

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed khider –Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie civil et d'Hydraulique
Référence 2021/2022



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية والري
المرجع 2022/2021

Mémoire de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en génie civil

Thème

*Etude expérimentale d'un béton de poudre réactive fibré
à base de sable de dune*

Nom et Prénom de l'étudiant :

Encadreur

Kliel Houria

Dr. CHADLI MOUNIRA

Promotion: Juin 2022

REMERCIEMENT

Au terme de ce mémoire, je tiens tout d'abord à adresser mes vifs et sincères remerciements à mon Directeur de mémoire, CHADLI MOUNIRA, pour son entière disponibilité, ses conseils et ses directives pertinentes tout au long de cette étude.

Je remercie le chef du département de Génie Civil de Biskra, Abed elssalam, pour sa disponibilité.

Je remercie tous les membres de la Faculté de Génie Civil de Biskra, du Laboratoire Matériaux en Génie Civil, enseignants et personnels administratifs avec qui j'ai eu le plaisir de travailler.

Je ne puis mentionner tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de ce travail que ceux qui m'ont aidé d'un simple encouragement à un appui continu trouvent ici l'expression de ma reconnaissance très sincère.





DEDICACE

Nous dédions ce mémoire de fin d'étude à :

ALLAH pour ses œuvres palpables dans notre vie;

Nos parents, frères et sœurs pour leur encouragement, soutien et

Surtout leur amour fraternel.

RESUME

Résumé

Le sable des dunes algériennes est un matériau d'une grande disponibilité en Algérie. Ce matériau est pratiquement non exploité, malgré les éventuelles caractéristiques qu'il peut présenter. L'utilisation de ce nouveau matériau dans le secteur de la construction, peut soulager d'avantage le domaine d'habitat, et contribuer au développement des régions du sud algérien, très riches en sable de dune.

Le béton de poudre réactive (BPR) est une innovation en béton qui a une résistance à la compression élevée allant jusqu'à 800 MPa. Ce béton BPR utilise un matériau à fines particules (poudre) qui est utile pour les réactions entre tous les matériaux constitutifs, de sorte que le béton devient plus dense et plus résistant. La fabrication du béton BPR nécessite des matériaux sous forme de ciment, de sable, d'eau et de matériaux ajoutés. Où la majeure partie du volume de béton est remplie par des granulats fins, de sorte que les caractéristiques des granulats fins utilisés comme mélange dans le béton jouent un rôle important dans les propriétés physiques et mécaniques du béton résultant.

Cette étude vise l'effet de l'utilisation de sable de dune sur les propriétés mécaniques et physiques du béton de poudre réactive fibré. Comme le sable de dune a été remplacé par du sable de rivière dans trois proportions différentes qui sont respectivement de 40%, 50% et 60%. Dans cette étude, la résistance à la flexion, la vitesse d'impulsion ultrasonique et la résistance à la compression seront examinés. Les résultats obtenus ont montré une bonne amélioration par rapport à toutes les expériences étudiées lors de l'ajout de sable de dune et il pourrait donc être utilisé comme substitut du sable de rivière dans le béton de poudre réactive, car le rapport idéal pour tous les résultats des tests lors du remplacement était de 60 % de sable de dune.

Mots clés : Sable de rivière, Sable de dune, Béton de poudre réactive, Propriétés physiques et mécaniques.

الملخص:

رمال الكثبان الجزائرية مادة متوفرة بكثرة في الجزائر. هذه المادة غير مستغلة عمليا ، على الرغم من الخصائص المحتملة التي قد تقدمها. إن استخدام هذه المادة الجديدة في قطاع البناء، يمكن أن يخفف أكثر في مجال العمران، ويساهم في تنمية مناطق جنوب الجزائر الغنية جداً بالرمال الكثيفة .

مسحوق الخرسانة التفاعلي هو ابتكار ملموس يتمتع بقوة ضغط عالية تصل إلى 800 ميجا باسكال. تستخدم خرسانة المسحوق التفاعلي مادة جسيمات دقيقة (مسحوق) مفيدة للتفاعلات بين جميع المواد المكونة، بحيث تصبح الخرسانة أكثر كثافة وأقوى. يتطلب صنع خرسانة المسحوق التفاعلي مواد على شكل أسمنت ورمل وماء ومواد مضافة. حيث يتم ملء معظم حجم الخرسانة بالركام الناعم، لذلك تلعب خصائص الركام الناعم المستخدم كخليط في الخرسانة دوراً مهماً في الخواص الفيزيائية والميكانيكية للخرسانة الناتجة .

تركز هذه الدراسة على تأثير استخدام رمل الكثبان الرملية على الخواص الميكانيكية والفيزيائية للخرسانة البودرة المتفاعلة. حيث تم استبدال رمل الكثبان الرملية برمل الأنهار بثلاث نسب مختلفة وهي 40% و 50% و 60% على التوالي. في هذه الدراسة، سيتم فحص مقاومة الانحناء وسرعة النبض بالموجات فوق الصوتية ومقاومة الضغط. أظهرت النتائج المتحصل عليها تحسناً جيداً على جميع التجارب التي تمت دراستها عند إضافة رمال الكثبان وبالتالي يمكن استخدامها كبديل لرمل النهر في الخرسانة ذات المسحوق التفاعلي ، حيث كانت النسبة المثالية لجميع نتائج الاختبار عند الاستبدال 60% من رمال الكثبان.

Table de matières

Remerciements.....	i
Dédicaces.....	ii
Résumé.....	iii
الملخص	iv
Table des matières.....	v
Liste des figures.....	x
Liste des tableaux.....	xiii
Liste des Abréviations.....	xvi
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Etude bibliographique

I.1 Introduction.....	3
I.2 Le béton ordinaire.....	3
I.2.1 Définition.....	3
I.2.2 Historique.....	4
I.2.3 Composition du béton.....	4
I.2.4 Propriétés du béton.....	4
I.2.5 Classification du béton.....	5
I.3 Définition d'un béton à haute performance.....	6
I.3.1 Historique.....	6
I.3.2 Les caractéristiques des BHP.....	7
a- A l'état frais.....	7
b- A l'état durcis.....	7
I.3.3 Les avantages des bétons Hautes Performances (BHP).....	8
I.3.4 Applications des BHP.....	8
I.4 Définition du béton à poudre réactive (BPR).....	8
I.4.1 Les constituants du BPR.....	9
I.4.1.1 Le ciment.....	9
I.4.1.2 Granulat.....	10
I.4.1.2.1 Sable fin.....	10
I.4.1.2.1.1 Les familles de sables.....	10
I.4.1.2.2 Additions.....	12
I.4.1.2.3 Les super-plastifiants.....	14
I.4.1.2.4 Fibres.....	15

Table de matières

I.4.1.2.5 Rapport Eau/Liant.....	15
I.5 Caractérisation et propriétés des BPR.....	15
I.5.1 Les Propriétés rhéologiques.....	15
I.5.2 Malaxage.....	16
I.5.3 Performances mécaniques.....	16
I.5.3.1 Résistance en compression et module d'élasticité.....	16
I.5.3.2 Résistance en traction.....	21
I.5.3.3 Durabilité.....	22
I.5.3.3.1 Porosité.....	22
I.5.3.3.2 Perméabilité, Résistance au gel-dégel et Abrasion.....	24
I.5.3.3.3 Résistance à la corrosion.....	25
I.5.3.3.4 La résistance aux agents agressifs.....	25
I.5.3.3.5 Résistance au feu.....	26
I.5.3.4 Microstructure des BPR.....	26
I.6 domaine d'application des BPR.....	26
I.7. Les avantages et les inconvénients des Béton de Poudres Réactive (BPR).....	28
I.7.1 Les avantage de BPR.....	28
I.7.2 Les inconvénients de BPR.....	28
I.8 Conclusion.....	28

Chapitre II: Techniques Experimental

II.1 Introduction.....	30
II.2. Matériaux utilisés.....	30
II.2.1. Le ciment Portland.....	30
II.2.2 Le Sable.....	31
II.2.2.1 Masse volumique absolue : selon la Norme [NFP 18-301].....	31
II.2.2.2 Masse volumique apparente : Selon la Norme [NFP 18-554].....	32
II.2.2.3 Equivalent de sable : Selon la Norme [NFP 18-598].....	32
II.2.2.4 Analyse granulométrique par tamisage NF EN933-1.....	34
II.2.3 : Additions.....	37
II.2.3.1 : Quartz broyé.....	37
II.2.3.2 : Poudre de marbre.....	39
II.2.4 Les adjuvants.....	40
II.2.5 : Les fibres métalliques.....	41
II.2.6 L'eau de gâchage.....	41

Table de matières

II.3 Formulation et conservation des éprouvettes.....	42
II.3.1 Formulation.....	42
II.3.2. Le malaxage.....	43
II.3.3 Procédure expérimentale.....	44
II 3.3.1 Préparations des éprouvettes et déroulement des essais.....	44
II.3.3.2 Constituant du BPRF.....	45
II.3.3.3 Caractérisation des différentes compositions.....	47
II.3.3.4 Essais de caractérisation du BPRF à l'état durci.....	48
II.4 Conclusion.....	50
Chapitre III : Résultats et discussions	
III.1 Introduction.....	51
III.2 Les propriétés physico-mécaniques.....	51
III.2.1 Résultats des masses des bétons durcis.....	51
III.2.2 Contrôle non destructif.....	54
III.2.3 Essais à l'état durci.....	56
III.2.3.1 Résultats des résistances à la compression (NF P 18-406).....	56
III.2.3.2 Résistance à la flexion (Norme NF EN 12390-5).....	59
III.3 Conclusion.....	61
Conclusion générale.....	62
Références.....	64
Annexes.....	68

Liste des Figures

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Etude Bibliographique

Figure I.1: Constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire [3].	4
Figure I.2. Passerelle piétonnière de Sherbrooke réalisée en 1997.	9
Figure I.3. Le sable roulé siliceux [10].	10
Figure I.4. le sable de dune [10].	11
Figure I. 5 :Types de dunes. A: barkhanes ; B: dunes paraboliques ; C: dunes longitudinale La flèche bleue indique la direction du vent dominant	12
Figure I.6. Différents ajouts cimentaires. [15].	13
Figure I.7. Fissuration dans le béton sans et avec fibres [21].	15
Figure I.8. Représentation du comportement rhéologique des BPR [22].	16
Figure I.9. Enveloppe de meilleures résistances obtenues pour différentes densité relatives [1].	17
Figure I.10. Courbe contrainte déformation du BPR200 en compression [24].	18
Figure I .11. Courbe contrainte déformation du BPR800 en compression [24].	19
Figure I.12. Développement des propriétés mécaniques de ciment Portland (a) et du ciment à base de laitier (b) [26].	19
Figure I.13. Influence du dosage en fumée de silice sur la résistance en compression [28]	21
Figure I .14. Comportement du BPR en traction directe [29].	21
Figure I. 15. Résistance en traction en fonction du rapport E/C et du dosage en fumée de silice [26].	22
Figure I .16. Distribution poreuse d'un béton ultra haute performance [34].	23
Figure I.17. Distribution poreuse d'un béton avec et sans traitement thermique [37].	24
Figure I. 18. Microstructure de BPR après 1 jour. [42].	26
Figure I .19. Microstructure de BPR après 7 jours. [42].	26
Figure I.20. Différent éléments structurels en BPR. [46].	27

Chapitre II : Techniques Expérimentales

Figure II .1. Ciment utilisé.	30
Figure II.2. Essai de la détermination de la masse volumique absolue du sable.	32
Figure II.3. Essai de détermination de la masse volumique apparente du sable.	32
Figure II.4. Equivalent de sable pour les deux types de sables.	33
Figure II.5. La tamiseuse utilisée.	35

LISTE DES FIGURES

Figure II.6. Courbe granulométrique de sable Lioua.....	36
Figure II.7. Courbe granulométrique de sable Elhajeb.....	37
Figure II.8. Quartz broyé.....	38
Figure II.9. La masse volumique absolue du quartz broyé.....	39
Figure II.10. La poudre de marbre.....	39
Figure II.11. Super plastifiant utilisé.....	41
Figure II.12. Les fibres métalliques.....	41
Figure II.13. Malaxeur électrique utilisé dans la fabrication de BPRF.....	44
Figure II.14. Moules utilisés pour la confection des éprouvettes.....	44
Figure II. 15. Eprouvettes protégées par film Plastique.....	45
Figure II.16. Démoulage des éprouvettes et nomination des éprouvettes.....	46
Figure II.17. Conservation dans l'eau, jusqu'à l'âge de 28 jours.....	46
Figure II.18. les éprouvettes après 28 jours.....	47
Figure II.19. Appareil ultrasons.....	48
Figure II.20. Dispositif de l'essai mécanique de rupture par flexion.....	49
Figure II.21. Dispositif de l'essai de Compression.....	50

Chapitre III: Résultats et discussions

Figure III.1. Histogramme des masses d'éprouvettes prismatiques non Fibrés.....	52
avant/après la conservation dans l'eau (7jours)	
Figure III.2. Histogramme des masses d'éprouvettes Prismatiques non.....	53
Fibrés (Témoin) avant/après la conservation dans l'eau (28jours)	
Figure III.3. Evolution de la vitesse d'onde des différents BPRF (7jours).....	55
Figure III.4. Evolution de la vitesse d'onde des différents BPRF (28jours).....	56
Figure III.5. Effet de variation du Pourcentage de Sable de rivière.....	57
des BPRF étudiés sur la résistance en compression à 7 jours	
Figure III.6. Effet de variation du Pourcentage de Sable de rivière.....	58
des BPRF étudiés sur la résistance en compression à 28 jours	
Figure III.7. Effet de variation de Pourcentages des sables sur la résistance.....	60
en traction par flexion des BPRF avec entaille à 7 jours.	
Figure III.8. Effet de variation de Pourcentages des sables sur.....	60
la résistance en traction par flexion des BPRF avec entaille à 28 jours	

Liste des Tableaux

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : Etude Bibliographique

Tableau I.1 : les différentes classes de béton selon leurs résistances [4] [5].....	5
Tableau 1. 3. Influence de la fumée de silice sur les propriétés des matériaux cimentaires [18].	13
Tableau I.2 : composition chimique et caractéristiques physiques de la fumée de silice [17].	14
Tableau I. 4. Malaxage de BPR fabriqué en laboratoire. [23].....	16
Tableau I.5. Caractéristiques mécaniques des BPR 200 et BPR 800 [1].....	17
Tableau I .6. Caractéristiques mécaniques en compression uniaxiale du BPR [24].....	18
Tableau I. 7. Résistances maximales en compression en fonction du traitement et du dosage en substitution minérale optimaux	20
Tableau I. 8. Principales caractéristiques de durabilité du BPR 200. [40].....	25

Chapitre II : Techniques Expérimentales

Tableau II.1. Résultats l'essai de la masse volumique apparent de ciment.....	31
Tableau II.2. Résultats l'essai de la masse volumique absolue de ciment.....	31
Tableau II.3. Les caractéristiques générales de ciment.....	31
Tableau II.4. Caractéristiques physiques de sable de rivière.....	33
Tableau II.5. Caractéristiques physiques de sable de dune.....	33
Tableau II.6. Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par G. DREUX [47].....	34
Tableau II.7. Analyse granulométrique de sable de rivière Lioua.....	36
Tableau II.8. Analyse granulométrique de sable de dune Elhajib.....	37
Tableau II.9. Analyse chimique du quartz broyé en %.....	38
Tableau II.10. Résultats de la masse volumique apparente de quartz broyé.....	38
Tableau II.11. Les caractéristiques générales de quartz broyé.....	39
Tableau II.12. Analyse chimique de la poudre de marbre.....	40
Tableau II.13. Résultats d'essais de la masse volumique apparente de marbre.....	40
Tableau II.14. Caractéristiques générales de la poudre de marbre.....	40
Tableau II.15. Les caractéristiques des fibres métalliques.....	41
Tableau II.16 : La formulation pour 1 m ³ de BPR.....	42
Tableau II.17. Compositions des mortiers relatifs aux essais de résistances mécaniques.....	42

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.18. Composition de BPRF à base de différents pourcentages et type de sable.....	43
Tableau II.19. La vitesse de propagation des ondes et la qualité du béton [47].....	48
Chapitre III: Résultats et discussions	
Tableau III.1. Récapitulatif des pesées des masses.....	52
des éprouvettes avant et après conservation dans l'eau (7jours)	
Tableau III.2. Récapitulatif des pesées des masses des éprouvettes.....	53
avant et après conservation dans l'eau (28jours)	
Tableau III. 3. Vitesse longitudinale de propagation.....	54
des ultrasons en BPR Témoin (0%F) après 7 jours	
Tableau III. 4. Vitesse longitudinale de propagation.....	54
des ultrasons en BPRF (2% F) après 7 jours	
Tableau III. 5. Vitesse longitudinale de propagation.....	55
des ultrasons en BPR Témoin (0%F) après 28 jours	
Tableau III.6. Vitesse longitudinale de propagation.....	55
des ultrasons en BPRF (2% F) après 28 jours	
Tableau III.7. Résistances moyennes à la compression des BPRF étudiés à 7j.....	57
Tableau III.8. Résistances moyennes à la compression des BPRF étudiés à 28j.....	58
Tableau. III.9. Valeurs de la résistance en traction par flexion.....	59
des différentes formulations 7j	
Tableau. III.10. Valeurs de la résistance en traction des différentes formulations 28j.....	60

Liste des Abréviations

LISTE DES ABRÉVIATIONS

LISTE DES ABRÉVIATIONS

BFUP : Béton fibré ultra haute performant.

BPR : Béton de poudre réactive.

BHP : Béton à haute performance.

BO : Béton ordinaire.

BUHP : Béton ultra haute performance.

BPRF : Béton de poudre réactive fibré.

E/C: Rapport eau / ciment

E/L: Rapport eau / liant

FS : La fumée de silice.

QB : Quartz broyé.

PM : Poudre de marbre

CSH : Silicate de Calcium Hydraté Portlandite

Rc : Résistance en compression

Rf : Résistance en flexion

SR : sable de rivière

SD : sable de dune



Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

De nos jours le béton est devenu le matériau le plus utilisé au monde dans le domaine du génie civil. Les pratiques de l'industrie du béton sont conditionnées par les ressources locales et sont relativement traditionnelles. Cependant, l'industrie du béton est confrontée ces dernières années à des changements importants : utilisation d'adjuvants de plus en plus performants, développement de nouveaux bétons (bétons à ultras hautes performances). Tous ces éléments non exhaustifs ont contribué à accroître son utilisation sur tous les ouvrages et offre à ce matériau la première place dans la construction au niveau mondial.

Le sud Algérien dispose des réserves naturelles importantes renouvelables en sable de dune, caractérisé par une granulométrie fine mais de composition chimique et minéralogique riche en silicium malgré l'abondance ce matériau reste inconnu. Le sable de dune de l'erg occidental occupe 6% de la surface du Sahara Algérien.

Le sable est un matériau indispensable pour la fabrication du béton. Il constitue environ 30% à 40% de toute la masse du béton. Son utilisation permet d'assurer une continuité granulaire nécessaire, entre le ciment et le gravier pour une meilleure cohésion du béton. La demande sans cesse croissante sur les granulats a provoqué un épuisement rapide des sablières, et une exploitation anarchique des sables de mer causant ainsi un grave préjudice à l'équilibre de l'environnement à proximité des plages avec des répercussions directes sur les ressources naturelles (épuisement), l'érosion des berges d'oued et l'avancée de mer sur terres. Les pratiques de l'industrie du béton sont conditionnées par les ressources locales et sont relativement routinières.

Le béton de poudres réactives (BPR) utilise des matériaux à fines particules utiles pour minimiser les vides, de sorte que le béton devienne plus dense et plus résistant, car les matériaux qui composent le BPR sont lisses et interagissent les uns avec les autres. Le poids du BPR produit est plus léger que le béton normal car le BPR n'utilise pas d'agrégats grossiers ni de pierre. Le poids normal du béton varie de 2 320 à 2 400 kg/m³, tandis que les résultats des recherches menées par Richard et Cheyrezy ,1995 [1] indiquent que le béton BPR a un poids compris entre 1 900 et 2 100 kg/m³. Parce qu'il est fabriqué à partir d'agrégats de micro matériaux, le béton fini présente une homogénéité, une compacité et une

INTRODUCTION GENERALE

grande durabilité.

Le BPR contenant des micro matériaux, dont l'un est la silice, est également capable de réagir à des températures plus élevées dans le processus de fabrication, accélérant ainsi l'augmentation de la résistance à la compression du béton. Avec cette série d'avantages, le BPR peut être réalisé avec des sections plus petites et plus fines sans renfort. BPR peut également être utilisé pour la fabrication de préfabriqués architecturaux. Cette étude vise à déterminer les propriétés physiques et mécaniques qui peuvent être obtenues en utilisant du sable de dune et du sable de rivière comme mélange de béton BPR.

L'objectif de ce travail est la mise au point d'un BPRF, en utilisant le sable de dune disponible en quantité soit en phase granulaire unique, ou bien en mélange avec du sable de rivière en différentes proportions, l'objectif étant la détermination de l'influence de ce sable de dune sur les propriétés physiques et mécaniques à l'état frais et durcies des bétons de poudres réactives fibrés.

En résumé, ce mémoire se divise en deux parties, la première partie traite de l'étude bibliographique menée en amont du travail en laboratoire. La deuxième partie est une présentation du travail expérimental mené en laboratoire, Ce mémoire est composé de trois chapitres :

Un premier chapitre : présent une recherche bibliographique sur les différents types de nouveaux bétons, leurs formulations, propriétés, avantages, domaines d'application, les constituants, et leurs caractérisations à l'état frais et durci.

Un deuxième chapitre : aborde les techniques expérimentales utilisées : la caractérisation des matériaux utilisés, la formulation des bétons et la présentation des essais réalisés.

Un troisième chapitre : consacré aux résultats expérimentaux avec la discussion des résultats.

Enfin, ce mémoire se clôture sur une conclusion générale, des recommandations et des perspectives

Chapitre I :
Etude bibliographique

I.1 Introduction

Les Bétons Ultra Fibrés Performants (BFUP) représentent actuellement la famille de matériaux à matrice cimentaire aux propriétés mécaniques et de durabilité les plus exceptionnelles. En outre, leur capacité autoplçante à l'état frais offre une excellente qualité de mise en oeuvre particulièrement adaptée à la préfabrication. Or, malgré leurs caractéristiques et leurs avantages indéniables, certaines spécificités liées à leurs formulations et à leur production rendent leurs coûts prohibitifs et leur bilan carbone peu satisfaisant, ce qui freine leur essor. Leurs applications résident ainsi très souvent, à ce jour, en quelques « niches » pour lesquelles leurs qualités les rendent indispensables.

Les bétons de poudres réactives (BPR) sont des bétons à ultra hautes performances. La compréhension de la durabilité de ces matériaux passe d'abord par la connaissance des processus physico-chimiques communs à tous les bétons, en particulier les réactions chimiques qui sont à l'origine de la formation des composés hydratés.

Dans ce chapitre nous proposons une synthèse bibliographique sur les différents types de bétons, du béton ordinaire aux bétons performants ainsi que leurs principales caractéristiques.

I.2 Le béton ordinaire

I.2.1 Définition

Le béton est le matériau de construction par excellence depuis presque un siècle. Constituer à l'origine de seulement quatre composants (gravillons, sable, ciment et eau), leurs méthodes de formulation ont évolué d'un savoir-faire empirique vers la science des matériaux.

Ces constituants (composants) sont dosés, en fonction de leurs propriétés, de manière à obtenir, après réaction physico-chimique entre eux, un produit solide dont les caractéristiques physiques et mécaniques peuvent être très supérieures à celles des roches les plus résistantes. Dans la mesure où le ciment est un liant hydraulique lui-même fabriqué avec des minéraux naturels, le béton peut être considéré comme une roche artificielle.

Nous abordons dans ce travail un type de béton qui est le béton ordinaire, est un matériau de construction composite constitué d'un mélange de granulats (sable, gravillons) et d'un liant. Le liant appelé ciment, c'est un liant hydraulique.

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.2.2 Historique

Le béton est né du besoin d'avoir un matériau de construction bon marché, malléable au moment de le mettre en place et résistant ensuite.

La forme la plus ancienne du béton remonte à 7000 ans avant JC. Un matériau similaire était connu des égyptiens et des Romains, mais l'essor réel du béton tel qu'on le connaît aujourd'hui est dû à l'anglais Joseph Aspidin qui en 1824 fait breveter le ciment Portland.

Yve Malier [2]. mentionne que Smeaton 1756, Vicat 1818, Apsdin 1825 sont parmi les inventeurs des bétons modernes. Monier et Lambot 1848, Coignet 1852, Hennebique (1880) réalisèrent avec ce matériau les premières constructions en béton armé. Il s'ensuivit un siècle pendant lequel le béton resta un mélange de granulat, de cuissant et d'eau.

I.2.3 Composition du béton

Le béton est un matériau composite constitué de granulats gros et fins (gravier ou pierre concassée, sable), de ciment et d'eau. Le mélange entre le ciment et l'eau forme une pâte qui durcit. La pâte de ciment hydraté et le sable constituent le mortier. Celui-ci à pour rôle de se lier avec les gros granulats pour former un conglomérat solide. Les adjuvants et les additions servent à améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou durci.

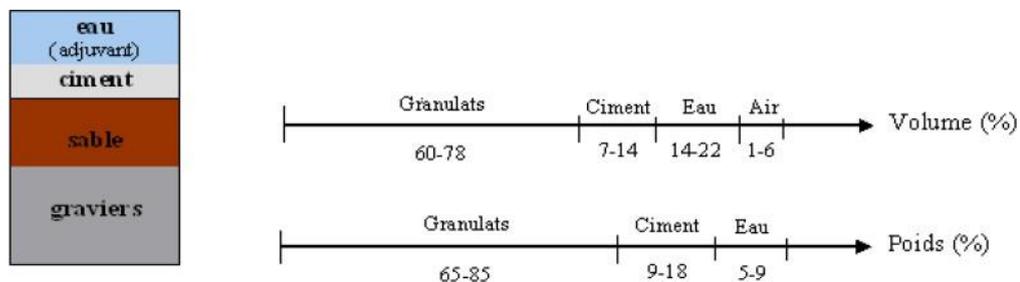


Figure I.1: Constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire [3].

I.2.4 Propriétés du béton

□ **Moulable** : c'est-à-dire qu'on peut lui faire prendre facilement des formes géométriques assez simplement, la grande variété des formes qu'il peut épouser découle de fluidité et sa Maniabilité.

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

□ **Durcit** : avec le temps le béton doit devenir un matériau dur, rigide et relativement indéformable c'est-à-dire mécaniquement résistant.

□ **Compacité** : La résistance à la compression d'un béton contenant suffisamment de liant croît avec sa compacité.

Maniabilité et résistance mécaniques sont deux objectifs contraires :

- Eau en excès bonne maniabilité, mauvaise résistance.
- Granulat roulé bonne maniabilité, mauvaise résistance.
- Granulats concassés mauvaise maniabilité, bonne résistance.

Pour réaliser un béton qui réponde aux deux critères, il faut optimiser tous les facteurs

I.2.5 Classification du béton

Le béton utilisé dans le bâtiment, ainsi que dans les travaux publics comprend plusieurs catégories.

En général le béton peut être classé en trois groupes (norme NF EN 206-1 articles 3.1.7 à 3.1.9), selon sa masse volumique ρ :

Béton léger : ρ entre 800 et 2 000 [kg/m³]

Béton normal : ρ entre 2 000 et 2 600 [kg/m³]

Béton lourd : $\rho > 2600$ [kg/m³]

Le béton peut aussi être classé selon sa résistance mécanique, comme indiquer dans le tableau suivant :

Tableau I.1 : les différentes classes de béton selon leurs résistances [4] [5]

Classes de béton	Résistances
Béton ordinaire	Inférieure a 50 [MPa]
Béton a haute performance	Entre 50 et 80 [MPa]
Béton a très haute performance	Entre 80 et 150 [MPa]
Béton exceptionnel	Supérieure a 150 [MPa]

I. 3 Définition d'un béton à haute performance

Par convention on appelle béton à haute performance (BHP), un béton dont la résistance mécanique moyenne à la compression à l'âge de 28 jours est supérieure à 50MPa sur cylindre et un rapport (Eau efficace/liant équivalent) inférieur à 0,4. Le BHP contient les constituants suivants : des granulats ordinaires, du ciment portland ordinaire, de la fumée de silice, parfois d'autres ajouts minéraux comme des cendres volantes et des adjuvants (fluidifiants).

Les Bétons à Hautes Performances (BHP), sont des matériaux à très haute compacité et haute résistance. Elle est de l'ordre plus de 100 MPa pour les bétons à très hautes performances, voire plus (150 à 200 MPa) pour des bétons fibrés à ultra hautes performances, BFUP.

Hautes performances signifient aussi facilité de mise en oeuvre et souplesse d'adaptation aux contraintes d'exécution des ouvrages. Les BHP ont une porosité extrêmement réduite, plus résistants aux agents agressifs et, de façon générale, présentent une durabilité accrue. Ils présentent une structure très dense, une faible porosité et une très bonne résistance à la pénétration d'agents agressifs.

I.3.1 Historique

Au début des années 1960 dans la région Chicago, les bétons à hautes résistances ont, en quelque sorte, vu le jour et ont commencé à être utilisés en quantité non négligeable dans plusieurs structures majeures [6].

En 1962, un béton de 40MPa est mis en place lors de la construction de l'édifice 1000 en Lake Shore Plana.

En 1965, c'est un béton de 50MPa qui est coulé lors de la construction de l'édifice en Lake Point.

En 1972, la résistance à la compression maximale du béton atteint 60MPa lors de la construction de Mid-Continental Plaza Building.

En 1976, un béton de 75MPa est utilisé pour construire deux colonnes instrumentées dans le River Plaza Projet.

En 1986, un béton de 100MPa été utilisé dans des projets spéciaux à CHICAGO.

En 1988-1989, un béton de 120MPa été utilisé dans la réalisation du Tow-Union Square Building aux USA.

Selon Pierre – Claude Aïtcin , il est possible de fabriquer des bétons de chantier de 150MPa , à condition de pouvoir disposer d'un ciment spécialement conçu à cet effet , de fumée de silice , de granulats particulièrement performants et d'un super plastifiant amélioré qui

n'entraîne pas d'air piégé lorsqu'il utilise un très fort dosage.

Avec quelques ciments Portlands très peu réactifs additionnés de fumée de silice et quelques fluidifiants particulièrement efficaces couplés à des granulats particulièrement performants qu'il est possible de réduire le rapport (E/C) entre 0.20 et 0.25 de bétons à hautes performances ayant un affaissement de 200mm lors de leurs livraisons en chantier. La résistance moyenne en compression de tels bétons peut atteindre 150MPa [7].

I.3.2 Les caractéristiques des BHP

a- A l'état frais

Maniabilité

L'effet lubrifiant des super-plastifiant permet aux particules solides de glisser les unes sur les autres. Le matériau frais se déforme facilement, même sous un effort modéré. Par exemple, dans l'essai au cône d'Abrams, le béton s'étale et présente des affaissements généralement supérieurs à 20 cm.

Fluage et fluidité

Le fluage est particulièrement inférieur à celui d'un béton courant. Le coefficient de fluage, Identique au rapport de la déformation différée sur la déformation instantanée est compris entre 1 et 1.5 pour les BHP tandis qu'il est de 2 pour les bétons.

-En règle générale, un BHP à une fluidité très élevée à l'état frais. Cette caractéristique facilite la mise en œuvre du béton, même dans les zones à densité d'armature élevée.

b- A l'état durcis

Les propriétés physiques

La masse volumique

Généralement la masse volumique d'un BHP est légèrement supérieure à celle d'un Béton Ordinaire. Ceci est dû à la meilleure compacité des BHP.

- Masse Volumique apparente = 2400 à 2500 pour les BHP

- Masse Volumique apparent = 2350 à 2400 pour BO

Durabilité

La porosité et la perméabilité faible de ces bétons améliorent la durabilité et la résistance aux agressions chimiques comme peuvent l'être les bétons marins ou en milieu agressif. Il en est de même pour la résistance au gel. La résistance aux agents agressifs (ions chlore, sulfates, eau de mer, acides...), le faible risque de corrosion des armatures, la forte résistance au cycle gel-dégel ainsi qu'à l'écaillage est autant de propriétés qui qualifient ce béton comme étant « Durable » [8]

□ **Résistance à la compression**

Les bétons sont classés selon leur résistance à la compression à 28 jours. Les bétons hautes Performances ont une grande résistance à la compression.

-Résistance accrue au jeune âge, ce qui permet de réduire le temps de coffrage et d'accélérer la mise en précontrainte. Des délais d'exécution raccourcis sont donc envisageables.

-Une résistance finale accrue après durcissement, ce qui permet de réduire les sections du béton et, donc, la diminution du poids de la construction. [9]

I.3.3 Les avantages des bétons Hautes Performances (BHP)

Les BHP présentent des avantages en comparaison au béton traditionnel :

Résistance élevée à la compression, ce qui permet de réduire les quantités de béton nécessaires.

Résistance élevée à l'état frais, ce qui permet d'augmenter la vitesse des travaux.

La durabilité de ce matériau permet son utilisation dans des environnements hostiles (résistance aux agressions extérieures). La durabilité permet de limiter l'entretien et les frais de maintenance.

I.3.4 Applications des BHP

Les grandes résistances à court termes permettent un décoffrage rapide mais aussi des mises en précontraintes rapides. Ainsi les BHP sont-ils utilisés pour les ouvrages précontraints qu'ils soient préfabriqués ou coulés en place.

Ces propriétés élevées au jeune âge amènent à préconiser l'utilisation de ce BHP pour les ouvrages soumis à de fortes sollicitations (bâtiments de grande hauteur, ponts, réservoirs, centrales nucléaires, etc).

La résistance en milieu agressif conduit à les préconiser pour les travaux en milieu marin ou agressif.

Enfin lorsque le béton doit être pompé sur une grande hauteur, le BHP est recommandé du fait de son ouvrabilité. [8]

I.4 Définition du béton à poudre réactive (BPR)

Les bétons de poudre réactive (BPR) ou les bétons à ultra hautes performances (BUHP) sont apparus en 1995 pour satisfaire aux exigences de résistance tout en conservant une bonne ouvrabilité.

Les bétons à poudre réactives (BPR) constituent une nouvelle famille de matériaux de construction dont la production est similaire à celle des bétons ordinaires. C'est un matériau cimentaire à matrice à ultra haute performance, est caractérisé par une forte teneur en fumée

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

de silice et par un très faible rapport E/C.

C'est un matériau dont les plus gros granulats, en l'occurrence du sable, ont une dimension maximale d'environ 600 μm .

Ces bétons permettent de construire autrement, là où les bétons classiques ne répondent plus aux contraintes exigées techniques et/ou architecturales : grands ouvrages, bétons architecturaux, environnements agressifs, respect du paysage, réparation avec contraintes de poids.

Sans nécessiter d'équipement spécifique pour leur fabrication, ils présentent des qualités exceptionnelles :

- Ils ont un caractère auto plaçant,
 - Ils permettent parfois des temps d'exécution de chantier plus courts,
 - Leurs performances mécaniques autorisent la diminution d'épaisseur et donc du poids des
- Leur durabilité est importante permet de ne pas envisager de coût d'entretien.

La première application mondiale est la passerelle piétonnière de Sherbrooke réalisée en 1997.



Figure I.2. Passerelle piétonnière de Sherbrooke réalisée en 1997.

I .4.1 Les constituants du BPR

I .4.1.1 Le ciment

Les formulations de Béton de poudre réactive se caractérisent par l'emploi d'une grande quantité de ciment allant de 700 kg/m³ jusqu'à plus de 1000 kg/m³. Cette quantité considérable de ciment, à laquelle vient s'ajouter aussi des ultrafines, a pour but de diminuer au maximum les vides, et d'augmenter, par conséquent, la compacité du mélange.

Comme pour le béton classique, le ciment utilisé pour la confection d'un béton BUHP est conforme à la norme NF EN 197-1.

Le choix du ciment est fait à partir de sa classe de résistance, de ses caractéristiques

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

d'hydratation, de l'agressivité du milieu et, d'une façon plus générale, de la composition du béton et de l'usage auquel on le destine. Pour bénéficier pleinement de l'activité pouzzolanique des fines d'addition, on privilégie souvent les ciments sans ajouts (CEM I) par rapport aux ciments avec ajouts.

I.4.1.2 Granulats

I.4.1.2.1 Sable fin

Le sable constitue le plus gros granulats du BPR, sa taille moyenne est inférieure à 600 μm . Un meilleur choix de ce composant garantirait une bonne interface pâte granulat. Ceci faciliterait le contrôle de la rhéologie et améliorerait les performances mécaniques du matériau. En effet, l'utilisation des grains de forme arrondie, présentant une faible adsorption d'eau, favorise la rhéologie du béton.

I.4.1.2.1.1 Les familles de sables

On distingue Trois familles

✚ **Les sables roulés siliceux (0 /2) :** dit ronds, sont issus d'un processus naturel d'érosion. En général, ils sont dragués dans les Oueds. Leur usage est courant depuis des années et est même recommandé. Cependant, les réserves disponibles sont proches de l'épuisement ou protégées par de nouvelles règles environnementales en matière de dragage des Oueds. Ce matériau est donc devenu moins intéressant économiquement.



Figure I.3. Le sable roulé siliceux [10]

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

✚ **Les sables de concassage calcaires** : sont le produit d'un processus industriel contrôlé de concassage, de lavage et de criblage appliqué à des roches calcaires exploitées en carrières, la contrainte du coût de revient élevé, le rends économiquement moins intéressant.

✚ **Le sable de dune** qui s'impose du fait de son abondance dans la nature (Sahara), de son coût d'extraction presque nul, et de sa propreté apparente, constitue la solution au problème d'épuisement des ressources naturelles et se présente comme un matériau d'avenir qui peut remplacer par excellence les deux types de sables suscités .



Figure I.4. le sable de dune [10]

Les dunes existent sous trois formes: [11]

- la barkhane est une dune en forme de croissant, à convexité au vent. Elle naît là où l'apport de sable est faible et sous des vents unidirectionnels (Figure I.5 A) ;
- la dune parabolique est une dune dissymétrique en forme de fer à cheval à concavité au vent souvent plus ou moins fixée par la végétation (Figure I.5 B). Sa disposition par rapport à la direction du vent est donc inverse de celle de la barkhane. La dune parabolique est peu mobile et généralement ne migre guère une fois qu'elle est formée ;
- les siouf ou sif, dunes en forme de sabre, sont des ondulations longitudinales s'amincissant vers une extrémité (Figure I. 5 C).

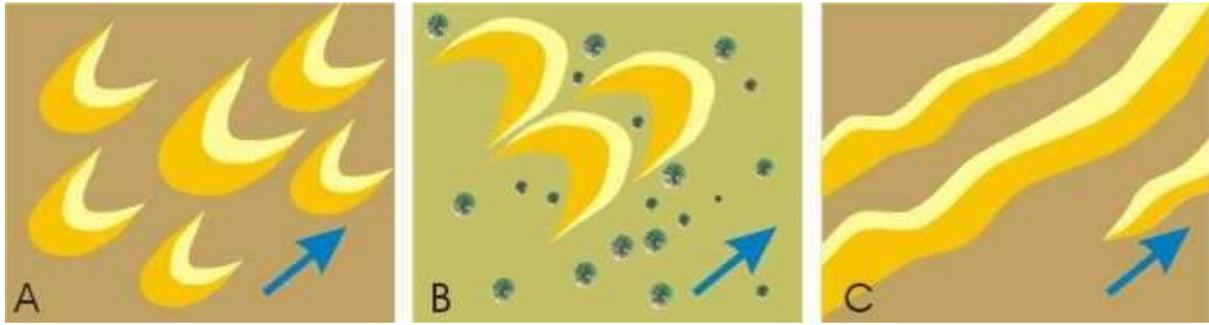


Figure I. 5 :Types de dunes. A: barkhanes ; B: dunes paraboliques ; C: dunes longitudinales.

La flèche bleue indique la direction du vent dominant

Le sable est considéré comme un sédiment détritique meuble composé, en l'absence totale de ciment, de grains jointifs mais libres, dont la taille est comprise entre 64 μm et 2 mm [12]. La valeur de cet intervalle diffère d'ailleurs suivant les auteurs : entre 20 μm et 2 mm pour [13], et entre 50 μm et 5 mm pour [14].

Tout sable connaissant un début de cimentation, aussi faible soit-il, est par convention considéré comme un grès. Le terme sable est en fait très général, la qualification se référant au seul critère granulométrique. C'est ainsi que le terme sable, employé sous qualificatif indiquant l'origine, est impropre. On parle de sable quartzeux lorsqu'il est composé de grains de quartz, de sable calcaire si les éléments constitutifs sont des grains de calcaires, de sable micacés...etc.

Le sable est composé de différents minéraux, tels que la silice, les silicates, les carbonates et les argiles (les silicates sont la famille la plus abondante dans la nature, représentant 90 % en masse de l'écorce terrestre).

I.4.1.2.2 Additions

Conformément à la norme NF EN 206, toutes les additions présentant une finesse supérieure à celle du ciment peuvent être utilisées en substitution d'une partie du ciment. Concernant le BPR, les additions les plus utilisées sont : la fumée de silice, le quartz broyé, et, plus récemment, le métakaolin. Les additions ont trois fonctions essentielles dans la matrice cimentaire du BPR : par effet filler, elles comblent les vides entre les grains de ciment, les fibres et le sable ; elles améliorent la rhéologie du mélange et enfin, elles forment des produits d'hydratation par leur effet pouzzolanique.



Figure I.6. Différents ajouts cimentaires. [15].

+ La fumée de silice

La fumée de silice est un produit minéral amorphe obtenu essentiellement lors de la fabrication du silicium et de ses alliages. Le silicium est obtenu par réduction du quartz en présence de carbone à 2 000 °C dans des fours à arc électrique. Les fumées contiennent du monoxyde gazeux (SiO_2) qui s'oxyde et se condense en particules vitrifiées amorphes extrêmement fines. Ces particules sont lisses et sphériques (100000 billes de fumées recouvrent entièrement un grain de ciment). Leur couleur est le plus souvent gris clair [16].

Tableau I.2 : composition chimique et caractéristiques physiques de la fumée de silice [17].

COMPOSITION CHIMIQUE	(%)	Couleur	Bleu gis
SiO₂	93	Densité	2,22
Al₂O₃	0,59	Masse volumique (kg/m ³)	280 (en vrac)
FeO	0,70	Fuseau granulométrique (µm)	0,04 i 0,28
MgO	0,52	Diamètre moyen (µm)	0,18
CaO	0,51	Surface spécifique théorique (m ² /kg)	20 000
Na₂O	0,17	Surface spécifique, B. E.T. (m ² /kg)	17 500
K₂O	0,59		
S	0,16		
Perte au feu	2,20		

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

✚ Effet de la fumée de silice

Le Tableau I.3 dresse un récapitulatif de l'influence de la fumée de silice sur les propriétés des matériaux cimentaires.

Tableau 1. 3. Influence de la fumée de silice sur les propriétés des matériaux cimentaires [18].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">✓ Accroissement des résistances mécaniques✓ Affinement de la structure poreuse✓ Diminution des coefficients de diffusion✓ Diminution du pH et des concentrations en alcalins de la solution interstitielle	<ul style="list-style-type: none">✓ Allongement du temps de malaxage afin d'assurer une dispersion homogène de la fumée de silice✓ Accroissement de la demande en eau✓ Accroissement du retrait endogène

✚ Le quartz broyé

Le quartz broyé est une poudre, issue de broyage d'un sable très riche en silice ($\text{SiO}_2 > 98\%$), utilisé comme filler (ajout inerte) dans les BPRF non traités thermiquement, il est par contre un ajout nécessaire pour les BPRF traités thermiquement. [19]

✚ Effet de quartz broyé

- ✓ La réduction des résistances en flexion des BPRF renfermant du quartz broyé et traités thermiquement à 150°C.
- ✓ L'amélioration des résistances mécaniques en compression des BPRF traités thermiquement en présence de quartz broyé. [20]

I.4.1.2.3 Les super-plastifiants

Compte tenu des très faibles rapports Eau/Liant des BPR, la quantité d'eau est insuffisante pour obtenir une maniabilité correcte permettant une bonne mise en oeuvre de ces bétons. L'emploi d'adjuvants de la famille des super-plastifiants, généralement hauts réducteurs d'eau, est donc indispensable pour fluidifier le mélange, mais aussi pour disperser les grains. Les super-plastifiants 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 dé flocculer complètement les grains. Ce sont des polymères de synthèse fabriqués spécialement pour l'industrie du béton.

I.4.1.2.4 Fibres

Les fibres sont ajoutées aux bétons pour augmenter la résistance à la traction et apporter un caractère ductile aux bétons fragiles par nature. En général, les fibres métalliques, synthétiques, de verre ou végétales peuvent être incorporées dans le béton. En ce qui concerne les BPR, elles peuvent être de nature métallique ou organique. Certaines fibres organiques permettent également d'augmenter la résistance au feu des BPR.

Généralement, l'impact des fibres sur le comportement à l'état frais des bétons est de nature à augmenter le dosage en liant et en adjuvant pour contrecarrer la perte de fluidité. Le choix se fait en fonction du type d'application visée. En effet, la prénorme matériaux BFR (PR NF P18-470) préconise l'utilisation des fibres métalliques pour les BPR structuraux, et les fibres synthétiques dans le cas de BPR non structuraux.

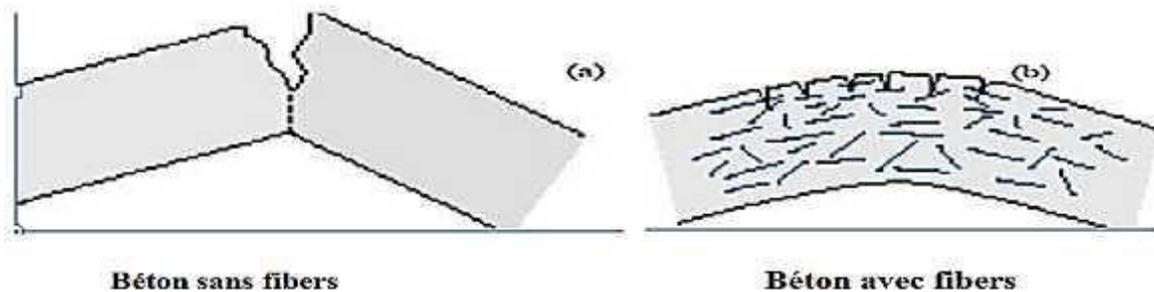


Figure I.7. Fissuration dans le béton sans et avec fibres [21].

I.4.1.2.5 Rapport Eau/Liant

Pour ce qui concerne la teneur en eau, les BP sont obtenus en choisissant un faible rapport Eau/Liant, inférieur à 0,20, dans le but de réduire au maximum la porosité du matériau et la connectivité des pores résiduels.

I.5 Caractérisation et propriétés des BPR

I.5.1 Les Propriétés rhéologiques

La rhéologie des BPR étant fortement liée à la réactivité du ciment utilisé, il apparaît que l'emploi de ciment à faible teneur en C3A et à faible surface spécifique permet d'augmenter l'ouvrabilité des BPR. Selon [22], un ciment CEM I 52,5 conduit à de très bonnes performances rhéologiques et mécaniques. En effet, ce ciment se caractérise par une faible teneur en C3A et un pourcentage en C3S qui favorise le développement de haute résistance mécanique. Cependant, certains ciments CEM I 42,5 peuvent également conduire à des résistances élevées. En pratique, on utilise un rhéomètre, appareil qui sert à étudier les propriétés rhéologiques des substances, pour évaluer le comportement rhéologique des BPR. [22].

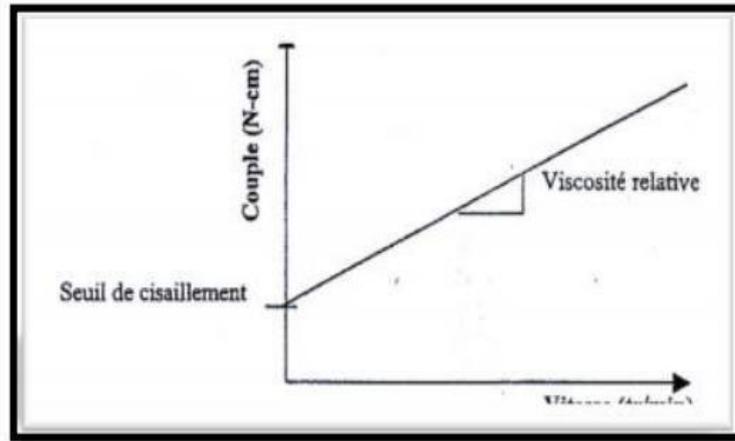


Figure I.8. Représentation du comportement rhéologique des BPR [22].

I .5.2 Malaxage

La durée du malaxage est définie pour chaque formule, à partir des épreuves d'étude et de convenance. La séquence de malaxage proposé par Bonneau pour un BPR mélangé dans un malaxeur classique à faible cisaillement est présentée dans le tableau I.4. Le temps de malaxage peut varier selon le- rapport E/C, le dosage en ciment et en ultrafines et l'efficacité du superplastifiant utilisé. [23].

Tableau I. 4. Malaxage de BPR fabriqué en laboratoire. [23]

2 min	Homogénéisation des matériaux secs
3 min	Ajout de l'eau et de la moitié du super-plastifiant
4 min	Ajout de l'autre moitié super-plastifiant malaxage à grande vitesse.
1 min	Ajout des fibres et fin de mélange simultanée.

I .5.3 Performances mécaniques

I .5.3.1 Résistance en compression et module d'élasticité

Richard et Cheyrezy [1] étaient les premiers à travailler sur les propriétés mécaniques des BPR. Ils ont fabriqué des BPR 200 et BPR 800 dont le rapport E/C variait de 0,15 à 0,19. Dans cette étude les auteurs se sont intéressés à l'influence du pressage (avant et pendant la prise) et de l'ajout des fibres sur la résistance en compression des bétons. En effet le pressage diminue la compacité en évacuant l'eau libre résiduelle. La (Figure I.9) montre l'évolution de la résistance en compression en fonction de la densité relative (rapport des densités de la pâte de béton au démoulage sur la densité des poudres sèches introduites supposées compactes).

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

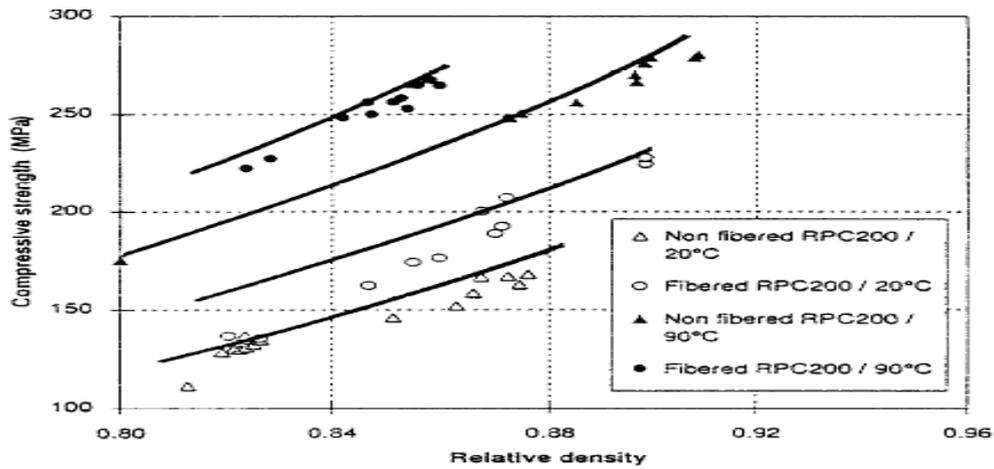


Figure I.9. Enveloppe de meilleures résistances obtenues pour différentes densités relatives [1].

Les caractéristiques mécaniques mesurées des échantillons sont résumées dans le (Tableau I.5) ci-dessous. On note que la combinaison « pressage-traitement thermique » augmente remarquablement les propriétés mécaniques du matériau.

Tableau I.5. Caractéristiques mécaniques des BPR 200 et BPR 800 [1].

	BPR 200	BPR 800	
Pressage avant prise (MPa)	aucun	50	
Traitement thermique (°C)	20 à 90	250 à 400	
Résistance en compression (MPa)	170 à 230	Avec sable quartzeux	490 à 680
		Avec fibres	650 à 810
Module d'Young (MPa)	50000 à 60000	65000 à 75000	

Un an après, Dugat et al. [24] ont fabriqué en laboratoire des BPR 200 de rapport E/C = 0,15 et des BPR 800 de rapport E/C = 0,14 dont les caractéristiques mécaniques sont présentées dans le Tableau I. 6.

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau I .6. Caractéristiques mécaniques en compression uniaxiale du BPR [24].

BPR	BPR 200	BPR 800
Traitement thermique (°C)	90	90 à 260 avec pressage de 60 MPa
Résistance en compression f_c (MPa)	194-203	420-520
Module d'Young statique E_c (MPa)	62000-66000	63000-74000
Module d'Young dynamique E_{dyn} (MPa)	59000-61000	32000-36000
Coefficient de Poisson statique	0,22-0,24	0,19-0,28
Coefficient de Poisson dynamique	0,22-0,24	-
Limite d'élasticité linéaire en 60% de la résistance ultime		-

Les figures (Figure I.10) et (Figure I.11) présentent respectivement les courbes contraintes déformations d'un essai de compression des BPR 200 et des BPR 800. A part les valeurs élevées des contraintes, les BPR 800 présentent un comportement différent (non linéaire) de celui du BPR 200.

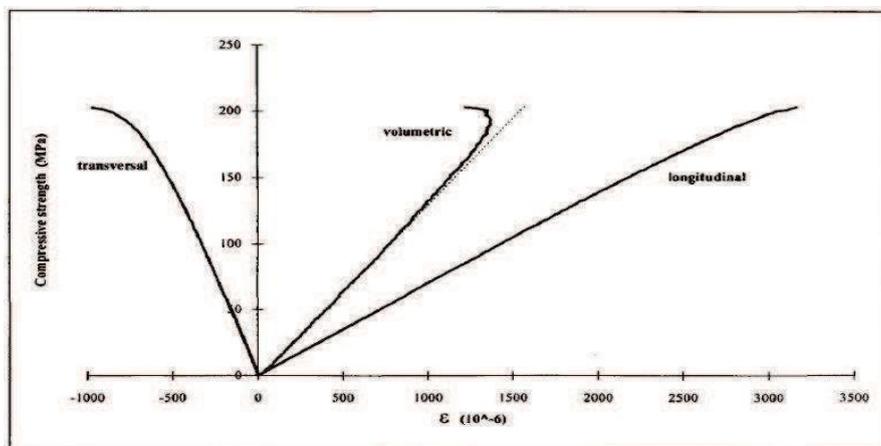


Figure I.10. Courbe contrainte déformation du BPR200 en compression [24].

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

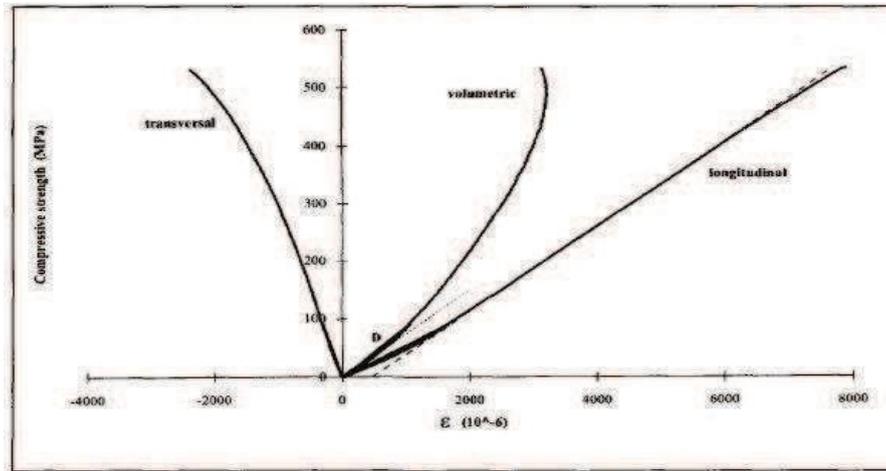


Figure I .11. Courbe contrainte déformation du BPR800 en compression [24].

En 1999, Matte [25] s'est aussi intéressée à la résistance en compression des BPR dont le rapport E/C était de 0,15 et 0,22. Après traitement thermique, elle a observé que le BPR à base de quartz et de fibres métalliques pourrait atteindre une résistance à la compression de 500 MPa. Cette résistance est à 200-300 MPa pour les BPR sans quartz ni fibres.

En 2002, Schachinger [26] a étudié l'influence de la fumée de silice et du laitier sur les propriétés mécaniques des BPR non fibrés dont le rapport E/C varie de 0,2 à 0,33. Il a mesuré une résistance à la compression, à 28 jours, de 171 MPa et 148 MPa pour un béton à base de ciment sans laitier et avec laitier, respectivement.

Les modules d'Young mesurés (Figure I .12) mettent en évidence la réaction à long terme de ciment à base de laitier

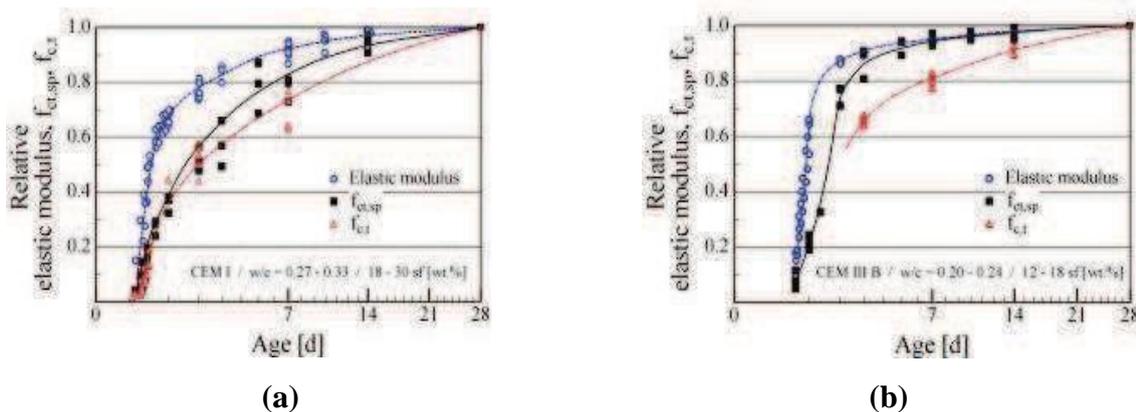


Figure I.12. Développement des propriétés mécaniques de ciment Portland (a) et du ciment à base de laitier (b) [26].

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

En 2007, Yazici [27] a travaillé sur l'influence du laitier, de cendres volantes et de la cure sur la résistance à la compression des BPR ($E/L = 0,13$). Les essais ont été réalisés sur des éprouvettes cubiques de 50 mm de côté. 12 h après leur fabrication, les échantillons ont été démoulés et ont subi un traitement thermique.

Le (Tableau I .7) résume les valeurs maximales de la résistance en compression ainsi que le traitement appliqué et le dosage optimal en substitution minérale du ciment correspondants.

Tableau I. 7. Résistances maximales en compression en fonction du traitement et du dosage en substitution minérale optimaux

	Traitement			f^{maxc} (MPa)	Dosage optimal (%)
	Thermique (°C)	Confinement (MPa)	Durée		
Cendres volantes	Non	Non	Non	125	40
	90	Non	12j	160	40
	210	2	8h	170	0 à 40
Laitier	Non	Non	Non	120	40
	90	Non	12	158	40
	210	2	8h	185	40

Un an plus tard, Yazici et al. [28] se sont intéressés à l'effet de la fumée desilice sur la résistance à la compression des bétons avec pressage de rapport E/L variant de 0,13 à 0,16. Ils ont montré que l'ajout de fumée de silice améliore les performances mécaniques des bétons (Figure I .13). En effet, la résistance en compression passe de 234 à 262 MPa en augmentant le dosage en fumée de silice de 22 à 35 %.

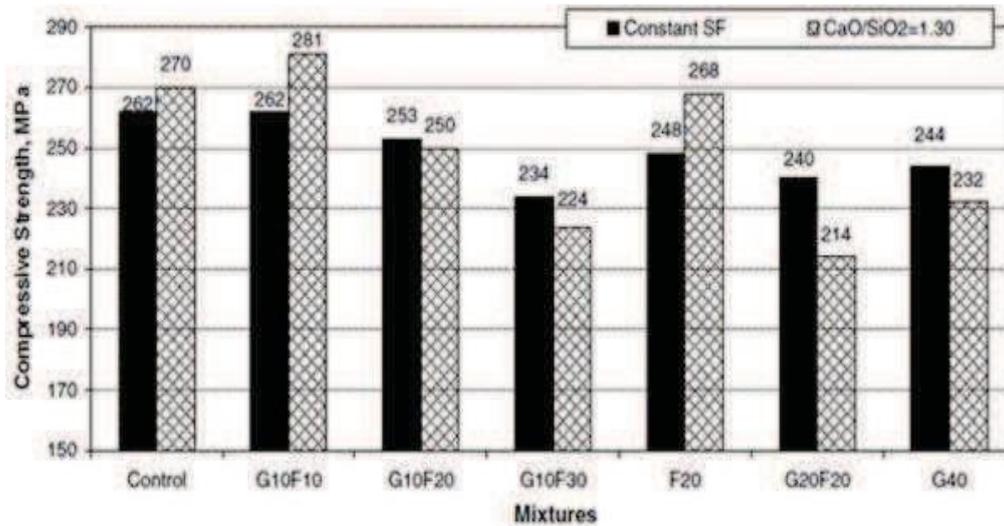


Figure I.13. Influence du dosage en fumée de silice sur la résistance en compression [28].

I .5.3.2 Résistance en traction

✚ Traction directe

Généralement, cette résistance est liée au dosage en fibres ainsi qu'à leur orientation. En effet, Adeline [29] a montré trois types de comportements (Figure I. 14) des éprouvettes ($E/C = 0,2$) sollicitées en traction directe. Le type I est caractéristique d'un BPR contenant un faible dosage en fibres. Les types II et III caractérisent un BPR contenant des fibres moyennement et bien orientées, respectivement.

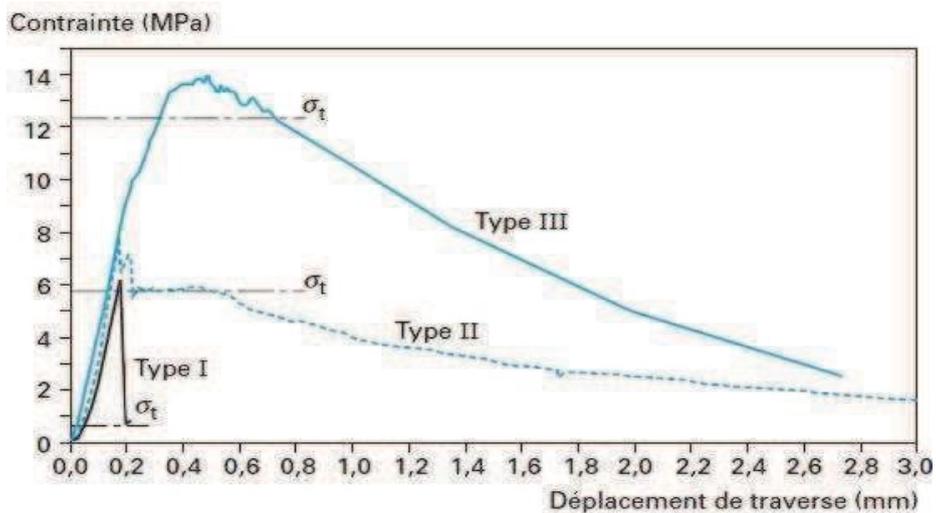


Figure I .14. Comportement du BPR en traction directe [29].

✚ Traction par flexion

Richard et Cheyrezy [1] ont mesuré les résistances en flexion des BPR 200 et BPR 800, présentées précédemment (Tableau 2). Ces résistances varient entre 30 et 60 MPa pour le BPR 200, et entre 45 et 141 MPa pour le BPR 800.

En 1996, Dugat et al. [24] ont mesuré une résistance en flexion d'une éprouvette 4x4x16 d'un BPR 200 de 32 MPa. Dans son rapport, l'équipe de Lafarge [30] a rapporté une résistance en flexion de 48 MPa pour un matériau Ductal.

✚ Traction par fendage

Schachinger et al. [26] ont réalisé des essais de traction par fendage sur des éprouvettes cylindriques 50 x 100 mm pour divers dosages en fumée de silice. La (Figure I.15) montre qu'on pouvait atteindre 14 MPa à 28j pour des bétons non fibrés et sans traitement thermique.

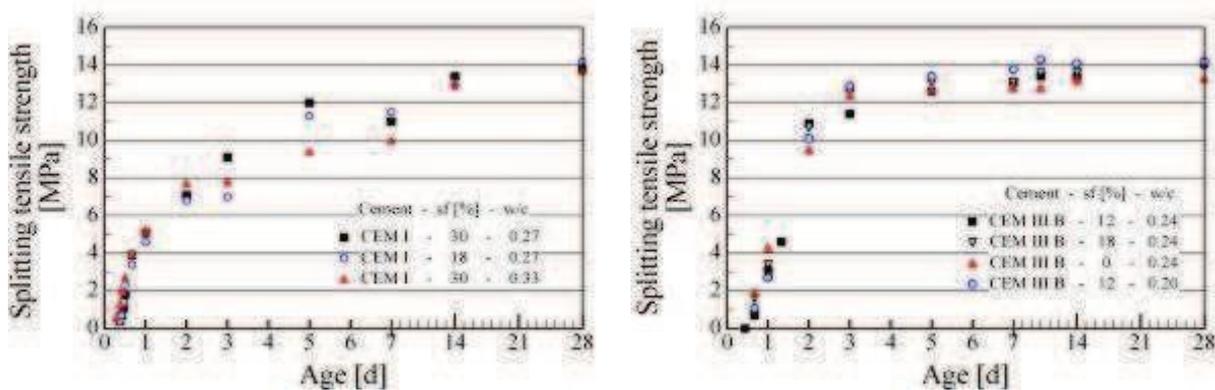


Figure I. 15. Résistance en traction en fonction du rapport E/C et du dosage en fumée de silice [26].

I.5.3.3 Durabilité

I.5.3.3.1 Porosité

Plusieurs chercheurs se sont intéressés aux propriétés physiques des BPR, notamment la porosité et la distribution poreuse, qui régissent généralement le transfert de matière à travers le réseau poreux du matériau.

Cheyrezy et al. [31] étaient parmi les premiers à travailler sur la porosité des BPR. Ces derniers ont mesuré, à l'aide d'un essai d'intrusion de mercure, une porosité de 7% et un pic à 70 nm, pour un BPR non traité thermiquement et dont le rapport Eau / Liant était voisin de 0,12. Pour ce même rapport E/L, Feylessoufi et al. [32] ont détecté un pic à 2,5 nm, pour des BPR traités thermiquement.

En 1997, Delagrave et al. [33], on travaillé sur la porosité des mortiers de rapport E/C

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

de 0,25. Trois formulations ont été étudiées : $M25-0$, $M25-30$ et $M25-50$ avec un volume de sable de 0, 30 et 50%, respectivement. Les échantillons ont été conservés 3 mois dans l'eau avant de mesurer leurs porosités totales au mercure. Les porosités mesurées étaient de 8,5, 7,2 et 8,0%, pour $M25-0$, $M25-30$ et $M25-50$, respectivement. La distribution poreuse de leurs échantillons a montré un pic autour de 10 μm .

Un an plus tard (en 1998), ces mêmes auteurs, ont travaillé sur des mortiers à base de fumée de silice. Ils ont mesuré une diminution de la porosité totale au mercure de 9,2%, pour un mortier contenant 6% de fumée de silice et 50% de sable ($M25-(FS)-50$), à 4%, pour une pâte de ciment contenant 6% de fumée de silice ($M25-(FS)-0$).

Matte [25] s'est aussi intéressée, dans le cadre de sa thèse, à la porosité au mercure des BPR avec des rapports E/C plus faibles et traités thermiquement. Trois bétons ont été formulés, à base du quartz et fumée de silice. Ces échantillons ont subi une cure humide de 24 h à 90°C, puis à l'air sec pendant, également, 24 h à 90°C. Les porosités mesurées étaient de 6, 6 et 7% pour des bétons de rapport E/C de 0,18, 0,21 et 0,24, respectivement. La distribution poreuse des échantillons a montré la disparition du pic avec l'ajout de fumée de silice et le traitement thermique des échantillons.

Loukili et al. [34] ont étudié la distribution poreuse d'un béton ultra haute performance fibré (E/C = 0,2). Ils ont montré un pic à 30 nm à 1 jour. Ce pic se déplace à 20 nm à partir de 7 jours (Figure I. 16). Ce déplacement a été attribué à la réaction pouzzolanique de la fumée de silice.

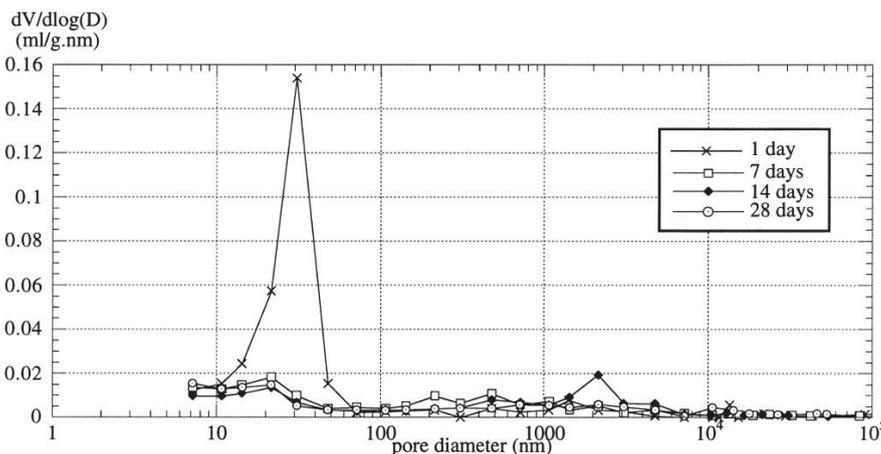


Figure I.16. Distribution poreuse d'un béton ultra haute performance [34].

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

En 2002, Vernet [35] a rapporté des valeurs de porosité à l'eau entre 1,6 et 6% pour des bétons à ultra haute performance.

En 2007, Charron et al. [36] ont montré qu'on pouvait atteindre des valeurs de porosité très faibles en rajoutant des fibres. Leurs échantillons ont subi une cure humide pendant 28 jours, trois jours après leur démoulage. La porosité au mercure mesurée est de 4,2% pour un béton de rapport E/C = 0,157.

Cwirzen et al. [37] ont étudié la distribution poreuse d'un béton de rapport E/C = 0,22. Ils ont montré, que sans traitement thermique (courbe en gras, continue), le pic est autour de 10 nm (Figure I.17)

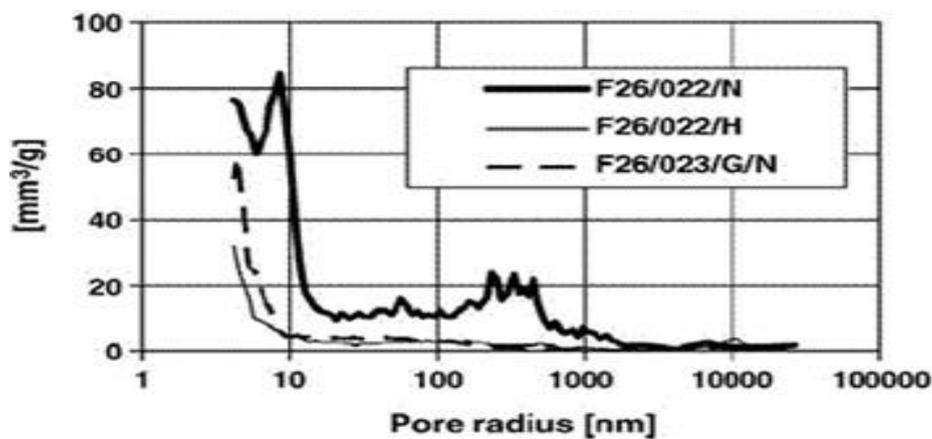


Figure I.17. Distribution poreuse d'un béton avec et sans traitement thermique [37].

Récemment, une étude a été menée sur le béton ultra performant, fibrés ou non, à base de fumée de silice et de métakaolin. Dans le cadre de cette étude, [38] a mesuré une porosité à l'eau de 6,1% pour un béton à base de fumée de silice, sans fibres, de rapport E/C = 0,27.

Quelques mois plus tard, Carcasses [39] a présenté une porosité à l'eau de 1,5 à 5 % pour un BFUP. La distribution poreuse de ce type de bétons montre un pic autour de 10 nm.

I.5.3.3.2 Perméabilité, Résistance au gel-dégel et Abrasion

La très faible porosité et l'absence d'eau libre dans les pores capillaires ont une influence directe sur les caractéristiques de perméabilité à l'air, de résistance au gel-dégel et de résistance à l'abrasion (tableau I.8).

Le BPR est plus résistant au gel-dégel qu'un BHP à air entraîné spécialement formulé à cet effet, et trois fois plus résistant à l'abrasion qu'un béton classique (suivant l'essai CNR). [40].

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau I. 8. Principales caractéristiques de durabilité du BPR 200. [40]

Porosité	< 2 %
Perméabilité à l'azote	1 à 5 10-20 m ²
Gel-dégel :	
module résiduel après 300 cycles	100 %
perte de masse après 300 cycles	< 10 g/cm ²
Abrasion (coefficient CNR)	1.3
Carbonatation :	
- constante de carbonatation K_c	0.1 mm/an ^{0.5}
- pénétration sur 15 mm	> 12 000 ans
Corrosion :	
coefficient de diffusion apparentcoefficient de diffusion effectif	Non mesurable 0.02

I .5.3.3.3 Résistance à la corrosion

Trois processus peuvent potentiellement être à l'origine de la corrosion dans le BPR :

-la pénétration d'ions chlore.

-la carbonatation.

-la propagation de la corrosion des fibres métalliques à partir de la surface.

Des essais de diffusion et de migration accélérée des ions chlores ont montré une parfaite imperméabilité du BPR à ces agents.

La carbonatation est insignifiante. Enfin, le réseau de fibres n'étant pas continu, la corrosion ne peut se propager aux fibres incluses dans la masse [41].

I .5.3.3.4 La résistance aux agents agressifs

La résistance 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 évaluée à partir d'essais de flexion 3 points sur des échantillons conservés pendant 12 mois en permanence dans ces solutions

agressives. Elle se concrétise par une baisse de 5 à 25 % des performances par rapport au matériau sain. [23].

I.5.3.3.5 Résistance au feu

Compte tenu de sa très faible porosité, le BPR ne présente pas une aussi bonne résistance au feu que les bétons traditionnels. Sans traitement particulier, il présente une tenue au feu d'environ 15 min. Une formulation particulière peut être utilisée qui porte cette valeur à 60 min pour une structure non chargée et à 30 min pour une structure chargée. Pour obtenir une tenue aux feux supérieurs anti-feu additionnels. [40].

I.5.3.4 Microstructure des BPR

Le dosage en eau est inférieur à celui nécessaire pour l'hydratation complète du ciment. Les BFUP possèdent ainsi une réserve de ciment anhydre qui leur procure un potentiel d'auto cicatrisation en cas de fissuration. L'eau pénétrant éventuellement par les fissures va permettre la formation d'hydrates au sein des microfissures en réagissant avec les grains de clinker résiduel. Ce phénomène constitue un atout particulièrement intéressant en termes de durabilité pour ce matériau. [42]. Il est également d'usage de faire subir aux BPR un traitement thermique visant à améliorer la microstructure en activant la réaction pouzzolanique. En effet ce traitement permettrait de reconstituer des chaînes C-S-H plus longues [43]. Ceci est attribué à l'hydratation rapide et à l'accélération de réaction pouzzolanique du quartz broyé [44].

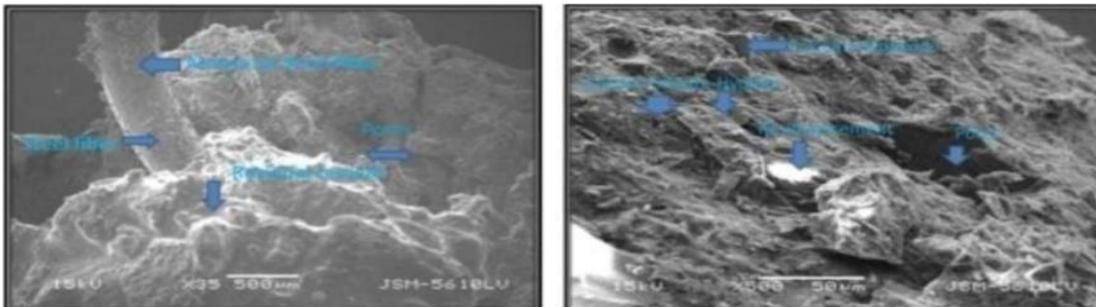


Figure I. 18. Microstructure de BPR après 1 jour. **Figure I .19.** Microstructure de BPR après 7 jours. [42].

I.6 domaine d'application des BPR

Les caractéristiques du BPR en font un matériau unique avec des possibilités d'utilisation dans une large gamme d'applications structurelles et non structurelles en raison de sa résistance supérieure et de son excellente durabilité. Ses applications dépassent alors le simple cadre du bâtiment et du génie civil.

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

• Génie civil et bâtiment

- structures triangulées : la passerelle de Sherbrooke est une structure triangulée de 60 m de portée. Elle illustre un des modes d'emploi du BPR
- poutres et poutrelles légères ;
- poteaux confinés ;
- dalles de ponts mixtes ;
- panneaux de façade ;
- voussoirs de tunnels.

•Industrie

- bâtis pour machines-outils ;
- dalles d'usure ;
- pièces pour l'emboutissage.

•Traitement des déchets. Environnement

- container pour le stockage de déchets radioactifs ;
- dalles filtres pour l'épuration des eaux usées ;
- coulis de blocage de déchets.

•Protection. Sécurité

- blindages légers
- coffres-forts. [45].



Figure I.20. Différent éléments structurels en BPR. [46].

Les nombreuses qualités des BFUP, permettent d'envisager une multitude d'applications aussi bien en structure de génie civil (poutres précontraintes par pré ou post tension, canalisations, conteneurs, ouvrages offshore, couvertures de grande portée, silos, réservoirs, cuves de rétention, tours de refroidissement, murs de soutènement, dalles, structures triangulées, voussoirs de tunnels, etc.) qu'en bâtiment (poutres, poteaux élancés, planchers de

grande portée, etc.) et leur utilisation dans des applications innovantes jusque-là inaccessibles au matériau béton et réservées à d'autres matériaux .

I.7. Les avantages et les inconvénients des Béton de Poudres Réactive (BPR)

I.7.1 Les avantage de BPR

Le BPR répond plus particulièrement aux exigences suivantes :

- Durabilité et durée de vie allongée.
- Meilleure performance aux chocs et à l'abrasion.
- Délai rapide et temps d'arrêt de la circulation minimal.
- Construction l'hiver par la résistance au gel dégel et ;
- Performance sismique grâce à ses propriétés de ductilité
- Impact minimal sur l'environnement.
- Finitions personnalisées, aspect élancé.
- Une durée de vie optimisée pour les décennies.
- Un excellent choix pour la fabrication d'éléments structurels durables et nécessitant peu d'entretien. [23].

I.7.2 Les inconvénients de BPR

- le cout des constituants sont très chère surtout quand on utilise les matériaux (fumées de silice).
- l'obligation de main d'ouvre qualifier.
- l'obligation de vérifier la formulation de BPR avant de malaxage pour chaque dosage.
- L'obligation l'existence de matériel qualifier (le broyeur).
- Le prix d'un mètre cube de BPR mis en place est 10 à 12 fois plus cher que le béton ordinaire ou à hautes performances.

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons effectué une revue bibliographique des travaux consacrés aux BPR Cette partie est destinée particulièrement à la description des BPR, qui un béton de type haute performance. Dans lequel nous avons collecté des informations sur le béton de poudre réactive : son historique, évolution, définition..., domaines d'application.

Donc une généralité bibliographique globale pour cette nouvelle génération de béton.

Après une présentation générale du matériau "béton", ainsi que ses propriétés requises au point de vue mécanique, rhéologique et durabilité, nous nous sommes intéressés aux évolutions apportées à ce matériau depuis une trentaine d'années, qui ont notamment conduit à la mise au point des BHP et plus récemment les BPR. Ces

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

nouveaux bétons, apparus en 1995, ont un coût élevé, qui peut néanmoins être compensé par leurs performances exceptionnelles.

Chapitre II:
Techniques expérimental

CHAPITRE II : TECHNIQUES EXPERIMENTAL

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les caractéristiques des matériaux utilisés au cours du travail pratique effectué au niveau de laboratoire, de Génie Civil Université de Biskra pour la confection d'un béton de poudre réactive fibré à base de fibres «métalliques ». Il sera aussi présenté, le travail de sélection des constituants ainsi que leur utilisation, dans le but d'obtenir les meilleurs résultats en matière de résistance. Il sera étudié par ailleurs, l'effet du mélange et de variation des pourcentages de sable sur les caractéristiques de BPRF.

L'objectif général de cette étude est d'évaluer le comportement mécanique des diverses formulations fibrées et non fibrées. Ainsi, les objectifs de l'étude sont :

- Évaluer le comportement mécanique (Résistance) des différentes formulations de BPRF.
- Évaluer l'influence de la variation de l'un des paramètres constitutifs du béton (Variation de la nature et de quantité de sable) sur le comportement et la performance des éprouvettes fibrée avec des fibres métalliques .
- Faire une étude comparative du comportement mécanique de compression des différentes formulations

II.2. Matériaux utilisés

Dans notre étude, nous avons utilisé des matériaux naturels locaux, ciment, sable, quartz broyé, poudre de marbre, superplastifiant, eau et des fibres métalliques.

II 2.1. Le ciment Portland

Nous avons effectué nos travaux de formulation des BPR avec un ciment composé de classe 42,5 MPa du Type CEM I. produit par la cimenterie Biskria (Spa Biskria Ciment).



Figure II .1. Ciment utilisé.

Les caractéristiques physiques du ciment utilisées sont présentées dans les tableaux suivants:

✚ La masse volumique apparente

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du

CHAPITRE II : TECHNIQUES EXPERIMENTAL

matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

Tableau II.1. Résultats l'essai de la masse volumique apparent de ciment

	M1 (g)	M2 (g)	ρ_c (g/cm ³)
Essai	294.48	1308.98	1.01

✚ La masse volumique absolue (Méthode du pycnomètre)

Tableau II.2. Résultats l'essai de la masse volumique absolue de ciment

	M1 (g)	M2 (g)	M3 (g)	M4 (g)	M5 (g)	Vpycn (cm ³)	ρ_t (g/cm ³)	Mt (g)	Vc (cm ³)	ρ_c (g/cm ³)
Essai	54.65	154.18	133.29	25	134.31	99.75	0.788	23.98	30.43	0.82

Tableau II.3. Les caractéristiques générales de ciment sont :

Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.01
Masse volumique absolue (g/cm ³)	0.82

II.2.2 Le Sable

Nous avons utilisé dans cette étude deux types de sable. Un sable local de Rivière (SR) ou Sable d'OUED provenant de Lioua, et un sable fin siliceux de Dune (SD) de la région de Elhajeb. Avant utilisation, ces sables ont été lavés afin de réduire les impuretés puis séchés à l'étuve à température 105 °C pendant 24heurs puis tamisé.

II.2.2.1 Masse volumique absolue : selon la Norme [NFP 18-301]

Cet essai est défini comme étant la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat sans tenir compte des vides pouvant exister entre les grains. La masse volumique absolue se détermine par la formule suivante :

Avec :

ρ_s : Masse volumique absolue

M: Masse des grains solides

V1 : Volume de l'eau ;

V2 : Volume total (grains solide + eau).



Figure II.2. Essai de la détermination de la masse volumique absolue du sable.

II.2.2.2 Masse volumique apparente : Selon la Norme [NFP 18-554]

La masse volumique apparente est définie comme étant la masse de l'unité de volume apparente du corps, c'est-à-dire celle du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient. On détermine la masse volumique apparente par la formule suivante :

Avec

V : Volume du récipient

M0 : Masse du récipient propre et vide

M1 : Masse du récipient rempli



Figure II.3. Essai de détermination de la masse volumique apparente du sable

II.2.2.3 Equivalent de sable : Selon la Norme [NFP 18-598]

Cet essai permet de mesurer la propreté du sable. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel

CHAPITRE II : TECHNIQUES EXPERIMENTAL

volumétrie entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent.

La valeur de l'équivalent de sable (ES) est le rapport multiple par 100, de la hauteur de la partie sableuse sédimentée sur la hauteur totale du floculat.

La formule qui nous permis la détermination de l'équivalent de sable est :

Avec :

- Hauteur h1 : sable propre +élément fins,
- Hauteur h2 : sable propre seulement.



Figure II.4. Equivalent de sable pour les deux types de sables

✚ Sable de Rivière (Lioua)

Tableau II.4. Caractéristiques physiques de sable de rivière

Caractéristique	Résultats	Unité
Masse Volumique apparente	1.56	[gr/cm ³]
Masse Volumique absolue	2.60	[gr/cm ³]
Equivalent de Sable (NF EN 933-8)	91.01	[%]

✚ Sable de Dune (Elhajeb):

Tableau II.5. Caractéristiques physiques de sable de dune

Caractéristique	Résultats	Unité
Masse Volumique apparente	1.50	[gr/cm ³]
Masse Volumique absolue	2.61	[gr/cm ³]
Equivalent de Sable (NF EN 933-8)	94.74	[%]

CHAPITRE II : TECHNIQUES EXPERIMENTAL

✚ Interprétation

La masse volumique absolue théorique varie dans l'intervalle de [2.60 -2.61] (gr /cm³)
Notre cas, pour les deux sables (2.60 gr/cm³ - 2 .61 gr/ cm³) fait partis de l'intervalle théorique des masses volumiques absolue des sables.

En se référant aux valeurs données par Dreux pour l'équivalent de Sable :

Tableau II.6. Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par G. DREUX [47].

Es au piston	Nature et qualité du sable
ES<60%	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité ou vérification plus précise de la nature des fines par un essai au bleu de méthylène.
60%≤ES<70%	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n a pas de conséquence notable sur la qualité du béton.
70%≤ES<80%	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
ES >90%	Sable très propre. L'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

✚ Nous pouvons classier

Sable de dune et sable de rivière : dont ES>80 : Sable très Propre avec une absence presque totale de fines argileuses risquant d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau ou en utilisant un super plastifiant en importante quantité.

✚ Remarques

-Dans cette étude nous avons utilisé des sables lavés pour réduire les impuretés puis séchés à l'étuve à température 105 °C pendant 24heurs.

- Après l'essai de l'équivalent de sable, nous avons constaté qu'il s'agissait bien des sables propres donc il convient très bien pour la composition de notre BPRF.

II.2.2.4 Analyse granulométrique par tamisage NF EN933-1

✚ But de l'essai

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la grosseur et les pourcentages respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon et spécifier les vides dans

CHAPITRE II : TECHNIQUES EXPERIMENTAL

l'échantillon et déduire le module de finesse.

✚ Préparation de l'échantillon pour l'essai

L'analyse granulométrique des granulats est déterminée selon la norme NF P 18-560[110], elle a été réalisée par voie sèche. L'échantillon de masse M ($200D < M < 600D$) préalablement séché dans une étuve ($105 \pm 5^\circ\text{C}$) est tamisé à travers une série de tamis qui correspond pour chaque cas de granulat suivant :

✚ Mode opératoire

- Prendre un échantillon lavée et séché de sable $M=2000\text{g}$.
- Peser chaque tamis à vide.
- Monter la colonne de tamis par l'emboîtement des tamis, en les classant de haut en bas dans l'ordre démailles décroissantes : 5-2,5-1,25-0,63-0,315-0,16 -0,08 mm,
- Ajouter un fond pour recueillir les éléments passant au dernier tamis un couvercle pour éviter la dispersion des poussières.
- Verser le matériau (sable sec) sur la colonne de tamis et la fixer soigneusement sur la machine d'agitation mécanique, agité pendant 10 minutes



Figure II.5. La tamiseuse utilisée.

- Arrêter l'agitateur, puis séparer avec soin les différents tamis.
- peser des échantillons obtenus dans chaque tamis.

Les résultats de l'analyse granulométrique de sable sont représenté dans le tableau suivant :

CHAPITRE II : TECHNIQUES EXPERIMENTAL

Tableau II.7. Analyse granulométrique de sable de rivière Lioua

Diamètre des tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât Cumulés (%)
		(g)	(%)	
5	0.97	0.97	0.0485	99.951
2.5	312.94	313.91	15.695	84.305
1.25	174.20	488.11	24.305	75.695
0.63	199.34	687.45	34.372	65.628
0.315	656.92	1344.37	67.21	32.781
0.16	416.07	1760.44	88.02	11.978
0.08	199.37	1959.81	97.99	2.01
Le fond	39.46	1999.27	99.96	0.04

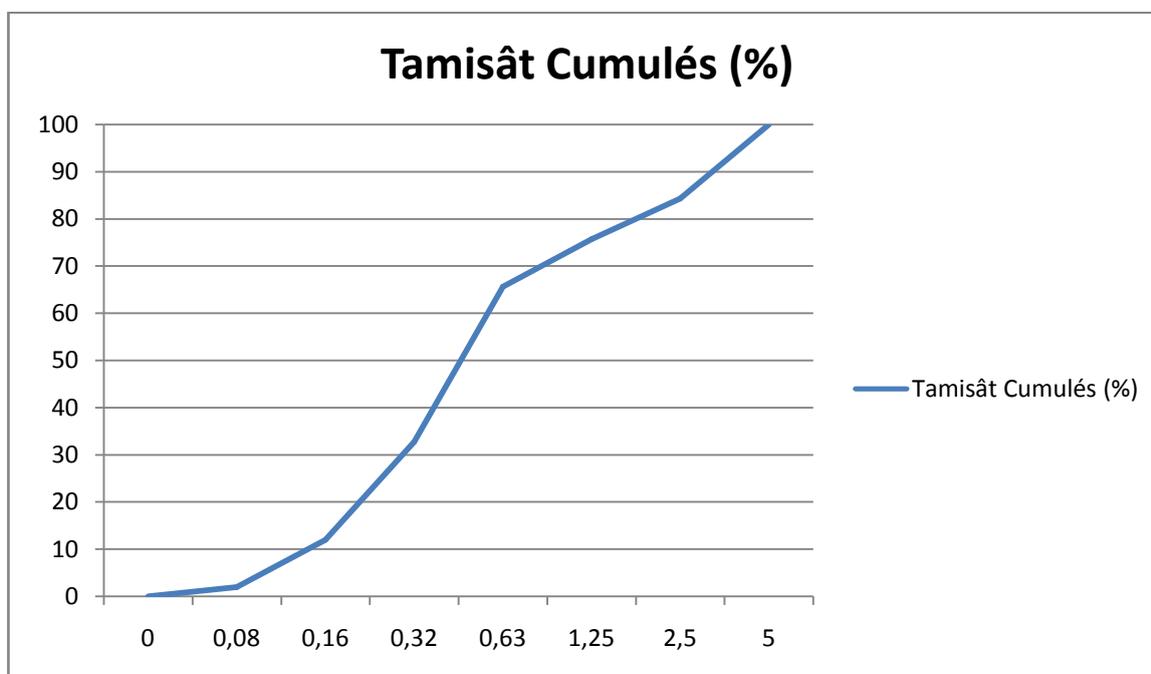


Figure II.6. Courbe granulométrique de sable lioua.

CHAPITRE II : TECHNIQUES EXPERIMENTAL

Tableau II.8. Analyse granulométrique de sable de dune Elhajeb

Diamètre des tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés		Tamisât cumulés (%)
		(g)	(%)	
5	0	0	0	100
2.5	0	0	0	100
1.25	0	0	0	100
0.63	0	0	0	100
0.315	429.63	429.63	21.4815	78.5185
0.16	1515.89	1945.52	97.276	2.724
0.08	51.8	1997.32	99.866	0.134
Le fond	2.69	2000.01	100.000	0

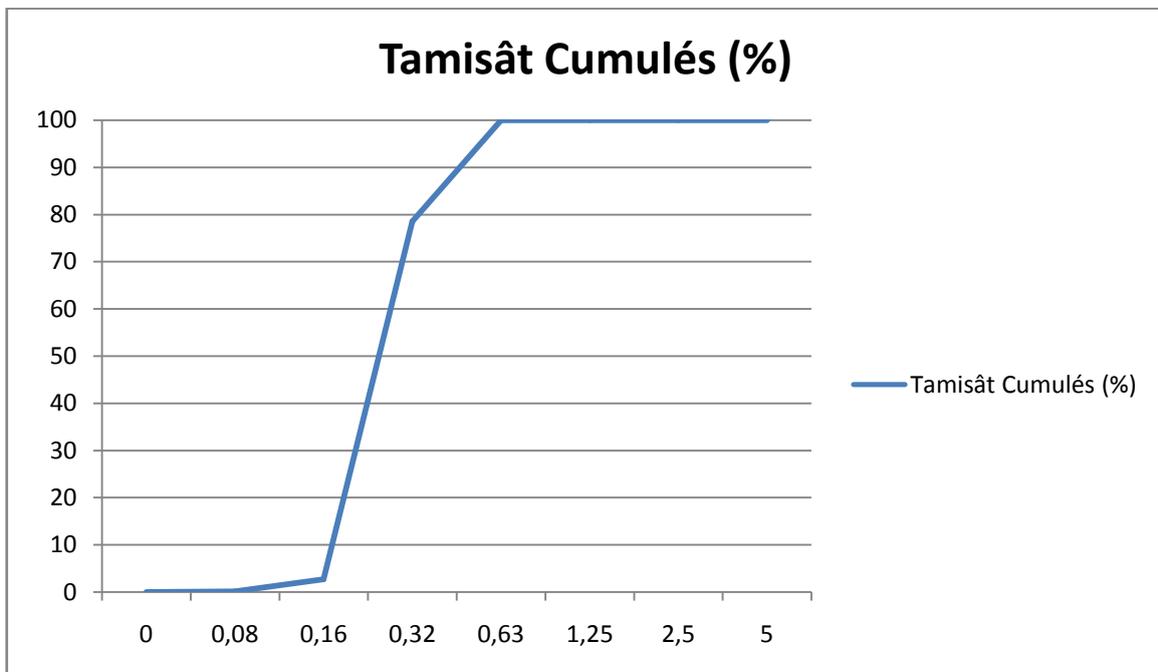


Figure II.7. Courbe granulométrique de sable Elhajeb

II.2.3: Additions

II.2.3.1: Quartz broyé (QB)

Le quartz broyé est une poudre, de diamètre moyen entre 10 et 15 μm , issue du broyage d'un sable très riche en silice ($\text{SiO}_2 > 98\%$) généralement utilisé dans la verrerie. Il est employé principalement dans la formulation des BUHP traité à une température supérieure à 90 °C comme complément chimique. Pour le béton non traité thermiquement, le quartz broyé peut

CHAPITRE II : TECHNIQUES EXPERIMENTAL

être considéré comme inerte et son utilisation n'est pas obligatoire.



Figure II.8. Quartz broyé.

✚ Les caractéristiques chimiques sont données dans le Tableau II.9

Tableau II.9. Analyse chimique du quartz broyé en %

Les éléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Lol	Cl
Quartz broyé%	94.333	1.171	1.044	1.622	0.184	0.037	0.386	0.001	1.582	0.02

✚ Les caractéristiques physiques de quartz broyé

La masse volumique apparente [NT 47-14 EN 196-1]

$$\rho_c = M/V \text{ (g/ cm}^3\text{)}$$

M : la masse de ciment dans récipient (M₂ – M₁).

V : volume de récipient (V = 1 L = 1000 cm³).

✚ Les résultats obtenus sont représenté dans le tableau II.10 suivant :

Tableau II.10. Résultats de la masse volumique apparente de quartz broyé.

	M ₁ (g)	M ₂ (g)	ρ_c (g/cm ³)
Essai	294.45	1050.94	0.8



Figure II.9. La masse volumique absolue du quartz broyé.
La masse volumique absolue (Méthode du pycnomètre) [NT 47-14 EN 196-1]

Tableau II.11. Les caractéristiques générales de quartz broyé.

Masse volumique apparente (g/cm ³)	0.8
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.64
surface spécifique (cm ² /g)	5714.7

II.2.3.3: Poudre de marbre (PM)

L'addition minérale qu'on a utilisée dans nos essais est la poudre de marbre. La poudre du marbre utilisée est le déchet des marbreries dues au découpage des pièces en marbre blanc.



Figure II.10. La poudre de marbre.

CHAPITRE II : TECHNIQUES EXPERIMENTAL

Les caractéristiques chimiques de cette poudre sont données dans le tableau II.12 suivant :

Tableau II.12. Analyse chimique de la poudre de marbre.

Elément	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅	Na ₂ O	ZnO	SrO	ZrO ₂
%	39.43	1.24	0.382	0.174	2.55	0.18	0.005	0.096	0.021	0.002	0.005

Les caractéristiques physiques de la poudre de marbre

La masse volumique apparent [NT 47-14 EN 196-1]

Les résultats obtenus sont représenté dans le tableau II.13 suivant

Tableau II.13. Résultats d'essais de la masse volumique apparente de marbre

	M1 (g)	M2 (g)	ρ_c (g/cm ³)
Essai	294.45	1265.82	0.97

La masse volumique absolue [NT 47-14 EN 196-1]

Tableau II.14. Caractéristiques générales de la poudre de marbre

Couleur	Blanche
Masse volumique apparente (g/cm ³)	0.97
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.65
surface spécifique (cm ² /g)	5150

II.2.4 Les adjuvants

C'est surtout la rhéologie du béton frais et la cinétique de prise et de durcissement que l'on peut espérer modifier directement. L'adjuvant utilisé dans notre étude est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la nouvelle génération.

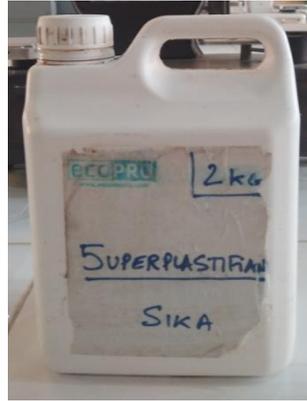


Figure II.11. Super plastifiant utilisé

II.2.5: Les fibres métalliques

Les fibres métalliques utilisées SIKA® METAL FIBRES RL-45/50-BN, sont fabriqués à partir de fil d'acier tréfilé. Dont la fabrication est certifié ISO 9001. Elles sont libres non encollées.



Figure II.12. Les fibres métalliques.

Tableau II.15. Les caractéristiques des fibres métalliques.

Nature	Longueur	Diamètre	Elancement	Résistance en traction	Nombre de fibres
Fil d'acier tréfilé sans revêtement	50mm	1.05mm	48	1000MPa (sur fil)	2800 fibre/kg

Précautions d'emploi : Lors de l'ouverture des sacs ou la manipulation des sacs ouverts, il est conseillé de porter des gants.

II.2.6 L'eau de gâchage

Lors du gâchage de nos BPRF, nous avons utilisé l'eau de robinet, qui est une eau potable du réseau de la ville de Biskra. Aucune analyse chimique n'a été réalisée là-dessus puisqu'elle est propre à la consommation.

CHAPITRE II : TECHNIQUES EXPERIMENTAL

II.3 Formulation et conservation des éprouvettes

II.3.1 Formulation

La méthode de formulation des BPRF est plus délicate par rapport aux autres types des bétons, plusieurs méthodes existent pour la formulation du béton à savoir DREUX – GORISSE, JAPONAISE et FAURY ... etc mais qui ne sont pas adaptable aux BPRF.

Il existe des formulations recommandées par des entreprises et des associations, à savoir LA FARGE et l'AFGC.

Tableau II.16 : La formulation pour 1 m³ de BPR

ciment (kg)	quartz (kg)	marbre (kg)	eau (l)	super plastifiant (kg)	fibre (kg)	sable (kg)
810	220	81	160	27		160
1020						

Tableau II.17. Compositions des mortiers relatifs aux essais de résistances mécaniques

Nombre d'éprouvette	Ciment (g)	Poudre de Marbre (g)	Super plastifiant (g)	Fibre 2%	L'eau (g)	Quartz broyé (g)
Une (01) éprouvette	207.36	20.736	6.912	4.147	45.62	56.32
Trois (03) éprouvettes	622.08	62.208	20.736	12.471	136.86	168.96

Sable

Deux types de sables ont été utilisés durant le travail expérimental, dans des proportions différentes, afin de tester l'apport de la nature et la quantité sur les performances mécaniques. Le tableau II.19 présente les différentes proportions et natures de sables utilisés

CHAPITRE II : TECHNIQUES EXPERIMENTAL

Tableau II.18. Composition de BPRF à base de différents pourcentages et type de sable

% des sables	Quantité de sable pour une (01) éprouvette (g)	Quantité de sable pour trois (03) éprouvettes (g)
40% SR	104.448	313.344
60% SD	156.672	470.016
50% SR	130.56	391.68
50% SD	130.56	391.68
60% SR	156.672	470.016
40% SD	104.448	313.344

Avec :SR : Sable de Rivière et SD : Sable de Dune

Nomenclature

Pour simplifier les écritures on a choisi une désignation de chaque formulation de BPRF comme suit :

Sans fibre : Témoin

BPRT1 avec 40% sable de rivière et 60% sable de dune.

BPRT2 avec 50% sable de rivière et 50% sable de dune.

BPRT3 avec 60% sable de rivière et 40% sable de dune.

Avec 2% de Fibre métalliques:

BPRF1 : Avec 2% Fibres

BPRF2: Avec 2% Fibres

BPRF3 : Avec 2% Fibres

II.3.2. Le malaxage

-Mettez le ciment, les additions et le sable sec dans le malaxeur,

-Malaxer les matériaux secs durant 2 minutes,

-Ajouter de l'eau et de la moitié du superplastifiant et malaxage durant 3 minutes à vitesse lente

-Ajouter de la seconde partie du superplastifiant, et malaxer pendant 6 à 8 min jusqu'à fluidification à vitesse rapide

-Ajouter des fibres métalliques, et malaxer pendant de 1 minute à faible vitesse.



Figure II.13. Malaxeur électrique utilisé dans la fabrication de BPRF

II.3.3 Procédure expérimentale

II 3.3.1. Préparations des éprouvettes et déroulement des essais

Les essais sont effectués sur des éprouvettes prismatiques en mortier de dimensions $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$, à raison de trois éprouvettes par essai.



Figure II.14. Moules utilisés pour la confection des éprouvettes

Dans tous les essais le rapport E/C a été fixé sur [0.22] pour tous les mortiers BPRF avec et sans fibre. La préparation des éprouvettes est réalisée selon la norme NF P 18-400. Les moules ont été couverts de film plastique et stockés dans le laboratoire dans les premières 24h.

Après 24 heures, les échantillons ont été démoulés et conservés dans l'eau à une température ambiante jusqu'à l'âge de l'essai 7 et 28 jours. A 28 jours, les tests de résistances mécaniques des mortiers ont été effectués selon la norme NF 15 403 et NF EN196-1.

CHAPITRE II : TECHNIQUES EXPERIMENTAL

Dans notre étude, les éprouvettes prismatiques ont été confectionnées avec des Bétons de poudres réactives, trois types de formulations étaient utilisés. Pour la fabrication des différents échantillons à étudier, la quantité de sable, ciment, poudre de marbre, super plastifiant et d'eau restent constant quel que soit la formulation, ne changeant que les pourcentages et le type de sables ainsi que les pourcentages des fibres utilisés, afin de voir leurs effets sur les résistances mécaniques du BPRF.

II.3.3.2 Constituant du BPRF

Les constituants du BPRF sont présentés dans le (Tableau. II.18-Tableau. II.19)

Le remplissage et conservation des moules s'est fait comme suit :

-Après gâchage, on procède au remplissage à raison de deux couches, dans des moules métalliques qui ont été enduits d'huile à l'avance.

-On procède au vibrage à la table vibrante pour les deux couches

-Araser et lisser la surface du béton avec une truelle.

La conservation des moules contenant les éprouvettes, se fait dans le laboratoire, et afin d'éviter toute dessiccation initiale, on protège les moules par du film plastique.



Figure II. 15. Eprouvettes protégées par film Plastique

Après 24 h les éprouvettes sont démoulées, notées et immergées dans un bassin d'eau jusqu'à l'âge de 7 et 28 jours.



Figure II.16. Démoulage des éprouvettes et nomination des éprouvettes

Nous avons conservé les éprouvettes dans un bassin de conservation rempli d'eau, juste après le démoulage pour y subir une cure d'hydratation jusqu'au mûrissement du béton à 7 et 28 jours, dans le but d'avoir un béton n'ayant pas subi de dessiccation.



Figure II.17. Conservation dans l'eau, jusqu'à l'âge de 28 jours

Toutes les éprouvettes ont été testées après 28 jours de mûrissement afin de déterminer les propriétés mécaniques du béton Fibrés Ultra Haut Performance aussi bien témoin.



Figure II.18. les éprouvettes après 28 jours

II.3.3.3. Caractérisation des différentes compositions :

+ Contrôle par ultrasons : [48]

C'est un essai non destructif très important qui permet d'évaluer plusieurs caractéristiques du béton durci telles que : le degré de compacité, de fissuration, l'uniformité de coulage

Le principe de la méthode des ultrasons consiste à mesurer le temps de propagation des impulsions ultrasoniques traversant le béton. Les résultats obtenus et donc leur interprétation dépendent du type de procédé de mesure appliqué et notamment la position des transducteurs de l'appareil à ultrasons.

+ La vitesse de propagation est donnée alors par l'équation suivante [48] :

$$V = d/t$$

Avec :

V: vitesse de propagation en [m/s]

d: distance entre les têtes en [m].

t: temps en microseconde

Des travaux effectués montrent qu'il y a une relation directe entre la vitesse de propagation des ondes dans un béton et sa qualité. Le tableau II.19 donne un classement.

CHAPITRE II : TECHNIQUES EXPERIMENTAL

Tableau II.19. La vitesse de propagation des ondes et la qualité du béton [47]

Vitesse de propagation (m/s)	La qualité de Béton
Supérieure à 4575	Excellente
3660 à 4575	Bonne
3050 à 3660	Douteuse
2135 à 3050	Mauvaise
Inférieure à 2135	Très mauvaise

Pour déterminer la vitesse longitudinale, nous avons utilisé dit appareil à ultrasons
Avant de commencer le contrôle de nos éprouvettes l'appareil à ultrasons doit être étalonné
avec l'étalon montré ci-dessous.



Figure II.19. Appareil ultrasons

II.3.3.4 Essais de caractérisation du BPRF à l'état durci

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression et à la traction par Flexion du Béton Fibré Ultra Haut Performance.

✚ Résistance à la flexion : Selon la norme (NFP18-407)

Cet essai est effectué sous charge concentrée exécuté par un bâti de flexion de type Toni Technique piloté par ordinateur équipé du logiciel Test Expert V7.11, et doté d'un capteur de force de 100 KN.

Cette machine est munie d'un dispositif à trois rouleaux, sur les éprouvettes en béton fibré ultra haute performance (4x4x16) [cm³] :

✚ Dispositif de l'essai de flexion

✚ Flexion trois points

Le dispositif de flexion comporte deux appuis à rouleau de 10 mm de diamètre, distant de 120mm, sur lesquels repose l'éprouvette prismatique suivant une face latérale de moulage, et

CHAPITRE II : TECHNIQUES EXPERIMENTAL

un troisième rouleau de même diamètre, équidistant des deux premiers, et transmettant la charge F . Afin de transmettre une répartition uniforme des efforts sur l'éprouvette, deux rouleaux doivent pouvoir osciller légèrement de leur centre dans le plan vertical perpendiculaire au grand axe de l'éprouvette.

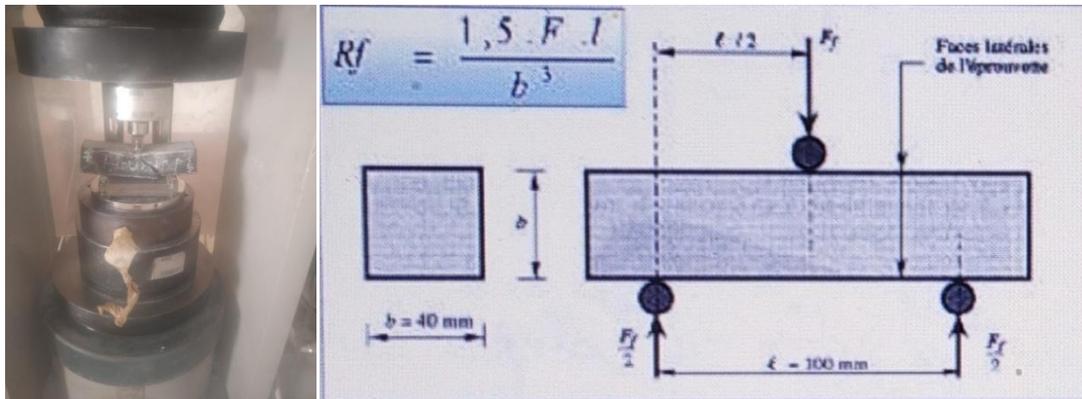


Figure II.20. Dispositif de l'essai mécanique de rupture par flexion

✚ Résistance mécanique à la compression (NF P 15-471)

Chaque demi-éprouvette est essayée en compression sur ces faces latérales de moule, sous une section de $4 \times 4 \text{ cm}^2$, entre deux plaques de métal dur d'au moins 10 mm d'épaisseur, de $40 \text{ mm} + 0,1 \text{ mm}$ de largeur, ces plaques sont en carbure de tungstène, la demi-éprouvette est placée entre elles de manière que son extrémité intacte dépasse d'au moins 1 cm et que les arêtes longitudinales d'éprouvettes soient perpendiculaires à celle des plaques.

Les plaques sont guidées sans frottement appréciable au cours de l'essai, de manière à avoir la même projection horizontale, l'une d'elles peut s'incliner légèrement pour permettre le contact parfait, plaque – faces d'éprouvette.

La résistance à la compression est calculée selon l'équation suivante :

$$RC = F/S \text{ [Kgf/ cm}^2\text{]}.$$

RC: Résistance à la compression en [MPa]

FC : Charge de rupture en [N]

b : Côte de l'éprouvette est égale à 40 [mm].

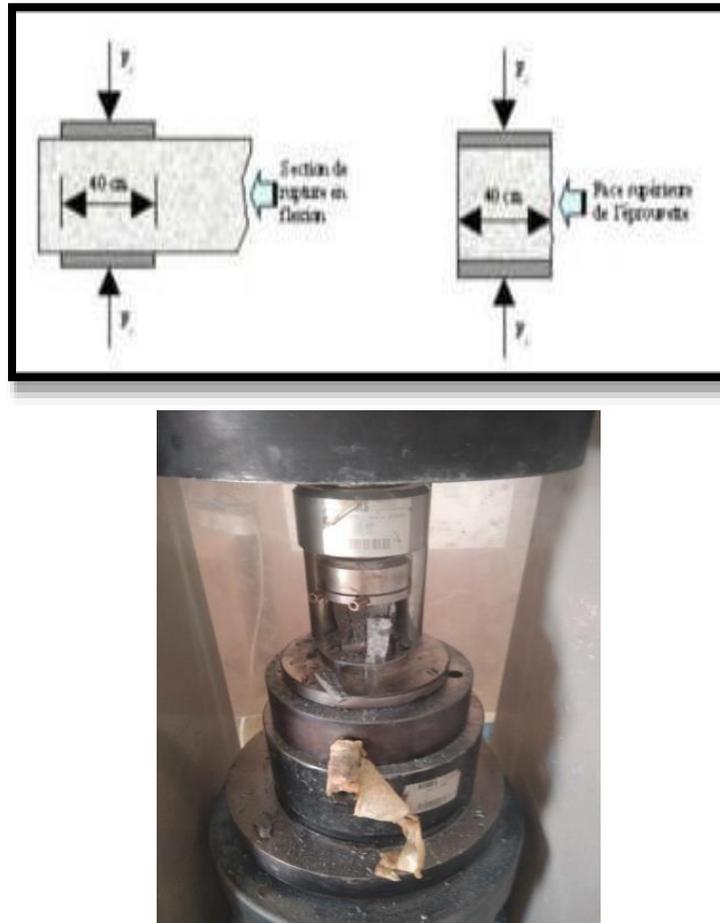


Figure II.21. Dispositif de l'essai de Compression

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté en détails tous les éléments de l'analyse expérimentale, en commençant par les caractérisations de différents constituants ; la formulation des bétons, la confection des éprouvettes, le mode opératoire et les différentes essais mécaniques considérés dans ce travail. Les différents résultats obtenus à l'issue des tests effectués sont présentés et illustrés dans le chapitre suivant.

Chapitre III :
Résultats et discussions

III.1. Introduction

La synthèse bibliographique a mis en évidence les besoins d'expérimentation pour étudier l'effet des sables sur les propriétés physico-mécanique d'un béton de poudre réactive avec et sans fibres. Dans ce cadre, ce chapitre est consacré à l'analyse et à l'interprétation des résultats d'un programme expérimental.

Nos essais physiques et mécaniques ont été effectués au sein de laboratoire de département de génie civil à l'Université de Biskra. Nous présentons dans ce chapitre les résultats des différents essais effectués sur les BPRF selon les différentes compositions de BPRF à différents pourcentages et types de sable ont été réalisées ([40%SR-60% SD] - [50%SR-50%SD] - [60%SR- 40%SD]) à raison de trois éprouvettes par essai.

III.2 Les propriétés physico-mécaniques

III.2.1 Résultats des masses des bétons durcis

Pour chaque formulation en BPRF sont confectionnés trois éprouvettes de dimensions $4 \times 4 \times 16$ [cm³]. Aux 7 jours et 28 jours, avant écrasement, les éprouvettes sont retirées de l'eau et pesées (humide), puis soumises à l'essai non destructif de mesure d'Ultrasons, puis aux essais destructifs de Flexion et de compression.

La moyenne des masses de différentes éprouvettes en BPRF a été calculée en utilisant la formule suivante :

$$M_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^{i=3} m_i}{3}$$

Avec :

m_i : correspond à la masse d'éprouvette mesurée.

Les résultats obtenus sont récapitulés dans les tableaux (III.1et III.2) suivant :

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Tableau III.1. Récapitulatif des pesées des masses des éprouvettes avant et après conservation dans l'eau (7jours)

Compositions	Avec Fibre (2%)		Témoin (0%)	
	Avant	Après	Avant	Après
Composition I : 40%SR-60% SD	576.07g	587.49g	565.18g	577.66 g
Composition II : 50% SR-50% SD	584.27 g	596.81g	566.89g	578.70g
Composition III : 60%SR-40%SD	574.79g	585.79g	596.33g	608.75g

Afin de faciliter l'interprétation de ces résultats, nous avons représenté en histogramme les masses des éprouvettes prismatiques avant et après la conservation dans l'eau.

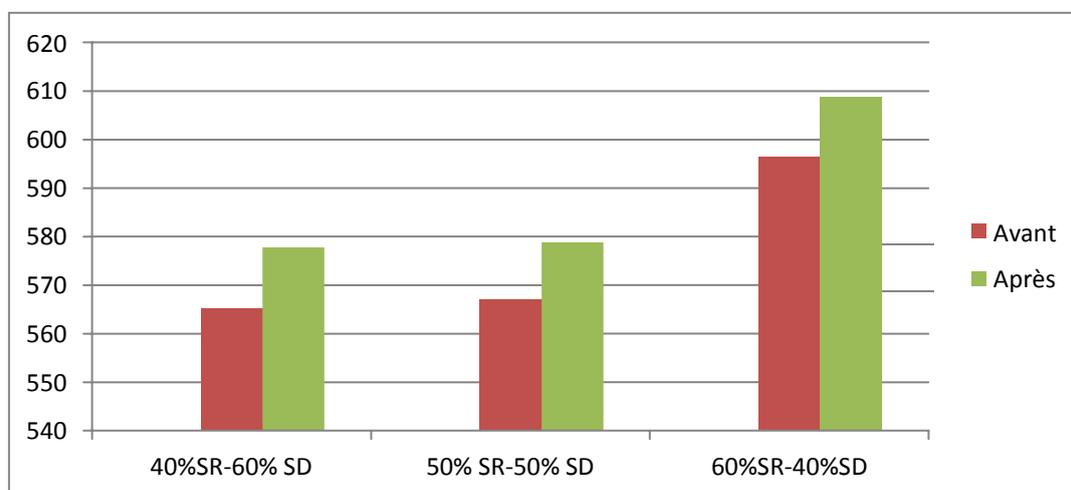


Figure III.1. Histogramme des masses d'éprouvettes prismatiques non Fibrés (Témoin) avant/après la conservation dans l'eau (7jours)

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Tableau III.2. Récapitulatif des pesées des masses des éprouvettes avant et après conservation dans l'eau (28jours)

Compositions	Avec Fibre (2%)		Témoin (0%)	
	Avant	Après	Avant	Après
Composition I : 40%SR-60% SD	623.75g	634.14g	561.23g	583.25g
Composition II : 50% SR-50% SD	604.72g	629.45g	584.21g	601.32g
Composition III : 60%SR-40%SD	610.27g	628.78g	591.87g	611.11g

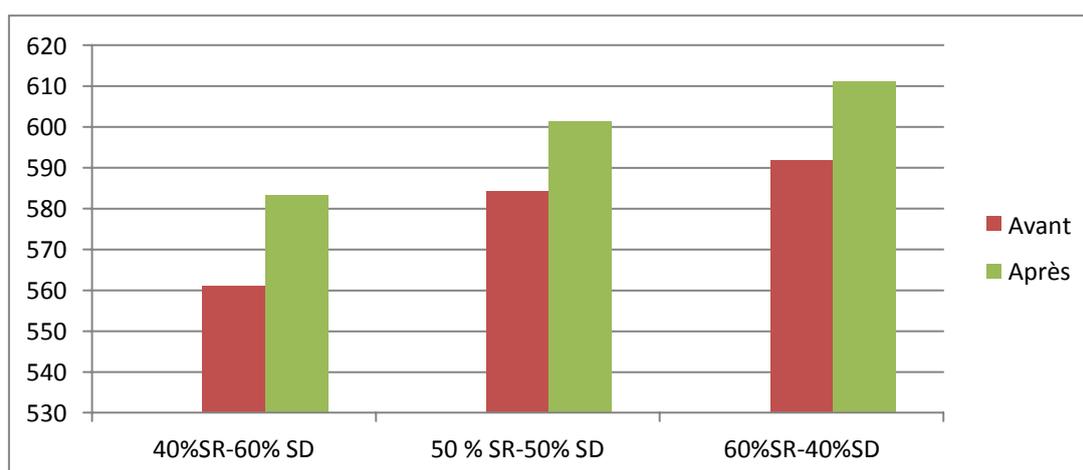


Figure III.2. Histogramme des masses d'éprouvettes Prismatiques non Fibrés (Témoin) avant/après la conservation dans l'eau (28jours)

-Nous remarquons que la première formulation de BPR (**40% SR-60% SD**) Fibré et non fibré à 7 jours et 28 jours présente la plus grande masse après conservation dans l'eau, qui égale à (634.14g pour BPR avec 2% de Fibre et 583.25g pour le témoin (28 jours)) et (587.49g pour BPR avec 2% de Fibre et 577.66g pour le témoin (7 jours)), même remarque pour la deuxième (**50% SR-50% SD**) et troisième formulations (**60%SR-40%SD**).

- D'après les deux histogrammes, nous observons une augmentation de la masse d'éprouvette après la conservation dans l'eau pour les différents BPR au cours du temps.

-Cette augmentation de masse s'explique par la pénétration dans l'éprouvette et le remplissage de la porosité accessible par l'eau du milieu de conservation, plus cette quantité

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

d'eau est importante, plus cela indique que la porosité du matériau est importante.

III.2.2 Contrôle non destructif

Résultats des essais d'auscultation sonore (ultra-son) :

Au 7^{ème} jours et 28^{ème} jours, après les pesées, les éprouvettes prismatiques ont été testées à l'ultrason. Les vitesses des ultrasons ont été déterminées par mesure du temps de parcours sur une série de trois éprouvettes pour chaque formulation de BPRF utilisée.

Les mesures des vitesses à l'ultrason ont été réalisées en mode de transmission directe. Ce mode fournit le maximum d'énergie. Elles sont réalisées par un testeur ultrasonique.

Pour une meilleure précision, nous avons répété l'essai trois fois sur chaque éprouvette, et nous avons par la suite calculé la moyenne des trois mesures obtenues sur chaque éprouvette de BPRF.

Afin d'avoir une meilleure idée des résultats des vitesses, nous avons calculé les moyennes des vitesses obtenues sur les trois éprouvettes de chaque formulation. Ces résultats sont représentés dans les tableaux (III.3 et III.4 et III.5 et III.6) et reportés sur un histogramme tel que schématisé sur les figures suivante :

Tableau III. 3. Vitesse longitudinale de propagation des ultrasons en BPR Témoin (0%F) après 7 jours

Formulation	C1	C2	C3
Vitesse (m/s)	4023	3983	4106

Tableau III. 4. Vitesse longitudinale de propagation des ultrasons en BPRF (2% F) après 7 jours

Formulation	C1F	C2F	C3F
Vitesse (m/s)	4130	3986	4056

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

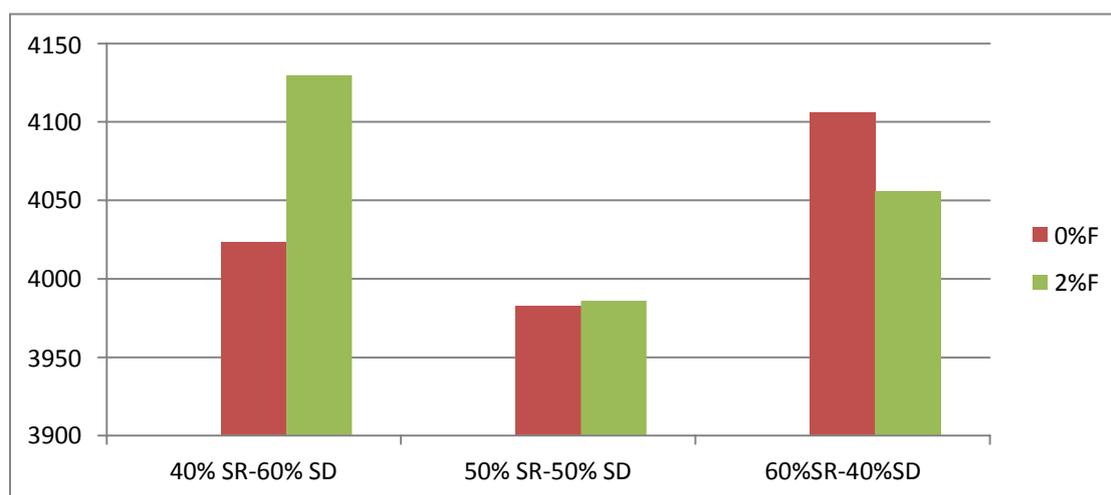


Figure III.3. Evolution de la vitesse d'onde des différents BPRF (7 jours)

Tableau III. 5. Vitesse longitudinale de propagation des ultrasons en BPR Témoin (0%F) après 28 jours

Formulation	C1	C2	C3
Vitesse (m/s)	4103	4380	4373

Tableau III.6. Vitesse longitudinale de propagation des ultrasons en BPRF (2% F) après 28 jours

Formulation	C1F	C2F	C3F
Vitesse (m/s)	4580	4426	4406

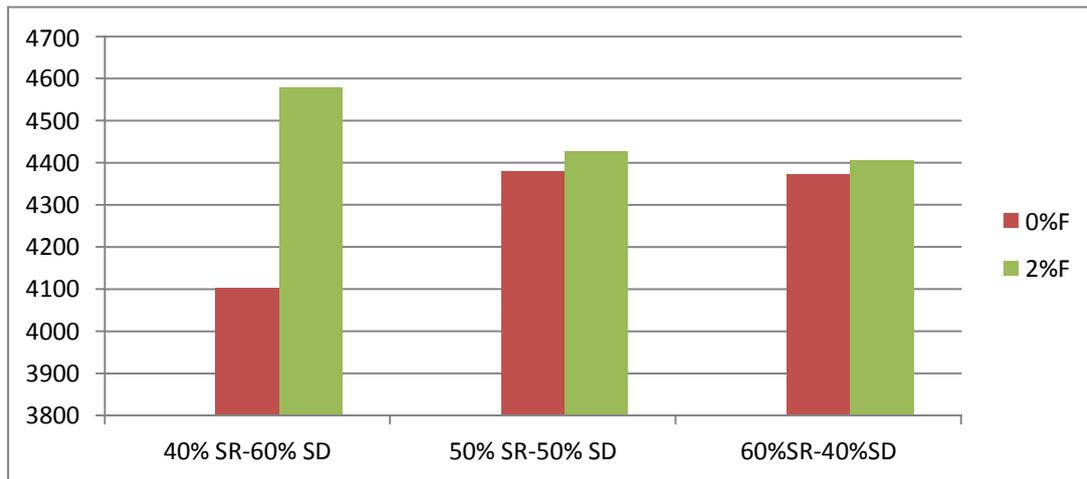


Figure III.4. Evolution de la vitesse d'onde des différents BPRF (28jours)

D'après les résultats représentés sur la figure III.3 et figure III.4 on souligne les points suivants :

- Pour la première formulation (**40% SR-60% SD**), une forte augmentation de la vitesse d'onde des BPRF avec 2% de fibre, comparée à celle du BPRT témoin
- Pour la deuxième formulation (**50% SR-50% SD**), une augmentation de la vitesse a également été confirmée pour les BPRF avec 2% de fibre malgré son niveau relativement élevé, en plus d'une augmentation significative de la vitesse d'onde pour le BPRT témoin comparant à la première formulation. Même remarque pour la troisième formulation (**60%SR-40%SD**) pendant 28 jours, quant à la troisième formulation pendant 7 jours une baisse de la vitesse d'onde des BPRF avec 2% de fibre, comparée à celle du BPRT témoin.
- Le comportement des compositions 1,2, 3, s'expliquerait aussi par la compacité élevée voire optimale du mélange SR et SD, la porosité entre les granulats « grossier » du sable de rivière étant comblée par les grains de sable de dune plus fins.
- Nous pouvons observer également, que ces BPRF font bien partie des ordres de grandeurs des BPRF de très bonne compacité.
- Ceci a été observé dans tous les cas de substitution partielle du sable de rivière par le sable de dune.
- Le sable de dune confère donc au matériau une bonne compacité, en remplissant ainsi les vides qui se trouvent dans la matrice cimentaire.

III.2.3 Essais à l'état durci

III.2.3.1 Résultats des résistances à la compression (NF P 18-406)

La résistance mécanique en compression est une caractéristique essentielle du matériau d'un béton ou d'un mortier ; elle correspond à la charge de rupture (charge maximale) enregistrée au cours de l'essai d'écrasement sous une contrainte normale axiale. La mise en

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

Nous avons procédé à trois mesures (essais), pour chaque formulation, les résultats obtenus sont consignés dans les tableaux (III.7 et III.8).

La moyenne des résistances mécaniques obtenues à 7 jours et 28 jours sur les trois éprouvettes testées, pour les différentes formules de BPRF sont récapitulés dans les tableaux (III.7 et III.8) Celle-ci est calculée en utilisant la formule suivante :

$$R_{cmoyenne} = \frac{\sum_{i=1}^{i=3} R_{ci}}{3}$$

R_{ci} : Résistance mesurée sur l'éprouvette i.

Tableau III.7. Résistances moyennes à la compression des BPRF étudiés à 7j

Compositions	Type d'essai	Avec Fibre (2%)	Témoin (0%)
Composition I : 40%SR-60% SD	Compression	45.02 MPa	33.44 MPa
Composition II : 50% SR-50% SD	Compression	43.86 MPa	35.85 MPa
Composition III : 60%SR-40%SD	Compression	53.07 MPa	40.46 MPa

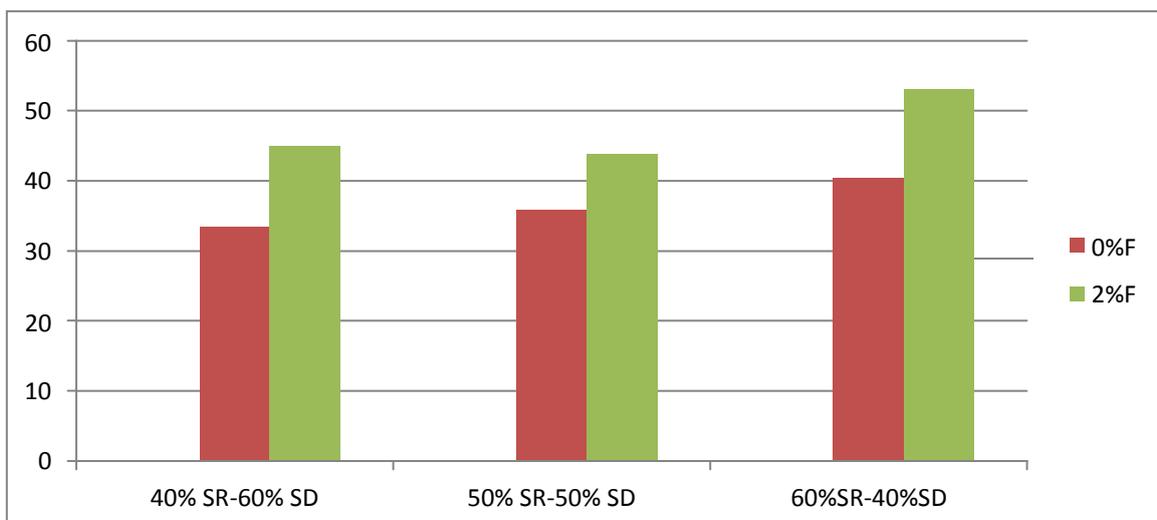


Figure III.5. Effet de variation du Pourcentage de Sable de rivière des BPRF étudiées sur la résistance en compression à 7 jours

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Tableau III.8. Résistances moyennes à la compression des BPRF étudiés à 28j

Compositions	Type d'essai	Avec Fibre (2%)	Témoin (0%)
Composition I : 40%SR-60% SD	Compression	73.88 MPa	49.18 MPa
Composition II : 50% SR-50% SD	Compression	75.06 MPa	47.00 MPa
Composition III : 60%SR-40%SD	Compression	81.26 MPa	52.45 MPa

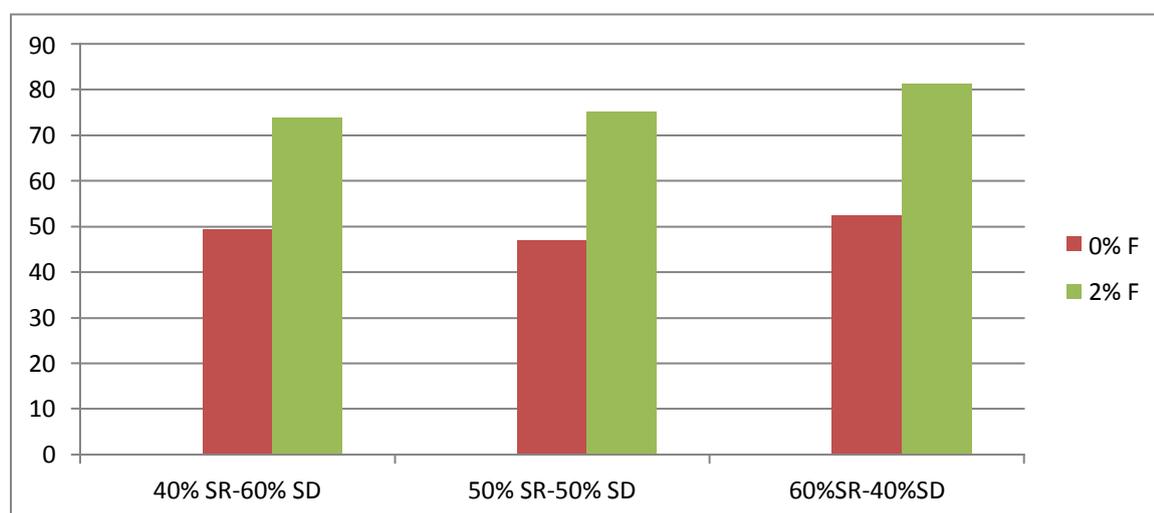


Figure III.6. Effet de variation du Pourcentage de Sable de rivière des BPRF étudiées sur la résistance en compression à 28 jours

Les résultats du test de résistance à la compression du béton BPRF qui ont été testés pour une taille d'échantillon de $4 \times 4 \times 16$ [cm³] en testant 9 échantillons pour chaque variation pour chaque âge ont obtenu les données suivantes : Dans les figures III.5 et III.6, on peut voir que le béton BPR avec et sans fibres de chaque variante a été prélevé sur 9 échantillons qui avaient été fabriqués, ce qui a donné une résistance à la compression moyenne à 28 jours entre 49,18 et 81,26 MPa.

D'après les résultats obtenus, la plus grande résistance à la compression est la variation III utilisant un mélange de 60 % de sable de rivière et 40 % de sable de dune, tandis que la plus faible est la variation I utilisant un mélange de 40 % de sable de rivière et de 60 % de sable de dune.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

D'après les figures III.5 et III.6 nous pouvons également voir que la résistance à la compression du béton BPRF de l'âge de 7 jours à 28 jours a connu une augmentation de sa résistance. Ce résultat confirme les tendances observées par Indrayadi et al. 2022

III.2.3.2 Résistance à la flexion (Norme NF EN 12390-5)

Lors d'un essai de flexion trois points, l'éprouvette de BFUP est soumise dans sa partie supérieure à des contraintes de compression et dans sa partie inférieure à des contraintes de traction. Etant donné que la résistance du BFUP à la traction est très faible par rapport à celle en compression, l'éprouvette va se rompre dès que celui-ci aura atteint sa limite en traction. La contrainte R_t correspond à la rupture résultant d'un calcul classique de résistance des matériaux en élasticité (contrainte de traction par flexion)

Nous rappelons les essais de traction par flexion sont effectués sur des éprouvettes prismatique $4x 4x 16$ [cm³].

Pour chaque mélange, nous avons testé la résistance à la traction après 7 jours et 28 jours de conservation à l'eau.

Résultats et discussions

Les valeurs moyennées de la résistance en traction par flexion pour chaque mélange sont regroupées dans les tableaux (III.9 et III.10)

Tableau. III.9. Valeurs de la résistance en traction par flexion des différentes formulations 7j

Compositions	Type d'essai	Avec Fibre (2%)	Témoin (0%)
Composition I : 40%SR-60% SD	Flexion 3 Pts	4.12 MPa	3.77 MPa
Composition II : 50% SR-50% SD	Flexion 3 Pts	3.94 MPa	3.55 MPa
Composition III : 60%SR-40%SD	Flexion 3 Pts	4.12 MPa	3.78 MPa

L'amélioration de la résistance à la traction par flexion est le premier objectif recherché par l'incorporation de fibres dans le béton

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

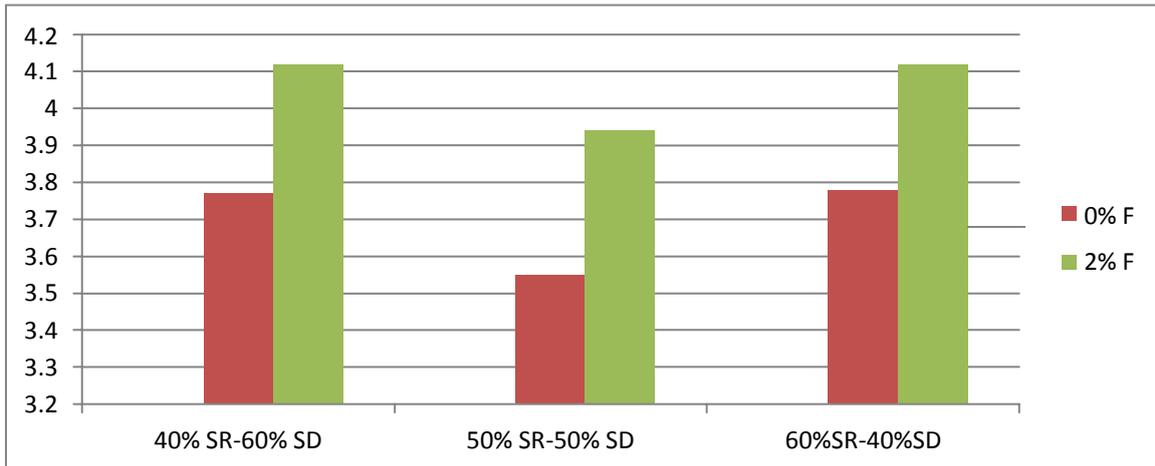


Figure III.7. Effet de variation de Pourcentages des sables sur la résistance en traction par flexion des BPRF avec entaille à 7 jours.

Tableau. III.10. Valeurs de la résistance en traction des différentes formulations 28j

Compositions	Type d'essai	Avec Fibre (2%)	Témoin (0%)
Composition I : 40%SR-60% SD	Flexion 3 Pts	6.91 MPa	6.76 MPa
Composition II : 50% SR-50% SD	Flexion 3 Pts	7.67 MPa	7.06 MPa
Composition III : 60%SR-40%SD	Flexion 3 Pts	6.89 MPa	6.43 MPa

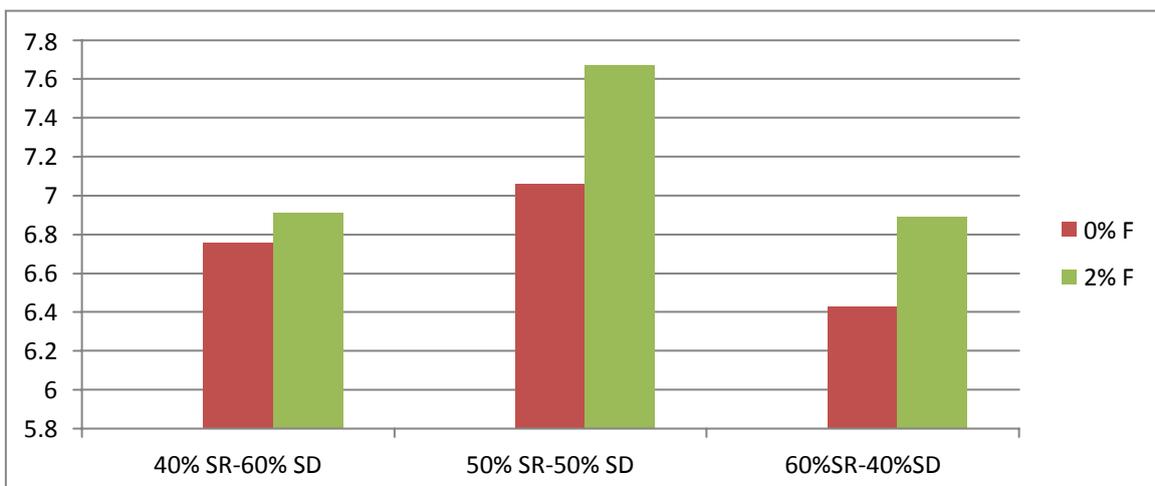


Figure III.8. Effet de variation de Pourcentages des sables sur la résistance en traction par flexion des BPRF avec entaille à 28 jours.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

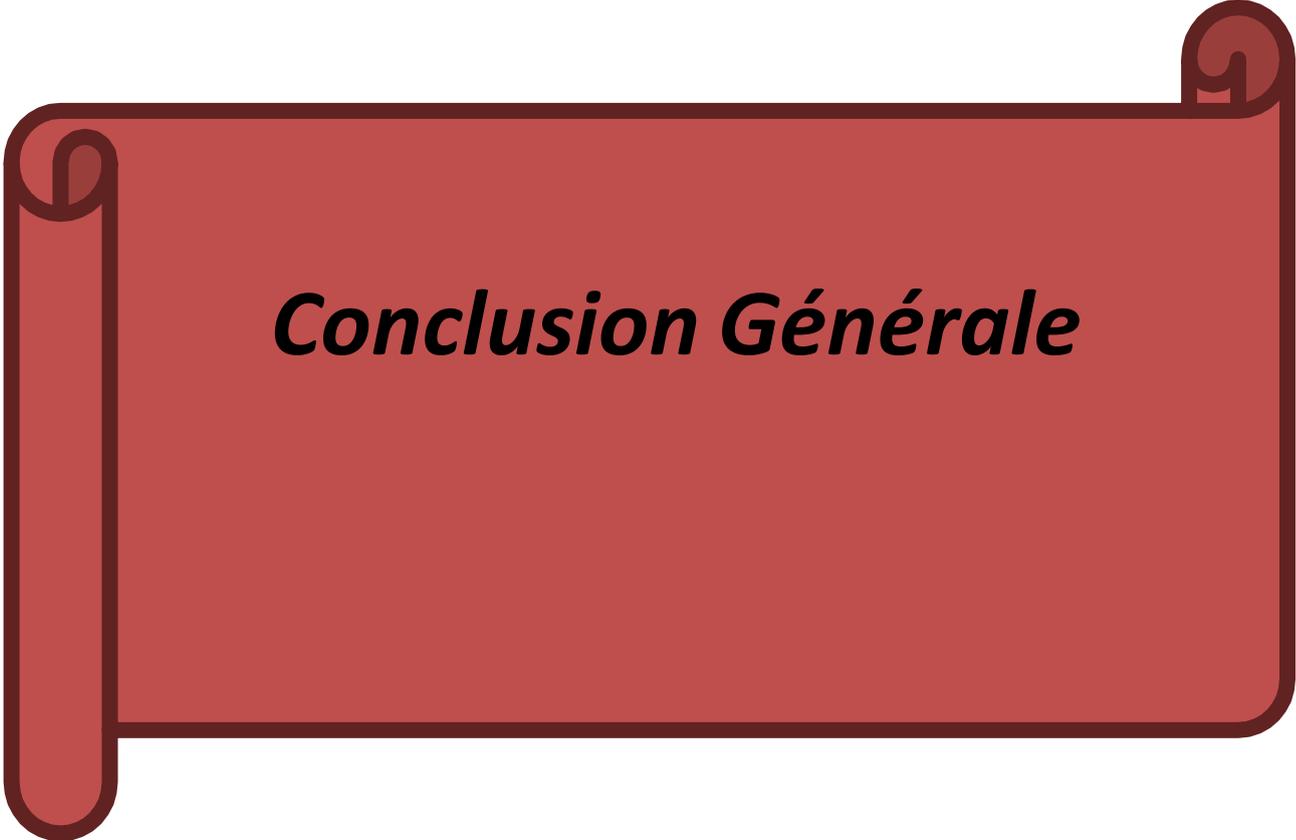
-D'après les résultats des courbes, un apport positif des fibres dans le béton sur le maintien de la résistance mécanique à la traction au fur, avec différents taux de sable de dune, mais aussi sur la valeur de la résistance à la traction à proprement dit.

-Effectivement, le béton ne contenant pas de fibres, présente systématiquement des valeurs de résistances plus faibles que les bétons contenant des fibres.

- Pour ce qui est de l'effet de la composition granulaire sur la résistance, une quasi-similarité entre les différentes compositions est notée. La meilleure valeur pour l'échantillon de BPRF était de 50 % SR + 50 % SD à 28 jours. Ceci indique que les deux types du sable donnent de bons résultats. Ce résultat confirme les tendances observées par [48].

III.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'étude de l'influence de la nature et du dosage de deux types de sables, sable de dune et sable de rivière sur la caractérisation des mécaniques (compression, traction par flexion), de BPRF contenant des fibres métalliques 2%, tantôt n'en contenant pas, comme la présence de fibres a un effet notable sur les performances du BPRF en plus de sable de dune. Donc des résistances mécaniques obtenues sont plus élevées que pour les bétons ordinaires et béton à hautes résistances.



Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Les bétons de poudres réactives fibrés se caractérisent par les performances mécaniques et de durabilité les plus élevées des matériaux à base cimentaire. Néanmoins, leur développement demeure freiné par leur coût qui le rend souvent peu compétitifs par rapport à des solutions techniques plus traditionnelles.

Les bétons de poudres réactives fibrés (BPRF) sont des bétons modernes constitués principalement d'une quantité remarquable en liant, de sable fin, d'ultrafines, d'adjuvant, et de fibres.

Grâce aux ultrafines, qui remplissent les vides entre les grains, nous pouvons avoir un béton compact et de par l'utilisation des adjuvants qui réduisent la quantité d'eau et augmentent la fluidité ; nous aboutissons à un béton moins poreux, offrant des résistances et des performances exceptionnelles.

La présente étude nous a permis de mettre en valeur d'une part l'utilisation des sables locaux disponibles en abondance en Algérie dans l'élaboration et la caractérisation de BPR avec des fibres métalliques, connus pour leur comportement mécanique très intéressant lorsqu'ils sont confectionnés à base de sable de rivière.

L'utilisation du sable de dune comme constituant dans la fabrication du BPR a été effectué selon différente proportion an adjonction avec un sable de rivière. Ces différentes formulations nous ont permis de mieux comprendre l'effet de la nature du sable et son pourcentage sur les caractéristiques aussi bien physiques que mécaniques des BPR.

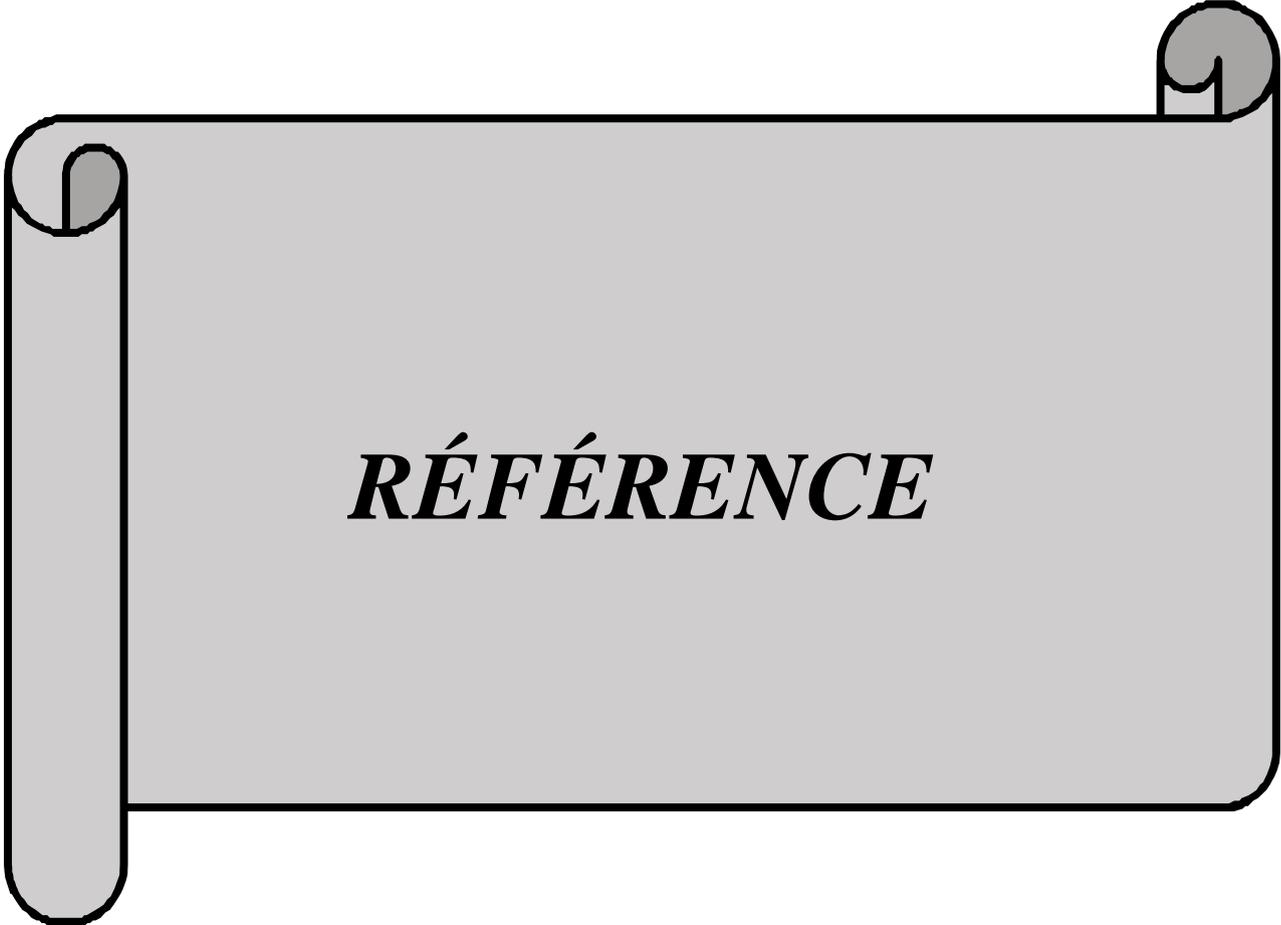
Trois formulations ont été choisis (40%SR-60% SD), (50%SR-50%SD) et (60%SR-40%SD) afin de pouvoir délimiter les pourcentages de sable de dune tolérables pour les BPR avec et sans fibres.

Sur la base des résultats obtenus nous pouvons établir des conclusions suivantes :

- ✚ L'utilisation du sable de dune dans la formulation du BPR, donne des résistances supérieures par rapport à ceux obtenus dans le cas de l'utilisation du sable de dune. Un gain de 30% en résistance à la compression a été observé même le dosage en ciment dans la formulation du béton du sable 0/5 est inférieur de 34%.
- ✚ L'abondance de sable de dune dans notre pays lui confère la caractéristique de matériau économique.
- ✚ Une squelette granulaire optimisé permet d'avoir une bonne compacité et une meilleure résistance mécanique, cela passe notamment par le choix de granulats de très petites dimensions.

CONCLUSION GENERALE

- ✚ L'ajout des fibres permet d'obtenir systématiquement de meilleures performances mécaniques que ce soit en compression ou en traction.
- ✚ Tous les bétons étudiés, présentent des valeurs de vitesse de propagation sonore supérieure à 3200 m/s, ce qui correspond à un béton compact de bonne résistance mécanique.
- ✚ Les meilleures résistances à la compression par la composition C3F (60% SR + 40 % SD).
- ✚ L'ajout de sable de dune présente l'avantage double d'augmenter les performances mécaniques des BFUP comparé au sable de rivière, mais aussi de remplacer un matériau tarissable et surexploité par un matériau abondant et sous-exploité.
- ✚ L'utilisation du sable de dune soulage et cela marque son impact sur la protection de la nature et l'environnement.



RÉFÉRENCE

RÉFÉRENCES

RÉFÉRENCES :

- [1]: Richard P and Cheyrezy M (), "Composition of reactive powder concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 7, pp. 1501-1511, 1995.
- [2]: M.LACHEMI, R.ADLINE, P.C.AITCIN P.RICHARD (1998) The Sherbrooke RPC footbridge, Structural Engineering International, Mai, vol.8, no 2, p. 140-144.
- [3]: Connaissances fondamentales, « les essais sur bétons frais, laboratoire de la matière ». Janvier/Février 2010, n° 26, béton [s].
- [4]: Guide pratique du béton, « Concevoir et mettre en oeuvre des bétons durables ». Editeur: Holcim (Suisse) SA , 6ème édition 2015.
- [5]: Guide de bonnes pratiques pour l'utilisation des fibres dans le béton, réalisé par Association béton Québec en collaboration avec les manufacturiers des fibres métalliques et fibres synthétiques, 2005
- [6]: S.Freedman. High Strength concrete. ISI 76. OIT , Association du ciment Portland .Skokie .IL,19 p.1971.
- [7]: Aitcin, P.C. (), "The durability characteristics of high performance concrete", A review, Cement and Concrete Composites, Vol 25, pp 409-420, 2003.
- [8]: CHADLI M., « Etude des performances des bétons de poudres réactives fibrés », Thèse de doctorat en Génie Civil. Université Mohamed khider , Biskra, 2019.
- [9]: Mahesh, K. M., Chetan, D. and Modhera, A., "Comparative study of reactive powder concrete containing steel fibers and recron 3s fibers", Journal of Engineering Research and Studies, JERS, Vol. I, Issue I,July-Sept. pp 83-89, 2010
- [10] : TAFRAOUI Ahmed , 2009, Thèse en vue de l'obtention du doctorat de l'université de Toulouse Contribution à la valorisation du sable de l'erg occidental (Algérie).
- [11] : Chavaillon J., Étude stratigraphique des formations quaternaires du Sahara Nord Occidental (de Colomb-Béchar à Reggane). Edition du CNRS, Paris 1964, p. 394.
- [12] : Pettijohn F., Sand and sand stone. Springer-Verlag New York, INC, Paper back, June 1987.
- [13] : Folk R.L., Ward W.C., A study of significant of grain size parameters. J.Sediment.brazos River bar, Petrol. 27, 1957, p. 3-26.
- [14] : Weydert P., Étude sédimentologique d'une coupe de la partie médiane du grand récif de Tuléar (SWMadagascar). Téthys 1, 1971, p. 237-280.

RÉFÉRENCES

- [15] : Dehbi Nacera Melissa, and Cylia Chaibet. « Comportement rhéologique et physico-mécanique des mortiers autoplaçants avec ajouts minéraux », Mémoire master, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2019.
- [16] : Khalid C, (2010), « Caractérisation de la microstructure et comportement à court et long terme d'un Béton de Poudre Réactive Extradable » thèse de doctorat
- [17] : Olga-mehaela S, (1996) « La Production Des Eléments Fabriqués En Béton De Poudres Réactives », Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées spécialité génie civil, Canada
- [18] : SALHI K, 2007, « Etude de l'influence de l'ajout du sable de dune et le laitier granulé finement broyés au ciment sur la stabilité de béton »
- [19] : chadli.M ,Mekki.M and Mezghiche, "Formulation and study of metal fiber-reinforced reactive powder concrete", world journal of engineering , (2018), Vol. 15 No.4, pp. 531-539.
- [20]: Mounira Chadli, « Etude Des Performances Des Bétons De Poudres Réactives Fibrés », Thèse De Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2019.
- [21]: Youcef Fritih, « Apport d'un renfort de Fibres sur le comportement d'éléments en Béton autoplaçant armé », Thèse de Doctorat, L'université de Toulouse, 2009
- [22]: 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.
- [23] : Ladourllyes, « Etude Des Performance Des Betons De Poudres Reactives Fibres (BPR-F), » mémoire de master ; Juin 2014].
- [24] : Dugat, J., Roux, N., et Bernier, G., (1996), "Mechanical properties of reactive powder concretes", Materials and Structures, S2, p. 233-240.
- [25] : Matte, V., (1999), "Durabilité des bétons à Ultra Hautes Performances : Rôle de la matrice cimentaire", Thèse de doctorat en cotutelle, Ecole Nationale Supérieure de Cachan et Université de Sherbrooke.
- [26] : Schachinger, I., Schmidt, K., Heinz, D., et Schießl, P., (2002), "Early-age cracking risk and relaxation by restrained autogenous deformation of Ultra High Performance Concrete", 6th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Leipzig, \$F:G!S, p. 1341-1354.
- [27] : Yazlcl, H., (2007), "The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures", Building and Environment, ZS (5), p. 2083-2089.
- [28] : Yazlcl, H., Yigiter, H., Karabulut, A. S., et Baradan, B., (2008), "Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete", Fuel, XK (12), p. 2401-2407.

RÉFÉRENCES

- [29] : Adeline, R., (1999), "Béton de poudres réactives", Techniques de l'ingénieur (C 2 216).
- [30] : Lafarge, (2003), "Ductal : Présentation du pont en Ductal de Saint Pierre La Cour"
- [31] : Cheyrezy, M., Maret, V., et Frouin, L., (1995), "Microstructural analysis of RPC (Reactive Powder Concrete)", Cement and Concrete Research, S8 (7), p. 1491-1500.
- [32] : Feylessoufi, A., Villiéras, F., Michot, L. J., De Donato, P., Cases, J. M., et Richard, P., (1996), "Water environment and nanostructural network in a reactive powder concrete", Cement and Concrete Composites, 4X (1), p. 23-29.
- [33] : Delagrave, A., Marchand, J., Ollivier, J.-P., Julien, S., et Hazrati, K., (1997), "Chloride binding capacity of various hydrated cement paste systems", Advanced Cement Based Materials, C (1), p. 28-35.
- [34] : Loukili, A., Khelidj, A., et Richard, P., (1999), "Hydration kinetics, change of relative humidity, and autogenous shrinkage of ultra-high-strength concrete", Cement and Concrete Research, S2 (4), p. 577-584.
- [35] : Vernet, C., (2002), "Enseignements tirés des recherches sur les BFUP", Chapitre ACI de Paris. Journées d'étude « Durabilité des ouvrages en béton ».
- [36] : Charron, J.-P., Denarié, E., et Brühwiler, E., (2008), "Transport properties of water and glycol in an ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) under high tensile deformation", Cement and Concrete Research, .X, p. 689-698.
- [37] : Cwirzen, A., Penttala, V., et Vornanen, C., (2008), "Reactive powder based concretes: Mechanical properties, durability and hybrid use with OPC", Cement and Concrete Research, .X (10), p. 1217-1226.
- [38] : Tafraoui, A., (2009), "Contribution à la valorisation de sable de dune de l'erg occidental (Algérie)", Thèse de doctorat, INSA de Toulouse.
- [39] : Carcassès, M., (2009), "Bétons Fibrés Ultra Performant (BFUP). Les nouvelles recommandations AFGC chapitre 3 durabilité des BFUP", UHPFRC, Marseille, France.
- [40] : Zenati Abdelfattah, « Contribution A L'étude Des Bétons De Poudres Réactives A Base De Fibres », Mémoire Magister, Université Des Sciences Et De La Technologie Houari Boumediene, 2007.
- [41] : Khetta walida, « Etude de l'influence des fibres métalliques sur le comportement mécanique d'un béton a poudre reactive », Mémoire de master, Université Mohamad Khider-biskra, 2015.
- [42] : Kamila, 2012. «introduction aux nano ciments et nano béton » Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou
- [43] : H. ZANNI, M. CHEYREZY, V. MARET, S. PHILIPPOT, P. NIETO (1996)

RÉFÉRENCES

Investigation of hydration and pozzolanic Reaction in Reactive Powder Concrete (RPC) using ^{29}Si NMR. *Cement and Concrete Research*, vol. 26, n° 1, p. 93-100.

[44] : [Khalid Cherkaoui,2010] : Khalid Cherkaoui , «Caractérisation de la microstructure et comportement à court et long terme d'un Béton de Poudre Réactive Extrudable» thèse doctorat ; 2010.

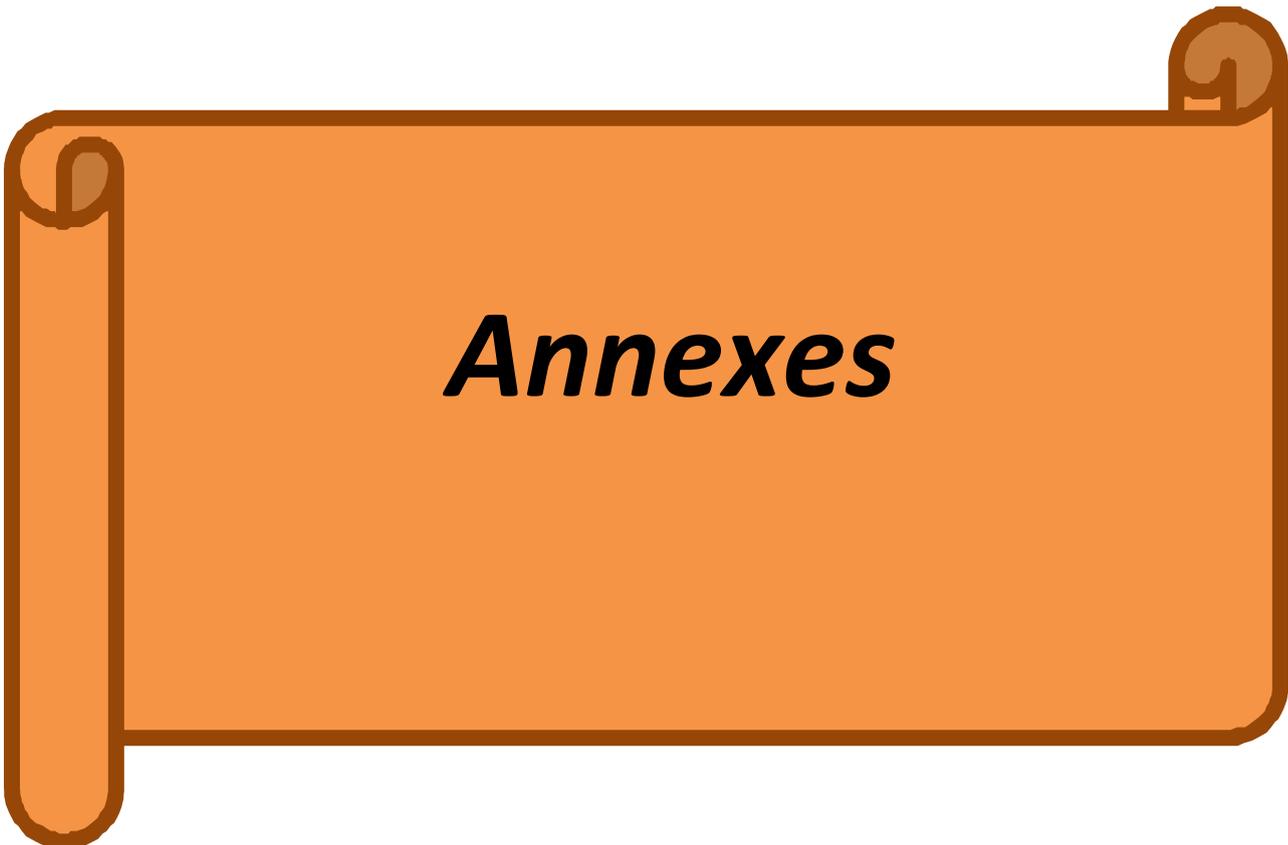
[45] : Technique de l'ingénieur par Régis ADELIN ingénieur des Ponts et Chaussées Chef de service adjoint à la Direction scientifique Bouygues BTP, 2009.

[46] : Malik, Adnan R."An investigation into the behaviour of reactive powder concrete columns." The University of New South Wales, Sydney, Australia: a dissertation in School of Civil and Environmental Engineering, 2007.

[47] : Aicha KAMEN, « comportement au jeune âge et différé d'un BFUP écrouissant sous les effets thermomécaniques » thèse de Magister- École polytechnique fédérale de Lausanne- 2006.

[48] : DELSOL Sébastien, « Evaluation du coefficient d'orientation dans les bétons renforcés des fibres métalliques » Maîtrisées sciences appliquées Génie Civil –Université de Montréal - 20

[49] : M. Indrayadi, et. al. " The Effect of the Use of Types Sand on Physical and Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete (RPC)." *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*, 11(2), (2022): pp. 29-39.



Annexes

ANNEXES

ANNEXE : Appareillage utilisé



Photos 1 : Malaxeur utilisé



Photos 2 : Essais de traction par flexion sur des éprouvettes 4X4X16 cm



Photos 3: Essais de compression



Photos 4 : Essais d'analyse granulométrique des éprouvettes 4X4X16 cm

ANNEXES



Photos 5: Essais d'équivalent de sable



Photos 6: Appareil ultrasons



Photos7: appareil à choc