



Department: Civil Engineering

N° d'Ordre : / 2023

Defense authorization N°/2023

DOCTORAL THESIS

3rd Cycle Doctoral (D-LMD)

Presented by

WAF A HAML A

With a view to obtaining the doctoral diploma in 3rd Cycle Doctoral (D-LMD)

Branch: Civil Engineering

Specialty: Materials in civil engineering

Topic

Roller-compacted sand concrete (RCSC) as pavement coating: Experimentation and Statistics

Supported, on 30 /05 /2023, before the jury composed of:

Last and first name	Grade	Institution of affiliation	Designation
Mr Lazhar Hariche	MCA	University of Djelfa	President
M Dalila Benamara	Pr	University of Djelfa	Supervisor
Mr Ammar Noui	MCA	University of Bordj Bou Arreridj	Co-Supervisor
Mr Madani Bederina	Pr	University of Laghouat	Examiner
M Kheira Camellia Nehar	MCA	University of Djelfa	Examiner
Mr Salim Guettala	Pr	University of Djelfa	visitor



Département : Génie Civil

N° d'Ordre : / 2023

Autorisation de Soutenance N°/2023

THESE DE DOCTORAT

Doctorat 3^{ème} Cycle (D-LMD)

Présentée par

Wafa Hamla

En vue de l'obtention du diplôme de Docteur en 3^{ème} Cycle D-LMD

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en génie civil

Thème

Béton de sable compacté au rouleau (BSCR) comme revêtement des chaussées : Expérimentation et Statistique

Soutenue publiquement, le 30 /05/2023, devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement de rattachement	Désignation
Mr Lazhar Hariche	MCA	Université de Djelfa	Président
M Dalila Benamara	Pr	Université de Djelfa	Directeur de thèse
Mr Ammar Noui	MCA	Université de Bordj Bou Arreridj	Co Directeur de thèse
Mr Madani Bederina	Pr	Université de Laghouat	Examineur
M Kheira Camellia Nehar	MCA	Université de Djelfa	Examineur
Mr Salim Guettala	Pr	Université de Djelfa	invité

Avant-propos

Tout d'abord louanges à Allah, Le tout-puissant qui nous a éclairés vers le bon chemin et qui nous avait donné le courage, la force et la patience pour mener ce modeste travail.

J'exprime en premier lieu mes remerciements à mon directeur de thèse Madame Dalila Benamara pour m'avoir confié ce travail de recherche, ainsi que pour, son aide et ses précieux conseils au cours de ces années.

Ce travail de thèse a été effectué au Laboratoire de génie civil de l'Université de Bordj Bou Arreridj, sous la direction du Monsieur Ammar Noui mon Co- directeur. Je tiens à le remercier pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire, pour sa confiance, sa gentillesse et ces discussions scientifiques au cours de ces années. Ce fut un plaisir de travailler à son côté.

Je remercie Monsieur Lazhar Hariche qui m'a fait l'honneur de présider ce jury. Je tiens à remercier également Monsieur Madani Bederina, madame Kheira Camellia Nehar, pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en acceptant de l'examiner.

Je voudrais également remercier monsieur Salim Guettala. Je lui suis très reconnaissant de sa présence. Je lui remercie également, pour leurs conseils scientifiques, leur gentillesse et sourire pendant la formation doctorale.

Ce travail n'aurait pas abouti sans l'aide de nombreuses personnes, Mes remerciements s'adressent également aux ensembles des enseignants de l'université de Bordj Bou Arreridj plus particulièrement monsieur Abdelatif Benouadah, monsieur Oussama Kessal, monsieur Ahmed Belkadi et monsieur Tahar Tayebi en tête de liste.

Mes plus vifs remerciements vont au professeur Abdelghani Merdas pour m'avoir facilité et permis la réalisation des essais de caractérisation au niveau de l'unité de recherche à l'université de Ferhat Abbas setif.

Je tiens à remercier le personnel du plateau technique en analyses physico-chimiques (PTAPC-Laghouat) ainsi que toutes les équipes de laboratoire de génie civil (université Bordj Bou Arreridj) spécialement monsieur Zoubir Djendi et monsieur Farid Chetouah.

Evidemment, j'aimerais remercier mon collègue Yazid Chetbani qui a été toujours disponibles et qui m'a aidé de réaliser les essais expérimentaux, merci pour votre encouragement et votre soutien.

Mes remerciements vont vers ma petite famille, à ma lumière de vie, à ma source de réussite, à celle qui a sacrifié tout ça vie pour me voir enfin réaliser, ce qu'elle est tant espérée et attendue de moi, à ma très chère et adorable mère, à mon père a mes sœurs et à mes frères je n'oublie pas mon beau-frère, merci pour vos encouragements constants et pour m'avoir soutenu à chaque étape de ma vie.

Wafa HAMLA

Abstract

It is widely admitted that constructions today require a parsimonious and intelligent use of materials, which must be respectful of the environment, in addition to innovative ideas. Over the past few years, the rapid development of road infrastructure and the lack of gravel resources have pushed practitioners in the field to develop and propose new alternative materials for road construction. As these novel materials are essentially based on sand, an innovative technique, i.e. the roller-compacted sand concrete technique, has lately been developed. The present study aims primarily to investigate the effects of the physical characteristics and the mineralogical nature of sand on the mechanical and physical behavior of this new roller-compacted sand-based concrete.

For this purpose, it was deemed appropriate to choose the design-of-experiment (mixture design) modeling with three factors that are represented by three different types of sand, i.e. calcareous sand (CS), alluvial sand (AS), and desert sand (DS). In addition, it was decided to select the compressive and tensile strength, dynamic modulus of elasticity, and water absorption at 28 days, as responses. Next, a microstructural analysis was carried out using the scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD) techniques.

The results obtained showed that the introduction of the mixture [DS (45% \pm 10%), CS (45% \pm 10%) et AS (10% \pm 10%)] into the roller-compacted sand concrete gives it the best mechanical and physical performance. It turned out that this is due to the improvement of the granular compactness and to the good homogenization of the roller-compacted sand-based concrete obtained. On the other hand, some mechanical tests were carried out in order to characterize the mixture of the roller-compacted sand-based concrete and the results obtained proved to be quite satisfactory. These findings allowed validating the use of this material in road structures.

Moreover, these results attest to the technical-scientific durability of using the roller-compacted sand concrete incorporating desert sand (DS) as an efficient material for road construction.

Keywords:

Roller-compacted sand-based concrete; Sand concrete; Mechanical strength; Design of experiments; Modeling; Microstructure.

Résumé

Les constructions nécessitent aujourd'hui un déploiement intelligent de matériaux respectueux de l'environnement et des idées innovantes.

Ainsi, le développement des infrastructures routières et le manque de ressources en gravier ont conduit à proposer de nouveaux matériaux alternatifs dans la construction des routes, basés uniquement sur l'utilisation de sable, à savoir le béton de sable compacté au rouleau (BSCR). Dans le présent travail on va étudier l'effet des caractéristiques physiques et de la nature minéralogique du sable sur le comportement mécanique et physique du BSCR.

À cet effet, la modélisation par plans d'expériences (plans de mélange) est sélectionnée avec trois différents sables (calcaire CS, Alluvionnaire AS, de dune DS) comme des facteurs. La résistance à la compression et à la traction, le module d'élasticité dynamique et l'absorption d'eau à 28 jours sont sélectionnées comme des réponses. De plus, une analyse microstructurale à l'aide du MEB et du DRX a été effectuée.

Les résultats ont montré que l'introduction du [DS (45% \pm 10%), CS (45% \pm 10%) et AS (10% \pm 10%)] dans le BSCR révèle des meilleures performances mécanique et physique. Ceci est dû à l'amélioration de la compacité granulaire provoquant une bonne homogénéisation du BSCR.

Les tests mécaniques effectués pour caractériser le mélange de béton de BSCR ont donné des résultats satisfaisants, ce qui valide l'utilisation de ce matériau dans les structures de chaussées. Ces résultats attestent de la viabilité technico-scientifique de l'utilisation du BSCR contenant un sable de désert (de dune) en tant que matériaux de construction des routes.

Les mots clé :

BSCR, béton de sables, Résistance mécanique, plans d'expériences, Modélisation, Microstructure.

الملخص

تتطلب المباني اليوم استخدامًا عقلانيًا وذكياً للمواد، التي يجب أن تحترم البيئة، وكذا الأفكار المبتكرة. على مدى السنوات القليلة الماضية، دفع التطور السريع للبنية التحتية للطرق ونقص موارد الحصى إلى تطوير واقتراح مواد بديلة جديدة لبناء الطرق.

نظرًا لأن هذه المواد الجديدة تعتمد أساسًا على الرمل، فقد تم مؤخرًا تطوير تقنية مبتكرة، ألا وهي الخرسانة الرملية المضغوطة. تهدف الدراسة الحالية في المقام الأول إلى التحقيق في آثار الخصائص الفيزيائية والطبيعة المعدنية للرمل على السلوك الميكانيكي والفيزيائي لهذه الخرسانة الجديدة ذات الأساس الرملي المضغوط. في هذا العمل سوف ندرس تأثير الخصائص الفيزيائية والطبيعة المعدنية للرمل على السلوك الميكانيكي والفيزيائي لنظام.

لهذا الغرض، كان من المناسب اختيار تصميم التجربة (تصميم الخليط) بثلاثة عوامل المتمثلة في ثلاثة أنواع مختلفة من الرمل، أي الرمل الجيري والرمل الغريني ورمل الصحراء. بالإضافة إلى ذلك، تقرر اختيار قوة الانضغاط والشد، والمعامل الديناميكي للمرونة، وامتصاص الماء في 28 يومًا، كاستجابات. بعد ذلك، تم إجراء تحليل هيكلية مجهرية باستخدام تقنيات المسح المجهرية الإلكترونية (MEB) وتقنيات حيود الأشعة السينية (DRX)

أظهرت النتائج المتحصل عليها أن الخليط يعطي أفضل ميكانيكي وهذا راجع إلى تحسين الانضغاط الحبيبي والتجانس الجيد للخرسانة الرملية المضغوطة المتحصل عليها.

أعطت الاختبارات الميكانيكية التي تم إجراؤها لتوصيف المزيج الخرساني لـ BSCR نتائج مرضية تمامًا، مما يؤكد صحة استخدام هذه المادة في هياكل الرصف. علاوة على ذلك، تشهد هذه النتائج على المتانة التقنية العلمية لاستخدام الخرسانة الرملية المضغوطة التي تحتوي على رمال الصحراء كمادة فعالة لبناء الطرق.

الكلمات المفتاحية

الخرسانة الرملية المضغوطة، الخرسانة الرملية، القوة الميكانيكية، تصميم تجريبي، النمذجة، البنية المجهرية.

Tables des matières

Introduction générale	01
-----------------------	----

Partie A : Etat de connaissance

Chapitre I : Béton de sable

I.1. Introduction	05
I.2. Historique	05
I.3. Définition du béton de sable	07
I.4. Composant du béton de sable	08
I.4.1. Les sables	08
I.4.2. Les fine d'ajout (ou additions)	09
I.4.3. Les ciments	10
I.4.4. L'eau	10
I.4.5. Adjuvants	10
I.4.6. Autres ajouts	11
I.4.6.1 Les fibres	11
I.4.6.2 Les gravillons	11
I.4.6.3 Les colorants	11
I.5. Domaine d'application du béton de sable	12
I.5.1. Fondations profondes	12
I.5.2. Routes	12
I.5.2.1. Chaussées en béton	12
I.5.2.2. Dalles industrielles	14
I.5.2.3. Equipements de voirie extrudés	14
I.5.3. VRD	15
I.5.4. Bâtiment	15
I.5.5. Techniques particulières	15
I.5.5.1. Béton de sable projeté	15
I.5.5.2. Bétons de sable fluides	17
I.5.5.3. Bétons de sable autoplaçant	17
I.5.5.4. Bétons de sable à hautes performances	18
I.5.5.5. Bétons de sable Fibré	18
I.6. Propriété mécanique et microstructure du béton de sable	19
I.6.1. Propriété mécanique du béton de sable	19
I.6.2. Microstructure du béton de sable	20
I.7. Formulation du béton de sable	24
I.7.1. Méthode SABLOCRETE	24
I.7.1.1. Méthode théorique	24
I.7.1.2. Méthode expérimentale	26

III.2.2.	Ciment.....	62
III.2.3.	Filler de calcaire.....	63
III.2.4.	Eau.....	63
III.3.	Optimisation de la formulation du BSCR par modélisation.....	64
III.3.1.	Choix du plan d'expériences.....	64
III.3.2.	Approche de conception de mélange.....	64
III.3.3.	Formulation de la composition de base des BSCR.....	65
III.4.	Méthode et essai.....	75
III.4.1.	Réalisation des gâchées.....	75
III.4.2.	Confection des éprouvettes.....	75
III.4.3.	Mode de cure.....	75
III.4.4.	Essai physico-mécaniques.....	76
III.4.4.1.	Résistance à la compression.....	76
III.4.4.2.	La résistance à la traction par fendage.....	76
III.4.4.3.	Module d'élasticité.....	77
III.4.4.4.	Absorption de l'eau.....	78
III.4.5.	Essai microstructure.....	78
III.5. 1.	L'analyse au microscope électronique à balayage (MEB)...	78
III.5.2.	Mesures par la diffraction de rayons X (DRX).....	79
III.5.	Conclusion.....	80

Chapitre IV : Etude des propriétés du BSCR et modélisation des réponses

IV.1.	Introduction.....	81
IV.2.	Etude des propriété physico-mécanique.....	81
IV.2.1.	Résistance à la compression.....	81
IV.2.1.1.	Modèles mathématiques.....	82
IV.2.1.2.	Analyse de la variance.....	87
IV.2.2.	Résistance à la traction par fendage.....	89
IV.2.2.1.	Modèles mathématiques.....	89
IV.2.2.2.	Analyse de la variance.....	94
IV.2.3.	Module d'élasticité.....	96
IV.2.3.1.	Modèles mathématiques.....	96
IV.2.3.2.	Analyse de la variance.....	98
IV.2.4.	Absorption d'eau.....	99
IV.2.4.1.	Modèles mathématiques.....	99
IV.2.4.2.	Analyse de la variance.....	101
IV.2.5.	Optimisation du BSCR.....	102
IV.3.	Etude microscopique des composite.....	104
IV.4.	Conclusion.....	115
	Conclusion générale.....	116

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1.	Carte des déserts dans le monde.....	5
Figure I.2.	Maison de François Coignet à Saint en France, et Phare de Port-Saïd en Egypte.....	6
Figure I.3.	Apparence du BS pur, BS chargé et du béton traditionnel.....	7
Figure I.4.	Effet filler.....	10
Figure I.5.	Application du béton de sable dans le domaine routier.....	14
Figure I.6.	Utilisation du béton de sable dans la préfabrication.....	14
Figure I.7.	Béton de sable en projection - Projection du béton sur vieille surface avec nouveau ferrailage.....	16
Figure I.8.	Panneau 3D en BS projeté.....	16
Figure I.9.	Essais d'étalement au mini-cône.....	17
Figure I.10.	Apparence des fissures dans les échantillons de béton de sable fibré après l'essai de flexion.....	18
Figure I.11.	A - Aspect global du béton (les grains de sable sont bien enveloppés dans la pâte), B - Pâte de ciment à l'état durci (produits hydratés dans un pore), C - Pâte de ciment à l'état durci (bonne adhérence, pas de fissures, pâte homogène).....	20
Figure I.12.	Liaison entre la pâte et les granulats dans le béton de sable de dune.....	21
Figure I.13.	Vue générale du béton de sable - A: Béton de sable dunaire, B: Béton de sable alluvionnaire.....	21
Figure I.14.	Images MEB des mélanges durcis: (a) CTRL-NC, (b) CTRL-AC, (c) M30-AC et (d) M40-AC.....	22
Figure I.15.	Image EDX des mélanges à l'état dur: (a) CTRL-NC, (b) CTRL-AC, (c) M30-AC et (d) M40-AC.....	23
Figure I.16.	Résistance moyenne à la compression en fonction de l'âge, pour différents mélanges contenant du béton de sable compacté (F1: sable concassé, F2: sable concassé, F3: sable de désert + sable concassé).....	30
Figure I.17.	Résistances à la compression à 28 jours des mélanges de béton de sable compacté contenant 100 % de matériaux de dragage.....	30
Figure I.18.	Résistance à la compression à 28 jours et intervalles de confiance à 95% pour les mélanges de béton de sable compacté BSD4, BSM0, BSM4 et BSC.....	31
Figure I.19.	Résistance à la compression à 28 jours et intervalles de confiance à 95 % pour les mélanges de béton de sable compacté BSM1, BSM2, BSM3 et BSM4: (a) En fonction de la teneur en ciment, et (b) En fonction du rapport du poids sur le volume.....	31
Figure I.20.	Influence du pourcentage d'ajout des granulats de caoutchouc sur la résistance à la compression.....	32

Figure I.21.	Amélioration de la résistance à la compression lorsque l'énergie de compactage croît.....	32
Figure I.22.	Valeurs des résistances à la traction indirecte pour différents mélanges de béton de sable compacté.....	33
Figure I.23.	Résultats de la résistance à la traction indirecte pour les Mélanges BSM2, BSM3, et BSM4.....	33
Figure I.24.	Effet du pourcentage d'ajout des granulats de caoutchouc sur la résistance à la traction.....	34
Figure I.25.	Effet de l'augmentation de l'énergie de compactage sur la résistance à la traction à 28 jours.....	34

Chapitre II

Figure II.1.	Barrage de Shimajigawa - Japon.....	36
Figure II.2.	Barrage de Koudiat-Acerdoune –Algérie (au cours la construction).....	36
Figure II.3.	BCR selon la teneur en liant et en eau.....	37
Figure II.4.	Mise en place du BCR en pavage - Atlanta USA.....	40
Figure II.5.	Répartition des contraintes sur une chaussée en BCR et une chaussée en BB.....	41
Figure II.6.	A-Etat du BCR frais lors de son déversement (Barrage Errmil Tunisie), B-Compactage du BCR (Barrage en BCR Errmil - Tunisie).....	42
Figure II.7.	Paramètres optimums d'un mortier pour BCR.....	44
Figure II.8.	Fuseaux granulométriques pour un BCR.....	45
Figure II.9.	Variation de la masse volumique en fonction de la teneur en eau.....	45
Figure II.10.	Résistance à la compression en fonction du rapport de combinaison du ciment à haute résistance mécanique et de l'adjuvant CSA et de la présence d'un agent accélérateur de durcissement.....	47
Figure II.11.	Résistance à la compression des enrobés BCR.....	48
Figure II.12.	Les résistances à la compression après 7 et 28 jours de cure.....	48
Figure II.13.	Résistance à la traction par fendage des BCR.....	49
Figure II.14.	Relation entre la teneur en cendres volantes et la résistance à la traction par fendage.....	49
Figure II.15.	Les résistances à la flexion après 7 et 28 jours de cure.....	50
Figure II.16.	Module d'élasticité des enrobés BCR.....	51
Figure II.17.	Microstructure du BCR (avec sable de mer non traité).....	52
Figure II.18.	Microstructure du BCR (avec sable de rivière).....	53
Figure II.19.	Tailles vides dans la pâte des BCR.	54
Figure II.20.	Micrographies électroniques à balayage montrant l'effet du sur l'ITZ, les vides et les fissures de BCR avec ciment Portland Type V.....	55

Chapitre III

Figure III.1.	Organigramme de la méthode expérimentale.....	56
Figure III.2.	Aspect général du ciment, du filler et du sable utilisé.....	56
Figure III.3.	Distribution granulométrique des matériaux utilisés.....	58
Figure III.4.	Essai de caractérisation des sables réalisés.....	58

Figure III.5.	Caractérisation du SD au moyen des techniques DRX et MEB.....	59
Figure III.6.	Caractérisation du SA au moyen des techniques DRX et MEB.....	60
Figure III.7.	Caractérisation du SC au moyen des techniques DRX et MEB.....	61
Figure III.8.	Analyse par diffraction des rayons X (DRX) du ciment.....	62
Figure III.9.	Analyse par diffraction des rayons X (DRX) du filler calcaire.....	63
Figure III.10.	Compactage et confection des éprouvettes.....	66
Figure III.11.	Représentation de la variation de la teneur en eau en fonction des trois sables utilisés (BSCR1-BSCR6).....	67
Figure III.12.	Représentation de la variation de la teneur en eau en fonction des trois sables utilisés (BSCR7-BSCR12).....	68
Figure III.13.	Représentation de la variation de la teneur en eau en fonction des trois sables utilisés (BSCR 13- BSCR 16).....	69
Figure III.14.	Représentation de la variation de la teneur en eau en fonction des trois sables utilisés (BSCR 17- BSCR 21).....	70
Figure III.15.	Substitution de sable par divers types de sable saharien.....	71
Figure III.16.	Représentation des 21 mélanges étudiés à l'aide d'un triangle équilatéral.....	72
Figure III.17.	Confection de BSCR par une machine de compactage automatique.....	75
Figure III.18.	Démoulage et conservation des éprouvettes de BSCR.....	75
Figure III.19.	Essai de la résistance à la compression du BSCR.....	76
Figure III.20.	Essai de la résistance à la traction par fendage.....	77
Figure III.21.	Équipement E-Meter MK II.....	77
Figure III.22.	Essai d'Absorption de l'eau.....	78
Figure III.23.	Vue d'ensemble du MEB de PTAPC-Laghouat.....	79
Figure III.24.	Étape de réalisations de l'essai DRX.....	80

Chapitre IV

Figure IV.1.	A- Courbes iso-réponses de la résistance à la compression à 7 jours. (MPa) B- Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.....	83
Figure IV.2.	A- Courbes iso-réponses de la résistance à la compression à 14 jours. (MPa) B- Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.....	84
Figure IV.3.	A- Courbes iso-réponses de la résistance à la compression à 28 jours. (MPa) B- Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.....	85
Figure IV.4.	Diagrammes des résidus de la résistance à la compression à 7,14 et 28 jours.....	88
Figure IV.5.	Relation entre la résistance à la compression et la traction par fendage résistance (bétons témoins).....	90
Figure IV.6.	A- Courbes iso-réponses de la résistance à la traction par fendage à 7 jours. B- Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.....	91
Figure IV.7.	A- Courbes iso-réponses de la résistance à la traction par fendage à 14 jours. B- Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.....	92

Figure IV.8.	A- Courbes iso-réponses de la résistance à la traction par fendage à 28 jours. B- Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.....	93
Figure IV.9.	Diagrammes des résidus de la résistance à traction par fendage.....	95
Figure IV.10.	A- Courbes iso-réponses de module d'élasticité (GPa). B- Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.....	97
Figure IV.11.	Diagrammes des résidus de module d'élasticité.....	98
Figure IV.12.	A- Courbes iso-réponses d'absorption d'eau (%). B- Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.....	100
Figure IV.13.	Diagrammes des résidus d'absorption d'eau.....	102
Figure IV.14.	Profileur de prévision des réponses la résistance à la compression.....	103
Figure IV.15.	MEB-EDX du BSCR 01(100%SC).....	105
Figure IV.16.	MEB-EDX du BSCR 06 (100%SA).....	105
Figure IV.17.	MEB-EDX du BSCR 21(100%SD).....	106
Figure IV.18.	MEB-EDX du BSCR 17 (60%SD+20%SA+20%SC).....	106
Figure IV.19.	MEB-EDX du BSCR 03 (60%SC+40%SA).....	107
Figure IV.20.	MEB-EDX du BSCR 18 (60%SD+40%SA).....	107
Figure IV.21.	MEB-EDX du BSCR 02 (80%SC+20%SA).....	108
Figure IV.22.	MEB-EDX du BSCR 20 (80%SD+20%SA).....	108
Figure IV.23.	MEB-EDX du BSCR 12 (40%SD+60%SC).....	109
Figure IV.24.	MEB-EDX du BSCR 10 (0,6SA+0,2SD+0,2SC).....	109
Figure IV.25.	DRX du BSCR 01(100%SC).....	110
Figure IV.26.	DRX du BSCR 06 (100%SA).....	110
Figure IV.27.	DRX du BSCR 21 (100%SD).....	111
Figure IV.28.	DRX du BSCR 17 (60%SD+20%SA+20%SC).....	111
Figure IV.29.	DRX du BSCR 03 (60%SC+40%SA).....	112
Figure IV.30.	DRX du BSCR 18 (60%SD+40%SA).....	112
Figure IV.31.	DRX du BSCR 02 (80%SC+20%SA).....	113
Figure IV.32.	DRX du BSCR 20 (80%SD+20%SA).....	113
Figure IV.33.	DRX du BSCR 12 (40%SD+60%SC).....	114
Figure IV.34.	DRX du BSCR 10 (0,6SA+0,2SD+0,2SC).....	114

Liste des tableaux

CHAPITRE I

Tableau I.1.	Classe de résistance des bétons routiers.....	13
--------------	---	----

CHAPITRE II

Tableau II.1.	Distribution granulométrique idéale de granulats fins d'après.....	38
Tableau II.2.	Distribution granulométrique idéale de granulats grossiers.....	39

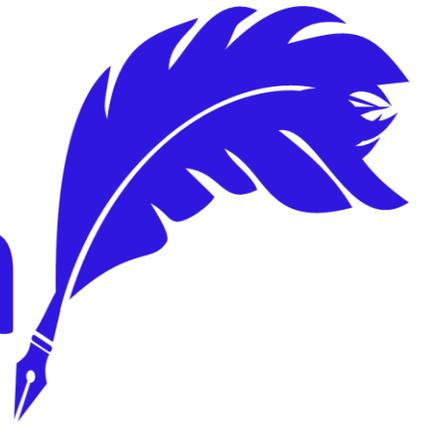
CHAPITRE III

Tableau III.1.	Propriétés physiques Caractéristique physique du sable utilisé....	57
Tableau III.2.	Composition chimique du sable utilisé (%)......	57
Tableau III.3.	Analyse chimique du ciment utilisé (%)......	62
Tableau III.4.	Analyse chimique de filler de calcaire utilisée (%)......	63
Tableau III.5.	Proportions des facteurs dans les compositions étudiées.....	73
Tableau III.6.	Formulations des mélanges selon un plan de mélange.....	74

CHAPITRE IV

Tableau IV.1.	Résistance à la compression des 21 mélange du BSCR.....	81
Tableau IV.2.	Coefficients et paramètres des modèles des réponses (R_C à 7,14 et 28 jours).....	82
Tableau IV.3.	Analyse de la variance des réponses (R_C à 7,14 et 28 jours).....	87
Tableau IV.4.	Résistance à la traction par fendage des 21 mélange du BSCR....	89
Tableau IV.5.	Coefficients et paramètres des modèles des réponses (R_t à 7,14 et 28 jours).....	89
Tableau IV.6.	Analyse de la variance des réponses (R_t à 7,14 et 28 jours).....	94
Tableau IV.7.	Moule d'élasticité des 21 mélange du BSCR.....	96
Tableau IV.8.	Coefficients et paramètres de modèle de la réponse (E_d).....	96
Tableau IV.9.	Analyse de la variance de la réponse (E_d).....	98
Tableau IV.10.	Absorption d'eau des 21 mélange du BSCR.....	99
Tableau IV.11.	Coefficients et paramètres du modèle de la réponse (Abs).....	99
Tableau IV.12.	Analyse de la variance de la réponse (Abs).....	101
Tableau IV.13.	Critères d'optimisation utilisés dans cette étude.....	102

Introduction



Générale

Tout investissement économique nécessite des investissements en infrastructures durables comme les ports et les routes. L'objectif de chaque gouvernement qui vise d'être une puissance mondiale est d'assurer une présence économique la plus largement possible dans le monde. C'est le cas de l'Algérie, qui vise d'être présente économiquement surtout en Afrique, ce qui nécessite tout d'abord une préparation au niveau de l'infrastructure routière où les trois quarts de sa longueur sont situés dans une zone désertique.

La construction routière en milieu désertique est devenue une demande actuelle, urgente et de plus en plus importante. La zone désertique a été toujours la zone la plus pauvre en raison des mauvaises conditions climatiques et du manque total de ressources naturelles à la surface. La présence humaine est également très faible, ce qui a limité les divers projets de construction et d'infrastructure. Mais les gens, actuellement, commencent à mieux explorer et investir dans ces régions (Dhia 1998).

Par ailleurs, l'insuffisance de graviers de carrières dans ces régions, nous a fait penser à utiliser le sable du Sahara dans la fabrication d'un nouveau béton routier grâce à sa disponibilité en grandes quantités, et à son prix raisonnable. Le sable de désert est disponible localement, ce qui nous a aidé à éviter le surcoût que le transport pouvait engendrer. Ce type de béton confectionné à base de sable présente plusieurs avantages économiques et écologiques, peut-être une alternative intéressante dans les endroits riches en sable et pauvres en gros granulats (Melais et Achoura. 2011).

Une des avenues innovantes pour minimiser la détérioration des chaussées consiste à employer des matériaux naturellement résistants à l'environnement chaud qui prévaut sur celles-ci. L'une des solutions à envisager est l'utilisation des chaussées en béton de sable compacte au rouleau (BSCR) en matériaux présents localement.

Il est à noter que le BCR est un béton rigide sans affaissement qui comprend de plus faibles quantités de pâte par rapport au béton ordinaire. Il peut également supporter le poids du rouleau compacteur avant que le ciment ne fasse sa prise (Madhkhan et al. 2012). Il s'est avéré que la construction avec le BCR est un processus relativement efficace et rentable.

Récemment, ce béton a été de plus en plus utilisé dans les chaussées en béton à faible vitesse dans des zones, telles que les parkings, les ports, les zones de stockage, les routes militaires, les routes secondaires et les installations de fabrication industrielle (ACI-1995; Hansen.1994). En outre, ce matériau, destiné aux chaussées industrielles et aux routes destinées à un usage intensif, a permis de réaliser des économies initiales de l'ordre de 10 à 58% par rapport au béton destiné aux chaussées conventionnelles (Pittman.1994). L'utilisation du BCR a récemment joué un rôle important dans le développement des infrastructures de transport, en raison de l'augmentation des prix du pétrole et de la limitation de l'utilisation des chaussées en asphalte (Hesami et al. 2016; Tsivilis et al. 2000).

Les études menées sur les BCR se concentrent généralement sur les paramètres du mélange, tels que le type de granulats et sa granulométrie, les quantités du matériau cimentaire et d'eau utilisées et les effets de ces paramètres sur la performance des BCR (Chhorn et Lee.2017; Fakhri et Amoosoltani.2017; Hazaree et al. 2011; Madhkhan et al. 2012; Vahedifard et al. 2010).

De nombreux chercheurs ont étudié les effets de divers facteurs sur les propriétés physiques et mécaniques des BCR (Harrington et al. 2010; Madhkhani et al. 2012; Vahedifard et al. 2010). À cet égard, Sengün et al (2019) ont étudié les effets des méthodes utilisées pour le compactage du béton sur les propriétés des bétons compactés au rouleau. Ils ont alors découvert que les résistances à la compression et à la traction par fendage étaient fortement affectées par le rapport de compactage.

De plus, bien que la résistance à la compression du béton dépende fortement de l'hydratation, le compactage peut améliorer, de manière significative, la densité du BCR ainsi que sa capacité de charge et sa résistance (Chhorn et al. 2017). Selon les conclusions de Berga et al. (2003), il faut plus de 3 heures pour qu'un mélange typique de BCR atteigne le temps de prise initial. Ils ont indiqué que cette durée devrait être suffisante pour la construction de la chaussée et que, par conséquent, le retardement n'est peut-être pas nécessaire pour les chaussées en béton compacté au rouleau.

D'autre part, la zone de transition interfaciale (ZTI) est l'un des facteurs clés qui peuvent affecter la résistance et la durabilité du béton. Cette zone interfaciale est fortement influencée par la taille des granulats (Bernard et Kamali-Bernard. 2012). Il faut noter que le volume de la zone de transition a un grand impact sur le comportement mécanique du béton. De plus, l'élimination totale ou partielle des granulats grossiers de la formulation du béton compacté au rouleau (BCR) peut certainement aider à minimiser les effets négatifs de la zone de transition interfaciale (ITZ) (Kamali-Bernard et al. 2014).

En raison de la pénurie de ressources naturelles, les chercheurs tentent de trouver des substituts aux agrégats à utiliser dans le béton (Heidari et al. 2017; Tavakoli 2013; Tavakoli et al. 2018). De nos jours, le béton de sable peut être considéré comme un béton spécial qui peut trouver différents champs d'applications. Il peut être utilisé comme un béton de sable coulant (Ambroise 1993), un béton autoplaçant à base de sable (Bouziani et al. 2011, 2014), un béton sablé (Benaïssa et al. 2015), un béton de sable à haute performance (Benamara et al. 2019) et un béton de sable compacté (Khay et al. 2010).

Dans le même contexte, Neji (1995) a présenté une étude sur la valorisation du sable saharien en vue de son utilisation en technique routière; il a ensuite proposé d'utiliser le béton de sable compacté comme nouveau matériau de fondation (Neji et al 2006). De même, d'autres chercheurs comme (Khay et al. 2011; Othmen 2013) ont constaté que la combinaison du sable concassé et du sable du désert permet d'améliorer, de manière significative, les propriétés mécaniques du béton de sable compacté, dont le compactage est similaire à celui du sol (Zdiri et al. 2009).

Au cours des dernières années, certains chercheurs (Smaida et al. 2019) ont étudié la possibilité d'utiliser du sable de dune dans la production de béton de chaussée. Leurs résultats ont indiqué que certains mélanges peuvent avoir des caractéristiques mécaniques élevées et pourraient donc être utilisés dans les couches de fondation des chaussées. De leur côté, Moradi et Shahnoori (2021) ont étudié les effets du remplacement du sable obtenu à partir de carrières par différents pourcentages de sédiments marins dragués ; ils ont découvert que l'utilisation de 15% de sédiments marins dragués a un impact considérable sur la résistance à la compression et la durabilité du BCR pour les pavements.

En effet, de nombreuses études ont été menées sur l'utilisation de déchets comme agrégat dans le béton. À cet égard, Tavakoli et al. (2020) ont utilisé des déchets pour remplacer les agrégats fins dans la formulation du béton de chaussées compacté au rouleau. Il a été révélé que les mélanges de déchets céramiques présentaient d'assez bonnes propriétés mécaniques, tandis que les mélanges de déchets de verre présentaient de bonnes performances en termes d'absorption d'eau.

De plus Tavakoli et al (2021), ont mené une étude sur l'utilisation de déchets de briques d'argile broyées comme substitut du sable dans la préparation d'une chaussée en béton compacté au rouleau (RCCP). Ils ont révélé qu'un taux de substitution de déchets de briques, jusqu'à 25 % n'a pas provoqué d'effets indésirables importants. Cependant, pour un taux supérieur à 50 %, les propriétés du béton étaient sévèrement affectées. Il a également été constaté que la fumée de silice (SF) peut améliorer les propriétés du béton, et peut même compenser les effets négatifs des déchets de briques utilisés dans le RCCP.

D'autre part, de nombreuses approches de modélisation statistique ont été largement appliquées ces dernières années afin d'identifier l'importance relative des différents facteurs de mélange et également d'étudier leurs effets couplés sur les propriétés les plus pertinentes du béton (Bouziani 2013; Goupy et Creighton 2007; Hadji et al. 2021; Seyed et al. 2016; Yahia et al. 2001; Zaitri et al. 2014; Zaitri et al. 2018).

Par conséquent, les objectifs et la signification connexe de cette recherche expérimentale ont été divisés en deux aspects différents : l'aspect scientifique et l'aspect socio-économique :

- L'aspect scientifique vise, en particulier, à optimiser les propriétés mécaniques et physiques du béton de sable compacté au rouleau en utilisant l'approche des plans de mélange. Il est important de mentionner que cette approche permet de rationaliser le programme de test et de modéliser empiriquement les réponses obtenues en fonction des facteurs de l'étude (Goupy 1988).

Dans la présente étude, trois types de sable, à savoir Le sable de désert (SD), le sable alluvial (SA) et le sable concassé (SC), ont été utilisés avec différents dosages dans la formulation d'un béton de sable compacté au rouleau. Un certain nombre d'essais a été réalisé pour évaluer les propriétés telles que, la résistance à la compression et à la traction, l'absorption d'eau et le module d'élasticité dynamique. En outre, des analyses microstructurales (XRD et SEM) ont été effectuées pour estimer les propriétés techniques du RCSC.

- En ce qui a trait à l'aspect socio-économique, il s'agit principalement de diffuser assez largement les connaissances et le savoir-faire auprès des chercheurs et des industriels et de contribuer à la mise en place d'une base de données ouverte à toutes les personnes désireuses de s'informer sur l'utilisation des différents types de sable à l'état naturel dans des matériaux routiers respectueux de l'environnement.

Pour mener à bien ce mémoire, deux parties ont été envisagées, chaque partie contient deux chapitres :

- La partie 1 intitulée : Etat des connaissances

Cette partie comporte deux chapitres, dont le premier est consacré à une vue d'ensemble des connaissances acquises sur les bétons de sable. Une attention particulière a été portée aux différentes méthodes existantes de formulation des bétons de sable. Le deuxième chapitre donne une revue bibliographique sur le béton compacte au rouleau.

- La partie 2 intitulée : Etude de formulation et caractérisation du BSCR

Dans un troisième chapitre (matériaux et méthode expérimentale), on va décrire les caractéristiques des matériaux utilisés, les méthodes et les procédures d'essais nécessaires pour la réalisation du programme expérimental relatif à cette thèse. De plus ce chapitre traite l'optimisation de la formulation de ce nouveau matériau par un logiciel statistique (JMP 16), une bonne partie est consacrée à la préparation du plan d'expériences et le choix du type de plan d'expériences.

Cependant, un quatrième et dernier chapitre (Etude des propriétés du BSCR et modélisation des réponses), fait l'objet d'une analyse et discussion des résultats trouvés à l'issue d'un programme expérimental résultant de l'application d'un plan de mélange. A partir de la base de données issue de l'application de ce plan, nous présentons des analyses statistiques permettant de trier l'influence des facteurs étudiés (le dosage de sable de désert (SD), le dosage de sable alluvionnaire (SA), et le dosage du sable concassée (SC)) sur la résistance à la compression, la résistance de la traction par fendage, le module d'élasticité et l'absorption d'eau des BSCRs préparés. Dans de ce chapitre nous nous sommes intéressés à l'étude de l'évolution microstructurale des bétons étudiés. En parallèle et afin de compléter cette analyse microstructurale, des essais par la microscopie électronique à balayage (MEB) associée à la microanalyse par énergie dispersive de rayons X (EDX) et de la diffraction aux rayons X ont été effectués afin de projeter la lumière sur le scénario de l'hydratation de notre matériau et de prédire le comportement de notre matériau à long terme.

Enfin, nous présentons une conclusion générale sur l'application de la méthode de plan d'expériences dans notre cas, on va clairement dévoiler l'effet des paramètres de formulation des BSCRs sur leurs propriétés étudiées. Cette conclusion sera clôturée par quelques recommandations pour les futures recherches.

Partie A

Etat de connaissance

Chapitre 01

Béton de sable

I.1.Introduction

Un grand nombre de travaux de recherches ont été menés sur le béton de sable et ce en raison du manque considérable de granulats alluvionnaires et la disponibilité du sable dans les déserts du Sahara qui s'étend sur une vaste partie du territoire Algérien, comme le montre clairement la Figure I-1. Les résultats des recherches menées ont ainsi contribué à trouver des formulations appropriées pour différentes utilisations de ce matériau et aussi à améliorer ses performances mécaniques.

Le présent chapitre a pour objectif de présenter une synthèse bibliographique globale sur le béton de sable. Un historique est donné en premier, avec ensuite la définition du béton de sable (BS), et enfin les composants de ce matériau sont cités en dernier. Dans une deuxième étape, les différentes méthodes de formulation des bétons de sable sont exposées. Certaines propriétés et applications de ce matériau sont enfin présentées en dernier.



Figure I.1 : Carte des déserts dans le monde (carte monde desert,2022).

I.2.Historique

Il est bien connu que le béton de sable (BS) est un matériau qui a été découvert depuis bien longtemps. Il a été utilisé dans un grand nombre de pays et dans divers domaines. C'est en France, et au 19ème siècle, que l'ingénieur François Coignet fit une découverte intéressante en développant le béton de sable (BS) pour la première fois. Ce béton consiste en un mélange de sable, de ciment, de chaux et d'eau. Ce type de béton a été utilisé pour la réalisation de plusieurs structures telles que la maison Coignet à Saint Denis, illustrée dans la Figure I.2, le mur de soutènement à Passy en France, le phare de Port Saïd en Égypte, montré aussi en Figure I.2, et le pont de New York (Sablocrete 1994).

Par ailleurs, dans l'ancienne Union des Républiques Socialistes Soviétiques (URSS), un pays pas très riche en gros granulats et en roches massives qui sont mal distribuées sur son immense territoire, le béton de sable a été utilisé pour la première fois au début du 20ème siècle dans la

construction du port de Kaliningrad et du pont de Chernavskif. D'autre part, il faut noter que, pendant les années 1920, la technologie du béton de sable a été carrément abandonnée en Europe occidentale et dans l'ex-Union Soviétique. Cependant, vers la fin de la deuxième guerre mondiale, elle a réapparu et a suscité l'intérêt de beaucoup de chercheurs et ce en raison du comportement d'un grand nombre de pistes réalisées par l'Allemagne. L'ancienne URSS avait alors établi une méthode pour la formulation et la mise en application du béton de sable dans la préfabrication pour la construction de différentes structures et dans divers domaines, comme les routes, autoroutes, aérodromes, bâtiments, ouvrages d'art, et autres (Chauvin 1991).

Plus tard, ce matériau tomba en désuétude car il a été remplacé par un béton à base de gros granulats qui a présenté des performances supérieures (Benaissa 1992). Similairement, l'utilisation du béton de sable n'a pas connu un grand succès en France car c'est un pays où les granulats de gros calibres sont amplement disponibles ce qui avait permis d'avoir des bétons avec des résistances assez élevées. Ce n'est que vers la fin des années 80 que les bétons de sable ont commencé à être utilisés et ont trouvé plusieurs applications dans divers domaines du génie civil. C'est pour cette raison que le projet Sablocrete (1994), qui s'inscrit dans le cadre du projet de l'utilisation optimale des matériaux locaux, a vu le jour en France, en l'année 1988. Il est important de noter que ce programme a fait ressortir des caractéristiques qui sont spécifiques au béton de sable et qui ne sont pas présentes dans le béton traditionnel, ce qui donne au BS une certaine préférence parmi les bétons connus à ce jour.



Figure I.2 : Maison de François Coignet à Saint en France, et Phare de Port-Saïd en Egypte (Sablocrete 1994).

Les premiers travaux de recherche sur la valorisation de ce matériau en Algérie ont été initiée par le Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB) qui a engagé une série d'investigations dans ce sens. On peut ainsi citer l'étude qui a été menée par Houari (1993) sur la valorisation et l'incorporation des fines calcaires dans les bétons de sable. En outre, une autre étude réalisée par Batata (1994) avait pour principal objectif de formuler un béton à

base de sable de dune afin d'avoir une compacité maximale. De même, plusieurs chercheurs ont considéré la possibilité d'introduire des armatures dans le béton préparé. Ainsi, par exemple, Benmalek (1997) a effectué une étude sur des éléments de structure en béton de sable de dune en utilisant le sable provenant de la région de Boussaâda. Plus tard, d'autres études menées par plusieurs chercheurs ont montré que le béton de sable (BS) est un matériau assez intéressant du point de vue technologique et environnemental (Bedadi 2011; Bédérina et al. 2005; Bouziani et al. 2012; Guettala et Mezghiche 2011).

I.3. Définition du béton de sable

Ce type de béton est assez fin. Il est composé de sable(s), de ciment, de quelques additions et d'eau. En plus de ces composants de base, le béton de sable doit aussi contenir un ou plusieurs adjuvants. Par ailleurs, les ajouts utilisés dans le béton traditionnel peuvent également être incorporés dans la formulation du béton de sable.

Même après intégration de gravillons (classe d/D) dans le mélange, un béton peut être appelé béton de sable tant que le rapport des masses des gravillons (G) et du sable (S) est plus petit que 0.7 ($G/S < 0.7$). Ce type de béton peut alors être appelé béton de sable chargé, comme montré en Figure I.3. Il a été montré que la présence de gravillons en petite quantité peut engendrer une amélioration de certaines propriétés, comme la maniabilité, le retrait, la résistance, et le fluage, du béton préparé. Par conséquent, il est bien possible d'utiliser un granulat de courbe granulométrique continue de 0 mm à un maximum de 8 mm, tant que le rapport massique entre les éléments supérieurs à 4 mm et les éléments inférieurs à 4 mm demeure inférieur à 0.7 (Sablocrete 1994).

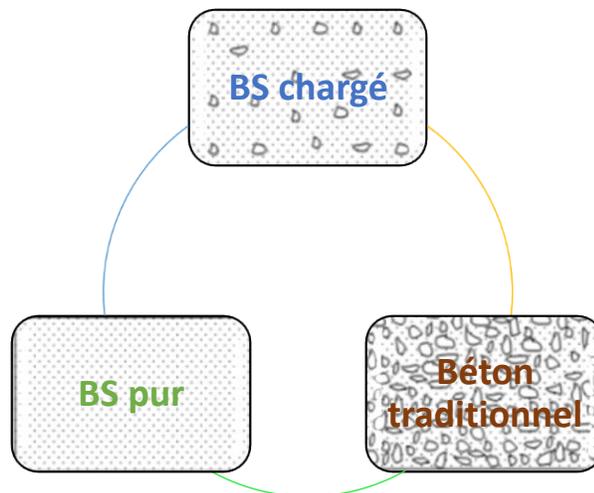


Figure I.3 : Apparence du BS pur, BS chargé et du béton traditionnel (Sablocrete 1994).

Le béton de sable qui contient plusieurs additions diffère du mortier de par sa composition, son dosage en liant qui est généralement bas, et sa résistance élevée. Ce béton est habituellement

destiné à des applications similaires à celles du béton ordinaire. Quant à sa composition, elle est différente de celle d'un béton ordinaire par son dosage en sable (S) assez élevé, l'absence ou le faible dosage en gravillons, et enfin l'intégration d'additions.

D'autre part, il a été trouvé que la résistance et le dosage en ciment de ces deux bétons sont presque similaires, ce qui veut dire que le béton de sable répond parfaitement aux critères qui ont fait le succès du béton conventionnel vis-à-vis de la performance, durabilité, apparence et comportement.

Par ailleurs, une définition du béton de sable a été donnée dans la norme Française AFNOR. NF P18 500 de juin 1995. Cette norme qui se rapporte à la norme P18-305 révisée et qui traite des Bétons Prêts à l'Emploi (BPE) offre essentiellement la possibilité d'utiliser des additions tout en détaillant les possibilités de leur prise en compte pour un remplacement partiel du ciment. Elle définit aussi les caractéristiques de durabilité à respecter suivant les critères environnementaux et les types d'ouvrages à réaliser.

I.4. Composants du béton de sable

Le béton de sable contient essentiellement du sable, des fines d'ajout, du ciment et de l'eau. Cependant, d'autres ajouts spécifiques, comme les gravillons, fibres, adjuvants, et autres, peuvent être envisagés afin de répondre aux besoins de certaines applications.

I.4.1. Les sables :

Un sable est défini comme un granulat conforme, de classe (0/D), comme cela a été recommandé par les normes NF P 18-101 et NF P 18-301*. Ce sable peut être soit naturel alluvionnaire ou de ballastière, soit de carrière résultant du concassage d'une roche massive ou détritique.

Il faut noter qu'aucun critère granulométrique n'est initialement requis pour la réalisation d'un béton de sable. En effet, on peut utiliser soit du sable fin homométrique comme le sable de dune, ou bien du sable alluvionnaire moyen ou grossier de classe (0/D) issu du concassage de roches. Cependant, l'unique condition d'emploi de ces sables est liée à leur propreté. A cet effet, il est utile de noter que les résultats des études menées sur des sables pollués ont montré que ces sables n'ont trouvé aucune application. En plus de la nature de la pollution, il y a lieu aussi de considérer sa variabilité à l'intérieur d'un gisement car ceci peut rendre l'usage de tels matériaux très difficile à envisager. Même si on pouvait rendre un sable pollué utilisable en incorporant des adjuvants, rien ne peut garantir qu'une telle approche pourrait s'appliquer à la totalité du gisement et ce en raison de sa variabilité. Il faut ajouter aussi que les sables riches en fines naturelles requièrent habituellement beaucoup plus d'eau, ce qui peut engendrer une diminution de la résistance du matériau préparé ([Sablocrete 1994](#)).

Enfin, dans la pratique actuelle, il est fortement conseillé de se limiter aux sables propres, tels que ceux utilisés pour la formulation du béton classique.

I.4.2. Les fines d'ajout (ou additions) :

D'une manière générale, la compacité est une qualité essentielle du béton. Cette caractéristique peut être influencée par les paramètres essentiels suivants :

- La granulométrie du mélange,
- La teneur en eau,
- L'énergie de mise en place.

Il est utile de rappeler que la distinction entre un béton classique et un béton de sable se trouve principalement dans la différence granulométrique.

Toutefois, on peut procéder à l'optimisation de la compacité, vis-à-vis de la granulométrie, en adoptant un certain nombre de règles. Dans ce cas-là, il s'agit tout simplement de considérer que les éléments les plus fins viennent se loger dans les vides des éléments plus gros (Sablocrete 1994).

Considérons, le cas du béton classique. On prend d'abord les gros éléments (de 10 à 20 mm) qui créent des macrovides pouvant se remplir par du sable. Quant aux vides du sable, ils sont remplis par des fines qui, dans notre cas, peuvent être des fines de ciment, car la quantité de ciment nécessaire pour avoir une bonne résistance est la même que celle dont on a besoin pour obtenir une bonne compacité. Ainsi, la concordance entre nos besoins en fines et le dosage en ciment est exprimée par la règle suivante :

$$C=550/\sqrt[5]{D} \quad \text{ou} \quad C=700/\sqrt[5]{D} , \text{ selon l'usage du béton} \quad \text{I.1}$$

Ces deux expressions donnent le dosage minimal en ciment en fonction du diamètre (D) du granulat utilisé. Signalons aussi que pour le béton de sable, une partie des vides du sable est d'abord remplie par un filler, et ensuite la rigidité du mélange est assurée à l'aide d'un complément en ciment qui correspond aux dosages généralement utilisés pour les bétons ordinaires. Dans de telles circonstances, la loi en $\sqrt[5]{D}$ peut toujours s'appliquer comme première approximation, pas seulement au dosage en ciment mais à l'ensemble (ciment + fines) (Sablocrete 1994).

Par ailleurs, il faut noter que les dosages en fines d'addition sont généralement élevés, c'est à dire entre 70 et 220 kg/m³, et parfois même au-delà. Par conséquent, les caractéristiques de ces fines, comme la nature géologique, la forme, etc., vont considérablement affecter les propriétés de la formule utilisée.

Concernant le filler calcaire, c'est un matériau très finement broyé; la taille des grains n'excède pas 80 µm. Sa finesse est presque identique à celle du ciment Portland. Le filler a pour rôle de remplir les vides autour des grains de sable.

L'objectif recherché à travers l'addition du filler calcaire est multiple. Ce filler peut servir, par exemple, à compléter la courbe granulométrique d'un ciment pauvre en grains fins, et aussi à compléter la granulométrie du granulat utilisé, comme dans le cas des bétons de sable. En outre, les fillers peuvent aussi avoir un impact sur l'hydratation à travers leur présence dans les pores

capillaires, ce qui pourrait engendrer une percolation de l'eau plus difficile. Ceci pourrait par conséquent affecter les paramètres rhéologiques du béton préparé (Bederina 2000; Joudi-Bahri et al. 2012). La Figure I.4 illustre clairement l'effet filler qui se manifeste par une plus grande compacité du squelette granulaire, ce qui devrait affecter positivement plutôt les propriétés à l'état frais que celles à l'état durci du béton.

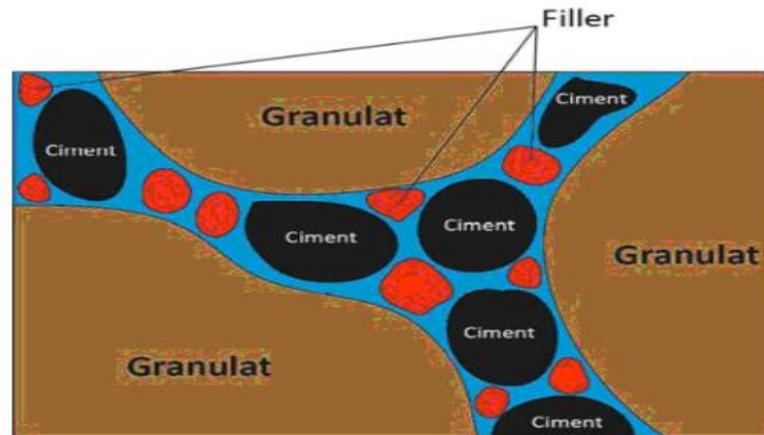


Figure I.4 : Effet filler (Diederich 2010).

I.4.3. Les ciments

Ce sont des poudres fines qui résultent de la cuisson à haute température, i.e. environ 1450 °C, et le broyage d'un mélange de plusieurs minéraux, avec en particulier de l'argile calcaire. Mélangées avec de l'eau, ces poudres, qui renferment des sels minéraux anhydres et instables, donnent une pâte qui peut, par hydratation, faire prise et durcir graduellement, ce qui leur confère le nom de liants hydrauliques.

Comme pour le cas du béton classique, le béton de sable est préparé avec un ciment qui est conforme à la norme NF P15-301. Il est important de souligner que le ciment est choisi sur la base de sa classe de résistance, ses caractéristiques d'hydratation, et l'agressivité du milieu. Ce choix dépend aussi de la composition du béton à formuler et de l'usage auquel il est destiné (Sablocrete 1994).

I.4.4. L'eau

L'eau de gâchage lors de la préparation des bétons de sable doit répondre aux spécifications de la norme NF P18-303. Notons qu'en sus de l'eau de gâchage, l'eau efficace comprend une quantité assez importante d'eau ramenée par les additions, les adjuvants et d'autres ajouts, et particulièrement par le sable (Sablocrete 1994).

I.4.5. Adjuvants

Les adjuvants utilisés dans les bétons de sable et les bétons conventionnels sont identiques. Ceci pourrait conférer aux deux bétons des propriétés relativement semblables.

Il faut noter que le béton de sable est un peu spécial puisqu'il privilégie l'incorporation de plastifiants ou de superplastifiants car ces derniers permettent d'améliorer la maniabilité du béton, avec en plus une augmentation de la résistance résultant de la réduction de la proportion d'eau et de la défloculation des éléments fins. Pour certaines applications, des entraîneurs d'air sont également utilisés avec pour principal objectif de créer un ensemble de microbulles dans le béton de sable afin de le préserver du gel, surtout lorsque la composition employée est vulnérable aux températures très basses (Sablocrete 1994).

N'oublions pas aussi que la nature et le dosage en adjuvants doivent automatiquement être soumis à une vérification au niveau du laboratoire. En outre, les adjuvants utilisés doivent être conformes à la norme NF P18-103.

I.4.6. Autres ajouts

I.4.6.1. Les fibres :

Tout d'abord, il faut savoir que les fibres servent essentiellement à réduire le retrait du béton au premier âge. Le dosage en fibres et leur nature sont des paramètres très importants qui peuvent influencer la performance du béton préparé. Les fibres jouent un rôle significatif dans l'amélioration des résistances mécaniques en traction et en flexion du béton, ainsi que celle de sa ductilité (Benaissa et al. 2015 ; Hadjoudja et al. 2014).

Dans la majorité des cas, des fibres organiques (polypropylène) sont employées afin de limiter les effets du retrait du béton après la prise et aussi pour prévenir la fissuration qui pourrait se produire. Les fibres d'acier ou de fonte amorphe seraient préférables dans le cas où on cherche à améliorer la ductilité (Sablocrete 1994).

I.4.6.2. Les gravillons :

Il est généralement admis qu'un béton de sable peut toujours garder cette dénomination de BS même dans le cas où il contient une certaine proportion de gravillons. Par ailleurs, il faut noter que le comportement du béton ne change pas tant que les gravillons restent dispersés dans le sable et ne forment pas un squelette structuré. Il a été montré que l'addition de gravillons en faible quantité pourrait améliorer quelques caractéristiques du béton comme le fluage, le retrait, la résistance et la maniabilité (Sablocrete 1994).

Dans la pratique, on pourra supposer qu'on a affaire à un béton de sable lorsque le rapport massique des gravillons (G) sur le sable (S) reste inférieur à 0.70 ($G/S < 0.70$).

I.4.6.3. Les colorants :

Ce sont des substances qui sont employées pour les mêmes objectifs que dans les bétons ordinaires. Cependant, ils doivent être soigneusement homogénéisés et le béton de sable doit être formulé de manière appropriée afin de préserver la stabilité de la teinte à long terme (Sablocrete 1994).

I.5. Domaine d'application du béton de sable

Le nombre élevé d'applications du béton de sable dans des domaines aussi vastes que le bâtiment et le génie civil ont permis de mettre en exergue l'intérêt que représente l'utilisation de ce matériau que ce soit au niveau technique qu'économique (Gluais G 1993).

Il a été prouvé que les BS peuvent être employés dans des domaines aussi divers que le bâtiment, les routes, les barrages, les bétons vibrés et les bétons projetés (Chauvin J 1987).

I.5.1. Fondations profondes

Le béton destiné au renforcement des pieux profonds doit posséder des particularités par rapport au béton conventionnel qui est généralement employé dans les fondations superficielles. Un certain nombre de règles et recommandations donnent les propriétés de base des bétons destinés à renforcer les pieux réalisés sur site (LCPC 1979). Ainsi, il convient de citer par exemple:

- La fluidité et mise en place sans vibration,
- La résistance à la ségrégation et au délavage,
- La prise lente et contrôlée,
- La compacité élevée,
- Les bonnes performances mécaniques.

Il a été montré que la conception et la composition du BS obéissent à la majorité des critères donné ci-dessus. Concernant les fondations, il faut dire que le BS, du fait de ses caractéristiques, peut être utilisé dans la construction de pieux assez profonds, dans les injections et reprises en sous-œuvre, surtout que se sont des travaux qui sont généralement faits dans un environnement subaquatique où tout délavage doit être évité. Par conséquent, on peut dire que ce matériau convient assez bien à la réalisation de travaux délicats ou bien des travaux difficiles à effectuer avec des bétons ordinaires (Bouziani 2013).

I.5.2. Routes

Les bétons de sable peuvent être utilisés en construction routière, dans les trois sortes d'ouvrages suivants (Sablocrete 1994):

I.5.2.1. Chaussées en béton :

Dans le cadre de la construction des chaussées, le projet national français Sablocrete a préconisé l'usage du béton de sable dans diverses structures de chaussées, et ce suivant le niveau de circulation des véhicules poids lourd. Ainsi, par exemple, pour les autoroutes très fréquemment utilisées, ayant un trafic routier moyen annuel (AADTT) supérieur à 300, il est fortement conseillé d'utiliser le béton de sable uniquement comme couche de base (Khay et al. 2011; Sablocrete 1994).

Pour les chaussées qui présentent un trafic moyen journalier annuel (TMJA, ou en anglais : Average Annual Daily Truck Traffic, AADTT) entre 50 et 300, il est recommandé d'utiliser le béton de sable comme couche de base recouverte d'asphalte à chaud ou de béton de ciment Portland ordinaire (revêtement blanc). Dans ce cas, la couche de base en béton de sable pour ces structures peut être jointe et goujonnée ; elle peut être aussi renforcée en continu.

Cependant, concernant les routes à faible trafic, i.e. inférieur à 50, il suffit d'appliquer une dalle de béton de sable afin de supporter les charges (Khay et al. 2011; Sablocrete 1994). Sur la base de ces directives, un grand nombre de routes ont été réalisées avec du béton de sable en France, en raison de leurs intérêts économiques et environnementaux.

Par ailleurs, le béton de sable destiné à la voirie doit présenter les caractéristiques suivantes :

- La plasticité doit être contrôlée au cône d'Abrams entre 2 et 6 cm (norme NF P 18451).
- La maniabilité LCPC doit être contrôlée au maniabilimètre à béton entre 10 à 30 secondes (norme NF P 18452).
- La teneur en air occlus doit être mesurée à l'aéromètre à béton, entre 8 et 10 % (norme NF P 18453).
- Les performances mécaniques sont données dans le tableau ci-dessous, en se conformant à la norme NF P98170.

Tableau I.1 : Classe de résistance des bétons routiers. (Sablocrete 1994)

Classe de résistance NF P98170	Résistance caractéristique à 28j (MPa)	
	Compression NF P18406	Fendage NF P18408
6	-	3.3
5	-	2.7
4	-	2.4
3	25	2
2	20	1.7
1	15	1.3

Les bétons de sable des classes 1 et 2 sont des bétons maigres car leur dosage en ciment varie entre 150 et 220 kg/m³. Ceux de la classe 3 ont un dosage en ciment entre 250 à 300 kg/m³. Le dosage en ciment des bétons de sable des classes 4 et 5 se situe entre 300 et 370 kg/m³. Pour des raisons économiques, la classe 6 de la norme en question s'applique rarement aux bétons de sable. Signalons que les paramètres des essais de fatigue des bétons de sable pour le dimensionnement peuvent être déduits directement de la résistance en fendage à 28 jours; ils ne sont pas déduits des résultats des essais de fatigue car ceux-là ne sont pas toujours disponibles (Sablocrete 1994).

Il a été révélé que le béton de sable n'est en général pas recommandé comme couche de revêtement pour les chaussées à forte circulation. Cependant, il peut y être employé comme couche de fondation. Dans ce cas, les bétons de sable des classes de résistance 1, 2, et 3 peuvent être utilisés. Dans la pratique, le niveau de performance du béton de sable est choisi selon la

méthode de construction adoptée par le maître d'œuvre. Ce choix relèvera alors de son entière responsabilité (Sablocrete 1994).

Notons aussi que les bétons appartenant aux classes de résistance 2 et 3 sont les seuls à être employés lors de la conception et le dimensionnement des structures de chaussées du catalogue des structures types des chaussées neuves de la direction des routes et de la circulation routière. Dans ce contexte d'utilisation, ces bétons sont appliqués en couche de base pour les trafics T0 et T1. Par ailleurs, afin de garantir un bon comportement de la chaussée au cours du temps, il est nécessaire de surveiller minutieusement les performances du béton de sable par rapport au phénomène d'érodabilité (Sablocrete 1994).



Figure I.5 : Application du béton de sable dans le domaine routier (Sablocrete 1994).

I.5.2.2. Dalles industrielles :

Concernant les dallages industriels, outre l'économie qui peut être faite sur les prix des matériaux utilisés, le choix de la solution béton de sable peut se justifier également par la facilité de sa mise en application.

I.5.2.3. Équipements de voirie extrudés :

Dans ce cas-là, il peut s'agir de caniveaux, bordures, murets, séparateurs, et glissières de sécurité, qui sont réalisés avec du béton en utilisant des machines à coffrages glissants.



Figure I.6 : Utilisation du béton de sable dans la préfabrication (Sablocrete 1994).

I.5.3. Voirie et Réseau Divers

Le béton de sable peut être utilisé pour des applications spécifiques comme les ouvrages d'art, l'enrochement artificiel, et les accessoires de Voirie et Réseau Divers (VRD). Il peut en outre représenter une solution technique et économique très intéressante pour un grand nombre d'ouvrages d'art qui nécessitent un matériau possédant une grande maniabilité avec une qualité esthétique de haut niveau (Bouziani 2013).

Il est largement reconnu que la réalisation d'ouvrages d'art nécessite des bétons de très haute performance. Malheureusement, la formulation d'un BS de haute performance ne peut se faire en raison de l'absence partielle ou totale de gravillons. Cependant, il est bien possible d'optimiser le squelette granulaire du BS en incorporant des éléments fins qui peuvent limiter le rapport (eau/ciment) sans avoir un effet considérable sur la maniabilité (Coquillat G 1992).

Pour ce qui est de la préfabrication d'accessoires VRD, il s'est avéré que le BS convient assez bien, particulièrement pour la préfabrication de tuyaux, regards et autres accessoires employés dans les canalisations étanches des réseaux d'assainissement qui servent à évacuer les eaux usées ou les eaux des pluies. Enfin, il est important de signaler qu'il existe d'autres applications où il serait largement plus intéressant d'utiliser le BS. On peut citer à titre d'exemple les travaux souterrains, tels que les tunnels, galeries, collecteurs, etc., ainsi que les barrages et les infrastructures portuaires (Sablocrete 1994).

I.5.4. Bâtiment

Les caractéristiques spécifiques du BS permettent à ce matériau d'être utilisé dans des domaines divers. D'après Bouziani (2013) le BS est un matériau qui est généralement préféré dans le secteur du bâtiment principalement à cause de ses qualités d'aspect de surface, comme par exemple le bon garnissage des moules et le bon enrobage des aciers même en présence d'un ferrailage dense.

En outre, le BS peut également être employé dans la préfabrication des murs architecturaux qui sont montrés dans la Figure I.6. En effet, la finesse granulométrique de ce type de béton donne un excellent aspect de surface aux éléments préfabriqués par rapport à ceux faits avec du béton conventionnel. Il faut noter également que cette finesse permet au BS d'accéder aux cotes minimales des pièces préfabriquées, ce qui peut faciliter le moulage de pièces ayant des formes assez complexes même en présence de ferrailages denses.

I.5.5. Techniques particulières

I.5.5.1. Béton de sable projeté

Il est utile de rappeler que c'est au début du vingtième siècle que la technique de la projection du béton a été dévoilée. Cette technique trouve un grand nombre d'applications dans le domaine du génie civil. On peut citer à titre d'exemple les réparations et renforcements des ouvrages en béton et en maçonnerie ainsi que les structures qui présentent des formes complexes.

Il a été indiqué que le béton de sable peut être utilisé à la place des bétons conventionnels, particulièrement en présence d'armatures denses, et ce en raison de sa finesse granulométrique.



Figure I.7 : Béton de sable en projection - Projection du béton sur vieille surface avec nouveau ferrailage (Sablocrete 1994).

Dans ce contexte, Benaïssa et al (2008) ont mené une étude sur le béton de sable qui doit être projeté par voie humide pour des panneaux 3D, à la place du béton ordinaire, comme montré sur la Figure I.8. Ces mêmes auteurs ont indiqué que les deux types de bétons possèdent des performances mécaniques pratiquement similaires. Les résultats de cette étude indiquent que l'utilisation du béton de sable est plus avantageuse par comparaison avec le béton ordinaire car ce matériau permet de réduire les rebonds de moitié (15% contre 30%). Ceci est particulièrement attribué à deux effets, à savoir la méthode de projection utilisée et la granulométrie du BS. Ce béton offre aussi l'avantage d'une mise en application sans poussière.



Figure I.8 : Panneau 3D en BS projeté (Benaïssa et al. 2008).

Ces mêmes chercheurs Benaïssa et al (2015) ont aussi examiné les propriétés mécaniques du béton de sable fibré, aux deux états frais et durci, projeté par voie humide et l'ont ensuite comparé avec le béton fibré projeté par voie sèche. Ils ont alors trouvé que le retrait de dessiccation est plus élevé au jeune âge, mais devient progressivement constant au cours du temps.

Les résultats de l'expérience indiquent aussi que le BS fibré projeté par voie humide donne une surface mieux finie, plus homogène, plus dense et plus compacte par comparaison avec celle obtenue avec le béton ordinaire fibré (Benaïssa et al. 2015b).

I.5.5.2. Bétons de sable fluides

Ce n'est que récemment que les bétons fluides ont été développés avec comme objectif d'améliorer les conditions d'exécution et d'augmenter la productivité des chantiers tout en assurant une qualité et une bonne durabilité des ouvrages. Notons que le béton de sable fluide s'est avéré très intéressant dans certaines conditions d'utilisation, telles que par exemple l'absence de vibrations, l'accessibilité difficile aux zones ferrillées et aux formes complexes dans les coffrages, et le pompage du béton sur de longues distances. En outre, l'absence partielle ou totale des gros granulats dans le BS minimise le risque de ségrégation (Ambroise J 1993).

Par ailleurs, ce type de béton est très avantageux dans plusieurs applications en génie civil. On peut citer par exemple les pieux forés, les injections et les reprises en sous-œuvre. Ce béton possède une fluidité qui est assurée par l'addition d'adjuvants superplastifiants qui permettent de limiter la quantité d'eau ajoutée car cette dernière peut entraîner une réduction des performances physico-mécaniques et de la durabilité du béton (Bouziani 2013). A cet effet, Bouziani et al. (2012) ont rapporté qu'une quantité de 10% de sable de dune permet d'avoir un béton de sable coulant avec une bonne fluidité et une meilleure performance en termes de résistance à la compression à 28 jours.

I.5.5.3. Bétons de sable autoplaçant

En général, le béton autoplaçant à base de sable est considéré comme un béton de sable coulant dont le principal agrégat est le sable naturel ; il peut être coulé sans compactage et sans vibration. Des études ont dernièrement été réalisées par Abidelah et al (2009) sur les bétons de sable autoplaçants (BSAP) dans le but d'améliorer ses caractéristiques en utilisant des déchets de carrière dont les propriétés, à l'état frais et à l'état durcis, sont en accord avec les recommandations de l'Association Française de Génie Civil (AFGC). D'autre part, Bouziani et al (2011) ont examiné l'impact de la proportion de poudre de marbre utilisée sur les propriétés du BSAP, à l'état frais et à l'état durci. Ils ont trouvé que lorsque la teneur en poudre de marbre augmente dans ce béton, i.e. entre 150 kg/m^3 et 350 kg/m^3 , ses propriétés à l'état frais s'améliorent et le temps d'écoulement au moyen d'un entonnoir en V diminue de 5 à 1,5 s alors que le mini-affaissement du cône augmente de 28 à 34 cm.



Figure I.9 : Essais d'étalement au mini-cône.(Bouziani 2013).

Bouziani (2013) a montré que la fluidité des BSAP, qui est représentée par l'étalement au mini-cône, augmente avec l'accroissement du dosage en FC mais diminue à mesure que le dosage en SD augmente.

I.5.5.4. Bétons de sable à hautes performances

Les bétons de sable à haute performance (BSHP) sont des matériaux assez nouveaux qui se caractérisent par des résistances très élevées, i.e. supérieure à 58 MPa, avec des particules de diamètre ne dépassant pas 5 mm. Ainsi, Benamara et al (2019) ont minutieusement étudié les paramètres de formulation, comme le rapport (E/L), le rapport (G/S), le type de ciment utilisé et son dosage, le type et quantités de superplastifiant employé, et ce afin de passer du BS au BSHP durable.

Cette étude a permis de montrer que la combinaison des fumées de silice et du sable de dune dans les mélanges donne une microstructure très dense avec une faible porosité, ce qui peut produire un béton très résistant à l'infiltration d'agents agressifs.

I.5.5.5. Bétons de sable Fibré

Lorsqu'on ajoute de la paille d'orge au béton de sable, ses propriétés thermophysiques ainsi que sa résistance à la flexion s'améliorent d'une manière significative. Cependant, lorsque la teneur en paille d'orge augmente, la résistance à la compression du béton formulé diminue alors que ses variations dimensionnelles augmentent (Belhadj et al. 2016).



Figure I.10 : Apparence des fissures dans les échantillons de béton de sable fibré après l'essai de flexion (Belhadj et al. 2016).

D'autre part, Ammari et al. (2020) ont examiné l'effet des fibres d'acier et de paille d'orge traitées à l'eau chaude sur le comportement du béton de sable qui est exposé à des conditions climatiques et environnementales sévères. La teneur en pailles d'orge a été fixée à 15 kg/m³ alors que la proportion de fibres d'acier variait entre 0 et 2 %. Les résultats de cette étude ont montré que la profondeur de carbonatation du béton diminuait, avec un taux d'environ 41 %, lorsque la proportion de fibres d'acier dans le béton de sable augmentait.

I.6. Propriété mécanique et microstructure du béton de sable

I.6.1. Propriété mécanique du béton de sable

Il a été montré qu'en général les résistances mécaniques des bétons de sable sont plus petites que celle des bétons ordinaires. Cependant, les bétons de sables à hautes performances mécaniques peuvent aussi être obtenus, même à court terme.

En se basant sur le projet national français, des pays d'Afrique du Nord ont décidé de se remettre à la recherche sur le béton de sable afin de profiter des quantités énormes de sable de dune existant dans ces pays (Belhadj et al. 2016 ; Belhadj et al. 2014 ; Bouziani et al. 2012; Guettala et al.2002.). La plus grande partie des études menées sur le béton de sable cherchaient principalement à améliorer la résistance à la compression du béton. Plus particulièrement, la recherche sur le béton de sable en Algérie, a été menée comme suit :

- Abdelhamid Guettala et al (1999) ont rapporté que lorsque le rapport (E/C) augmente, la résistance du cube dans le béton de sable de dune augmente aussi, ce qui n'est pas le cas pour le béton de sable de rivière. En outre, l'incorporation d'additions permet d'augmenter la résistance du béton de sable de dune jusqu'à 40%.
- Quant à Bédérina et al (2005) , ils ont montré qu'utiliser un mélange de sables de dune et de rivière dans des proportions données, en ajoutant un filler calcaire, permet d'avoir un béton de sable plus maniable, plus compact et plus résistant.
- Kettab et al (2007) , ils ont examiné l'effet de l'ajout de la poudre de caoutchouc sur le comportement du béton de sable. Ils ont alors réussi à montrer que l'addition de la poudre de caoutchouc lors de la préparation du béton de sable, même avec des taux faibles, n'est pas recommandée lorsqu'il s'agit d'améliorer la résistance mécanique.
- S'agissant de Mohamed et Djamila (2018) , ils ont étudié l'impact des déchets de caoutchouc, plus précisément ceux provenant des chaussures usagées rejetées dans la nature, qui sont incorporés dans la masse de béton de sable concassé. Ils ont trouvé que l'addition de 40% de déchets de caoutchouc dans le béton de sable a engendré une réduction de 20% de la résistance à la compression. Ces mêmes constatations ont été faites pour le cas de la résistance à la flexion.
- D'autre part, Bouziani et al (2012) ont montré que le sable de dune est un matériau capable d'optimiser la distribution granulométrique du sable de rivière, et par conséquent il peut améliorer la fluidité et les propriétés mécaniques des bétons de sable coulant.
- Guendouz et Boukhelkhal (2019) ont mené une étude sur les propriétés du béton de sable fluide incorporant des déchets céramiques, particulièrement ceux issus des carrelages et sanitaires en céramique. Ils ont alors noté que la résistance à la compression à 28 jours des mélanges contenant 60 % de déchets de carreaux de céramique et 50 % de déchets d'appareils sanitaires avait augmenté d'environ 100 % et 51 %, respectivement. Quant à la résistance à la flexion du béton de sable fluide, elle avait augmenté d'environ 48 % et

34 %, pour les mélanges contenant 60 % de déchets de carreaux de céramique et 60 % de déchets d'appareils sanitaires.

- Similairement, Biskri et al (2022) ont étudié l'impact des produits d'emballage et des bouteilles PET (déchets plastiques) sur les propriétés du béton de sable. Les résultats expérimentaux issus de cette étude ont permis alors de dire qu'une matrice cimentaire renforcée avec un taux de 1 % de fibres PET peut améliorer les propriétés mécaniques du béton de sable.

I.6.2. Microstructure du béton de sable

En 1997, Lange et al (1997) ont indiqué que les propriétés mécaniques et la durabilité du béton sont principalement affectés sa microstructure. En plus, il a été rapporté que la microstructure du béton de sable reste continue, homogène et compacte jusqu'à un certain degré. De plus, la pâte de ciment à l'état durci demeure amorphe et ne présente pas de fissures remarquables. La microscopie électronique à balayage a permis de remarquer que l'hydratation se produit normalement et qu'aucune texture particulière ne caractérise la morphologie de l'interface (auréole de transition) entre la pâte et les granulats (Sablocrete 1994).

A ce propos, Benaissa et al (1993) ont rapporté que la microstructure du béton de sable est une structure continue et la pâte de ciment présente un aspect amorphe. Par ailleurs, les images MEB montrées sur la Figure I.11 suggèrent que l'hydratation s'est développée de façon normale. En effet, la Figure I.11A montre clairement un matériau dense ayant une texture homogène avec absence remarquable de fissurations, alors que la Figure I.11B présente une pâte de ciment à l'état durci ayant une bonne compacité avec une structure amorphe. Cependant, la Figure I.11C indique que les grains de sable sont, dans l'ensemble, assez bien enchevêtrés à l'intérieur de la pâte cimentaire et aussi dans les zones de transition interfaciales entre la pâte de ciment durci et les granulats de sable.

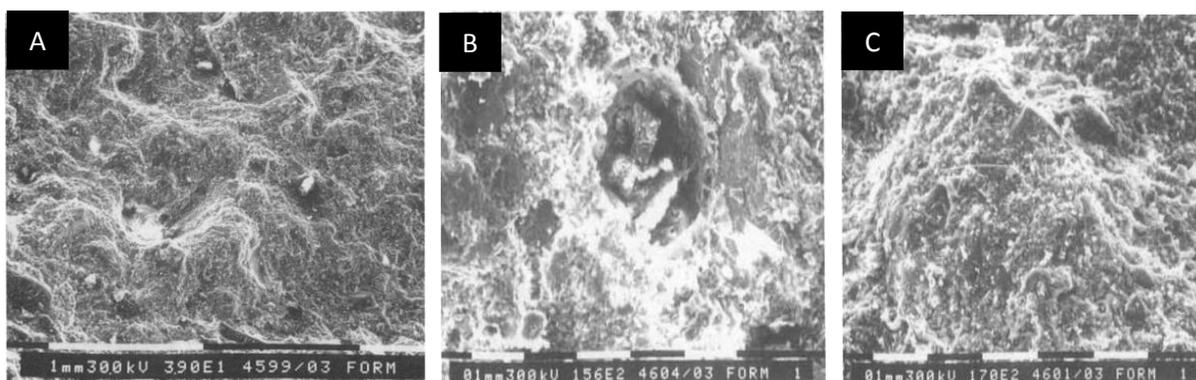


Figure I.11 : A - Aspect global du béton (les grains de sable sont bien enveloppés dans la pâte), B - Pâte de ciment à l'état durci (produits hydratés dans un pore), C - Pâte de ciment à l'état durci (bonne adhérence, pas de fissures, pâte homogène) - (Benaissa et al. 1993).

Il est intéressant de rappeler que Bederina (2000) a examiné trois types de béton de sable à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) et a réussi à montrer que la pâte de ciment durcie est relativement compacte et présente un aspect homogène (Figure I.12).

Il faut noter aussi Bederina (2007) avait déjà tenté de valoriser les matériaux locaux en réutilisant des déchets industriels, tels que les copeaux de bois, à des proportions entre 0 et 160 kg/m³, et ce en vue de formuler des bétons de sables. Ce même chercheur et son équipe ont également mené une étude microscopique sur le béton de sable incorporant des déchets de bois, et ont montré que les deux bétons, à base de sables alluvionnaire et dunaire, exhibent une surface qui a une apparence assez homogène et compacte, indépendamment de la quantité de copeaux de bois existant dans la composition (Figure I.13).

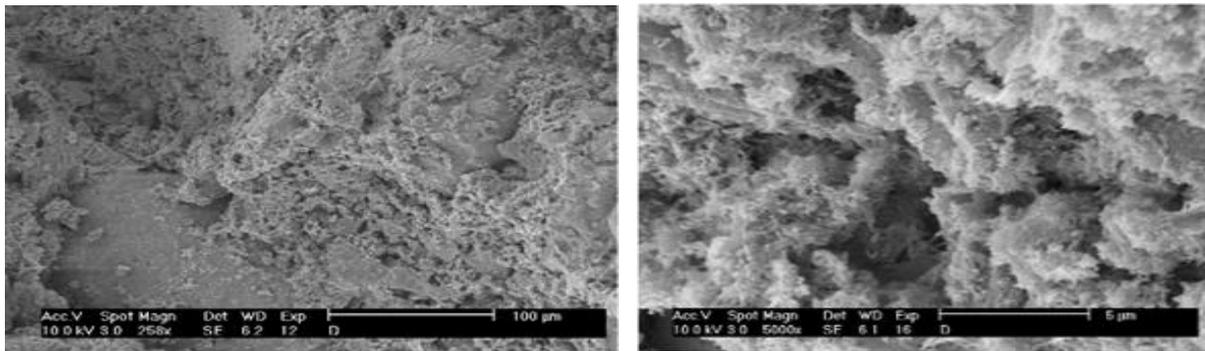


Figure I.12: Liaison entre la pâte et les granules dans le béton de sable de dune (Bederina 2000).

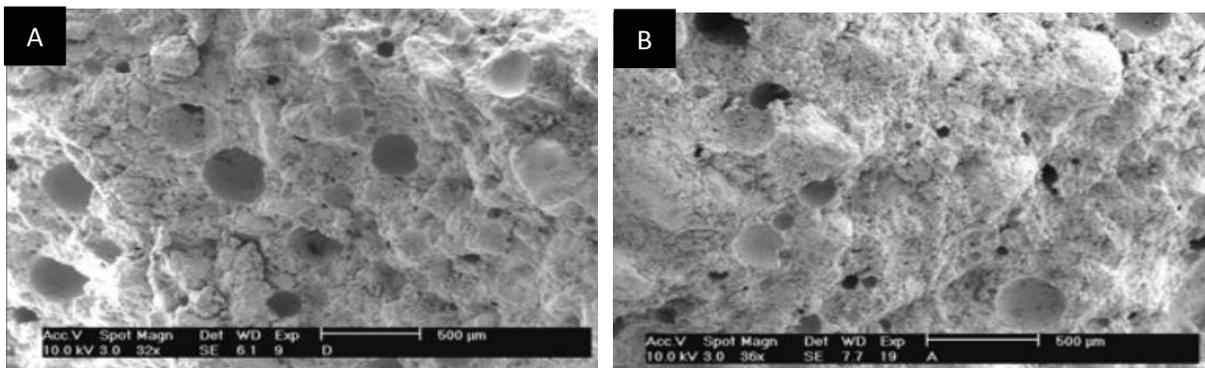


Figure I.13 : Vue générale du béton de sable - A: Béton de sable dunaire, B: Béton de sable alluvionnaire (Bederina 2007).

Par ailleurs, des analyses microstructurales ont été effectuées afin d'observer les changements microscopiques qui pourraient se produire à l'intérieur des pâtes de ciment Portland ordinaire et dans le sable de dune broyé (CPO-SDB). A cet effet, Alawad et al (2014) ont préparé des compositions qui contiennent 0%, 10%, 20%, 30% et 40% de sable de dune broyé en substitution partielle du ciment.

Les images obtenues par microscopie électronique à balayage (MEB) de la surface de rupture des pâtes durcies sont présentées en Figure I.14 alors que les résultats de l'analyse EDX des mélanges correspondants sont donnés sur la Figure I.15.

Ainsi, la Figure I.14-a illustre l'image MEB du CTRL-NC (NC: normal curing ou durcissement normal). Signalons aussi que des plaques CH, des formes d'ettringite en forme d'aiguille ainsi que des pores noirs ont également été remarqués. Sur l'image MEB de la Figure I.14-b de la même pâte durcie en autoclave, de grandes tiges cristallines de CH et une structure cellulaire en nid d'abeille de silicate de calcium hydraté (CSH) ont été constatées. En outre, Alawad et al (2014) ont remarqué que la microstructure totale du CTRL-AC était hétérogène, ce qui était certainement dû à l'hydratation rapide dans les conditions d'autoclave.

Par ailleurs, les images SEM de M30-AC et M40-AC sont présentées respectivement sur les Figures I.14-c et d ; elles montrent des microstructures denses, compactes et uniformes. En plus, des structures cristallines, en forme de plaques de CSH, ont été remarquées au centre de ces images. Il est important de souligner que le sable de dune broyé qui a été additionné a réagi avec le CH résultant de l'hydratation du ciment Portland ordinaire et a entraîné la formation de variétés cristallines de CSH qui a rempli les pores et a par conséquent amélioré la compacité de la pâte hydratée.

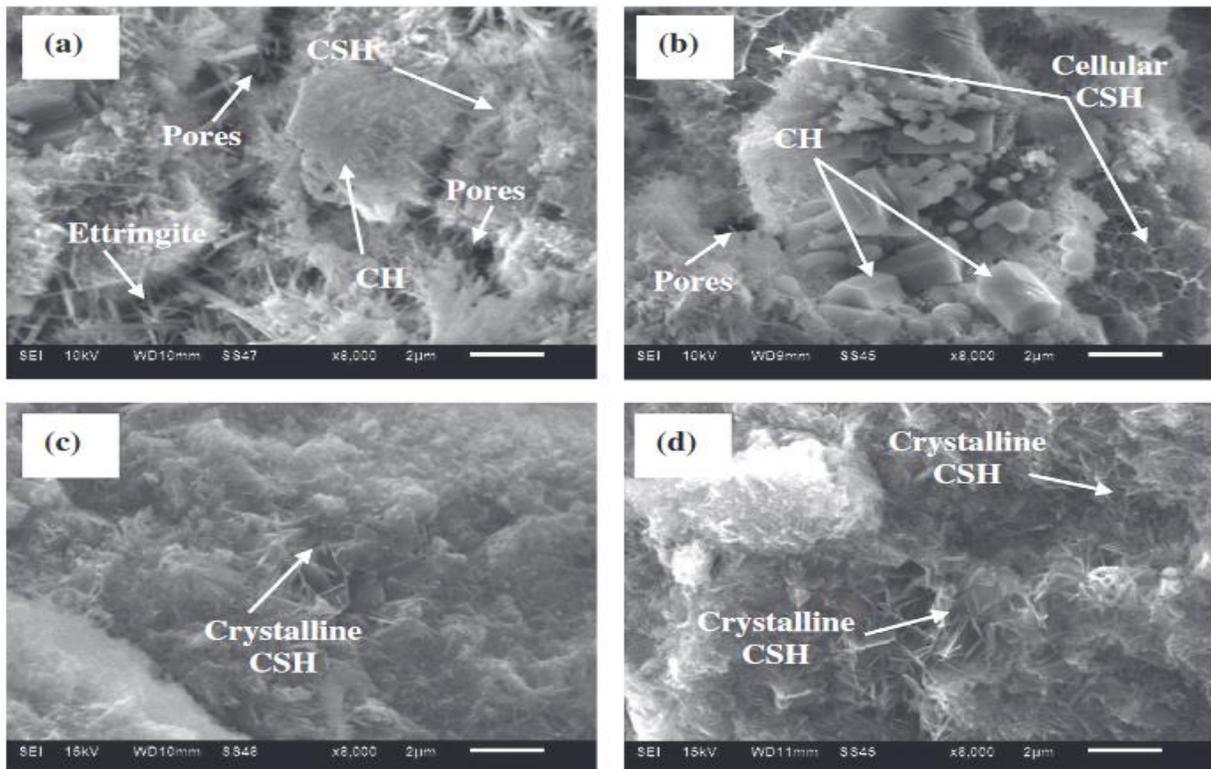


Figure I.14 : Images MEB des mélanges durcis: (a) CTRL-NC, (b) CTRL-AC, (c) M30-AC et (d) M40-AC (Alawad et al. 2014).

En outre, l'image MEB et l'analyse EDX de CTRL-NC sont présentées dans les Figures I.15a et b, respectivement. Ainsi, l'analyse EDX indique que Ca et Si existent en grandes concentrations, ce qui a favorisé la formation de la phase CSH. Quant aux Figures I.15 c et d, elles montrent l'image MEB et l'analyse EDX du mélange CTRL-AC. Ces figures révèlent l'existence de grands pics de Ca et un petit pic de Si, ce qui témoigne de la formation de CH.

Pour ce qui est des Figures I.15 e et f, elles présentent l'image MEB et l'analyse EDX du mélange M30-AC. L'analyse EDX a montré que le produit obtenu était CSH avec un rapport du calcium sur la silice (Ca/Si) approximativement égal à l'unité. Enfin, les Figures I.15 g et h présentent l'image SEM et l'analyse EDX du mélange M40-AC. Elles établissent la présence d'un grand pic de Si qui correspond à la silice de quartz qui n'a pas réagi.

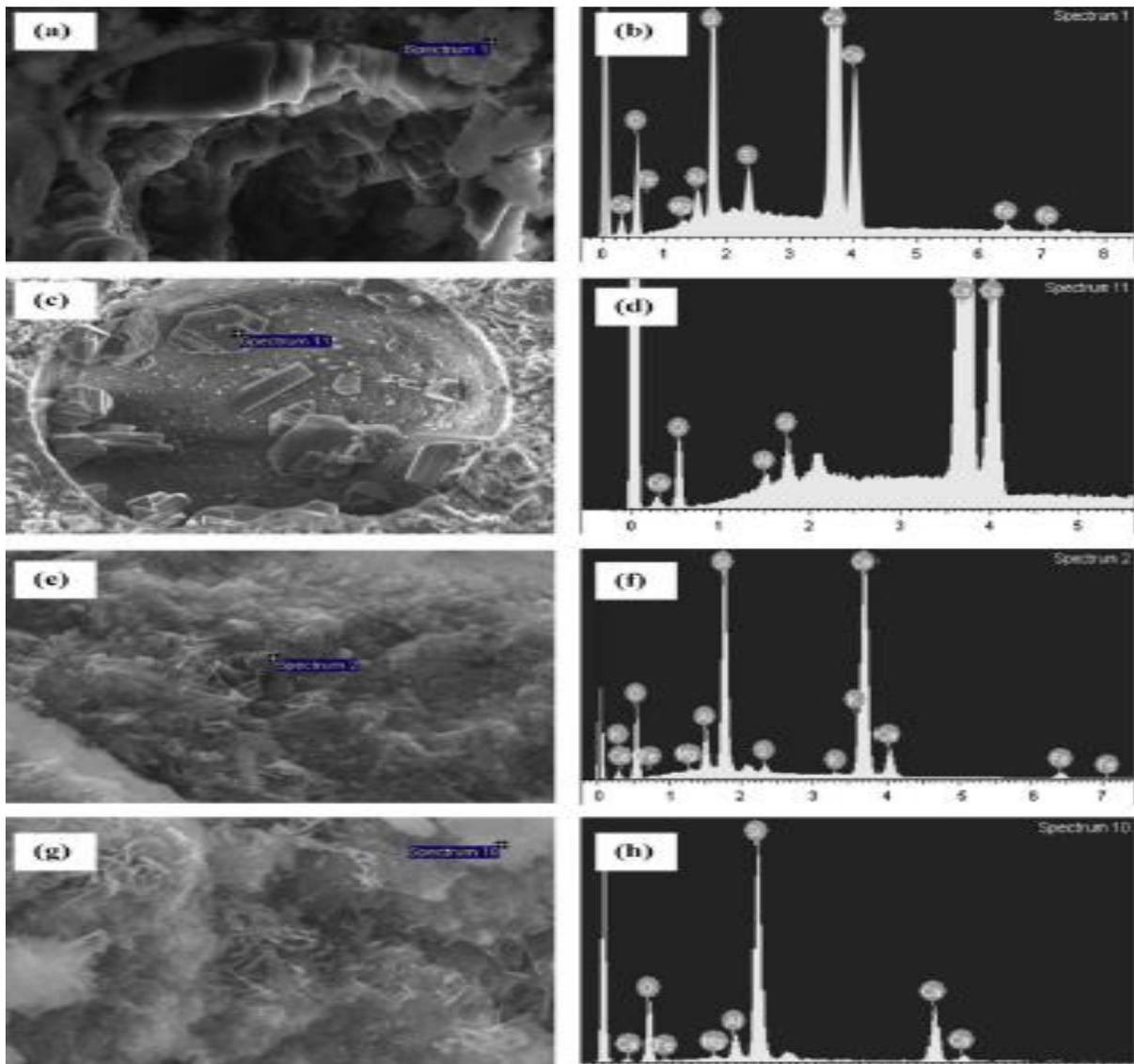


Figure I.15 : Image EDX des mélanges à l'état dur: (a) CTRL-NC, (b) CTRL-AC, (c) M30-AC et (d) M40-AC (Alawad et al. 2014).

I.7. Formulation du béton de sable

D'après la revue de la littérature, il y a deux méthodes de formulation des bétons de sable. Selon, Abdeldjalil ZRI (2010), il y a d'abord la méthode qui a été adoptée par le projet Sablocrete qui est à l'origine de la modification de la norme révisée P 18-500, et ensuite, il y a celle qui a été suggérée par Cissé (1996).

I.7.1. Méthode SABLOCRETE :

Ici, deux approches de formulation du béton de sable sont données. La première est théorique et est principalement basée sur l'optimisation de la compacité de ce matériau en prenant en compte la relation de Caquot, alors que la deuxième est expérimentale et est basée sur la préparation des gâchées (Sablocrete 1994).

I.7.1.1. Méthode théorique

Elle a été établie sur la base de la formule de CAQUOT. Elle permet d'estimer la compacité du squelette granulaire. Cette compacité correspond au complément à l'unité de la porosité. CAQUOT a établi une expression mathématique au début du 20ème siècle afin d'évaluer le volume de vides dans un mélange granulaire en fonction de son étendue granulaire (d/D) en utilisant la relation suivante :

$$v = v_0 \left(\frac{d}{D}\right)^{1/5} \quad \text{I.2}$$

Où V_0 est une constante expérimentale égale à 0,5; D et d sont les dimensions des mailles du tamis retenant, respectivement, 10% et 90% du granulat.

Dans cette méthode, le dosage en fines du béton de sable, moyennant quelques hypothèses simplificatrices, correspond à la moitié de la porosité de l'étendue granulaire de sable.

$$[\text{fines}] = 0.38 \left(\frac{0.08}{D}\right)^{1/5} \quad (\% \text{ volumique}). \quad \text{I.3}$$

Notons que les dosages en ciment et en additions peuvent être obtenus en résolvant le système suivant :

$$\begin{cases} \text{Ciment} + \text{addition} = [\text{fines}] \\ \text{Ciment} + \text{addition} = \text{optimum d'activité} \end{cases} \quad \text{I.4}$$

Il est utile de rappeler que l'optimum d'activité correspond au seuil au-delà duquel l'activité des fillers ne contribue plus à l'amélioration des performances mécaniques du matériau préparé.

L'ensemble (squelette granulaire + fines) présente, à ce niveau-là, une compacité optimale qui induit une porosité minimale. Notons que cette porosité correspond à la somme d'un volume d'eau (e) et d'un volume de vides piégés (v). Rappelons que la porosité minimale théorique du béton peut être déterminée en se basant sur les résultats des études précédemment menées par CAQUOT sur la compacité. Elle est donnée par l'expression :

$$(e+v)_{\min}=0.8 \left(\frac{d}{D}\right)^{1/5} \quad \text{I.5}$$

Où : (d/D) est l'étendue granulaire du squelette granulaire total.

La borne inférieure d de l'étendue granulaire est difficile à évaluer car des effets de floculation peuvent se produire dans l'eau à l'échelle des fines particules. Il est important de distinguer deux cas différents pour l'estimation de la valeur de d :

Mélange totalement défloculé à l'aide des agents défloculants : Dans ce cas, d peut être défini comme la moyenne harmonique des dimensions des grains, assimilés à des sphères, du composant le plus fin. On a alors la relation suivante :

$$d = \frac{60}{f \cdot \rho} \quad \text{I.6}$$

Où f est la surface spécifique (finesse Blaine, cm^2/g) et ρ est la masse volumique des grains (g/cm^3).

Mélange non défloculé : Pour un mélange non défloculé, il n'est pas aisé d'attribuer une valeur exacte à d puisque les dimensions des floes dépendent de conditions physicochimiques qui sont assez complexes. Cette valeur est généralement prise entre 20 et 25 μm .

Par ailleurs, afin d'estimer le dosage en eau, il est nécessaire d'évaluer au préalable le volume d'air piégé. Pour cela, la formule suivante est utilisée pour obtenir un ordre de grandeur. Ainsi, des proportions d'air d'environ 3 à 5% sont alors obtenues :

$$[\text{vides}] = K \cdot [\text{eau}] \quad (\text{l}/\text{m}^3) \quad \text{I.7}$$

Ici K peut varier entre 0,2 et 0,25

Finalement, le dosage en sable peut être trouvé en soustrayant d'un mètre cube du mélange la somme des dosages des composants préalablement déterminés, comme suit

$$[S] = 1000 - [\text{Fines}] - [e] - [v] \quad \text{I.8}$$

D'autre part, la résistance à la compression du mélange peut être évaluée en appliquant la formule de Féret modifiée ci-dessous :

$$R_b = \frac{K_f \cdot R_c}{\left(1 + \frac{3.1(e+v)}{c(1+K_1+K_2)}\right)^2} \quad \text{I.9}$$

Où : K_f est le coefficient granulaire (entre 4,5 et 5); R_c est la vraie classe du ciment (MPa); e est le dosage total en eau (l/m^3); v est l'air piégé (l/m^3); C est le dosage en ciment (kg/m^3); R_b est la résistance à la compression du béton à 28 jours (MPa); k_1 est le coefficient pouzzolanique; k_2 est le coefficient d'activité du filler calcaire.

Aussi, les coefficients sont donnés par::

$$k_1 = K_{cv} \cdot \frac{c_v}{v} + K_{fs} \cdot \frac{f_s}{c} \quad \text{et} \quad k_2 = K_{fil} \cdot \frac{FIL}{c} \quad \text{I.10}$$

Où K_{cv} , K_{fs} , K_{fill} sont les coefficients d'équivalence en ciment des différentes additions en fines, et CV, FS, FIL représentent les dosages en cendres volantes, fumée de silice, et filler calcaire (kg/m^3), respectivement.

I.7.1.2. Méthode expérimentale

La méthode expérimentale, qui est basée sur la méthode de Baron et Lesage, a pour objectif de formuler un béton de sable ayant un squelette granulaire le plus compact possible et ce suivant les caractéristiques de pompabilité, faculté de moulage, et capacité de projection, requises (Sablocrete 1994). La formulation du béton de sable suit les étapes suivantes :

1/ Détermination d'une formule de base sans fines d'addition

- Choisir un dosage en ciment : Tout d'abord, le dosage minimal en ciment est prescrit par les normes ; il est fait suivant les exigences du cahier de charge établi. Il faut noter aussi que le dosage en ciment doit rester constant tout au long de l'étude.
- Fixer le dosage en eau : Le dosage en eau (e) est généralement fixé selon l'expérience. Il est ensuite ajusté, en cas de nécessité, suivant la maniabilité voulue.

$$E = \frac{800}{1+\alpha} \left(\frac{d}{D}\right)^{1/5} \quad \text{I.11}$$

Ici E est la teneur en eau en (l/m^3) ; α est un paramètre variant entre 0,1 et 0,15; (d/D) est l'étendue granulaire du squelette granulaire total.

- Estimation de dosage du sable : Il est bien possible d'évaluer la proportion de sable en retranchant les volumes de tous les autres composants dans un volume unitaire (1 m^3), en incorporant un volume donné V_a d'un adjuvant fluidifiant, qui est nécessaire à la défloculation du mélange. Puisque le béton de sable contient toujours un volume d'air v entre 2.5 et 5%, on peut alors écrire :

$$V_c + V_e + V_a + V_{\text{air}} + V_{\text{sable}} = 1000 \text{ (litres)} \quad \text{I.12}$$

- Réglage de la maniabilité et du rendement : Le mélange contenant le ciment, l'eau, le sable et l'adjuvant est supposé avoir un temps d'écoulement entre 7 et 10 secondes, mesurées au maniabilimètre LCL.

2/ Détermination du dosage en fine d'addition

Le dosage en fines d'addition peut être déterminé en préparant un certain nombre de gâchées avec un rapport (E/C) constant, et en utilisant différents dosages en fines. Notons que pour chaque gâchée, la masse apparente réelle est comparée avec la masse volumique apparente théorique afin de déterminer la maniabilité.

3/Adaptation de la maniabilité à la mise en œuvre

Là, le dosage en sable dans un mètre cube de béton doit être corrigé jusqu'à atteindre la maniabilité voulue et arriver à avoir des masses volumiques apparentes théorique et réelle égales.

4/ Contrôle de la résistance.

Dans ce cas-là, des essais mécaniques sont réalisés afin de contrôler les résistances mécaniques. Bien évidemment, les dosages en eau et/ou en adjuvant doivent être modifiés si les résistances à la compression obtenues ne sont pas satisfaisantes. Ensuite, l'étude est refaite en modifiant le dosage en ciment.

I.7.2. Méthode Cissé :

Elle est basée sur l'expression empirique qui donne le dosage minimal en fines en fonction du diamètre (D) du granulat utilisé. A la différence des méthodes couramment utilisées pour la formulation du béton et à celle de Sablocrete dont l'objectif est de déterminer la porosité minimale, la méthode de Cissé (1996) cherche à trouver un mélange de composants, qui pour un dosage en ciment donné, la résistance doit être maximale.

Cette méthode est basée sur l'expression empirique ci-dessous :

$$C' = C_{\min} = \frac{f_{cj} + 250}{\sqrt[5]{D}} \quad \text{I.13}$$

Comme cela a été proposé par le projet Sablocrete (1994), le rapport de la masse des fines sur celle du squelette granulaire doit varier entre 0,2 et 0,3. Il est obtenu en utilisant la formule ci-dessous :

$$r = \frac{C + F}{C + F + \sum_{i=1}^n S_{gi}} \quad \text{I.14}$$

Notons que C' correspond à la quantité de ciment, de fines de sables et de sable fillérisé (kg/m^3); C est la quantité de ciment (kg/m^3); F est la quantité de fillers ($< 80\mu\text{m}$) dans le sable et le sable fillérisé; D est le diamètre maximum de l'ensemble des granulats (mm); f_{cj} est la résistance caractéristique (Bars); r est le pourcentage total de fines, y compris le ciment; et S_{gi} est la quantité de sable sans fillers (kg/m^3).

La résolution du système suivant permet de déterminer le dosage en sables. Pour cela, il est nécessaire de déterminer d'abord la quantité de fillers à utiliser.

$$\begin{cases} \sum_1^n S_{gi} = C' \frac{1-r}{r} \\ \sum_1^n f_i S_{gi} = \sum_1^n F_i \end{cases} \quad \text{I.15}$$

Ici F_i est la quantité de fillers dans le sable et f_i le pourcentage de fillers dans le sable.

La relation ci-dessous permet de déterminer les quantités de sables :

$$S_i = \frac{S_{gi}}{1-f_i} \quad \text{I.16}$$

Dans le cas où les valeurs de f_i sont petites, cette relation devient alors :

$$S_i = S_{gi}(1 + f_i) \quad \text{I.17}$$

En outre, une fois le rapport (E/C) fixé en considérant la surface spécifique des granulats et en tenant compte des conditions d'exposition de l'ouvrage, il devient alors possible de calculer le dosage en eau. Il a été trouvé que la plus grande valeur théorique que ce rapport massique peut atteindre est 0,70.

I.8. Présentation du béton de sable compacté (BSC)

I.8.1. Définition du BSC

C'est un béton de sable obtenu par compactage. Le dosage en liant, qui peuvent être soit du ciment ordinaire, soit du ciment avec des cendres volantes, soit un liant routier, doit varier entre 250 et 330 kg/m³. Il faut souligner que pendant la préparation du mélange, la teneur en eau doit être bien contrôlée car autrement la mise en application du béton sera très difficile, voire même impossible. Il faut noter que les bétons de sable compactés (BSC) reçoivent en surface, suivant la densité du trafic routier, soit un béton bitumineux (BB), soit un béton bitumineux très mince (BBTM), soit un enduit. Dans le cas où le BB serait utilisé, un système anti-remontée de fissures devrait alors être appliqué (Sablocrete 1994).

Dans le cas où ce nouveau matériau serait utilisé dans les chaussées, il pourrait être appliqué à différentes structures selon le niveau de circulation des camions et des conditions environnementales du site. Par exemple, la structure d'un trottoir pourrait être composée de dalles en BSC et recouverte de 38 mm d'asphalte mélangé à chaud. Soulignons aussi que les joints sont envisagés afin d'éviter le rétrécissement et la fissuration due aux changements de température. Un espacement d'environ 4 m peut être utilisé (Sablocrete 1994).

I.8.2. Comportement mécanique du béton de sable compacté

I.8.2.1. Résistance à la compression :

Le sable qui doit être utilisé dans la formulation du béton de sable compacté (BSC) qui va servir de couche de base dans la construction des chaussées provient de différentes sources. La Figure I.16 montre trois mélanges contenant du sable concassé qui a été ramené de deux carrières différentes. Les résultats relatifs à la résistance à la compression à 28 jours (20 MPa) sont assez satisfaisants. Par contre, les mélanges contenant du sable de désert ont exhibé une résistance à la compression à 28 jours très faibles, de moins de 7 MPa. Par conséquent, il était nécessaire de procéder à la correction du sable du désert en ajoutant du sable concassé et ce en vue d'améliorer la performance des mélanges préparés (El Euch Khay et al. 2010).

Par ailleurs, une étude de faisabilité en vue d'utiliser les matériaux locaux de dragage en mer dans la formulation du BSC pour la construction de routes en Tunisie a été initiée par Othmen et al (2013) pour cela, trois différents types de sables ont été considérés, à savoir le sable de désert, le sable manufacturé (obtenu par concassage de pierres de carrière), et le sable dragué en mer provenant des ports, et ce, afin de créer des couloirs de navigation. Ces mêmes auteurs ont examiné des mélanges à base de béton de sable compacté avec des teneurs en ciment variant entre 275 et 350 kg/m³. D'autre part, la Figure I.17 présente quatre mélanges de béton de sable qui ont été précédemment formulés avec 100 % de matériaux de dragage et des proportions de ciment de 275, 300, 325 et 350 kg/m³. Ces mélanges sont dénommés BSD1, BSD2, BSD3 et BSD4, respectivement. Il a été constaté que la résistance à la compression à 28 jours augmente

avec la proportion de ciment, ce qui insinue que le rapport (E/C) diminue. Notons qu'aucune des résistances n'a pu atteindre 15 MPa.

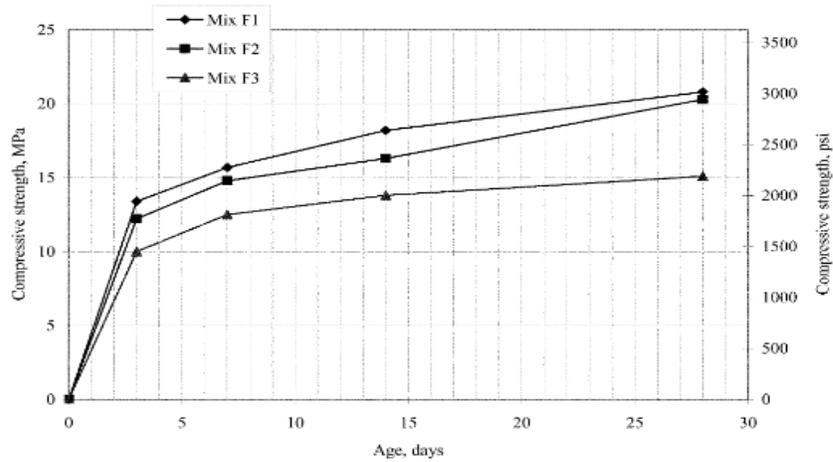


Figure I.16: Résistance moyenne à la compression en fonction de l'âge, pour différents mélanges contenant du béton de sable compacté (F1: sable concassé, F2: sable concassé, F3: sable de désert + sable concassé) – Source: (El Euch Khay et al. 2010)

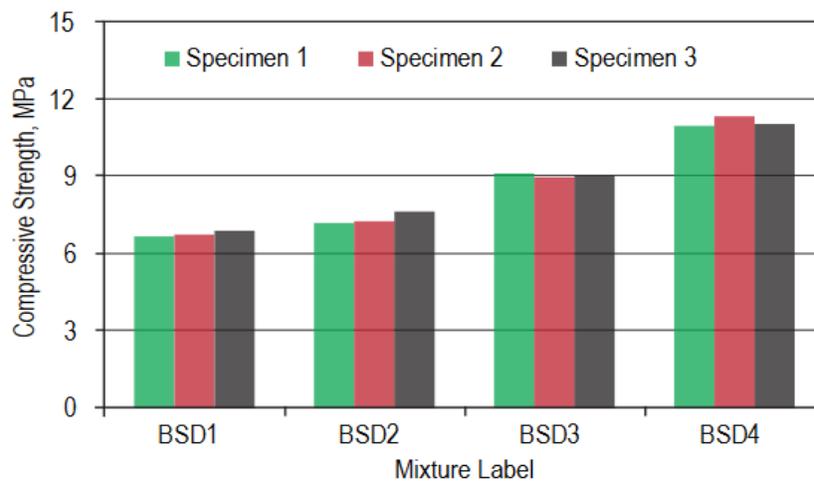


Figure I.17 : Résistances à la compression à 28 jours des mélanges de béton de sable compacté contenant 100 % de matériaux de dragage (Othmen 2013).

Quant à la Figure I.18, elle présente les résistances à la compression à 28 jours de ces mélanges. Il faut remarquer que des proportions de sable manufacturé ont été ajoutées au sable de dragage en vue d'améliorer la compacité du mélange de béton de sable et aussi d'augmenter sa résistance à la compression. Pour cela, deux proportions différentes de sable ont été considérées, à savoir 70% de sable dragué avec 30% de sable manufacturé (BSM0), et 60% de sable dragué avec 40% de sable manufacturé (BSM4). Notons que la teneur maximale en ciment de 350 kg/m^3 a été utilisée pour ces deux mélanges (Othmen 2013). En plus, un mélange témoin de béton de sable compacté (BSC), contenant 100 % de sable manufacturé, a aussi été préparé.

Similairement, la Figure I.18 indique que le sable manufacturé à un effet remarquable sur la résistance à la compression du béton préparé. En effet, il a été trouvé qu'en ajoutant 40 % de sable manufacturé, la résistance à la compression moyenne à 28 jours passe de 11 à 22 MPa. Soulignons aussi que la résistance à la compression à 28 jours du béton de sable compacté contenant 100 % de sable manufacturé est nettement plus grande que celle des autres mélanges. Elle a pu atteindre une valeur moyenne à 28 jours d'environ 35,5 MPa.

Par ailleurs, la Figure I.19 présente l'effet du dosage en ciment et du rapport (E/C) sur le même mélange de béton de sable compacté contenant 60% de sable de dragage et 40% de sable manufacturé (Othmen 2013). En outre, Khelaifa et al (2021) ont suggéré que la substitution partielle du sable de dunes par des agrégats de caoutchouc dans le béton de sable compacté engendre une diminution de la résistance mécanique. Dans notre cas, quatre substitutions à différents pourcentages volumétriques (10, 30, 40 et 50%) de sable ont été considérées, en utilisant quatre énergies de compactage (E1: 1.072 KJ/ dm³, E2: 1.608 KJ/ dm³, E3: 2.680 KJ/ dm³, et E4: 3.752 KJ/ dm³).

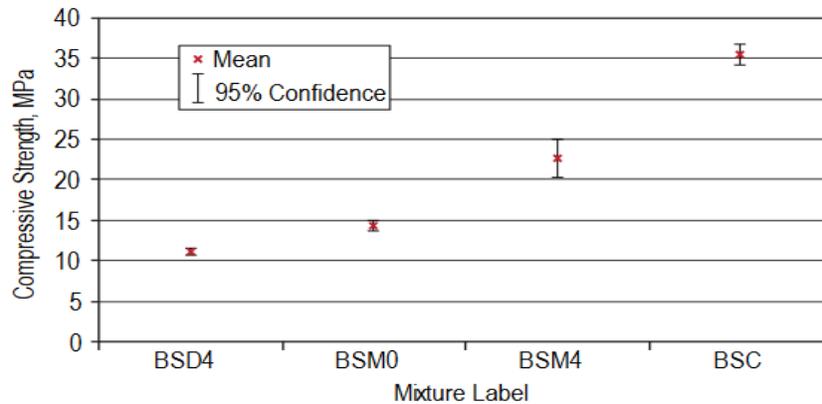


Figure I.18 : Résistance à la compression à 28 jours et intervalles de confiance à 95% pour les mélanges de béton de sable compacté BSD4, BSM0, BSM4 et BSC (Othmen 2013).

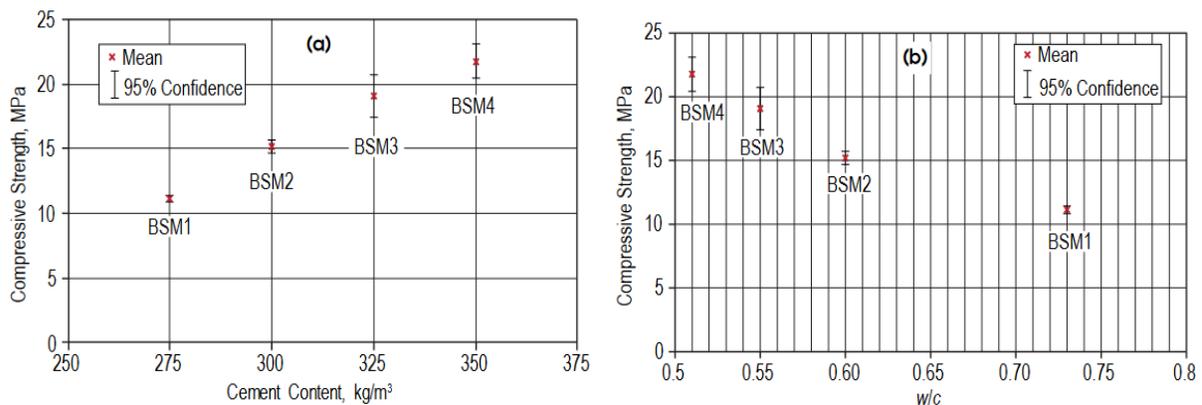


Figure I.19 : Résistance à la compression à 28 jours et intervalles de confiance à 95 % pour les mélanges de béton de sable compacté BSM1, BSM2, BSM3 et BSM4: (a) En fonction de la teneur en ciment, et (b) en fonction de rapports du poids sur le volume (Othmen 2013).

Aussi, la Figure I.20 montre l'impact du pourcentage d'ajout des granulats de caoutchouc sur la résistance à la compression du béton préparé. Cette même figure permet de voir que la résistance à la compression augmente avec l'âge du béton. Cependant, l'incorporation des agrégats de caoutchouc a engendré une diminution de la résistance à la compression du matériau obtenu.

Concernant la Figure I.21, elle montre que la résistance à la compression s'améliore lorsque l'énergie de compactage augmente.

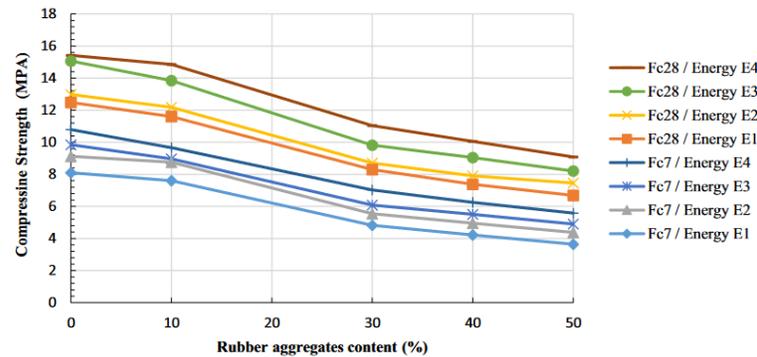


Figure I.20 : Influence du pourcentage d'ajout des granulats de caoutchouc sur la résistance à la compression (Khelaifa et al. 2021).

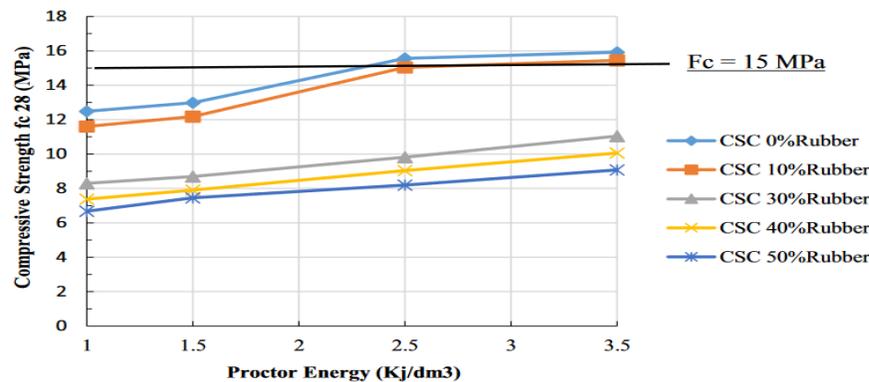


Figure I.21 : Amélioration de la résistance à la compression lorsque l'énergie de compactage croît (Khelaifa et al. 2021).

I.8.2.2. Résistance à la traction indirecte :

Pareillement, au cas du béton conventionnel, le béton de sable compacté possède une résistance à la traction qui est bien plus faible que sa résistance à la compression. Il faut signaler également que la résistance à la traction indirecte des mélanges de béton de sable concassé et compacté était égale à environ 11 % de la résistance à la compression, alors que pour le mélange F3 (sable de désert + sable concassé), elle ne représentait que 9,5 %. Par ailleurs, la résistance à la traction indirecte des mélanges de béton de sable concassé et compacté était en moyenne égale à 2,3 MPa, alors que le mélange contenant du sable de désert avait une résistance à la traction indirecte moyenne de 1,43 MPa (El Euch Khay et al. 2010).

En l'année 2013, Othmen a mené une étude sur l'utilisation du sable de dragage dans la fabrication du béton de sable compacté et a remarqué que toutes les éprouvettes examinées présentaient des valeurs de résistance à la traction indirecte plus grande que 1,5 MPa, excepté pour le mélange BSM4 (60 % de sable dragué et 40 % de sable manufacturé) qui possédait une résistance à la traction indirecte moyenne plus grande que 2 MPa, comme le montre la Figure I.23. Les résultats trouvés sont assez encourageants, et par conséquent, on peut dire que ce matériau est apte à être utilisé dans la construction des routes.

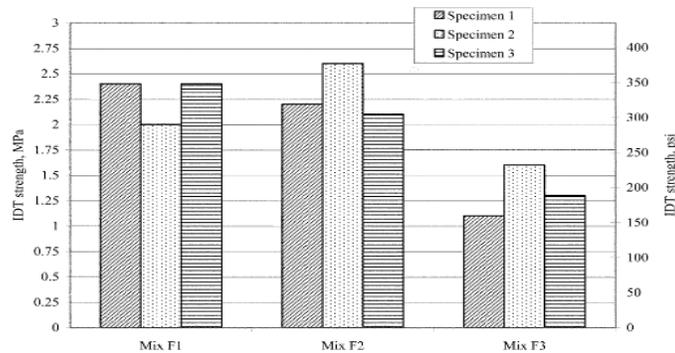


Figure I.22 : Valeurs des résistances à la traction indirecte pour différents mélanges de béton de sable compacté (El Euch Khay et al. 2010).

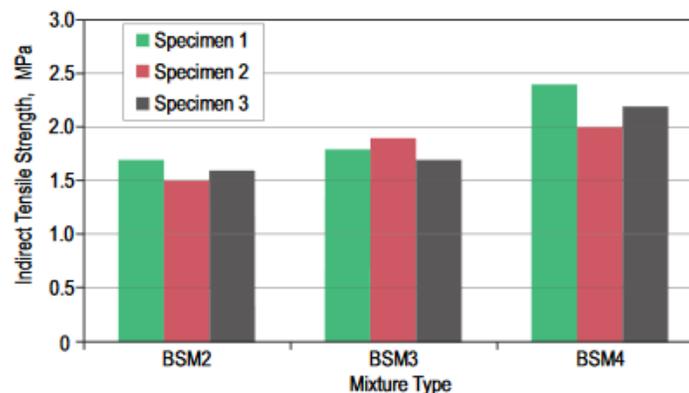


Figure I.23: Résultats de la résistance à la traction indirecte pour les Mélanges BSM2, BSM3, et BSM4 (Othmen 2013).

I.8.2.3. Module d'Young :

Les résultats relatifs au module de Young des différents mélanges de béton de sable compacté contenant du sable de désert et du sable concassé, à différents pourcentages, trouvés dans l'étude qui a été menée par El Euch Khay et al (2010) étaient de 21,1, 21,0 et 18,1 GPa. D'autre part, Othmen (2013) a évalué d'une manière assez approfondie le module d'élasticité des trois mélanges de béton de sable compacté retenu, contenant 60 % de sable de dragage et 40 % de sable manufacturé; il a trouvé que les valeurs moyennes mesurées pour les trois mélanges étaient de 18 000, 20 200 et 22 600 MPa.

I.8.2.4. Résistance à la traction fendue :

La Figure I.24 présente les résultats issus des essais de la résistance à la traction fendue des bétons de sable compactés, pour tous les bétons et pour les quatre énergies Proctor. Il a été constaté que la résistance à la traction fendue a baissé lorsque la teneur en agrégats de caoutchouc a augmenté. Par contre, comme le montre la Figure I.25, lorsque l'énergie de compactage a augmenté, la résistance à la traction de tous les bétons examinés s'est améliorée (Khelaifa et al. 2021).

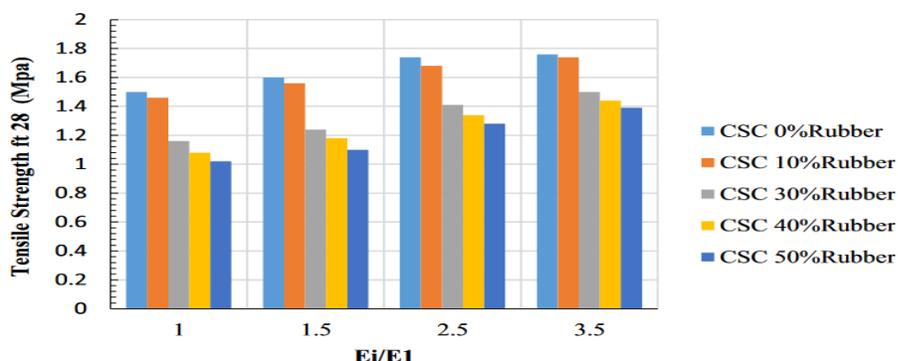


Figure I.24 : Effet du pourcentage d'ajout des granulats de caoutchouc sur la résistance à la traction (Khelaifa et al. 2021).

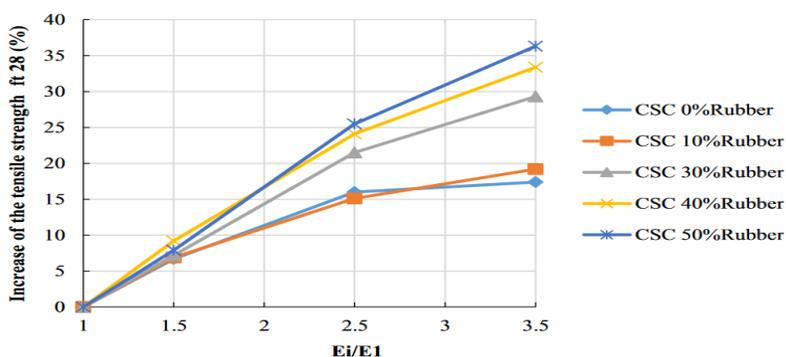


Figure I.25: Effet de l'augmentation de l'énergie de compactage sur la résistance à la traction à 28 jours (Khelaifa et al. 2021).

I.9. Conclusion

Dans le cadre de la valorisation des ressources locales, des bétons de sable ont été développés. Ces matériaux sont considérés comme relativement nouveaux dans le domaine du génie civil. Il a été montré que le béton de sable peut parfaitement remplacer le béton traditionnel. Le sable utilisé est largement disponible et donc la préparation de ce béton ne revient pas cher du tout. Dans ce chapitre, un certain nombre de caractéristiques physiques et mécaniques du BSC ont été présentés. Il s'est avéré que le BS peut avantageusement être utilisé dans la construction des routes. Ce type de béton peut donc être intégré dans la nouvelle gamme des bétons routiers, car il présente des propriétés mécaniques appropriées avec un bon rapport qualité - prix.

Chapitre 02



**Béton compacté
au rouleau**

II.1. Introduction

Le BCR se présente comme étant une technologie évolutive pour une grande diversité d'application : Barrages, routes de transport, rues, et aires de stationnement. Ce chapitre présente une revue de la documentation sur la technologie du Béton Compacté au Rouleau qui a une relation directe avec le composite étudié. En premier lieu, on a commencé par la présentation historique. Ensuite, on a mis en évidence les différents composants du BCR ainsi que les domaines d'application de ce dernier. Puis, une description est consacrée aux méthodes de formulations de ce matériau. Et enfin, on a présenté une généralité sur les performances et les caractéristiques du BCR.

II.2. Historique

Selon des chercheurs, tels que Jeuffroy and Sauterey (1989), ce sont les Romains qui ont commencé à utiliser des liants hydrauliques ou pouzzolanes dans les structures de chaussée, dès le 1er siècle avant J-C, car un certain ratio de liant (2 parts de pouzzolane naturelle + 1 part de chaux) était destiné et utilisé pour lier les pierres des voies romaines. Ces chaussées, qui étaient constituées de dalles, assuraient le roulage des chars. Elles sont considérées comme les ancêtres des chaussées rigides en béton. La technique de traitement du gravier est apparue en Suède en 1930. Comme le BCR, sa composition est la même que celle du béton ordinaire, et sa mise en place est également similaire au BCR. Cependant, le BCR et le gravier traité diffèrent considérablement par la teneur en matériau cimentaire et la granulométrie de l'agrégat. Dans la littérature, plusieurs travaux considèrent les graviers traités comme une forme de béton compacté au rouleau (ACI-325 2001; Choi et Hansen 2005).

Le concept du BCR a été utilisé, pour la première fois, aux Etats Unis en 1942 avec la construction d'une route à Yakima (Washington) par U.S Army Corps of Engineers (Gauthier et Marchand 2001). Au Canada, la première utilisation de la technologie BCR dans un projet routier remonte à 1976, lorsqu'une aire de triage, hors sol, de 52 000 m² a été construite en Colombie-Britannique sur l'île de Vancouver.

Le premier projet à grande échelle a été réalisé par U.S Army Corps of Engineers en 1984 sur une superficie de 15175 m² (Meddah 2015). Des aires, ayant des surfaces de l'ordre de 44313 m² et 107021 m², ont été réalisées à Houston (Texas) et Denver (Colorado), respectivement. Une grande surface de BCR a été construite, entre 1986 et 1988, au port de Conley et de la Marine de Moran à Boston (ACI-325. 2001).

Pour ce qui concerne l'utilisation du BCR en corps de barrages, la première utilisation a été effectuée dans les années 1960 avec la réalisation du barrage (Gere à Italie) et au Manicougan I au Canada avec un béton très ferme placé et compacté à l'aide des bulldozers. Ce béton a été considéré comme un BCR (ACI 207 1999; ASTM-C496 2011).

Au début des années 1970, la philosophie de conception et de construction, utilisant la technologie BCR, est apparue au Japon sous le nom de BCR pour construire le barrage de Shimajigawa, en utilisant en partie la technologie BCR (Figure II.1). Ce barrage a été achevé en 1981 avec un volume total de BCR de 317 000 m³. Le barrage de Willow Creek a été achevé en 1982 et est en service depuis 1983 en tant que premier barrage construit entièrement par la technologie BCR, il a un volume total de 330 000 m³ (ACI 207 1999; BaCaRa 1996).



Figure II.1 : Barrage de Shimajigawa - Japon (ACI 207 1999).

En Afrique, jusqu'à présent, le BCR est encore une technique nouvelle et elle n'a été développée que pour la construction de barrages, tels que le barrage de Rmil en Tunisie, Koudiat Asserdoune en Algérie (Figure II.2) et Ain Al Koreima au Maroc (Deghfel 2022). Récemment, la construction d'une route en BCR a été réalisée en Algérie dans la fin 2017. Ce projet, réalisé par une société française, consiste à relier la cimenterie de Lafarge Holcim M'sila, à la route nationale RN60 (Benouadah 2019).



Figure II.2 : Barrage de Koudiat-Acerdoune –Algérie (au cours de la construction) (Forbes 2007).

II.3. Qu'est-ce qu'un BCR ?

Le Béton Compacté au Rouleau est un béton qui se caractérise par sa à faible teneur en eau et son affaissement nul. Il se compose d'un mélange de ciment, d'agrégats inertes et d'eau de gâchage. Gauthier et Marchand (2004) ont indiqué qu'il est mis en place et compacté en utilisant un matériel spécifique, comme les finisseurs à haut pouvoir de compactage ou le matériel couramment utilisé en travaux publics : les rouleaux compacteurs, les niveleuses, les bulldozers, plaques vibrantes.

Le dosage en liant dans le BCR est particulièrement plus faible, qu'un béton conventionnel où la teneur en liant varie entre 60 à 300 kg/m³ (Gauthier et al. 2000). Certains ajouts minéraux, naturels ou artificiels (les fumées de silice, les laitiers et les cendres volantes) peuvent influencer sur l'amélioration des caractéristiques des mélanges de BCR, à l'état frais ou durci. De plus, les adjuvants du béton conventionnel sont aussi employés pour l'optimisation de certaines caractéristiques du BCR.

Le BCR est distingué par sa consistance qui est identique à celle d'un sol humide, alors que l'énergie de compactage est supérieure à celle de la vibration usuelle dans le cas du béton conventionnel (Gauthier et Marchand 2004).

Du point de vue composition, Anderson (1986) a indiqué, dans ses études, que le BCR est un matériau caractérisé par un volume de pâte inférieur à celui du BC, comme montré sur la Figure II.3, et que son squelette granulaire est plus compact. La teneur en eau est aussi plus faible dans le cas du BCR, comparée aux teneurs utilisées dans le cas du BC. La formulation d'un mélange de BCR doit minimiser, au maximum, le volume de vide et les granulats seront généralement enrobés d'une mince couche de pâte, vu la faible teneur en liant (Zdiri 2008).

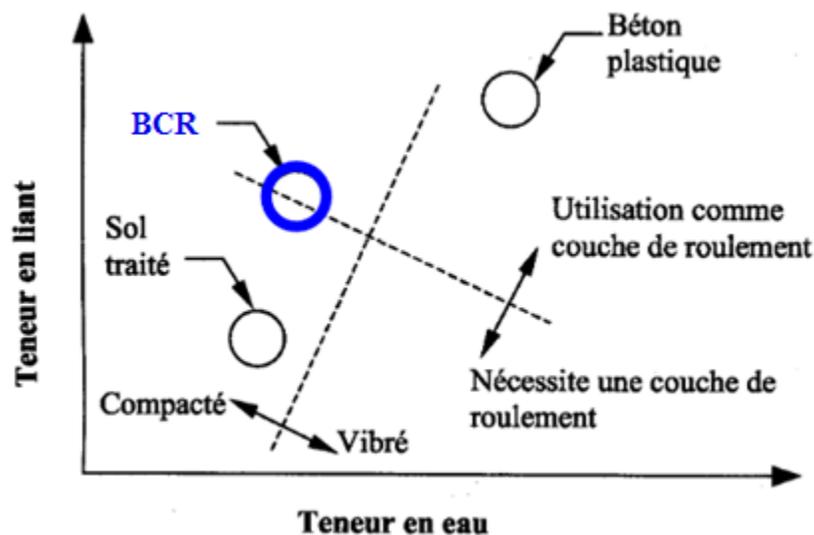


Figure II.3 : BCR selon la teneur en liant et en eau (Anderson 1986).

II.4. Composants du BCR

II.4.1. Liant

Selon les exigences requises et la destination du projet, on fait le choix du type et du dosage de ciment ; généralement la quantité de ciment représente 12 à 16% de la masse totale de ses constituants secs pour les mélanges de béton compacte au rouleau (Gauthier et Marchand 2004). Un BCR routier demande une quantité plus élevée de ciment par rapport à un BCR d'ouvrage massif (barrage), puisque les sollicitations mécaniques sont plus grandes. De plus, il est nécessaire de minimiser la quantité de ciment pour un BCR destiné aux barrages pour réduire la chaleur dégagée pendant l'hydratation. Les liants hydrauliques utilisés pour le BCR doivent présenter certaines propriétés importantes comme : une faible chaleur d'hydratation, une prise retardée ou un temps de prise assez long, une bonne résistance aux sulfates et finalement le pourcentage C_3A doit être limité pour obtenir une bonne durabilité et éviter la dégradation (Zdiri 2008).

II.4.2. Granulats

On désigne, en général, par granulats des graviers et des sables naturels. Les granulats représentent environ les trois quarts du volume du béton et constituent son squelette. Dans le cas du BCR, les granulats représentent une proportion comprise entre 75 et 85% du volume total du mélange solide. Leurs influences sur le BCR, à court et à long terme, sont remarquables (Gauthier et Marchand 2004). Afin d'éviter leur ségrégation, lors de la fabrication et leur mise en place, la grosseur des grains, pour un BCR destiné pour les routes, est de 20 mm, ce qui rend le malaxage plus facile et améliore l'homogénéité du composite. Selon USACE (2000), la structure des particules peut être optimisée en utilisant plusieurs fractions de tailles différentes. Dans la pratique, il est préférable de déterminer les fractions des granulats grossiers et des granulats fins, selon les tableaux (II.1 et I.2).

Tableau II. 1 : Distribution granulométrique idéale de granulats fins d'après (USACE 2000).

Diamètre (mm)	Tamisât cumulé (%)
9,5	100
4,75	95-100
2,36	75-95
1,18	55-80
0,6	35-60
0,3	24-40
0,15	12-28
0,075	6-18
Module de finesse	2,1-2,75

Tableau II.2 : Distribution granulométrique idéale de granulats grossiers d'après (USACE 2000).

Diamètre (mm)	Tamisât cumulé (%)		
	4,75 à 75 mm	4,75 à 50 mm	4,75 à 19 mm
75	100	/	/
63	88	/	/
50	76	100	/
37,5	61	81	/
25	44	58	/
19	33	44	100
12,5	21	28	63
9,5	14	18	41
4,75	-	-	-

II.4.3. Additions

Les additions sont définies comme des matériaux minéraux finement broyés, qui peuvent être ajoutés au BCR pour lui confier des propriétés particulières ou pour améliorer certaines de ses caractéristiques (une bonne maniabilité à l'état frais, une durabilité à l'état durci, bonne compacité). L'emploi des additions (laitier, pouzzolane, fumée de silice, cendres volantes) dans le BCR, permet aussi de réduire significativement le coût du projet par diminution de la quantité de ciment dans le mélange.

Moradi et Shahnoori (2021) ont montré que le laitier de haut fourneau granulé broyé, lorsqu'il est mélangé avec du ciment, influe positivement sur les propriétés mécaniques et certaines propriétés de durabilité du BCR. Ce dernier augmente l'adhérence et remplit les pores. L'utilisation des pouzzolanes jusqu'à 20% est bien conseillée (Madhkhan et al. 2012), car les pouzzolanes permettent d'augmenter la résistance à long terme de la chaussée en BCR. Vahedifard et al. (2010) ont également constaté que la fumée de silice était un additif minéral efficace, car l'ajout de 10 % de fumée de silice améliorerait la durabilité au gel des bétons compactés au rouleau destinés aux chaussées. De plus, la fumée de silice a un effet desséchant sur le mélange frais, il est couramment utilisé en conjonction avec un adjuvant réducteur d'eau (Pigeon et Marchand 1996).

L'addition des cendres volantes donne des résistances, à long terme, plus élevées, car la microstructure du BCR résultant est améliorée par des réactions pouzzolaniques supplémentaires (ACI-325.10R-95 1995; Pigeon et Malhotra 1995) ; le pourcentage maximal des cendres volantes incorporées est limité à 20% (Vahedifard et al. 2010). Selon Atiş et al (2004) et Cao et al (2000), les cendres volantes peuvent apporter des avantages d'ordres chimiques, comme la réduction de chaleur d'hydratation.

II.4.4. Adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques qui sont introduits dans le béton afin d'améliorer ou de modifier des caractéristiques précises ; ils sont additionnés au béton, selon une proportion qui ne dépasse pas 5% de la masse totale du ciment. La plupart des adjuvants utilisés pour la confection des bétons conventionnels, peuvent être utilisés pour les BCRs, on cite : les réducteurs de prise, les entraîneurs d'airs, les accélérateurs de durcissement et les superplastifiants. A cause de l'aspect sec du BCR, le dosage des adjuvants pour les BCRs diffère des dosages habituellement utilisés pour les bétons courants. les adjuvants doivent être ajoutés avec des quantités supérieures à celles utilisées dans le béton classique, pour être efficaces (Gauthier et Marchand. 2001). Étant donné que les revêtements BCR ne contiennent pas de matériaux de renforcement (armature), de faibles dosages d'ions chlorure dans certains adjuvants n'ont aucun effet néfaste. Cependant, des précautions doivent être prises, car certains additifs peuvent accélérer ou retarder la prise du BCR, comme c'est le cas des plastifiants et des superplastifiants (Zdiri 2008).

II.5. Domaines d'application

II.5.1. BCR en technique routière (Pavages)

Ce type d'application nécessite une quantité plus élevée de ciment et un rapport E/C plus faible par rapport à un BCR pour barrage, car les sollicitations tant mécaniques (passage des véhicules) que thermiques (cycles de gel/dégel, présences de sels fondants) y sont plus importantes (Marchand et al. 1997). La teneur en particules fines de diamètre inférieur à 80 µm doit être assez élevée, afin de faciliter la finition de la surface du béton. Le mélange employé est raide et ferme et il faut le compacter à l'aide de rouleaux compacteurs cylindriques ou pneumatiques. Alors la différence entre les techniques de BCR en barrage et en pavages réside dans le fait que les procédures pour la construction d'un pavage en BCR exigent des contrôles plus rigoureux que dans le cas des barrages.



Figure II.4 : Mise en place du BCR en pavage - Atlanta USA (Zdiri 2008).

L'utilisation du béton compacté au rouleau pour les constructions routières varie d'une épaisseur de 10 cm pour des applications industrielles à 25 cm pour les rues des villes, les aires de stationnement de camions et les halls d'entrepôts (Figure II.4). Pour résoudre le problème de ségrégation et afin de produire une surface dense et lisse, la dimension maximum du granulat est limitée à 20 mm. De plus, la résistance à la compression du BCR pour pavage varie de 15 à 40 MPa (Zdiri 2008).

Du point de vue 'durabilité', le revêtement BCR présente de bonnes performances. Il est particulièrement adapté aux routes urbaines, aux intersections à fort trafic et aux passages très fréquentés par les véhicules lourds, les installations industrielles, les voies réservées aux bus, les ports et les zones de stockage, etc. Les concepteurs utilisent ce matériau dans les chaussées lorsque des facteurs, tels que la résistance, la durabilité et l'économie sont importantes (Smith et al. 1998).

Le pavage en BCR présente plusieurs avantages, tels que la bonne résistance à la compression et à la flexion, et même au cisaillement. Le pavage en BCR ne nécessite ni armature de résistance, ni coffrages ni travaux de finition, ce qui permet des économies de temps pour la mise en place, réduisant ainsi le coût de construction. Si on le compare au BB, les BCRs nécessitent moins de travaux d'entretien, permettent, en général, une bonne adhérence et offrent des économies de carburant (ERES 1998; Gauthier et al. 2000; Gauthier et Marchand 2004; Zaniewski 1989).

Le BCR a tendance à répartir la charge sur une grande surface de la couche de forme (Figure II.5). Les revêtements BB, quant à eux, sont constitués de matériaux plus souples et moins raides, qui ne répartissent pas la charge comme le font les revêtements rigides. Par ailleurs, selon une étude de 1998 sur les coûts du cycle de vie réalisée par Saucier et al (1995) et ERES (1998), la durée de vie attendue d'une chaussée souple en BB est de 17 ans, alors que celle d'une chaussée rigide en BCR est de 34 ans.

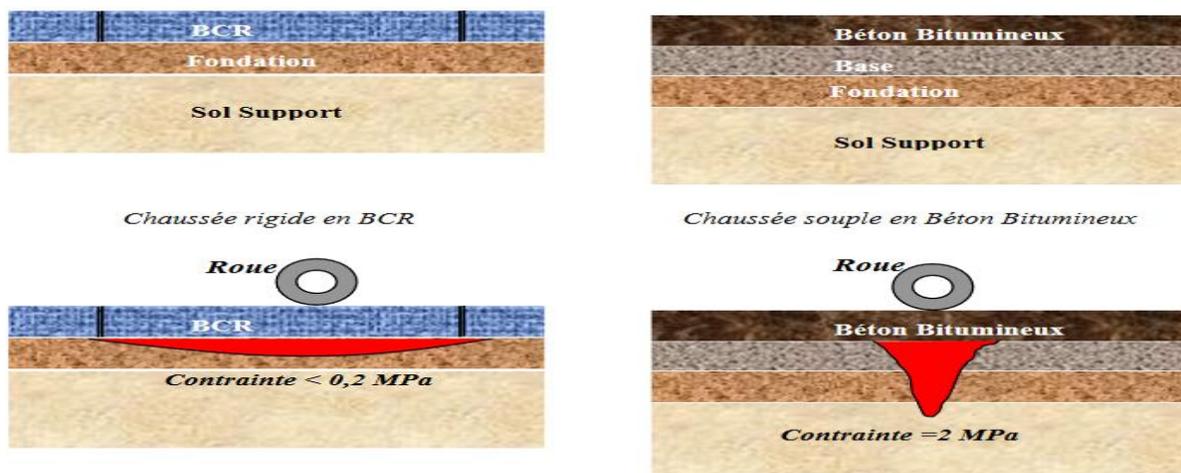


Figure II.5: Répartition des contraintes sur une chaussée en BCR et une chaussée en BB (Saucier F. et al. 1995).

II.5.2. Le BCR en corps des barrages

Le BCR peut également être utilisé comme matériau de construction des barrages. L'avantage de cette technique est que ce matériau permet de réaliser des pentes plus fortes en amont et en aval. L'utilisation du BCR permet aussi une exécution et une mise en service plus rapide du barrage. Le liant utilisé est généralement le ciment, il est recommandé d'utiliser des ajouts minéraux, tels que les cendres volantes, puisque la quantité de ciment utilisée est faible. Cette substitution de ciment permet de réduire le dégagement de la chaleur d'hydratation lors du coulage et du durcissement. La dimension maximale du granulat varie de 60 à 150 mm. Pour ces ouvrages, les résistances à la compression varient de 7 à 20 MPa (Zdiri 2008).

Pratiquement et après être déversé, le mélange de BCR est étalé au moyen de niveleuses ou de bulldozers mécaniques, puis il est compacté au moyen de rouleaux compacteurs vibrants. On emploie, dans la construction de barrages en BCR, les mêmes techniques de réalisation utilisées pour les remblais en terre, comme montré dans la Figures II.6.



Figures II.6 : A-Etat du BCR frais lors de son déversement (Barrage Errmil Tunisie), B-Compactage du BCR (Barrage en BCR Errmil - Tunisie) (Zdiri 2008).

II.6. Formulation du BCR

La plupart des méthodes de formulation de BC ne conviennent pas aux mélanges de BCR, vu les caractéristiques spécifiques de ce dernier qui est considéré comme un béton ferme à affaissement nul, avec une faible teneur en ciment et une grande quantité de granulats.

Certaines méthodes de formulation des mélanges de BCR sont proposées dans le document American Concrete Institute ([ACI-325.10R-95 1995](#)).

Elles ont été développées en utilisant différentes approches et ont été employées avec succès. Majoritairement, elles sont basées sur des méthodes empiriques ou semi-empiriques, nécessitant la production de lots d'essai importants pour obtenir un mélange aux proportions optimales et meilleures caractéristiques. De plus, au cours des dernières années, une méthode de formulation a été développée au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) en France et par la suite adaptée dans la formulation des mélanges BCR par le Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton (CRIB) de l'Université Laval. Cette méthode est basée sur une meilleure compréhension des paramètres qui influencent les propriétés à l'état frais et durci du BCR. Dans la grande majorité des cas, un seul lot d'essai est nécessaire pour déterminer les caractéristiques du mélange optimum.

II.6.1. Méthodes empiriques

Les méthodes empiriques sont des procédures simples à utiliser et relativement efficaces. Le principe de ces méthodes est de réaliser plusieurs gâchées en laboratoires afin d'obtenir le mélange adéquat pour un certain projet. Elles ne sont pas très flexibles et nécessitent beaucoup de temps et d'énergie pour corriger et adapter la formulation ([Marchand et al. 1997](#)). Dans certains cas, plus de 25 mélanges sont nécessaires pour atteindre les caractéristiques voulues du BCR. En revanche, des gâchés de réajustement sur chantier sont nécessaires pour obtenir un béton de bonne qualité.

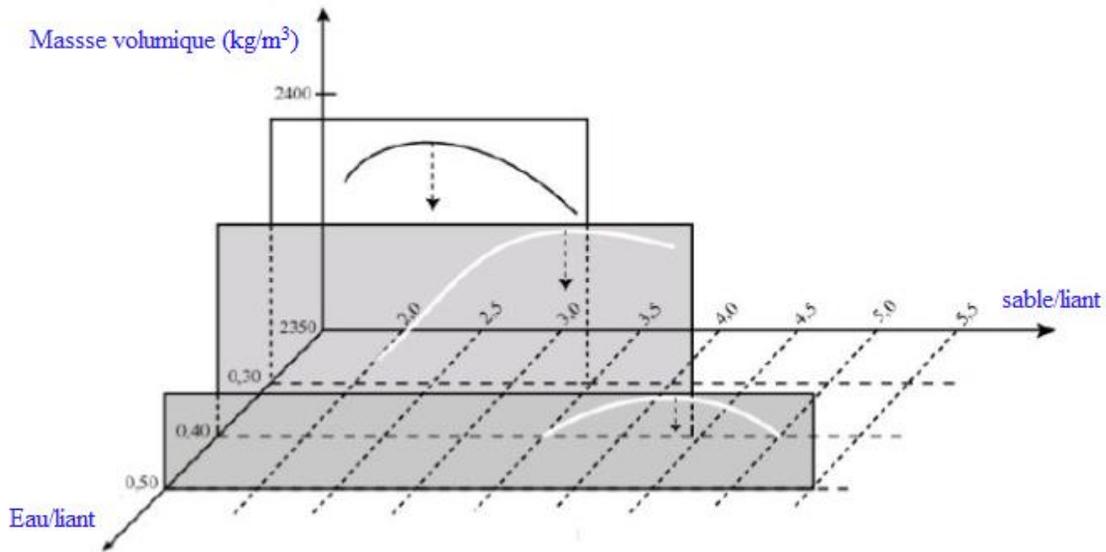
Les méthodes empiriques les plus couramment utilisées pour formuler des mélanges de BCR sont décrites par le Comité 325.10R-95 de l'ACI (American Concrete Institute) et comportent deux procédures :

- Formulation respectant certaines limites de maniabilité ;
- Formulation selon les méthodes utilisées en géotechnique.

II.6.1.1. Méthode de formulation respectant des limites de maniabilité

Cette méthode de formulation est proposée par l'ACI ([ACI-325.10R-95 1995](#)) ; on l'applique pour la composition des mélanges de BCR afin d'atteindre un seuil caractéristique de maniabilité ([Marchand et al. 1997](#)). Les dosages des différents constituants du mélange de BCR sont déterminés en suivant une procédure en trois étapes :

- La première étape comporte la réalisation d'une première série de gâchées d'essais uniquement de mélanges de mortier en faisant varier le rapport 'Eau/Ciment' et le rapport 'Sable/Ciment' afin de déterminer le volume de pâte minimum. Ensuite, on détermine la masse volumique de chaque mélange formulé.
- La deuxième étape consiste à fixer le rapport 'Eau/Liant', selon les caractéristiques mécaniques recherchées (Figure II.7).
- Dans la troisième étape on ajustera les dosages de granulats fins et grossiers afin d'atteindre le seuil de maniabilité voulue.



Figures II.7 : Paramètres optimums d'un mortier pour BCR (Marchand et al. 1997).

II.6.1.2. Méthode de formulation selon des principes de géotechnique

Cette méthode de formulation, également proposée par l'ACI (ACI-325.10R-95 1995), comporte une procédure similaire à celle du compactage des sols. On utilise dans cette méthode la relation entre la densité sèche et la teneur en eau du BCR. En général, elle est plus fiable et s'adapte mieux pour la formulation des mélanges comportant des granulats de petites dimensions, ainsi que dans le cas de l'emploi des fortes teneurs en liants (Haque et Ward 1986; Marchand et al. 1997).

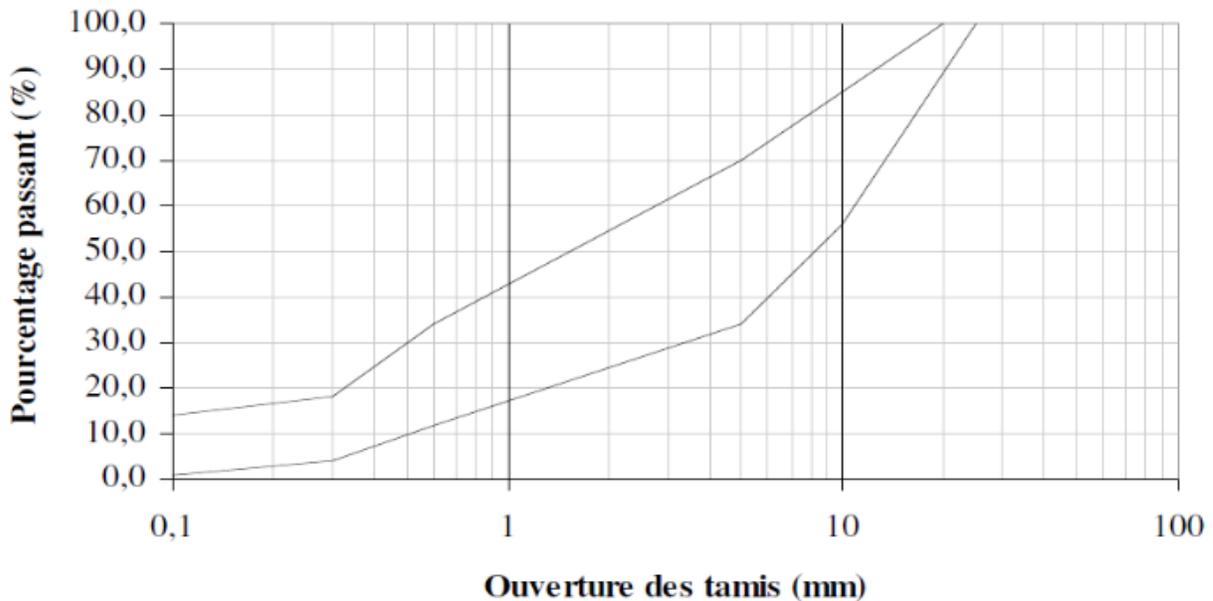
La procédure consiste à déterminer d'abord le rapport de granulats fins par rapport aux granulats grossiers suivant les fuseaux granulométriques (Figure II.8). Puis, on réalise une série de mélanges de BCR en variant les teneurs en liant. La teneur en liant varie généralement de 12 à 14% de la masse totale des matériaux secs. L'étape suivante consiste à confectionner, pour chaque teneur en liant, des mélanges à différentes teneurs en eau. On détermine, ensuite, la teneur en eau optimale à partir d'un graphique qui permet d'obtenir la teneur en eau qui correspond à la densité sèche maximale. En utilisant la méthode décrite par la norme ASTM C1557 – Method D (ASTM-D1557-07 2007).

Les éprouvettes de BCR sont compactées dans des moules cylindriques avec une énergie de compactage spécifique. Après compactage, on mesure la masse volumique du BCR et on déduit la densité sèche à l'aide de la formule suivante :

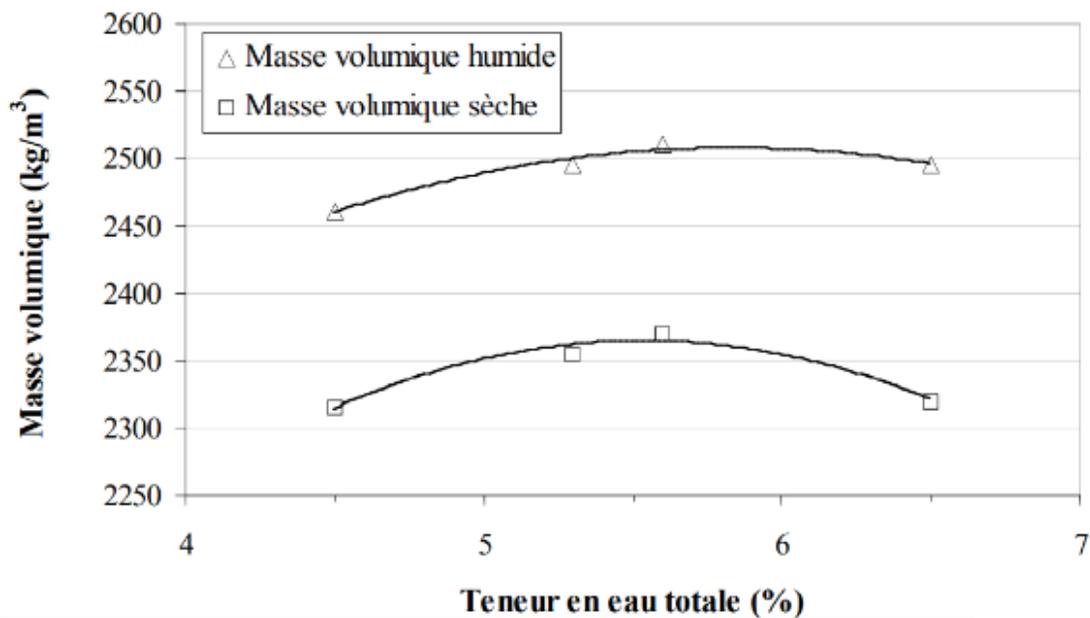
$$\rho_d = \left(\frac{\rho_h}{\omega + 100} \right) 100 \dots\dots\dots (II.01)$$

ρ_d : densité sèche, ρ_h : densité humide maximale mesurée, ω : teneur en eau réelle (la teneur en moyenne calculée à partir des pesées de prélèvement de béton frais, avant et après étuvage).

La variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau est représentée sur un graphique. A partir de la Figure II.9 on trouve que la masse volumique sèche varie considérablement dans l'intervalle de la teneur en eau optimale. Par contre, la masse volumique humide reste insensible dans cette partie de la courbe. Avec la teneur optimale on prépare des éprouvettes de contrôle de résistance sur lesquelles seront réalisés des essais de résistance à la compression et de traction par fendage (Marchand et al. 1997).



Figures II.8 : Fuseaux granulométriques pour un BCR (Marchand et al. 1997).



Figures II.9 : Variation de la masse volumique en fonction de la teneur en eau (Marchand et al. 1997).

II.6.2. Méthode semi-empirique

Comme expliqué par Gagné (2000), le concept des méthodes semi-empiriques est basé sur des données expérimentales et des formules empiriques. La formulation des mélanges de BCR par une méthode semi-empirique est basée sur le calcul du rapport « volume de pâte » sur « volume de vide ». L'application de cette méthode nécessite de réaliser quelques gâchées d'essais en laboratoire.

L'hypothèse principale de cette méthode est basée sur le fait que le mélange de BCR optimal devrait avoir une quantité juste nécessaire de pâte, pour remplir les espaces inter-granulaires restants après que le squelette granulaire a atteint la densité maximale par un processus de compactage. Elle est aussi principalement basée sur une approche volumétrique. Pour un faible dosage en ciment, le volume de pâte est insuffisant et les vides laissés après le compactage vont affaiblir les caractéristiques mécaniques et augmenter la perméabilité du BCR. Alors que pour un fort dosage en ciment, le volume de pâte devient excessif et augmentera, par conséquent, la chaleur d'hydratation, ainsi que les coûts de fabrication sans amélioration significative des caractéristiques physiques ou amélioration de l'imperméabilité (Zdiri 2008).

La méthode semi-empirique, basée sur le volume de pâte optimal, n'est applicable que pour formuler des mélanges de BCR sans air entraîné, car la composition des mélanges de BCR avec air entraîné est trop complexe à cause des effets du réseau des vides d'air sur les propriétés mécaniques (Gagné 2000). La formulation du BCR, par cette méthode, exige de suivre trois étapes :

- La première étape consiste à déterminer les proportions des granulats d'une façon à obtenir un mélange granulaire le plus compacte possible. Le volume de vides des granulats est calculé en mètre cube après le compactage.
- La deuxième étape consiste à ajuster le dosage de la pâte, de manière à avoir une maniabilité donnée.
- Finalement, il faut fixer le rapport entre l'eau et le liant afin d'obtenir une pâte qui puisse satisfaire les exigences mécaniques.

II.6.3. Méthode théorique

La méthode théorique se distingue par l'absence de gâchées d'essais en laboratoires. Le principe de cette méthode est de minimiser la porosité inter-granulaire du béton en optimisant les proportions des différentes classes granulaires. Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées en France (LCPC) a développé une méthode théorique appelée le modèle d'empilement compressible pour la confection de différents mélanges, tels que le béton ordinaire et le béton à haute performance. Par la suite, le Centre de recherche interuniversitaire sur le béton (CRIB) de l'Université Laval a développé cette méthode de façon à confectionner le BCR. Plusieurs travaux ont été effectués à l'aide de cette méthode, les résultats obtenus montrent que cette technique donne amplement satisfaction (Benouadah 2019).

II.7. Propriété mécanique et microstructure du BCR

II.7.1. Propriété mécanique du BCR

II.7.1.1. Résistance à la compression

La résistance à la compression est principalement influencée par la quantité de ciment, le type de matériau cimentaire (les additions), la qualité et la granulométrie des agrégats, la teneur en eau et le degré de compactage atteint.

La figure II.10 présente un mélange de béton compacté au rouleau qui se compose principalement de ciment de type III, d'adjuvant CSA (400 kg/m^3 de liant total) et $23,5 \text{ kg/m}^3$ de latex (10 % du poids du ciment) a permis d'atteindre la résistance à la compression visée qui était de 21 MPa après 4 h selon (Won et al. 2011).

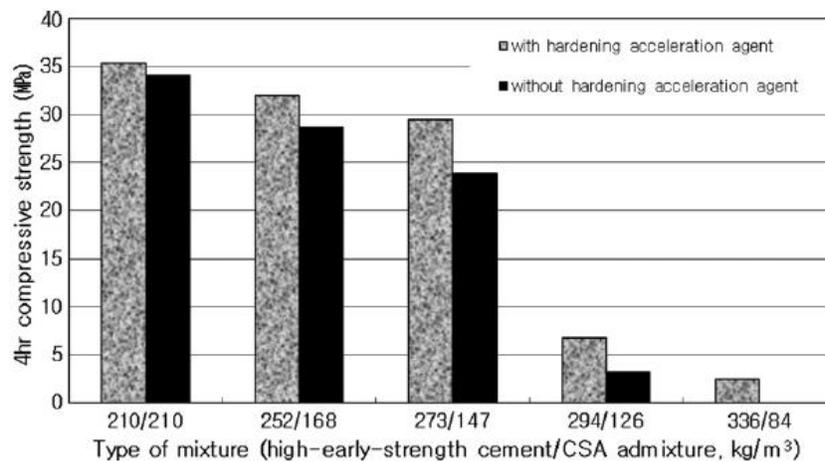


Figure II.10: Résistance à la compression en fonction du rapport de combinaison du ciment à haute résistance mécanique et de l'adjuvant CSA et de la présence d'un agent accélérateur de durcissement (Won et al. 2011).

Mardani-Aghabaglou et Ramyar (2013) ont étudié les propriétés mécaniques du béton compacté au rouleau à haute teneur en cendres volantes conçu selon la méthode de la densité maximale. Il a été observé que dans les mélanges, où le ciment était remplacé par une teneur élevée de cendres volantes, entraînait une diminution des valeurs de compression. D'autre part, l'augmentation de la teneur en cendres volantes a augmenté les valeurs de la résistance du mélange, lorsque le granulat a été remplacé.

Madhkhani et al. (2012) ont étudié les effets de la pouzzolane et des fibres d'acier et de polypropylène (PP) sur les propriétés mécaniques des chaussées en BCR. Une augmentation maximale de la résistance à la compression a été observée entre 28 et 90 jours d'âge, en utilisant des pouzzolanes. L'influence des fibres d'acier sur la résistance à la compression était souvent plus importante que celle des fibres de PP. Benouadah et al (2017) ont étudié le comportement physique et mécanique d'un béton compacté au rouleau renforcé de fibres de polypropylène. Ils ont constaté que l'incorporation de fibres de polypropylène dans un béton

compacté au rouleau donnait des résultats satisfaisants, en terme de résistance mécanique, qui augmente d'environ 23% pour le mélange à 1 kg/m³.

Une diminution de la résistance à la compression du BCR à 28 jours était d'environ 32,5% et 55% lorsque les granulats naturels sont remplacés par revêtement d'asphalte recyclé (Figure II.11) suivant l'étude faite par (Settari et al. 2015). Dans le même contexte, Fakhri et al (2017) ont montré que l'utilisation de chaussées d'asphalte récupérées (RAP) entraînait une faible résistance à la compression des spécimens de BCR, en particulier lorsque l'incorporation de la teneur en RAP est supérieure à 50%. Ce comportement s'explique par la plus faible adhésion entre le mortier de ciment et les particules de RAP.

Fakhri (2016) a montré que la résistance à la compression de 28 jours augmente pour différentes teneurs en caoutchouc 5% et 10%, sans fumée de silice, et 5%, 10%, 15% et 20%, avec fumée de silice (voir Figure II.12). De plus Meddah et al (2014) ont étudié la possibilité d'utiliser des pneus en caoutchouc déchiqueté dans le BCR. Ils ont constaté que la résistance à la compression de la BCR fabriquée avec des agrégats de caoutchouc peut être améliorée de 11 à 28 %, si la rugosité des surfaces en caoutchouc est modifiée.

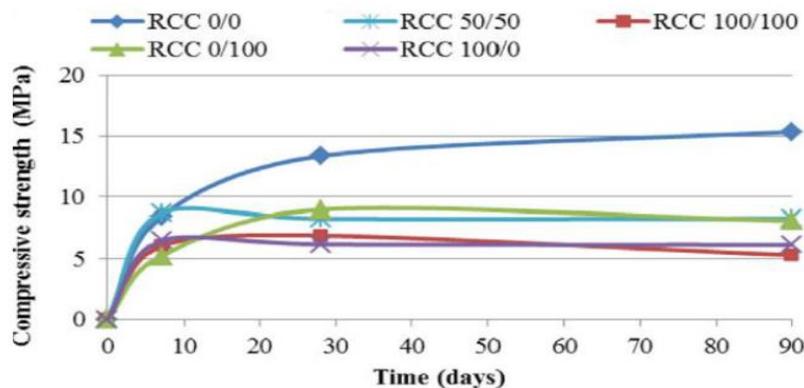


Figure II.11 : Résistance à la compression des enrobés BCR (Settari et al. 2015).

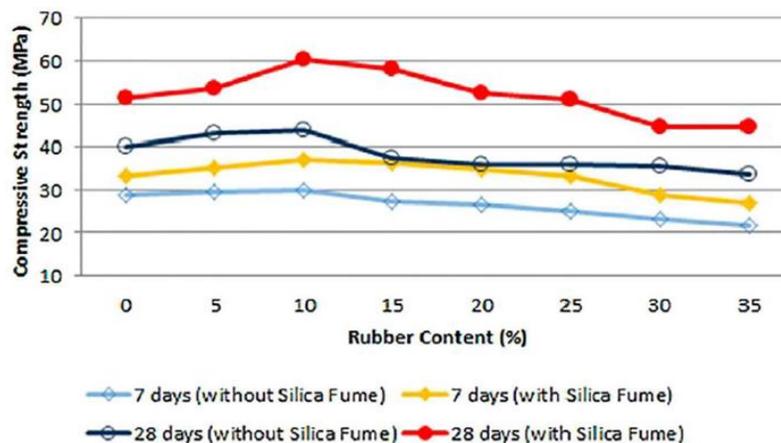


Figure II.12: Résistances à la compression après 7 jours et 28 jours de cure (Fakhri 2016).

Moradi et Shahnoori (2021) ont montré que les valeurs maximales de la résistance à la compression du BCR, dans une solution de sulfate de sodium à 5%, ont été observées avec un remplacement de 15% de sables obtenus à partir des carrières par de sédiments marins dragués avec 15 % de laitier de haut fourneau granulé broyé.

II.7.1.2. Résistance à la traction par fendage

La figure II.13 montre les résultats de la résistance à la traction par fendage du BCR fabriqué avec des matériaux de chaussée en asphalte recyclé. Le remplacement de 50 %, des parties fines et grossières, a entraîné une résistance à la traction par fendage plus élevée (Settari et al. 2015). Rao et al (2015) ont montré que l'utilisation de cendres volantes, avec des niveaux plus élevés, a provoqué la réduction des valeurs à la traction par fendage, à tous les âges (Figure II.14).

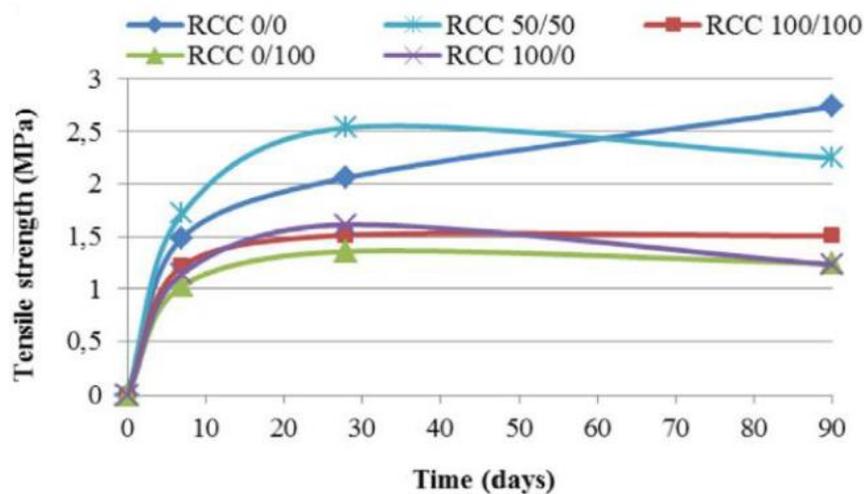


Figure II.13: Résistance à la traction par fendage des BCR (Settari et al. 2015).

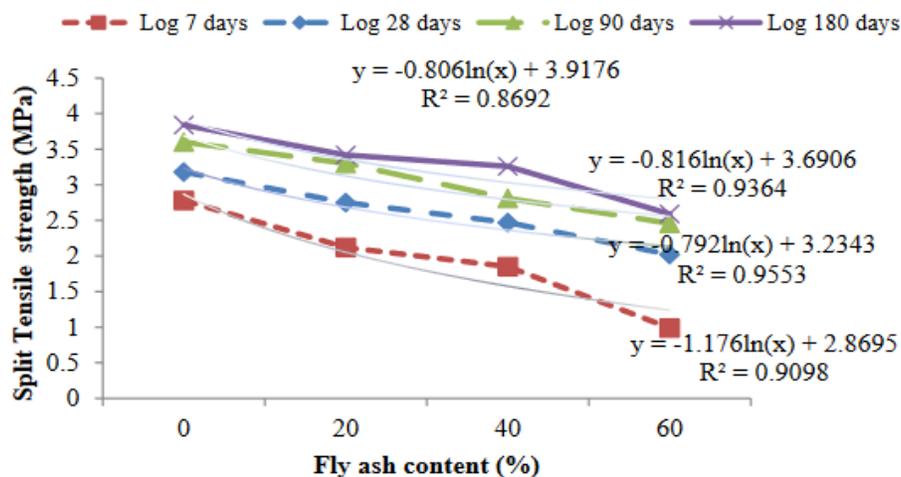


Figure II.14 : Relation entre le dosage en cendres volantes et la résistance à la traction par fendage (Rao et al. 2015).

II.7.1.3. Résistance à la flexion

Certaines des recherches effectuées dans le domaine du béton compacté au rouleau, comme celle de Karadelis et Lin (2015) qui ont constaté que, par rapport au béton conventionnel renforcé par des fibres d'acier, le béton modifié par des polymères compactés au rouleau et renforcé par des fibres d'acier développait une résistance à la flexion très élevée. Ce qui est très favorable à la réhabilitation des chaussées en béton usé. Neocleous et al (2011) ont montré aussi que le comportement en flexion du béton compacté au rouleau, sous charges statiques, peut être amélioré par l'ajout de fibres d'acier.

Rao et al (2015) ont montré une réduction de la résistance à la flexion avec des niveaux accrus de teneur en cendres volantes. Une étude sur les performances mécaniques du béton compacté au rouleau avec des agrégats de béton recyclés présenté par Lopez-Uceda et al (2018) montre que le BCR avec 175 kg/m^3 et 100 % de remplacement grossier d'agrégat naturel par agrégat recyclé atteint plus de 2 MPa en résistance à la flexion.

Une augmentation de la résistance à la flexion à 28 jours a été remarquée pour des échantillons BCR contenant 5 % de caoutchouc granulé (avec et sans fumée de silice), mais elle est diminuée pour les autres mélanges (Fakhri, 2015). La figure II.15 montrent les diagrammes des variations de résistance et à la flexion après 7 et 28 jours de cure (Fakhri 2016).

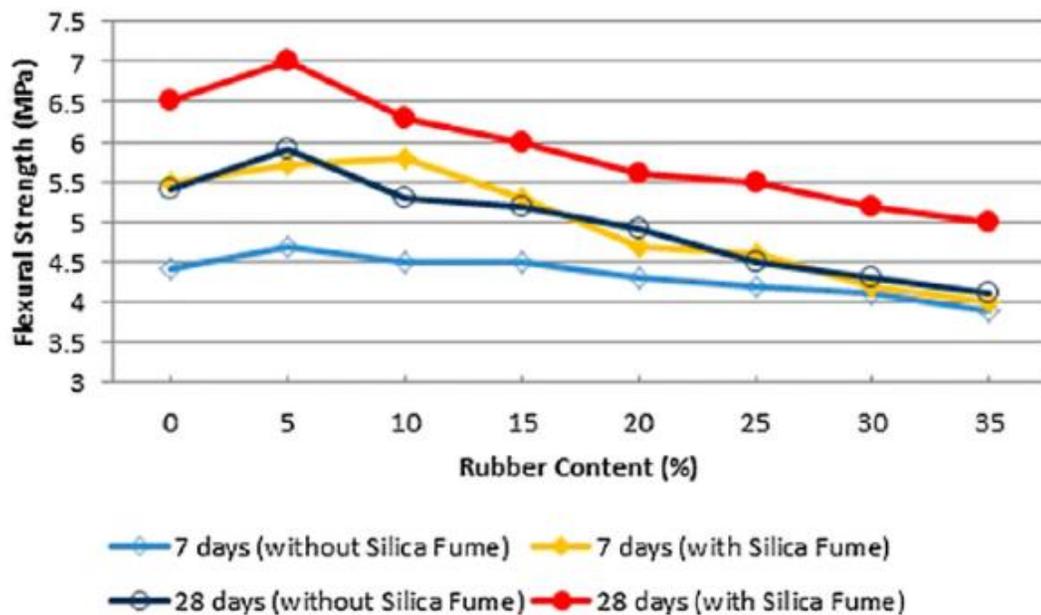


Figure II.15 : Les résistances à la flexion après 7 et 28 jours de cure (Fakhri 2016).

Il a été observé que dans les mélanges, où le ciment était remplacé par des cendres volantes, l'augmentation de la teneur en cendres volantes provoquait une réduction des valeurs de résistance à la flexion, à tous les âges, jusqu'à 180 jours (Mardani-Aghabaglou et Ramyar 2013).

II.7.1.4. Module d'élasticité

Les principaux facteurs affectant les propriétés élastiques du BCR sont : l'âge, la résistance, le volume de la pâte et le type de granulat. En général, pour un type de granulat donné, le module d'élasticité est fonction de la résistance (ACI 207.5R-99, 2004). Une étude a indiqué que le module d'élasticité de la matrice BCR (mode de défaillance) et de l'interface (mode de défaillance) est lié à la racine carrée de leur résistance nominale à la compression et au rapport entre la taille maximale des agrégats et la dimension caractéristique de l'échantillon (Li et al. 2002). Le module d'élasticité n'a généralement pas été mesuré sur des spécimens provenant de projets réels de BCR. Des essais limités sur des carottes obtenues à partir d'une section d'essai en grandeur réelle indiquent que les valeurs du module d'élasticité du BCR peuvent être similaires ou légèrement supérieures à celles du béton conventionnel avec des teneurs en ciment similaires (Tayabji et al. 1995).

Zdiri et al. (2010) ont prouvé l'anisotropie du BCR et ont montré la sensibilité des résistances mécaniques et du module d'élasticité à la direction de compactage. Albuquerque et al (2011) ont constaté que les mélanges BCR, contenant du laitier, nécessitaient de plus grandes quantités d'eau pour le compactage et présentaient des baisses du module d'élasticité.

Fakhri et Amosoltani (2017) ont montré que l'incorporation de revêtements d'asphalte récupérés (RAP) et de matériaux en caoutchouc dans les BCR augmentait la capacité d'absorption d'énergie. De plus, la rigidité et le module d'élasticité ont été diminués par l'ajout de revêtements d'asphalte ou de caoutchouc. Settari et al. (2015) ont aussi montré que les matériaux de chaussée en asphalte recyclé influent négativement sur module d'élasticité du béton compacté au rouleau. Le remplacement total du sable naturel par des matériaux RAP fins entraîne une perte d'environ 41 % du module d'élasticité (Figure II.16). Cette diminution a atteint 53 % lorsque 10 % des granulats naturels grossiers ont été remplacés par des matériaux d'enrobés grossiers, une perte approximative de 32 % a été trouvée par d'autres chercheurs (Debieb et al. 2009).

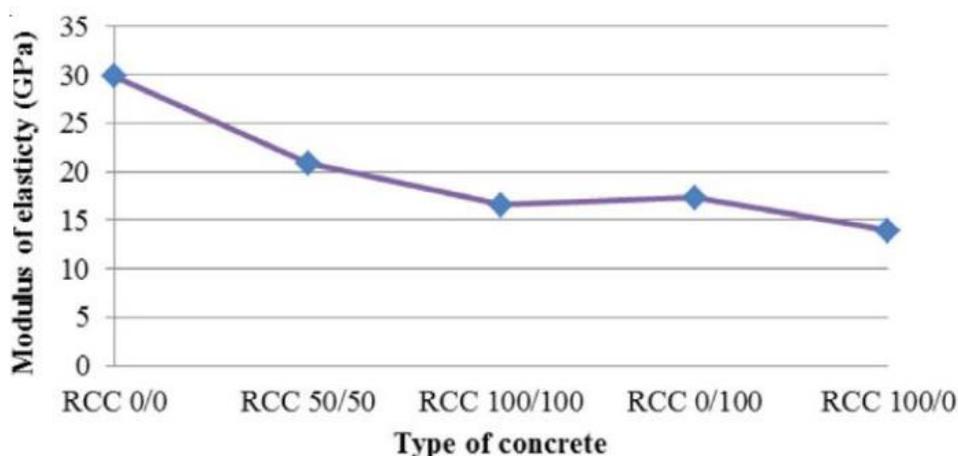


Figure II.16 : Module d'élasticité des enrobés BCR (Settari et al. 2015).

II.7.2. Microstructure du béton

La microstructure est définie comme la façon dont un matériau est constitué de ses composants de base à l'échelle microscopique. Parmi les récents travaux de la microstructure des bétons compactés au rouleau, on cite :

Le sable de rivière a été remplacé par du sable de mer non traité dans du béton compacté au rouleau (BCR) soumis aux cycles de brouillard salin qui a été produit par une solution de sulfate de sodium à 5 %. La résistance à la compression et à la flexion du nouveau BCR avec 400 cycles de brouillard salin est diminuée de 32,3 % (Zhang et al. 2022).

La figure II.17 montre les microstructures du BCR (avec sable mer). On voit clairement que la surface de la microstructure du BCR de sable de mer, sans cycle de brouillard salin, est lisse. Cependant, avec l'augmentation des cycles de brouillard salin, des cristaux blancs apparaissent d'abord à la surface de la microstructure (comme le montre la figure II.17 b), puis une partie des pores est remplie (comme le montre la figure II.17 c), et enfin un grand nombre de microfissures sont trouvées (comme le montre la figure II.17 d et e).

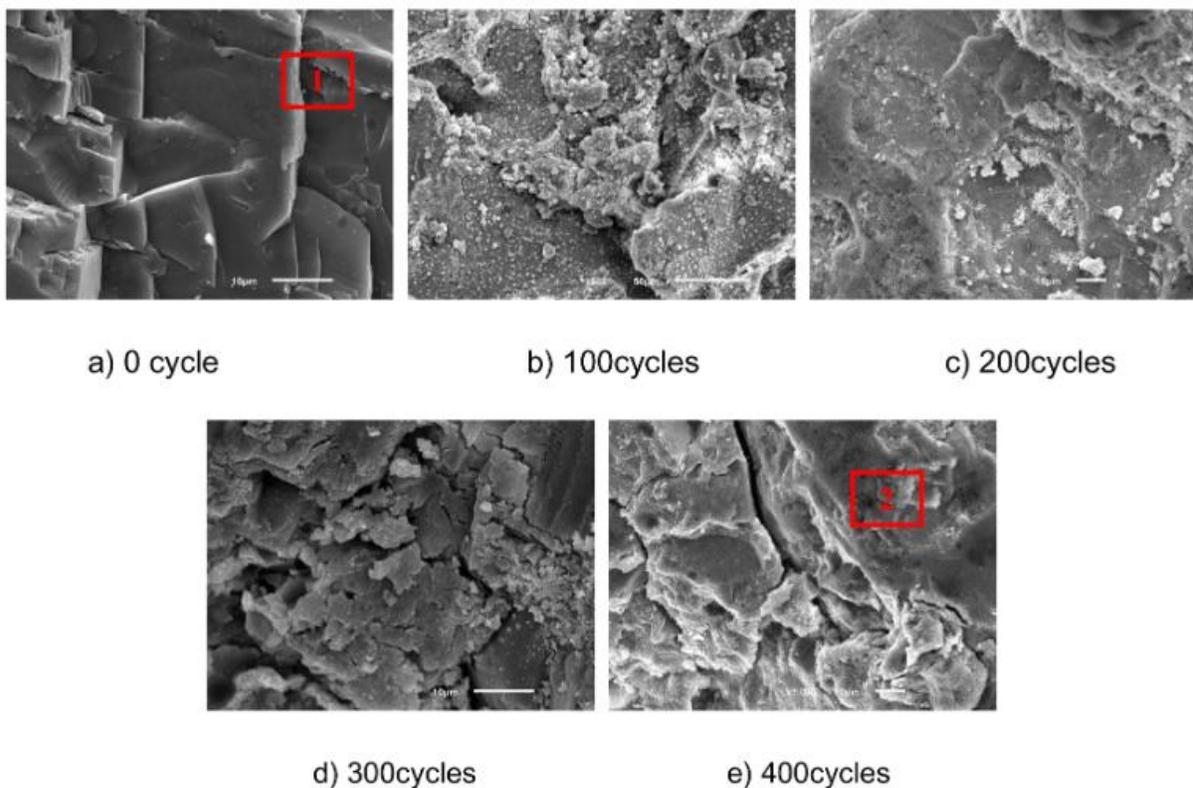


Figure II.17 : Microstructure du BCR avec sable de mer non traité (Zhang et al. 2022).

La figure II.18 montre les microstructures du BCR de sable de rivière. On peut voir que plusieurs microfissures se produisent dans la matrice BCR de sable de rivière, sans cycle de brouillard salin, comme le montre la figure II.18 a. Les microfissures peuvent être causées par le retrait de la pâte de ciment, lors de l'hydratation (Şahmaran et al. 2009). Avec une augmentation des cycles de brouillard salin, des cristaux blancs et des microfissures sont

également observés dans la matrice. Cependant, la quantité de cristaux blancs et la dimension des microfissures dans le BCR de sable de rivière sont inférieures à celles du BCR de sable mer (Zhang et al. 2022).

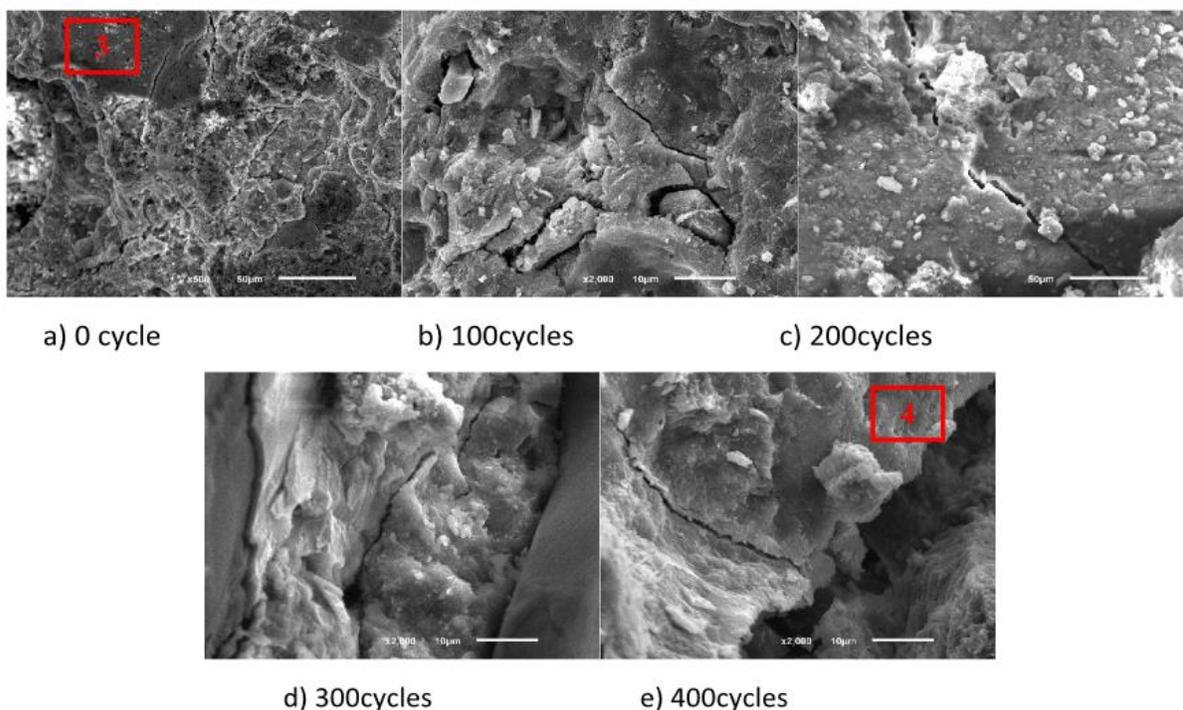


Figure II.18 : Microstructure du BCR avec sable de rivière (Zhang et al. 2022).

Trois types de sable, avec une différence de teneur en particules très fines, ont été utilisés dans la fabrication du BCR :

- Sable standard selon l'ACI 211.3R,
- Sables modifiés contenant environ 6 % de poudre de calcaire.
- Sable à faible teneur en fines contenant < 1 % de particules très fines.

L'utilisation de sable à faible teneur en fines dans le BCR n'a pas eu d'effet significatif sur les résistances à la compression, à la traction par fendage et à la flexion. Cependant, l'utilisation de sable modifié au calcaire dans le BCR a considérablement réduit les propriétés mécaniques. Donc le sable, sans particules très fines, peut être utilisé dans le BCR. Des images au microscope électronique à balayage d'échantillons de BCR (Figure II.19) ont indiqué que la taille des vides augmentait légèrement en l'absence de sable standard comprenant de très fines particules (Hashemi et al. 2019).

Le BCR (avec 12% et 15% de ciment) contenant du sable standard ont montré une taille de vide moyenne de 37 μm . De même, la taille moyenne des vides pour les BCR à 12% et 15% de ciment contenant du sable à faible teneur en fines et du sable modifié était d'environ 61 μm et 147 μm . Néanmoins, l'augmentation de la teneur en ciment de 12% à 15% a influencé la taille des vides, en particulier pour les BCR contenant du sable modifié. La plus grande taille des vides a diminué de 52 à 43 μm pour le sable standard, de 90 à 78 μm pour le sable à

faible teneur en fines et de 250 à 120 pour le sable modifié, lorsque la teneur en ciment a augmenté de 12% à 15%, respectivement (Hashemi et al. 2019).

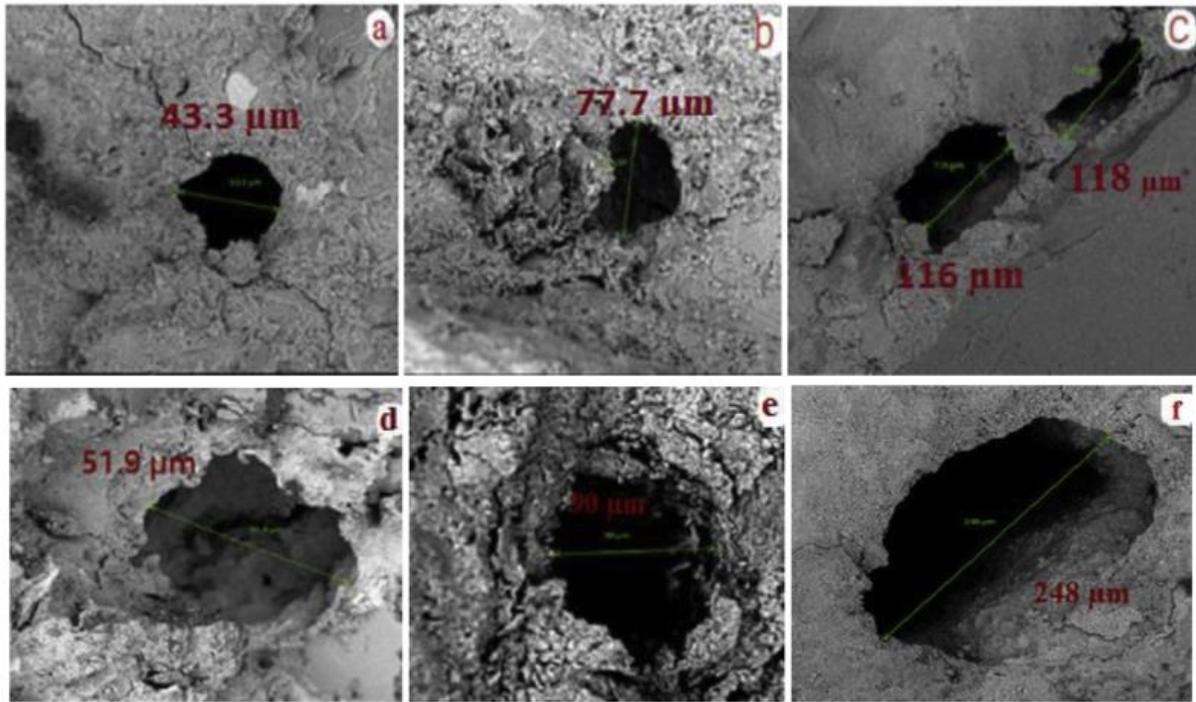


Figure II.19 : Tailles vides dans la pâte des BCR. (a) A-15-SS , (b) A-15-LFS , (c) A-15-LMS , (d) A-12-SS , (e) A-12-LFS , (f) A-12-LMS (Hashemi et al. 2019).

Avec : A-12 (BCR avec 12 % de ciment), A-15 (BCR avec 15 % de ciment), SS (sable standard), LFS (sable à faible teneur en fines), LMS (sable modifié au calcaire).

Moradi et Shahnoori (2021) ont étudié l'effet du remplacement des sables obtenus à partir de carrières, avec différents pourcentages de sédiments marins dragués (DMS). Dans cette étude, le test au Microscope électronique à balayage (MEB) a été effectué pour détecter les fissures capillaires et les vides d'airs piégés et les vides de compactage dans les échantillons BCR (Figure II.20). La figure II.20 B montre la distribution plus dense du gel CSH. La concentration des vides et leur surface moyenne ont été considérablement réduites, à l'exception du cas de 15% des sédiments marins dragués où la forme sphérique et la taille des sédiments marins dragués ont réduit le nombre et la taille des pores ; par contre, les autres pourcentages des sédiments marins dragués n'ont pas pu fournir d'effets bénéfiques sur les propriétés de durabilité du mélange BCR.

La formation de gel CSH supplémentaire lors de l'ajout de Laitier de haut fourneau granulé broyé est visible sur la figure II.20 C. L'influence pouzzolanique du Laitier de haut fourneau granulé broyé peut conduire à une meilleure qualité du silicate de calcium hydraté (CSH). L'ITZ formée entre 100% sédiments marins dragués et le mortier de ciment est plus poreuse et plus épaisse (Figure II.20 D). Les mélanges 0 et 100% des sédiments marins dragués, comme

indiqué sur la figure II.21 A et D, contenaient un pourcentage plus élevé de vides, l'agrégat et la pâte de mortier.

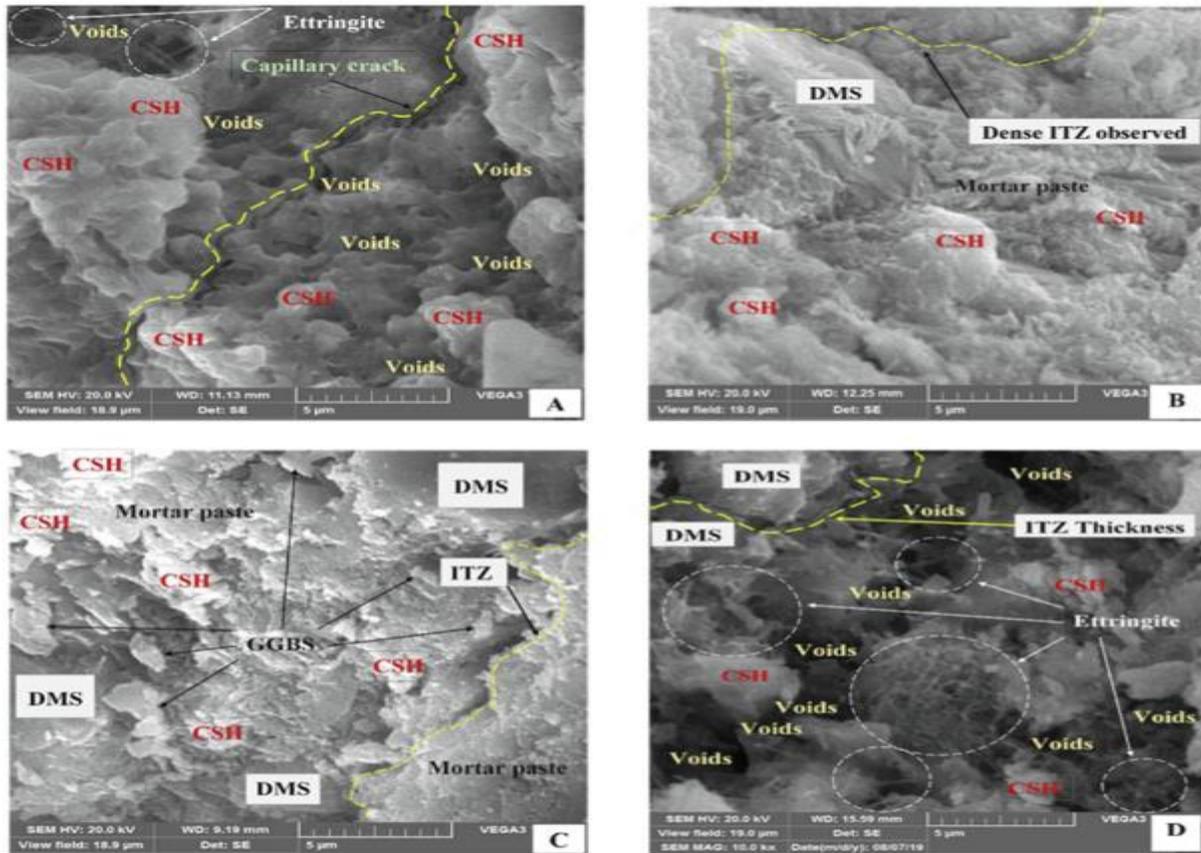


Figure II.20 : Micrographies électroniques à balayage montrant l'effet du sur l'ITZ, les vides et les fissures de BCR avec ciment Portland Type V (Moradi et Shahnoori 2021).

Avec : A- (béton de référence) ; B- (du DMS 15 %) ; C- (du DMS 25 % + Laitier 15 %) ; D – (du DMS 100 %).

II.8. Conclusion

Ce chapitre présente une revue de la littérature sur les BCR, où on a montré que les méthodes de formulation des BCR se différencient de celles utilisées pour les bétons conventionnels et le choix entre ces méthodes dépend de la destination du projet et des moyens disponibles. Il a été mis également en évidence que le BCR est un matériau performant, économique et durable. Sur la base des différentes recherches, il convient de noter que les études de BCR doivent être adaptées à la nature des matériaux disponibles et aux exigences du projet ; il faut donc mettre en évidence les granulats locaux, tout en envisageant un faible dosage en liant. Il faut également trouver de nouveaux matériaux et additifs qui peuvent améliorer les performances des mélanges BCRs et qui présente des avantages écologique et économique à la fois.

Partie B

Etude de formulation et
caractérisation du
BSCR

Chapitre 03

Matériaux et méthodologie
expérimentale

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la carte d'identité de chaque constituant rentrant dans nos formulations du BSCR. Tous les constituants ont fait l'objet des caractérisations physiques, chimiques et microstructurales afin de prédire les différentes interactions possibles entre les composants, ainsi que leurs compatibilités vis-à-vis des caractéristiques mécaniques des mélanges préparés.

L'étude de la composition du BSCR consiste à définir le mélange optimal des différents sables disponible ainsi que le dosage en ciment et la teneur eau. L'objectif de cette optimisation est de réaliser un BSCR dont les qualités doivent être celles recherchées pour la construction routière. Pour cela, nous avons suivi une nouvelle méthode appelée "plans d'expériences" afin d'optimiser la formulation du composite étudié. De plus, une partie de ce chapitre est destinée à la présentation des techniques expérimentales et méthodes utilisées. La figure III.1 présente l'organigramme du protocole expérimental suivi.

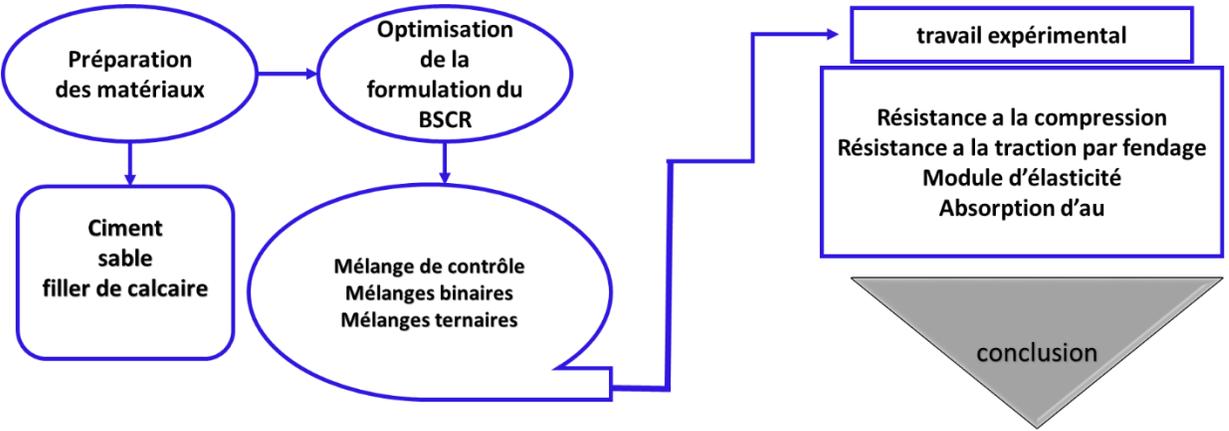


Figure III.1 : Organigramme de la méthode expérimentale.

III.2. Matériaux utilisés

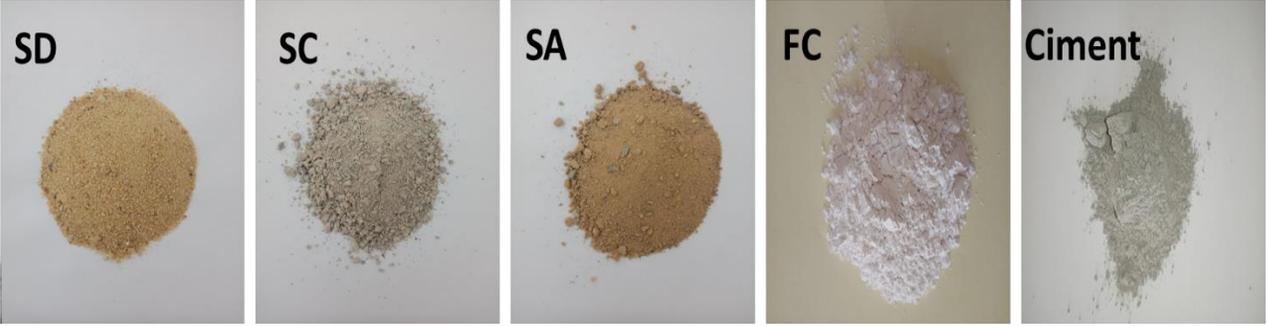


Figure III.2 : Aspect général du ciment, du filler et du sable utilisé.

III.2.1. Sable

Trois types de sables locaux ont été utilisés : sable de désert (SD) de la région d'Oued Souf ; sable alluvionnaire (SA) de la région de Boussaâda et sable concassée (SC) de la région de Sétif, ce type de sable est considéré comme un déchet de fabrication de gravier. Les sables sont de classe 0/5 mm, leur distribution granulométrique a été réalisée par tamisage selon la norme NFP 18-560 et illustrée par la figure III.3. Le Tableau III.1 résume les principales propriétés des sables utilisés. Le module de finesse est défini comme la somme des pourcentages cumulés retenus sur les tamis de la série standard (0,16-0,315-0,63-1,25-2,5-5 mm%), il est défini par la norme NF P 18-541. L'équivalent de sable est mesuré selon la norme NF P 18 598 et la compacité est déterminée par la norme NF P 18-554. La figure III.4 représente la série des essais réalisés pour l'identification des matériaux.

Tableau III.1 : Propriétés physiques du sable utilisé.

Type de sable	Teneur en eau %	ρ apparent (kg/m ³)	ρ absolue (kg/m ³)	Compacité	bleu de Méthylène g/kg	équivalent de sable	Module de finesse MF
SD	2.04	1.62	2.60	0.62	0.25	92.63	2.012
SA	2.04	1.48	2.60	0.56	2.04	56.19	1.703
SC	1.35	1.58	2.60	0.60	1.013	70.79	2.830

La composition chimique (Tableau III.2) des sables a été réalisée à partir d'un essai FRX : méthode d'analyse spectroscopique de la matière, se basant sur le principe de la fluorescence des rayons X. C'est l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour la détermination qualitative et quantitative de la composition élémentaire d'un échantillon.

Cet essai révèle la présence prépondérante de silice (SiO₂), environ 80 % de la composition chimique totale pour le sable désert, et environ 70% pour le sable alluvionnaire. Le pourcentage élevé de SiO₂ indique que les deux types de sables (SD et SA) sont essentiellement de nature siliceuse. En revanche le sable concassé contient une forte concentration d'éléments de CaO et une concentration moins forte de l'élément SiO₂, car il est obtenu à partir des roches sédimentaires de calcaire.

Tableau III.2 : Composition chimique du sable utilisé (%).

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	CL	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	ZrO ₂	SrO	Br
SD	0.711	0.579	4.37	84.3	0.112	2.31	0.201	2.36	4.06	0.932	0.0075	0.0072	0.0256	0.0317	-
SA	0.153	1.12	5.25	73.5	0.126	0.405	-	1.45	15.7	0.309	0.0365	1.86	0.0393	0.0244	0.0072
SC	0.0895	2.81	3.84	8.39	0.0488	0.116	-	0.705	81.9	0.313	-	1.79	-	0.0472	-

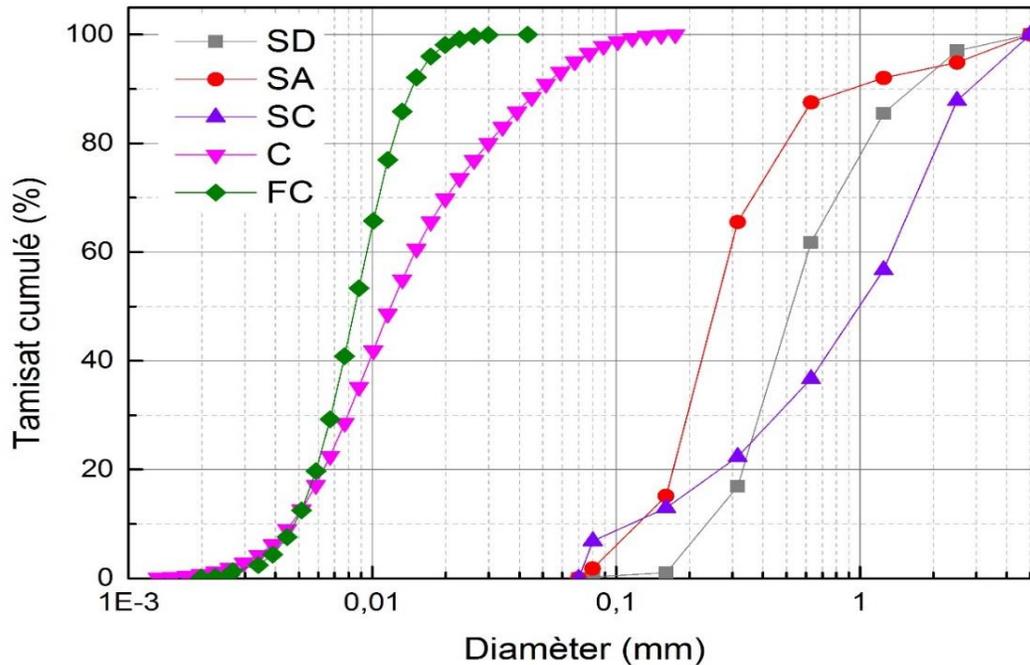


Figure III.3 : Distribution granulométrique des matériaux utilisés.

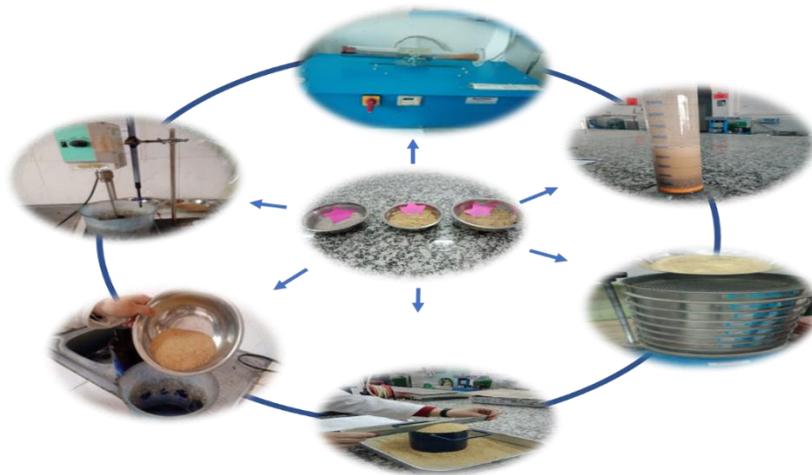


Figure III.4 : Essai de caractérisation des sables réalisé.

Les analyses minéralogiques par diffraction des rayons X (DRX) et MEB effectuées sur la poudre des trois sables sont enregistrées en figures III.05, III.06 et III.07. Les principaux composants cristallins trouvés dans les échantillons de sables étaient le quartz (Q) et la calcite (C). Les essais DRX et FRX nous ont conduit à la même conclusion ; il s'agit de deux sables siliceux (SD et SA) et un autre calcaire (SC).

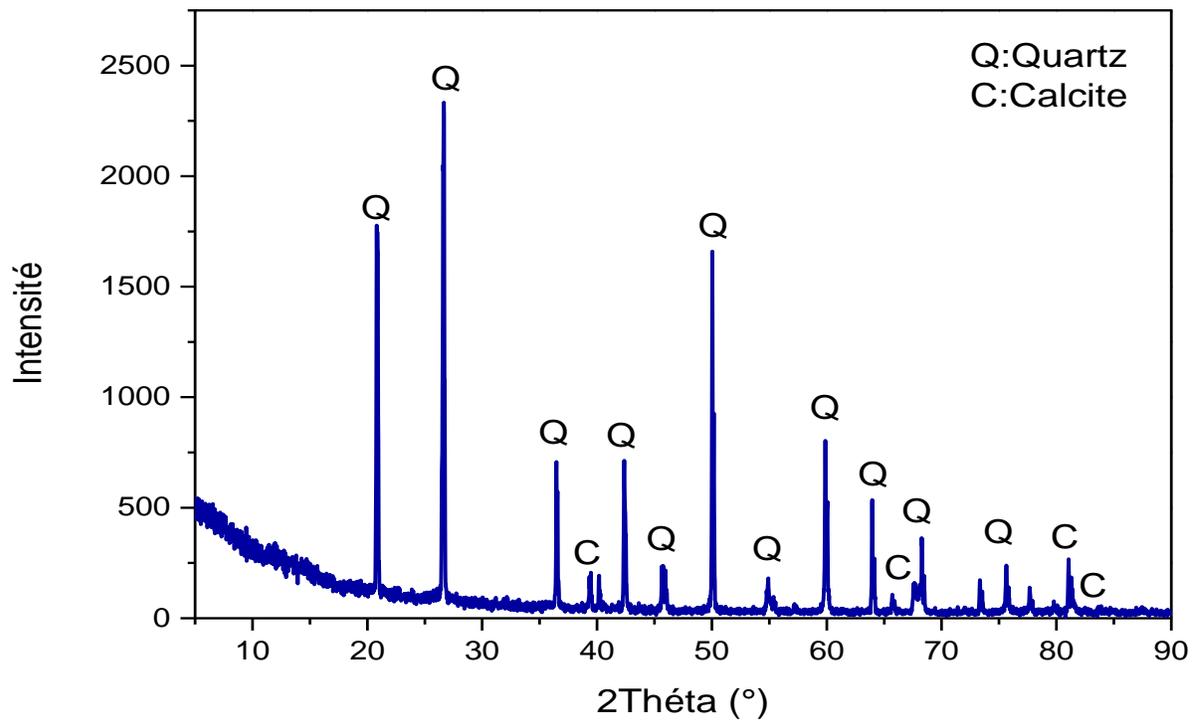
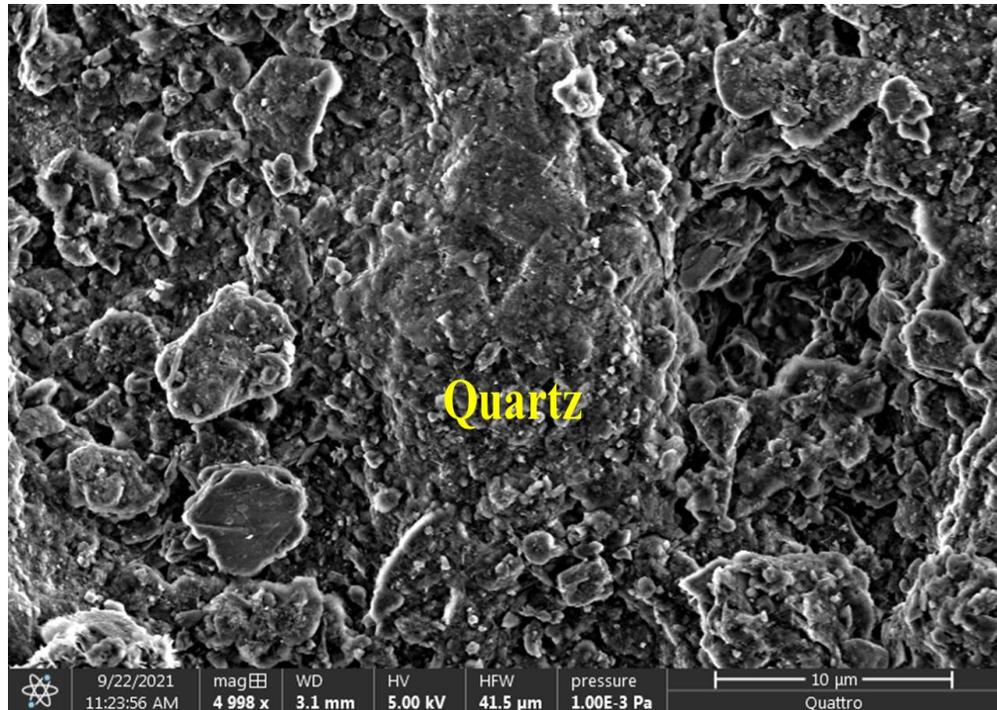


Figure III.5 : Caractérisation du SD au moyen des techniques DRX et MEB.

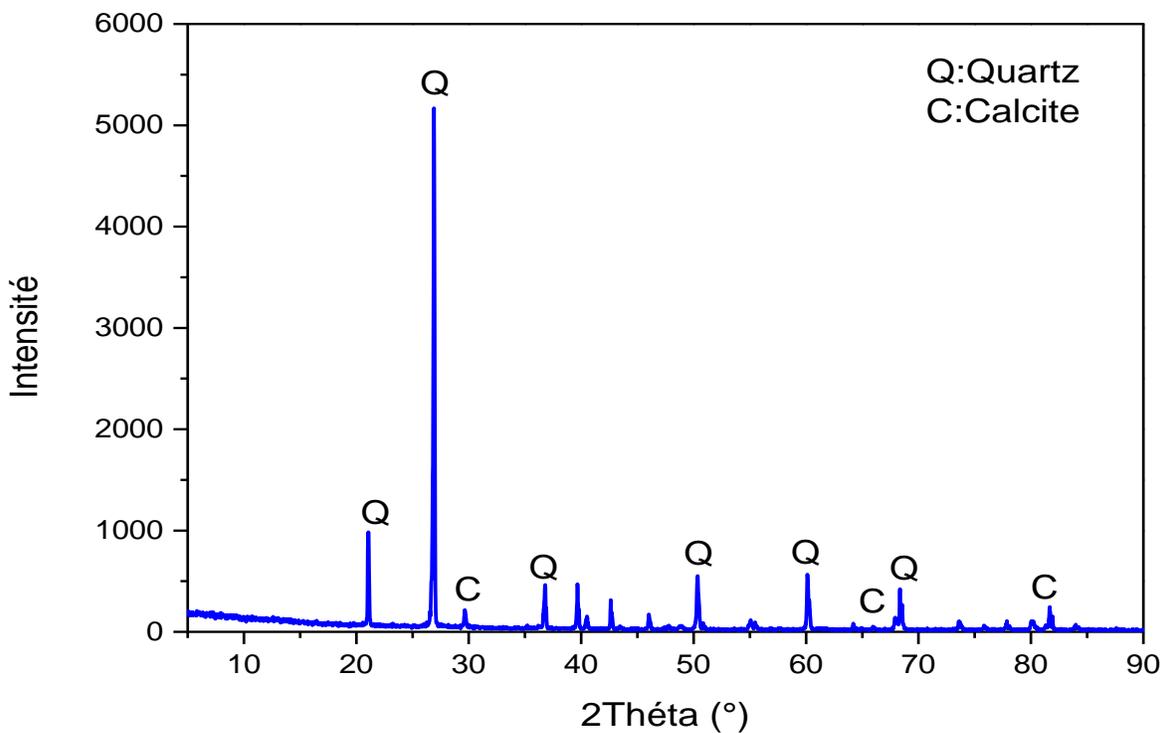
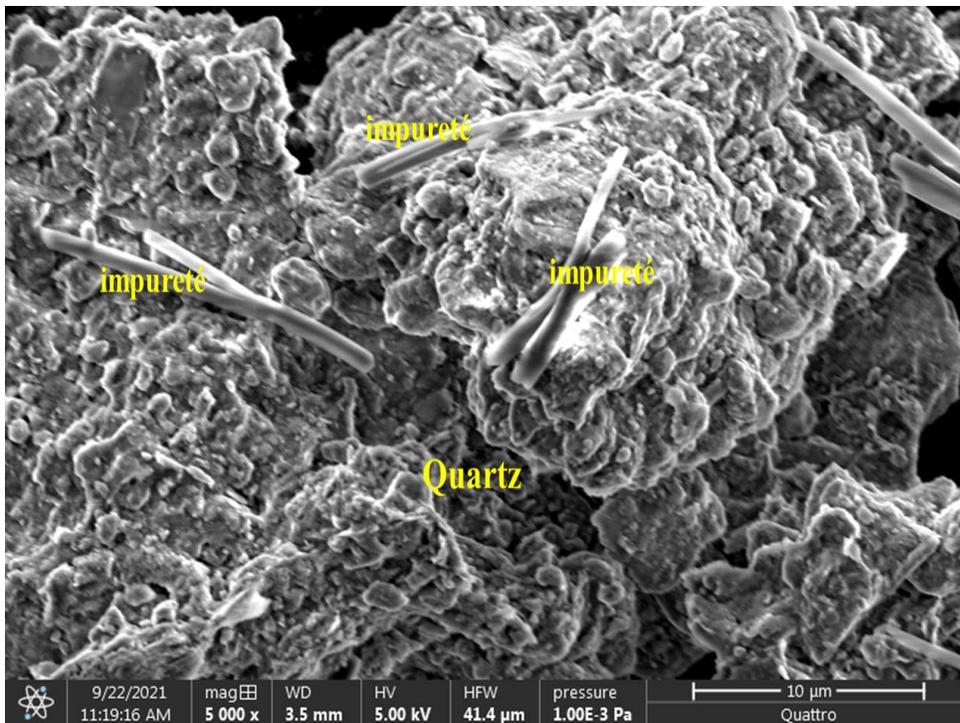


Figure III.6 : Caractérisation du SA au moyen des techniques DRX et MEB.

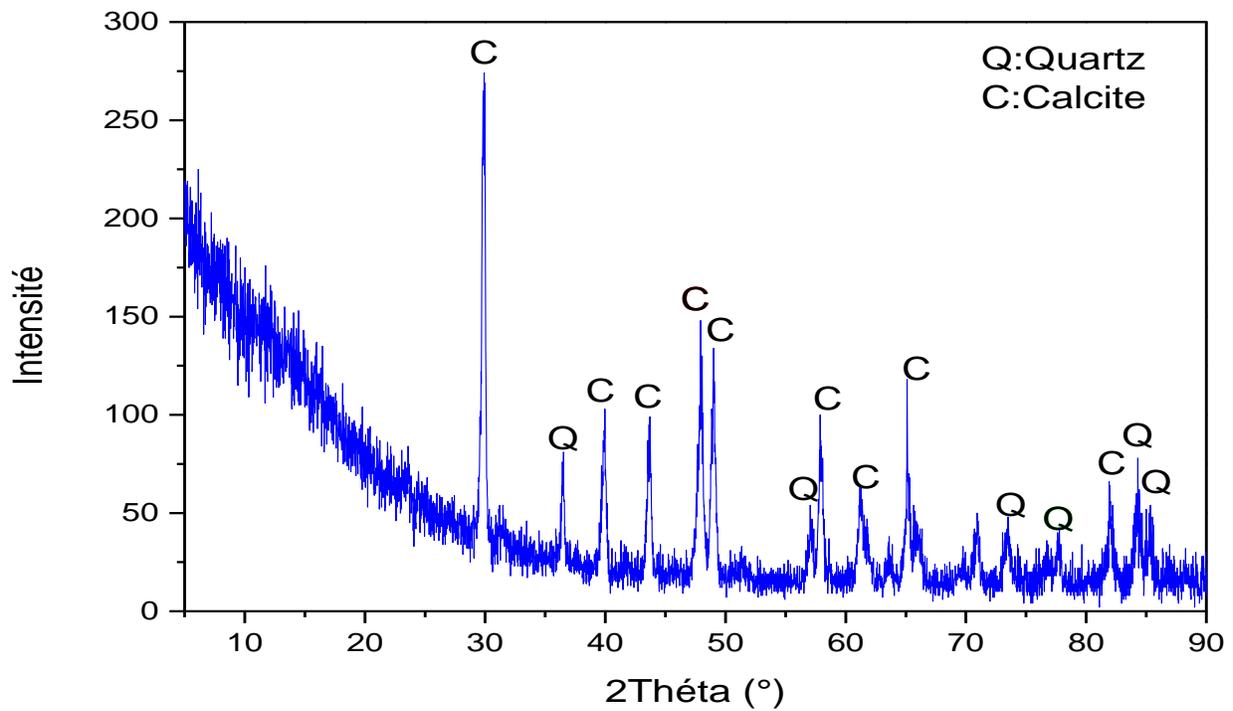
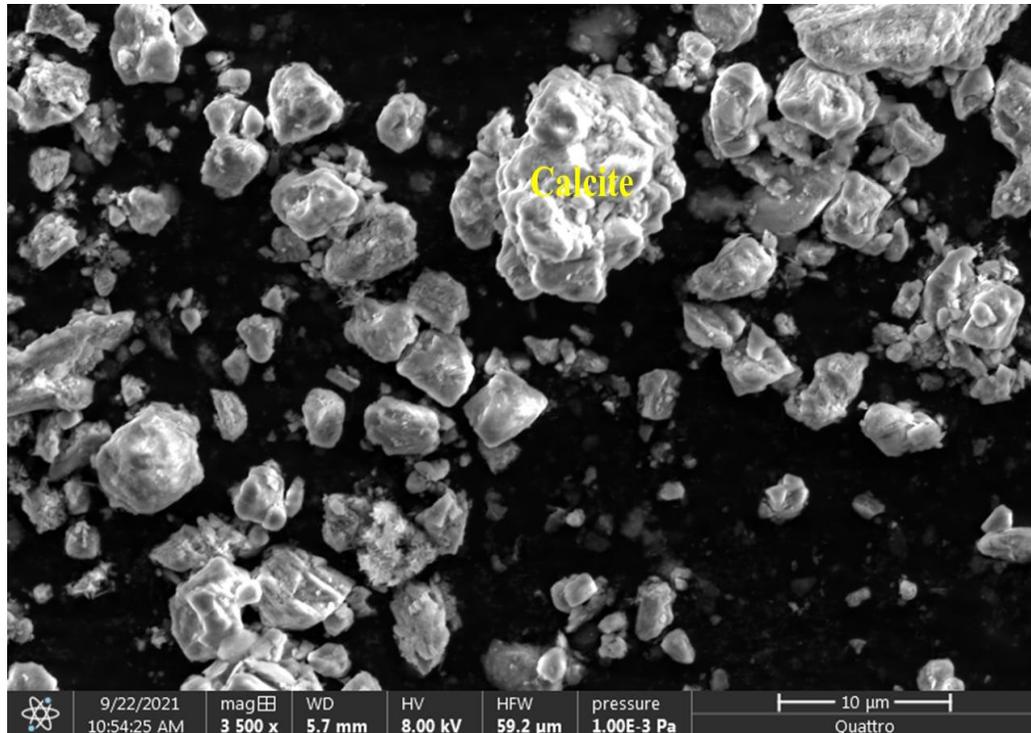


Figure III.7: Caractérisation du SC au moyen des techniques DRX et MEB.

III.2.2. Ciment

Le ciment utilisé pour l'élaboration du composite étudié est le Ciment Portland au Calcaire de type CEM II/B-L 32.5N, conformément à la norme algérienne NA 442 et européenne EN 197-1. Le ciment avait une densité de 3.09 g/cm^3 . L'analyse granulométrique au granulaser montre que la totalité des grains du ciment est inférieure au diamètre $100 \mu\text{m}$ et que le diamètre moyen est de l'ordre de $20 \mu\text{m}$ (figure III.3). Les principales propriétés chimiques sont présentées respectivement dans les tableaux III.3 et figure III.7, l'analyse du spectre obtenu révèle la présence des principales phases cristallochimiques du clinker, avec une prédominance des silicates tricalciques C_3S .

La finesse de Blaine est effectuée selon la norme NF EN 196-6, à l'aide d'un perméabilimètre de Blaine qui permet de déterminer la finesse de broyage du ciment. Son principe consiste à mesurer le temps de passage d'une quantité d'air connue au travers d'un lit de poudre. Plus le temps (t) mis par l'air pour traverser la poudre est long, plus la surface massique de cette dernière est importante. La surface spécifique Blaine est proportionnelle à la racine carrée du temps. La valeur de la surface spécifique Blaine du ciment utilisé est de l'ordre de $3937 \text{ cm}^2/\text{g}$.

Tableau III.3 : Analyse chimique du ciment utilisé (%).

Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	CL	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	Fe_2O_3	ZnO	SrO
0.0903	1.50	2.77	13.4	0.0784	3.43	0.0357	0.677	74.3	0.264	0.0582	3.22	0.0149	0.138

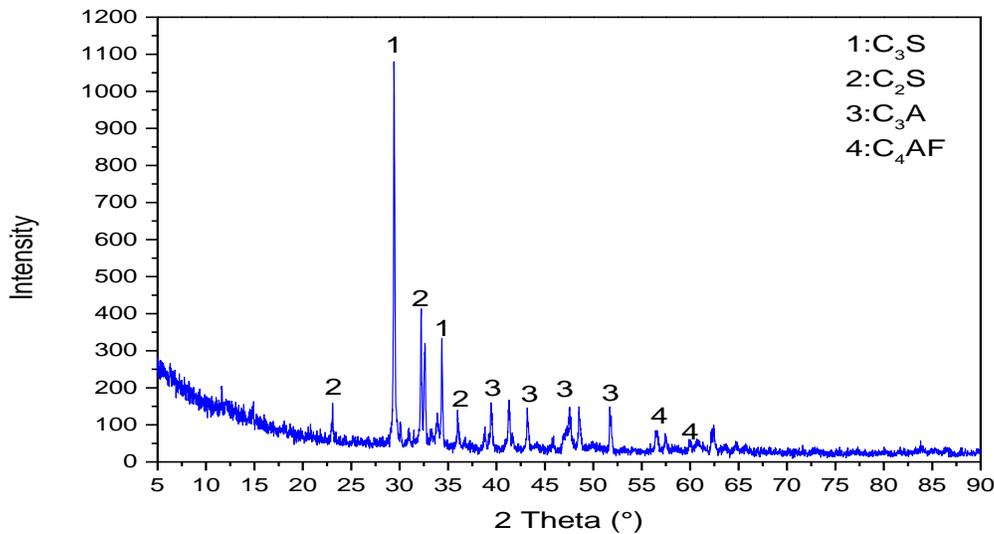


Figure III.8 : Analyse par diffraction des rayons X (DRX) du ciment.

III.2.3. Filler de calcaire

Le filler utilisé dans notre étude est obtenu par broyage ultra fin de carbonate de calcium issu des gisements de calcaire, d'origine néritique des montagnes uniques en Algérie situées à l'est de la wilaya de Constantine-El Kharroub. Son poids spécifique est de 2.7, sa densité apparente non tassée égale à 0.9 g/cm^3 pour un diamètre $10 \mu\text{m}$. Les propriétés physiques et chimiques et la répartition granulométrique au Granolaser de ce dernier sont représentées respectivement dans le tableau III.4 et les figures III.3 et III.9. D'après les résultats de l'essai de diffractométrie aux rayons X présenté dans la figure III.8, nous constatons que le CaCO_3 est l'espèce prépondérante. Donc le filler calcaire utilisé contient principalement de la calcite.

Tableau III.4 : Analyse chimique de filler de calcaire utilisée (%).

CO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	SrO
42.1	0.115	0.188	0.0979	0.0122	0.0121	57.5	0.0138	0.0083

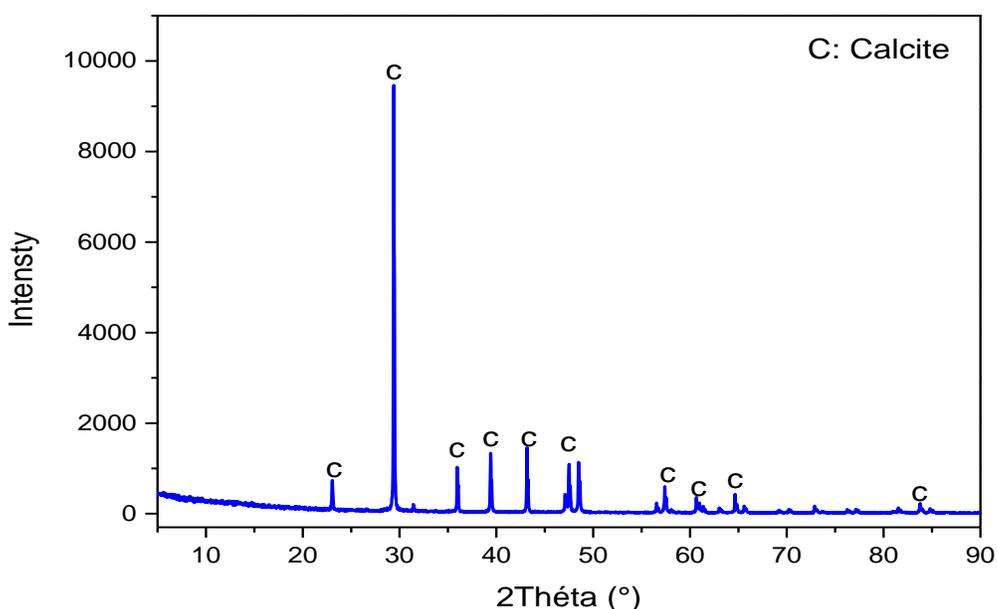


Figure III.9 : Analyse par diffraction des rayons X (DRX) du filler calcaire.

III.2.4. Eau

L'eau de gâchage pour les bétons de sable, comme tout béton ordinaire, doit être potable, dépourvue des sels minéraux. L'eau utilisée est l'eau de robinet, qui alimente le laboratoire de génie civil de l'université de Bordj Bou Arreridj. Sa température est comprise entre 18 et 20°C. Nous supposons qu'il est conforme à la norme [NF P 18-303](#).

Si l'on note x_i la teneur en constituant i , la somme des teneurs de tous les constituants du mélange satisfait à la relation :

$$\sum_{i=1}^{i=n} x_i = 100\% \dots\dots\dots (III.2)$$

III.3.3. Formulation de la composition de base des BSCRs

Les constituants du béton de sable compacté au rouleau (BSCR) sont les mêmes que ceux des bétons de sable. La formule donnée par Sablocrete (1994) est la plus adaptable à notre étude. Cette méthode se base sur la formule de Caquot pour déterminer la compacité du squelette granulaire. Le ciment et le filler de calcaire sont maintenus constants.

Les 21 BSCRs étudiés sont différents en fonction du type et de la quantité du sable introduit. Cette variation dans la composition du squelette granulaire rend le compactage difficile, ainsi la teneur en eau devra être parfaitement maîtrisée. La consistance du mélange doit être suffisamment rigide et, au même temps, elle doit être assez humide et maniable. Pour cela nous avons fait une correction de la quantité d'eau en utilisant l'essai Proctor modifié. Cet essai nous permet de trouver la quantité d'eau optimale de chaque mélange préparé. Les mélanges étudiés sont compactés à une humidité différente, en utilisant l'énergie Proctor modifiée selon la norme AFNOR NF P094-093, à l'aide d'une machine de compactage automatique (figure III.10). Les compositions obtenues sont résumées dans le tableau III.6.

Il convient de noter que la méthode utilisée dans la présente étude passe par les étapes suivantes :

1-Estimation du dosage en fines :

$$[Fines] = 0.38 (0.08 / D) \dots\dots\dots (III.3)$$

Le dosage du ciment et des ajouts est obtenu en résolvant le système suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Ciment} + \text{ajouts} = [Fines]. \\ \text{Ajouts/ciment} = \text{facteur d'activité optimal} \end{array} \right.$$

2-Estimation de la teneur en eau et vide :

$$(e+v) = 0.8*(d / D)^{0.2} \dots\dots\dots (III.4)$$

Où 'e' est le volume d'eau et 'v' le volume d'air piégé. En outre, $d = 60 / (f.p)$, dans laquelle 'f' est la finesse Blaine du ciment (cm^2/g) et 'p' la densité du ciment (g/cm^3). Pour estimer la teneur en eau, le volume d'air piégé doit être déterminé. Un ordre de grandeur peut être obtenu comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_v = K \cdot W \text{ (l/m}^3\text{)} \\ 0.20 \leq K \leq 0.25. \end{array} \right.$$

3-Estimation du dosage en sable :

$$[S] = 1000 - [Fines] - [e] - [v] \dots\dots\dots (III.5)$$

4-Correction de la teneur en eau par l'essai Proctor :

Un moule Proctor modifié a été utilisé pour compacter cinq couches, avec 56 coups par couche. On utilise une machine de compactage automatique qui comporte une dame tombant automatiquement dans le moule, le mouvement de translation verticale automatique de la dame est couplé à un mouvement de rotation du moule autour de son axe, ce procédé permet la répartition uniforme de compactage sur toute la surface du moule.

Nous avons fait varier les teneurs en eau de compactage de 4 à 12%, par pas de 2%. Les résultats obtenus (W_{opt} , γ_{dmax}) sont consignés dans les courbes des figures III.11,12,13 et 14. Ces courbes montrent la relation entre la teneur en eau et la densité sèche, pour chaque mélange compacté.

On note que la teneur en eau optimale des mélanges de béton de sable compacté au rouleau (BSCR) a varié d'une valeur minimale de 5,42 % à une valeur maximale de 9,75 %. Cette variation peut être attribuée aux propriétés physiques et chimiques des différents types de sable utilisés dans ce travail.

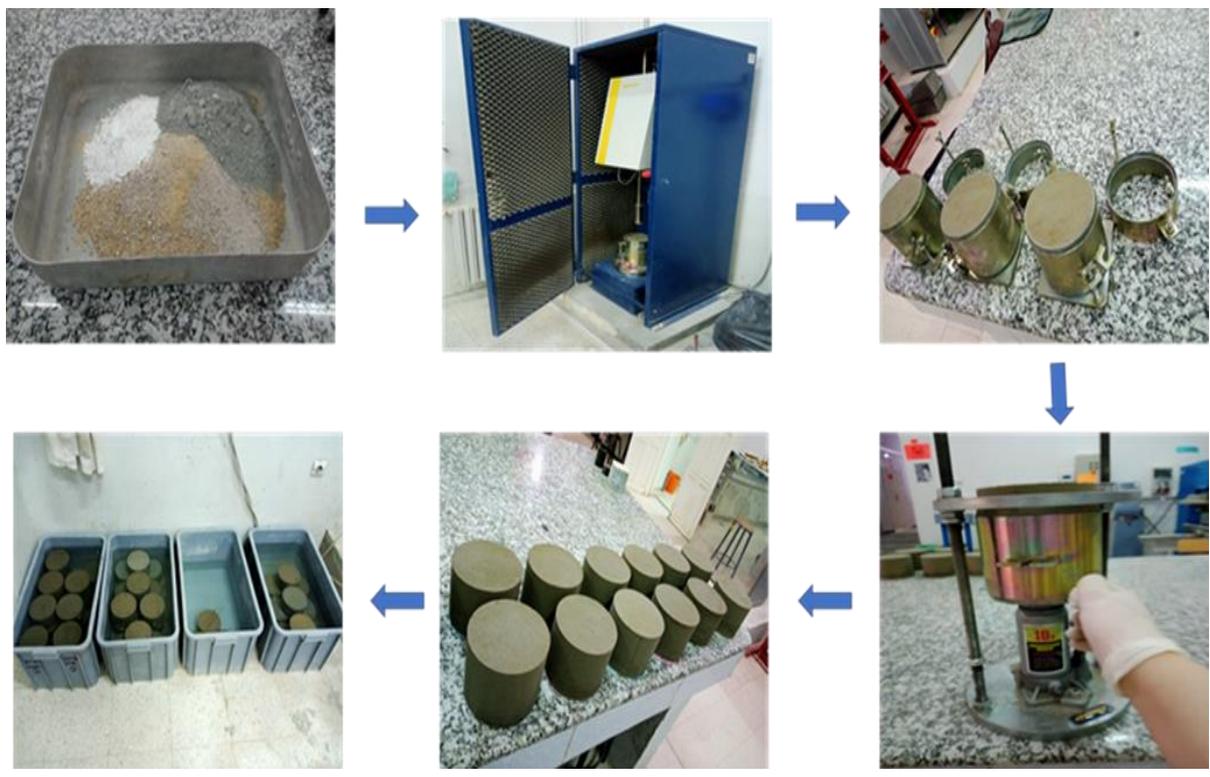


Figure III.10 : Compactage et confection des éprouvettes.

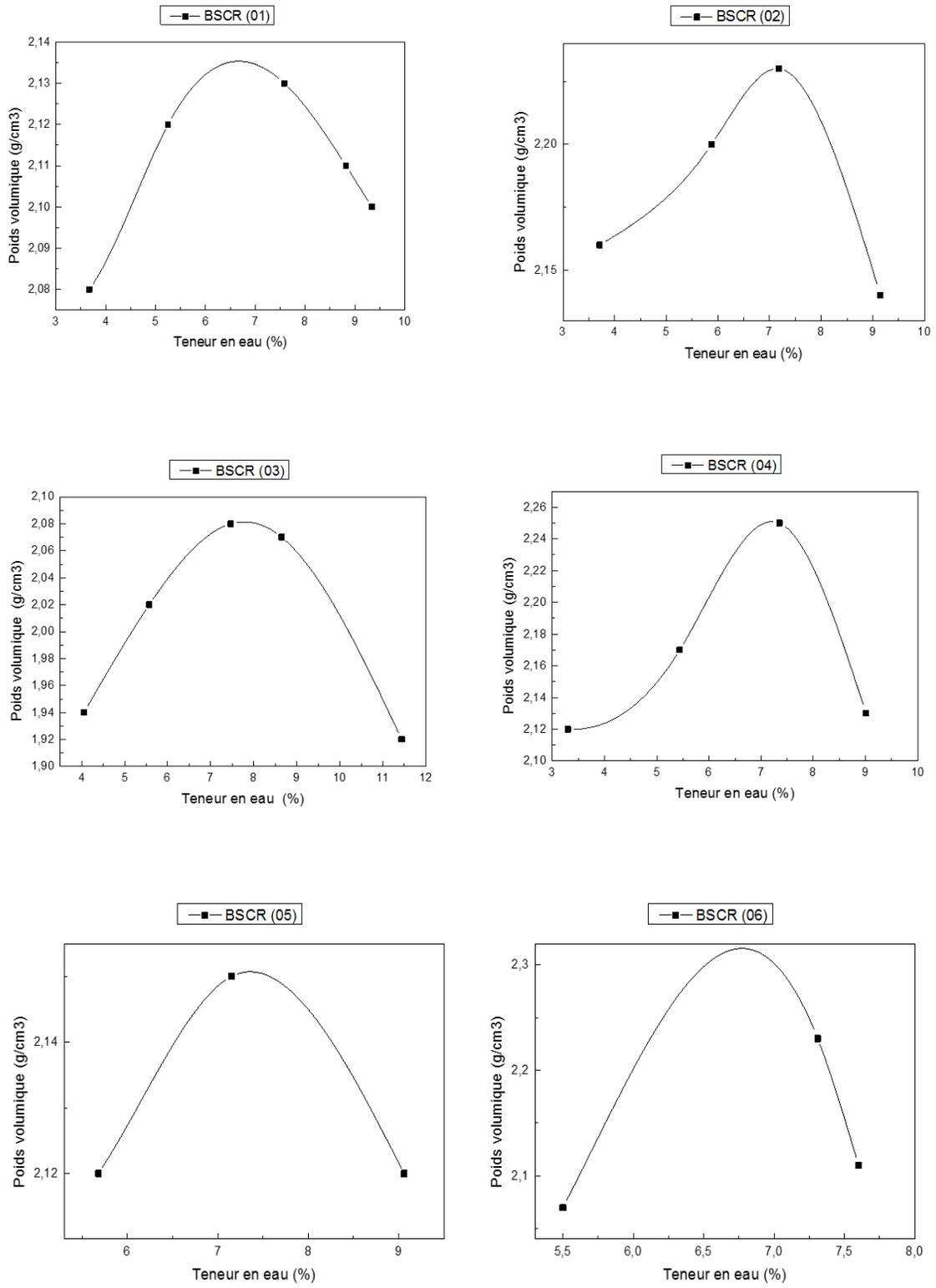


Figure 11 : Représentation de la variation de la teneur en eau en fonction des trois sables utilisés (BSCR1-BSCR6).

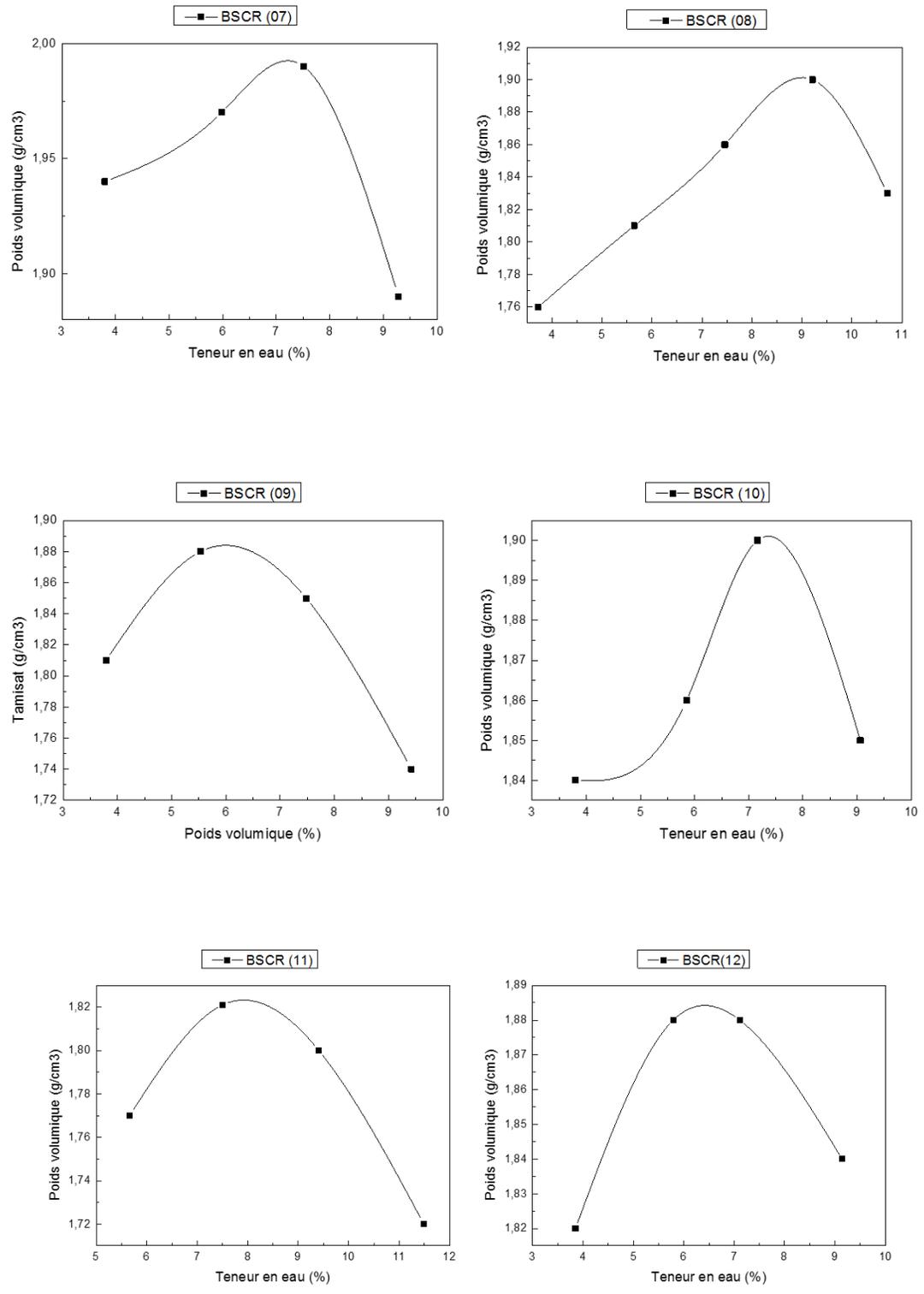


Figure 12 : Représentation de la variation de la teneur en eau en fonction des trois sables utilisés (BSCR7-BSCR12).

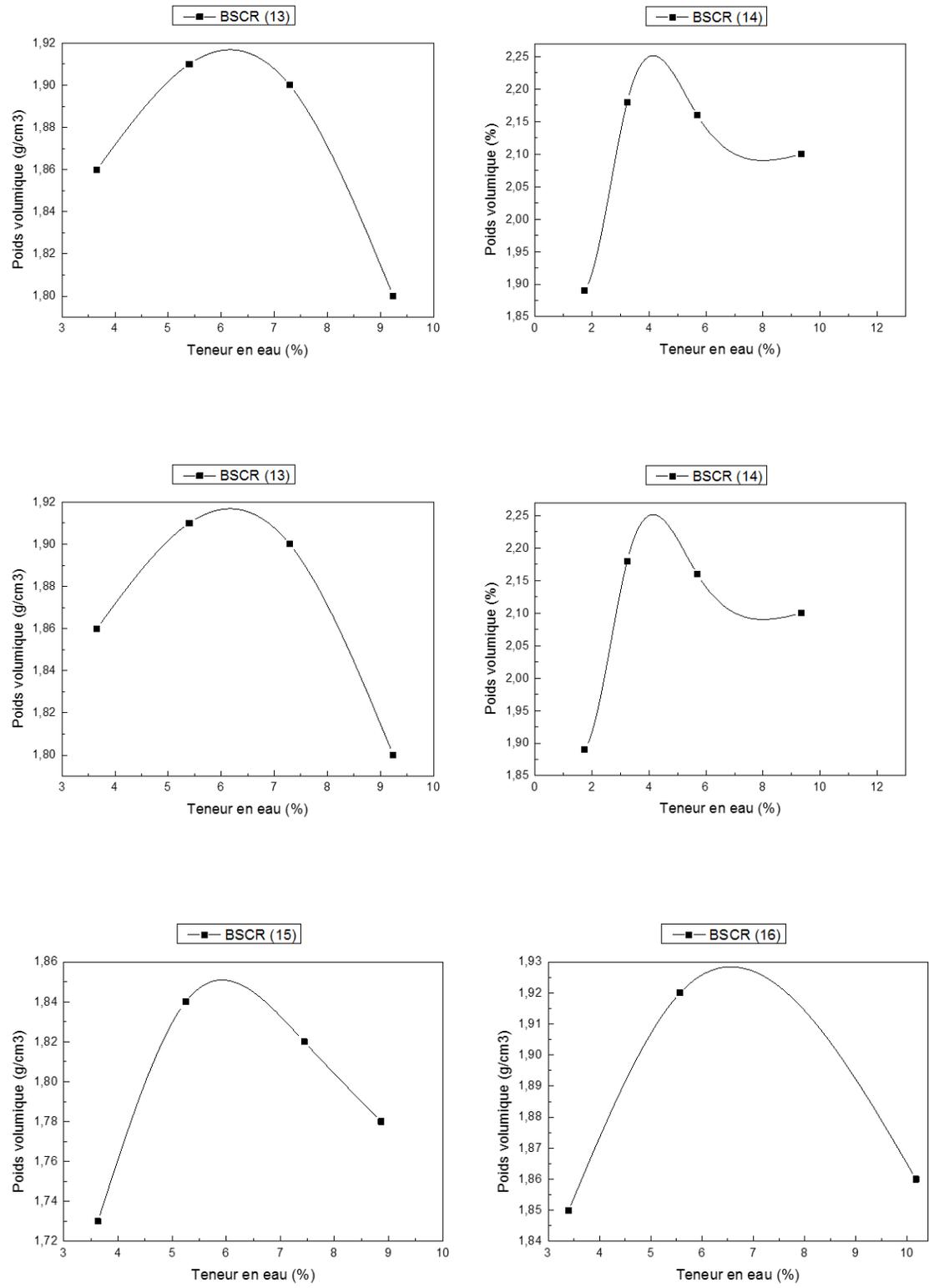


Figure 13 : Représentation de la variation de la teneur en eau en fonction des trois sables utilisés (BSCR 13- BSCR 16).

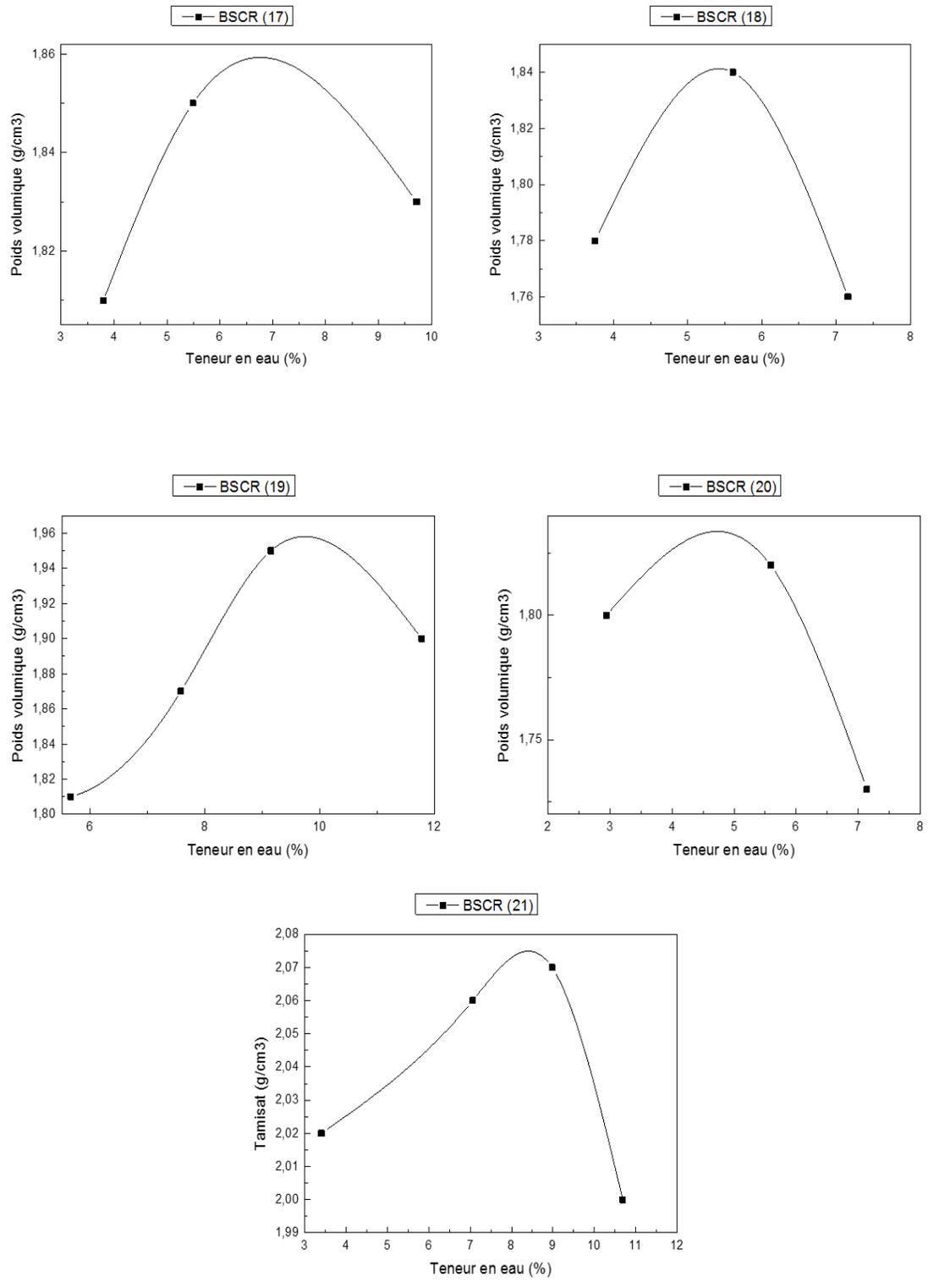


Figure 14 : Représentation de la variation de la teneur en eau en fonction des trois sables utilisés (BSCR 17- BSCR 21).

Comme nous l'avons déjà mentionné, les mélanges du BSCR incorporant chacun des trois sables ont été préparés avec différents rapport « E/C », ce qui est en accord avec les résultats obtenus après le test proctor. A noter que les dosages de ciment et de filler calcaire ont été maintenus fixes.

Dans ce travail, nous nous intéressons au béton de sable compacté au rouleau qui a une résistance à la compression comprise entre 15 et 25 MPa, destiné aux applications routières. Pour cela nous avons traité un plan de mélange à 3 facteurs (SD, SA et SC) pris en proportions massiques (figure III.15), les facteurs sont dépendants, les uns des autres. Le domaine expérimental est décrit par la relation suivante:

$$\% SD + \% SA + \% SC = 100 \dots\dots\dots(III.6)$$

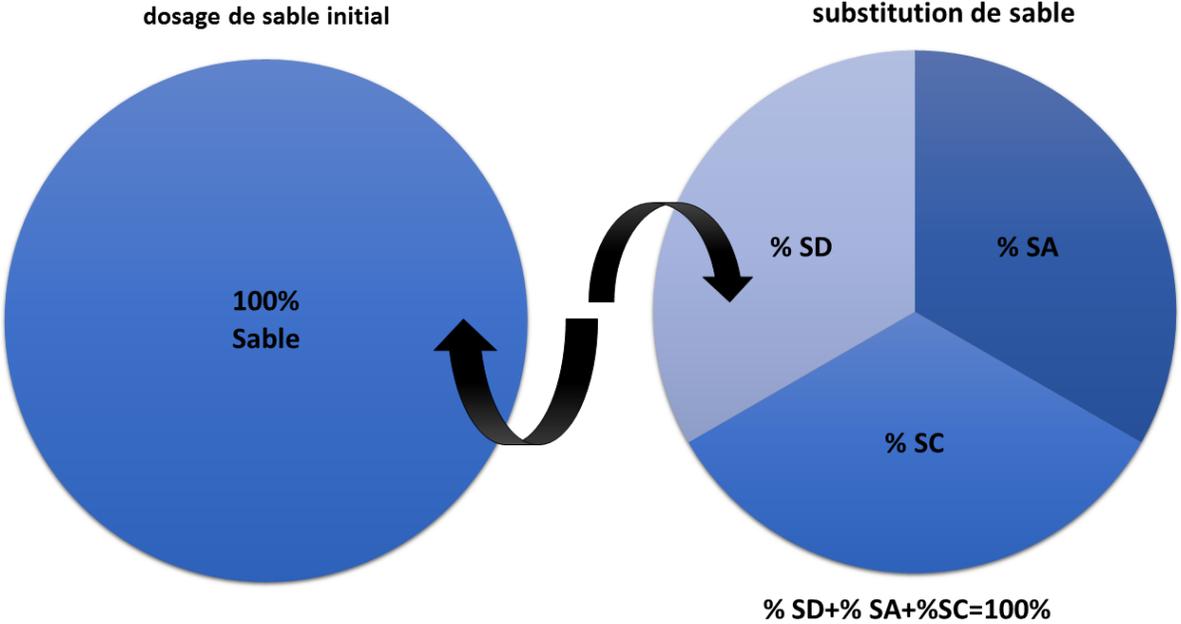


Figure III.15: Substitution du sable par divers types de sable saharien.

Le nombre d'expériences générés par le logiciel est calculé par la relation suivante :

$$C_{q+m-1}^m = \frac{(q+m-1)!}{(m)!(q-1)!} \dots\dots\dots(III.7)$$

Avec

- q : est le nombre de facteurs
- m : le nombre de niveaux.

Selon l'équation (III.7), avec trois facteurs « $q = 3$ » et cinq niveaux « $m = 5$ », le nombre de compositions à traiter est égal à 21.

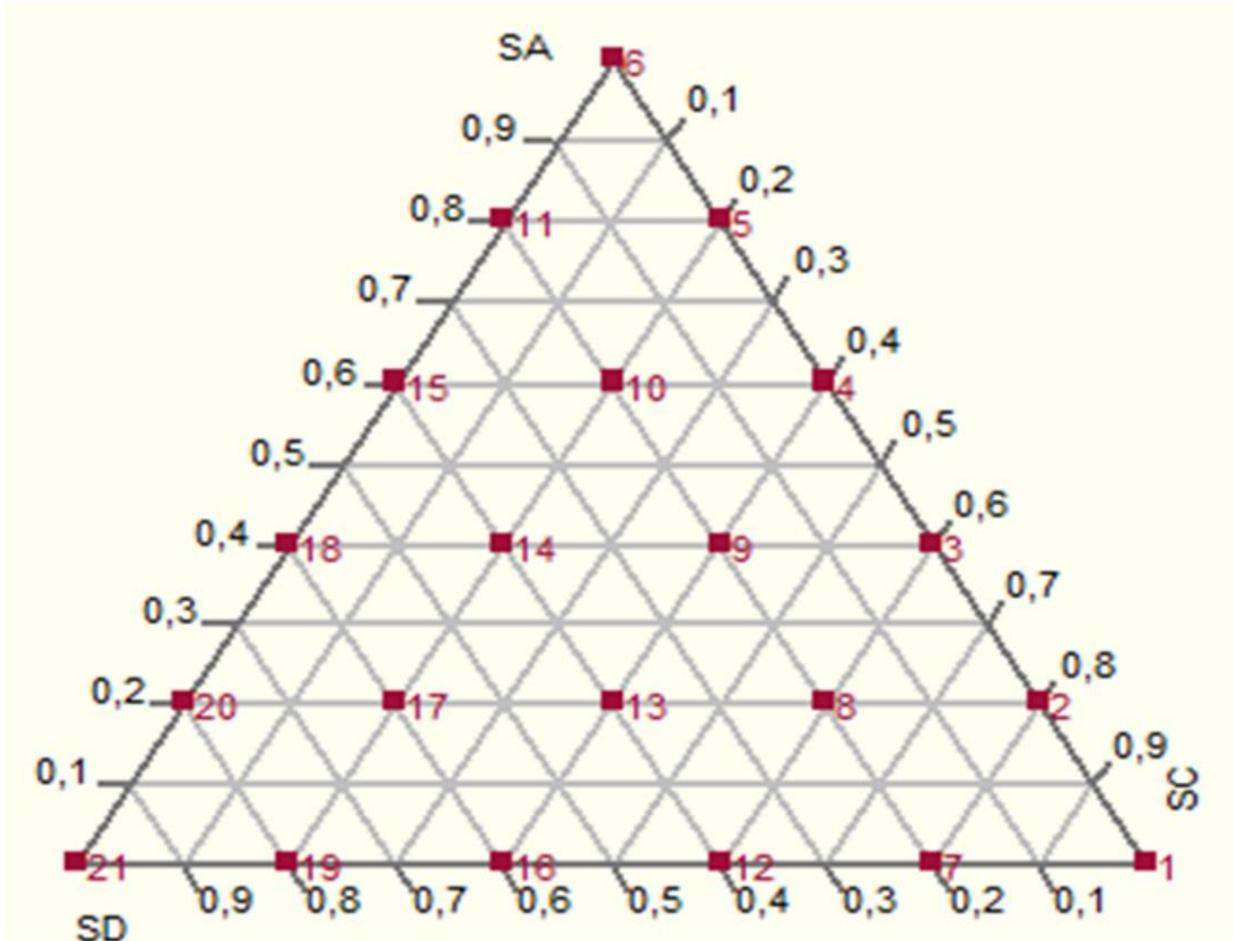


Figure III.16: Représentation des 21 mélanges étudiés utilisant un triangle équilatéral.

La figure III.16 représente un réseau triangulaire des 21 combinaisons étudiées, les points situés sur le côté droit du triangle équilatéral représentent les mélanges composés uniquement des sables AS et CS, les points situés sur le côté gauche représentent les mélanges composés uniquement des sables AS et SD et les points situés sur le côté horizontal montrent les mélanges composés uniquement des sable SD et SC; tandis que les points situés à l'intérieur du triangle équilatéral représentent un mélange tertiaire (SD, AS et CS).

Les sables témoins sont aux sommets du triangle équilatéral. Les proportions de ces facteurs d'expérience générés par le logiciel (JMP 16) sont présentées dans le tableau III.5. Le tableau III.6 représente la formule finale des 21 BSCRs étudiés.

Tableau III.5 : Proportions des facteurs dans les compositions étudiées.

Mélange	SD	SA	SC
BSCR 01	0	0	1
BSCR 02	0	0,2	0,8
BSCR 03	0	0,4	0,6
BSCR 04	0	0,6	0,4
BSCR 05	0	0,8	0,2
BSCR 06	0	1	0
BSCR 07	0,2	0	0,8
BSCR 08	0,2	0,2	0,6
BSCR 09	0,2	0,4	0,4
BSCR 10	0,2	0,6	0,2
BSCR 11	0,2	0,8	0
BSCR 12	0,4	0	0,6
BSCR 13	0,4	0,2	0,4
BSCR 14	0,4	0,4	0,2
BSCR 15	0,4	0,6	0
BSCR 16	0,6	0	0,4
BSCR 17	0,6	0,2	0,2
BSCR 18	0,6	0,4	0
BSCR 19	0,8	0	0,2
BSCR 20	0,8	0,2	0
BSCR 21	1	0	0

Tableau III.6 : Formulations des mélanges selon un plan de mélange.

Mélange N°	Sable (kg/m ³)			Ciment (kg/m ³)	Fileur de calcaire (kg/m ³)	Eau (l/m ³)
	SD	SA	SC			
BSCR 01	0	0	1646			175
BSCR 02	0	329.2	1316.8			184
BSCR 03	0	658.4	987.6			197
BSCR 04	0	987.6	658.4			184
BSCR 05	0	1316.8	329.2			140
BSCR 06	0	1646	0			174
BSCR 07	329.2	0	1316.8			173
BSCR 08	329.2	329.2	987.6			229
BSCR 09	329.2	658.4	658.4			156
BSCR 10	329.2	987.6	329.2			188
BSCR 11	329.2	1316.8	0	320	168	203
BSCR 12	658.4	0	987.6			165
BSCR 13	658.4	329.2	658.4			159
BSCR 14	658.4	658.4	329.2			126
BSCR 15	658.4	987.6	0			153
BSCR 16	987.6	0	658.4			169
BSCR 17	987.6	329.2	329.2			174
BSCR 18	987.6	658.4	0			138
BSCR 19	1316.8	0	329.2			223
BSCR 20	1316.8	329.2	0			124
BSCR 21	1646	0	0			215

III.4. Méthode et essai

III.4.1. Réalisation des gâchées

La qualité du béton dépend beaucoup plus de l'homogénéisation de la composition, non seulement au stade macroscopique, mais également au stade microscopique. Pour obtenir une grande homogénéité du béton de sable compacté au rouleau, un premier malaxage, à sec a été réalisé, suivi d'un deuxième malaxage après introduction de l'eau de malaxage. Lors du malaxage le constituant actifs (ciment) est introduit en dernier, immédiatement avant la mise de l'eau, avec une bonne répartition sur tous les grains de sable. Sept minutes, c'est la durée du malaxage qui a été suffisante pour obtenir l'homogénéité des constituants.

III.4.2. Confection des éprouvettes

Les éprouvettes utilisées (Figure III.17) pour la confection des essais mécaniques et physiques sont les mêmes tirés de l'essai Proctor modifié (Zdiri et al. 2009). Cette procédure a été choisie pour garder la même énergie et le même type de compactage.



Figure III.17: Confection de BSCR par une machine de compactage automatique.

III.4.3. Mode de cure

Les éprouvettes étaient démoulées immédiatement à l'aide d'une crique (Figure III.18), ces dernières sont maintenues dans l'environnement du laboratoire ; après 24 heures elles ont été stockées dans un bac d'eau à une température ambiante d'environ 20°C jusqu'à la date des essais.



Figure III.18: Démoulage et conservation des éprouvettes de BSCR.

III.4.4. Essai physico-mécaniques

III.4.4. 1. Résistance à la compression

La résistance à la compression du Béton est considérée comme sa propriété la plus importante. Elle donne une idée globale sur la qualité d'un béton, car elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydraté et au type de granulats.

Pour les différents mélanges de BSCR, l'essai de compression est mené sur des éprouvettes de forme cylindrique ; les valeurs obtenues ont été déterminées en prenant la moyenne de trois échantillons, après 7, 14 et 28 jours (Figure III.19).



Figure III.19 : Essai de la résistance à la compression du BSCR.

III.4.4. 2. La résistance à la traction par fendage

Les échantillons du BSCR ont été testés à l'aide d'une machine d'essai de compression, selon la norme [BS EN 12390-6](#). Les éprouvettes cylindriques sont soumises, sur toute leurs génératrices, à un effort de compression appliqué sur la zone étroite (Figure III.20). Les contraintes de traction orthogonales, qui en résultent, provoquent la rupture de l'éprouvette par traction. L'équation (III.8) a été utilisée pour déterminer la résistance à la traction fendue. La vitesse du chargement est 0,05 MPa/s.

$$F_T = \frac{2P}{\pi DL} \dots\dots\dots (III.8)$$

Avec

F_t : Résistance à la traction (N/mm²) ; P : Charge à la rupture (N) ; D : Diamètre du cylindre ou côté du cube (mm) ; L : Longueur du cylindre (mm).

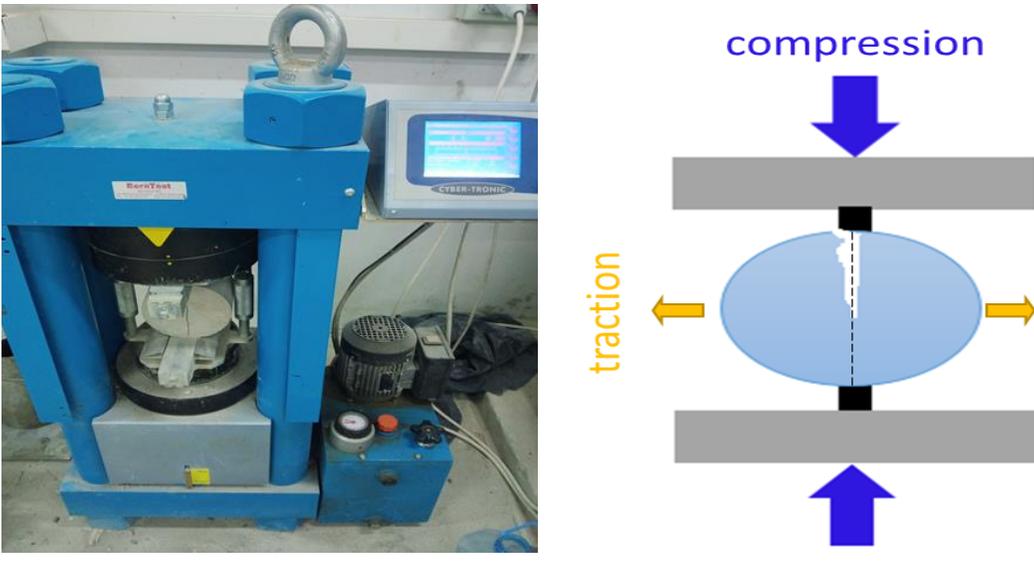


Figure III.20: Essai de la résistance à la traction par fendage.

III.4.4. 3. Module d'élasticité

Le test du module d'élasticité dynamique a été effectué selon la norme ASTM C215, en utilisant un équipement E-Meter MK II (Figure III.21), comme on peut le voir sur la figure 10. Le test consiste à déterminer la réponse en fréquence de résonance de l'éprouvette cylindrique induite par un impact mécanique généré avec une bille d'acier. Le module dynamique (GPa) est alors donné par l'équation suivante :

$$E_d = 5.093 \left(\frac{LM}{d^2} \right) (n')^2 \dots \dots \dots (III.9)$$

Avec :
 n' : fréquence fondamentale longitudinale (Hz) ; L : longueur de l'éprouvette (m) ; d : diamètre du spécimen (m) ; M : poids du spécimen (kg).



Figure III.21: Equipement E-Meter MK II.

III.4.4.4. Absorption de l'eau

Le test a été effectué conformément à la norme ASTM C 642-06. Les éprouvettes ont été immergées dans de l'eau pendant vingt-quatre heures (Figure III.22). Par la suite, les échantillons ont été égouttés avec une serviette, pendant dix minutes, pour éliminer l'excès d'eau (Awolusi et al. 2019). L'absorption d'eau a été déterminée en utilisant l'équation (III.10). Trois échantillons ont été testés pour chaque mélange de béton afin d'obtenir une valeur moyenne fiable.

$$\text{Abs} = \frac{W_2 \pm W_1}{W_1} \times 100 \dots\dots\dots (III.10)$$

Avec :

W1 : Poids de l'échantillon avant immersion dans l'eau ; W2 : Poids de l'échantillon après immersion dans l'eau.



Figure III.22 : Essai d'Absorption de l'eau.

III.4.5. Essai microstructure

III.4.5.1. L'analyse au microscope électronique à balayage (MEB)

La microscopie électronique à balayage (MEB) peut effectuer une analyse élémentaire en détectant l'énergie des rayons X émis. Le fort grandissement et la profondeur de champ de cette technique d'analyse permettent de former des images de surfaces rugueuses ou lisses avec un haut pouvoir de résolution.

Pour notre étude, les observations ont été faites avec un microscope électronique à balayage (Quattro ESEM) disponible au Plateau Technique d'Analyses Physico-Chimiques (PTAPC-LAGHOUAT). Les échantillons observés ont été prélevés au centre d'éprouvettes cylindriques. Ils sont des dimensions de l'ordre de 1 à 2 cm, afin de pouvoir les introduire dans la chambre du MEB (Figure III.23).

Les photos MEB réalisées, prises sur une échelle de 10 micromètres (5000x) à cette échelle, nous pouvons visualiser les principales phases du ciment hydraté (les hydro-silicates de calcium (C-S-H), l'ettringite et la portlandite avec des morphologies diverses : cristaux, aiguilles et plaquettes).



Figure III.23 : Vue d'ensemble du MEB de PTAPC-Laghouat.

III.4.5.2. Mesures par la diffraction de rayons X (DRX)

La diffraction de rayons X, est une technique de la caractérisation des matériaux, qui permet la détermination des phases minérales des matériaux. En effet, cette méthode ne s'applique qu'à des milieux cristallins, présentant les caractéristiques de l'état cristallin, c'est-à-dire, un arrangement périodique, ordonné et dans des plans réticulaires tridimensionnels des atomes constitutifs. Ceux-ci s'organisent, donc, en plans réticulaires, plus ou moins denses, qui sont désignés par leurs coordonnées (h, k, l) dans un système de repérage de l'espace (Houria MEFTAH 2018).

Pour réaliser les essais 'diffraction aux rayons X', nous avons pris des échantillons à partir des éprouvettes de BSCR réalisées ; ces échantillons sont concassés, puis broyés (Figure III.24) jusqu'à obtenir des poudres fines (<80 μm). Les échantillons retenus pour analyse sont placés dans des porte échantillons en plastique et mise en place dans l'appareil (Malven Panalytical) disponible au Plateau Technique d'Analyses Physico-Chimiques (PTAPC-LAGHOUAT). Ces derniers ont été exposés aux rayons X, afin de se faire une idée sur les nouveaux produits formés.

Les principaux produits présents dans les bétons de sable étudiés par l'analyse 'diffraction des rayons X' sont : le quartz, calcite, les hydrates de silicate de calcium, la portlandite, l'ettringite, et aluminat de carbone.



Figure III.24 : Etapes de réalisations de l'essai DRX.

III.5. Conclusion :

L'objectif de cette étude, qui s'inscrit dans un cadre de recherche développement, est de connaître l'influence du type et du dosage de sable sur les propriétés mécaniques et la microstructure d'un nouveau type de béton routier, fabriqué avec 100% de sable. L'étude sera réussie si notre béton répond à certaine exigence technique.

C'est avec la technique des plans d'expériences et après une première approche expérimentale qui nous permet d'optimiser la formulation finale du BSCR, selon le type et les caractéristiques des granulats étudiés.

Chapitre 04



Etude des propriétés du
BSCR
et modélisation des réponses

IV.1. Introduction

La méthode des plans d'expériences permet de considérer toutes les interactions possibles entre les effets des composants et d'établir l'ordre d'importance des paramètres sur les propriétés étudiées. Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats du programme expérimental réalisé. Ces résultats nous permettent, par la suite, d'établir des modèles mathématiques décrivant les effets des constituants (SD, SA, et SC) de la formulation du BSCR sur les paramètres étudiés (résistance à la compression et à la traction par fendage, le module d'élasticité ainsi que l'absorption d'eau).

Dans un second lieu, les résultats de la microstructure des divers composites, choisis sur la base des résultats issus du plan d'expériences, sont présentés et discutés.

IV2.Etude des propriétés physico-mécaniques

IV.2.1. Résistance à la compression

Les résultats des essais de la résistance à la compression aux âges de 7, 14 et 28 jours sont récapitulés dans le tableau IV.1 suivant :

Tableau IV.1 : Résistance à la compression des 21 mélanges du BSCR (MPa).

Mélange	SD	SA	SC	R _{c-7j}	R _{C-14j}	R _{C-28 j}
BSCR 01	0	0	1	12,78	15,34	18,66
BSCR 02	0	0,2	0,8	11,38	13,65	15,41
BSCR 03	0	0,4	0,6	13,45	14,87	19,99
BSCR 04	0	0,6	0,4	6,18	7,84	10,02
BSCR 05	0	0,8	0,2	3,77	4,23	5,38
BSCR 06	0	1	0	4,49	5,25	6,98
BSCR 07	0,2	0	0,8	12,74	13,3	13,47
BSCR 08	0,2	0,2	0,6	12,06	13,14	20,31
BSCR 09	0,2	0,4	0,4	6,98	13,86	14,29
BSCR 10	0,2	0,6	0,2	5,01	6,88	7,46
BSCR 11	0,2	0,8	0	3,22	5,32	10,26
BSCR 12	0,4	0	0,6	12,89	13,47	16,31
BSCR 13	0,4	0,2	0,4	9,04	9,46	13,36
BSCR 14	0,4	0,4	0,2	4,45	6,14	11,14
BSCR 15	0,4	0,6	0	4,9	8,6	12,14
BSCR 16	0,6	0	0,4	17,66	20,73	19,47
BSCR 17	0,6	0,2	0,2	13,16	16,7	20,94
BSCR 18	0,6	0,4	0	6,39	10,62	18,47
BSCR 19	0,8	0	0,2	11,39	18,22	21,32
BSCR 20	0,8	0,2	0	11,39	14,93	16,12
BSCR 21	1	0	0	15,25	19,68	24,73

IV.2.1.1. Modèles mathématiques

Le coefficient estimé dans le modèle linéaire (Coeff) et les valeurs de la probabilité (p-value) des réponses sont regroupés dans le tableau IV.2. On remarque que les coefficients des réponses sont acceptables. La majorité est supérieure à 1, ce qui est confirmé par les faibles valeurs de p-values.

Tableau IV.2 : Coefficients et paramètres des modèles des réponses (R_C à 7,14 et 28 jours).

	R_{C-07j}		R_{C-14j}		R_{C-28j}	
	$R^2 = 0.82$		$R^2 = 0.80$		$R^2 = 0.72$	
	Coeff.	p-value	Coeff.	p-value	Coeff.	p-value
DS	15,033333	<,0001*	20,510767	<,0001*	24,378968	<,0001*
AS	2,8440476	0,1358	3,5405291	0,1239	4,8980159	0,0973
CS	13,12619	<,0001*	14,797672	<,0001*	18,175397	<,0001*
DS*AS	-12,76042	0,1498	-11,38145	0,2778	-2,616071	0,8415
DS*CS	1,0252976	0,9043	-5,12252	0,6192	-14,64881	0,2732
AS*CS	4,297619	0,6158	7,3164683	0,4799	8,2232143	0,5323
DS*AS*CS	-47,8125	0,3443	-40,77546	0,4993	-19,51389	0,7983

D'après le tableau IV.2, on constate que les coefficients de corrélations sont relativement élevés. Ceci montre une bonne corrélation entre les résultats expérimentaux obtenus et les valeurs trouvées par le modèle. Ainsi, tous ces coefficients ont été obtenus par une méthode de régression basée sur les critères d'optimisation des moindres carrés.

À l'aide de cette modélisation, on peut écrire un modèle avec lequel on prédit les réponses dans l'ensemble du domaine d'étude :

$$R_{C-07j} = 15,033333*SD + 2,8440476*SA + 13,12619*SC - 12,76042*SD*SA + 1,0252976*SD*SC + 4,297619*SA*SC - 47,8125*SD*SA*SC \quad (IV.1)$$

$$R_{C-14j} = 20,510767*SD + 3,5405291*SA + 14,797672*SC - 11,38145*SD*SA - 5,12252*SD*SC + 7,3164683*SA*SC - 40,77546*SD*SA*SC \quad (IV.2)$$

$$R_{C-28j} = 24,378968*SD + 4,8980159*SA + 18,175397*SC - 2,616071*SD*SA - 14,64881*SD*SC + 8,2232143*SA*SC - 19,51389*SD*SA*SC \quad (IV.3)$$

Les différents modèles trouvés par la méthode des plans d'expériences, permettent de tracer des courbes isoréponses, afin de visualiser les effets des paramètres de formulation (dosage de SD, dosage de SA, et dosage de SC) sur les réponses : R_{C-7} , R_{C-14} et R_{C-28} jours.

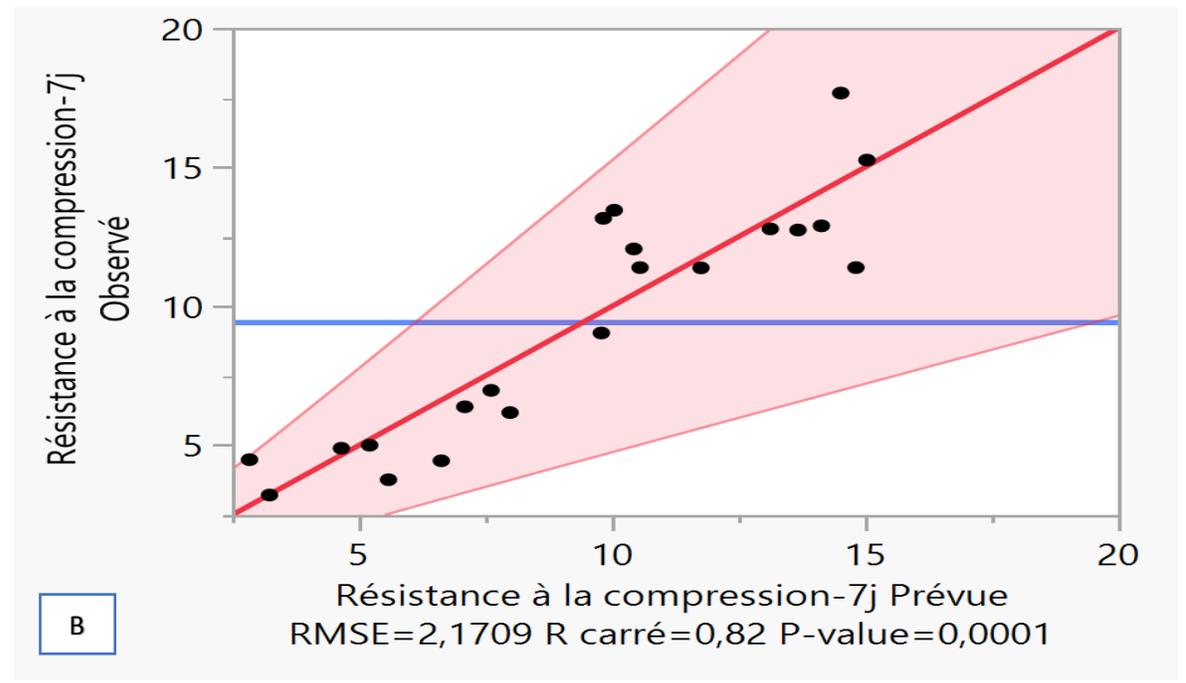
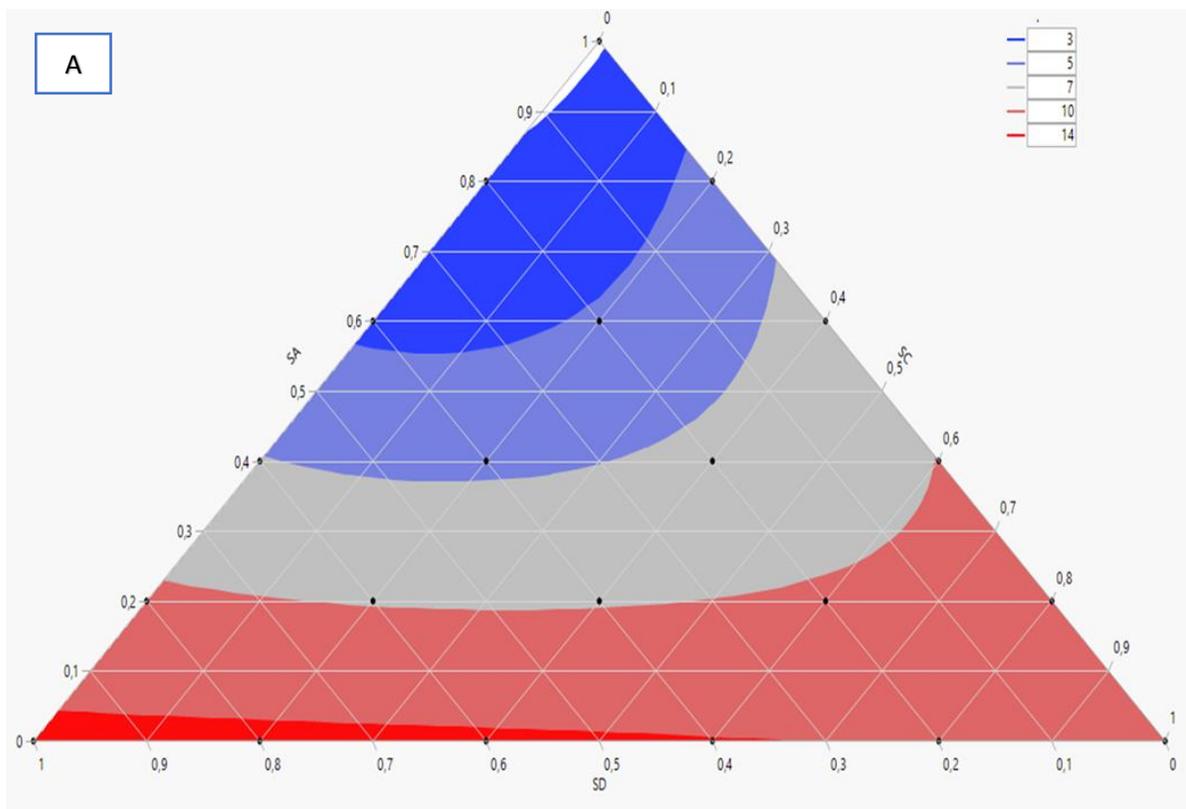


Figure IV.1 : A- Courbes iso-réponses de la résistance à la compression à 7 jours (MPa)
 B- Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.

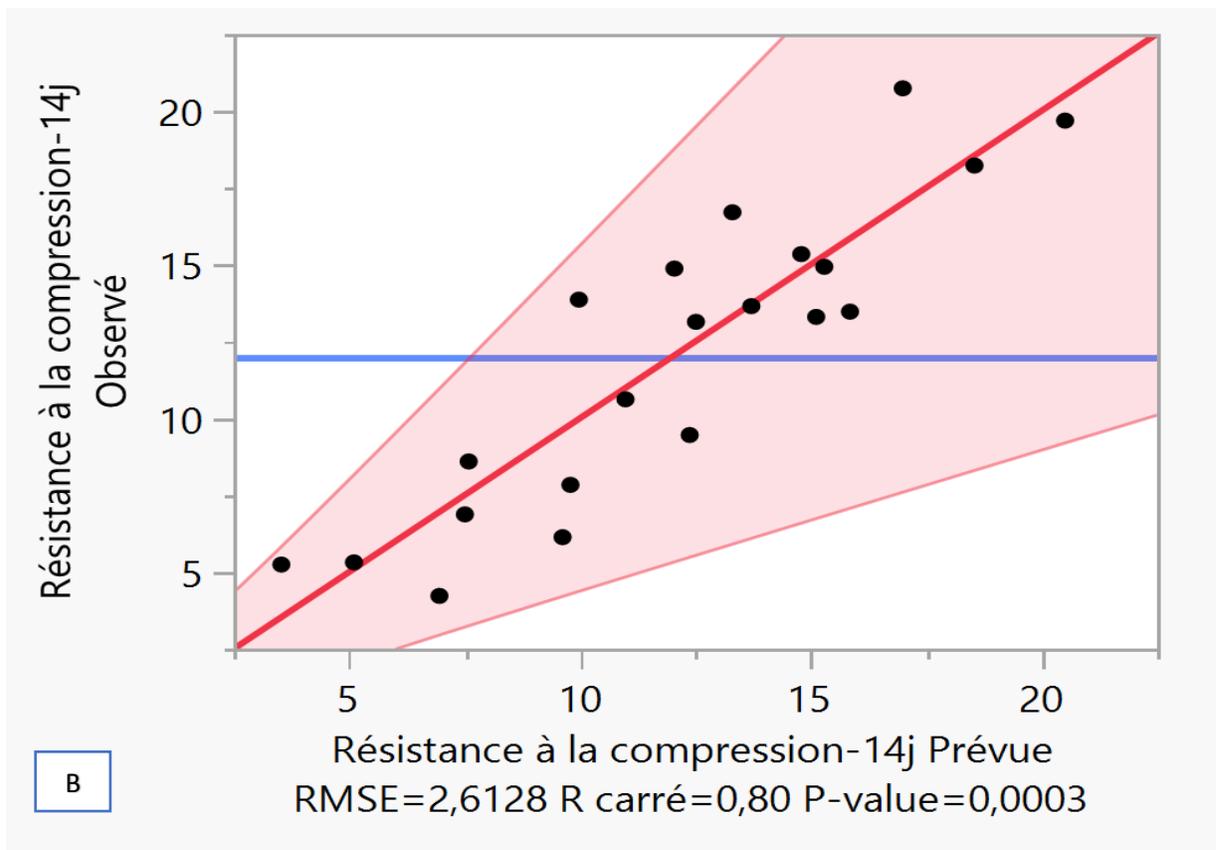
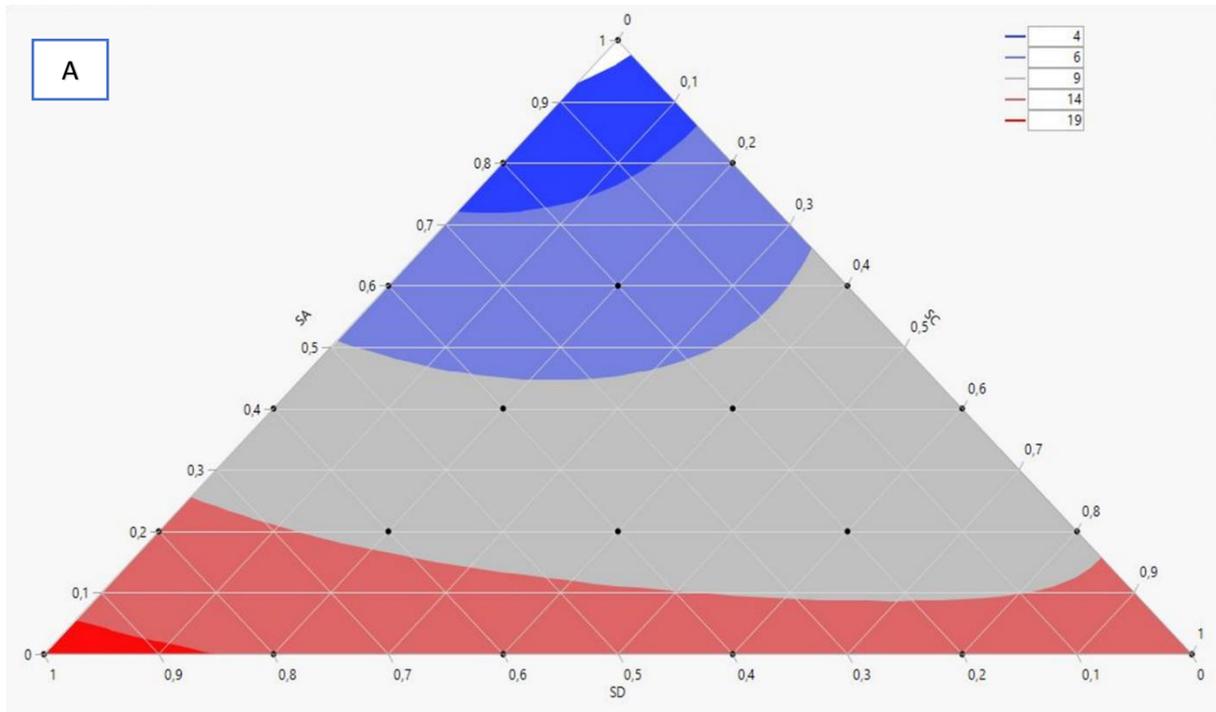


Figure IV.2 : A- Courbes iso-réponses de la résistance à la compression à 14 jours (MPa)
B- Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.

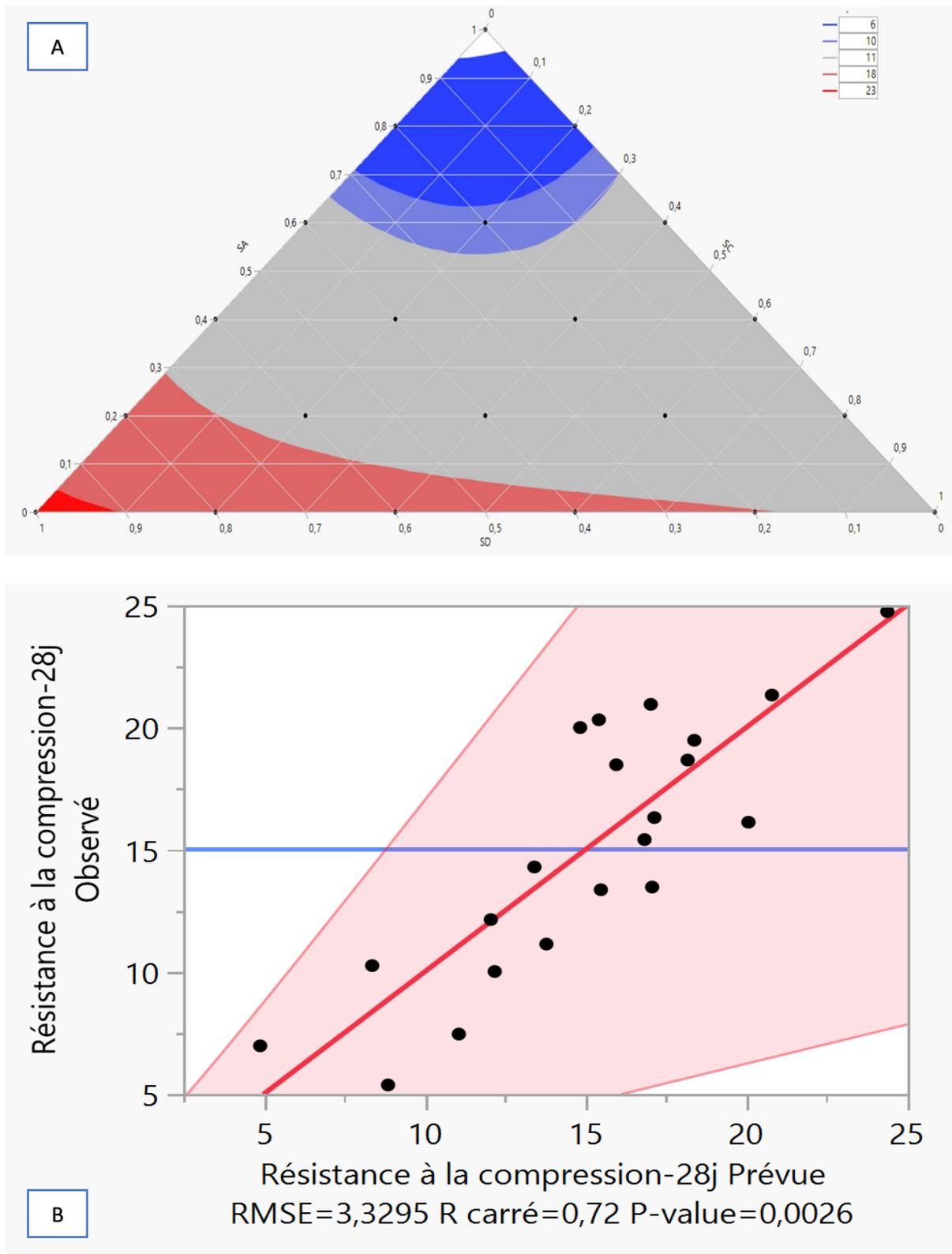


Figure IV.3 : A- Courbes iso-réponses de la résistance à la compression à 28 jours (MPa)
B- Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.

Les courbes d'iso-réponse de la résistance à la compression et les courbes de corrélation entre les résultats expérimentaux (observés) et les résultats théoriques (prédits) sont présentés dans les Figures IV.1 (A et B), IV.2 (A et B) et IV.3 (A et B) respectivement.

Il est clair que la résistance mécanique à la compression se développe au cours du temps (Figures IV.1A, IV.2A et IV.3A). Pour le mélange de référence (contrôle), il a été constaté que le sable du désert (SD) a donné les meilleurs résultats en termes de résistance à la compression ($R_C = 24,73$ MPa). En outre, le BSCR à base de sable concassé (SC) a donné une résistance mécanique intermédiaire ($R_C = 18,66$ MPa). En revanche, le BSCR contenant du sable alluvionnaire (SA) a eu une résistance mécanique plus faible ($R_C = 6,98$ MPa).

Les différences observées entre les trois mélanges sont liées directement aux différences observées dans leurs caractéristiques physiques, en particulier en ce qui concerne le module de finesse et l'équivalent sable. Il est utile de rappeler que le sable alluvionnaire (SA) avait un module de finesse égale à 1,7 et un équivalent sable égal à 56,19 ; ces deux valeurs ne sont pas acceptables et peuvent influencer négativement le degré d'hydratation de la pâte cimentaire, ainsi que la compacité du mélange.

Les valeurs de la résistance à la compression, obtenues à 28 jours, sont relativement moyennes (entre 13.47 et 24.73 MPa), à l'exception des mélanges incorporant plus de 60% de sable alluvionnaire. De plus, les valeurs trouvées pour les mélanges binaires, qui contiennent une teneur limitée en SA, sont bien meilleures que les autres. En ce qui concerne les mélanges ternaires, il a été constaté que plus le taux de sable alluvionnaire est élevé, plus la résistance mécanique est faible ; cette différence montre que la qualité du sable a un effet prédominant sur la résistance à la compression.

Les Figures IV.1 (A et B), IV.2 (A et B) et IV.3 (A et B) montrent que la résistance à la compression augmente, lorsque la teneur en sable concassé (SC) dans le système binaire (CS - AS) augmente. Ceci est certainement dû à la plus forte cohésion qui se crée entre les grains et la pâte de ciment. Dans ce contexte, Farran et al (1972) ont, en effet, confirmé l'apparition d'une forte liaison entre la pâte de ciment et les grains de calcaire. Ces résultats sont en bon accord avec ceux précédemment rapportés par El Euch Khay et al (2010) , qui a montré que la résistance à la compression du béton de sable compacté (BSC), contenant du sable concassé (SA), était assez élevée.

De plus, la valeur de la résistance à la compression de 20.61 MPa a été obtenu à 28 jours pour le mélange binaire (60% SC, 40% SA), comme représenté sur la Figure IV.3 A ; tandis que celle de 18.25 MPa a été obtenu pour le mélange ternaire (20% SA, 20% SD, 60% SC) comme représenté sur la Figure IV.3 A. Il convient de noter que la valeur de la résistance à la compression de 20 MPa est requise pour le béton destiné à être utilisée dans la construction de chaussées rigides (El Euch Ben Said et al. 2018).

Bouziani (2013) a constaté que l'augmentation de la résistance à la compression peut être attribuée à la teneur élevée en fines et à la forme angulaire des grains de SC (Figure III.5). Cette forme angulaire du sable favorise la compacité du mélange. Ces résultats sont

similaires à ceux rapportés par Attia et al (2021) dans l'étude qu'ils ont réalisée sur un béton conventionnel fabriqué avec des sables ternaires.

Une diminution de la résistance à la compression du BSCR a été remarquée lorsque le dosage en sable alluvionnaire (SA) a augmenté dans les systèmes ternaires (SA - SC - SD). Ceci pourrait certainement être attribué au fait que le sable alluvionnaire (SA) contient une quantité considérable d'impuretés organiques (Figure III.4), ce qui provoque une certaine perturbation dans l'hydratation du ciment.

En ce qui concerne les mélanges BSCR 21, BSCR 06 et BSCR 01, il a été remarqué que la présence du sable de désert (SD), dans le mélange formulé, peut améliorer la résistance à la compression de ces bétons (plus de 24 MPa). Ceci est certainement dû à la taille et à la forme sphérique des grains du sable de désert, ce qui conduit à une amélioration de l'adhérence, la compacité et la résistance mécanique du béton. De plus, il a été constaté que le BSCR qui contient 80% de SD et 20% de SC a une résistance à la compression acceptable d'environ 20 MPa. Le DS réduit le volume de vide et augmente la compacité.

Ce BSCR peut alors être classé en classe 2, selon la norme française (NF P 98-170) pour la construction des routes en béton.

IV.2.1.2. Analyse de la variance

Les analyses de la variance des réponses modélisées (résistance à la compression à 7, 14 et 28 jours) sont présentées dans le Tableau IV.3 suivant :

Tableau IV.3 : Analyse de la variance des réponses (R_C à 7,14 et 28 jours).

	Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
R_{C-07j}	Modèle	6	304,05712	50,6762	10,7528
	Erreur	14	65,97958	4,7128	Prob. > F
	Total non corrigé	20	370,0367		0,0001*
R_{C-14j}	Modèle	6	388,03931	64,6732	9,4734
	Erreur	14	95,57527	6,8268	Prob. > F
	Total non corrigé	20	483,61458		0,0003*
R_{C-28j}	Modèle	6	405,88117	67,6469	6,1023
	Erreur	14	155,19609	11,0854	Prob. > F
	Total non corrigé	20	561,07726		0,0026*

On remarque, d'après le Tableau IV.3, que les Rapports F des réponses (R_{C-07j} , R_{C-14j} et R_{C-28j}) sont généralement faibles, mais acceptables ; ils sont tous supérieurs à 1, ce qui est confirmé aussi par les faibles valeurs de p-values représentées dans le tableau précédent. Alors, on peut dire que les modèles postulés ne représentent pas uniquement la moyenne des mesures et les variations des réponses sont bien dues aux variations des facteurs.

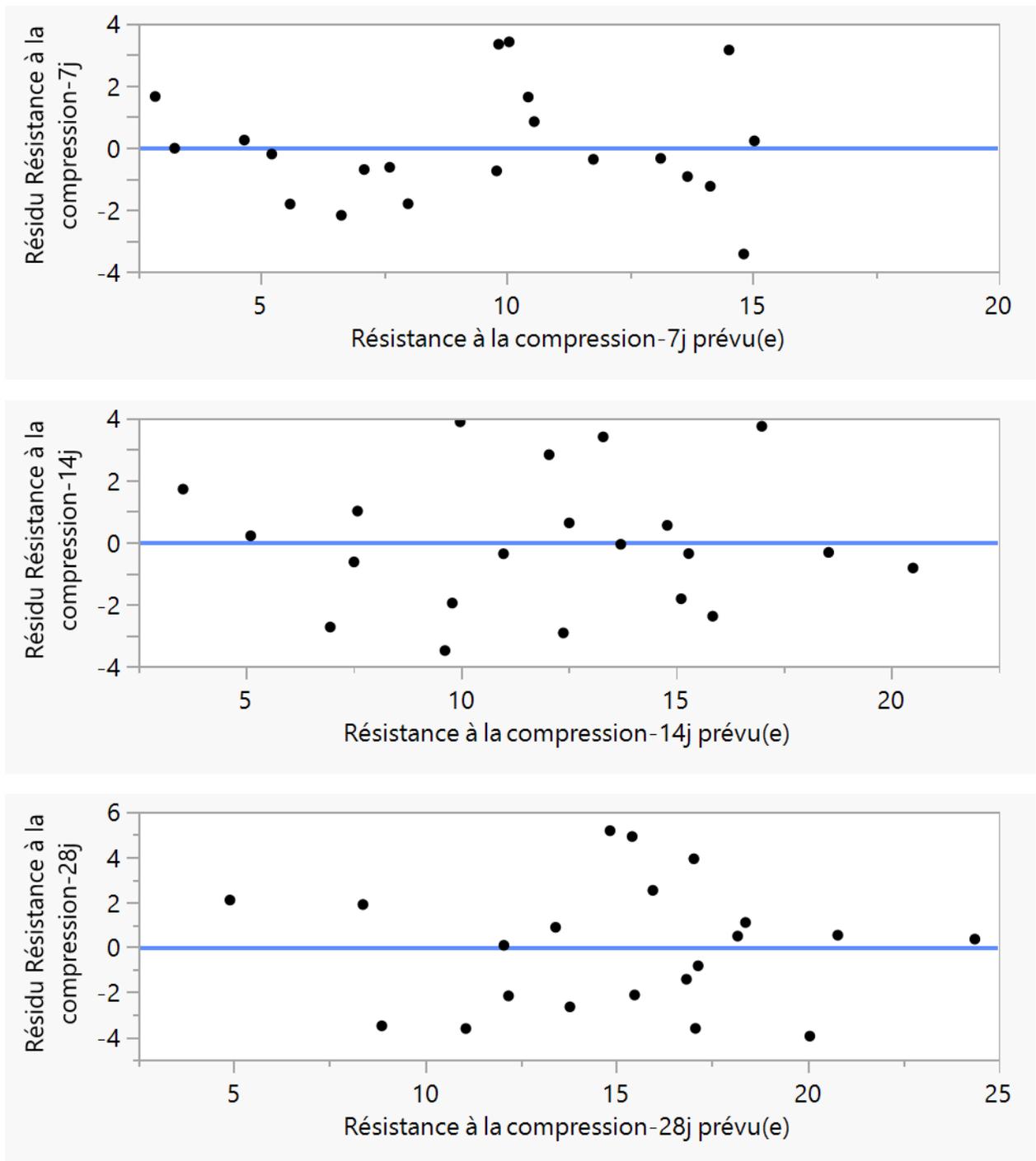


Figure IV.4 : Diagrammes des résidus de la résistance à la compression à 7,14 et 28 jours.

La représentation graphique des résidus en fonction des réponses prévues (figure IV.4), donne une idée sur la capacité des modèles postulés de représenter les valeurs observées. En fait, selon la figure IV.4, les résidus semblent être distribués de manière aléatoire (pas une tendance particulière). Par conséquent, on peut dire que le modèle, obtenu en appliquant la méthode de conception expérimentale, explique bien les résultats expérimentaux.

IV.2.2. Résistance à la traction par fendage

Les résultats des essais sont récapitulés dans le Tableau IV.4 suivant :

Tableau IV.4 : Résistance à la traction par fendage des 21 mélange du BSCR (MPa).

Mélange	SD	SA	R _{t-7j}	R _{t-14j}	R _{t-28 J}
BSCR 01	0	0	1,28	1,28	1,59
BSCR 02	0	0,2	1,49	1,54	1,99
BSCR 03	0	0,4	1,03	1,42	1,66
BSCR 04	0	0,6	1,12	1,22	1,57
BSCR 05	0	0,8	0,53	1,18	1,4
BSCR 06	0	1	0,98	1,28	1,45
BSCR 07	0,2	0	1,67	2,11	2,59
BSCR 08	0,2	0,2	1,99	2,24	2,79
BSCR 09	0,2	0,4	1,16	1,95	2,35
BSCR 10	0,2	0,6	1,08	1,53	1,66
BSCR 11	0,2	0,8	0,87	1,43	1,62
BSCR 12	0,4	0	1,46	2,46	2,55
BSCR 13	0,4	0,2	1,21	1,93	2,34
BSCR 14	0,4	0,4	0,92	1,64	1,99
BSCR 15	0,4	0,6	0,93	1,05	1,34
BSCR 16	0,6	0	1,91	1,94	2,12
BSCR 17	0,6	0,2	1,53	2,04	2,5
BSCR 18	0,6	0,4	1,22	1,4	1,69
BSCR 19	0,8	0	1,32	1,89	2,04
BSCR 20	0,8	0,2	1,23	1,56	1,97
BSCR 21	1	0	1,52	1,74	1,82

IV.2.2.1. Modèles mathématiques

Tableau IV.5: Coefficients et paramètres des modèles des réponses (R_t à 7, 14 et 28 jours).

	R _{C-07j}		R _{C-14j}		R _{C-28j}	
	R ² = 0.61		R ² = 0.81		R ² = 0.75	
	Coeff.	p-value	Coeff.	p-value	Coeff.	p-value
DS	1,4346825	<,0001*	1,6412698	<,0001*	1,802619	<,0001*
AS	0,7811111	0,0029*	1,2412698	<,0001*	1,3407143	<,0001*
CS	1,4977778	<,0001*	1,5365079	<,0001*	1,9514286	<,0001*
DS*AS	-0,342262	0,7401	-0,623512	0,4335	0,0848214	0,9328
DS*CS	0,8303571	0,4255	2,5982143	0,0047*	2,34375	0,0326*
AS*CS	-0,258929	0,8017	-0,120536	0,8783	0,0922619	0,9269
DS*AS*CS	0,7986111	0,8943	7,7430556	0,108	10,9375	0,0785

Comme c'est indiqué dans le Tableau IV.5, les coefficients de corrélations (R^2) des modèles postulés sont généralement acceptables, sauf dans le cas de la résistance à la traction par fendage à sept jours ($R_t=0.61$). Les coefficients de signe négatif indiquent qu'une augmentation dans la valeur de la variable associée fait diminuer la réponse et les coefficients de signe positif indiquent qu'une augmentation dans la valeur de la variable fait augmenter la réponse. A partir des résultats du logiciel, la signification des coefficients des facteurs et des interactions est déterminée suivant la valeur obtenue de « P » : $p \leq 0.01$ très significatif ; $p \leq 0.05$ significatif ; $p \leq 0.1$ peu significatif.

$$R_{t-07j} = 1,4346825*SD + 0,7811111*SA + 1,4977778*SC - 0,342262*SD*SA + 0,8303571*SD*SC - 0,258929*SA*SC + 0,7986111*SD*SA*SC \quad (IV.4)$$

$$R_{t-14j} = 1,6412698*SD + 1,2412698*SA + 1,5365079*SC - 0,623512*SD*SA + 2,5982143*SD*SC - 0,120536*SA*SC + 7,7430556*SD*SA*SC \quad (IV.5)$$

$$R_{t-28j} = 1,802619*SD + 1,3407143*SA + 1,9514286*SC + 0,0848214*SD*SA + 2,34375*SD*SC + 0,0922619*SA*SC + 10,9375*SD*SA*SC \quad (IV.6)$$

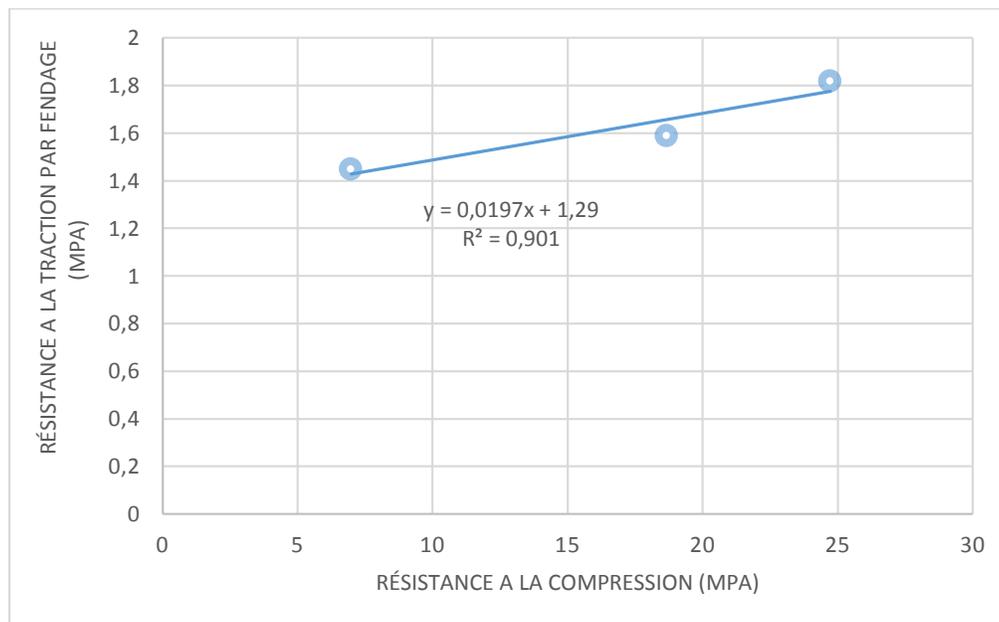


Figure IV.5: Relation entre la résistance à la compression et la traction par fendage résistance (bétons témoins).

En outre, la figure IV.6 illustre la relation linéaire entre la résistance à la traction par fendage et la résistance à la compression dans les mélanges témoins. La tendance de la résistance à la traction par fendage et celle de la résistance à la compression sont similaires. Le rapport entre la résistance à la traction par fendage et la résistance à la compression, pour les trois mélanges de contrôle (DS, CS et AS), était respectivement égale à 7.36%, 8.57% et 20.77%. Ces résultats sont en bon accord avec ceux rapportés dans les études précédentes (Heidari et al. 2017; Tavakoli et al. 2020).

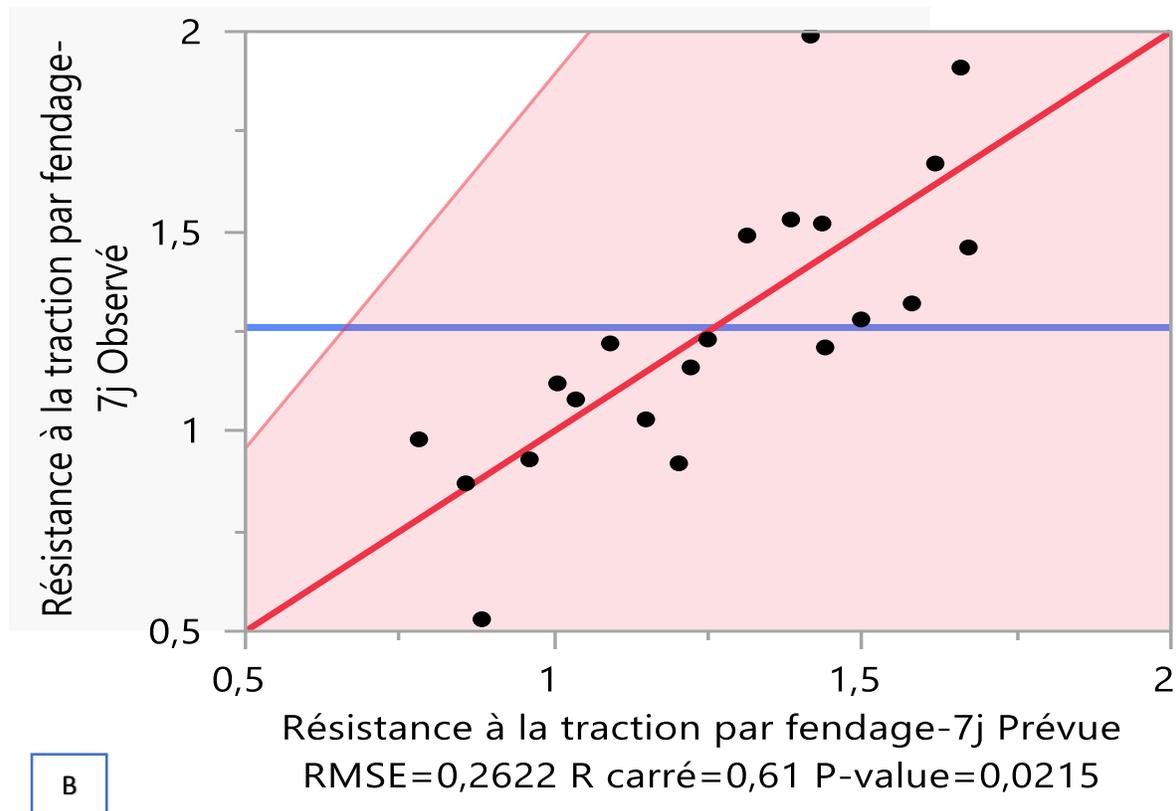
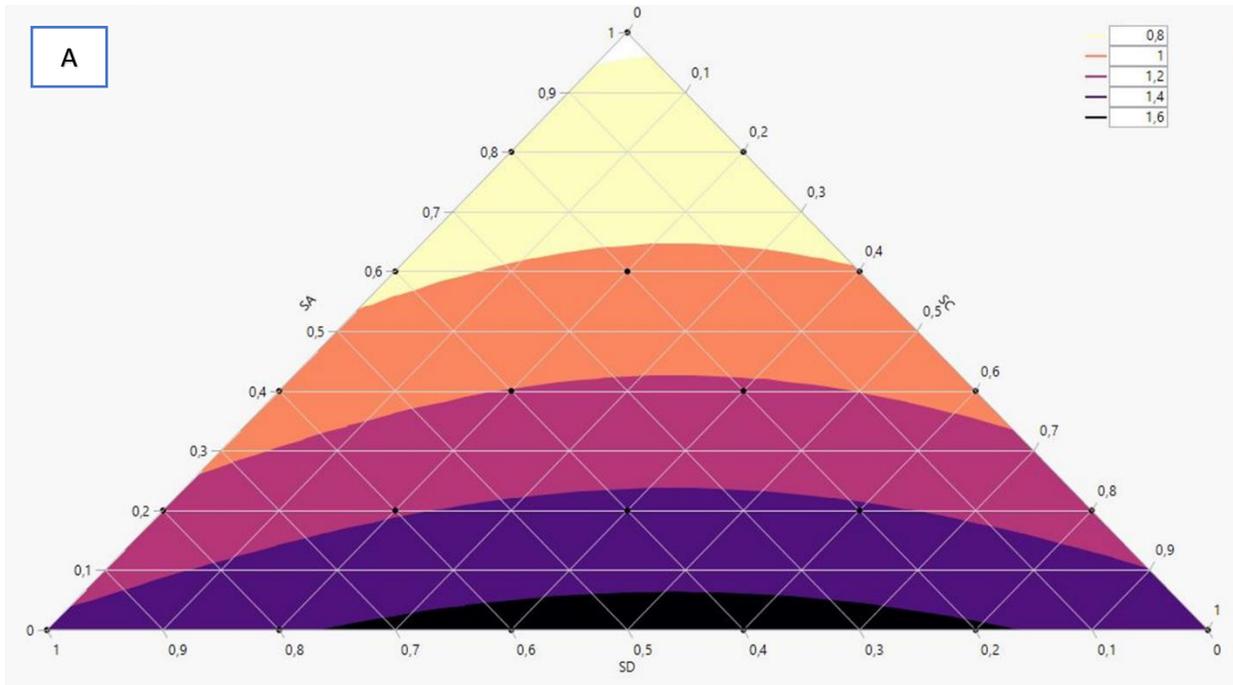


Figure IV.6: A- Courbes iso-réponses de la résistance à la traction par fendage à 7 jours.
 B- Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.

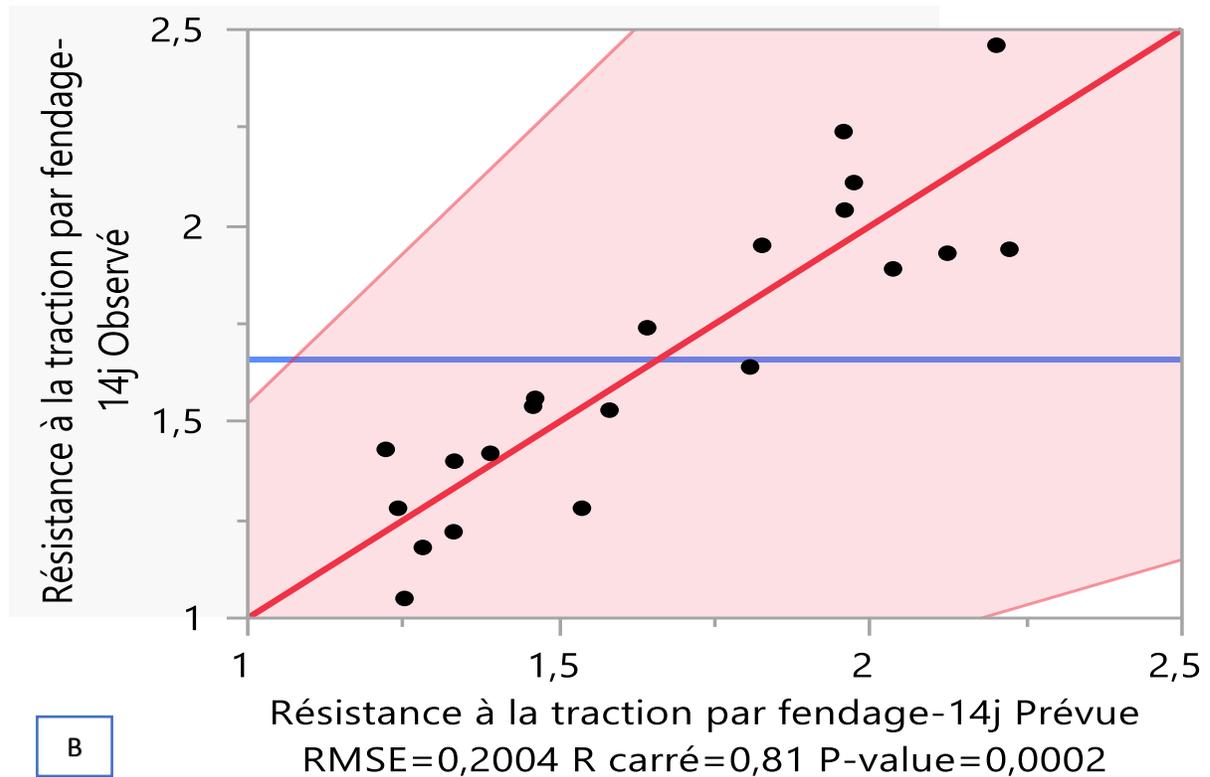
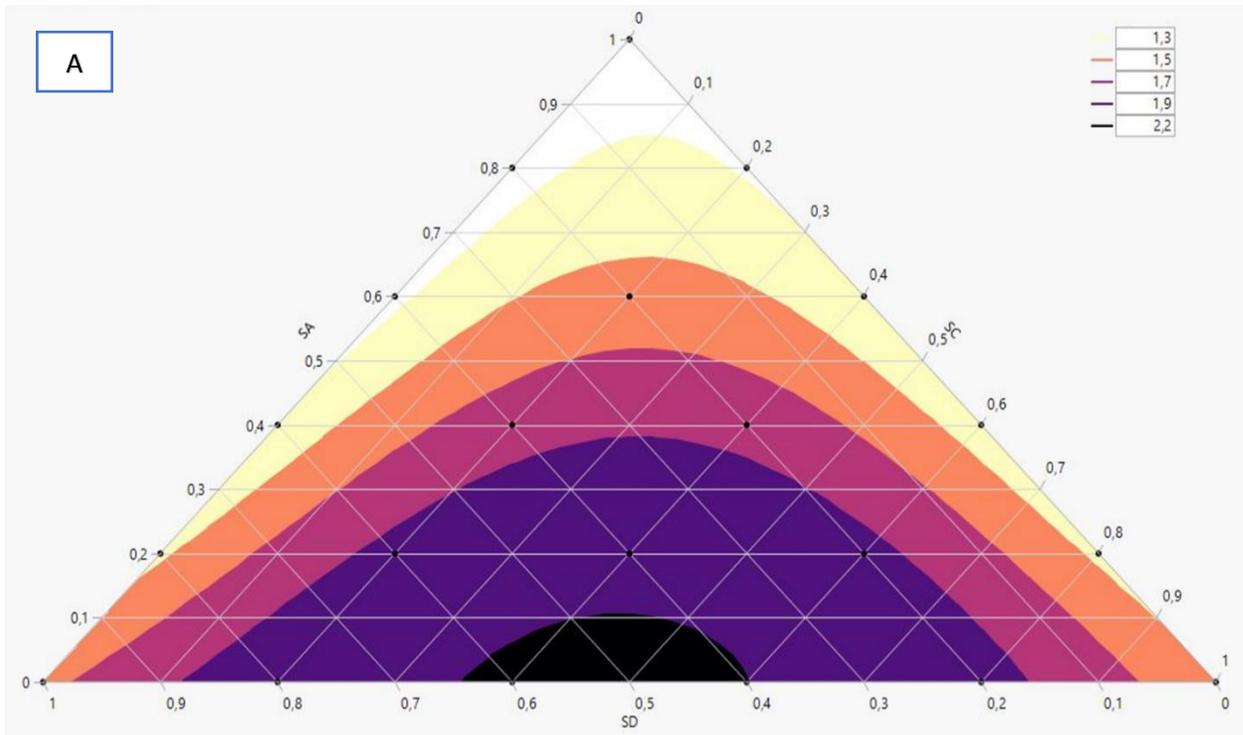


Figure IV.7 : A- Courbes iso-réponses de la résistance à la traction par fendage à 14 jours.
B- Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.

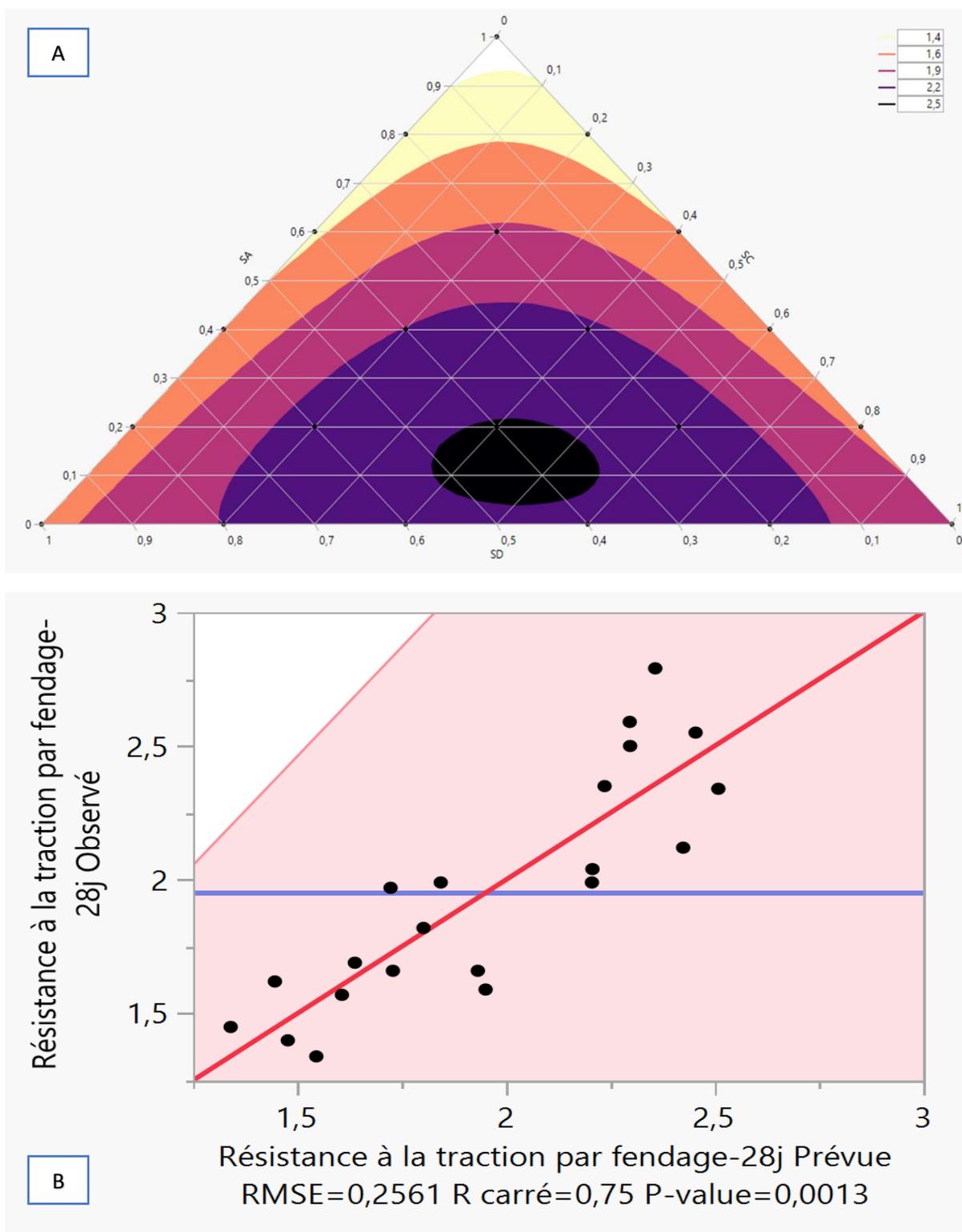


Figure IV.8: A- Courbes iso-réponses de la résistance à la traction par fendage à 28 jours.
B- Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.

Les figures IV.6 (A et B), IV.7 (A et B), IV.8 (A et B) illustrent, respectivement, les courbes d'iso-réponse de la résistance à la traction par fendage (MPa) et les courbes de corrélation entre les résultats expérimentaux (observés) et les résultats théoriques (prédits) pour la résistance à la traction par fendage.

Les figures (IV.6A, IV.7A et IV.8A) montrent clairement que la présence du sable concassé (SC) à un dosage ne dépassant pas 60% est bénéfique pour la résistance à la traction du BSCR. Il faut souligner que le mélange optimal à l'âge de 28 jours est celui qui contient 20% SD, 20% SA et 60% SC, révélant une résistance à la compression de 2,79 MPa. De plus, le BSCR incorporant 60% de sable du désert (SD) présente une résistance à la traction égale à 2,5 MPa. Ces résultats confirment l'importance technique de la présence de SD dans les BSCR. De plus, ces résultats sont en bon accord avec ceux rapportés par (Cisse et al. 1999; Khay et al. 2011).

De même, il a été constaté que la résistance à la traction par fendage, tout comme la résistance à la compression, du BSCR à base de sable binaire (SC + SA) a augmenté, ce qui n'est pas le cas pour les sables binaires incluant l'SA. La résistance minimale à la traction par fendage de 1,85 MPa pour le béton qui est principalement utilisé dans la construction des routes a été déterminée par le ministère britannique des transports (Department of Transport 1976). Par conséquent, tous les bétons compactés au rouleau (BCR) contenant du sable standard, du sable à faible teneur en fines et du sable modifié peuvent être utilisés pour la construction des routes (Zdiri et al. 2009).

IV.2.2.2. Analyse de la variance

Les analyses de la variance des réponses modélisées (résistance à la traction par fendage à 7, 14 et 28 jours) sont présentées dans le Tableau IV.6 suivant :

Tableau IV.6: Analyse de la variance des réponses (R_t à 7,14 et 28 jours).

	Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
R_{t-07j}	Modèle	6	1,5058714	0,250979	3,6494
	Erreur	14	0,9628238	0,068773	Prob. > F
	Total non corrigé	20	2,4686952		0,0215*
R_{t-14j}	Modèle	6	2,3603238	0,393387	9,7939
	Erreur	14	0,5623333	0,040167	Prob. > F
	Total non corrigé	20	2,9226571		0,0002*
R_{t-28j}	Modèle	6	2,7718857	0,461981	7,0423
	Erreur	14	0,9184095	0,065601	Prob. > F
	Total non corrigé	20	3,6902952		0,0013*

À partir du Tableau IV.6, on remarque que les Rapports F des réponses (R_{t-07j} , R_{t-14j} et R_{t-28j}) sont généralement faibles, mais ils sont acceptables ; ils sont tous supérieurs à 1, ce qui est confirmé aussi par les faibles valeurs de p-values représentées dans le tableau précédent (Tableau IV.5). Alors on peut dire que les modèles postulés ne représentent pas uniquement la moyenne des mesures et les variations des réponses sont bien dues aux variations des facteurs.

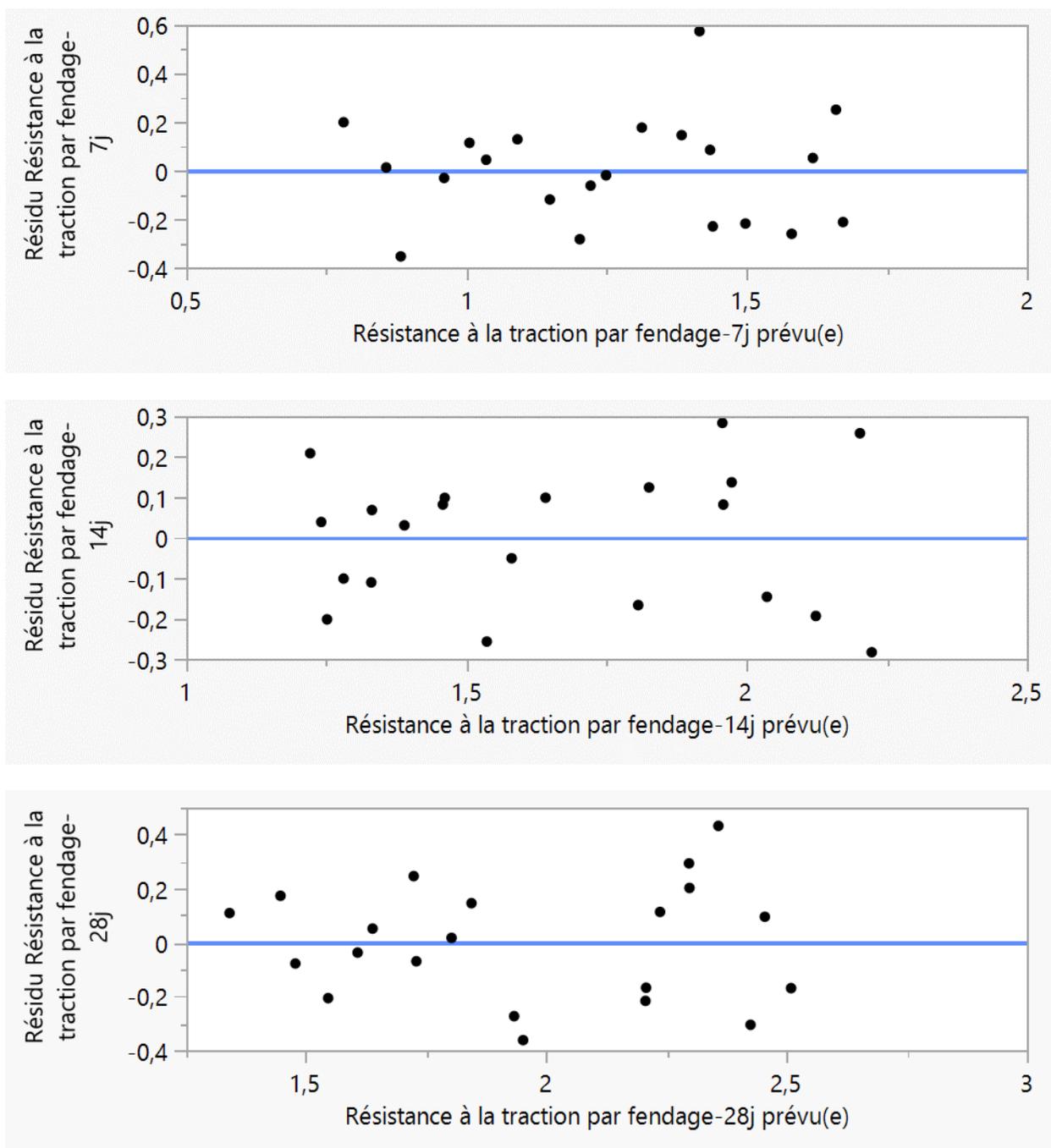


Figure IV.9: Diagrammes des résidus de la résistance à traction par fendage à 7,14 et 28 jours.

La représentation graphique des résidus en fonction des réponses prévues (Figure IV.9), nous permet de s'assurer que les résidus sont répartis au hasard (pas une tendance particulière) pour toutes les réponses (R_{t-07j} , R_{t-14j} et R_{t-28j}). Compte tenu de ces informations, nous supposons qu'il n'y a plus d'informations à extraire de ces réponses.

Donc, on peut dire que les modèles issus de l'application de la méthode de plan d'expériences expliquent bien les résultats expérimentaux (Attia et al. 2021; Bouziani 2013).

IV.2.3. Moule d'élasticité

Tableau IV.7: Moule d'élasticité des 21 mélange du BSCR (GPa).

Mélange	SD	SA	SC	E _d
BSCR 01	0	0	1	19,278
BSCR 02	0	0,2	0,8	20,256
BSCR 03	0	0,4	0,6	20,61
BSCR 04	0	0,6	0,4	17,006
BSCR 05	0	0,8	0,2	15,983
BSCR 06	0	1	0	12,056
BSCR 07	0,2	0	0,8	20,678
BSCR 08	0,2	0,2	0,6	18,258
BSCR 09	0,2	0,4	0,4	18,72
BSCR 10	0,2	0,6	0,2	15,066
BSCR 11	0,2	0,8	0	16,184
BSCR 12	0,4	0	0,6	21,518
BSCR 13	0,4	0,2	0,4	18,072
BSCR 14	0,4	0,4	0,2	14,612
BSCR 15	0,4	0,6	0	16,828
BSCR 16	0,6	0	0,4	20,61
BSCR 17	0,6	0,2	0,2	19,528
BSCR 18	0,6	0,4	0	17,57
BSCR 19	0,8	0	0,2	19,278
BSCR 20	0,8	0,2	0	17,983
BSCR 21	1	0	0	20,006

IV.2.3.1. Modèles mathématiques :

Tableau IV.8: Coefficients et paramètres du modèle de la réponse (E_d).

	E _d (Gpa)	
	Coeff.	p-value
DS	19,139026	<,0001*
AS	12,518669	<,0001*
CS	19,706526	<,0001*
DS*AS	5,7832341	0,1941
DS*CS	6,3046627	0,1592
AS*CS	11,79127	0,0147*
DS*AS*CS	-76,66898	0,0078*

$$E_d = 19,139026*SD + 12,518669*SA + 19,706526*SC + 5,7832341*SD*SA + 6,3046627*SD*SC + 11,79127*SA*SC - 76,66898*SD*SA*SC \quad (IV.7)$$

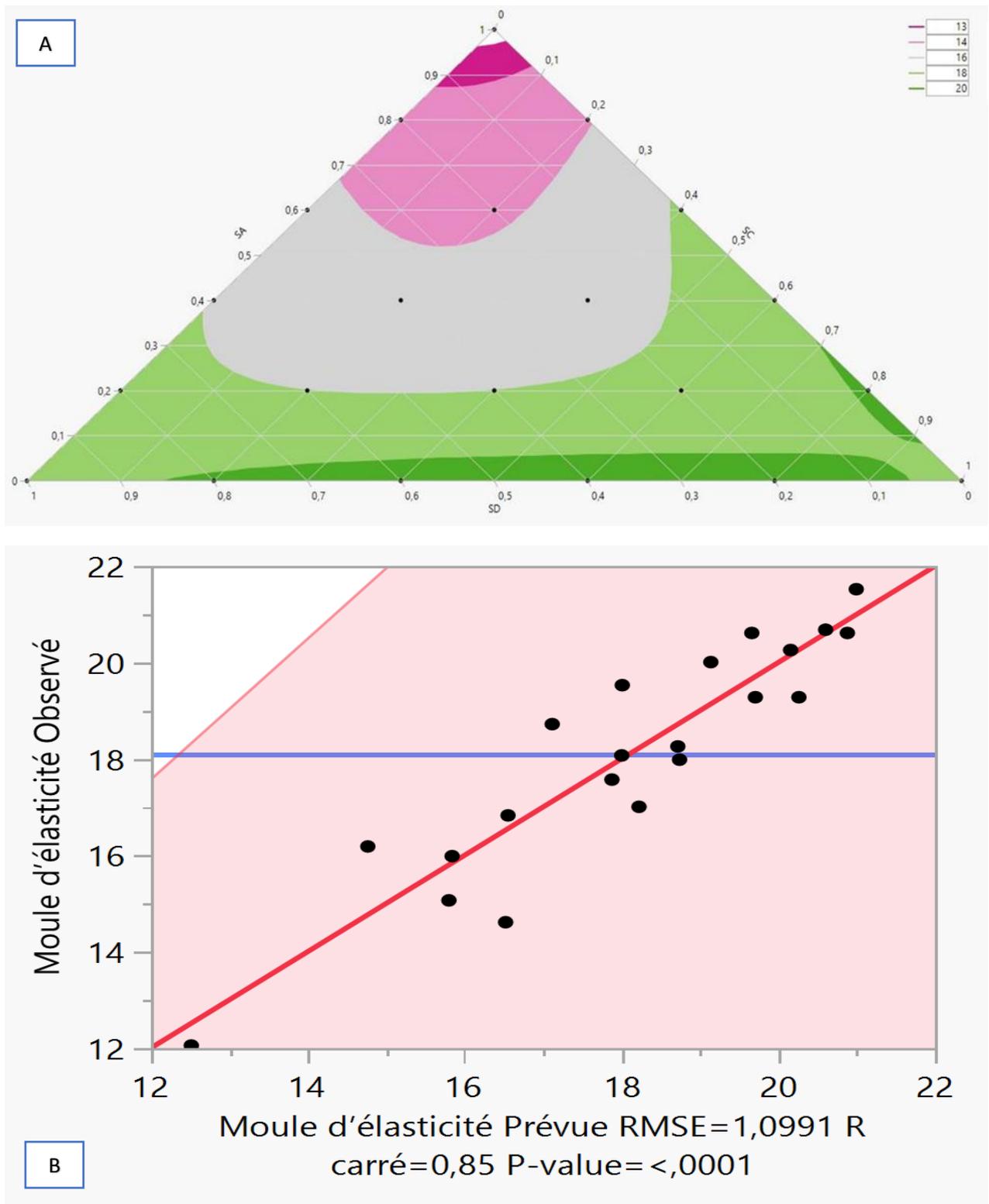


Figure IV.10 : A- Courbes iso-réponses du module d'élasticité (GPa).
B- Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.

Les courbes de la figure IV.10 (A et B) illustrent, respectivement, la courbe d'iso-réponse et la courbe de corrélation entre les résultats expérimentaux (observés) et les résultats théoriques (prédits) pour le module d'Young dynamique. Sur la Figure 16(a), on peut voir que le BSCR 12 (60% CS + 40%DS) a le module d'Young le plus élevé, avec environ 21 GPa, ce qui correspond aux valeurs proposées dans le cadre National du projet Sablocrete. (Sablocrete 1994)

D'autre part, les mélanges BSCR 02, BSCR 03, BSCR 07, BSCR 16 et BSCR 21 ont donné des valeurs inférieures de 4,3% à 7% à celle du BSCR12, ce qui est certainement dû à la présence du sable de désert (DS). Cela a provoqué une réduction considérable du nombre de vides intergranulaires et a donc généré une meilleure compacité du béton. Ces résultats sont en parfait accord avec ceux rapportés par d'autres chercheurs qui ont découvert que le module d'élasticité augmentait avec la proportion d'asphalte récupéré dans les chaussées en béton compacté au rouleau (Boussetta et al. 2020; Chhorn et Lee 2017).

IV.2.3.2. Analyse de la variance

Tableau IV.9: Analyse de la variance de la réponse (E_d).

	Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Ed	Modèle	6	96,68533	16,1142	13,3388
	Erreur	14	16,91294	1,2081	Prob. > F
	Total non corrigé	20	113,59827		<,0001*

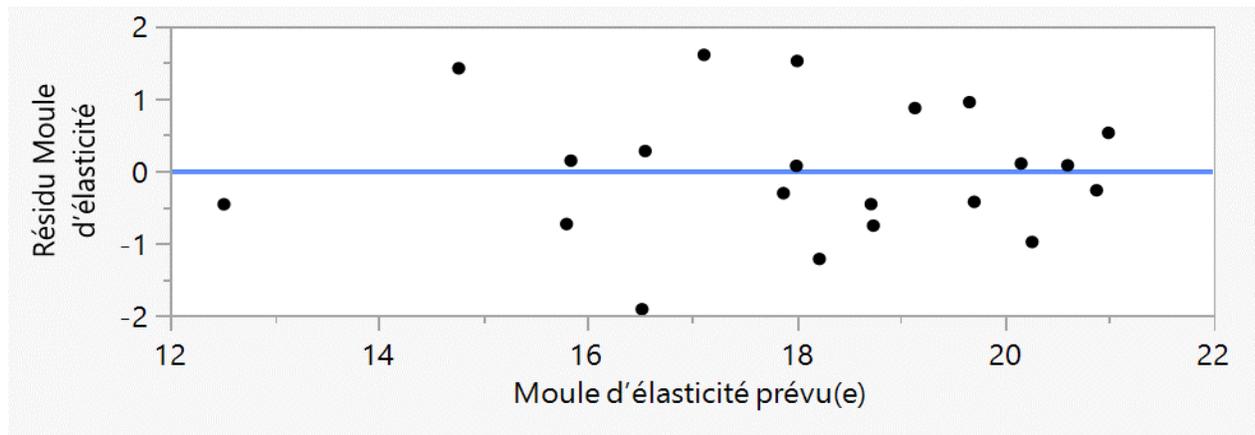


Figure IV.11 : Diagrammes des résidus de module d'élasticité.

D'après le tableau ci-dessus, le Rapport F (de Fisher) de la réponse de module d'élasticité est largement grand, ce qui implique que le modèle est significatif. La valeur du rapport F est inférieure à 1 (<,0001*), donc le modèle est statistiquement significatif. La figure IV.11 représente le diagramme des valeurs du résidu qui est la différence entre la valeur expérimentale et la valeur prédite par le modèle. Cette caractéristique statistique nous permet de s'assurer qu'il ne reste pas d'informations à extraire de nos résultats.

IV.2.4. Absorption d'eau

Tableau IV.10: Absorption d'eau des 21 mélange du BSCR (%).

Mélange	SD	SA	SC	Abs
BSCR 01	0	0	1	8,41
BSCR 02	0	0,2	0,8	7,7
BSCR 03	0	0,4	0,6	8,12
BSCR 04	0	0,6	0,4	6,45
BSCR 05	0	0,8	0,2	10,99
BSCR 06	0	1	0	9,53
BSCR 07	0,2	0	0,8	6,67
BSCR 08	0,2	0,2	0,6	3,99
BSCR 09	0,2	0,4	0,4	7,83
BSCR 10	0,2	0,6	0,2	7,37
BSCR 11	0,2	0,8	0	7,9
BSCR 12	0,4	0	0,6	6,72
BSCR 13	0,4	0,2	0,4	8,36
BSCR 14	0,4	0,4	0,2	10,63
BSCR 15	0,4	0,6	0	9,04
BSCR 16	0,6	0	0,4	6,04
BSCR 17	0,6	0,2	0,2	5,8
BSCR 18	0,6	0,4	0	6,45
BSCR 19	0,8	0	0,2	4,07
BSCR 20	0,8	0,2	0	7,14
BSCR 21	1	0	0	3,41

IV.2.4.1. Modèles mathématiques

Tableau IV.11: Coefficients et paramètres du modèle de la réponse (Abs).

	Abs (%)	
	$R^2 = 0.53$	
	Coeff.	p-value
DS	3,9366138	0,0115*
AS	9,7044709	<,0001*
CS	7,7806614	<,0001*
DS*AS	5,0332341	0,4383
DS*CS	-0,175099	0,9783
AS*CS	-4,608135	0,4772
DS*AS*CS	13,796296	0,7134

$$\text{Abs} = 3,9366138 \cdot \text{SD} + 9,7044709 \cdot \text{SA} + 7,7806614 \cdot \text{SC} + 5,0332341 \cdot \text{SD} \cdot \text{SA} - 0,175099 \cdot \text{SD} \cdot \text{SC} - 4,608135 \cdot \text{SA} \cdot \text{SC} + 13,796296 \cdot \text{SD} \cdot \text{SA} \cdot \text{SC} \quad (\text{IV.8})$$

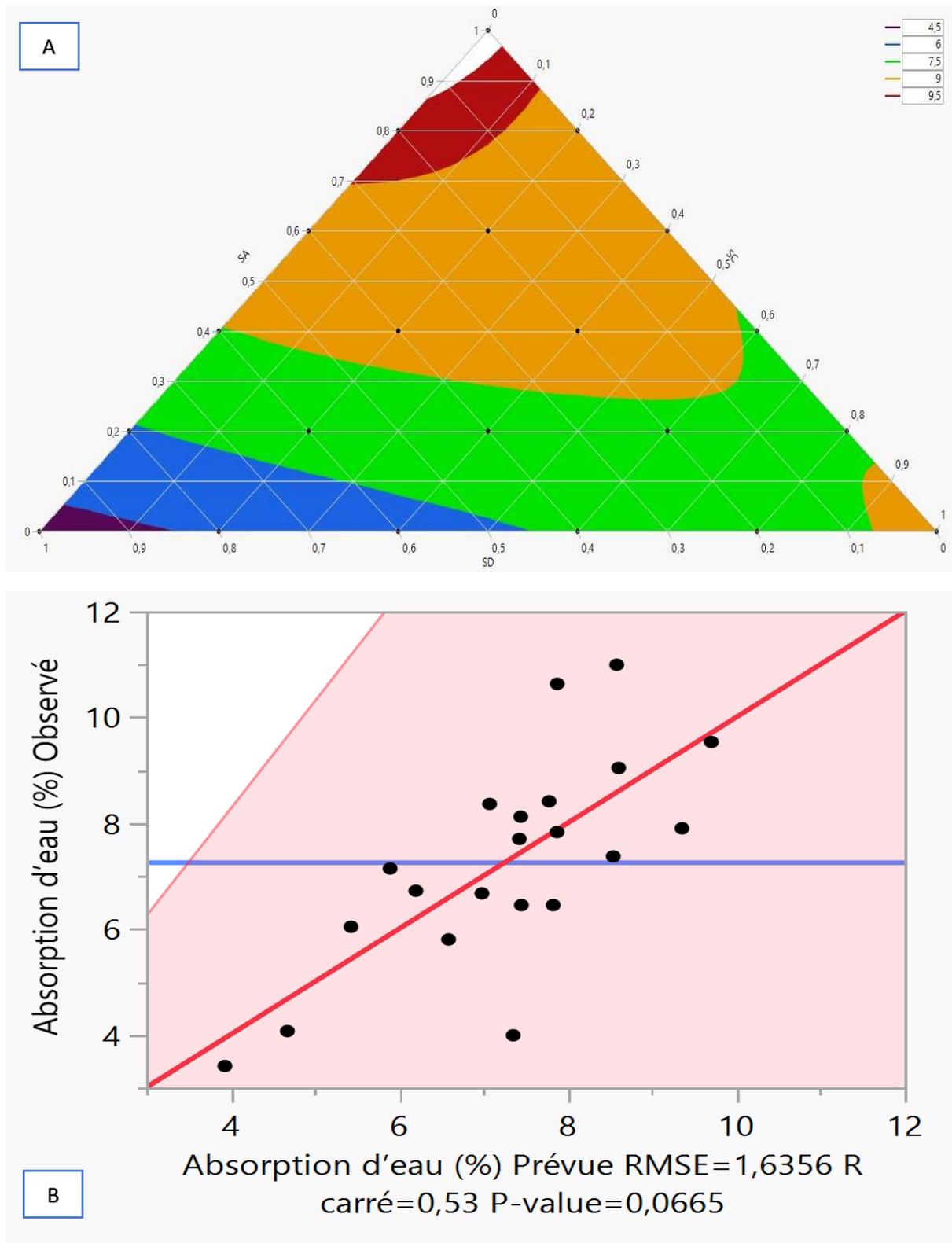


Figure IV.12 : A- Courbes iso-réponses d'absorption d'eau (%).
B- Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues.

L'absorption d'eau est généralement utilisée comme un facteur important pour quantifier la durabilité des matériaux cimentaires (Mohammadi 2013). Les figures 15(A) et (B) illustrent, respectivement, la courbe d'iso-réponse et la courbe de corrélation entre les résultats expérimentaux (observés) et les résultats théoriques (prédits) pour l'absorption d'eau.

De plus, J. Castro et al. ont divisé le béton en : béton de bonne qualité avec une absorption d'eau <3%, béton de qualité moyenne avec une absorption d'eau entre 3 et 5% et béton de mauvaise qualité avec une absorption d'eau supérieure à 5% (Castro et al. 2011).

A travers les résultats obtenus, on peut remarquer que la présence du sable de désert (DS) a un effet significatif sur la réduction de l'absorption d'eau pour le béton de sable compacté au rouleau. En outre, il a été constaté que le béton contenant 100% de DS a montré la plus faible absorption d'eau, avec seulement 3,4%. Par contre, le sable alluvionnaire (AS) s'est avéré augmenter l'absorption d'eau du béton de sable compacté.

Ceci est dû au fait que ce type de sable contient des impuretés qui provoquent une mauvaise adhésion entre la pâte et les granulats, ce qui conduit à la création de pores supplémentaires. Il convient de mentionner que Hashemi et al (2019) ont étudié l'effet de l'utilisation d'un sable à faible teneur en fines sur l'absorption d'eau dans les chaussées en béton compacté au rouleau. Ils ont découvert que l'absorption d'eau finale variait entre 2,6% et 4,9%. Ces résultats sont similaires aux nôtres.

IV.2.4.2. Analyse de la variance

Tableau IV.12: Analyse de la variance de la réponse (Abs).

	Source	Degrés de liberté	Somme des carrés	Carré moyen	Rapport F
Abs (%)	Modèle	6	41,628745	6,93812	2,5936
	Erreur	14	37,451236	2,67509	Prob. > F
	Total non corrigé	20	79,079981		0,0665

Les résultats d'analyse de la variance, représentés dans le tableau IV.12 indiquent principalement que le modèle utilisé est bien ajusté , puisque la somme des carrés due aux erreurs est faible par rapport à celle totale. Ceci est confirmé par l'analyse donnée par les graphiques des réponses observées en fonction des réponses prévues (Figure IV.11B).

D'après la figure IV.11b, on observe que les points sont peu proches de la droite, ce qui implique que le modèle prévoit correctement les valeurs en fonction des facteurs choisis. En effet, plus le nuage de ces points est proche de la première bissectrice, plus le modèle décrit convenablement la variation des résultats d'essais.

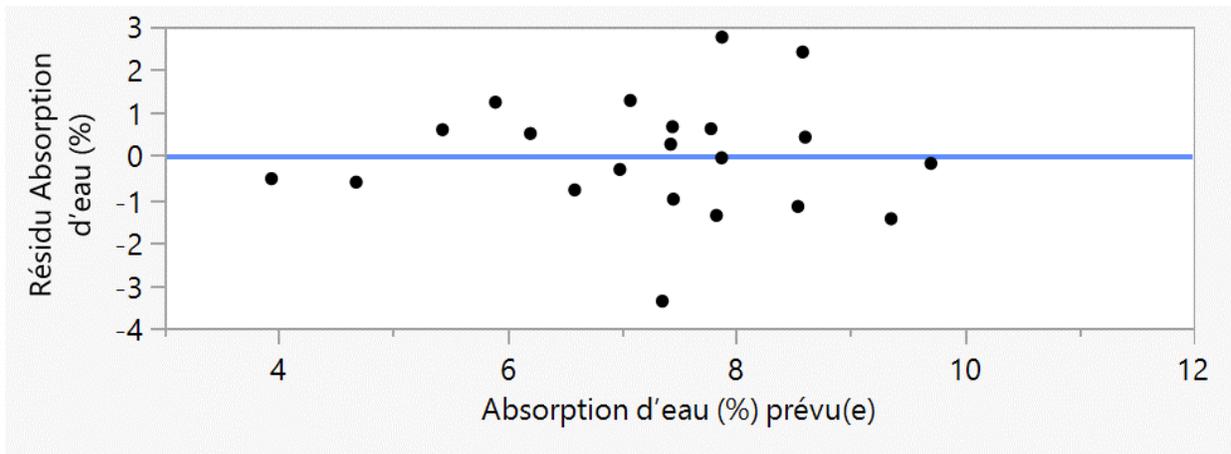


Figure IV.13 : Diagrammes des résidus d'absorption d'eau.

Le graphique des résidus, en fonction des réponses prévues, donne une idée sur la capacité des modèles postulés de représenter les valeurs observées. En effet, d'après la figure IV.13, il semble que les résidus sont répartis au hasard (pas une tendance particulière). Donc, on peut dire que les modèles, issus de l'application de la méthode de plan d'expériences, expliquent bien les résultats expérimentaux.

Généralement, le résidu permet aussi de savoir si les effets des facteurs sont significatifs ou non, et de vérifier le modèle. Si ce résidu est trop important, on peut alors envisager d'enrichir ou de corriger le modèle, puis éventuellement de mettre à jour le plan d'expériences et de refaire d'autres essais. La méthode peut ainsi être mise en œuvre de manière adaptative, c'est-à-dire en améliorant successivement le modèle en fonction des insuffisances rencontrées (Goupy J. 2006).

IV.2.5. Optimisation du BSCR

Le processus d'optimisation considère toutes les réponses simultanément, afin d'obtenir une conception de mélange de béton qui sera favorable pour toutes les réponses étudiées (Awolusi et al. 2019). Selon Oehlert (2000), lorsqu'il y a plus d'une réponse, il est important de trouver l'optimum de compromis qui n'optimise pas une seule réponse.

Tableau IV.13: Critères d'optimisation utilisés dans cette étude.

Paramètre	unité	Objectif	Model de précision	résultat expérimental	PE	Désirabilité
SD	-	-	0,33	0,33	-	-
SA	-	-	0,33	0,33	-	-
SC	-	-	0,33	0,33	-	-
R _{C-28j}	Mpa	maximale	14.09	14.41	2.22	0.458
R _{T-28j}	Mpa	maximale	2.38	1.95	-22.05	0.638
E _d	Gpa	maximale	16.94	17.21	1.57	0.494
Abs	%	minimale	5.78	3.20	-80.62	0.518

$$\text{Erreur relative absolue (PE, \%)} = \left(1 - \frac{\text{Valeur prédite}}{\text{Valeur Expérimentale}}\right) \times 100. \text{(Pilkington et al. 2014)} \quad \text{IV.9}$$

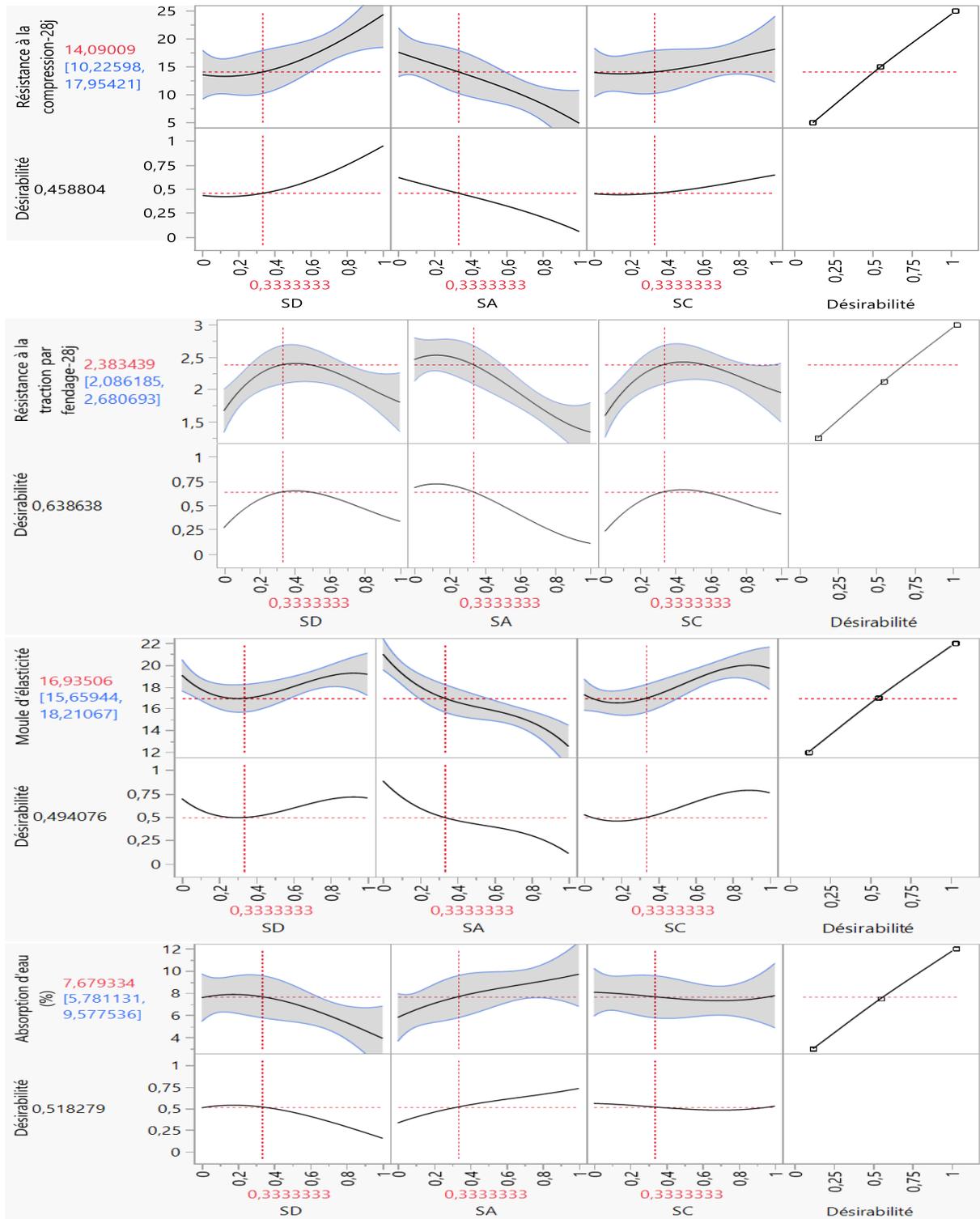


Figure IV.14 : Profil de prévision des réponses en fonction des sables.

Le processus a été effectué pour déterminer l'optimum valeurs pour un dosage de 0.33(SD), 0.33(SA) et 0.33 (SC)) pour atteindre des valeurs souhaitables des quatre réponses : la résistance à la compression, la résistance à la traction par fendage, le module d'élasticité et

l'absorption d'eau. De plus l'expérience supplémentaire du mélange (0.33SD+0.33SA+0.33SC) a été réalisée pour valider les modèles mathématiques tirés du logiciel, suivant la méthode des plans de mélange (figure III.14). La validité des modèles peut être testée par la méthode statistique, basée sur le calcul des erreurs de l'expérience et le modèle mathématique (éq IV.9). La condition « maximale » a été sélectionnée pour R_{C-28J} , R_{T-28J} et E_d , afin d'atteindre le niveau le plus élevé de résistance possible, alors que la condition « minimale » a été sélectionnée pour l'absorption d'eau afin d'assurer une faible capacité de pénétration des substances externes (voir tableau IV.13). À partir du processus d'optimisation, on pourrait déduire que plus de 30% de sable alluvionnaire influe négativement sur les propriétés mécaniques.

IV.3. Etude microscopique des composites

Une analyse microstructurale, à l'aide du microscope électronique à balayage (MEB), a été faite sur les mélanges (N° 01,02, 03, 06,10, 12,17,18,20 et 21). Les images 'MEB' (Figure IV.15 à 24) sont prises à une échelle de 10 micromètres (5000x) ; à cette échelle, nous pouvons observer les principales phases du ciment hydraté.

D'après la figure IV.17, on constate que la microstructure du BSCR contenant que le SD est la plus dense et homogène. Ceci est dû à la bonne répartition du sable de désert qui comble les vides, provoquant une amélioration de la compacité du mélange. Ces remarques confirment les bonnes performances mécaniques et physiques du BSCR à base du SD. De plus la présence du filler calcaire, dans le BSCR, joue un rôle supplémentaire sur l'hydratation du ciment. Péra et al. (1999) ont montré que le carbonate de calcium a un effet d'accélérateur sur l'hydratation du ciment conduisant à la formation de carbo-silicates et les carbo-aluminates de calcium hydraté. Très peu de vides visibles sont observés, à ce niveau d'agrandissement, sur la surface des pâtes de bétons testées (BSCR 01, BSCR 02, BSCR 03, BSCR 06, BSCR 10, BSCR 12, BSCR 17, BSCR 18, BSCR 20 et BSCR 21). On a également observé que la matrice est moins chargée et uniformément emballée avec des produits d'hydratation. Ces observations microscopiques confirment la bonne qualité d'adhérence « pâte-granulats ».

Les produits 'C-S-H' et l'ettringite peuvent être facilement observés dans différents échantillons, mais les microstructures sont différentes. Les deux échantillon (BSCR 12 et BSCR 20) ont une structure lâche, les produits d'hydratation sont liés de manière lâche, les fissures et les trous sont clairement visibles. Des produits d'hydratation, en forme d'aiguilles, sont observés sur la figure IV.15, ces produits d'hydratation sont entrelacés dans un réseau entier, mais la structure du réseau de l'échantillon est plus compacte et ferme, il a donc la plus grande résistance. Des microstructures denses, compactes et uniformes ont été observées dans les figures IV.16 et IV.20, tandis que des structures en forme d'aiguilles, de cristaux de C-S-H sont observées au centre de ces images. L'utilisation de l'EDX couplé au MEB a simplifié l'identification des phases.

L'analyse EDX révèle la présence de 'Ca' et 'Si', à des concentrations élevées indiquant la formation de la phase 'CSH' (Alawad et al. 2014). Un pic élevé de 'Ca' et d'un pic bas de 'Si' confirmant la formation de 'CH'. Un rapport « Ca/Si » d'environ 1 est généralement associé à une résistance élevée et à une perméabilité plus faible (Eilers et al. 1983; Hong et Glasser 2004; Jupe et al. 2008).

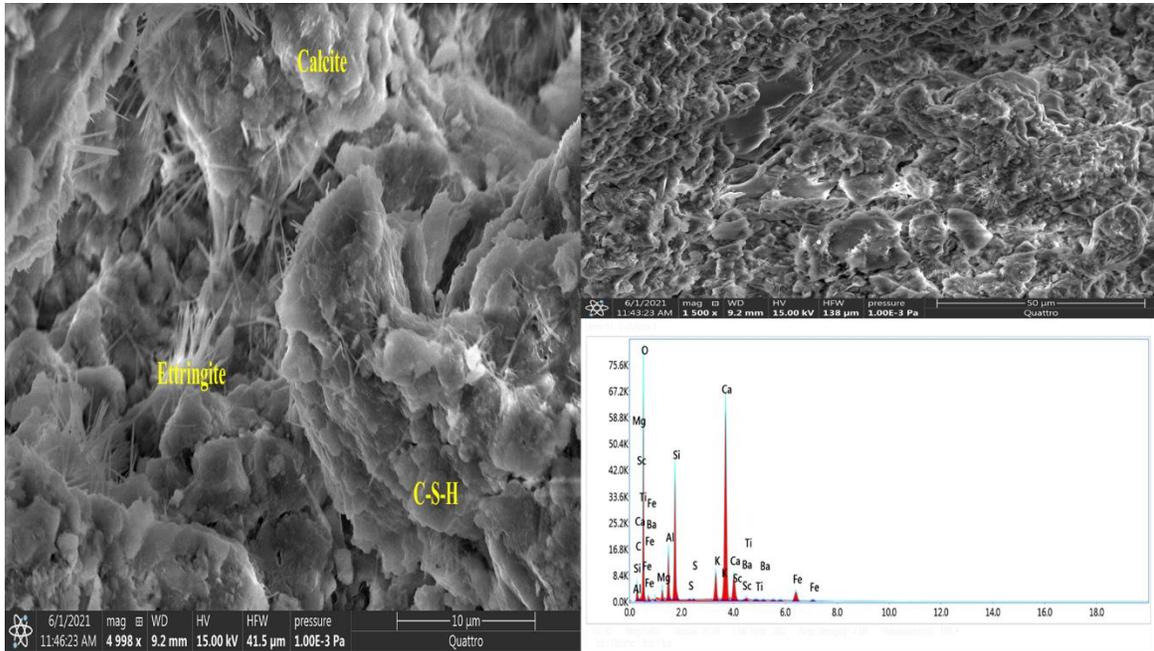


Figure IV.15 : MEB-EDX du BSCR 01(100% SC).

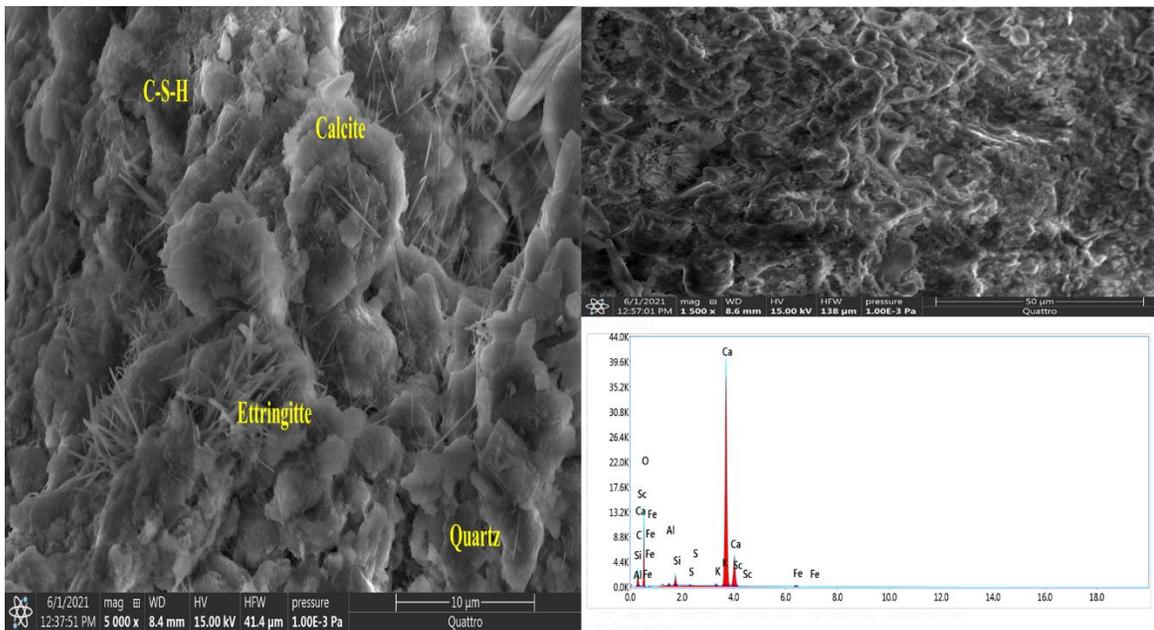


Figure IV.16 : MEB-EDX du BSCR 06 (100% SA).

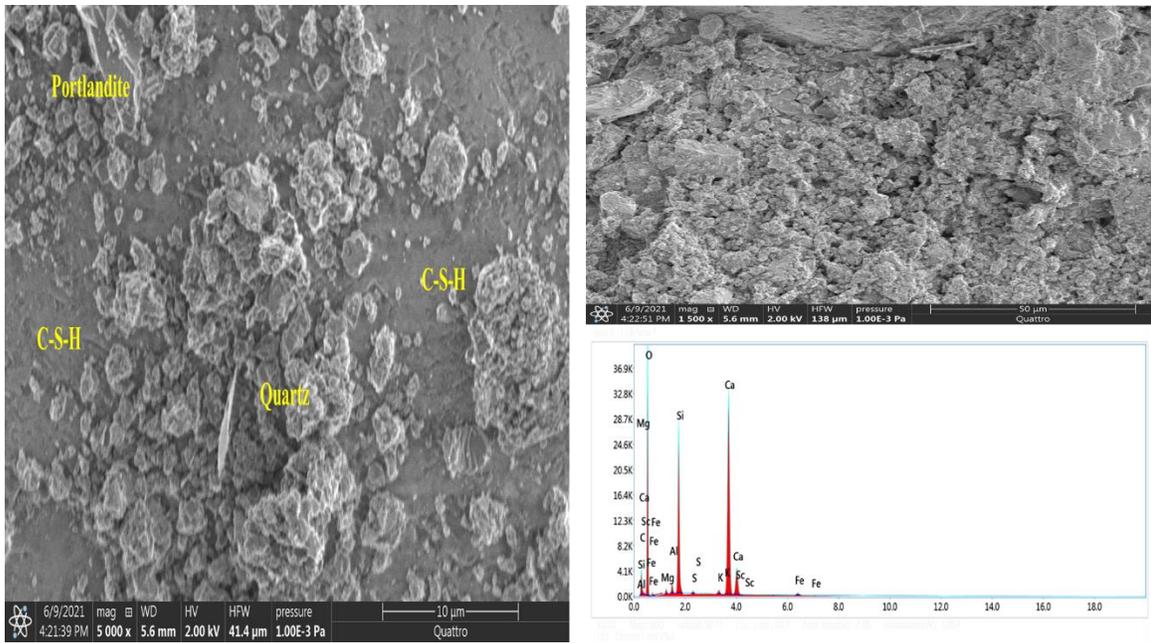


Figure IV.17 : : MEB-EDX du BSCR 21(100%SD).

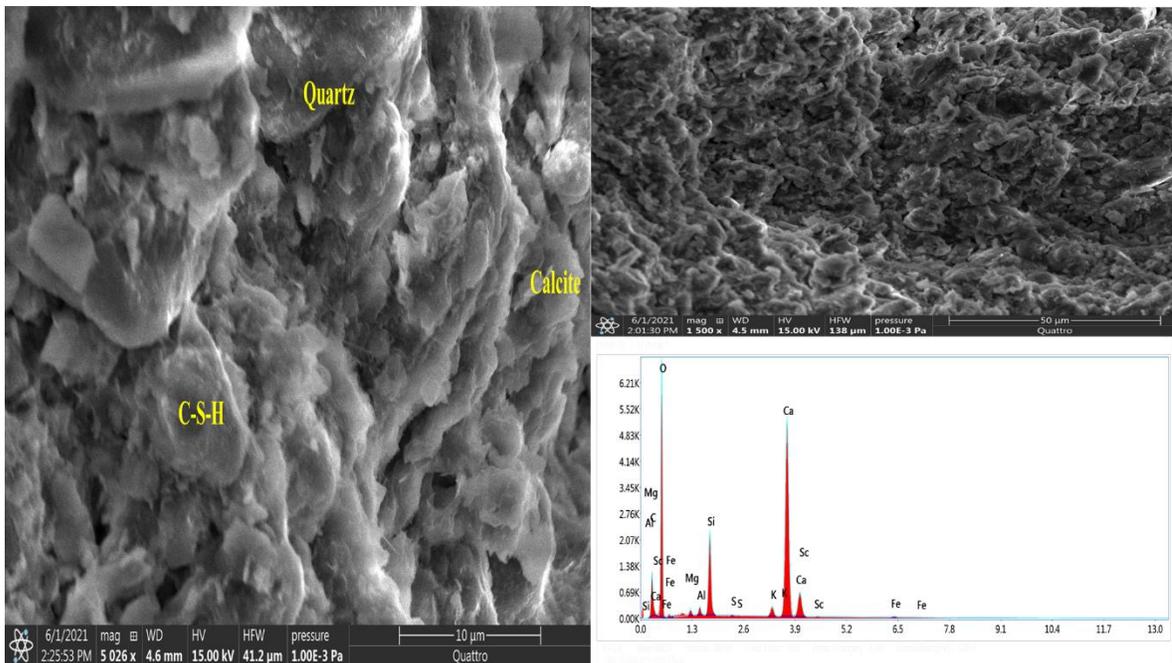


Figure IV.18 : : MEB-EDX du BSCR 17 (60%SD+20%SA+20%SC).

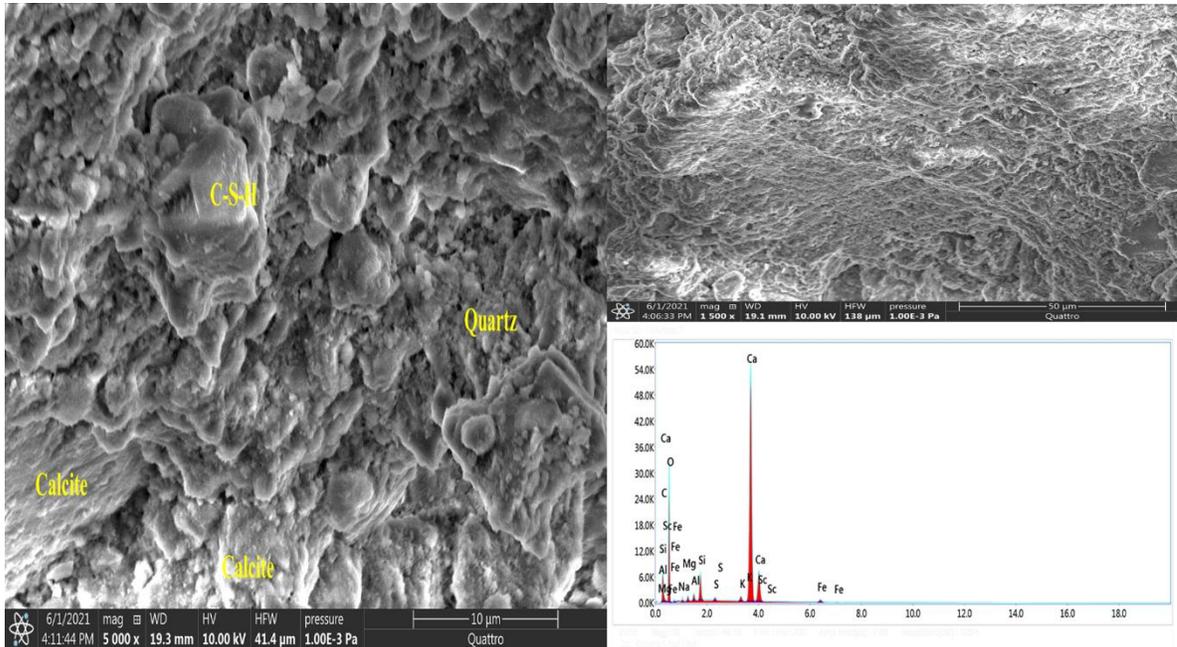


Figure IV.19 : : MEB-EDX du BSCR 03 (60% SC+40% SA).

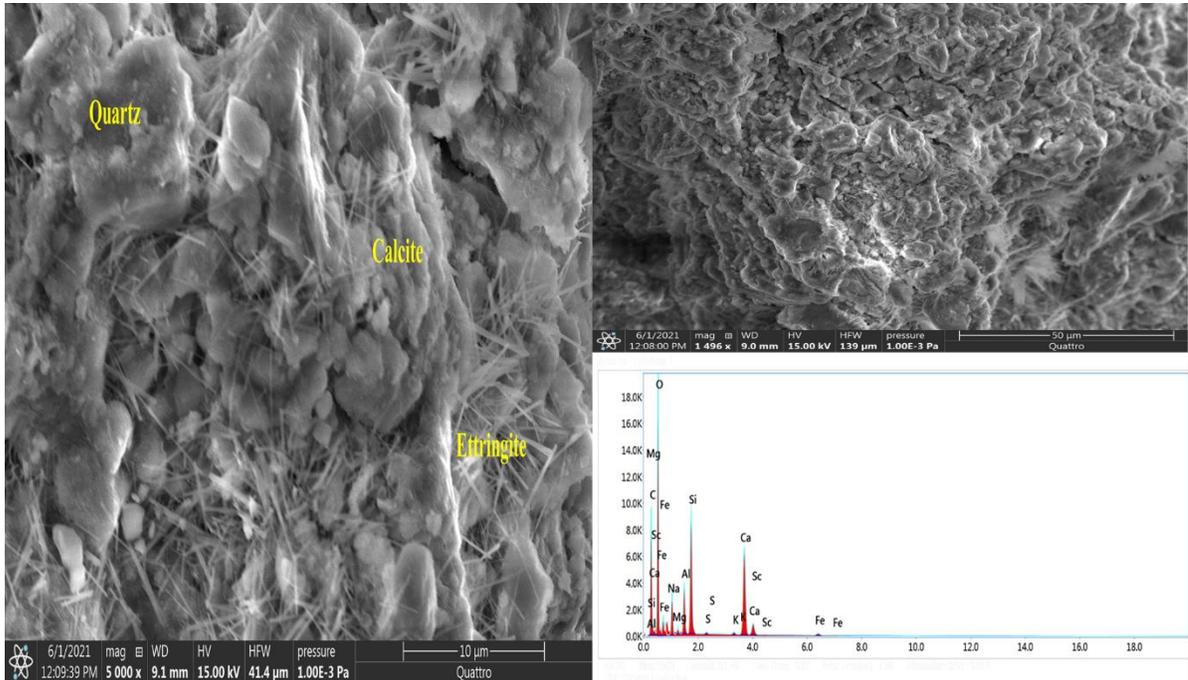


Figure IV.20 : : MEB-EDX du BSCR 18 (60% SD+40% SA).

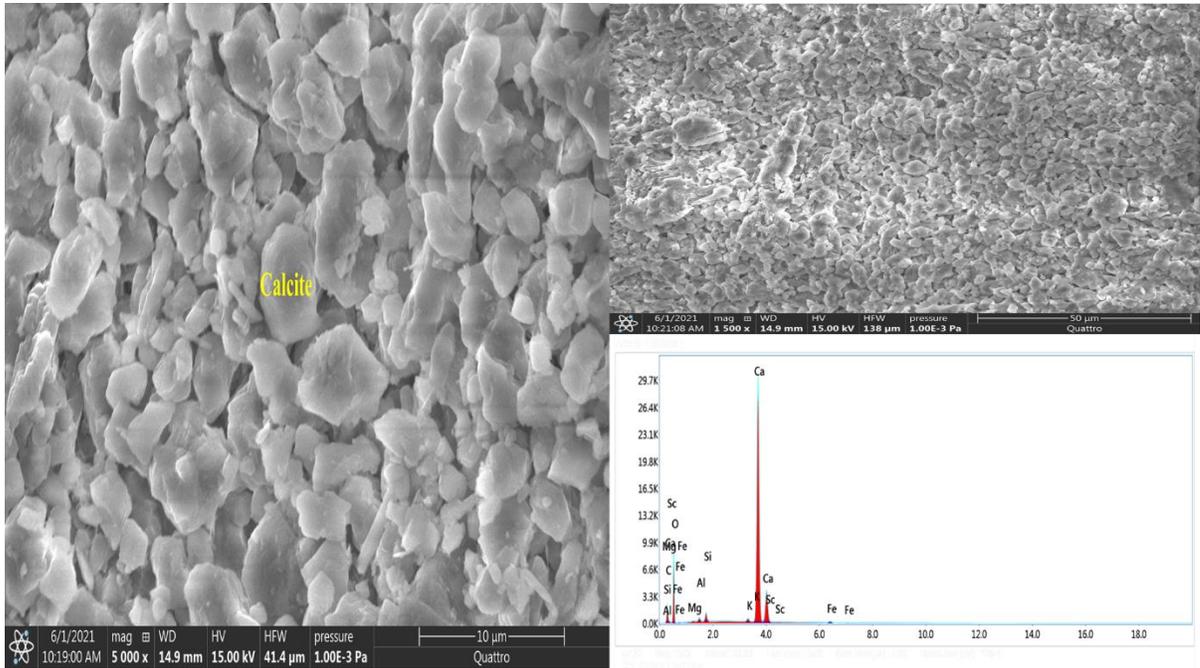


Figure IV.21 : : MEB-EDX du BSCR 02 (80%SC+20%SA).

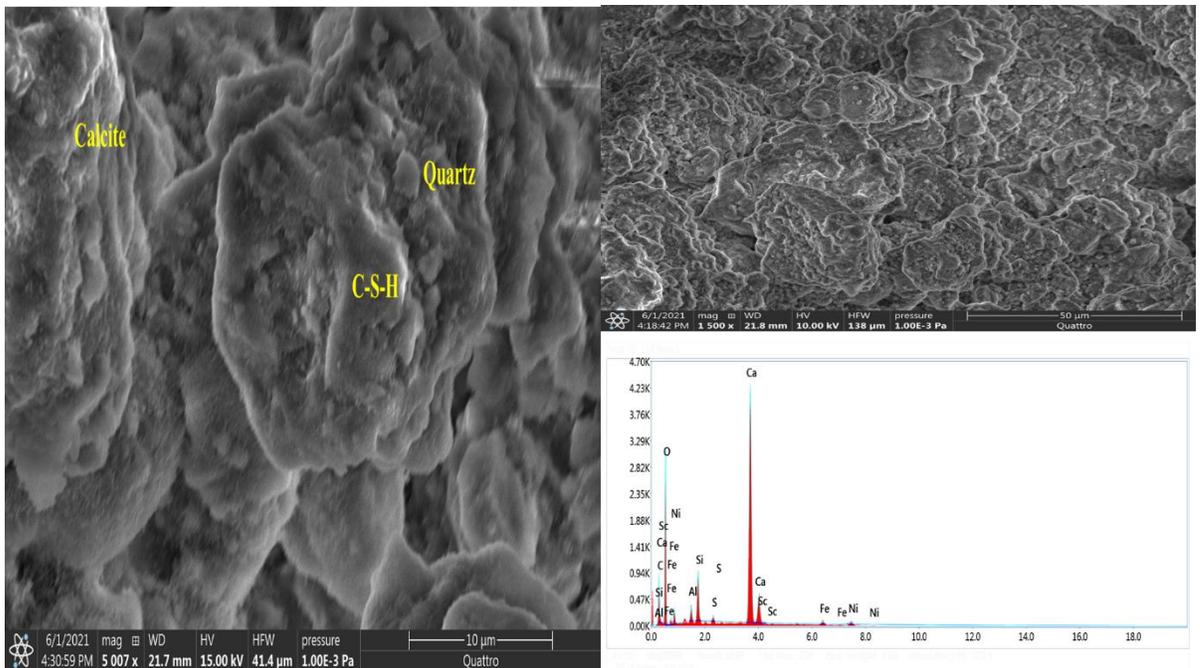


Figure IV.22 : : MEB-EDX du BSCR 20 (80%SD+20%SA).

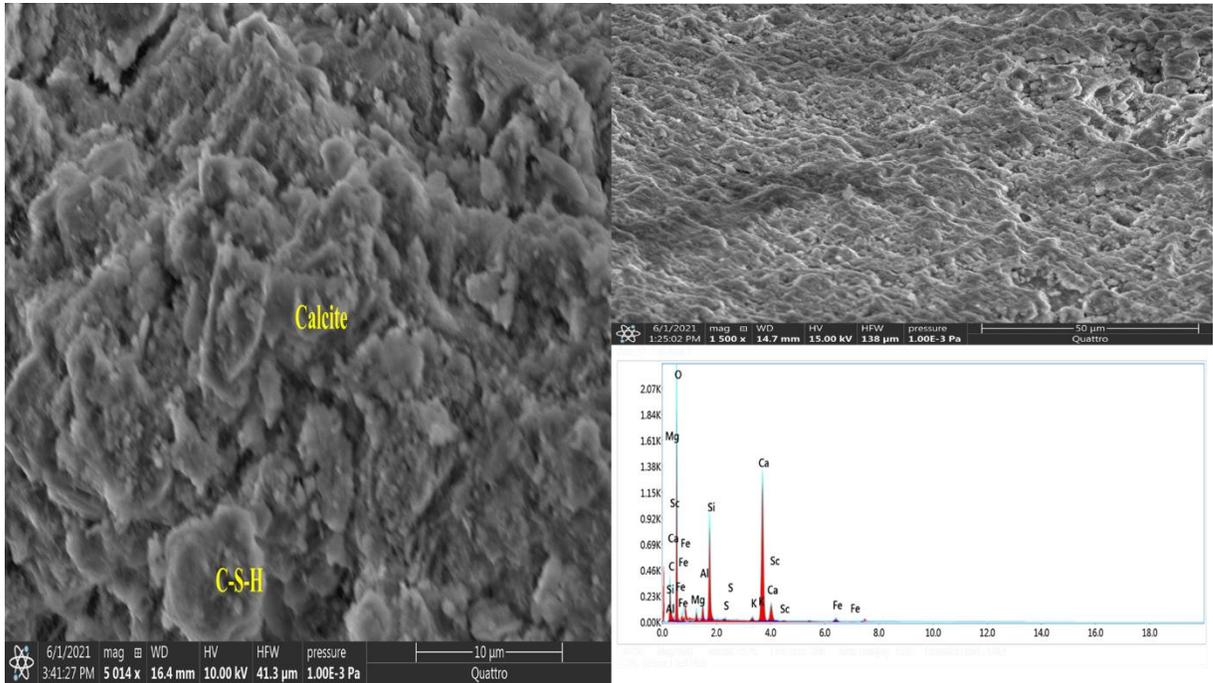


Figure IV.23 : : MEB-EDX du BSCR 12 (40%SD+60%SC).

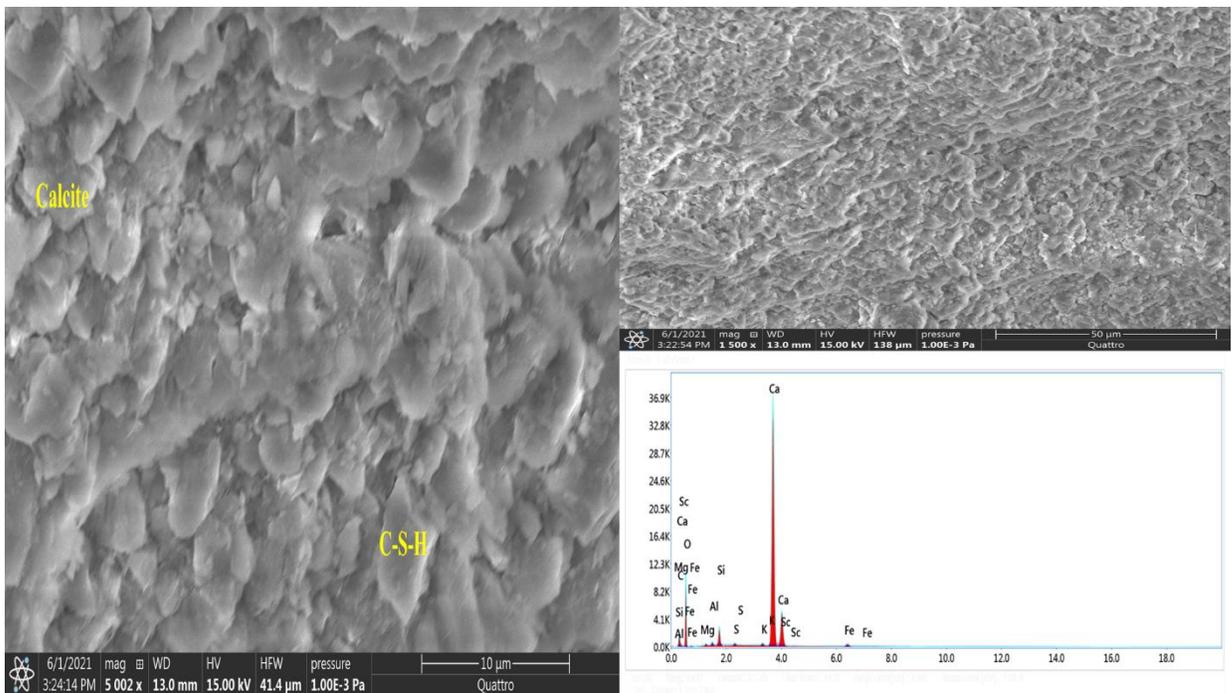


Figure IV.24 : : MEB-EDX du BSCR 10 (0,6SA+0,2SD+0,2SC).

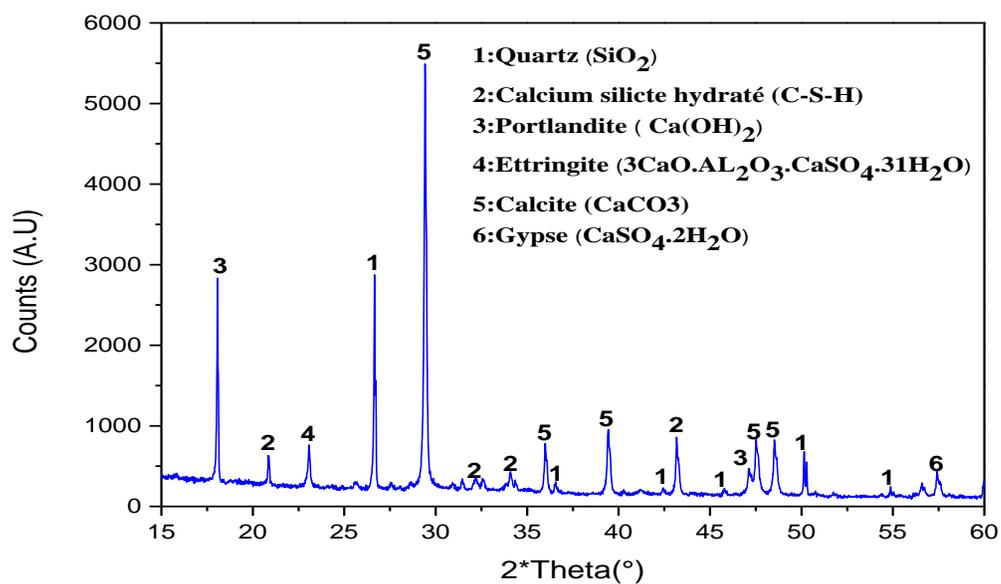


Figure IV.25 : DRX du BSCR 01(100% SC).

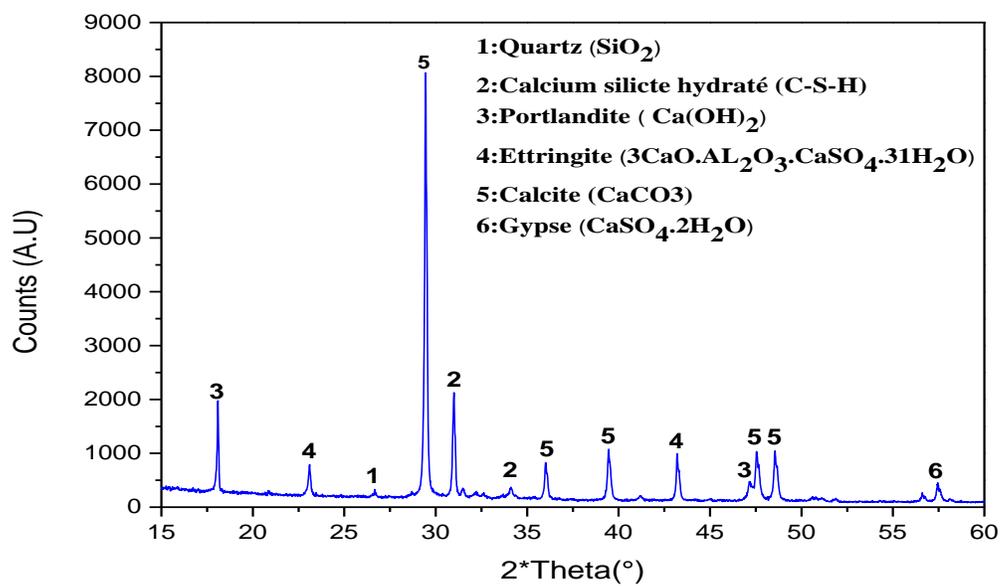


Figure IV.26 : DRX du BSCR 06 (100% SA).

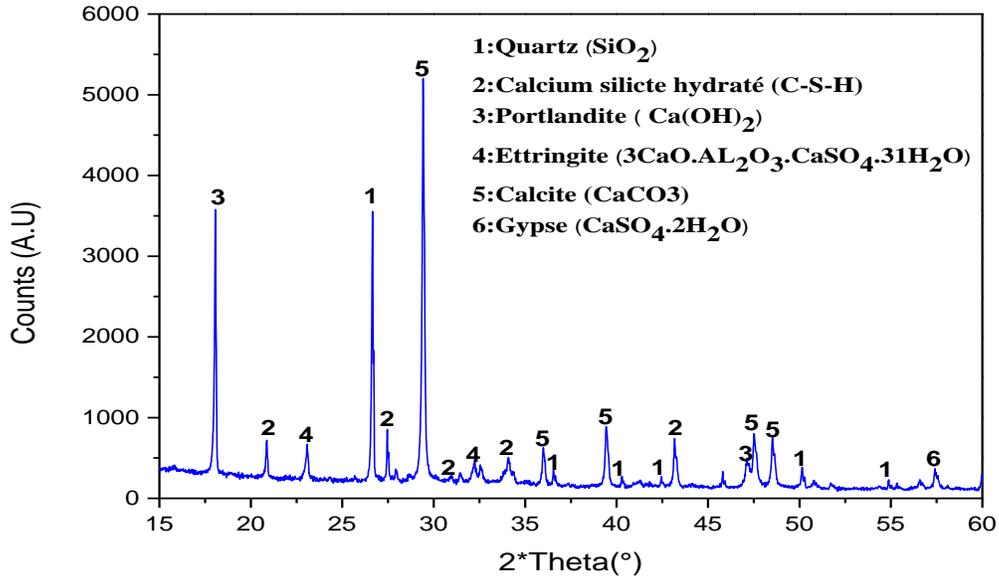


Figure IV.27 : DRX du BSCR 21 (100%SD).

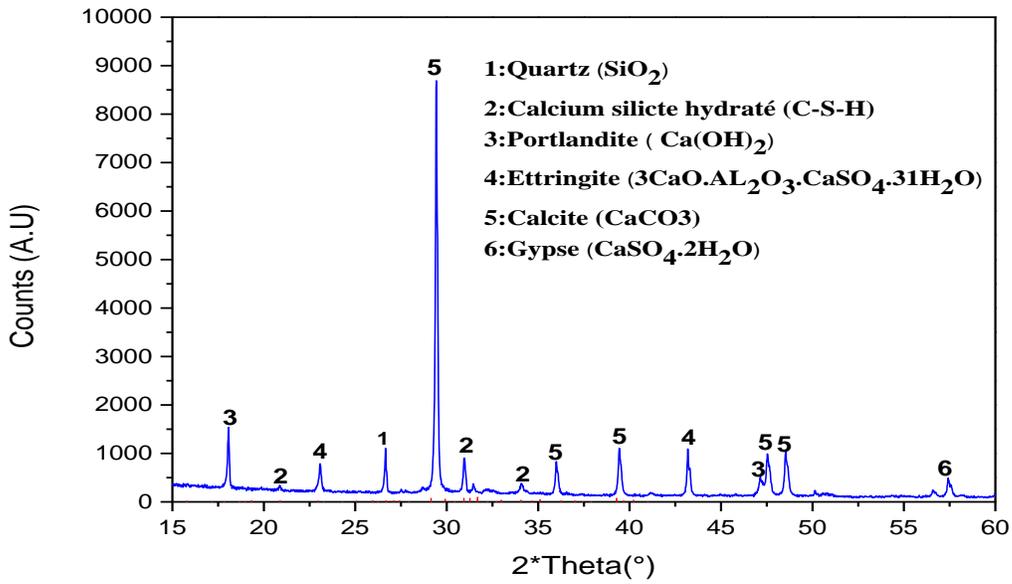


Figure IV.28 : DRX du BSCR 17 (60%SD+20%SA+20%SC).

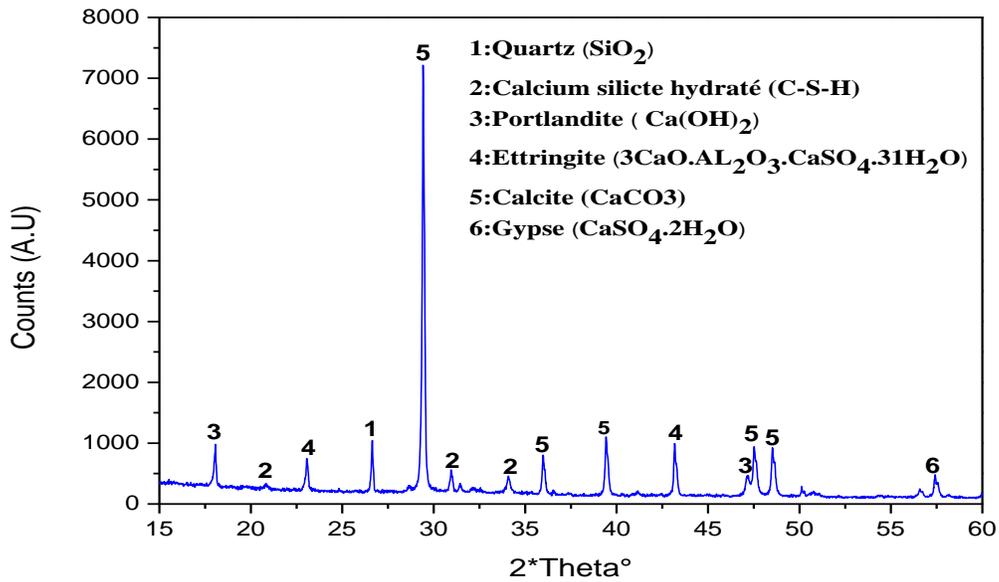


Figure IV.29 : DRX du BSCR 03 (60% SC+40% SA).

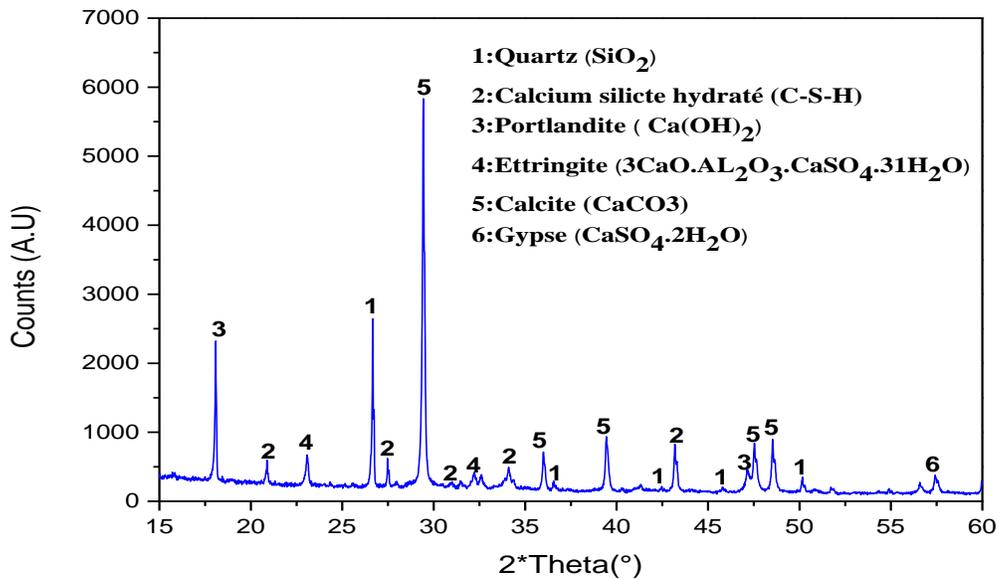


Figure IV.30 : DRX du BSCR 18 (60% SD+40% SA).

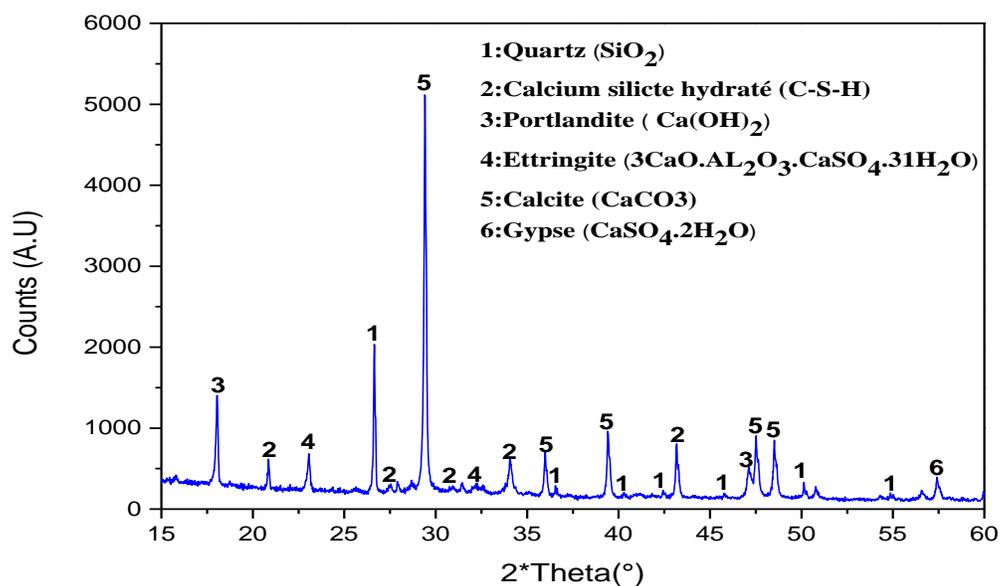


Figure IV.31 : DRX du BSCR 02 (80% SC+20% SA).

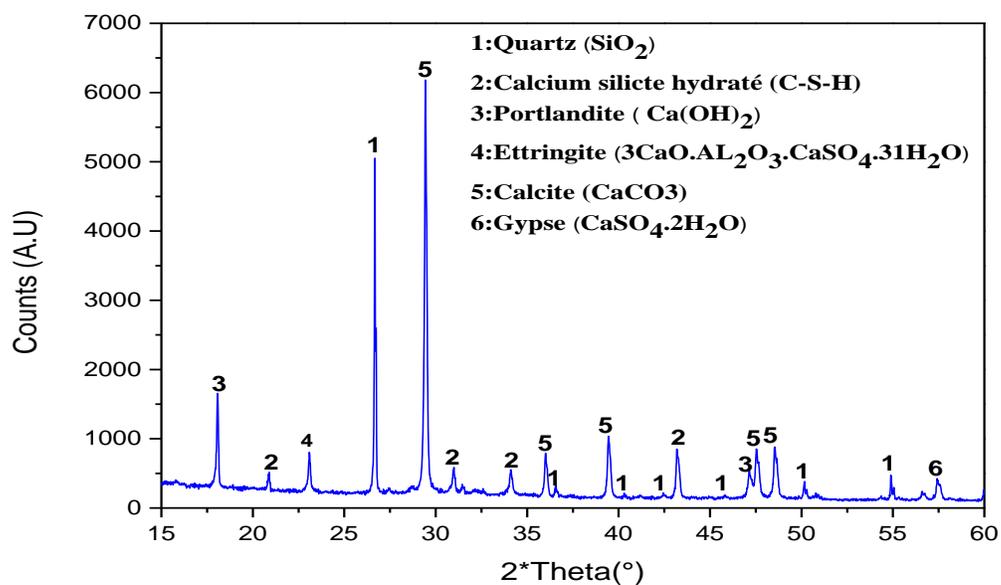


Figure IV.32 : DRX du BSCR 20 (80% SD+20% SA).

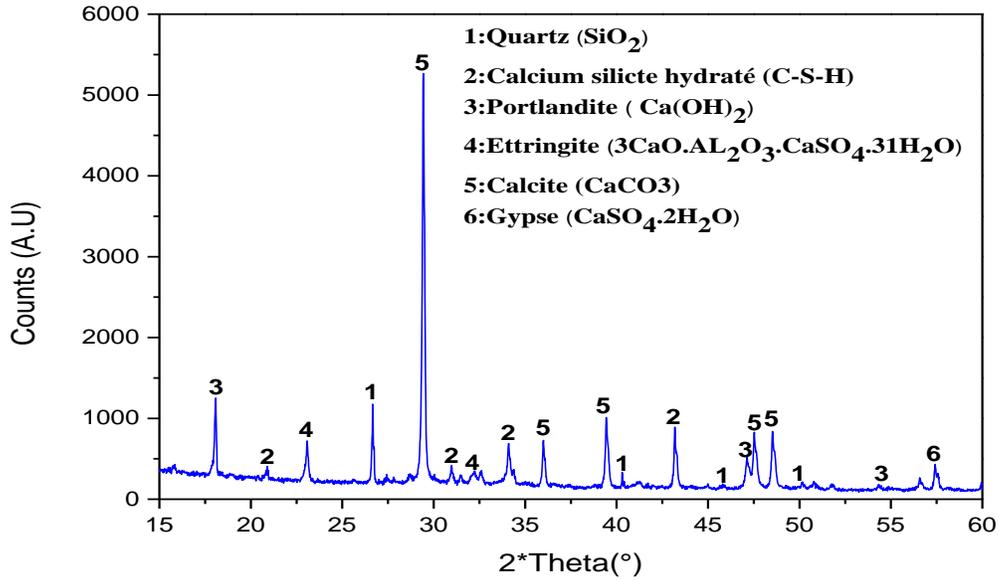


Figure IV.33 : DRX du BSCR 12 (40%SD+60%SC).

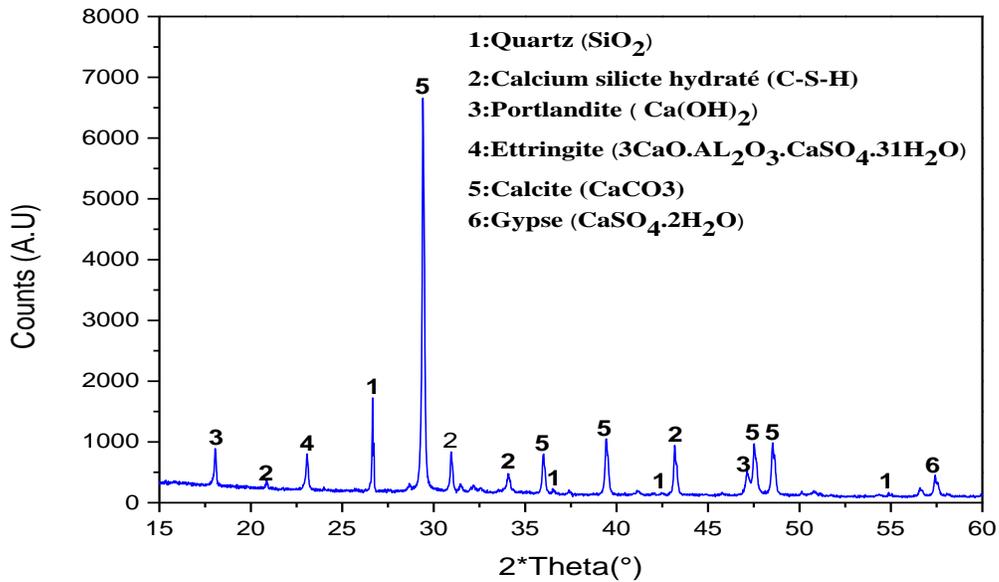


Figure IV.34 : DRX du BSCR 10 (0,6SA+0,2SD+0,2SC).

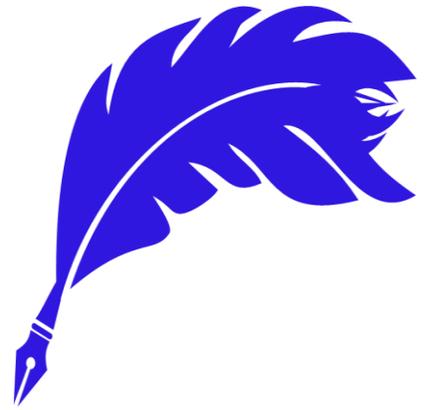
La DRX a été utilisée pour identifier la composition minéralogique des pâtes durcies des différents mélanges du BSCR réalisé. Les résultats aux rayons X (Figure IV.25 à 34) de tous les BSCRs ont révélé la présence de différentes phases comme la portlandite, l'ettringite, C-S-H, la calcite et le quartz. Par contre les pics de calcite et de quartz sont proportionnels aux teneurs de SC et de SD ; pour le BSCR, qui contient un dosage élevé de SC, le pic de calcite augmente relativement. De plus, le pic de la portlandite est légèrement supérieur, dans les BSCR 21 à base de 100% de SD.

IV.6. Conclusion

L'approche de conception de mélange développée dans cette étude expérimentale est une technique efficace pour étudier les effets des trois types sable (sable dune, sable alluvionnaire et sable concassée) sur les propriétés mécaniques, en binaire et ternaire systèmes. Cette approche a permis de fournir des modèles mathématiques qui ont conduit à présenter les résultats obtenus dans des courbes de niveau ternaires.

A partir du modèle mathématique, on constate que les propriétés mécaniques sont fortement influencées par l'effet de la teneur en sable de dune, ensuite la teneur en sable concassée ; les bétons à base de sable binaire (SC+SA) présente de bonnes réponses mécaniques, par conte la présence du sable concassé dans le sable ternaire influe négativement sur les caractéristiques mécaniques des BSCRs formulés. Ces modèles mathématiques facilitent l'évaluation de ces effets en utilisant des graphes ternaires avec iso-réponse courbes.

Conclusion



Générale

Ce travail de recherche s'inscrit dans le cadre du projet de valorisation des sables locaux et de leur utilisation dans le secteur de la construction routière. Pour cela, 21 mélanges de béton ont été préparés, dont 3 bétons témoins, 12 bétons binaires et 6 bétons ternaires. Les résultats obtenus ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- L'approche de la conception du mélange développée dans cette étude expérimentale s'est avérée être une technique efficace pour étudier les effets des trois types de sable sur les propriétés mécaniques et physiques du béton de sable compacté au rouleau (RCSC) ;
- La représentation graphique est un outil visuel efficace qui peut aider à optimiser les proportions de sable du désert (DS), de sable alluvionnaire (AS) et de sable concassé (CS) dans les systèmes binaires et ternaires. Cela permettrait de répondre aux différents critères de performance physique et mécanique du béton ;
- En ce qui concerne les mélanges témoins, le sable alluvial (AS) provoque une baisse considérable des réponses mécaniques des BSCRs qui peut être corrigée en utilisant d'autres types de sable, afin d'améliorer leur comportement mécanique. Ceci a été observé, par la suite, pour les mélanges binaires et ternaires utilisés dans notre étude expérimentale ;
- Les résultats obtenus à travers les trois mélanges : BSCR 21, BSCR 06 et BSCR 01, confirmant que le sable du désert peut être utilisé pour la correction du sable lors de la formulation du BSCR, où une meilleure réponse mécanique a été observée à 28 jours, dépassant 24 MPa. Sa résistance à la traction par fendage est d'environ 7,35 % de la résistance à la compression. La taille et la forme sphérique du SD permettent d'améliorer la compacité et la résistance mécanique ;
- Tous les échantillons ont montré une augmentation de la performance mécanique, sauf ceux contenant plus de 20% de sable alluvial (AS). Les échantillons de béton incorporant plus de 20 % d'AS ont présenté des réponses mécaniques faibles en raison de l'effet négatif du module de finesse et de l'équivalent sable de ce type de sable sur la compacité et le degré d'hydratation du mélange de ciment ;
- Le périmètre des réponses mécaniques recommandé après modélisation correspond à l'intervalle commun entre les meilleures réponses de la résistance à la compression et celles de la résistance à la traction fendue, [DS (45% \pm 10%), CS (45% \pm 10%) et AS (10% \pm 10%)]. Ceci est dû à l'amélioration de la compacité et de l'adhérence entre la pâte et les grains de sable dans ce périmètre expérimental. Ces deux paramètres, à savoir la résistance à la compression et la résistance à la traction fendue, témoignent de la qualité des bétons de chaussée ;

- Un béton de sable compacté au rouleau (BSCR) de classe 2 peut être obtenu en utilisant un dosage élevé de sable de désert (plus de 60%) ;
- La résistance à la compression augmente avec la teneur en sable concassé (CS) dans le mélange de béton. L'utilisation de CS, à un taux de 60%, améliore considérablement le comportement mécanique des BSCR, surtout en présence du sable de désert (DS) ;
- La résistance à la traction par fendage est de l'ordre 2.79 MPa pour la formule à base de sable de 60% concassage, elle représente 13.73% de la résistance en compression. Tandis qu'elle est de 2.5 MPa dans le cas de la formule à base de 60% sable de dune, elle représente ainsi 11.93% de la résistance en compression ;
- Les valeurs de la résistance à la compression des mélanges BSCR17, BSCR 08, BSCR 03 et BSCR 19 étant 20,94 MPa, 20,31 MPa, 19,99 MPa, 21,32 MPa respectivement rendent ces bétons tout à fait appropriés pour être utilisés comme couche de chaussée rigide. Ces bétons appartiennent à la classe 2 selon la norme française NF P 98-170 ;
- Le BSCR 12 (60% SC+ 40%SD) présente le module le plus élevé d'environ 21 GPa. Cette valeur correspond aux valeurs déclarées dans le cadre du projet Sablocrete. Cependant, les mélanges BSCR 02, BSCR03, BSCR 07, BSCR 16 et BSCR 21 ont donné des valeurs inférieures de 4.3%-7% à celle du BSCR12 ;
- Le type de sable utilisé et sa granulométrie ont un effet important sur les propriétés physiques et mécaniques des BSCRs, car le sable est le principal composant de ces mélanges ;
- L'utilisation de sables binaires et ternaires améliore les résistances mécaniques des mélanges, où la résistance à la compression des mélanges ternaires était entre 13.36 et 20.31 MPa, de plus la résistance à la traction par fendage en 28 jours passé de 1.66 jusqu'à 2.79 MPa, ;

Dans la présente étude, la correction des deux paramètres fondamentaux, à savoir la granulométrie et la propreté, a été effectuée sur des mélanges de trois types de sables différents, à l'état brut, en utilisant une technique innovante, afin de vérifier la possibilité de produire des bétons à base de sable compactés au rouleau (BSCR) incorporant différents types de sable. Les résultats obtenus favorisent l'utilisation de mélanges binaires et ternaires avec des teneurs en sable bien définies.

De manière générale, les résultats obtenus sont assez satisfaisants. Ces résultats ont permis de conclure que la nature du sable influe les différentes caractéristiques physiques et mécaniques des bétons formulés. Certaines de ces caractéristiques sont le degré d'hydratation de la pâte de ciment, sa microstructure, sa compacité, son module élastique et son absorption d'eau.

Recommandations

Sur la lumière des résultats ainsi obtenus, il est conseillé de :

- Mesurer la maniabilité en fonction des divers types de sables utilisés pour un dosage de ciment fixée à 300 kg/m^3 .
- Étudier l'influence du type de compactage sur le comportement du béton de sable compacté au rouleau.
- Étudier le comportement du BSCR par temps chaud et tester leurs propriétés de fatigue.
- Réaliser l'essai de poinçonnement et l'essai de retrait.
- Réaliser une étude de dimensionnement des chaussées fabriquées avec du BSCR.
- Réaliser une planche d'essai en grandeur réelle pour une route présentant les mêmes conditions que celles considérées dans notre étude, afin d'examiner et d'étudier le comportement réel de ce type de structure et de vérifier la fiabilité des résultats obtenus en laboratoire.

Référence



bibliographique

Abdeljalil ZRI, 2010. Mise en place d'une nouvelle approche de formulation d'une matrice cimentaire à base de sable de dragage : application aux bétons de sables et granulats.

Abidelah, A., Bouchair, A., Kerdal, D., Ayed, K., 2009. Characterization of a self-compacting sand concrete using the quarry waste. *Can. J. Civ. Eng.* 36, 1773–1782.

ACI 207, 1999. ACI committee 207, 1999. Roller-Compacted Mass Concrete. ACI 207.5R-99. *ACI Materials Journal*, 85(5).

ACI 207.5R-99, 2004. Roller compacted mass concrete. *ACI Manual of Concrete Practice*, Author, 47.

ACI-325. (2001), Report on roller-compacted concrete pavements. *Am Concr Inst*, 95, 1–32.

ACI-325.10R-95, 1995. "State-of-the-art report on rollercompacted concrete pavements." *Manual of concrete practice*, ACI manual of concrete practice, ACI, USA,: 32.

AFGC, 2000. Association Française de Génie Civil. Bétons Auto-plaçant. Recommandations provisoires, Documents scientifiques et techniques, juillet 2000.

Alawad, O.A., Alhozaimy, A., Jaafar, M.S., Al-Negheimish, A., Aziz, F.N.A., 2014. Microstructure analyses of autoclaved ground dune sand–Portland cement paste. *Constr. Build. Mater.* 65, 14–19. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.040>

Albuquerque, M.C., Balbo, J.T., Sansone, E.C., Pinto, P.C., 2011. Fracture characterization of roller compacted concrete mixtures with blast furnace slag and industrial sand. *Int. J. Pavement Res. Technol.* 4, 244.

Ambroise J, 1993. "Bétons de sable fluides. Propriétés mécaniques et physiques". Rapport de recherche, Institut National des Recherches Appliquées, INSA, Lyon, Mars 1993.

Ammari, M.S., Bederina, M., Belhadj, B., Merrah, A., 2020. Effect of steel fibers on the durability properties of sand concrete with barley straws. *Constr. Build. Mater.* 264, 120689. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120689>

Anderson, R., 1986. Roller-Compacted Concrete Pavements Physical Properties. CBI Rep. No Ra 3, 86.

ASTM-C496, 2011. ASTM-C496 (2011). "Standard tensile test method for splitting for splitting strength of cylindrical concrete specimens." AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.

ASTM-D1557-07, 2007. "Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort Standards " AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.

Atiş, C.D., Sevim, U.K., Özcan, F., Bilim, C., Karahan, O., Tanrikulu, A.H., Ekşi, A., 2004. Strength properties of roller compacted concrete containing a non-standard high calcium fly ash. *Mater. Lett.* 58, 1446–1450.

Attia, A., Guettala, S., Zaitri, R., 2021. Using mixture design method to optimizing concretes characteristics made with binary and ternary sands. *World J. Eng.* 18, 194–205. <https://doi.org/10.1108/WJE-05-2020-0184>

Awolusi, T.F., Oke, O.L., Akinkulore, O.O., Sojobi, A.O., 2019. Application of response surface methodology: Predicting and optimizing the properties of concrete containing steel fibre extracted from waste tires with limestone powder as filler. *Case Stud. Constr. Mater.* 10, e00212. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00212>

BaCaRa, 1996. Le béton compacté au rouleau. Presses de l'Ecole-, Nationale Des Ponts et Chaussées, France.

Batata.A, Merouani Z, 1994. Le béton de sable de dune : sa formulation et ses propriétés, Séminaire International sur la Qualité du béton en Climat Chaud. Institut du Génie Civil, Université du Blida et CTC Sud. Ghardaia, Algérie, 1994, pp. 346-355.

Bedadi, L., 2011. Etude expérimentale d'un béton de sable de dune pour la fabrication des dalles et pré dalles armées et faiblement armées 3, 7.

Bédérina, 2007. caractérisation mécanique et physique des bétons de sables a base de déchets de bois. Ecole nationale polytechnique, 10, Avenue Hassen Badi El-Harrach, Alger.

- Bederina, M., 2000. Caractérisation mécanique et microstructure des bétons de sables locaux: effets des fillers et de la nature des sables sur le comportement mécanique du matériau. Mgister Thesis Univ. Laghouat Algeria Fr.
- Bédérina, M., Khenfer, M.M., Dheilily, R.M., Quéneudec, M., 2005. Reuse of local sand: effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concretes. *Cem. Concr. Res.* 35, 1172–1179. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.006>
- Bederina, M., Marmoret, L., Mezreb, K., Khenfer, M.M., Bali, A., Quéneudec, M., 2007. Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: Experimental study and modelling. *Constr. Build. Mater.* 21, 662–668.
- Belhadj, B., Bederina, M., Benguettache, K., Queneudec, M., 2014. Effect of the type of sand on the fracture and mechanical properties of sand concrete. *Adv. Concr. Constr.* 2, 013–027.
- Belhadj, B., Bederina, M., Makhoulfi, Z., Dheilily, R.M., Montrelay, N., Quéneudéc, M., 2016a. Contribution to the development of a sand concrete lightened by the addition of barley straws. *Constr. Build. Mater.* 113, 513–522. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.067>
- Belhadj, B., Bederina, M., Makhoulfi, Z., Dheilily, R.M., Montrelay, N., Quéneudéc, M., 2016b. Contribution to the development of a sand concrete lightened by the addition of barley straws. *Constr. Build. Mater.* 113, 513–522. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.067>
- Benaissa, A., Kamen, A., Chouicha, K., Malab, S., 2008. Panneau 3D au béton de sable. *Mater. Struct.* 41, 1377–1391.
- Benaissa A, Morlier P, Tram V, 1992. Le béton de sable, un matériau non fissurant , Algérie Equipement, 6 (1992): 7-11.
- Benaissa, A., Morlier, P., Viguier, C., 1993. Microstructure du beton de sable. *Cem. Concr. Res.* 23, 663–674. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90017-4](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90017-4)
- Benaissa, I., Nasser, B., Aggoun, S., Malab, S., 2015a. Properties of Fibred Sand Concrete Sprayed by Wet-Mix Process. *Arab. J. Sci. Eng.* 40, 2289–2299. <https://doi.org/10.1007/s13369-015-1753-3>
- Benaissa, I., Nasser, B., Aggoun, S., Malab, S., 2015b. Properties of Fibred Sand Concrete Sprayed by Wet-Mix Process. *Arab. J. Sci. Eng.* 40, 2289–2299. <https://doi.org/10.1007/s13369-015-1753-3>
- Benamara, D., Tebbal, N., Rahmouni, Z.E.A., 2019. Durability of high performance sandcretres (HPS) in aggressive environment. *Adv. Concr. Constr.* 8, 199–206. <https://doi.org/10.12989/ACC.2019.8.3.199>
- Benmalek M, Bali A, 1997. Le béton de sable de dune, un matériau de construction performant pour le monde arabe"; C.A.M, à Damas, Syrie.
- Benouadah, A., 2019. Étude du comportement d'un béton compacté au rouleau armé de fibres. (Thesis). Université de M'sila.
- Benouadah, A., Beddar, M., Meddah, A., 2017. Physical and mechanical behaviour of a roller compacted concrete reinforced with polypropylene fiber. *J. Fundam. Appl. Sci.* 9, 623–635.
- Berga, L., Buil, J. M., Jofre, C., and Chonggang, S. (2003), "Roller compacted concrete dams." Proc. 4th International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams, Madrid, Spain, 17-19 November 2003.
- Bernard, F., Kamali-Bernard, S., 2012. Predicting the evolution of mechanical and diffusivity properties of cement pastes and mortars for various hydration degrees – A numerical simulation investigation. *Comput. Mater. Sci.* 61, 106–115. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.03.023>
- Biskri, Y., Benzerara, M., Babouri, L., Dehas, O., Belouettar, R., 2022. Valorization and recycling of packaging belts and post-consumer PET bottles in the manufacture of sand concrete. *Frat. Ed Integrità Strutt.* 16, 225–239.
- Boussetta, I., El Euch Khay, S., Neji, J., 2020. Experimental testing and modelling of roller compacted concrete incorporating RAP waste as aggregates. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 24, 1729–1743. <https://doi.org/10.1080/19648189.2018.1482792>

- Bouziani, T., 2013a. Formulation et caractérisation d'un béton de sable fibré auto-plaçant (PhD Thesis). Université de Boumerdès-M'hamed Bougara.
- Bouziani, T., 2013b. Assessment of fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete made with different sand types by mixture design modelling approach. *Constr. Build. Mater.* 49, 308–314. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.039>
- Bouziani, T., Bederina, M., Hadjoudja, M., 2012. Effect of dune sand on the properties of flowing sand-concrete (FSC). *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 6, 59–64. <https://doi.org/10.1007/s40069-012-0006-z>
- Bouziani, T., Benmounah, A., Bederina, M., Mohamed, L., 2011. Effect of Marble Powder on the Properties of Self-Compacting Sand Concrete. *Open Constr. Build. Technol. J.* 5, 25–29.
- Bouziani, T., Benmounah, A., Makhloufi, Z., Bédérina, M., Queneudec T'kint, M., 2014. Properties of flowable sand concretes reinforced by polypropylene fibers. *J. Adhes. Sci. Technol.* 28, 1823–1834. <https://doi.org/10.1080/01694243.2014.924176>
- Cao, C., Sun, W., Qin, H., 2000. The analysis on strength and fly ash effect of roller-compacted concrete with high volume fly ash. *Cem. Concr. Res.* 30, 71–75.
- Carte monde desert [WWW Document], Carte Monde. URL <http://www.carte-du-monde.net/227-carte-monde-desert.html> (accessed 11.12.22).
- Castro, J., Bentz, D., Weiss, J., 2011. Effect of sample conditioning on the water absorption of concrete. *Cem. Concr. Compos.* 33, 805–813. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.05.007>
- Chauvin J, 1987. Les sables, Guide pratique d'utilisation routière, ISTE.[04]. Sablocrete (1994) Béton de Sable : Caractéristiques et Pratiques d'Utilisation. Presses de l'ENPC, France.
- Chauvin.J.J, 1991. Le béton de sable en Union Soviétique, Bulletin de liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées n°174, juillet-août, Réf.3589.
- Chhorn, C., Lee, S.-W., 2017. Consistency control of roller-compacted concrete for pavement. *KSCE J. Civ. Eng.* 21, 1757–1763. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0820-y>
- Choi, Y.-K., Hansen, K.D., 2005. RCC/Soil-cement: What's the difference? *J. Mater. Civ. Eng.* 17, 371–378.
- Cisse, I.K., Laquerbe, M., Gaye, A., Diene, M., 1999. Caractérisation des bétons de sable routiers compactés: application au cas du Sénégal. *Mater. Struct.* 32, 151–157. <https://doi.org/10.1007/BF02479443>
- Coquillat G, 1992. "Béton de sable à haute performance", Centre Expérimental de Recherches et d'Etudes du BTP (CEBTP), Rapport de recherche. Bordeaux, Juin 1992.
- D. Harrington, F. Abdo, W. Adaska, C. Hazaree, 2010. Guide for Roller-Compacted Concrete Pavements, Inst. Transp. Iowa State University, p. 104.
- Debieb, F., Courard, L., Kenai, S., Degeimbre, R., 2009. Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates. *Constr. Build. Mater.* 23, 3382–3387. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.031>
- Deghfel Moussa, 2022. Effet du climat chaud sur le comportement d'un béton compacté au rouleau (BCR). Université mohamed boudiaf-M'sila.
- Department of Transport, Specification for Road and Bridge Works, H.M, Stationery Office, London, 1976, pp. 69–70.
- Dhia, M.H.B., 1998. Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière en milieu saharien 10.
- Diederich, P., 2010. Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement auto-plaçant du béton (PhD Thesis). Toulouse 3.

- Eilers, L.H., Nelson, E.B., Moran, L.K., 1983. High-temperature cement compositions-pectolite, scawtite, truscottite, or xonotlite: which do you want? *J. Pet. Technol.* 35, 1373–1377.
- El Euch Ben Said, S., El Euch Khay, S., Loulizi, A., 2018. Experimental Investigation of PCC Incorporating RAP. *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 12, 8. <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0227-x>
- El Euch Khay, S., Neji, J., Loulizi, A., 2010. Compacted Sand Concrete in Pavement Construction: An Economical and Environmental Solution. *ACI Mater. J.* 107.
- ERES, 1998. ERES Consultant, (1998) Review of Life-Cycle Costing Analysis Procedures, étude faite pour le ministère des Transports de l'Ontario, Canada.
- Fakhri, M., 2016. The effect of waste rubber particles and silica fume on the mechanical properties of roller compacted concrete pavement. *J. Clean. Prod.* 129, 521–530.
- Fakhri, M., Amosoltani, E., 2017a. The effect of Reclaimed Asphalt Pavement and crumb rubber on mechanical properties of Roller Compacted Concrete Pavement. *Constr. Build. Mater.* 137, 470–484. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.136>
- Fakhri, M., Amosoltani, E., 2017b. The effect of Reclaimed Asphalt Pavement and crumb rubber on mechanical properties of Roller Compacted Concrete Pavement. *Constr. Build. Mater.* 137, 470–484. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.136>
- Fakhri, M., Amosoltani, E., Aliha, M.R.M., 2017. Crack behavior analysis of roller compacted concrete mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber. *Eng. Fract. Mech.* 180, 43–59.
- Farran, J., Javelas, R., Maso, J.C., 1972. Study of the existing transition aureole between the aggregates of a mortar and the mass of paste cement hydrated, in: *Colloque International, Liaison de Contact Dans Les Matériaux Composites Utilisés En Génie Civil*. Novembre Toulouse, pp. 60–76.
- Forbes, 2007. Forbes, B. B. a. B. A. (2007). A High RCC Dam with Low Grade Aggregates. 5th International Symposium on RCC Dams.
- Gagné, R., 2000. High-performance roller-compacted concrete for pavement-Mixture design, application and durability, in: *Int. Symp. Eng. Mater. Sustain. Dev.* Okayama, Jpn. pp. 74–88.
- Gauthier, P. & Marchand, J., 2001. Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec, Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec (ACRGTQ). Association canadiennes du ciment. (ACC). Association béton Québec (ABQ). 129p.
- Gauthier, P., Marchand, J., 2004. Conception et réalisation de revêtements en béton compacté au rouleau au Québec. *Assoc. Béton Qué. ABQ Qué.* 63–87.
- Gauthier, P., Marchand, J., Boisvert, L., Ouellet, E., Pigeon, M., 2000. Conception, formulation, production et mise en oeuvre de revêtement en béton compacté au rouleau. *Contin. Train. GCI-A2455 Cent. Recherché Interuniv. Sur Béton Dép. Génie Civ. Univ. Laval.*
- Gluais G, Bru J. P, 1993. “Confortement d’une digue en enrochements par injection de béton de sable”, *Bulletin de liaison, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, LCPC, Paris*1993, N° 183- NIT 3697, pp. 91-95.
- Goupy, J., 1988. *Méthode des plans d’expérience [The method experiment plans]*. Paris Dunod.
- Goupy J., 2006. *Les plans d’expériences [Design of experiments]*. France : Revue MODULAD, Numéro 34 ; 2006.
- Goupy, J., 2000. *Plans d’expériences : les mélanges [Experiences plans : the mixtures]*. Collect. Tech. Ingénierie 285.
- Goupy, J., Creighton, L., 2007. *Introduction to design of experiments with JMP examples*. SAS publishing.
- Goupy, J., Creighton, L., 2006. *Introduction aux plans d’expériences*. Dunod : L’Usine nouvelle, Paris.

- Guendouz, M., Boukhelkhal, D., 2019. Properties of flowable sand concrete containing ceramic wastes. *J. Adhes. Sci. Technol.* 33, 2661–2683. <https://doi.org/10.1080/01694243.2019.1653594>
- Guettala, A., Mezghiche, B., Chebili, R., Characteristic Improvement of Dune's Sand Concrete 10.
- Guettala, A., Mezghiche, B., Chebili, R., 1999. Strength comparisons between rolled sand concrete and dune sand concrete.
- Guettala, S., Mezghiche, B., 2011. Compressive strength and hydration with age of cement pastes containing dune sand powder. *Constr. Build. Mater.* 25, 1263–1269. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.026>
- Hadjoudja, M., Khenfer, M.M., Mesbah, H.A., Yahia, A., 2014. Statistical models to optimize fiber-reinforced dune sand concrete. *Arab. J. Sci. Eng.* 39, 2721–2731.
- Hadji, T., Guettala, S., & Quéneudec, M. (2021). Mix design of high performance concrete with different mineral additions. *World Journal of Engineering*, 18(5), 767–779. <https://doi.org/10.1108/WJE-12-2020-0650>
- Hansen KD., A pavement for today and tomorrow. *Concr Int* 1987;9(2):15–7.
- Haque, M.N., Ward, M.A., 1986. Marginal materials in roller compacted concrete for pavement construction, in: *Journal Proceedings*. pp. 674–679.
- Hashemi, M., Shafiqh, P., Abbasi, M., Asadi, I., 2019. The effect of using low fines content sand on the fresh and hardened properties of roller-compacted concrete pavement. *Case Stud. Constr. Mater.* 11, e00230. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00230>
- Hazaree, C., Ceylan, H., Wang, K., 2011. Influences of mixture composition on properties and freeze–thaw resistance of RCC. *Constr. Build. Mater.* 25, 313–319. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.023>
- Heidari, A., Hashempour, M., Tavakoli, D., 2017. Using of Backpropagation Neural Network in Estimation of Compressive Strength of Waste Concrete. *J. Soft Comput. Civ. Eng.* 1. <https://doi.org/10.22115/scce.2017.48040>
- Hesami, S., Modarres, A., Soltaninejad, M., Madani, H., 2016. Mechanical properties of roller compacted concrete pavement containing coal waste and limestone powder as partial replacements of cement. *Constr. Build. Mater.* 111, 625–636. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.116>
- Hong, S.-Y., Glasser, F.P., 2004. Phase relations in the CaO–SiO₂–H₂O system to 200 C at saturated steam pressure. *Cem. Concr. Res.* 34, 1529–1534.
- Houari, H., 1993. Contribution à l'étude du comportement des bétons renforcés de fibres métalliques sous l'action des charges maintenus et cycliques », Thèse de Doctorat, Université INSA de Lyon, Paris, pp 244, 1993. Université INSA de Lyon, Paris, pp 244, 1993.
- Houria MEFTAH, B., 2018. Contribution à l'étude du comportement à haute température des bétons de granulats recyclés, renforcés des fibres polypropylène. Université badji mokhtar annaba.
- J. Ambroise, 1993. Bétons de sable fluides : propriétés mécaniques et physiques.
- Jeuffroy, G., Sauterey, R., 1989. Cours de routes-Chaussées en béton de ciment.
- Joudi-Bahri, I., Lecomte, A., Ouezdou, M.B., Achour, T., 2012. Use of limestone sands and fillers in concrete without superplasticizer. *Cem. Concr. Compos.* 34, 771–780.
- Jupe, A.C., Wilkinson, A.P., Luke, K., Funkhouser, G.P., 2008. Class H cement hydration at 180 C and high pressure in the presence of added silica. *Cem. Concr. Res.* 38, 660–666.
- Kamali-Bernard, S., Keinde, D., Bernard, F., 2014. Effect of Aggregate Type on the Concrete Matrix/Aggregates Interface and its Influence on the Overall Mechanical Behavior. A Numerical Study. *Key Eng. Mater.* 617, 14–17. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.617.14>
- Karadelis, J.N., Lin, Y., 2015. Flexural strengths and fibre efficiency of steel-fibre-reinforced, roller-compacted, polymer modified concrete. *Constr. Build. Mater.* 93, 498–505.

- Kettab, R., Bali, A., Alliche, A., 2007. Rubber-modified sand concrete for waste management. *Int. J. Nucl. Energy Sci. Technol.* 3, 63–75.
- Khay, S.E.E., Neji, J., Loulizi, A., 2011. Compacted dune sand concrete for pavement applications. *Proc. Inst. Civ. Eng. - Constr. Mater.* 164, 87–93. <https://doi.org/10.1680/coma.900049>
- Khay, S.E.E., Neji, J., Loulizi, A., 2010. Shrinkage properties of compacted sand concrete used in pavements. *Constr. Build. Mater.* 24, 1790–1795. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.008>
- Khelaifa, H., Boudaoud, Z., Benouis, A., 2021. Effect of adding rubber aggregates on the behaviour of compacted sand concrete. *Innov. Infrastruct. Solut.* 6, 1–11.
- Lange, F., Mörtel, H., Rudert, V., 1997. Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties. *Cem. Concr. Res.* 27, 1481–1488.
- LCPC 1979, Rapport de Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. “Les pieux forés : recueil des règles de l’art”, Décembre 1979.
- Li, Q., Zhang, F., Zhang, W., Yang, L., 2002. Fracture and tension properties of roller compacted concrete cores in uniaxial tension. *J. Mater. Civ. Eng.* 14, 366–373.
- Lopez-Uceda, A., Agrela, F., Cabrera, M., Ayuso, J., López, M., 2018. Mechanical performance of roller compacted concrete with recycled concrete aggregates. *Road Mater. Pavement Des.* 19, 36–55.
- Madhkhan, M., Azizkhani, R., Torki Harchegani, M.E., 2012. Effects of pozzolans together with steel and polypropylene fibers on mechanical properties of RCC pavements. *Constr. Build. Mater.* 26, 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.05.009>
- Marchand, J., Gagne, R., Ouellet, E., Lepage, S., 1997. Mixture proportioning of roller compacted concrete-a review. *Spec. Publ.* 171, 457–486.
- Mardani-Aghabaglou, A., Ramyar, K., 2013. Mechanical properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method. *Constr. Build. Mater.* 38, 356–364.
- Meddah, A., Beddar, M., Bali, A., 2014. Use of shredded rubber tire aggregates for roller compacted concrete pavement. *J. Clean. Prod.* 72, 187–192. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.052>
- Meddah Abdelaziz, 2015. Caractérisation d’un béton compacté contenant des déchets pneumatiques. École Nationale Polytechnique d’Alger, 10 Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP. 182, 16200, El Harrach, Alger, Algérie.
- Melais, F.Z., Achoura, D., 2011. Formulation et propriétés des bétons de sable renforcé de fibres de polypropylène 11.
- Mohamed, G., Djamila, B., 2018. Physical, mechanical and thermal properties of Crushed Sand Concrete containing Rubber Waste. *MATEC Web Conf.* 149, 01076. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814901076>
- Mohammadi, B., 2013. Development of concrete water absorption testing for quality control. Concordia University.
- Moradi, S., Shahnoori, S., 2021. Eco-friendly mix for Roller-Compacted Concrete: Effects of Persian-Gulf-Dredged marine sand on durability and resistance parameters of concrete. *Constr. Build. Mater.* 281, 122555. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122555>
- Neji J, 1995. Valorisation du sable saharien dans la technologie routière.
- Neji J, Smaoui H et Gandouz W, 2006. Proposition de nouveaux matériaux pour la fondation des routes : Un sable traité au laitier et un béton de sable compacté. *Int. J. Pavements* 5 1 109–120.
- Neocleous, K., Angelakopoulos, H., Pilakoutas, K., Guadagnini, M., 2011. Fibre-reinforced roller-compacted concrete transport pavements, in: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport*. Thomas Telford Ltd, pp. 97–109.

- Oehlert, G.W., 2000. Design and analysis of experiments: Response surface design. N. Y.
- Othmen, R.B., 2013. Compacted-Sand Concrete for Pavement 8.
- Péra, J., Husson, S., Guilhot, B., 1999. Influence of finely ground limestone on cement hydration. *Cem. Concr. Compos.* 21, 99–105. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(98\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(98)00020-1)
- Pigeon, M., Malhotra, V.M., 1995. Frost resistance of roller-compacted high-volume fly ash concrete. *J. Mater. Civ. Eng.* 7, 208–211.
- Pigeon, M., Marchand, J., 1996. Frost Resistance of roller-compacted concrete. *Concr. Int.* 18, 22–26.
- Pilkington, J.L., Preston, C., Gomes, R.L., 2014. Comparison of response surface methodology (RSM) and artificial neural networks (ANN) towards efficient extraction of artemisinin from *Artemisia annua*. *Ind. Crops Prod.* 58, 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.03.016>
- Pittman DW, Development of design procedure for roller compacted concrete (RCC) pavement. Technical Report GL-994-6. US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station; 1994.
- Rao, S.K., Sravana, P., Rao, T.C., 2015. Strength and compaction characteristics of fly ash roller compacted concrete. *Int. J. Sci. Res. Knowl.* 3, 0260–0269.
- Sablocrete, 1994. Synthèse du Projet National de Recherche et Développement, Bétons de sable, caractéristiques et pratiques d'utilisation. Presses de l'école Nationale des Ponts et Chaussées LCPC, Paris.
- Şahmaran, M., Lachemi, M., Hossain, K.M., Li, V.C., 2009. Internal curing of engineered cementitious composites for prevention of early age autogenous shrinkage cracking. *Cem. Concr. Res.* 39, 893–901.
- Saucier F., Cormier B., Duchesne C, 1995. Introduction au dimensionnement et à la construction des chaussées en béton de ciment, Centre de recherche interuniversitaire sur le béton, CRIB, Département de génie civil, Université Laval, Canada, pagination multiple.
- Şengün, E., Alam, B., Shabani, R., Yaman, I.O., 2019. The effects of compaction methods and mix parameters on the properties of roller compacted concrete mixtures. *Constr. Build. Mater.* 228, 116807. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116807>
- Settari, C., Debieb, F., Kadri, El.H., Boukendakdji, O., 2015. Assessing the effects of recycled asphalt pavement materials on the performance of roller compacted concrete. *Constr. Build. Mater.* 101, 617–621. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.039>
- Smaida, A., Haddadi, S., Nechnech, A., 2019. Improvement of the mechanical performance of dune sand for using in flexible pavements. *Constr. Build. Mater.* 208, 464–471. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.041>
- Smith, K., Von Quintus, H., Killingsworth, B., Barton, R., Kobia, K., 1998. Review of life-cycle costing analysis procedures. Final Rep. Prep. Brent Rauhut Eng. ADI Group Submitt. ERES Consult. Ont. Minist. Transp.
- Seyed, M., Bederina, M., & Makhloufi, Z. (2016). Effect of ternary binder on the mechanical and microstructural properties of sand concrete. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 30(4), 339–361. <https://doi.org/10.1080/01694243.2015.1099867>
- Tavakoli, D., 2013. Properties of concrete incorporating silica fume and nano-SiO₂. *Indian J. Sci. Technol.* 6, 1–5. <https://doi.org/10.17485/ijst/2013/v6i1.12>
- Tavakoli, D., Fakharian, P., de Brito, J., 2021. Mechanical properties of roller-compacted concrete pavement containing recycled brick aggregates and silica fume. *Road Mater. Pavement Des.* 1–22. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1924236>
- Tavakoli, D., Hashempour, M., Heidari, A., 2018. Use of Waste Materials in Concrete: A review 24.
- Tavakoli, D., Sakenian Dehkordi, R., Divandari, H., de Brito, J., 2020a. Properties of roller-compacted concrete pavement containing waste aggregates and nano SiO₂. *Constr. Build. Mater.* 249, 118747. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118747>

- Tavakoli, D., Sakenian Dehkordi, R., Divandari, H., de Brito, J., 2020b. Properties of roller-compacted concrete pavement containing waste aggregates and nano SiO₂. *Constr. Build. Mater.* 249, 118747. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118747>
- Tayabji, S.D., Sherman, T.W., Keifer, O., Nanni, A., Piggott, R.W., Pittman, D., Ragan, S.A., Scott, J.A., 1995. State-of-the-art report on roller-compacted concrete pavements.
- Tsivilis, S., Batis, G., Chaniotakis, E., Grigoriadis, Gr., Theodossis, D., 2000. Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar. *Cem. Concr. Res.* 30, 1679–1683. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00372-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00372-0)
- USACE, 2000. USACE (2000). “Engineering and Design, Roller Compacted Concrete.” Engineer Manual No 1110-2-2006,.
- Vahedifard, F., Nili, M., Meehan, C.L., 2010a. Assessing the effects of supplementary cementitious materials on the performance of low-cement roller compacted concrete pavement. *Constr. Build. Mater.* 24, 2528–2535. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.003>
- Vahedifard, F., Nili, M., Meehan, C.L., 2010b. Assessing the effects of supplementary cementitious materials on the performance of low-cement roller compacted concrete pavement. *Constr. Build. Mater.* 24, 2528–2535.
- Won, J.-P., Kim, J.-M., Lee, S.-J., Lee, S.-W., Park, S.-K., 2011. Mix proportion of high-strength, roller-compacted, latex-modified rapid-set concrete for rapid road repair. *Constr. Build. Mater.* 25, 1796–1800.
- Yahia, A., Khayat, K.H., 2001. Experiment design to evaluate interaction of high-range water-reducer and antiwashout admixture in high-performance cement grout. *Cem. Concr. Res.* 31, 749–757.
- Zaniewski, J.P., 1989. Effect of pavement surface type on fuel consumption. *Portland Cem. Assoc. Skokie IL.*
- Zaitri, R., Bederina, M., Bouziani, T., Makhloufi, Z., & Hadjoudja, M. (2014). Development of high performances concrete based on the addition of grinded dune sand and limestone rock using the mixture design modelling approach. *Construction and Building Materials*, 60, 8–16. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.062>
- Zaitri, Rebih, Guettala, S., & Bederina, M. (2018). Physico-mechanical properties of mortars based on the addition of dune sand powder and the recycled fines using the mixture design modelling approach. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 32(15), 1613–1628. <https://doi.org/10.1080/01694243.2018.1434032>
- Zdiri, 2008. Etude de formulation et de comportement mécanique des Bétons Compactés au Rouleau (BCR): Applications routières - Cas des matériaux de gisements locaux. Thèse en cotutelle entre : L’Université de Tunis El Manar (Tunisie) et L’Université d’Artois (France).
- Zdiri, M., Abriak, N., Ouezdou, M.B., Neji, J., 2010. Study of the anisotropy of the roller compacted concrete (RCC) for pavement. *Int. J. Concr. Struct. Mater.* 4, 45–49.
- Zdiri, M., Abriak, N., Ouezdou, M.B., Neji, J., 2009. The use of fluvial and marine sediments in the formulation of Roller Compacted Concrete for use in pavements. *Environ. Technol.* 30, 809–815. <https://doi.org/10.1080/09593330902990097>
- Zhang, H., Zhang, W., Meng, Y., Li, H., 2022. Deterioration of sea sand roller compacted concrete used in island reef airport runway under salt spray. *Constr. Build. Mater.* 322, 126523. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126523>