton. De même, le coefficient d'absorption d'eau d'un granulat est fondamental car il détermine la quantité d'eau nécessaire pour le mélange de béton. Les valeurs de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau à 24 heures du granulat examiné dans cette étude sont obtenues en laboratoire CDL selon la norme NF EN 1097-6, et les détails sur la granulométrie et les caractéristiques physiques sont présentés dans le Tableau 4.3 et dans la Figure 4.23.

**Tableau 4.3** : Les caractéristiques physiques du sable

Masse volumique apparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,522
Masse volumique absolue ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,68
Module de finesse $M_f$	1,68
Equivalent de sable	Sable très propre
Coefficient d'absorption d'eau ( $W_A$ %)	0,216
La taille des particules	Diamètre < 1,25 mm

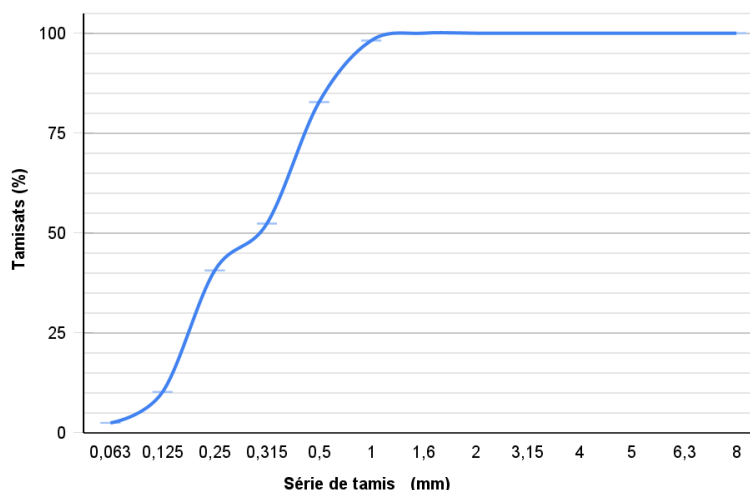


Figure 4.23 : La courbe granulométrique du sable

#### 4.4.4 Fibre métallique (FM)

Les fibres sont intégrées dans la structure du béton, ce qui donne au matériau une homogénéité de comportement. Ces fibres, de par leur nature, possèdent des propriétés spécifiques, tant au niveau de leur forme que de leurs caractéristiques mécaniques, ce qui influence grandement leur réaction sous contrainte et déformation. Leur capacité à renforcer le matériau dépend principalement de leur ancrage, de leur résistance à la traction et de leur module d'Young.



Figure 4.24 : Fibres métalliques utilisées

Les caractéristiques des fibres métalliques utilisées disponibles au CDL sont représentées dans le Tableau 4.4 suivant :

Tableau 4.4 : Les Caractéristiques des fibres métalliques

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

#### 4.4.5 Superplastifiant (SP)

L'introduction d'un superplastifiant haut réducteur d'eau dans la formulation des bétons permet de considérablement diminuer la quantité d'eau nécessaire, ainsi que leur rapport E/C. Le superplastifiant utilisé est nommé MEDAFLOW RE 250 et fabriqué par l'entreprise Granitex, est spécialement conçu à base de polymères de synthèse modifiés. Son utilisation dans les

bétons garantit l'obtention d'un rapport E/C très bas tout en maintenant une remarquable maniabilité.

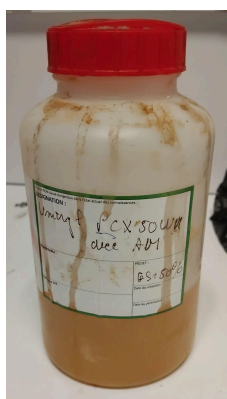


Figure 4.25 : Superplastifiant utilisé

Grâce aux caractéristiques spécifiques du MEDAFLOW RE 250, il est possible d'élaborer des bétons et mortiers de très haute qualité, comme indiqué dans le Tableau 4.5.

Tableau 4.5 : Les caractéristiques du superplastifiant MEDAFLOW RE 250

Aspect	Couleur	PH	Densité	Teneur en chlore
Liquide	Ocre clair	6 - 6,5	1,06 + 0,01	< 1 g/l

#### 4.4.6 Quartz broyé (QB)

Le quartz broyé, une fine poudre dont le diamètre moyen se situe entre 10 et 15  $\mu\text{m}$ , est obtenue par le broyage d'un sable particulièrement riche en silice ( $\text{SiO}_2 > 98\%$ ), souvent utilisé dans l'industrie verrière. Son principal rôle est dans la formulation des BPR soumis à des températures élevées, dépassant les 90  $^{\circ}\text{C}$ , où il agit comme un composé chimique complémentaire. Toutefois, pour le béton non soumis à un traitement thermique, l'usage du quartz broyé n'est pas impératif étant donné son inertie. Les caractéristiques physiques et chimiques sont données dans le Tableau 4.6.

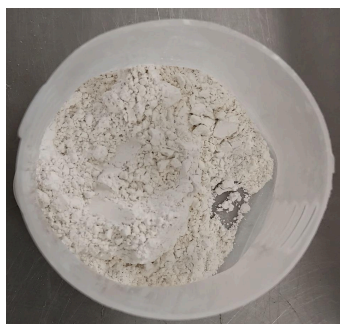


Figure 4.26 : Quartz broyé utilisé

#### 4.4.7 Fumées de silice (FS)

La fumée de silice employée dans cette étude est une poudre grise, assez sombre, composée de silice ultra fine. Elle provient de l'industrie de la fabrication du silicium ou des alliages à base de

silicium, et elle répond aux normes NF P 18-502 et pr NF EN 13263-1. Ses caractéristiques chimiques et physiques sont données dans le Tableau 4.6.

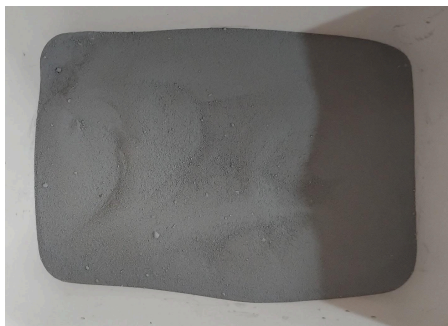


Figure 4.27 : Fumé de silice utilisée

#### 4.4.8 Laitier broyé (LB)

Le laitier granulé de haut fourneau est utilisé ici comme un ajout cimentaire. Il est obtenu par refroidissement rapide dans l'eau, puis par chute dans un grand bassin. Il se présente sous forme de sable de couleur gris clair, avec une granulométrie variant de 0 à 5 mm. Sa composition chimique est donnée au Tableau 4.6.



Figure 4.28 : Laitier Broyé

Tableau 4.6 : Composition chimique et physique exprimée en % pondéraux des additions utilisées

Caractéristiques physiques	Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	surface spécifique (cm <sup>2</sup> /g)							
Fumée de silice (FS)	0.646	1.56	23 000							
Laitier broyé (LB)	0.697	2.60	7277.29							
Quartz broyé (QB)	0.800	2.63	5714.719							
Composition Chimique										
(%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	CL-	Na <sub>2</sub> O	P.A.F
FS	94	1	1	0.4	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	1.62	0.184	0.386	0.04	0.012	0.001	

#### **4.4.9 Eau**

L'eau utilisée pour les mélanges de mortier provient du robinet du laboratoire. Bien qu'aucune analyse n'ait été effectuée, l'eau est considérée comme propre et exempte d'impuretés nuisibles.

#### **4.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les divers matériaux utilisés dans nos formulations, ainsi que leurs caractéristiques physiques, minéralogiques et chimiques. Pour évaluer les performances des différents types de béton, un ensemble d'essais a été établi, couvrant divers aspects. Certains de ces essais se concentrent sur les aspects physico-mécaniques, tels que la résistance à la compression et à la traction par flexion, tandis que d'autres portent sur les propriétés de transfert, comme les essais d'absorption. Ces évaluations sont essentielles pour une compréhension approfondie des performances de durabilité des BPR examinés dans cette étude.



# **CHAPITRE 5**

## ***Formulation des BPR***

## 5.1 Introduction

Cette étude vise à examiner les propriétés du Béton de Poudre Réactive (BPR) avec et sans ajout de laitier, ainsi qu'avec et sans substitution de ciment par de la poudre de verre. Pour ce faire, nous avons formulé 3 types de BPR : le BPRT, qui servira de référence, le BPR20L, avec une addition de 20% de laitier, et le BPR30PV, comprenant 10% de laitier et une substitution de 30% de ciment par de la poudre de verre.

Ce chapitre présente en détail la méthodologie de formulation de ces 3 types de béton. Nous décrivons la méthodologie et les ajustements progressifs utilisés pour déterminer les proportions optimales de chaque constituant. Nous expliquerons également la détermination des pourcentages de laitier et de poudre de verre, ainsi que la fixation des dosages d'eau et de superplastifiant nécessaires pour atteindre les propriétés souhaitées. Les compositions finales des 3 formulations seront établies, fournissant une base solide pour les analyses ultérieures. Les résultats de ces formulations et leurs performances seront examinés dans les chapitres suivants.

## 5.2 Formulation

Cette section présente en détail les procédures de formulation des BPR étudiés. Dans le cadre de notre revue de la littérature, il est apparu qu'il n'existe pas de méthode standardisée pour formuler ces matériaux. La plupart des formulations de BPR sont actuellement développées de manière empirique, étant donné que les méthodes conventionnelles de formulation pour les bétons classiques tel que Dreux gorisse, ne sont pas adaptées en raison de la granulométrie très proche des constituants des BPR, ne tenant pas compte des adjuvants ou des additions spécifiques. Ainsi, les formulations sont élaborées en se basant sur l'expérience accumulée et en se référant aux principes énoncés par Richard et Cheyrezy (1995) ainsi que de Larrard et Sedran (1994) [Détailés dans le Chapitre 1].

La méthode de formulation utilisée pour déterminer les compositions des BPR examinés dans cette étude repose sur les diverses approches présentées dans la littérature spécialisée. Des formulations préliminaires ont été soumises à des tests expérimentaux à l'état frais et durci, avec des ajustements progressifs des proportions de chaque composant pour atteindre les performances désirées. Les résultats ont été documentés et évalués selon des critères prédéfinis.

Dans le cadre de la formulation de BPR, avant d'entreprendre la formulation du béton de référence BPRT à grande échelle, nous avons réalisé environ 6 mélanges de 0,5 litre chacun. À chaque étape, nous avons mesuré l'étalement en visant le diamètre de 25 à 26 cm. Ce diamètre a été atteint au cinquième mélange sans fibres métalliques, et au sixième avec 2,2% des fibres métalliques.

Nous avons également mesuré à chaque fois la quantité d'eau et de superplastifiant correspondante nécessaire pour atteindre le diamètre d'étalement souhaité. Cette procédure a été suivie pour le béton témoin de référence BPRT.

Pour les deux autres bétons, BPR20L (béton de poudre réactive avec 20 % de laitier) et BPR30PV (béton de poudre réactive avec 70 % de ciment et 30 % de poudre de verre, plus 10 % de laitier de haut fourneau), nous avons utilisé une méthode de compacité, comme montre les

figures de 5.1 à 5.4 suivantes, pour fixer les proportions de laitier (20 % et 10 %) ainsi que de poudre de verre et de ciment (30 % et 70 %).

$$C = 1 - e$$

avec :

- C : Compacité
- e : Porosité =  $\rho_{\text{apparente}} / \rho_{\text{absolue}}$

L'approche consiste à mesurer la masse volumique apparentes pour différents dosages en pourcentage des mélanges (le volume du moule utilisé est le même donc on travaille avec **la masse** seulement). En commençant par le ciment et la poudre de verre, puis par le ciment et le laitier, et enfin en combinant le dosage optimal de ciment et de poudre de verre avec le laitier. On observe ensuite l'évolution de cette masse volumique apparente en fonction des pourcentages de chaque constituant du mélange.

L'objectif est d'identifier le dosage optimal en analysant les courbes obtenues dans les essais, la méthode est illustrée dans la figure 5.1.



Figure 5.1 : Méthode de compacité

### 5.2.1 Optimisation du dosage de Laitier et de PV

Le résultat de l'essai de compacité indique que le mélange le plus compacte obtenu se compose de 70% CIM et 30% PV (Figure 5.2) de plus 100% CIM et 20% Laitier (Figure 5.3) et au final 70% CIM, 30% PV et 10% Laitier (Figure 5.4).

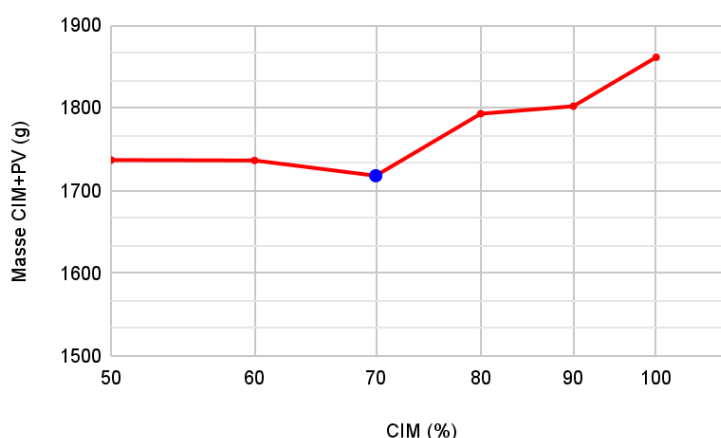


Figure 5.2 : Optimisation du dosage de Poudre de Verre dans le BPR30PV

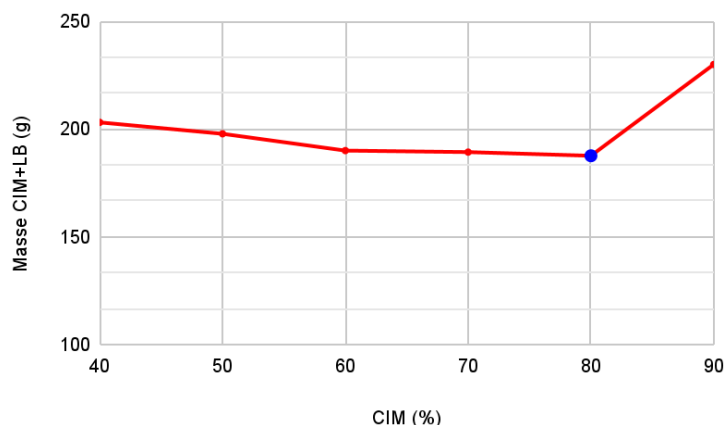


Figure 5.3 : Optimisation du dosage de Laitier Broyé dans le BPR20L

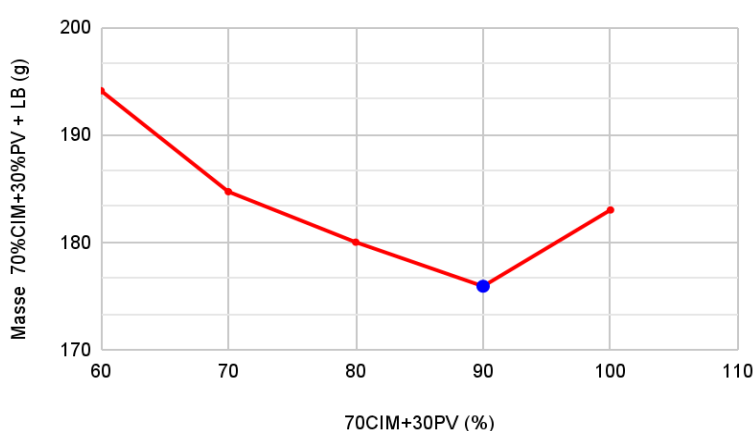


Figure 5.4 : Optimisation du dosage de Laitier Broyé dans le BPR30PV

D'après les résultats indiqués dans les graphes précédents, nous avons pu constater et fixer à l'aide de cette méthode de compacité que le pourcentage de laitier dans le deuxième mélange de béton est de 20%, ce mélange étant nommé BPR20L. Pour le troisième mélange, le pourcentage de laitier est de 10%, avec une substitution de 30% de ciment par de la poudre de verre, ce mélange étant nommé BPR30PV.

## 5.2.2 Optimisation du dosage d'eau et d'adjuvant

Comme précisé précédemment, divers mélanges de mortiers ont été formulés pour évaluer leur étalement, dans le but de déterminer les dosages optimaux en eau et en superplastifiant. Les dosages d'eau et de superplastifiant ont été fixés une fois que le diamètre d'étalement souhaité (25 / 26 cm) soit atteint, tableau 5.1.

Tableau 5.1 : L'Étalement mesuré à chaque mélange de mortier

Mortier	Mortier 1	Mortier 2	Mortier 3	Mortier 4	Mortier 5	Mortier 6
E/C	0,2	0,2	0,2	0,2	0,22	0,22
Dosage en SP %	3%	1,2%	1,5%	2%	2,22%	2,22%
Etalement (cm)	29/30	21	21/23	23	25	26

Il a été constaté que le dosage optimal de superplastifiant liquide pour le BPRT est de 2,2 % par rapport à la masse de ciment. Des éprouvettes prismatiques de dimensions 4x4x16 cm<sup>3</sup> ont été fabriquées avec ce mélange, et les tests de résistance en compression et en traction ont été effectués après 2 jours de cure. Les résultats obtenus ont révélé une résistance en compression de 76 MPa et une résistance en traction de 11 MPa, ce qui répond aux critères de performance recherchés.

En conséquence, les paramètres de formulation ont été fixés pour la suite des essais avec un rapport eau/ciment (E/C) de 0,22 et une incorporation de superplastifiant de 20 kg/m<sup>3</sup> (2,2 %)

Le Tableau 5.2 présente les formulations finales après optimisation des proportions de chaque constituant, incluant le sable blanc, le quartz broyé, les fibres d'acier, la fumée de silice qui ont été fixés à partir des formules de base [Tableau 1.6 : Bonneau, 1997 et Alepari et al, 1997], ainsi que les dosages de laitier et de poudre de verre qu'on a déjà fixé avec la méthode de compacité.

**Tableau 5.2** : Compositions des 3 formulations des BPR

	Proportions	Ciment	Sable	QB	FS	FM	SP	Eau	LB	PV
<b>BPRT</b>	Rapportées à la masse du ciment	1	1,3	0,05	0,05	0,022	0,022	0,22	/	/
	en kg/m <sup>3</sup>	900	1172	45	45	20	20	200	/	/
<b>BPR20L</b>	Rapportées à la masse du ciment	1	1,075	0,05	0,05	0,022	0,022	0,22	0,2	/
	en kg/m <sup>3</sup>	900	968	45	45	20	20	200	180	/
<b>BPR30PV</b>	Rapportées à la masse du ciment	1	1,2	0,05	0,05	0,022	0,022	0,22	0,1	0,3
	en kg/m <sup>3</sup>	630	758	31,5	31,5	20	20	138,6	90	270

## 5.3 Fabrication et mise en place des BPR

### 5.3.1 Malaxage

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

- Pour toutes les éprouvettes ( Prismatiques de 4×4×16 cm<sup>3</sup>, Cubiques de 5×5×5 cm<sup>3</sup> et Cylindrique de 7×16 cm<sup>2</sup>) on a utilisé le même mélange du béton dans un malaxeur à mortier de 9 litres de la marque "Controlab".



Figure 5.5 : Malaxeur utilisé

- La séquence de malaxage, observée à  $\pm 1$  seconde près, est la suivante :
  - Introduire les matériaux secs (ciment, sable, QB, FS) et répartir les FM dans le malaxeur.
  - Malaxage des poudres à sec durant 2 minutes.
  - Introduction 2/3 de l'eau au début en même temps du malaxage durant 3 minutes.
  - Introduction du mélange du reste de l'eau avec le superplastifiant par parties et malaxage jusqu'à fluidification (environ 5 minutes).
  
- Remarque : Lors du malaxage de notre mélange de béton BPR, nous avons observé qu'en ajoutant la totalité de l'eau et du superplastifiant dès le début, le mélange semblait initialement dur et sec, indiquant un manque apparent d'eau. Cependant, en continuant le malaxage, le mélange est devenu progressivement plus fluide et la pâte désirée a commencé à se former. Cette observation met en évidence l'importance du temps de malaxage, surtout avec un rapport E/C très faible de 0,22.

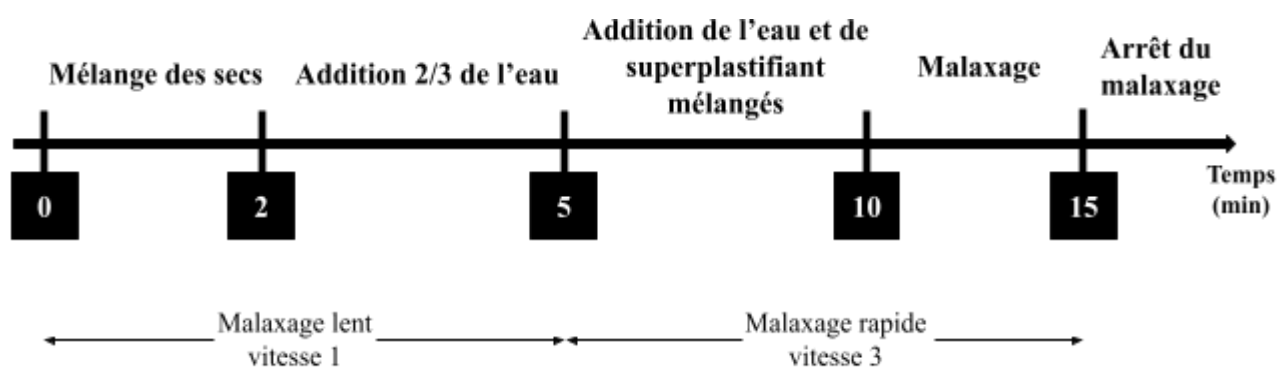


Figure 5.6 : Protocole de malaxage des BPR

### 5.3.2 Coulage

Le mélange préparé du béton est mis en place par coulage en une seule fois, sans vibration, après application d'une huile blanche sur les moules pour faciliter le démoulage.

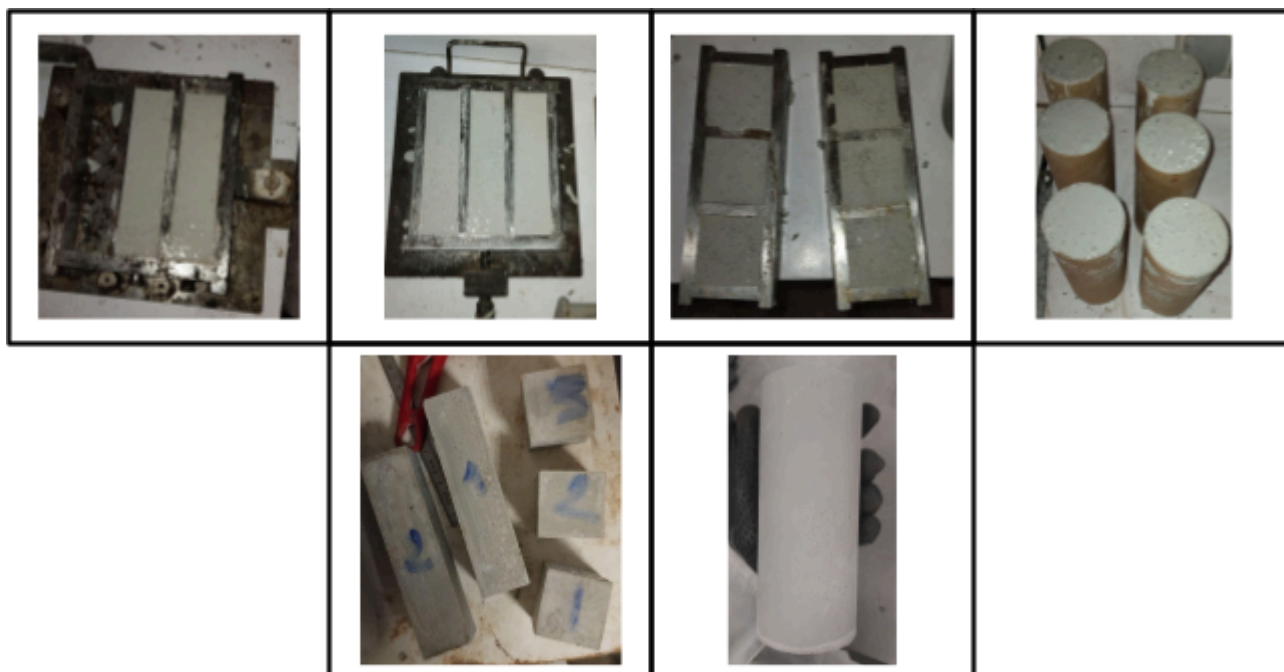


Figure 5.7 : Moules et éprouvettes utilisés pendant les essais

### 5.3.4 Conservation

Les éprouvettes ont été conservées dans leurs moules pendant les premières 24 heures dans "Salle 50% Humidité". Après démoulage, les éprouvettes destinées aux essais de retrait sont restées dans la même chambre (Salle 50% Humidité) et toutes les autres éprouvettes ont été immergées dans de l'eau dans la salle de conservation jusqu'à l'échéance des essais (2, 28 et 75 jours).



Figure 5.8 : Les éprouvettes conservées dans l'eau

## 5.4 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a été déterminant pour définir les formulations des Bétons à Poudre Réactive (BPR) étudiés. Grâce à une approche empirique et une série d'ajustements progressifs, nous avons pu identifier les proportions optimales de chaque composant, incluant la poudre de verre et le laitier, pour les différentes variantes de béton examinées.

Les paramètres ont été fixés rigoureusement à un rapport eau/ciment (E/C) de 0,22 et une concentration de superplastifiant de 20 kg/m<sup>3</sup> (2%) pour l'intégralité de l'étude. Ces compositions finales des 3 formulations de BPR fournissent une base pour les essais à venir sur les différents échantillons durcis, dont les résultats seront présentés dans le prochain chapitre.



**CHAPITRE 6**  
*Résultats et Interprétations*

## 6.1 Introduction

La revue bibliographique a souligné la nécessité de mener des d'expérimentation pour étudier l'impact de la poudre de verre et des additions cimentaires sur les propriétés du béton à poudres réactives (BPR).

Ce dernier chapitre se consacre donc à l'analyse et à l'interprétation des résultats d'un programme expérimental. Ce programme vise à examiner l'effet de la présence de poudre de verre, avec d'autres ajouts comme la fumée de silice, le quartz broyé et le laitier broyé (avec ou sans laitier broyé).

Les premiers résultats présentés porteront sur les caractéristiques du béton à l'état frais et à l'état durci, notamment les propriétés mécaniques, les résistances à la compression, à la flexion et à la traction, ainsi que sur les déformations (retrait et gonflement).

Enfin, les résultats seront présentés lors de l'analyse de la microstructure des différents bétons : **BPRT**, **BPR20L** et **BPR30PV**.

## 6.2 Caractéristiques instantanées à l'état frais

Les essais effectués à l'état frais sur les trois formulations de Béton à Poudres Réactives (BPR) sont représentés dans la figures 6.1 et les résultats donnés dans le tableau 6.1.

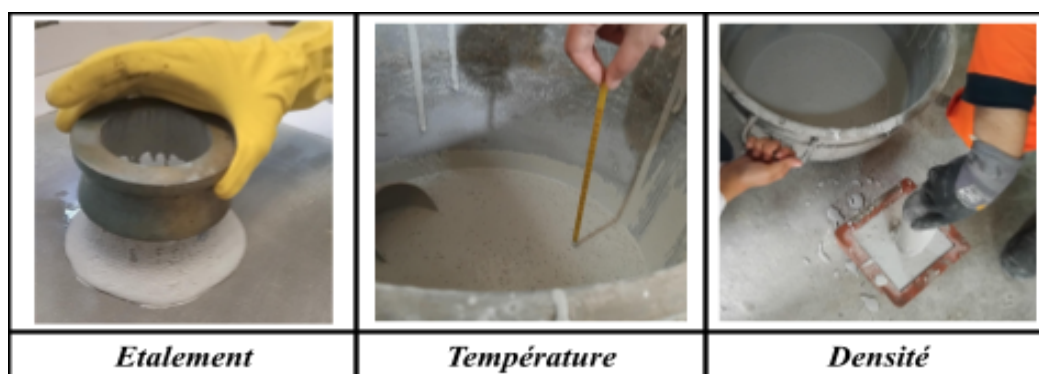


Figure 6.1 : L'ensemble des essais effectués sur les 3 BPR à l'état frais

Tableau 6.1 : Les caractéristiques des 3 BPR à l'état frais

Béton	BPRT	BPR20L	BPR30PV
Etalement (mm)	260	265	250
Température (°C)	26	25	24
Masse Volumique (g/cm <sup>3</sup> )	2,313	2,307	2,216

D'après les résultats présentés de le tableau 6.1 On remarque des variations légères dans les caractéristiques à l'état frais pour les 3 bétons formulés.

- **L'étalement**, qui mesure la maniabilité du béton, varie légèrement entre les différentes formulations : le BPRT affiche un étalement de diamètre 260 mm, le BPR20L atteint 265 mm, et le BPR30PV montre un étalement de 250 mm. La plus grande mesure de l'étalement a été attribuée au béton à base de laitier (BPR20L). Même si la différence entre le BPRT et le BPR20L n'est pas significative (**environ 1,92% d'augmentation**), il est notable que le laitier améliore l'ouvrabilité du béton.

En revanche, le béton BPR30PV, qui intègre de la poudre de verre, montre une diminution de l'ouvrabilité par rapport aux autres formulations, avec **une réduction d'environ 3,85%** par rapport au BPRT.

Notre étude montre donc une baisse de l'ouvrabilité avec un taux de remplacement de 30% de poudre de verre par rapport au ciment. Ces résultats confirment d'autres études menées sur ces bétons incorporant de la poudre de verre [Shayan et coll., 2005].

- **La température des mélanges** se situe dans une plage étroite autour de 24-26°C. Les ajouts cimentaires tels que le laitier et la poudre de verre ont tendance à diminuer la chaleur d'hydratation du ciment [Xiaolin et al., 2014]. La mesure de la température à l'état frais sert d'indicateur de cette chaleur d'hydratation. Les résultats montrent que la température est légèrement plus basse pour les mélanges contenant du laitier et de la poudre de verre.

Le BPR30PV présente une température de 24°C, indiquant une réduction de la chaleur d'hydratation. Ceci est en accord avec les études antérieures qui ont démontré que la poudre de verre réduit également la chaleur d'hydratation [Shayan et coll., 2005; Xiaolin et al., 2014]. Cela s'explique par le fait que la poudre de verre, en tant que matériau à réaction lente, libère moins de chaleur lors de l'hydratation par rapport au ciment traditionnel, contribuant ainsi à une température plus basse du mélange frais. Une température plus basse lors de l'hydratation peut améliorer la durabilité du béton en réduisant les risques de fissuration thermique et en favorisant un durcissement plus uniforme.

- **La masse volumique** des mélanges diminue en présence de laitier et la poudre de verre. En termes de pourcentage, le BPR20L a une masse volumique inférieure de 0,26% par rapport au BPRT, et le BPR30PV a une masse volumique inférieure de 4,19% par rapport au BPRT. On peut dire qu'une masse volumique plus faible peut indiquer une proportion plus élevée de composants légers comme la poudre de verre.

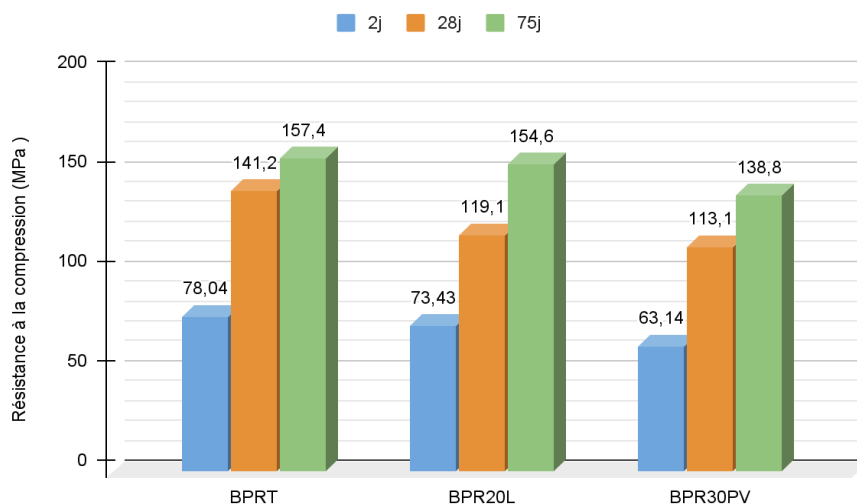
Ces résultats confirment d'autres études menées sur ce type de béton incorporant de la fumée de silice, du quartz broyé et de la poudre de verre [Soliman et Tagnit, 2016].

## 6.3 Caractéristiques à l'état durci

### 6.3.1 Résistance à la Compression

Des essais de résistance à la compression ont été réalisés sur les différents bétons confectionnés et les résultats sont donnés dans la figure 6.2 . Cette figure présente les résistances à la compression des bétons à 2 jours et 28 jours, ainsi que les résultats à 75 jours. Les essais ont été menés conformément aux normes en vigueur, permettant d'évaluer la performance mécanique des différentes formulations de BPR au fil du temps. Les résultats à 2 jours

fournissent une indication précoce de la prise initiale et de la vitesse de gain de résistance, tandis que les résultats à 28 jours permettent d'apprécier la résistance caractéristique du béton durci. Les données à 75 jours, offriront une vision complète de l'évolution de la résistance à long terme et permettront d'évaluer la durabilité des différentes formulations.



**Figure 6.2 :** Evolution de la résistance à la compression des trois BPR en 2 , 28 et 75 jours

Les résultats de la résistance à la compression montrent la diminution de la résistance avec l'ajout du laitier et de poudre de verre.

- **À 2 jours :**

La résistance du BPR30PV (avec 30% de substitution de ciment par de la poudre de verre) est inférieure de 19% par rapport à celle du BPRT béton témoin. Cette diminution est due au fait qu'à jeune âge, la réaction pouzzolanique de la poudre de verre n'a pas encore pleinement contribué à la formation des hydrates de calcium-silicate (CSH) et d'aluminate de calcium (CAH), issus principalement de l'hydratation du clinker. Ainsi, la résistance initiale est plus faible.

La résistance du BPR20L (avec ajout de laitier sans substitution de ciment) est inférieure de 5,9% par rapport à celle du BPRT témoin. Cela indique que le laitier n'a pas d'impact notable sur la résistance à la compression.

- **À 28 jours :**

La résistance du BPR30PV est inférieure de 19,8% par rapport au BPRT. Cette réduction, bien que notable, montre que la poudre de verre permet tout de même d'atteindre une résistance substantielle à moyen terme ( supérieur à 110 MPa ) , malgré une diminution par rapport au béton témoin. La résistance du BPR20L est inférieure de 15,7% par rapport au BPRT , montrant une performance similaire.

- **À 75 jours :**

Les résistances à la compression continuent d'augmenter avec le temps. À ce stade, les résistances du BPRT et du BPR20L dépassent les 150 MPa avec un écart faible entre les deux, le

BPR20L étant inférieur de 1,77% par rapport au BPRT. Le BPR30PV montre une résistance inférieure de 11,81% par rapport au BPRT à 75 jours.

Ces résultats sont comparables à ceux trouvés dans d'autres études mentionnées dans la partie bibliographie, comme celles de [Soliman et Tagnit, 2016] et [Hussain et Aljalawi, 2022].

- Les valeurs de résistance en compression obtenues correspondent à celles rapportées dans la littérature. En effet, Richard et Cheyrezy ont obtenu une résistance variant entre 125 et 170 MPa pour un BPR 200 avec un rapport E/C de 0,15.
- Ces résultats montrent que, bien que l'ajout de poudre de verre et de laitier broyé réduit initialement la résistance à la compression par rapport au béton témoin (BPRT), les formulations BPR30PV et BPR20L permettent tout de même d'atteindre des résistances significatives à 28 jours.
- La poudre de verre, même à un taux important de 30%, offre une performance compétitive par rapport à l'ajout de laitier sans substitution de ciment. Cela suggère que la poudre de verre est une alternative viable pour remplacer 30% du ciment, offrant ainsi une solution économique et écologique pour les bétons à poudre réactive, tout en maintenant des propriétés mécaniques adéquates.

### ➤ Mode de rupture de Compression

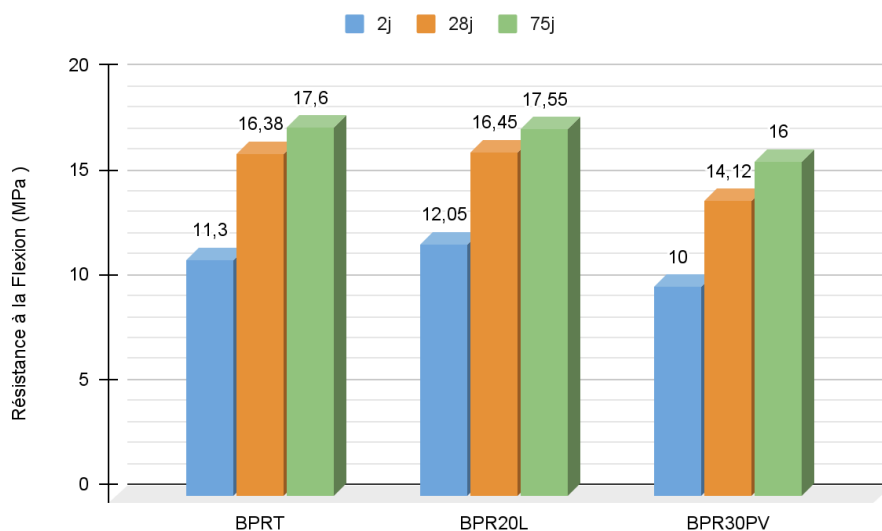
Lors de l'application d'une charge de compression sur les éprouvettes de béton, de nombreuses fissures apparaissent sur leur surface latérale (figure 6.3). Ces fissures sont causées par les contraintes de traction induites par l'effet de Poisson. Cet effet se traduit par une déformation transversale des matériaux sous une contrainte longitudinale. Les fibres métalliques jouent un rôle dans ce contexte en empêchant les fissures de se propager complètement ou d'atteindre une profondeur significative.



**Figure 6.3 :** Fissures causées par l'essai de compression sur les éprouvettes cubiques des 3 bétons (5x5x5 cm<sup>3</sup>) à 2j, 28j et 75j

### 6.3.2 Résistance à la traction par Flexion

Pour chaque formulation de BPR, des essais de flexion en 3 points ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 6.4 .



**Figure 6.4 :** Evolution de la résistance à la flexion des trois BPR en 2, 28 et 75 jours

Les résultats de la résistance à la flexion montrent la diminution de la résistance avec l'ajout du laitier et de poudre de verre.

- **À 2 jours :**

Les résultats montrent que le BPR20L atteint une résistance à la flexion de 12,05 MPa, ce qui est supérieur de 6,55% à celle du BPRT (11,3 MPa).

En revanche, le BPR30PV affiche une résistance à la flexion de 10 MPa, inférieure de 11,5% à celle du BPRT. Cette différence peut être expliquée par la lenteur de la réaction pouzzolanique de la poudre de verre, qui ne permet pas un gain rapide de résistance à la flexion aux premiers jours de durcissement.

- **À 28 jours :**

À ce stade, le BPR20L continue de surpasser légèrement le BPRT avec une résistance de 16,45 MPa contre 16,38 MPa pour le BPRT, soit une augmentation marginale.

Pour le BPR30PV, bien que la résistance soit inférieure au BPRT, elle atteint une résistance notable de 14,12 MPa, indiquant une amélioration par rapport aux premiers jours grâce à l'évolution des réactions pouzzolaniques.

Cependant, cette résistance reste inférieure à celle obtenue pour un mélange contenant 20 % de PV, qui a atteint 17 MPa à 28 jours, selon les travaux de [Hussain et Aljalawi ,2022].

- **À 75 jours :**

Les résistances à la flexion continuent d'augmenter avec le temps. À ce stade, les résistances du BPRT et du BPR20L dépassent les 17.5 MPa sans rupture .

Pour le BPR30PV, la résistance est désormais améliorée de 13,13 % par rapport à 28 jours, mais reste inférieure de 14,6 % au BPRT. Cela indique une amélioration par rapport aux premiers jours grâce à l'évolution des réactions pouzzolaniques.

- Les valeurs de résistance en flexion obtenues dépassent 14 MPa à 28 jours et dépassent 16 MPa après 75 jours, ce qui démontre que l'introduction de fibres entraîne une augmentation significative de la résistance et améliore la ductilité du matériau.
- Comme pour la résistance en compression, les mêmes conclusions peuvent être tirées quant à l'effet de la poudre de verre.
- La résistance à la flexion de la poudre de verre, même à un taux élevé de substitution, montre une progression constante, confirmant la capacité de la poudre de verre à renforcer la matrice du béton au fil du temps.

### ➤ Mode de rupture de Flexion

Lors de l'application d'une charge de traction par flexion sur les éprouvettes de béton, celles-ci se fracturent en leur milieu (Figure 6.5 ). Cependant, les fibres métalliques intégrées ne se rompent pas, ce qui améliore le comportement global du béton et augmente sa résistance en flexion.

En ce qui concerne les BPRT et BPR20L à 75 jours, aucune rupture n'est observée, leur résistance dépasse la limite de la machine de flexion utilisée, qui est de 18,75 MPa avec une charge de 8 kN.



Figure 6.5 : Fissures causées par l'essai de flexion sur les éprouvettes prismatiques 3 bétons (4x4x16 cm<sup>3</sup>) à 2j, 28j et 75j

➤ **Relation entre la résistance à la compression et la résistance à la flexion**

Dans le cadre de notre étude sur le béton de poudre réactive, nous avons analysé la relation entre la résistance à la compression ( $f_{c28}$ ) et la résistance à la flexion ( $f_t$ ) à 28 jours. Pour les bétons ordinaires, cette relation est souvent exprimée par la formule empirique suivante :

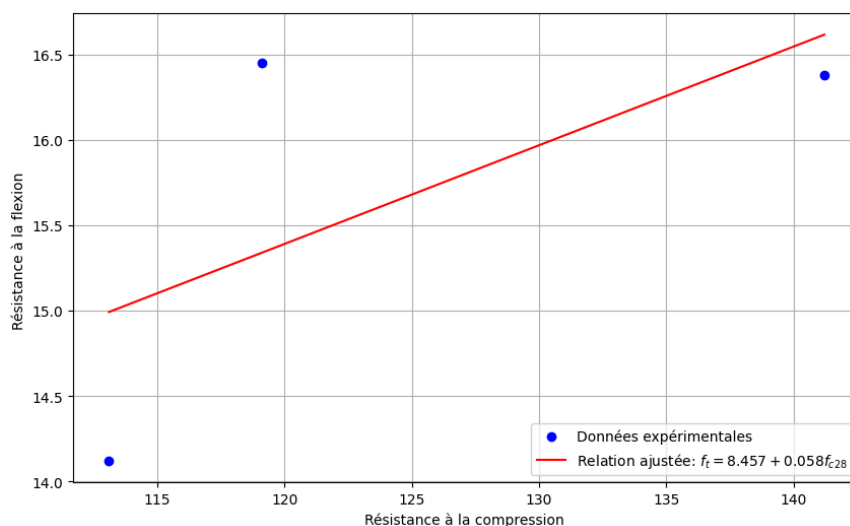
$$f_t = 0,6 + 0,06f_{c28}$$

Cependant, en utilisant nos données expérimentales, nous avons ajusté cette relation spécifique à notre béton de poudre réactive. La relation ajustée obtenue est la suivante :

$$f_t = 8,457 + 0,058f_{c28}$$

Le coefficient de corrélation (r) de 0,645 obtenu pour cette relation ajustée indique qu'il existe une corrélation modérée entre les valeurs observées de  $f_t$  et les valeurs prédites par le modèle.

La figure 6.6 ci-dessous illustre la droite de régression obtenue, mettant en évidence la relation linéaire ajustée entre la résistance à la compression et la résistance à la flexion pour le béton de poudre réactive. Cette visualisation permet de mieux comprendre la précision et l'applicabilité de notre modèle ajusté par rapport aux données expérimentales.



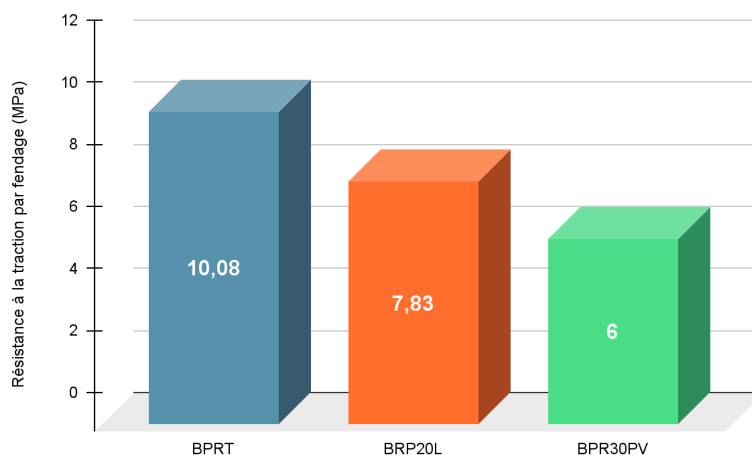
**Figure 6.6 :** La relation entre la résistance à la compression et la résistance à la flexion

Cette visualisation permet de mieux comprendre la relation linéaire obtenue et la précision de notre ajustement par rapport aux données expérimentales.



### 6.3.3 Résistance à la traction par fendage

Pour chaque composition, un essai de traction par fendage a été réalisé à **28 jours** (Figure 6.7) afin de comparer les résistances à celles obtenues par traction en flexion.



**Figure 6.7 :** Evolution de la résistance à la traction par fendage des 3 BPR en 28 jours

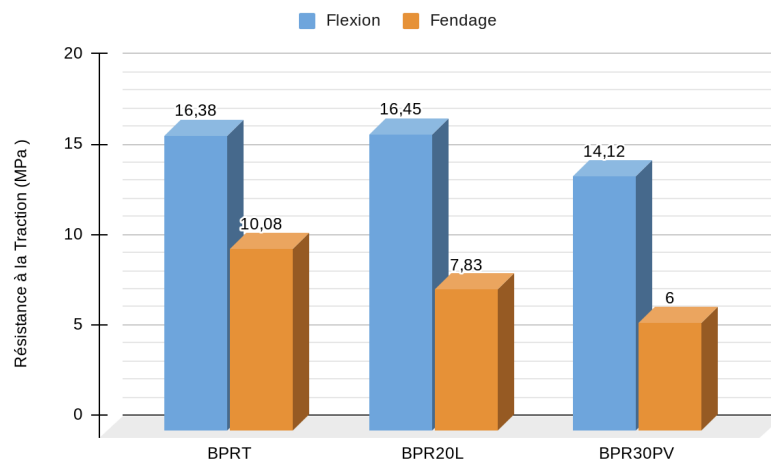
Les résultats obtenus pour la résistance à la traction par fendage varient entre 10 MPa pour le BPRT et 6 MPa pour le BPR30PV. Ces valeurs de traction par fendage sont comparables à celles rapportées par Lafarge [Lafarge, 2003], où une résistance en traction comprise entre 5 et 8 MPa a été mesurée sur un matériau Ductal fibré. De plus, les résultats de la thèse de Cherkaoui [Cherkaoui, 2010] indiquent des résistances de fendage comprises entre 6 et 8 MPa pour un BPR.

La valeur la plus élevée a été obtenue pour le BPRT, sans ajout de laitier ni de poudre de verre, atteignant une résistance maximale de 10 MPa.

En revanche, la résistance pour le BPR20L est inférieure de 22% par rapport au BPRT, et celle pour le BPR30L est inférieure de 40% par rapport au BPRT. Cette diminution notable peut être attribuée à la réduction de la quantité de ciment, remplacée par la poudre de verre.

#### ➤ Comparaison de la résistance en traction par fendage et par flexion

La figure 6.8 représente la comparaison de la résistance en traction obtenue par fendage et par flexion des BPR à 28 jours



**Figure 6.8 :** Comparaison de la résistance en traction obtenue par fendage et par flexion des BPR à 28 jours

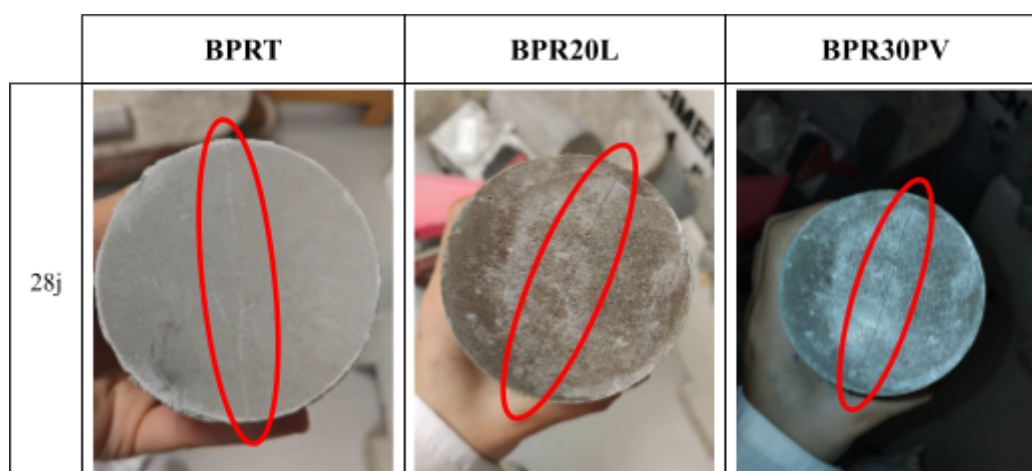
Le BPRT, sans ajout de laitier ni de poudre de verre, affiche une résistance à la traction par fendage de 10,08 MPa et une résistance en flexion de 16,38 MPa. Cette haute performance peut être attribuée à la pureté de sa composition cimentaire, favorisant une microstructure dense et bien liée, sans les effets dilutifs des matériaux de substitution.

Le BPR30PV montre la plus faible résistance à la traction par fendage (6 MPa), une réduction de 40% par rapport au BPRT, avec une résistance en flexion de 14,12 MPa. La poudre de verre, malgré ses avantages, ne réagit pas aussi efficacement que le ciment, entraînant une microstructure moins compacte et une cohésion interne réduite.

En conclusion , la substitution partielle du ciment par la poudre de verre dans les BPR réduit la résistance à la traction par fendage, bien que la résistance en flexion soit moins affectée.

### ➤ Mode de rupture de Traction par fendage

Lorsqu'une force de traction par fendage est appliquée sur des éprouvettes cylindriques en béton, une ligne de rupture très nette se forme souvent sur le disque de l'éprouvette. Comme montré dans la figure 6.9.



**Figure 6.9 :** Fissures causées par l'essai de traction par fendage sur les éprouvettes cylindriques des 3 bétons (7x16 cm<sup>2</sup>) à 28j

### 6.3.4 Retrait à l'air des prismes de béton

Les essais de retrait ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques de dimensions  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ , maintenues à l'air libre dans des conditions de température ambiante stable de laboratoire ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ). Les résultats obtenus à l'âge de 40 jours sont illustrés dans la figure 6.10, qui présente l'évolution temporelle du retrait jusqu'au 40 jours.

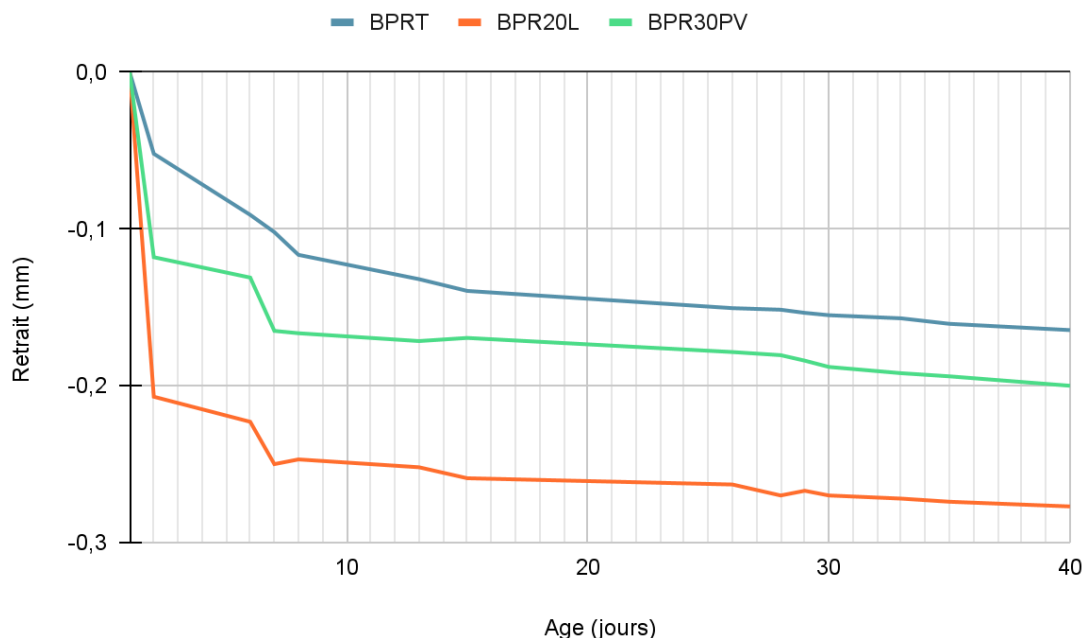


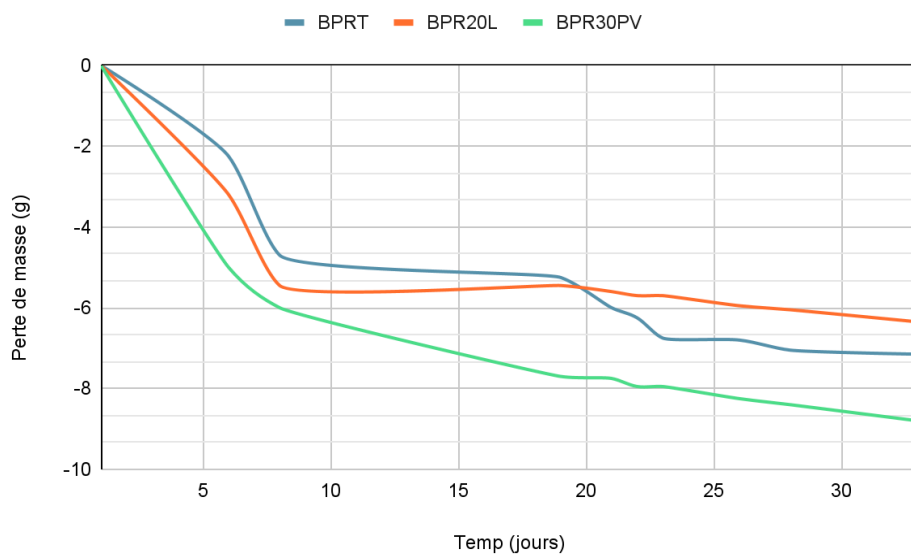
Figure 6.10 : Retrait à l'air des trois béton en fonction de temps

Les essais de retrait montrent que le BPR possède un faible retrait, ce qui peut être attribué à la résistance importante à jeune âge. Les essais de retrait montrent également que les ajouts cimentaires influencent le comportement au retrait des bétons.

- Le BPR20L, avec l'ajout de 20 % de laitier, présente le retrait le plus important en raison de la quantité accrue de laitier, connue pour son potentiel de retrait élevé [Olga, 1996]. Le laitier de haut fourneau, en raison de sa réactivité latente et de son absorption continue d'eau, peut entraîner une contraction volumétrique accrue, augmentant ainsi le retrait.
- Pour le BPR30PV, avec l'incorporation de poudre de verre, le retrait est légèrement supérieur à celui du BPRT, mais reste minime. Cette augmentation peut être attribuée à la faible proportion de laitier dans ce béton et à sa réactivité, qui influe sur la microstructure. Cependant, l'utilisation de poudre de verre contribue à une meilleure performance à long terme en réduisant les fissures dues au retrait.

#### ➤ Perte de masse

Les mêmes éprouvettes prismatiques de dimensions  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ , utilisées pour les essais de retrait, ont été maintenues à l'air libre dans des conditions de ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ). Leur masse a été mesurée sur une période de temps afin d'évaluer leur perte de masse, comme illustré dans la figure 6.11.



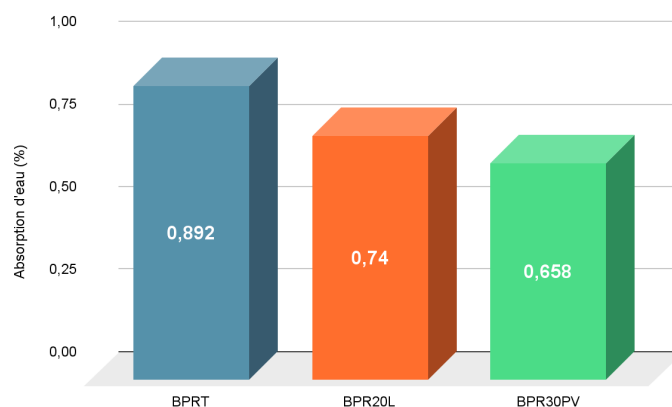
**Figure 6.11** : Perte de masse des bétons en fonction du temps

La perte de masse est principalement due à l'évaporation de l'eau présente dans les pores du béton. A jeune âge, on observe que la vitesse de perte de masse des échantillons BPR30PV et BPR20L, auxquels des additifs ont été incorporés, est plus élevée que celle du BPRT, sans ajout.

La perte de masse la plus importante est observée pour le BPR30PV contenant de la poudre de verre. Ce constat est en accord avec le fait que la poudre de verre est un matériau non absorbant d'eau. Ainsi, cela suggère que l'ajout de poudre de verre favorise une plus grande disponibilité d'eau pour l'évaporation, contribuant ainsi à une perte de masse plus significative dans cet échantillon.

### 6.3.5 Absorption d'eau

La figure 6.12 résume les valeurs d'absorption d'eau ou de porosité à l'eau des 3 bétons.



**Figure 6.12** : Capacité d'absorption d'eau des différentes formulations du BPRF

La porosité à l'eau des BPR examinés est remarquablement basse pour les trois béton ont une absorption d'eau inférieure à 1% (<1%).

Les valeurs obtenues sont en ligne avec celles documentées dans la première partie. Par exemple, Resplendino et Petitjean [Resplendino, 2003] rapportent des valeurs d'absorption à l'eau variant entre 1,5 et 5 % pour (BUHP). De même, Lafarge a signalé une absorption à l'eau de 1,9 % pour un matériau Ductal.

Les résultats du test d'absorption ont montré que la valeur d'absorption la plus faible est attribuée à la substitution de 30% de poudre de verre par rapport aux mélanges de référence. Cela est dû au fait que la poudre de verre agit comme matériau cimentaire supplémentaire, formant une plus grande quantité de gel C-S-H capable de remplir les espaces dans la matrice de béton qui seraient autrement remplis d'eau [Setina, 2013 ].

En conclusion, il est observé que l'augmentation de la teneur en fines poudre de verre et laitier induit une diminution du coefficient d'absorption d'eau. Cette relation suggère que des niveaux plus élevés de fines correspondent à une porosité réduite et à un coefficient d'absorption d'eau minimisé.

### 6.3.6 Absorption capillaire par immersion

L'absorption par capillarité a été réalisée pour les 3 formulations de béton, comme illustré dans la figure 6.13.

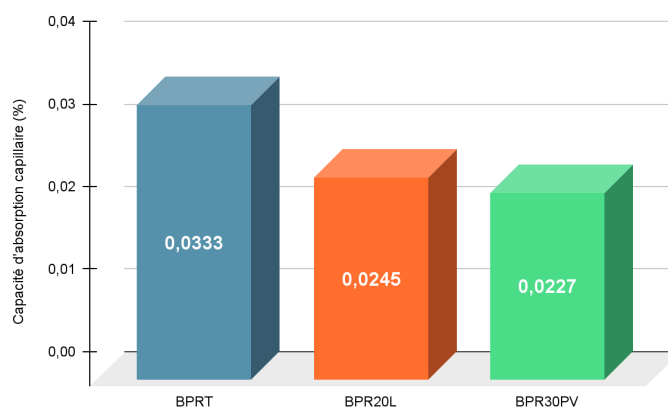


Figure 6.13 : Perméabilité capillaire des différentes formulations du BPR

Il est notable de remarquer les valeurs d'absorption relativement faibles pour tous les bétons à base de BPR. Cette caractéristique est bien documentée dans la littérature en raison de la faible porosité et de la perméabilité réduite de ces matériaux, attribuables principalement à la présence significative de fumée de silice dans la composition du BPR. La réactivité élevée de la fumée de silice contribue à l'homogénéité du mélange, réduisant ainsi les vides et les canaux de communication dans la matrice du béton.[Zenati ,2007]

La formulation BPR30PV présente la valeur d'absorption la plus basse, principalement en raison de la finesse exceptionnelle de la poudre de verre utilisée. Cette finesse permet à la poudre de verre de remplir efficacement les vides microscopiques entre les fines et les grains de ciment, favorisant ainsi une structure compacte et réduisant significativement la porosité et la perméabilité du béton.

De plus, le BPR20L montre également une amélioration par rapport au BPRT, avec une absorption inférieure de 25 %, confirmant ainsi l'affinement de la structure poreuse induit par le laitier et la diminution de la perméabilité, comme mentionné dans la littérature [Olga, 1996].

De la même manière que pour l'absorption d'eau, des conclusions similaires peuvent être tirées pour l'absorption capillaire. L'augmentation des dosages de fines entraîne une diminution du coefficient d'absorption capillaire d'eau par immersion et réduit la taille des pores.

### 6.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné les divers résultats de notre étude expérimentale sur l'influence de la poudre de verre et du laitier sur le comportement du béton de poudre réactive. Ces résultats nous permettent de conclure que :

- La substitution de ciment par un 30% de poudre de verre a légèrement réduit l'ouvrabilité de BPR, et a montré une température plus basse à l'état frais ( de 26°C à 25°C), indiquant une diminution de la chaleur d'hydratation, ce qui peut améliorer la durabilité en réduisant les risques de fissuration thermique.
- La masse volumique des bétons diminue avec l'ajout de poudre de verre et de laitier, indiquant une proportion plus élevée de composants légers.
- Le BPR est un matériau très résistant en compression, atteignant une résistance supérieure à 140 MPa à 28 jours. De même, pour la résistance en flexion, le BPR affiche de bonnes performances comparées à un béton ordinaire (BO) ou un béton à haute performance (BHP).
- L'ajout de laitier a un impact léger sur le BPR, la résistance à la compression reste pratiquement la même à long terme, et la résistance en flexion montre parfois de meilleures performances que le BPRT.
- La substitution partielle du ciment par de la poudre de verre dans le BPR offre une bonne résistance à la compression après 28 jours, bien qu'elle soit inférieure à celle du BPRT, avec un gain de 270 kg/m<sup>3</sup> de ciment remplacé par de la poudre de verre. b
- La substitution partielle du ciment par de la poudre de verre dans les BPR réduit la résistance à la traction par fendage, bien que la résistance en flexion soit moins affectée. Par exemple, le BPR30PV montre une réduction de 40% de la résistance à la traction par fendage par rapport au BPRT.
- Le BPR20L, avec l'ajout de 20 % de laitier, présente le retrait le plus important, tandis que le BPR30PV montre un retrait légèrement supérieur à celui du BPRT mais reste minime. En termes de perte de masse, le BPR30PV a la plus grande perte, probablement due à la nature non absorbante de la poudre de verre
- L'augmentation de la teneur en fines de poudre de verre et de laitier entraîne une diminution du coefficient d'absorption d'eau et de la porosité. Les valeurs d'absorption d'eau sont particulièrement faibles pour les BPR, notamment pour le BPR30PV qui présente la plus faible absorption d'eau en raison de la finesse de la poudre de verre utilisée.

# ***CONCLUSION GÉNÉRALE***

## CONCLUSION GÉNÉRALE

La recherche sur la formulation d'un béton de poudre réactive (BPR) utilisant de la poudre de verre a révélé des résultats prometteurs pour le développement de matériaux de construction durables et respectueux de l'environnement. Dans un contexte où la durabilité et le recyclage des déchets sont essentiels, cette étude démontre que l'incorporation de poudre de verre, issue du recyclage des déchets de verre non valorisés, offre une solution viable et écologique. Bien que la résistance initiale à la compression et à la flexion soit légèrement réduite par rapport au béton de référence, les performances à moyen et long terme sont prometteuses, avec une amélioration de perméabilité et de la porosité.

### Conclusion sur l'utilisation des déchets du verre (PV) dans le BPR

L'étude a démontré que la substitution partielle du ciment par de la poudre de verre (PV) dans la formulation de béton de poudre réactive (BPR) présente de nombreux avantages et défis.

- L'incorporation de 30% de poudre de verre a légèrement réduit l'ouvrabilité du béton frais, mais reste dans des marges acceptables pour les applications pratiques.
- Une baisse de température indiquant une chute de la chaleur d'hydratation observée avec la PV est bénéfique pour la durabilité du béton, réduisant les risques de fissuration thermique.
- Les résistances mécaniques à court terme sont inférieures à celles du béton témoin (BPR), les performances à moyen et long terme montrent une amélioration progressive grâce à la réaction pouzzolanique de la PV.

Ces résultats indiquent que la PV, en tant que substitut partiel du ciment, est une solution prometteuse pour valoriser les déchets de verre tout en produisant un béton durable et écologique respectueux de l'environnement par la réduction de la quantité de ciment utilisée.

### Conseils Pratiques

- Pour optimiser l'utilisation de la poudre de verre dans le BPR, il est important de suivre des pratiques de broyage rigoureuses pour atteindre une granulométrie de 38 à 45  $\mu\text{m}$  avec un taux de refus ne dépasse pas les 20% pour le tamis 45  $\mu\text{m}$ , et une SSB supérieur à 6000  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Cette finesse est essentielle pour assurer une bonne réactivité et une distribution homogène dans la matrice du béton.
- La formulation du mélange doit être soigneusement ajustée pour équilibrer les effets des différents composants, notamment la poudre de verre, le Laitier granulé et la fumée de silice, ainsi que la quantité d'eau et du superplastifiant.
- Des essais préliminaires pour les matériaux sont indispensables pour calibrer les proportions et garantir la qualité du béton final en visant les compacités maximales.
- La gestion des conditions de durcissement, incluant la température et l'humidité, doit être contrôlée pour optimiser les propriétés mécaniques du béton.



## CONCLUSION GÉNÉRALE

### Recommandations et perspectives

- Bien que cette étude se soit concentrée sur la substitution partielle du ciment par de la poudre de verre, les résultats obtenus avec le laitier (BPR20L) suggèrent des pistes de recherche intéressantes.
- Explorer les effets de combiner la poudre de verre (PV) et le laitier dans différentes proportions, afin d'optimiser les propriétés mécaniques et durables du béton.
- Réaliser des essais avec un mélange de BPR sans fibre pour mieux observer le comportement intrinsèque du matériau.
- Tester un mélange de BPR contenant uniquement de la poudre de verre, sans ajout de laitier, pour isoler et analyser son impact spécifique.
- En raison de contraintes des moyens, l'étude n'a pas pu inclure une analyse approfondie de la durabilité. Il est donc recommandé de mener des recherches futures sur l'impact à long terme de ces substitutions sur la durabilité, le mode de rupture et le comportement au retrait du béton.
- Effectuer une analyse approfondie des avantages économiques et environnementaux de l'utilisation de matériaux recyclés, tels que la poudre de verre et le laitier, à grande échelle.
- Estimer les coûts associés à l'utilisation de ces matériaux dans des projets de construction afin de déterminer leur viabilité économique.
- Considérer que certains de ces matériaux peuvent être coûteux. Il serait donc utile de comparer les coûts et les bénéfices de l'utilisation de la poudre de verre et du laitier par rapport à des matériaux traditionnels.
- Les perspectives de cette recherche ouvrent la voie à de nouvelles innovations pour améliorer la durabilité et l'efficacité des matériaux de construction tout en réduisant l'empreinte environnementale de l'industrie.

### Conclusion finale

En conclusion, la substitution du ciment par de la poudre de verre dans la formulation de BPR représente une avancée significative vers une construction plus durable et respectueuse de l'environnement. Ce béton écologique a été fabriqué à partir de déchets de verre, offrant ainsi une solution pour préserver l'environnement en réduisant les dommages causés par l'accumulation des déchets de verre, leur non-dégradation, ainsi que les émissions de **CO2** générées par la fabrication du ciment. Les résultats de cette étude démontrent que la PV peut améliorer les propriétés du béton tout en offrant une alternative écologique et économique au ciment traditionnel. La valorisation des déchets de verre par leur transformation en poudre de verre et leur utilisation dans le béton permet de réduire l'empreinte carbone de l'industrie de la construction et de promouvoir l'économie. Les futures recherches et innovations dans ce domaine permettront d'optimiser les formulations et les méthodes de production, contribuant ainsi à des pratiques de construction plus durables et efficaces. Les perspectives ouvertes par cette étude sont prometteuses et montrent que l'intégration de matériaux recyclés dans le béton de haute performance est une voie viable pour l'avenir de la construction durable.

# ***BIBLIOGRAPHIE***

## BIBLIOGRAPHIE

A. Zidol Ph.D. Utilisation de la poudre de verre dans les bétons de trottoir à Montréal. Infrastructures Montréal. Université de SHERBROOKE.

Abbas Moslehi, Mohammad Ali Dashti Rahmatabadi, and Hosein Arman. Research Article Determination of Optimized Mix Design of Reactive Powder Concrete. Article ID 4421095, 14 pages. Hindawi.

Aboutair Amel, « Caractérisation Physico-mécanique Et Microstructurale Des Bétons Fibrés A Matrices Ultra Haute Performance », Thèse De Doctorat, Université M'hamed Bougara-Boumerdes, 2019.

Adeline, R., "Béton de poudres réactives", Techniques de l'ingénieur (C 2 216), 1999.

AFPC-AFREM, "Mode opératoire recommandé, essai de perméabilité au gaz du béton durci", Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM, Durabilité des bétons, "Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, Toulouse, 1997, p. 125-134.

Agence Nationale des Déchets. Caractérisation des déchets ménagers et assimilés dans les zones nord, semi-aride et aride d'Algérie. Caractérisation DMA, 2014.

Ali Hussain Zainab, Nada Mahdi Fawzi Aljalawi, "Behavior of reactive powder concrete containing recycled glass powder reinforced by steel fiber," Journal of the Mechanical Behavior of Materials, Published by De Gruyter, June 1, 2022.

Amroun Sofiane. Caractérisation de nouveaux ciments à base de verre finement broyé et étude de leurs durabilité et résistances. Mémoire de fin d'étude, Ecole Nationale Polytechnique, 2022.

Arab Bahia , Rachid Mehaddene, Yacine Bouchnab. Substitution du ciment CPA par la poudre de verre dans les mortiers à hautes performances. Environnement, Ingénierie & Développement, 2017, N°75 - décembre 2017, pp.1-8.

Benamrane Dounia Zed. L'effet de la méthode de formulation sur la résistance à la compression du béton. Mémoire de Master. Université KASDI Merbah Ouargla, 2017.

Bonneau, O., Lachemi, M., Dallaire, E., Dugat, J., Aitcin, P.-C., "Mechanical properties and durability of two industrial reactive powder concretes". ACI Mater. J. 94, 1997.

Bonneau, O., Vernet, C., Moranville, "Optimization of the rheological behavior of reactive powder concrete". Presented at the Proceedings of the First International Symposium on HPC and RPC, Sherbrooke, Canada, pp 99–118, 1998.

Chadli Mounira. Étude des performances des bétons de poudres réactives fibrés. Thèse de Doctorat en sciences, Université Mohamed Khider – Biskra, 2019.

Chekireb Sihem. Valorisation de La Poudre de Verre dans le Béton Autoplaçant. Mémoire de maîtrise. Université de Sherbrooke (Québec) Canada, 2015.

Cheribet Drouiche Zoheir seif el islem. Valorisation de poudre de verre dans la formulation

## BIBLIOGRAPHIE

de béton autoplaçant. Mémoire de Projet de Fin d'Études, Ecole Nationale Polytechnique, 2023.

Dakhmouche Fatima-Zohra, "Carbonatation de bétons adjuvants a base de ressources locales Algériennes", Thèse Doctorat, Université d'Orléans et de l'Université Mentouri de Constantine, P 240, 2009.

Deluzarche Céline. Pourquoi le sable du désert n'est pas utilisé pour la construction ?. 2024. futura-sciences.

Derradj Hicham. Formulation des bétons à haute performance. Mémoire De Fin d'Études. Université de Jijel, 2016.

Douaïssia Z. & al. Effets du laitier granulé et de la pouzzolane naturelle sur les propriétés physico-mécaniques et sur la réaction alcali silice des mortiers à base de verre recyclé. Rev. Sci. Technol., Synthèse Vol 26, numéro 1: 78-91. 2020.

Dreux, G., Festa, J.,. "Nouveau guide du béton et de ses constituants". Eyrolles, 1998.

Dugat, J., Roux, N., et Bernier, G., "Mechanical properties of reactive powder concretes", Materials and Structures, S2, 1996, p. 233-240.

Dugat J., Roux N., Bernier G., « Etude expérimentale de la déformation sous contrainte et du comportement à la rupture du béton de poudre réactive (BPR) ». Annales de l'ITBTP, n°.532, mars avril 1995, p. 112-121.

Frohard Fabien. Durabilité des éco-bétons : impact d'additions cimentaires alternatives sur la corrosion des armatures dans les bétons armés. Science des matériaux [cond-mat.mtrl-sci]. Université Paris-Est, 2014. Français. HAL open science.

Idir Rachida, Louise Lemesre, Bathyle Hery, Thomas Poinot, André Carles-Gibergues, et al.. L'utilisation du verre de recyclage dans les matériaux cimentaires et alcali-activés. NOMAD 2022 - 4e conférence internationale francophone Nouveaux Matériaux et Durabilité, IMT Mines Alès; LMGC; LIFAM, Nov 2022, Montpellier, France. HAL open science.

Jean-Marc. Utilisation du sable pour la construction. 2015. Matériaux et Bricolage.

Kadi Abdelghani, Naamaoui Tahar. Méthodes de la formulation des bétons (Étude Théorique). Mémoire De Fin d'Études. Université Ahmed Draia d'Adrar, 2020.

Kateb Mohamed Lamine. Utilisation des granulats de verre dans la fabrication des bétons architecturaux «cas des briques en bétons». Mémoire de maîtrise des sciences appliquées. Université de Sherbrooke (Québec) Canada, 2009.

Kechkar Chiraz. Polycopié de cours. 2021. BETONS INNOVANTS 1. Université 8 Mai 1945. Guelma. p 51.

KHELIFA Mohammed-Rissel. Formulation et caractérisation d'éco-bétons renforcés aux fibres d'alfa pour des bâtiments verts et durables. Thèse en cotutelle International. Université Paris Seine – Université de Cergy-Pontoise / Université Ferhat Abbas Sétif 1, 2017.

## BIBLIOGRAPHIE

Kushartomo W, Bali I, Sulaiman B. Mechanical behavior of reactive powder concrete with glass powder substitute. *Procedia Eng.* 2015 Jan 1.

Kushartomo Widodo, Ika Bali, Budi Sulaiman. Mechanical behavior of reactive powder concrete with glass powder substitute. *Procedia Engineering* 125 617 – 622. 2015.

Ladour Ilyes, « Etude Des Performance Des Bétons De Poudres Réactives Fibres (Bpr-F) », Mémoire Master, Université Mohamed Khider – Biskra, 2014.

LAFARGE FRANCE, Fabrication du ciment. Membre du GROUPE HOLCIM.

Loukili A., Khelidj A., and Richard P., “Hydration kinetics, change of relative humidity, and autogenous shrinkage of ultrahigh-strength concrete,” *Cement and Concrete Research*, vol. 29,no. 4, pp. 577–584, 1999.

Majid Mohammed Zainab, "Behavior of sustainable Reactive Powder Concrete by Using Glass Powder as a Replacement of Cement," *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, vol. 961, article 012022, IOP Publishing, 2022.

Mathieu Studer. Conception et calcul des structures en verre. Licencié en Ingénieur civil architecte. Université Libre de Bruxelles, 2008.

Mathilde Lagier. Article. En 1990, il invente le béton à poudres réactives. 2009. *L'Usine Nouvelle*.

Mejdi Mehdi. Compréhension des mécanismes d’hydratation des ciments composés incorporant de la poudre de verre ou des cendres de boues d’épuration calcinées. *Matériaux et structures en mécanique [physics.class-ph]*. Université Paris-Est; Université de Sherbrooke (Québec, Canada), 2019. Français.

Mirzahosseini, M., Riding, K.A. Effect of curing temperature and glass type on the pozzolanic reactivity of glass powder. *Cement and Concrete Research* 2014. vol 58,p 103–111.

Morin, R., Tagnit-Hamou, A., Omran, A. F., & Zidol, A. (2015). Utilisation de la poudre de verre dans les bétons de trottoir à Montréal. Présenté à la conférence CERIU-INFRA, Québec, novembre 2015.

Olga Mehaela S, «La Production Des Eléments Fabriqués En Béton De Poudres Réactives», Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées spécialité génie civil, canada, 1996.

Patrick Guiraud. Fumée de silice : l’addition incontournable pour des bétons durables. *Bétons fibrés*. 2018. infociments.

Québec : Un ouvrage d’art en La passerelle sur la à Sherbrooke. *TRAVAUX URBAINS - SHERBROOKE*. Travaux n° 751 • mars 1999.

Richard, P. et Cheyrezy, M., "Composition of reactive powder concretes", *Cement and Concrete Research*, S8 (7), 1995, p. 1501-1511.

## BIBLIOGRAPHIE

- Scholze, H. (1980). *Le Verre : nature, structure et propriétés*. Paris : Institut du verre.
- Schwarz, N., Cam, H., & Neithalath, N. Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. *Cement and Concrete Composites* 2008, vol 30, n 6, pp 486–496.
- Schwarz, N. et DuBois, M. et Neithalath, N. Electrical conductivity based characterization of plain and coarse glass powder modified cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, volume 29, 2007, n° 9, p. 656-666.
- Sedki Meriem. *Etude expérimentale d'un béton à base de déchets de verre*. Mémoire de Master Recherche, Université Mouloud Mammeri – Tizi-Ouzou, 2019.
- Setina J, Gabrene A, Juhnevica I. Effect of pozzolanic additives on structure and chemical durability of concrete. *Procedia Eng.* 2013 Jan 1. 2013.04.127.
- Shatha Sadiq Hasan. *Investigation Of Using Waste Glass Powder As A Supplementary Cementitious Material In Reactive Powder Concrete*. University of Technology, Iraq, 2020.
- SHAYAN, A., XU, A. Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs, *Cement and concrete research*, 2006, Vol. 36. p. 457-468.
- SHAYAN, A., XU. A. Value-added utilization of waste glass in concrete. *Cement and Concrete Research*, 2004, Vol. 34, p. 81-89.
- Soliman, N.A., & Tagnit-Hamou, A. Development of ultra-high-performance concrete using glass powder – Towards ecofriendly concrete. *Construction and Building Materials*, 125, 600–612. 2016.
- Tafraoui A ; *Contribution à la valorisation de sable de dune de l'erg occidental (Algérie)*; Thèse Doctorat de l'université de Toulouse, INSA de Toulouse, Février 2009.
- Taieb Fatima. *Contribution à l'Étude du Retrait des Mortiers de Béton Autoplaçant Équivalent à Base de Sédiments de Dragage*. Thèse de Doctorat 3ème CYCLE , Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, 2019.
- Tallec Michèle , Jean-Marc Capdevila. *Entreposage des déchets B : quoi ? quels obstacles ? quelles localisations ?*. C. R. Physique 3 (2002) 851–866. CEA, centre de Saclay, France.
- Tran, T.M., Trinh, H.T.M.K., Nguyen, D., Tao, Q., Mali, S., & Pham, T.M. Development of sustainable ultra-high-performance concrete containing ground granulated blast furnace slag and glass powder: Mix design investigation. *Construction and Building Materials*, 397, 132358. 2023.
- Zenati Abdelfattah, « *Contribution À L'étude Des Bétons De Poudres Réactives À Base De Fibres* », Mémoire Magister, Université Des Sciences Et De La Technologie Houari Boumediene, 2007.
- Zeroub Hamid, Rabah Chaïd, Saïd Kenai, & Raoul Jauberthie *Microstructure and permeability of concrete with glass powder addition conserved in the sulphatic environment* *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2015.

# ***ANNEXES***

## Annexe A : Fiche Technique du Ciment Blanc utilisé



### APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Construction des Ouvrages d'Art esthétiques et éléments décoratifs.
- Carreaux de dalle: monocouche et bicouche.
- Mortiers et colles à base de ciment.
- Idéal pour la préfabrication légère et lourde.



### FORMULATION CONSEILLÉE

	Ciment	Sable Moyen (sec) 0/4	Gravillons (sec) 8/15mm 15/25mm	Eau (litres)
Dosage pour béton c25/30	X 1	+  X7	+  X5 +  X4	+ 25 L

Remarque: un bidon = 10 Litres

Cette formule est proposée en l'absence d'une formulation étudiée et délivrée par un laboratoire spécialisé.

### CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Analyses chimiques	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	3 ± 1,5
Teneur en sulfates (SO3) (%)	3 ± 0,8
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	2,5 ± 0,8
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	< 0,1

Composition minéralogique du Clinker (Bogue)	Valeur
C3S (%)	54 ± 3
C3A (%)	10 ± 1

Propriétés physiques	Valeur
Consistance Normale (%)	28,5 ± 2
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm²/g) (NA231)	4000 - 5000
Retrait à 28 jours (µm/m)	≤ 1000
Blancheur (Y)	85 ± 2

Temps de prise à 20° (NA 230)	Valeur
Début de prise (min)	140 ± 40
Fin de prise (min)	200 ± 40

Résistance à la compression	Valeur
2 jours (MPa)	≥ 30
28 jours (MPa)	≥ 52,5

Ces données sont communiquées à titre informatif et sont susceptibles d'être modifiées en fonction des paramètres de production.

Conditionnement: /



## Annexe B : Caractéristiques physico-chimique du Ciment

Tableau A.1 : Caractéristiques physico-chimique du Ciment, Holcim, LAFARGE

Caractéristiques		Normes	Résultats	Exigences NA 442	Unité
SiO <sub>2</sub>		NA 5042	22,34	/	%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			3,57	/	%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			0,18	/	%
CaO			66,57	/	%
K <sub>2</sub> O			2,46	/	%
Na <sub>2</sub> O			2,55	/	%
Na <sub>2</sub> O-Equ				0,4	/
Perte au feu		NA 5042	2,99	/	%
Teneur en MgO		NA 5042	1,96	/	%
Teneur en SO <sub>3</sub>		NA 5042	2,63	≤ 4	%
Chlorure			0,031	≤ 0,1	%
Whiteness	L*		93,98	/	%
	(CIE 1931) Y		84,55	/	%
SSB		NA 231	4610	/	cm <sup>2</sup> /g
I S T		NA 230	156	≥ 45	min
F S T			223	/	min
Expansion		NA 230	1	≥ 10	min

## Annexe C : Fiche Technique du Superplastifiant utilisé

NOTICE TECHNIQUE

Version 03

Edition février 2017

2

1

4

2

# MEDAFLOW RE 250

Conforme à la norme EN 934-2: TAB 1, TAB 3.1, 2 et 3.2  
ET TAB 3.2 NA 774

### Super plastifiant–Haut réducteur d'eau

#### Description

Le **MEDAFLOW RE 250** est un super plastifiant haut réducteur d'eau. Il est conçu à base de polymères de synthèse modifier et son utilisation dans le béton permet l'obtention d'un rapport E/C très bas suivant d'un maintien d'ouvrabilité remarquable.

Le **MEDAFLOW RE 250** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

#### Domaines D'application

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto-plaçant
- Bétons pompes sur de longues distance
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux

#### Propriétés Et Effets

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW RE 250** permet :

##### Sur béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très bas
- Amélioration considérable de la fluidité
- Faciliter la mise en œuvre du béton
- Décoffrage rapide

##### Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques à jeune âge
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait

#### Caractéristiques :

- Aspect..... liquide
- Couleur..... Ocre clair
- pH.....6 - 6,5
- Densité.....1,06 + 0,01
- Teneur en chlore.....< 1 g/l

#### Mode D'emploi :

Il est recommandé d'ajouter le **MEDAFLOW RE 250** dans le béton après introduction des  $\frac{3}{4}$  de l'eau de gâchage. Ait déjà été introduite.

Il est conseillé de réaliser des essais dans les conditions de chantier afin de déterminer le dosage fournissant pour les résultats recherchés.

Il peut être aussi ajouté directement dans le camion malaxeur (toupie), puis malaxer à grande vitesse : 1min/m<sup>3</sup>.

Par temps chaud, le **MEDAFLOW RE 250** peut être combiné à un retardataire de prise (**MEDARETARD GR**).

#### Conditionnement Et Stockage :

Le **MEDAFLOW RE 250** est conditionné en bidons de 11 kg , fûts de 210 kg 240 kg.

##### Délai de conservation :

12 mois dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (5°C < t < 35°C)

#### Précautions D'emploi :

**Manipulation non dangereuse.**

Se référer à la fiche de données de sécurité disponible sur : [www.granitex-dz.com](http://www.granitex-dz.com)

*Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandée de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.*



**Grani**  
جرانيتكس

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

[www.granitex.dz](http://www.granitex.dz) - E-mail: [granitex@granitex.dz](mailto:granitex@granitex.dz)



## Annexe D : Fiche Technique du Laitier utilisé



## Laitier

## Fiche de données de sécurité

Selon Federal Register / Vol. 77, n° 58 / lundi 26 mars 2012 / Règles et règlements et selon le règlement sur les produits dangereux (11 février 2015).

Date de révision : 01/01/2022

Date d'émission : 02/01/2022

Version : 3.2

## IDENTIFICATION

## Identificateur du produit

Type de produit : Mélange

Nom du produit : Laitier

Synonymes : NewCem®, agrégat léger Litex™, agrégat léger True Lite™, laitier granulé Vitrex™, Laitier de haut fourneau granulé (GGBFS), laitier de haut fourneau, scories, laitier granulé, scories granulées, scories métalliques, laitier refroidi à l'air, scories non métalliques, ciment de laitier, ciment de scories hydrauliques, slag

Remarque : Cette FDS couvre de nombreux types de laitier. La composition individuelle des constituants dangereux variera d'un type de laitier à l'autre.

## Usage recommandé

Le laitier est utilisé comme ajout cimentaire pour les produits cimentaires, de béton et fabriqués en béton. Il est également utilisé dans la stabilisation des sols, comme agent de remplissage dans l'asphalte, et dans d'autres produits largement utilisés en construction.

## Nom, adresse et téléphone de la partie responsable

Entreprise – Lafarge Canada

Ouest du Canada  
# 300 115 Quarry Park Road SE  
Calgary, AB T2C 5G9  
Téléphone : (403) 225-5400

Est du Canada  
6509 Airport Road  
Mississauga, ON L4V 1S7  
Téléphone : (905) 738-7070

Site Internet : [www.lafarge.ca](http://www.lafarge.ca)

## Numéro de téléphone d'urgence

Numéro d'urgence : Chemtel 1-800-255-3924 (24 heures)

## COMPOSITION / INFORMATIONS SUR LES INGRÉDIENTS

## Mélange

Nom chimique	Identifiant de produit	% *	Classification des ingrédients du SGH
Laitier, scories, métaux ferreux, haut fourneau	(N ° CAS.) 65996-69-2	100	Non classés
<b>Contient</b>			
Nom chimique	Identifiant de produit	% (w / w)	Classification (SGH-US)
Oxyde de calcium	(N ° CAS.) 1305-78-8	30 - 50	Skin Irrit. 2, H315 Eye Dam. 1, H318 STOT SE 3, H335 Aquatic Acute 3, H402
Oxyde de magnésium (MgO)	(N ° CAS.) 1309-48-4	<20	Non classés
Quartz	(N ° CAS.) 14808-60-7	<1	Carc. 1A, H350 STOT SE 3, H335 STOT RE 1, H372

Texte intégral des codes-H : voir section 16.

Le laitier est un sous-produit non métallique issu de la production de fer. Des traces de produits chimiques peuvent être détectées lors de l'analyse chimique. Par exemple, le laitier peut contenir des traces d'oxyde de manganèse, d'oxyde de titane, de composés de chrome, de composés soufrés et d'autres traces de composants.

\* Les pourcentages sont exprimés en pourcentage en poids (w / w%) pour les ingrédients liquides et solides. Les ingrédients gazeux sont listés en pourcentage volume / volume (v / v%).