

République Algérienne Démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 Guelma



Faculté : Sciences et Technologie
Département : Génie Civil et d'Hydraulique
Laboratoire de domiciliation : Génie Civil et d'Hydraulique

THÈSE

En Vue de l'Obtention du Diplôme de
Doctorat en Troisième Cycle

Domaine : Science et Technologie Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Présenté par

SOUICI Ikram

Intitulée

Élaboration et caractérisation des bétons de sable à base des fillers et sables recyclés

Soutenue le: 27/02/2025

, Devant le jury composé de:

Pr. BELACHIA Mouloud	Université 8 mai 1945 Guelma	Président
Pr. BENOUIS Abdelhalim	Université 8 mai 1945 Guelma	Rapporteur
Pr. ZEGHICHI Leila	Université Mohamed Khider Biskra	Co-Rapporteur
Pr. MEZHOUD Samy	Université des Frères Mentouri Constantine-1	Examineur
Pr. NAFA Zahreddine	Université 8 mai 1945 Guelma	Examineur

Année Universitaire : 2024/2025

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

 <https://orcid.org/0000-0001-9471-2110>

DÉDICACES

Je souhaite dédier ce travail :

*À ma précieuse mère, dont le soutien a été constant tout au long de ma vie
scolaire.*

À la mémoire de mon cher père et gendre.

*Mes frères et sœurs et leurs enfants, vous occupez toujours une place dans mon
imagination.*

À ma grande famille et mes proches.

A tous ceux qui m'ont aidée et fait confiance.

REMECIEMENTS

Je souhaite exprimer mes plus sincères remerciements à mon co-encadreur de thèse, la professeure ; **Leila Zeghichi**. Je suis profondément reconnaissante pour son constant encouragement et ses conseils au cours des trois dernières années, ainsi que pour son amical soutien face aux obstacles.

Je remercie également mon directeur de thèse le professeur ; **Abdelhalim Benouis** le travail sous sa direction est une expérience enrichissante au cours de laquelle j'ai beaucoup appris et progressé.

Je tiens à remercier chaleureusement l'ensemble des jurés.

Je souhaite exprimer mes sincères remerciement à tous les enseignants et les administrateurs de l'université de Guelma 8 mai 1945 pour leur aide.

Je tiens à remercier chaleureusement ma famille, mes proches et toutes les personnes participant à la réalisation de ce travail.

Ikram Souici

RESUMÉ

Cette étude vise à examiner l'effet des déchets minéraux « les fillers et les sables recyclés » ainsi que les déchets végétaux (fibres de palmiers dattiers) sur les propriétés physico-mécaniques et les propriétés de durabilité des bétons de sable (BS). Pour parvenir à formuler les différents types de béton, nous avons adopté une approche à la fois théorique et expérimentale, utilisant un plan d'expérience (plan factoriel complet et un plan de mélange). Les modèles dérivés des prédictions ont été employés pour évaluer les effets des différents facteurs de mélange ainsi que leurs interactions, dans le but d'optimiser les performances du béton de sable étudié.

Les résultats révèlent que la maniabilité et la résistance à la compression à 28j des bétons de sable à base des fillers de béton et de la brique recyclée (FR et BR) sont principalement affectée par le contenu en BR et en filler calcaire naturel FC.

La maniabilité optimale (18 cm) est atteinte pour le mélange (FC= 20%, FR= 10% et BR= 70%) par contre la résistance en compression optimale (35.85 Mpa) est atteinte pour le mélange (FC= 10%, FR= 2% et BR= 88%) ; ces données confirment que l'amélioration de la résistance à la compression est due à la réaction pouzzolanique des briques recyclées et à la formation de nouveaux C-S-H, favorisant une densification accrue de la matrice cimentaire.

Les bétons de sable à base des sable recyclés (BS/SR) présentent des résistances à la compression comparable à celles du BS 0/0 .

Les résultats de l'optimisation de l'effet de la longueur et teneur en fibres de palmiers dattiers (FDP) sur les résistances mécaniques des bétons de sable montrent que l'augmentation de la résistance à la compression à 28j est conditionnée principalement par l'augmentation de la longueur des ces fibres (LF) suivie par la diminution de son pourcentage (PF), en revanche l'accroissement de la résistance à la flexion à 28j et causé par l'augmentation des deux facteurs (LF et PF). L'incorporation de FDP dans les bétons de sable joue un rôle significatif dans l'amélioration de leur résistance à la flexion, cependant l'augmentation de leur teneur peut réduire la résistance à la compression de ces bétons.

Mots clés :

Béton de sable, sable recyclé, filler de béton recyclé, filler de la brique recyclée, fibres de palmiers dattiers, propriétés physico-mécaniques, et optimisation.

ABSTRACT

This study aims to investigate the impact of incorporating mineral wastes (such as fillers and recycled sands) and vegetable wastes (specifically date palm fibers) on the physical, mechanical, and durability characteristics of sand concrete (SC). To formulate various types of concrete, we employed both theoretical and experimental methodologies, utilizing a design of experiments that included full factorial design and mixing design. Models derived from these predictions were employed to assess the influence of different mixing factors and their interactions, with the objective of optimizing the performance of the studied sand concrete.

The results demonstrate that the workability compressive strength at 28 days of sand concretes incorporating recycled concrete fillers and recycled brick (RF and RB) is primarily influenced by the content of RB and the natural limestone filler LF, followed by RF, respectively. Under optimal conditions, all three factors reach their peak values (LF= 20%, RF= 10%, and RB= 70%), leading to maximum workability at 18 cm. When these factors are adjusted to (LF= 10%, RF= 2%, and RB= 88%), the compressive strength at 28 days reaches 35.85 MPa. Conversely, with percentages of (LF= 33.33%, RF= 33.33%, and RB= 33.33%), the workability and compressive strength values are 15.94 cm and 23.87 MPa, respectively. These findings underscore the enhanced compressive strength, attributed to the pozzolanic reaction of RB fines and the formation of new C-S-H, promoting increased densification of the cementitious matrix.

The results from optimizing the effect of the length the and amount of date palm fibers (DPF) in sand concrete indicate that the rise in compressive strength at 28 days is predominantly influenced by increasing fiber length (FL), followed by decreasing fiber percentage (FP). Conversely, the improvement in flexural strength at 28 days is attributed to the increase in both factors (LF and PF). The inclusion of DPF in sand concrete plays a substantial role in enhancing flexural strength, although higher fiber content may result in a decrease in compressive strength for these concrete mixes.

The origin of waste materials, particularly mineral waste, notably the condition of the demolished structure, exhibits a robust correlation with the quantity of adherent mortar, significantly influencing the anticipated outcomes. SEM analysis of recycled filler-based sand concrete utilizing SC/FR indicates that RFs contain a higher proportion of fines, rendering the structure of recycled sand concrete less compact compared to the control sand concrete SC 0/0, given that RFs originate from the demolition of previous specimens. Sand concretes utilizing

ABSTRACT

recycled sand (SC/RS) demonstrate compressive strength like SC 0/0, primarily due to the inherent nature of these recycled sands, sourced from freshly manufactured male slabs.

Key words :

Sand concrete, recycled sand, recycled concrete filler, recycled brick filler, date palm fibers, physico-mechanical properties, and optimization

المخلص

الهدف من هذه الدراسة هو تحليل كيفية تأثير إضافة المخلفات المعدنية (مواد الحشو والرمال المعاد تدويرها) والمخلفات النباتية (ألياف النخيل) على الخصائص الفيزيائية، الميكانيكية وديمومة الخرسانة الرملية (BS). من أجل صياغة أنواع مختلفة من الخرسانة، اعتمدنا نهجًا نظريًا و تجريبيًا على حد سواء، باستخدام تصميم تجريبي (التصميم الكامل وتصميم الخلط). تم استخدام النماذج المستمدة من التنبؤات لتقييم تأثيرات عوامل الخلط المختلفة وتفاعلاتها، بهدف تحسين أداء الخرسانة الرملية المدروسة أظهرت النتائج أن قابلية التشغيل وقوة الانضغاط عند 28 يومًا للخرسانة الرملية المحتوية على مواد حشو الناتجة عن الخرسانة و الأجر المعاد تدويرها (FR و BR) أنهما يتأثران بشكل رئيسي بمحتوى BR والحشو الحجر الجيري الطبيعي FC، يليه FR على التوالي. في ظل الظروف المثالية، يكون للعوامل الثلاثة قيم مثالية (FC= 20% و FR= 10% و BR= 70%) حيث تصل قابلية التشغيل إلى أقصى حد لها عند 18 سم. عندما تكون هذه العوامل بالنسب المئوية التالية (FC= 10%، FR= 2%، BR= 88%) تكون قوة الانضغاط عند 28 يومًا 35.85 MPa، بينما تكون قيم قابلية التشغيل وقوة الانضغاط عند (FC= 33.33%، FR= 33.33%، BR= 33.33%) 15.94 سم و 23.87 MPa على التوالي. تظهر هذه النتائج أن التحسن في قوة الانضغاط يعود إلى التفاعل البوزولاني لمواد الحشو BR وتكوين C-S-H جديدة، مما يؤدي إلى زيادة تكثيف المصفوفة الإسمنتية.

تُظهر نتائج تحسين الخصائص الميكانيكية للخرسانة الرملية المحتوية على أطوال ونسب مختلفة من ألياف نخيل التمر (DPF) أن الزيادة في قوة الانضغاط عند 28 يومًا، مشروطة بشكل أساسي بزيادة طول هذه الألياف (LF) يليها انخفاض نسبتها (PF)، من جهة أخرى إن الزيادة في قوة الانحناء عند 28 يومًا، ناتجة عن زيادة كلا العاملين (LF و PF). يلعب دمج ألياف نخيل التمر في الخرسانة الرملية دورًا مهمًا في تحسين قوة الانحناء، ولكن زيادة محتواها يمكن أن يقلل من قوة انضغاط هذه الخرسانة.

إن مصدر النفايات، لاسيما النفايات المعدنية أي حالة الهيكل المهذوم، لها علاقة قوية جدًا بكمية الملاط الملتصق، مما يؤثر بشكل كبير على النتائج المتوقعة. انطلاقًا من نتائج الماسح الإلكتروني الضوئي MEB للخرسانة الرملية المحتوية على مواد حشو معاد تدويرها BS/FR، يمكننا أن نستنتج أن هذه المواد المألوفة تحتوي على الكثير من المواد الناعمة، مما يجعل الهيكل الخرساني الرملي المعاد تدويره أقل كثافة مقارنةً بالخرسانة الرملية العادية BS 0/0، نظرًا لأن مواد الحشو المعاد تدويرها ناتجة عن طحن عينات قديمة. تقدم الخرسانة الرملية القائمة على الرمل المعاد تدويره (BS/SR) قوة انضغاطية مماثلة لـ BS 0/0 ويرجع ذلك أساسًا إلى طبيعة هذه الرمال المعاد تدويرها الناتجة عن تهديم سقف معوج لبناية مصنعة حديثًا.

المخلص

الكلمات المفتاحية:

الخرسانة الرملية، الرمل المعاد تدويره، مواد حشو ناتجة عن خرسانة المعاد تدويرها، مواد حشو ناتجة عن آجر معاد تدويره، ألياف النخيل، الخصائص الفيزيائية والميكانيكية، التصميم التجريبي والتحسين

SOMMAIRE

DÉDICACES.....	I
REMERCIEMENTS.....	II
RESUME	III
ABSTRACT.....	IV
ملخص.....	VI
SOMMAIRE.....	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES FIGURES	XIV
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	XVIII
1 CHAPITRE 1 : BÉTON DE SABLE.....	1
1.1 Introduction	1
1.2 Historique	1
1.3 Définition	2
1.4 La différence entre le mortier et le béton de sable ?	2
1.5 Constituants de bétons de sable.....	2
1.5.1 Le sable	2
1.5.2 Les fines d'ajouts	3
1.5.3 Ciments.....	5
1.5.4 L'eau de gâchage	6
1.5.5 Les adjuvants.....	6
1.5.6 Les autres additions.....	6
1.6 Caractéristiques des bétons de sable	7
1.6.1 Caractéristiques physiques, mécaniques et durabilité	7
1.7 Microstructure du béton de sable	11
1.8 Les facteurs influents sur les propriétés du béton de sable.....	11
1.8.1 Impact du sable.....	11
1.8.2 Impact des fillers	12
1.8.3 Impact de milieu de conservation.....	13
1.8.4 Impact des fibres	14

SOMMAIRE

1.9	Avantage du béton de sable	15
1.10	Restriction au béton de sable.....	15
1.11	Applications du béton de sable.....	16
1.12	Catégories de béton de sable	16
1.12.1	Béton de sable autoplaçant.....	16
1.12.2	Béton de sable léger	17
1.12.3	Béton de sable fibré.....	17
1.12.4	Béton de sable à haut performance (BHP).....	17
1.13	Conclusion.....	17
2	CHAPITRE 2 : VALORISATION DES DECHETS MINERAUX ET VEGETAUX.....	20
2.1	Introduction	20
2.2	Les déchets minéraux	20
2.2.1	Déchets de construction et de démolition (DCD)	20
2.3	Valorisation des déchets du béton	21
2.4	Exploration du béton recyclé dans la littérature.....	22
2.5	Les bénéfices de la réutilisation de granulats de béton recyclé dans le béton.....	23
2.6	Présentation de granulats de béton recyclé.....	23
2.7	Propriétés physiques de granulats de béton recyclé (GBR)	25
2.7.1	Absorption d'eau	25
2.7.2	La masse volumique (Desnité).....	26
2.8	L'influence du GBR sur les caractéristiques du béton	27
2.8.1	L'effet sur la maniabilité	27
2.8.2	L'effet sur la résistance à la compression.....	28
2.8.3	L'effet sur le retrait	30
2.9	L'effet des granulats fins recyclés (fillers) sur les propriétés du béton	31
2.9.1	L'effet sur la maniabilité	31
2.9.2	L'effet sur l'absorption par immersion.....	32

SOMMAIRE

2.9.3	L'effet sur le retrait	32
2.10	L'effet des fillers de la brique recyclée sur les propriétés du béton les propriétés du béton	33
2.10.1	L'effet sur la maniabilité	33
2.10.2	L'effet sur la sorptivité	34
2.10.3	L'effet sur le retrait	36
2.11	Les déchets végétaux.....	37
2.11.1	Les déchets de palmiers dattiers.....	37
2.12	Conclusion.....	44
3	CHAPITRE 3 : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET PROCTOCOLE EXPÉRIMENTAL.....	47
3.1	Introduction	47
3.2	Matériaux utilisés	47
3.2.1	Sable de naturel	47
3.2.2	Sable recyclé	47
3.2.3	Ciment :.....	49
3.2.4	Filler calcaire (Fc)	49
3.2.5	Fillers de béton recyclé (FR).....	49
3.2.6	Fillers de brique recyclé (BR)	49
3.2.7	Eau de gâchage.....	52
3.2.8	Adjuvant	52
3.2.9	Fibres de palmiers dattiers.....	52
3.3	Formulation des bétons de sable élaborés	53
3.3.1	Formulation du béton de sable témoin	53
3.3.2	Formulation du béton de sable témoin C* (sans fines d'addition).....	53
3.3.3	Évaluation du dosage en sable.....	53
3.3.4	Optimisation de la maniabilité et le dosage en sable.....	54
3.3.5	Estimation du dosage optimal des fines d'addition	54

SOMMAIRE

3.4	Les séries du béton de sable	55
3.4.1	Béton de sable témoin (BS 0/0).....	55
3.4.2	Béton de sable à base des fillers recyclés (BS/FR) et (BS/BR)	55
3.4.3	Béton de sable à base des fillers combinés (BS/FR/BR).....	55
3.4.4	Béton de sable à base du sable recyclé (BS/SR)	55
3.4.5	Béton de sable à base des fibres de palmiers dattiers (BS/FPD).....	55
3.4.6	Béton de sable à base de fibres et des fines recyclés (BS/FR/FDP).....	56
3.5	Optimisation par plan d'expérience	57
3.5.1	Logiciel JMP	57
3.5.2	Les plans d'expérience	57
3.5.3	Les plans factoriels complets	59
3.6	Méthode de malaxage et conservation	61
3.7	Les essais effectués	61
3.7.1	Essai de maniabilité et de densité fraîche.....	61
3.7.2	Essais d'absorption par immersion	62
3.7.3	Essai de l'absorption capillaire (sportivité).....	62
3.7.4	Essai de la porosité accessible à l'eau	62
3.7.5	Essai de retrait	63
3.7.6	Essais mécaniques	63
3.7.7	Essai de la vitesse d'impulsion ultrasonique.....	63
3.7.8	Essais microstructurales (MEB).....	63
3.8	Conclusion.....	63
4	CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION	65
4.1	Introduction	65
4.2	L'effet des fillers recyclés sur les propriétés du béton de sable	65
4.2.1	Les propriétés à l'état frais	65
4.2.2	Les propriétés à l'état durci.....	67

SOMMAIRE

4.2.3	La résistance à la compression	68
4.2.4	La résistance à la flexion	69
4.2.5	Les propriétés de durabilité	70
4.2.6	La vitesse d'impulsion ultrasonique.....	72
4.3	Microstructure (MEB) des Bétons de sable à base des fillers FR/BR	72
4.4	Optimisation de la maniabilité et la résistance à la compression des mélanges ternaires (FC, FR, BR).....	74
4.4.1	Modèle mathématique, résumé de l'ajustement et estimation des coefficients ...	74
4.4.2	Effet principal.....	77
4.4.3	Courbes iso-réponses.....	77
4.5	Microstructure des bétons de sable contenant de fillers combinées (Fc, FR, BR)...	78
4.6	L'effet des sables recyclés (SR) sur les propriétés du béton de sable	79
4.6.1	A l'état frais.....	79
4.6.2	A l'état durci.....	81
4.7	Optimisation de la teneur et la longueur des fibres de palmiers dattiers (BS/FPD) dans le béton de sable	84
4.7.1	Maniabilité	84
4.7.2	Densité.....	85
4.7.3	Resistance à la compression	85
4.7.4	Résistance à la flexion.....	86
4.7.5	Absorption par immersion.....	86
4.7.6	Sorptivité	87
4.7.7	La vitesse d'ultrason	88
4.7.8	Optimisation des résistances mécaniques	88
4.8	Conclusion.....	90
5	CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES.....	108
6	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	94

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1: Corrélation entre la distribution des granulats et la teneur en ciment utilisée [12]	4
Tableau 2.1: consommation mondiale de granulats dans le domaine de construction (en milliard de tonnes) [56]	23
Tableau 2.2: Classe de granulats recyclés [80]	24
Tableau 2.3: Résistance à la compression du béton [88].....	29
Tableau 2.4: Résultats de l'essai d'affaissement en fonction du pourcentage des poussières [97]	31
Tableau 2.5: Absorption totale [99]	32
Tableau 3.1: propriétés physiques des sables	48
Tableau 3.2: composition chimique (%) de ciment.....	49
Tableau 3.3: Composition chimique des fillers utilisés	51
Tableau 3.4: Composition minéralogique des fillers recyclés (FR et BR).....	52
Tableau 3.5: Tableau d'aide pour la détermination de la quantité du sable	53
Tableau 3.6: Composition du béton de sable témoin en kg/ m ³	55
Tableau 3.7: Compositions des différentes séries du béton de sable en kg/ m ³	56
Tableau 3.8: Matrice d'expérience du plan de mélange.....	59
Tableau 3.9: Matrice d'expérience du plan factoriel 2 ²	60
Tableau 3.10: composition du béton de sable à base de fibres de palmiers dattiers (BS/DPF)	61
Tableau 4.1: Résumé de l'ajustement.....	75
Tableau 4.2: Estimation des coefficients.....	76

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: phare de port said en Egypte [8]	Figure 1.2: Pont de New- York [9]	1
Figure 1.3: Démonstration de l'effet filler [15]		5
Figure 1.4: L'effet de la quantité de gros granulats sur l'affaissement du béton de sable [19].		7
Figure 1.5: augmentation de la résistance à la traction par flexion en fonction de la texture de substrat [15].....		8
Figure 1.6: Evolution de retrait de différents compositions du de béton de sable (F1, F2, F3) en fonction du rapport w/c [24].....		9
Figure 1.7: Evolution de porosité en fonction de la taille des pores [7]		10
Figure 1.8: Bonne développement des grains dans la pâte [26].....		11
Figure 1.9: Evolution de la résistance à la compression (a) et la résistance à la traction (b) selon le type du sable [20].....		12
Figure 1.10: Variation du MEB de béton de sable en fonction de l'âge de durcissement [22]		13
Figure 1.11: Effet de l'eau agressive sur la résistance à la flexion de béton en fonction de l'âge de béton [28].....		14
Figure 1.12: Changements dans la déformation due au retrait libre avec le temps [36].....		15
Figure 2.1: Volume total des déchets de construction et de démolition dans le monde [56] ..		21
Figure 2.2: Nombre de publications et nombre cumulé de publication annuelles sur le béton recyclé [76].....		22
Figure 2.3: Zone d'interface de BGR ; a : (ancienne ZIT) / b : (nouvelle ZTI) [81]		24
Figure 2.4: Granulat de béton recyclé [83]		25
Figure 2.5: Absorption de granulat de béton recyclé [70].....		26
Figure 2.6: Densité de granulats de béton recyclé [70].....		27
Figure 2.7: Variation de l'affaissement en fonction de la teneur en WCA [91]		27
Figure 2.8: Développement de l'affaissement du béton en fonction de différents types de granulats grossiers et de diverses conditions d'humidité [88]		28
Figure 2.9: Evolution de la résistance à la compression du mélange 1 (a) et du mélange 2 (b) [92]		30
Figure 2.10: Résultats moyens de retrait au séchage [93].....		30
Figure 2.11: Retrait de séchage du béton fabriqué avec différents types de granulats [94]....		31
Figure 2.12: Variations de retrait des mortiers [103].....		33
Figure 2.13: Valeurs d'affaissement du béton produit [109]		33

LISTE DES FIGURES

Figure 2.14: Affaissement relatif du mélange de ciment avec RBP [117].....	34
Figure 2.15: Résistance à la flexion du M-CBP et du M-MBP avec différents dosages [123]	34
Figure 2.16: Variation du coefficient d'absorption capillaire des différents mortiers à un rapport E/L de 0,5 [2]	35
Figure 2.17: Effet de la teneur en CBW sur le coefficient d'absorption d'eau par capillarité des mortiers durcis pendant 90 jours [115].....	35
Figure 2.18: Effet du RBP sur le retrait autogène [116].....	36
Figure 2.19: Évolution du retrait en relation avec la concentration de déchets de briques [118]	36
Figure 2.20: Parties aériennes du palmier dattier [133]	38
Figure 3.1: Démolition d'une nouvelle dalle (Wilaya de Biskra)	47
Figure 3.2: Les différentes catégories de sables.....	48
Figure 3.3: Analyse granulométrique des sables	48
Figure 3.4: Fillers utilisés.....	50
Figure 3.5: MEB des fillers	50
Figure 3.6: Analyse granulométrie par laser des fines (ciment, filler calcaire, filler recyclé et brique recyclée).....	50
Figure 3.7: DRX des fillers utilisés.....	51
Figure 3.8: Etapes d'obtention les fibres de palmiers dattiers	52
Figure 3.9: Visualisation des mélanges à trois composants à l'aide d'un triangle équilatéral .	59
Figure 3.10: Illustration d'un plan expérimental.....	60
Figure 4.1: Evolution de la maniabilité du béton de sable en fonction de la teneur en filler recyclés (FR et BR).....	65
Figure 4.2: Effet des fillers recyclés (FR, BR) sur la densité fraîche du béton de sable.....	66
Figure 4.3: Développement de retrait de séchage des bétons de sable à base des fillers recyclés (FR, BR).....	67
Figure 4.4: Impact de taux des fillers recyclés (FR, BR) sur la résistance à la compression du béton de sable	68
Figure 4.5: Développement de la résistance à la flexion des bétons de sable contenant des fillers recyclés (FR, BR).....	69
Figure 4.6: Effet des fillers recyclés (FR, BR) sur l'absorption par immersion et porosité accessible du béton de sable.....	70
Figure 4.7: Sportivité du béton de sable à base des fillers recyclés (FR, BR)	71
Figure 4.8: Evolution de la vitesse d'impulsion du béton de sable à base des FR et BR	72

LISTE DES FIGURES

Figure 4.9: MEB du BS 0/0.....	73
Figure 4.10: a : MEB du béton de sable (BS/100%BR), b : MEB du béton de sable (BS/100% FR).....	73
Figure 4.11: a : MEB du mélange de (BS/50% BR),b : MEB du mélange de (BS/50% FR)	74
Figure 4.12: Evolution des effets principaux	77
Figure 4.13: Courbes iso-réponses de la maniabilité	78
Figure 4.14: Courbes d'iso-réponses de la résistance à la compression	78
Figure 4.15: a : MEB du mélange de (BS/50% BR et 50% FR), b : MEB du mélange de (BS/ 33,33% Fc – 33,33% FR et 33,33% BR)	79
Figure 4.16: Evolution de la maniabilité des BS en fonction de la teneur en SR	79
Figure 4.17: Densité fraiche du béton de sable à base du sable recyclé	80
Figure 4.18: Retrait de séchage de béton de sable recyclé.....	81
Figure 4.19: Résistance à la compression du béton de sable en fonction de pourcentage de sable recyclé	81
Figure 4.20: Résistance à la flexion du béton de sable en fonction de l'ajout des SR.....	82
Figure 4.21: Effet de la teneur en sable recyclé sur l'absorption par immersion et porosité accessible à l'eau du béton de sable	83
Figure 4.22: Vitesse d'impulsion ultrasonique des bétons de sable recyclés	84
Figure 4.23: Maniabilité des bétons de sable fibrés	85
Figure 4.24: Densité du béton de sable fibré après 28 jours	85
Figure 4.25: Résistance à la compression du béton de sable fibré.....	86
Figure 4.26: Résistance à la flexion du béton de sable fibré.....	86
Figure 4.27: Absorption par immersion du béton de sable fibré.....	87
Figure 4.28: Sorptivité des bétons de sable fibrés (BS/FPD).....	87
Figure 4.29: Vitesse ultrasonique du béton de sable fibré.....	88
Figure 4.30: Effets principaux des résistances mécaniques à 28j	89
Figure 4.31: Effet d'interaction des résistances mécaniques à 28j.....	89
Figure 4.32: Profileurs de surface des résistance mécaniques	90

INTRODUCTION
GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

À mesure que l'utilisation du béton de sable évolue pour ces différentes propriétés, les chercheurs ont exploré d'autres voies pour confectionner un béton respectueux de l'environnement par l'ajout des matières issues du recyclage, cette idée présente une solution pour minimiser l'effet environnemental des déchets.

La collecte des résidus solide issus des catastrophes naturelles comme les séismes et les inondations est désormais une problématique environnementale de premier plan. Par conséquent, l'utilisation des déchets s'avère être une alternative intéressante à l'élimination [1].

En Algérie en particulier, une quantité considérable de déchets est générée annuellement, cependant elle est rarement collectée. Plus 2,2 millions de tonnes de déchets sont générés par le secteur de bâtiment annuellement [2], des recherches sont effectués sur la valorisation des déchets de démolition (mélange de brique et de ciment) pour la préparation des nouvelles substances cimentaires comme le mortier et le béton. Ce recyclage présente un intérêt d'ordre écologique et économique [1].

En outre, l'exploitation de déchets végétaux dans les matériaux de construction est en forte croissance, notamment les déchets des palmiers dattiers, Grâce à l'élagage annuel des palmiers. Des études récentes ont indiqué qu'il existe plus de 120 millions de palmiers dattiers dans la région MENA, chaque arbre vivant plus d'un siècle et générant des fruits et des déchets pendant les récoltes annuelles.

L'Algérie compte le plus grand nombre de palmier dépasse 800 000 tonnes annuellement [3].

L'objectif de cette étude est d'apporter une contribution à valorisation des déchets de palmiers dattiers pour fabrique un béton écologique et durable. Pour atteindre cet objectif, les points ci-après sont examinés et analysés :

- Évaluer l'effet du remplacement du filler calcaire par un filler recyclé sur la qualité du béton de sable (mélanges binaire), puis ajuster la teneur en fillers (mélanges ternaire) à l'aide d'un plan expérimental.
- Etude du remplacement sélectif du sable naturel par du sable de béton recyclé sur les caractéristiques du béton de sable.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

- Estimation de l'effet de l'ajout des fibres de palmiers dattiers sur les propriétés du béton de sable, ainsi optimisation du pourcentage de ces fibres et leur longueur par un plan factoriel complet.

Un plan expérimental consiste à organiser une série d'essais expérimentaux de manière à obtenir un maximum d'informations en réalisant un nombre minimal d'expériences, tout en garantissant la meilleure précision possible dans les estimations des réponses par le modèle. Cette méthode est employée pour évaluer l'impact des divers paramètres potentiels en vue d'optimiser les performances du système étudié [4].

Cette thèse comprend quatre chapitres:

Le 1er chapitre montre une vue d'ensemble du béton de sable, en abordant ses distinctions avec le mortier, ses éléments constitutifs, les facteurs qui impactent ses propriétés, ainsi que les domaines d'application découlant de ses caractéristiques.

Le deuxième chapitre présente des données statistiques sur la production mondiale de déchets minéraux, notamment générés par la démolition des constructions. Il examine également la valorisation des fibres de palmiers dattiers dans les composites cimentaires à partir d'une étude approfondie de la littérature.

La deuxième partie (chapitre 3 et 4) est basée sur la partie expérimentale du travail effectué. Le chapitre 3 décrit en détail les caractéristiques chimiques et minéralogiques des matériaux utilisés, ainsi la procédure de traitement de ces matériaux.

Les résultats retenus de notre étude expérimental sont bien présentés et analysés dans le quatrième chapitre. Ces résultats mettent en évidence l'effet des sables et fillers recyclés sur les propriétés et la durabilité du béton de sable. Finalement, une optimisation (taux, dimension) des fibres végétales incorporées dans la matrice cimentaire est effectuée pour comprendre leurs effets dans le renforcement du béton de sable.

En conclusion, une synthèse générale résume les principaux résultats rencontrés et suggère des perspectives de recherche pour l'avenir.

Chapitre 1

BÉTON DE SABLE

1 CHAPITRE 1 : BÉTON DE SABLE

1.1 Introduction

Le béton de sable connaît une popularité croissante grâce à ses caractéristiques particulières telles que sa facilité de mise en œuvre maniabilité, sa granulométrie fine et bon aspect de surface. Il se compose essentiellement de sable, de ciment, aussi des fillers qui augmentent la compacité et corrigent granulométrie du mélange en diminuant le dosage en ciment requis.

Grâce à l'utilisation accrue du béton de sable, les spécialistes de cette discipline ont essayé d'incorporer d'autres composants locaux, industriels ou recyclés afin d'améliorer les propriétés de ce matériau et d'atténuer les impacts nocifs des déchets sur l'écosystème.

Ce chapitre illustre un bref aperçu du béton de sable, mettant en évidence les divergences par rapport au mortier, ses constituants, les facteurs influençant ses caractéristiques et ses domaines d'usage spécifiques.

1.2 Historique

Le béton de sable, est un matériau ancien dont la composition a évolué au cours des années. En France, il tire ses origines du "béton aggloméré" inventé par COIGNET en 1853, dans le but de construire des édifices monolithiques à la fois économiques et résistants [5].

Les premières applications de ce matériau sont visibles dans la Maison Coignet, située dans la rue Charles Michels à Saint-Denis (région parisienne), il a également été utilisé à l'étranger, comme dans la construction du phare de Port-Saïd en Égypte, atteignant une hauteur de 52 mètres (voir figure 1.1), ainsi que dans le pont de New York en 1872 (voir figure 1.2) [6].



Figure 1.1: phare de port said en Egypte [8]



Figure 1.2: Pont de New- York [9]

BÉTON DE SABLE

Durant les années 1869 à 1872, pendant la construction de quelques parties du canal qui puisaient l'eau dans la rivière Vanier, CIGNET a expérimenté pour la première fois l'ajout d'un sable non conventionnel à un sable fin classique dans le but d'apporter des améliorations granulaires. Ce sable non conventionnel était alors considéré comme inadapté à la construction [6].

Le béton de sable a été couramment adopté pour la construction d'installations majeures telles que le port de Kaliningrad et le pont de Chernavskiv. Cette technique avait été largement oubliée en Europe occidentale et en ex-URSS vers les années 1920, mais a retrouvé de la pertinence pendant la Deuxième Guerre mondiale grâce aux performances observées sur certaines pistes construites par l'Allemagne [7]. Les bétons de sable à un rôle moins important jusqu'aux années 1970-1980. Toutefois, de nouvelles préoccupations concernant l'exploitation responsable des granulats et une sensibilisation accrue aux enjeux environnementaux ont contribué à la popularité du béton de sable dans le sud-ouest de la France au 1970. Cette reprise se justifie par la pénurie de dépôts alluviaux et la richesse des dépôts de sables massifs. Face à cette situation, l'Association pour la Promotion et le Développement du Béton de Sable a été fondée en 1988 [6].

1.3 Définition

Le béton de sable est type de béton se compose de granulats fins, de ciment, d'adjuvants et d'eau. L'ajout de gravillons est permis tant que leur proportion par rapport au sable reste inférieure à 0,7 (NF P18-500) [8].

1.4 La différence entre le mortier et le béton de sable ?

Le béton de sable comme son nom le révèle, où le sable est utilisé comme matériau essentiel ($D_{max} \leq 6\text{mm}$). Sa composition requiert seulement (250 à 400) Kg/m^3 de ciment, une quantité typique pour les bétons classiques. Pour obtenir une compacité optimale, on ajoute des fines (fillers) et un plastifiant. En comparaison, le mortier demande une concentration plus élevée en ciment, entre 400 et 600 Kg/m^3 [9].

1.5 Constituants de bétons de sable

1.5.1 Le sable

La préparation du béton de sable ne requiert aucune exigence quant à l'origine du sable employé. Qu'il soit extrait de dépôts naturels alluvionnaires, de carrières, obtenu par concassage ou encore récolté dans les dunes, tous types de sable peuvent être utilisés. Cependant, la

BÉTON DE SABLE

propreté du sable est primordiale ; l'utilisation de sable contenant des impuretés est strictement interdite [6].

Il existe plusieurs types de sable, dont les suivant :

1.5.1.1 Sable de dune

Il est d'origine désertique, son diamètre fine et uniforme varie entre 0,063 et 2 mm. Ils se distinguent par leur pureté, mais leur principal inconvénient réside dans leur haute teneur en fines naturelles, ce qui nécessite souvent l'ajout d'une quantité d'eau de gâchage plus élevée, Cela conduit à une légère augmentation de la perméabilité du béton.

1.5.1.2 Sable de mer

Ce sable, d'origine côtière, présente une granulométrie comparable à celle du sable de dune, avec une finesse particulière. Toutefois, pour son utilisation dans la fabrication de béton, il est important qu'il ne soit ni excessivement fin, ni qu'il contienne du sel.

1.5.1.3 Sable de rivière

Ce sable, issu du dragage des rivières, doit offrir une résistance suffisante et être exempt de pollution pour garantir une bonne préparation du béton.

1.5.1.4 Sable de carrière

Issus de concassage de roches. Ont une proportion plus élevée de fines ou de fillers par rapport au sable naturel [10].

1.5.1.5 Sable artificiel

Il peut être obtenu soit par des processus industriels à partir de sources minérales, soit être spécialement fabriqué pour répondre à des besoins particuliers comme le laitier qui est fabriqué à partir de résidus divers provenant des hauts fourneaux [9].

1.5.2 Les fines d'ajouts

Le béton de sable exige une teneur en ciment notablement plus élevée, dépassant généralement les 400 kg/m^3 , en raison du diamètre maximal des granulats $D \leq 6\text{mm}$. Pour optimiser la compacité du mélange, Une approche consiste remplir des pores du sable, par l'incorporation des fillers ou de fines. Le terme "filler", signifie remplir, et désigne des matériaux dont la taille maximale des granulats ne peut pas excéder 0,2 mm, Ils sont fréquemment obtenus par le criblage ou la fragmentation de roches. La corrélation entre le besoin en fines et la teneur en ciment nécessaire se manifeste à travers la règle largement reconnue de :

BÉTON DE SABLE

$C = 550 / \sqrt[5]{D}$ ou $C = 700 / \sqrt[5]{D}$ (Suivant l'utilisation du béton).

En définissant la teneur minimum en ciment suivant le diamètre (D) des granulats employés [9] tel que présenté dans le tableau ci-dessous:

Tableau 1.1: Corrélation entre la distribution des granulats et la teneur en ciment utilisée [12]

Granularité	$\sqrt[5]{D}$	$550 / \sqrt[5]{D}$	$700 / \sqrt[5]{D}$	
0/25	1.904	290	370	Béton
0/20	1.821	300	385	
0/16	1.741	315	400	
0/8	1.516	360	460	
0/6.3	1.445	380	480	
0/4	1.320	415	530	Mortier
0/2	1.149	480	610	
0/1	1.000	550	700	

Les fillers jouent un rôle essentiel dans renforcer la cohésion du mélange, une apparence basée sur leur composition minérale et leur finesse et catégorisée comme actif ou inerte [5].

Les résultats de certaines expérimentations menées au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées à Bordeaux [L.R.P.C., 1992] ont permis de mettre en évidence que la granulométrie des fillers n'avait pas un impact déterminant. En revanche, la composition chimique et minéralogique (l'activité pouzzolanique) aussi la morphologie (forme, angularité, état de surface) qui jouent un rôle crucial. Certains fillers, qualifiés de "actifs", favorisent le processus de prise hydraulique du ciment en réagissant avec la chaux dégagée par celui-ci, Cela conduit à un accroissement de la résistance [6].

On distingue plusieurs types d'addition (active ou inerte), comme :

1.5.2.1 Filler calcaire

Il s'agit d'une roche minérale finement broyée, qui répond aux exigences de la norme française NF P18-508 (1995) concernant les ajouts minéraux calcaires.

BÉTON DE SABLE

Les fillers calcaires sont également susceptibles d'affecter le procédé d'hydratation du ciment, ce qui se traduit par une amélioration notable des résistances à un stade précoce [11]. Étant donné qu'ils peuvent se trouver dans les pores capillaires et modifier les caractéristiques rhéologiques du béton [10].

Le phénomène, appelé effet filler comme illustré dans la figure (1.3), entraîne une compacité accrue du squelette granulaire, influençant aussi les performances du béton aux états frais et à l'état durci [11].

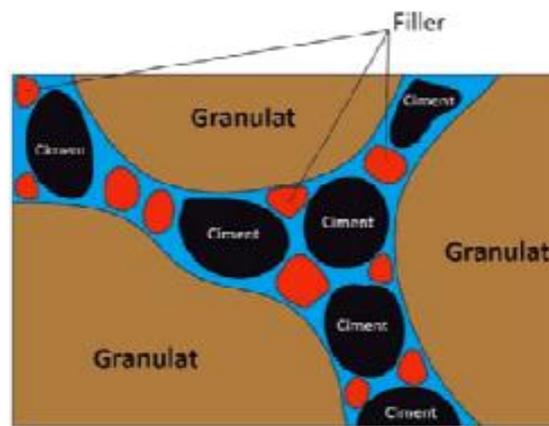


Figure 1.3: Démonstration de l'effet filler [15]

1.5.2.2 Laitier

Résultants au refroidissement rapide des scories de fer dans les hauts fourneaux. Les ciments de laitier ont une bonne résistance aux environnements agressifs tels que les eaux sulfatées et les milieux marins.

1.5.2.3 Fumée de silice

Sont des déchets de Ferro silicium ou de silicium ont une teneur élevée en silice amorphe, généralement supérieure à 85% en masse. L'ajout de ces fumées dans le béton augmente sa densité et réduit sa porosité finale. Ainsi, les solutions chimiquement agressives ont moins de possibilités de pénétrer à travers le réseau poreux du béton, ce qui améliore sa durabilité [5].

1.5.3 Ciments

Selon la norme NF P15-301, les quantités de ciment sont comparables à celles des bétons traditionnels, variant entre 300 et 400 kg/m³ [12].

BÉTON DE SABLE

1.5.4 L'eau de gâchage

Elle participe à l'hydratation des liants, garantit la saturation des agrégats et confère au béton la plasticité requise pour être mis en place [9].

1.5.5 Les adjuvants

Les adjuvants améliorent la maniabilité du mélange, ce qui peut conduire à une résistance accrue en minimisant la quantité d'eau et en garantissant une excellente distribution des fines [6].

Les additions présentées dans les matériaux cimentaires peuvent entraîner des changements, à la fois bénéfiques et défavorables, dans certaines de leurs propriétés. Le rôle et l'efficacité d'un adjuvant dépendent du dosage appliqué ainsi que des composants constitutifs du béton.

En présence d'eau, les grains de ciment peuvent regrouper dépend de leur taille et de leur charge électrique superficielle, ce qui influe la fluidité du mélange. Par conséquent, il est nécessaire d'augmenter la proportion d'eau, exprimée par le rapport E/C, afin de garantir une texture plus fluide [8].

1.5.6 Les autres additions

1.5.6.1 Gravillon

Dans un béton de sable, le rapport G/S (gravillons/sable) doit rester inférieur à 0,7, où S représente une granulométrie inférieure à 4 mm [6].

1.5.6.2 Fibres

Sont principalement employées pour minimiser le retrait lors du durcissement initial. La quantité et le type de fibres sont cruciaux pour garantir leur efficacité [6].

La proportion de fibres incorporées est généralement indiquée en pourcentage (%) par rapport au volume total du béton. Par exemple, les fibres polymères sont couramment ajoutées à des concentrations comprises entre 0,1 et 1% du volume global de béton [13].

1.5.6.3 Colorants

Ils sont employés dans des applications similaires à celles des bétons traditionnels, mais leur incorporation requiert une attention particulière. Pour assurer une homogénéité optimale du mélange et une composition idéale du béton de sable, tout en préservant la durabilité de sa couleur avec temps [6].

1.6 Caractéristiques des bétons de sable

1.6.1 Caractéristiques physiques, mécaniques et durabilité

1.6.1.1 Granulométrie / maniabilité

Le béton de sable exige un teneur en eau supérieure que le béton traditionnel, une proportion plus élevée d'éléments grossiers tend souvent à améliorer la maniabilité du mélange. Ainsi, il existe une relation entre la finesse de Blaine et l'ouvrabilité du béton [14].

La figure 1.4 montre clairement l'impact significatif du dosage de sable fin sur l'ouvrabilité des bétons conçus, respectant une quantité régulière de l'eau et du ciment et ajouter un superplastifiant. Les résultats des essais démontrent que lorsque le sable contient une proportion élevée d'éléments grossiers (comme dans les cas SC4 et SC5), il devient plus poreux et plus absorbant. Cela entraîne un accroissement du degré de finesse et amélioration de l'ouvrabilité du matériau. En revanche, une élévation du taux de fines (comme observé dans les cas SC1 et SC2) avec un affaissement du cône d'Abrams est d'environ 2 cm, ce qui concerne des bétons plus compacts

Le SC5 a une plasticité élevée. Pendant l'essai, il a été remarqué qu'avant la vibration, l'eau pénètre dans les pores du matériau (indiquant un béton sec), tandis que pendant la vibration, un film d'eau se forme à la surface du béton (confirmant la présence d'eau dans les pores) [15].

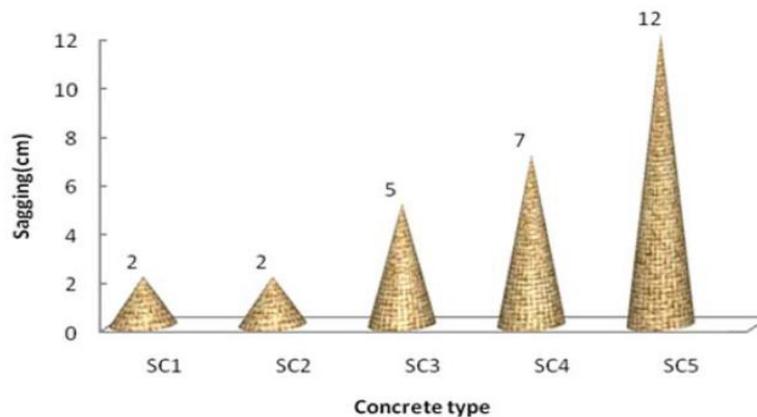


Figure 1.4: L'effet de la quantité de gros granulats sur l'affaissement du béton de sable [19]

1.6.1.2 Résistance à la flexion

La résistance à la flexion du béton est habituellement relativement faible. Cependant, la résistance à la traction est parfois essentielle dans le béton, ce qui nécessite des additifs qui contribuent à augmenter cette caractéristique.

BÉTON DE SABLE

Gadri et Guettala [16] ont étudié la possibilité d'utiliser le béton de sable comme un matériau de réparation et d'évaluer sa force d'adhérence au substrat de béton ordinaire. Afin de déterminer sa force d'adhérence et le type de défaillance qui peut se produire après l'essai de flexion par fendage. Le béton de sable a été préparé par l'application un soin de surface visant à améliorer leur rugosité avant les essais (LGR) : traitement par brossage métallique manuel, (HRG) : écaillage de la surface, (DH) : perçage au marteau, (HRGDH) : perçage au marteau avec écaillage.

La figure 1.5 présente une augmentation de la résistance à la flexion avec 57,3 % et 50 %, respectivement, dans le cas des substrats OCS. Cette augmentation est moins importante pour les surfaces à trous percés (DH), pour les mêmes matériaux de recouvrement, avec 38,8 % et 20 %, sur le même substrat OCS.

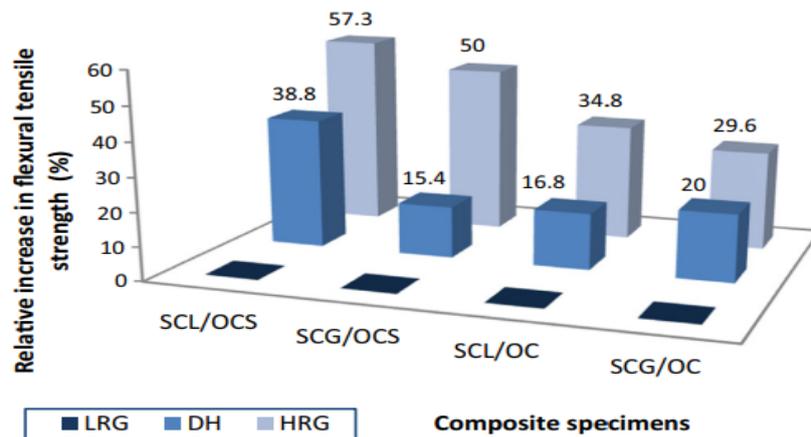


Figure 1.5: augmentation de la résistance à la traction par flexion en fonction de la texture de substrat [15]

1.6.1.3 Retrait

Le retrait du béton est un processus de déformation qui se produit progressivement avec le temps. Il se caractérise par la diminution du volume d'un élément de béton sans charge ni contrainte à une température stable [17]. [12].

Le béton de sable connaît une augmentation rapide du retrait de séchage à un stade précoce, ce phénomène étant dû à une cinétique élevée de séchage initial. Néanmoins, cette cinétique diminue progressivement, conduisant à une stabilisation ultérieure du retrait [9].

Bouziani et al. [18] ont réalisé des tests de retrait sans contrainte sur trois formulations distinctes du béton de sable compacté (F1, F2 et F3). La composition F3 est obtenu à partir de sable du désert, que l'on trouve en grandes quantités dans le sud du pays (région du Sahara).

BÉTON DE SABLE

La figure 1.6 (F1) présente l'évolution de la contrainte de retrait en $\mu\text{m}/\text{m}$ pendant les 28 premiers jours pour tous les échantillons. Il convient de noter que chaque point sur les courbes représente le résultat moyen pour les trois échantillons testés. L'essai de retrait sans contrainte a montré une très bonne répétabilité puisque la valeur absolue de l'écart entre les échantillons étudiés est estimé de 3 % à 9 % pour chaque mélange examiné. Les graphiques démontrent de manière évidente que le phénomène de retrait s'accroît proportionnellement à l'augmentation du rapport eau/ciment (w/c).

La figure 1.6 (F2) montre les résultats de l'essai de retrait non contraint obtenu pour le mélange F2 à différents rapports w/c . Les mêmes résultats obtenus pour le mélange F1 ont été validés pour le mélange F2. Ce mélange a cependant présenté un retrait plus important que le mélange F1. En effet, à un rapport w/c de 0,8 et après 28 jours, une contrainte de retrait moyenne de 516 $\mu\text{m}/\text{m}$ a été mesurée. La figure 1.6 (F3) montre les résultats du retrait du mélange F3 ; ce béton se comporte de la même manière que les mélanges F1 et F2.

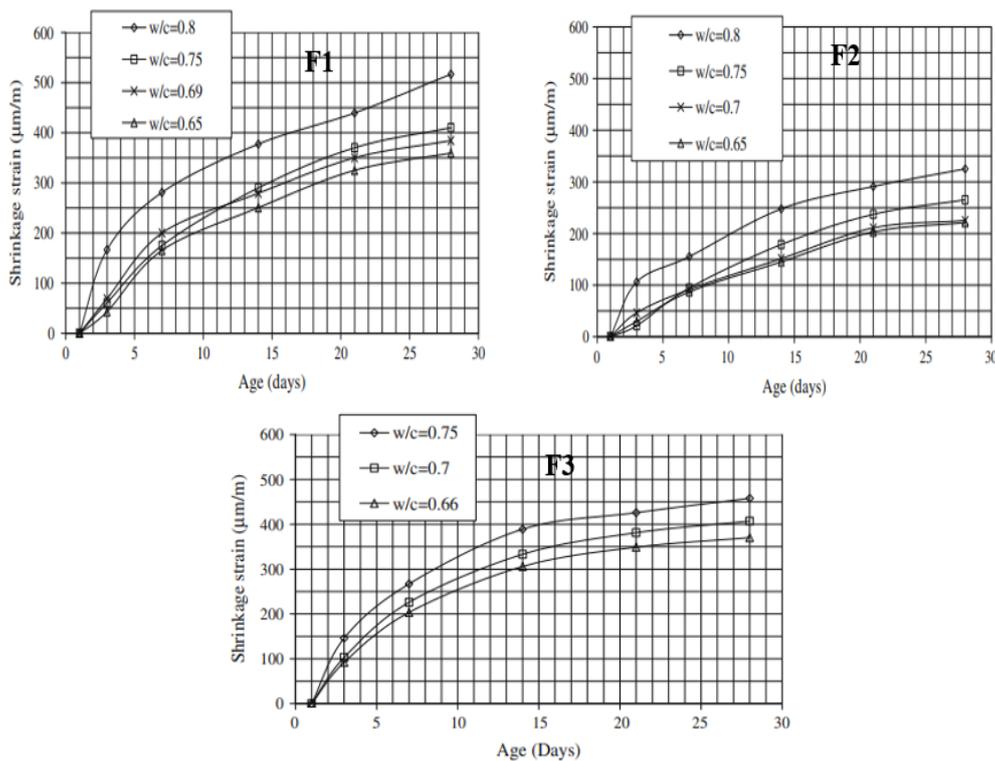


Figure 1.6: Evolution de retrait de différents compositions du de béton de sable (F1, F2, F3) en fonction du rapport w/c [24]

1.6.1.4 Porosité

Généralement, le béton de sable se caractérise par une plus grande porosité que le béton conventionnel. Sa microstructure se caractérise par une plus grande quantité de vides, ces

BÉTON DE SABLE

derniers étant de taille plus réduite et orientés de manière plus unidimensionnelle par rapport au béton traditionnel (Figure 1.7). Un nombre accru de pores augmente la probabilité de colmatage, d'autant plus facilement en raison de leur petite taille. Cette distribution spécifique des pores contribue largement à leur bonne résistance lors des essais de durabilité, porosité identique à celle d'un béton classique. En ce qui concerne la perméabilité à l'air, elle est nettement inférieure ou comparable à celle des bétons traditionnels [6]. D'autre part, Benaissa et al. [19] ont démontré que la porosité du béton de sable est environ de 11 à 13%, comparable à celle du béton ordinaire. Cette porosité favorise un séchage rapide et uniforme, donc une faible résistance à la rupture pour le béton de sable.

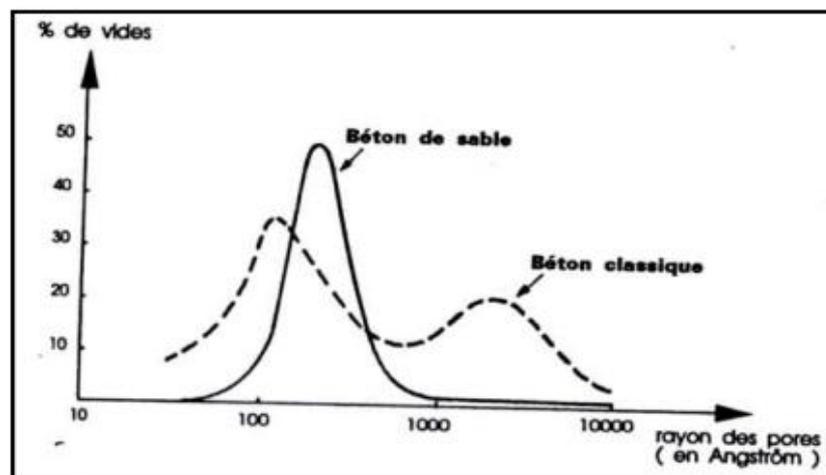


Figure 1.7: Evolution de porosité en fonction de la taille des pores [7]

1.6.1.5 Fissuration

Benaissa et al. [12] ont montré que le béton de sable se caractérise par une densité progressive, la granulométrie fine de ce béton permet une mise en place économique en comparaison avec le micro-béton traditionnel.

Les courbes contrainte-déformation du béton de sable sont semblables à celles du béton conventionnel. Cependant, les déformations sont plus prononcées dans le cas du béton de sable. En ce qui concerne l'évolution des caractéristiques mécaniques sous divers degrés de sollicitation. Terrah née Ouis [20] Il a été observé que le béton de sable présente une fissuration plus tardive et un facteur d'endommagement plus faible que le béton classique.

1.7 Microstructure du béton de sable

Le béton de sable se caractérise par une structure continue, où la pâte de ciment apparaît de manière amorphe, comme signalé au MEB (Figures 1.8). Les remarques de Benaissa et al. [19] indiquent que l'hydratation s'est déroulée de manière normale, les agrégats sont bien incorporés dans la matrice cimentaire, sans Portlandite significative dans l'interface pâte-granulats ou ZTI. La perméabilité bimodale du matériau est donc distinguée de celle observée dans d'autres types de béton, comprise entre 11 et 13 %, elle est semblable à celle du béton traditionnel. Ce procédé de création de vides est rapide et uniforme, ceci explique l'absence de fissuration en générant des gradients d'humidité faibles, réduisant ainsi les contraintes de tension superficielle et empêche la création des fissures.

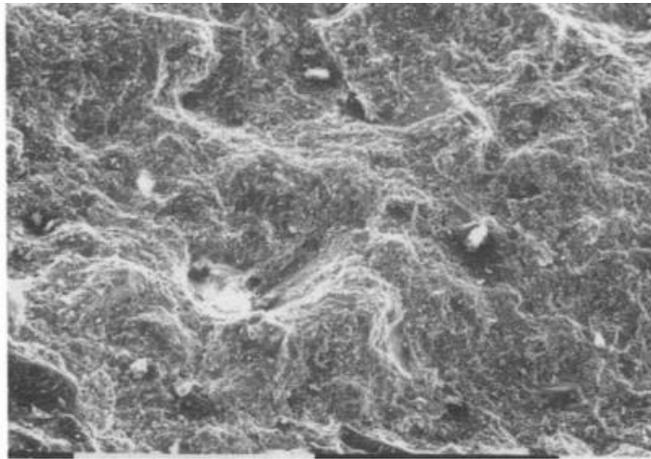


Figure 1.8: Bonne développement des grains dans la pâte [26]

1.8 Les facteurs influents sur les propriétés du béton de sable

1.8.1 Impact du sable

Melais et al. [15] ont indiqué qu'il y a une hausse de taux des fines avec un contenu croissant en éléments grossiers améliore l'ouvrabilité du béton. A ce contexte Bédérina et al. [21] ont révélé que l'existence d'une concentration optimale de filler pour chaque type de sable. Cette constatation provient aussi sur la densité. Aux limites granulaires égales (pour RS et RDS), le sable présentant la meilleure répartition granulaire sur la partie fine (RDS) produit un béton plus résistant (figure 1.9).

BÉTON DE SABLE

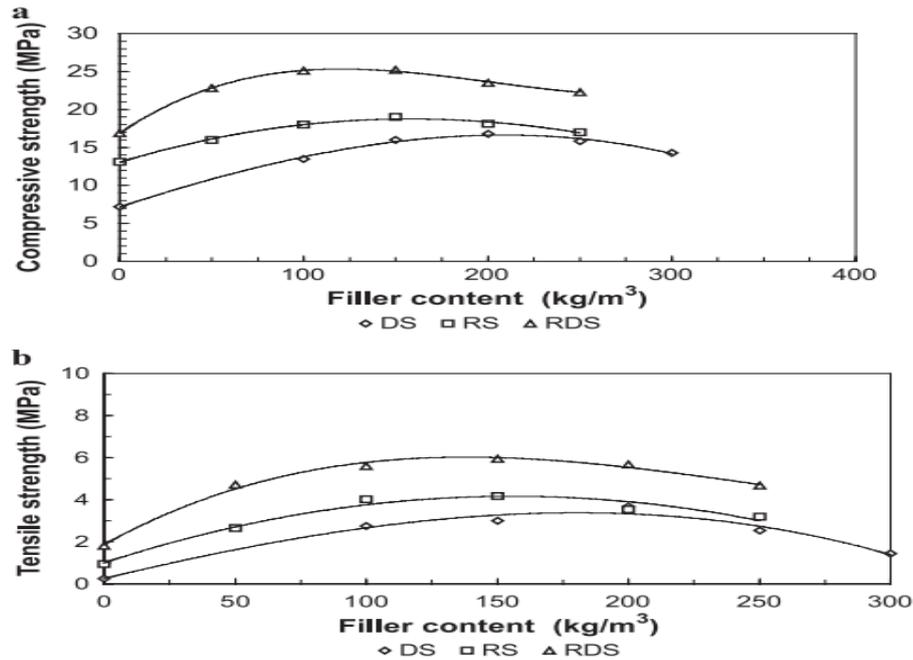


Figure 1.9: Evolution de la résistance à la compression (a) et la résistance à la traction (b) selon le type du sable [20]

Cheng, Shui et al [22] ont remplacé le sable d'oued par de sable corallien allant de 0 à 685 kg/m³ comme un agrégat fin, Ils ont rapporté que le béton de sable corallien présente une absorption capillaire, un retrait de séchage et une seuil de carbonatation plus importants.

1.8.2 Impact des fillers

Jiang et al. [23] confirme que le béton de sable de laitier granulé (GGBS) Contient une grande quantité de produits d'hydratation et une porosité réduite que celui avec les cendres volantes (FA). D'après la figure 1.10 (c et d), il est clair que le GGBS a un effet plus important sur la résistance microstructurale que l'FA. Un degré d'hydratation plus élevé obtenu dans les spécimens avec le GGBS est enregistré dans les observations SEM, ce qui pourrait être le résultat de l'activité pouzzolannique plus élevée du GGBS. Le béton de sable à base du filler FA est moins compact et révèle un nombre important de tablettes de portlandite recouvertes. Au contraire, la matrice est plus compacte dans le cas du béton de sable avec le GGBS, surtout à un âge avancé, et présente des tablettes et des cristaux relativement ordonnés. La résistance mécanique du béton est liée à sa densité et est également influencée par la structure et la nature des produits d'hydratation.

BÉTON DE SABLE

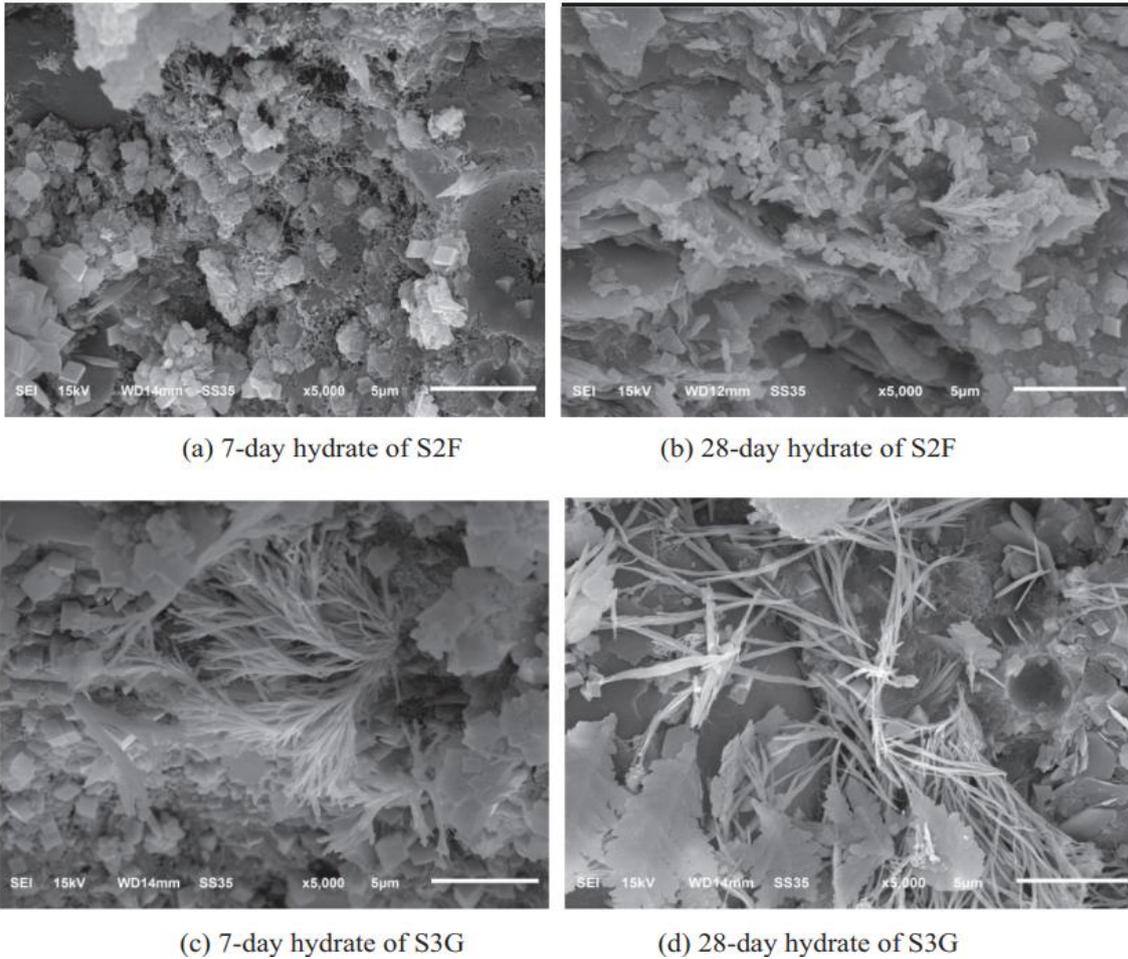


Figure 1.10: Variation du MEB de béton de sable en fonction de l'âge de durcissement [22]

1.8.3 Impact de milieu de conservation

Djoughri et al. [24] ont déposé des échantillons en béton de sable à l'air libre, dans l'eau potable et dans l'eau souterraine. Ils ont observé que l'eau potable, donne de bonnes propriétés physico-mécaniques par rapport à l'air libre et à l'eau souterraine.

L'étude expérimentale faite par Mani et al. [25] ont prouvé que le béton de sable de dune saharien présente une résistance élevée lorsqu'il est utilisé dans les conditions ambiantes agressives du Sahara. La figure 1.11 montre que le béton avec 100 % de sable naturel d'Oued El-Ratm (NSR) présente une résistance à la flexion élevée. Aussi il y a une amélioration significative de 30,20 % pour le mélange contient (40 % de sable de Guemar et 60 % de sable de NSR) par rapport au béton de 100% de sable dune de Guemar.

BÉTON DE SABLE

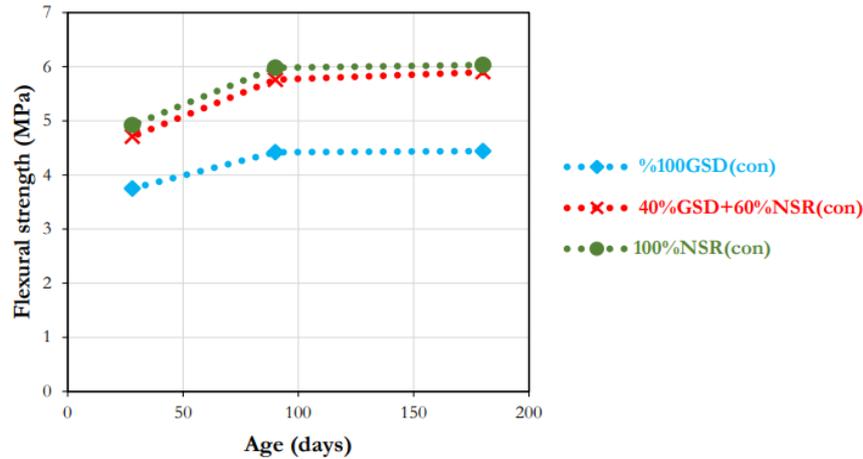


Figure 1.11: Effet de l'eau agressive sur la résistance à la flexion de béton en fonction de l'âge de béton [28]

1.8.4 Impact des fibres

L'un des défauts de béton de sable est sa tendance au retrait, généralement plus élevé que celui des bétons de ciment Portland classiques [6]. En outre, une fois que des fissures apparaissent en raison du retrait ou des charges des poids lourds, elles ont tendance à se propager rapidement. Une solution possible à ce problème est l'utilisation de fibres qui, une fois intégrées dans la composition de béton, elles sont intégrés pour minimiser le retrait du béton de sable et améliorer ses propriétés mécaniques [26].

Bouziani et al. [27] ont ajouté 0,5 % de fibres de polypropylène (PF) et les résultats indiquent que cette incorporation augmente la viscosité et réduire le retrait du béton de sable moullé.

La figure 1.12 illustre l'évolution du retrait libre avec le temps. Pour le mélange M1 (sans fibres) a présenté un retrait libre de 720 $\mu\text{m}/\text{m}$ après 180 jours. Il s'agit d'une valeur relativement élevée par rapport à celle atteinte par le béton de ciment portland (PCC) conventionnel. En fait, la valeur de retrait libre à 180 jours diminue à mesure que la teneur en fibres augmente. Par exemple, le mélange F3 (10,5 kg de fibres) a atteint une contrainte de retrait libre à 180 jours de 482 $\mu\text{m}/\text{m}$, ce qui représente une diminution d'environ 33 % par rapport au mélange M1.

BÉTON DE SABLE

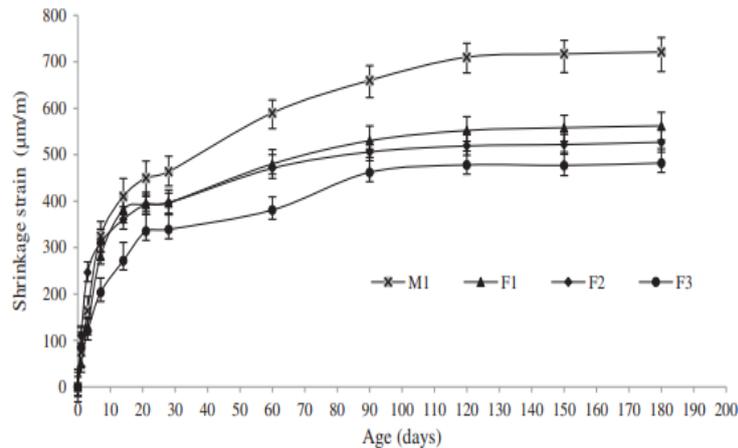


Figure 1.12: Changements dans la déformation due au retrait libre avec le temps [36]

1.9 Avantage du béton de sable

Les caractéristiques que le béton de sable est en mesure d'offrir sont les suivantes :

- Ouvrabilité : le béton de sable est plus maniable, ce qui facilite sa mise en œuvre, réduit l'énergie nécessaire pour sa mise en œuvre.
- Adhésion et faible ségrégation : la stabilité dimensionnelle des grains dans le béton de sable offre une bonne compacité avec une ségrégation réduite.
- Légèreté : fait le béton de sable particulièrement pratique pour la réhabilitation des structures anciennes et pour remplir les nouvelles structures.
- Faible granularité : cette propriété est recherchée dans les travaux d'injection et de bétonnage d'environnements à haute résistance.
- Apparence : le béton de sable peut être utilisé pour créer des aspects esthétiques, notamment en modifiant son apparence esthétique [28].

1.10 Restriction au béton de sable

Le béton de sable n'est pas une alternative du béton ordinaire soit pour des problèmes économiques ou techniques [29].

➤ En terme économique, il est reconnu que l'incorporation d'additifs peut considérablement améliorer la résistance du béton de sable. Cependant, l'utilisation accrue d'additifs ou une augmentation du dosage en ciment entraîne une élévation des prix. Si le béton de sable n'offre pas d'avantages significatifs dans l'application prévue, il est donc superflu de rechercher des performances supérieures. La stratégie à suivre d'un sujet local, en particulier de

BÉTON DE SABLE

la présence d'agrégats et de leur usage envisagé. Dans notre pays, les déchets de concassage des carrières peuvent être utilisés comme matériaux de remplissage, en parallèle avec les matériaux naturels trouvés dans certaines régions, particulièrement dans le sud du pays [12].

➤ En terme technique, le retrait, le fluage et la durabilité du bétons de sable sont des paramètres pas bien comprises. Cette insuffisance d'informations pourrait restreindre son emploi dans des structures soumises à des charges lourds ou à la précontrainte [28].

1.11 Applications du béton de sable

Le béton de sable est utilisé pour les travaux subaquatiques et les interventions de reprise en sous-œuvre [30]. Gadri et Guettala [16] ont élaboré un béton de sable et ont cherché à améliorer ses performances pour obtenir un matériau de réparation cimentaire offrant une meilleure adhérence au support (substrat) et une capacité d'adaptation satisfaisante.

D'autres part Khay et al. [18] ont révélé que le béton de sable compacté représente une solution économiquement compétitive. En effet, une comparaison initiale des coûts montre que le coût par mètre carré d'une structure de chaussée en béton de sable compacté est légèrement inférieur à celui d'une chaussée souple classique. Khay et al. [31] ont confirmé que le béton de sable est valable pour la construction des routes. Ainsi, son utilisation comme matériau de base pour les chaussées Khay et al [23] ont démontré que ce béton de sable est valable pour les constructions de routes. Kettab et al [32] ont proposé une conception optimale du mélange et d'autres tests ont été menés pour découvrir les principales propriétés du béton de sable de dune pour les routes d'aéroport.

Sall et Tkachenko [33] sont parmi les chercheurs qui qui confirmé l'utilisation du béton de sable dans les chaussées des pays chauds et secs.

1.12 Catégories de béton de sable

1.12.1 Béton de sable autoplaçant

Belmokretar et al. [34] ont préparé un béton de sable autoplaçant (BSAP) pour la réparation des substrats en béton ordinaire (BO), en appliquant deux méthodes de préparation de surface : traitement avec un agent adhésif (AA) et création de rugosité par sablage (SB). Les résultats montrent que ce béton de sable (BSAP) offre des hautes qualités pour utiliser ce matériau pour la réparation cimentaire. Ainsi Tayeb et al. [21] ont préparé un béton de sable autoplaçant (BSA) en adaptant la teneur en marbre en poudre (MP). Les données révèlent que la teneur élevée de MP dans les SCSC, de 150 kg/m³ à 350 kg/m³, améliore les propriétés à l'état frais du béton

BÉTON DE SABLE

en réduisant le temps d'écoulement à travers l'entonnoir en V (de 5 s à 1,5 s) et en augmentant l'affaissement du mini-cône (de 28 cm à 34 cm). L'utilisation de 250 kg/m³ de MP permet d'atteindre la viscosité initiale la plus élevée tout en conservant une bonne fluidité à des vitesses de rotation élevées, par rapport aux teneurs en MP de 150 kg/m³ et 350 kg/m³.

1.12.2 Béton de sable léger

Bederina et al [35] ont affirmé que l'ajout de copeaux de bois améliore la résistance du béton léger, tout en ayant un impact minimal sur la conductivité thermique. De plus, le retrait du béton a été nettement réduit.

1.12.3 Béton de sable fibré

La recherche expérimentale réalisée par Ben Othman et al. [26] ont étudié le béton de sable fibré au polypropylène, un béton mince utilisant uniquement du sable en tant que granulat. Leur constatation indique les fibres de polypropylène réduisent légèrement les propriétés mécaniques du matériau mais améliorent considérablement son comportement au retrait ainsi que sa ténacité et donc sa ductilité. Une recherche expérimentale réalisée par Hadjoudja et al. [36], montre que l'amélioration du taux de fibres, du teneur en eau et leur proportion peut minimiser le retrait et empêche les fissures en particulier pour le béton de sable de dune.

1.12.4 Béton de sable à haut performance (BHP)

Il est constitué de granulat d'un diamètre maximal atteint 5 mm, une résistance mécanique et une durabilité élevée. Benamara et al. [37] ont examiné la composition, les propriétés et la résistance à long terme dans un environnement sulfaté du béton de sable à haute performance (BHP) conçu à partir de matériaux locaux.

Hadji [38] ont développé un modèle mathématique pour étudier l'influence des ajouts minéraux sur les propriétés physico-mécaniques du béton de sable à haut performance (BHP). Des réponses apportées ont prouvé que la modélisation par un plan d'expérience améliore la connaissance des interactions entre les différents facteurs des mélanges étudiés. Ainsi, l'ajout de ces additifs conduit à une croissance significative des résistances mécaniques en comparaison avec le béton de sable témoin. Ces conclusions permettent d'améliorer la formulation des BSHP.

1.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons principalement focalisé notre attention sur l'histoire, aussi Nous avons examiné les constituants, les performances physico-mécaniques du béton de sable, et

BÉTON DE SABLE

certaines critères de sa durabilité. Les paramètres affectant les caractéristiques du béton de sable ont été discutés. Enfin, nous avons exploré les avantages et les défis associés à l'utilisation de ce matériau, en décrivant ses différentes variantes et domaines d'application.

Chapitre 2

VALORISATION DES DÉCHETS MINÉRAUX ET VÉGÉTAUX

2 CHAPITRE 2 : VALORISATION DES DECHETS MINERAUX ET VEGETAUX

2.1 Introduction

Le développement dans le domaine industriel, la croissance démographique et les conséquences de catastrophes naturelles (tremblements de terre, inondations, etc.) entraînent une production massive de déchets minéraux, Il est donc impératif de recycler ces déchets, qui peuvent être valorisés en tant que granulats de taille grossière et/ou fine dans les matériaux cimentaires. Cette approche est vue comme une solution fiable pour promouvoir un équilibre harmonieux entre l'exploitation des ressources naturelles et la conservation de l'environnement.

Récemment, il y a eu un intérêt croissant pour l'incorporation de déchets végétaux, notamment ceux provenant des palmiers dattiers dans le béton, une évolution vu leurs quantités croissantes au fur et à mesure des opérations d'entretien annuelles de palmiers dattiers.

Ce chapitre présente les statistiques menées sur les déchets de démolition et de construction (DCD) ainsi les déchets végétaux à travers le monde. Il examine également la méthode de valorisation de ces résidus, tout en faisant un résumé des études précédentes sur ce sujet.

2.2 Les déchets minéraux

250 millions de tonnes de déchets minéraux sont produit en 2012. Dans le cadre du développement durable, la directive européenne 2008/98/CE nécessite le recyclage des déchets issus de travaux de bâtiments pour couvrir au moins 70% du volume global des résidus avant 2020 [39].

2.2.1 Déchets de construction et de démolition (DCD)

La figure 2.1 montre le volume des déchets produits dans le monde en 2018. En 2016, la Chine a été le principal producteur mondial de déchets, totalisant environ 2 360 millions de tonnes, suivie par les États-Unis et l'Inde avec environ. L'Union européenne a également joué un rôle significatif dans la production de déchets d'équipements électriques et électroniques, la France et l'Allemagne se démarquant en tant que principaux contributeurs avec respectivement 240 et 225 millions de tonnes [40].

VALORISATION DES DÉCHETS MINÉRAUX ET VÉGÉTAUX

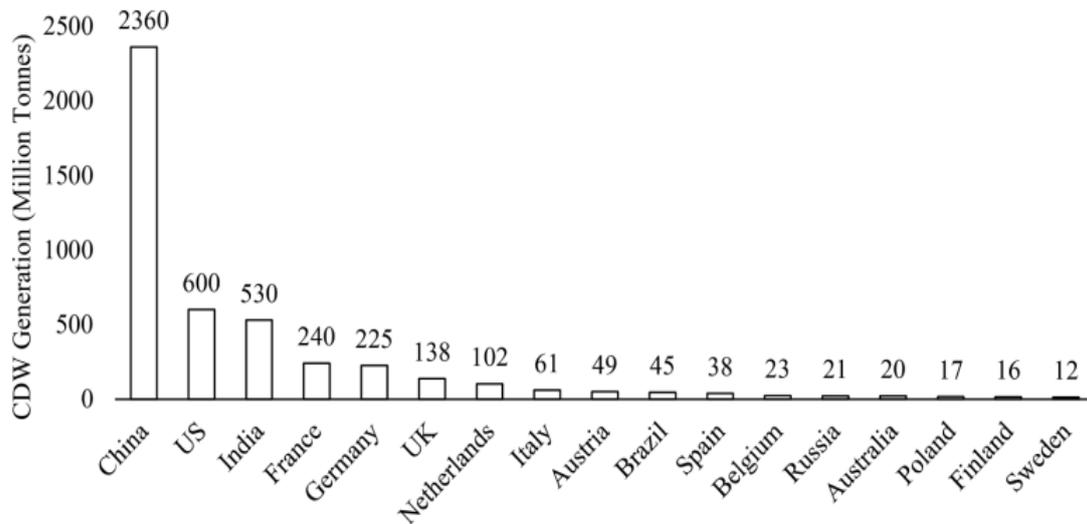


Figure 2.1: Volume total des déchets de construction et de démolition dans le monde [56]

D'après Oikonomou [41], l'impact des DCD sur l'environnement est le suivant : prélever 50 % des matières premières dans la nature, consommer 40 % de l'énergie totale et créer 50% des déchets totaux; la construction est devenue l'industrie ayant le plus grand impact sur l'environnement [42].

Aujourd'hui, la réduction des déchets industriels considérée comme une priorité environnementale dans le monde. Notamment à cause de la pénurie de décharges, fait que l'utilisation des déchets comme une alternative à leur élimination est devenue une solution prometteuse. Des recherches actuelles affirment que l'utilisation des DCD, composé de ciment et de briques recyclés pour produire du nouveau béton et du mortier. Cette méthode présente un double avantage écologique et économique grâce à leur valorisation [1].

2.3 Valorisation des déchets du béton

Le béton est très utilisé dans la construction en raison de son faible coût, sa polyvalence et sa capacité à être adapté à différentes formes et application [43], [42]. Il s'agit d'un matériau composite préparé à partir d'une certaine proportion de matériaux cimentaires, d'eau, de granulats et d'adjuvants [44]. Les nations en développement, incluant la Chine et l'Inde parmi les dix principaux, représentent les plus importants consommateurs de béton [43], [44].

L'utilisation généralisée du béton a entraîné plusieurs problématiques, en particulier l'exploitation exagérée des matériaux locaux et le stockage massif des DCD a conduit à une pénurie d'espaces pour les décharges [45].

Aujourd'hui, plusieurs chercheurs ont pris un nombre croissant d'efforts se concentre sur la durabilité du béton, le béton à granulats recyclés (BGR) est particulièrement étudié comme une méthode de recyclage du béton [46].

2.4 Exploration du béton recyclé dans la littérature

Ces dernières années, la recherche sur le béton recyclé a connu une croissance significative, avec l'utilisation de l'analyse documentaire pour synthétiser et regrouper la littérature antérieure en un ensemble cohérent [47].

La distribution temporelle des publications sur le béton recyclé est résumée et présentée dans la figure 2.2. La première référence documentée sur le béton recyclé remonte à 1978. La figure 2.3 montre que le nombre de publications par an sur ce sujet est passé de 1 en 1978 à 463 à la fin de 2019. Elle donne aussi un aperçu de l'évolution de l'intérêt pour le béton recyclé. Cette figure peut être divisée en trois périodes : (1) phase initiale de 1978 à 1999 [inférieur à neuf publication par an] ; (2) phase de croissance lente de 2000 à 2005 [entre 7 et 16 publications par an] ; et (3) phase de croissance rapide [entre 25 et 463 publications par an]. Le nombre de publications a connu une croissance exponentielle au cours de la troisième phase. Comme le suggèrent [48], le nombre de publications est un indicateur du niveau d'intérêt pour un sujet. L'augmentation du nombre de publications sur le béton recyclé depuis 2001 pourrait être associée à la signature du Protocole de Kyoto en 1998, en lien avec les stratégies visant à combattre le changement climatique. Par ailleurs, le nombre cumulé de publications est passé de 1 en 1978 à 2 462 fin 2019 [49].

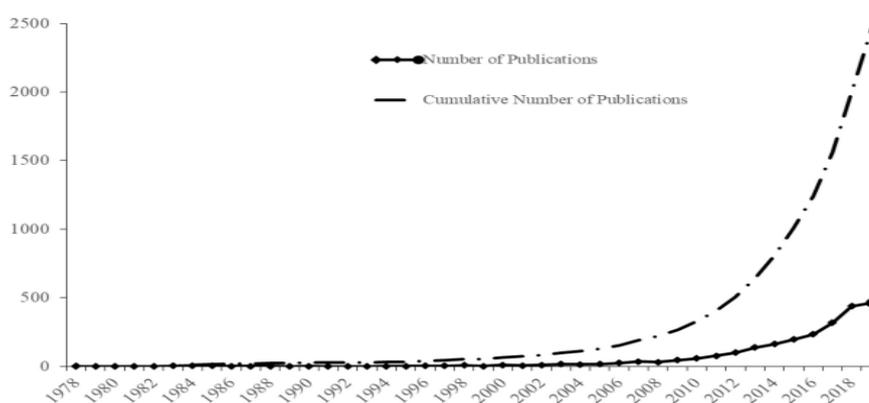


Figure 2.2: Nombre de publications et nombre cumulé de publication annuelles sur le béton recyclé [76]

2.5 Les bénéfices de la réutilisation de granulats de béton recyclé dans le béton

La fabrication de ciment pourrait atteindre 4,83 milliards de tonnes d'ici 2030 dans le monde. Cela pourrait permettre la production d'un grand volume de béton, ce qui exige une augmentation progressive des ressources telles que les pierres naturelles en tant que granulats naturels (GN), puisqu'elles représentent normalement 60 à 75 % du volume total de béton [40]. Environ 48,3 milliards de tonnes de GN ont été consommées dans le monde et la croissance quinquennale a été estimée à plus de 5 % (tableau 2.1). On prévoit que la demande de GN doublera au cours des deux ou trois prochaines décennies, au rythme de la croissance actuelle.

Tableau 2.1: consommation mondiale de granulats dans le domaine de construction (en milliard de tonnes) [56]

	Année			Croissance annuelle (%)	
	2005	2010	2015	2005-2010	2010-2015
Amérique du Nord	3,3	3,0	3,7	-1,7	4,3
Europe de l'Est	2,9	2,6	3,1	-2,1	3,0
Asie/Pacifique	16,0	24,8	32,6	9,1	5,7
Autre	5,1	7,1	8,9	6,6	5,0
à l'échelle mondiale	27,3	37,4	48,3	6,5	5,2

Buck [50] rappelle que l'exploitation de GBR a commencé après la seconde Guerre mondiale, quand il y a eu une démolition intensive de bâtiments et de routes était excessive et qu'il fallait à la fois se débarrasser des déchets et reconstruire l'Europe. Après la nécessité immédiate de recycler le béton, l'utilisation du GBR a diminué.

2.6 Présentation de granulats de béton recyclé

Le granulats recyclés (GR) est un matériau composite dont la texture est rugueuse et poreuse, composé de quelques impuretés, de mortier durci, de pierres non liées et d'agrégats vierges avec du mortier adhérent maintenu par une faible liaison, le GR est un matériau biphasé composé de mortier résiduel et d'agrégats vierges d'origine. Dans certaines circonstances, le GR est constitué d'une quantité raisonnable de granulats naturel GN avec un nombre excessif de contaminants qui doivent être retirés [51].

Le granulats de béton (BGR) se compose de 3 zones de transition interfaciale [42] :

VALORISATION DES DÉCHETS MINÉRAUX ET VÉGÉTAUX

1. ZTI entre la matrice GN et l'ancienne matrice cimentaire (ancienne ZIT),
2. ZTI entre la GN et la nouvelle matrice de ciment (nouvelle ZTI),
3. ZTI entre la nouvelle et l'ancienne matrice de ciment (nouvelle ZTI)

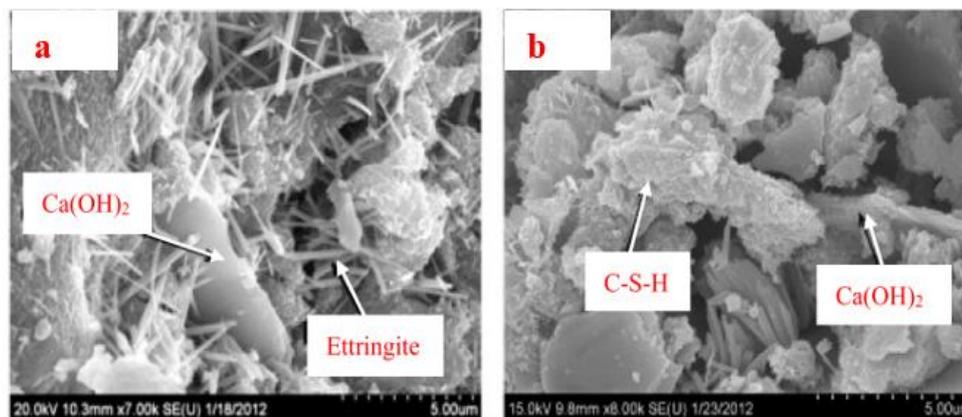


Figure 2.3: Zone d'interface de BGR ; a : (ancienne ZIT) / b : (nouvelle ZTI) [81]

Ces trois ZTI semblent avoir des propriétés qui affectent le BGR de diverses façons. La forte perméabilité et fissures dans l'ancienne zone de transition interfaciale (ZTI) augmentent la demande en eau et diminuent la quantité d'eau disponible dans la nouvelle ZTI. Cela est dû à l'absorption d'eau par la matrice cimentaire du béton à granulats recyclés (BGR), ce qui peut compromettre le processus d'hydratation. Cependant, l'eau absorbée peut accélérer le processus d'hydratation tardive en réduisant l'auto-séchage de la nouvelle matrice de ciment, densifiant ainsi les ZTI [52]. Les GR sont classés en trois catégories comme indiqué dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2: Classe de granulats recyclés [80]

La classe	Origine (circonstances normales)	Teneur en brique (en poids %)
Granulats recyclés (I)	Maçonnerie	0 - 100
Granulats recyclés (II)	Béton	1 - 10
Granulats recyclés (III)	Béton et brique	1 - 50

Comme montré dans la figure 2.4, la pâte de ciment augmente l'absorption du GBR par rapport aux granulats naturels, modifiant ainsi ses propriétés. Les GBR se classent en trois catégories :

- Les fines recyclées : fines avec une granulométrie allant de 0 à 500 μm ;

- Les sables recyclés : généralement de taille 0/4 mm ;
- Les gravillons recyclés : généralement de taille supérieure à 4 mm. [53].

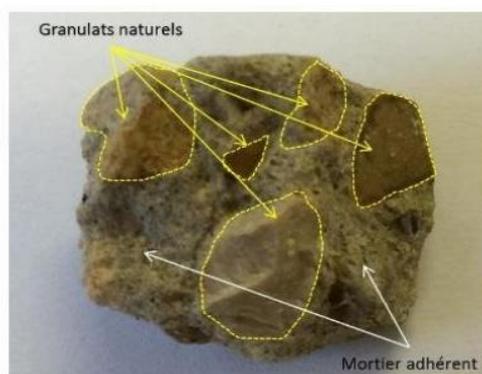


Figure 2.4: Granulat de béton recyclé [83]

2.7 Propriétés physiques de granulats de béton recyclé (GBR)

2.7.1 Absorption d'eau

L'absorption d'eau des granulats est un élément essentiel pouvant impacter les propriétés des matériaux où ils sont intégrés, et elle est influencée par structure poreuse du mortier résiduel. Les études révèlent qu'une plus grande proportion de mortier primaire est liée à une augmentation de l'absorption d'eau, comme le montre la Figure 2.5 [53]. Les GBR ont A_b élevé par rapport aux GN, la plupart des GN ayant une absorption inférieure à 1,5. Les différences observées dans la capacité d'absorption d'eau entre les diverses recherches est expliquée par les différents teneurs en pâte du ciment attachée aux GR. Ainsi la présence d'autres matériaux tels que des briques d'argile et des tuiles concassées, caractérisés par une absorption d'eau élevée [54].

Les résultats de différentes études Verian et al. [55] ont signalé que le degré d'absorption des agrégats recyclés (GR) est compris entre 3 et 10%. Cependant, les granulats naturels (GN) ont un degré d'absorption allant de 1 à 5%.

Lorsque A_b est uniforme entre les différentes particules, il est peu probable que ces valeurs posent des problèmes dans la majorité des bétons, à condition que les valeurs moyennes soient bien établies et prises en compte lors de la conception et du dosage du mélange [56].

La capacité d'absorption d'eau plus élevée des agrégats recyclés (GBR) s'explique par leur nature poreuse, qui favorise une absorption accrue d'eau à travers les pores [57].

La capacité d'absorption d'eau GBR est 23 à trois fois plus élevée par rapport aux GN, allant jusqu'à 12 % pour les GBR grossiers et les granulats fins [58]. Poon, Shui et al [59] dans leur étude mentionnent qu'elle peut varier jusqu'à 15 %. La capacité d'absorption d'eau du GBR est plus importante pour les particules de taille réduite; à mesure que la teneur en mortier augmente, la finesse s'améliore aussi [60].

Conformément aux recommandation d'un comité international, le GBR grossier ayant une capacité d'absorption d'eau supérieure à 7 % et un agrégat fin supérieur à 13% n'est pas souhaitable pour l'usage en béton [61].

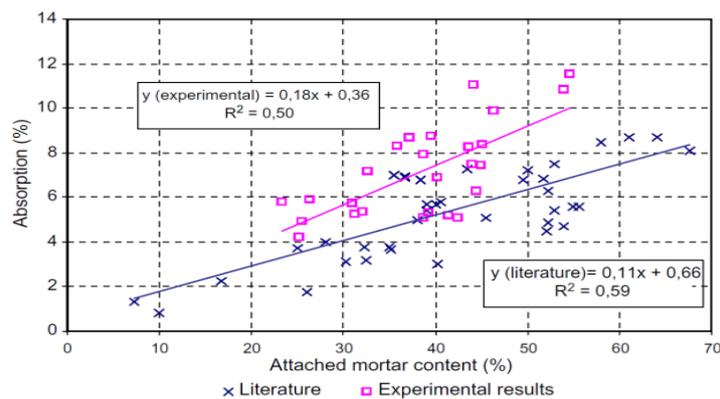


Figure 2.5: Absorption de granulat de béton recyclé [70]

2.7.2 La masse volumique (Densité)

Conformément aux travaux antérieurs, la densité du GBR est inférieure à celle du GN [54]. Beaucoup de recherches ont démontré une relation entre la quantité de mortier résiduelle et la densité (figure 2.6). Une élévation proportionnelle de mortier collé qui entraîne une baisse de la densité. D'après les connaissances acquises, les GR ont généralement une masse volumique comprise entre 2400 et 2500 kg/m³, tandis que celle des granulats naturels est d'environ 2750 kg/m³ [53].

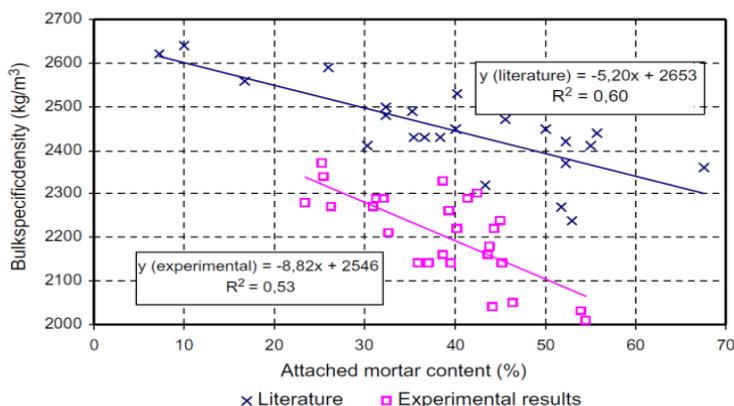


Figure 2.6: Densité de granulats de béton recyclé [70]

2.8 L'influence du GBR sur les caractéristiques du béton

2.8.1 L'effet sur la maniabilité

Les résultats obtenus par Topcu et Şengel [62] ont révélé qu'il y a une croissance significative avec l'élévation de la teneur en granulats de béton recyclé (WCAs). Cette chute a été remarquée aussi bien pour le béton naturel que pour celui contenant 100 % de WCAs, s'est élevée à environ 15 à 20 %. Cette réduction est due à l'absorption d'eau plus élevée du mortier des WCAs. Les corrélations entre le volume unitaire des WCAs et les niveaux d'affaissement (figure 2.7).

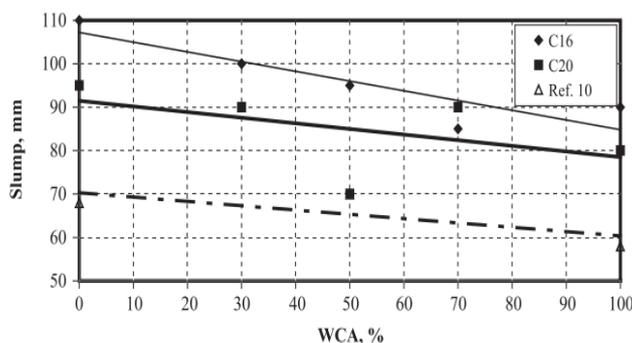


Figure 2.7: Variation de l'affaissement en fonction de la teneur en WCA [91]

Poon et al. [59] présentent la progression de l'affaissement du béton au cours du temps (figure 2.8). Concernant les mélanges préparés avec uniquement du granit concassé comme granulats grossiers, les valeurs initiales d'affaissement des trois mélanges étaient d'environ 100 -110 mm (Figure 2.8. a).

Les figures 2.8 b et 2.8 affirment que les gros granulats ont été utilisés après un traitement à l'humidité contrôlée en étuve (OD), l'affaissement initial des mélanges atteignait 120 mm pour

un remplacement de 20 % et 130 mm pour un remplacement de 50 %, Toutefois les résultats d'affaissement initiales des mélanges préparés avec les granulats aux états d'humidité contrôlé à l'air (AD) et à la surface séchée superficiellement saturé (SSD).

Pour les mélanges dont tous les agrégats grossiers ont été remplacés par le granulat recyclé, l'effet de l'état d'humidité du granulat grossier est devenu significatif (Figure 2.8 d).

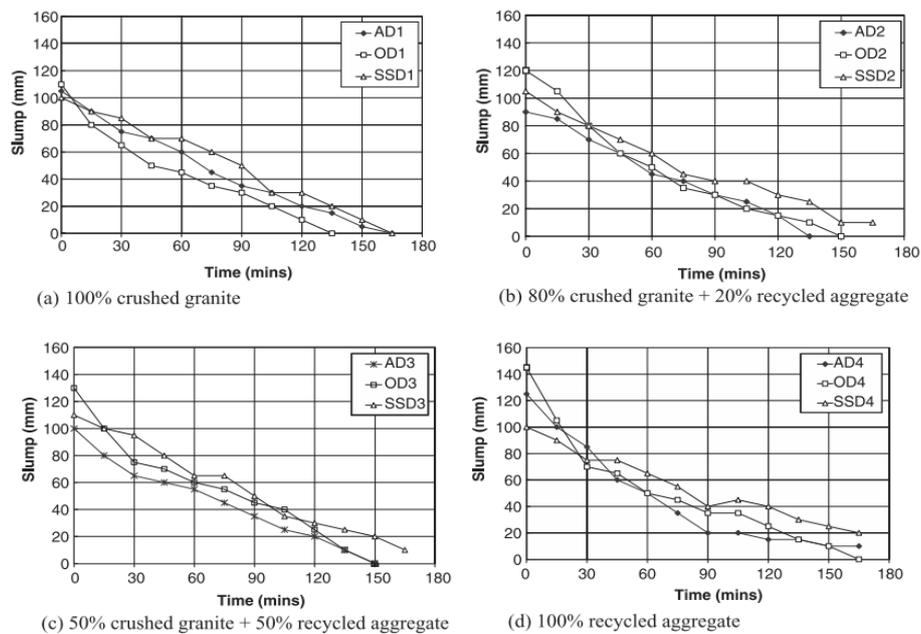


Figure 2.8: Développement de l'affaissement du béton en fonction de différents types de granulats grossiers et de diverses conditions d'humidité [88]

2.8.2 L'effet sur la résistance à la compression

Poon, Shui et al [59] ont signalé que lorsque seul le granit concassé est utilisé à l'état AD et SSD la résistance à la compression est similaire quel que soit l'âge testé. Cependant, la résistance du mélange préparé avec le granulat grossier dans l'état OD est beaucoup plus faible. L'utilisation de granulats recyclés à l'état OD, en remplacement du granit concassé semble avoir un effet positif sur les mélanges préparés, cependant il présente un effet négatif dans le cas où les GBR sont l'état SSD. (Voir le tableau 2.3). Sachant que : l'état séché à l'air (AD), séché au four (OD) et surface séchée superficiellement saturée (SSD).

VALORISATION DES DÉCHETS MINÉRAUX ET VÉGÉTAUX

Tableau 2.3: Résistance à la compression du béton [88]

Mélange	Résistance à la compression (MPa)		
	3 jours	7 jours	28 jours
AD1	25,0	34,9	48,3
OD1	18,2	27,9	40,2
SSD1	25,2	33,1	46,0
AD2	23,3	34,8	44,9
OD2	19,4	29,2	43,2
SSD2	20,4	30,3	43,0
AD3	22,9	32,2	44,7
OD3	21,0	29,2	39,7
SSD3	17,7	27,0	38,1
AD4	24,4	33,9	46,8
OD4	21,7	32,1	43,3
SSD4	17,5	28,5	39,1

Selon les études de Tabsh et Abdelfat [63] illustrés dans la figure 2.19 a et b, deux mélanges de béton avec différentes résistances cibles à 28 jours ont été considérés : (a) Mélange 1 avec une résistance cible au cylindre $f_0 c = 30$ MPa, et (b) Mélange 2 avec une résistance cible au cylindre $f_0 c = 50$ MPa. Ils ont démontré que, si la teneur en granulats grossiers est la même dans les 2 types de mélanges, la chute de la résistance est liée à l'utilisation de granulats recyclés est plus marquée dans les mélanges à structure poreuses comparativement à ceux à structure plus compacte. Bien qu'elle ne soit pas examinée dans cette étude, cette conclusion est évidemment valable si la résistance du granulat grossier recyclé est supérieure à 50 MPa. Comme mentionné précédemment, le béton fabriqué avec des granulats recyclés a nécessité environ 10 % d'eau supplémentaire par rapport au béton fabriqué avec des granulats naturels pour maintenir le même affaissement. Cette teneur en eau accrue a un impact sur la résistance du béton. On suppose que si des adjuvants avaient été utilisés pour améliorer l'ouvrabilité tout en maintenant la même quantité d'eau dans les deux mélanges de béton, le béton recyclé aurait pu atteindre une résistance supérieure que celles remarqués.

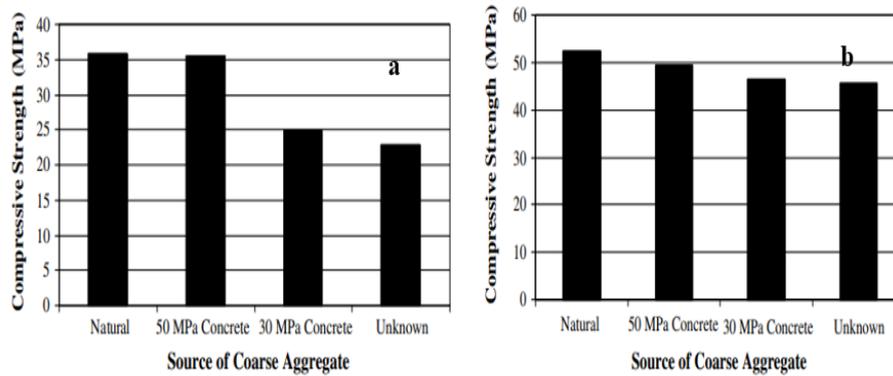


Figure 2.9: Evolution de la résistance à la compression du mélange 1 (a) et du mélange 2 (b) [92]

2.8.3 L'effet sur le retrait

Comme illustré par la figure 2.10, la composition du béton contenant des granulats recyclés (BGR ou RAC) a été mesurée pour avoir un retrait de séchage significativement plus important que le mélange témoin (control) tout au long de l'expérience, avec une augmentation moyenne de 25 % du retrait à 112 jours comparé au béton témoin. le béton à base du sable fin de cendres volantes (FARAC) n'a présenté qu'une augmentation moyenne de 7 % du retrait de séchage à 112 jours par rapport au mélange témoin [64].

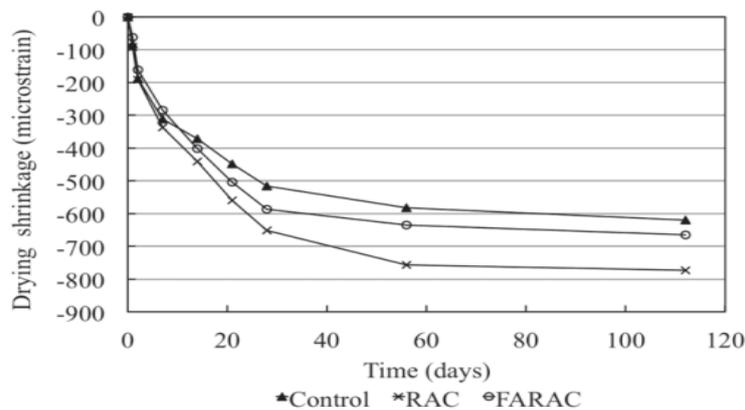


Figure 2.10: Résultats moyens de retrait au séchage [93]

Duan et Poon [65] ont révélé dans la figure 2.11 qu'il y a quatre mélanges de béton comprenant des granulats naturels (NA) et trois types d'agrégats recyclés (RA). Dans chaque série, quatre formulations de béton sont conçues pour obtenir des résistances estimées de 30, 45, 60 et 80 MPa à 28 jours.

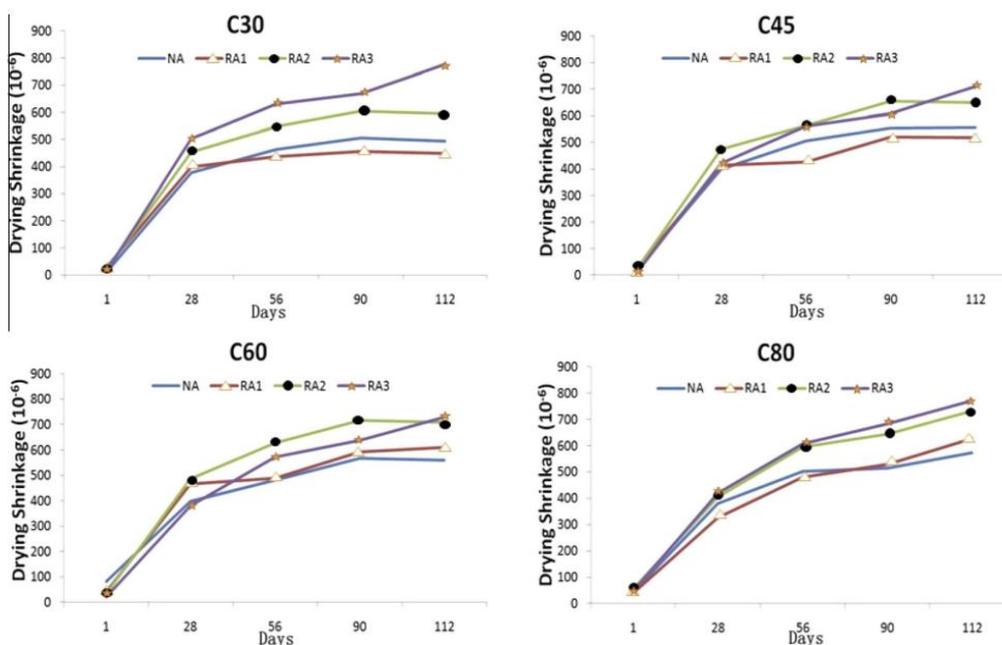


Figure 2.11: Retrait de séchage du béton fabriqué avec différents types de granulats [94]

2.9 L'effet des granulats fins recyclés (fillers) sur les propriétés du béton

2.9.1 L'effet sur la maniabilité

Leite et Monteiro [66] ont signalé que la réduction de la maniabilité du béton recyclé est principalement attribuable à une demande en eau plus élevée nécessaire pour ces mélanges. Cette demande accrue en eau est due à la forme angulaire des particules et leur surface plus rugueuse. En outre, la présence d'une grande quantité de fines contribue au phénomène de ressuage pendant la production du béton. Ainsi autres chercheurs Nedeljković et al. [67] ont constaté que la nature et la forme des granulats fins affectent l'écoulement. Y compris l'effet de l'interaction avec les adjuvants réducteurs d'eau.

D'après le tableau 2.4 on peut constater que le taux des fines élevée affecte l'ouvrabilité du béton. Lorsque le pourcentage de poussière augmente, la ténacité des agrégats augmente et, à son tour, la surface spécifique des particules d'agrégats augmente. Par conséquent, une quantité plus élevée d'eau est nécessaire pour hydrater la surface accrue des particules, ce qui conduit à une réduction de l'ouvrabilité [68].

Tableau 2.4: Résultats de l'essai d'affaissement en fonction du pourcentage des poussières [97]

Contenu de poussière (%)	Affaissement (cm)
0	92

VALORISATION DES DÉCHETS MINÉRAUX ET VÉGÉTAUX

5	87
10	80
15	76
20	72
25	65
30	60

2.9.2 L'effet sur l'absorption par immersion

Une corrélation très forte ($R^2= 0,99$) a été noté une corrélation entre l'absorption d'eau proportion des agrégats fins naturels (GFN) remplacés par des agrégats fins recyclés (GFR). Cette élévation prévue de l'absorption d'eau par immersion est due à la structure plus poreuse des agrégats GFR, entraînant ainsi une augmentation générale des pores ouverts dans la matrice du béton [69].

Dans le même sens ils ont indiqué les résultats moyens obtenus pour l'absorption d'eau par immersion des bétons réalisés avec les granulats fins recyclés (GFR) seul (C100 R) ou l'absorption d'eau par immersion a augmenté de 46% alors que l'augmentation dans la composition (C30 R) où 30% du granulats fins naturels (GFN) est substitués par des GFR était seulement de 16,8% (tableau 2.5).

Tableau 2.5: Absorption totale [99]

	Absorption d'eau			Δ (%)
	μ (%)	σ (%)	c_v (%)	
Rc	11,3	0,11	0,0097	-
C 30 R	13,2	0,22	0,0167	16,8
C 100 R	16,5	0,32	0,0194	46

V - moyenne ; r - écart-type ; Cv - coefficient de variation

2.9.3 L'effet sur le retrait

La figure 2.12 illustre les résultats des variations dimensionnelles pour le mortier témoin (A0) sont nettement moins prononcés que ceux du mortier préparé par des granulats fins de béton recyclé GFR (A20). L'élévation de retrait est due aux agrégats recyclés composés de substances beaucoup plus absorbantes et poreuses que le sable naturel, ce qui conduit à une réduction de la dureté qui excède l'effet chargement [70].

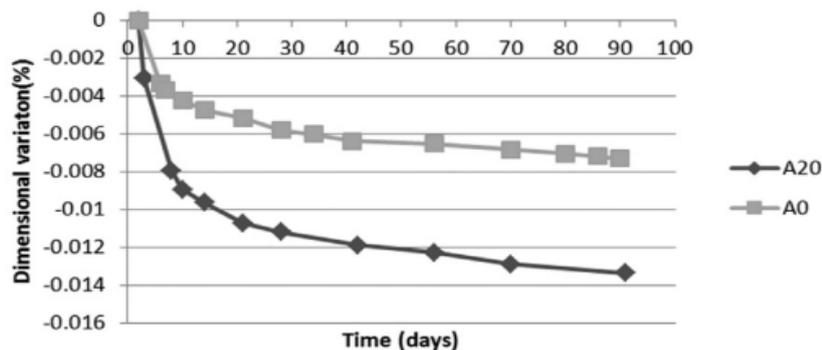


Figure 2.12: Variations de retrait des mortiers [103]

2.10 L'effet des fillers de la brique recyclée sur les propriétés du béton les propriétés du béton

2.10.1 L'effet sur la maniabilité

La poudre des briques recyclées exerce une influence sur L'ouvrabilité du béton montre une variation significative selon le taux de substitution. Comme illustré dans la figure 2.13, une réduction significative des valeurs d'affaissement est observée avec l'élévation de la teneur en poudre (CBP) dans les mélanges. Ces résultats sont probablement liés à la plus grande absorption d'eau du CBP en raison de sa structure poreuse et de sa forme irrégulière qui absorbe plus d'eau. Malgré l'ajout d'une plus grande quantité de SP au mélange contenant 30 % en poids de CBP (MC30), L'affaissement a été diminué à environ 65 % de sa valeur initiale [71].

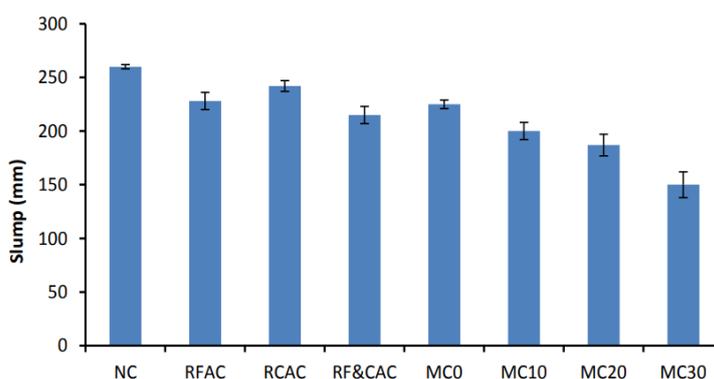


Figure 2.13: Valeurs d'affaissement du béton produit [109]

La figure 2.14 présente l'affaissement des mélanges cimentaires contenant la poudre de brique recyclée (PBR). Elle montre que l'évolution de l'affaissement relatif varie selon les mélanges avec différents niveaux de remplacement de PBR, provenant de diverses études. Cependant, il est clair que l'affaissement du mélange est principalement lié au remplacement et à la finesse

des PBR. [72], Ge et al. [73] ont constaté que pour le béton avec une teneur en PBR de 10 %, l'affaissement était similaire à celui d'un groupe témoin, mais que lorsque le niveau de remplacement était augmenté à 20 % ou 30 %, l'affaissement du mélange chutait brusquement [74].

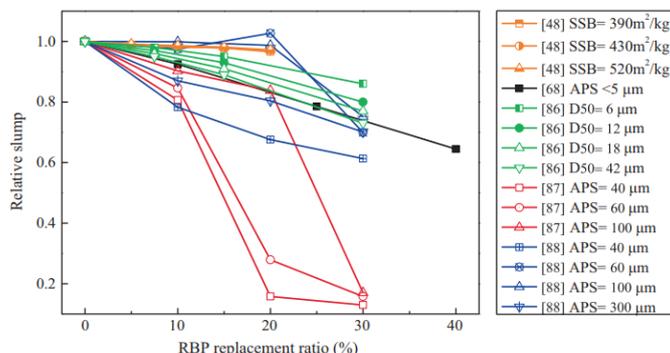


Figure 2.14: Affaissement relatif du mélange de ciment avec RBP [117]

Sharma, Gupta et al [75] affirment, que les mortiers à base de 10 % et 20 % de PBR ont une résistance à la flexion accrue. D'autres part Duan et al. [76] dans la figure 2.15 ont indiqué que le mortier à base de 30% de MBP et CBP présente une résistance à la flexion à 28 jours similaires à celle du mortier témoin.

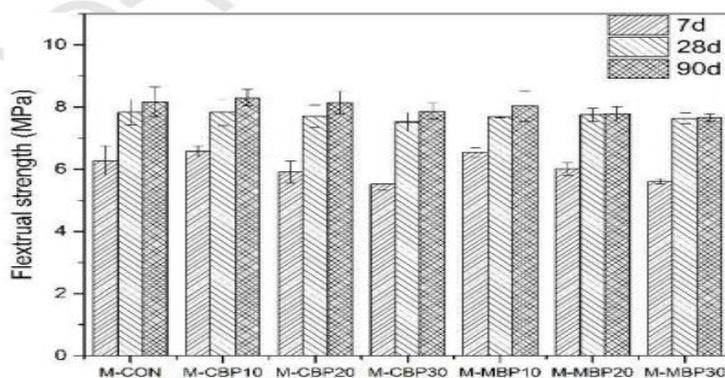


Figure 2.15: Résistance à la flexion du M-CBP et du M-MBP avec différents dosages [123]

Liu [77], Xue et al. [78] ont également abouti à une conclusion similaire : Lorsque le rapport PBR augmente, la résistance à la flexion à 28 jours réduit linéairement.

2.10.2 L'effet sur la sorptivité

La sorptivité diminue davantage lorsque le mortier est enrichi en poudre de brique, surtout pour les mortiers ayant un rapport E/L de 0,5 (voir figure 2.16). En revanche, les mortiers contenant 30 % de poudre de brique absorbent plus d'eau par rapport au mortier témoin (0 % PB). Cette

réduction liée à la faible porosité créée par réaction pouzzolanique, ce qui rend le réseau capillaire plus complexe. Par conséquent, la pénétration de l'eau devient plus lente et plus difficile [1].

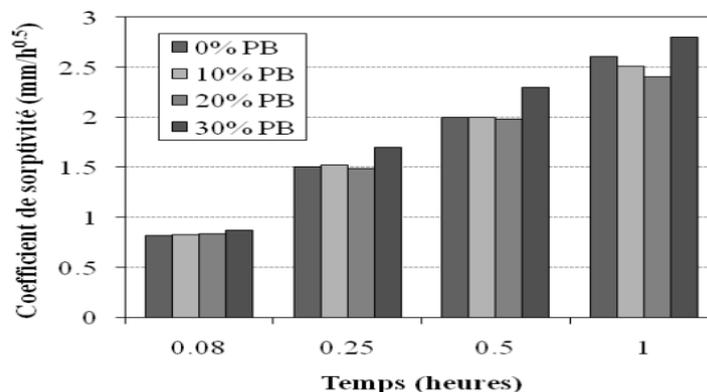


Figure 2.16: Variation du coefficient d'absorption capillaire des différents mortiers à un rapport E/L de 0,5 [2]

Schackow et al. [72] ont étudié l'effet de la poudre de brique sur l'absorption du mortier ; La (figure 2.17) montre que les différences ne sont pas significatives à 10 min mais sont devenues significatives après 90 min, Cela indique que l'incorporation de déchets de briques d'argile (CBW) a graduellement entravé la structure poreuse interconnectée supposée, réduisant ainsi la capacité de circulation des liquides dans la matrice. Ces conclusions révèlent que l'augmentation de la densité du mortier durci est attribuée à l'incorporation de CBW, et cette variation est liée aux différences observées dans la microstructure résultent de l'effet physique et pouzzolanique combiné du CBW.

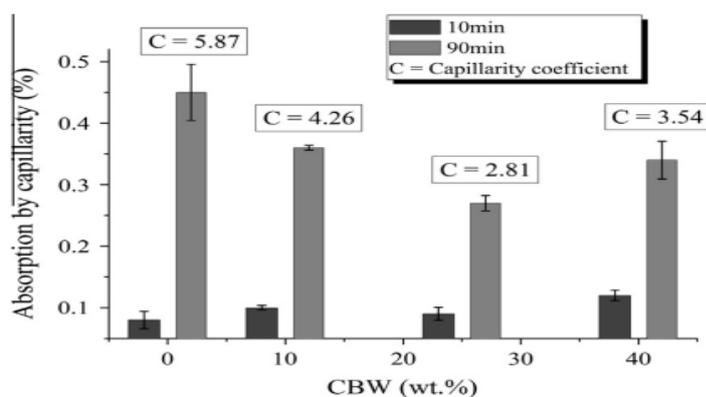


Figure 2.17: Effet de la teneur en CBW sur le coefficient d'absorption d'eau par capillarité des mortiers durcis pendant 90 jours [115]

2.10.3 L'effet sur le retrait

Afin d'évaluer l'impact des briques recyclées sur le retrait des matériaux cimentaires. Ge et al. [73] ont observé une réduction notable de 35,9% de retrait autogène lorsque 10 % du ciment est substitué par des briques recyclées (RBP) (Figure 2.18). Les principales raisons de la réduction du retrait sont résumées ci-dessous. D'une part, la réaction d'hydratation précoce du RBP dans le béton est très faible, de sorte que le remplacement du ciment par du RBP réduit les produits d'hydratation précoce et la formation de petits pores, réduisant ainsi le retrait autogène des matériaux cimentaires. D'autre part, le RBP a un effet de durcissement interne en raison de sa forte absorption d'eau.

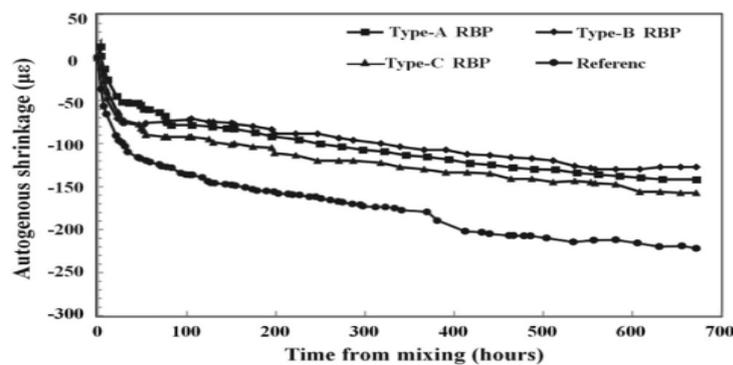


Figure 2.18: Effet du RBP sur le retrait autogène [116]

Nacéri et Hamina [79] ont noté que l'augmentation du taux de retrait des bétons contenant des PBR était vraisemblablement causé par l'absorption élevée d'eau des PBR, ce qui augmente le rythme d'évaporation de l'eau de gâchage (Figure 2.19). En résumé, Le PBR remplit plusieurs fonctions dans les composites [74].

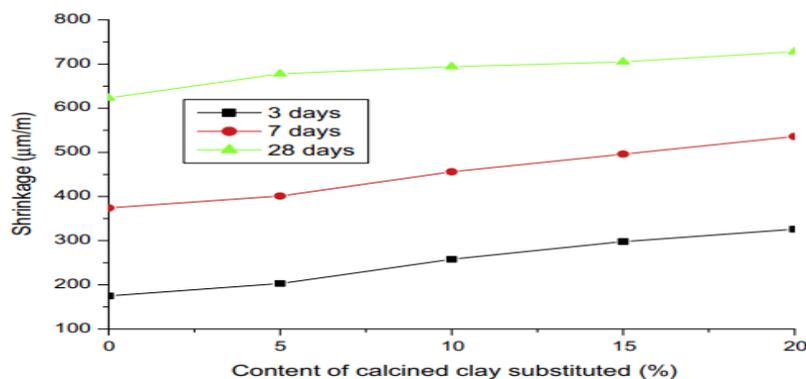


Figure 2.19: Évolution du retrait en relation avec la concentration de déchets de briques [118]

2.11 Les déchets végétaux

Actuellement, les déchets végétaux sont non seulement sous-utilisés, mais ils sont aussi souvent à l'origine de la pollution. En outre, l'expansion de l'agriculture en Algérie a entraîné la production d'énormes quantités de résidus végétaux qui, lorsqu'ils sont laissés sur les terres agricoles, créent d'énormes problèmes environnementaux. La valorisation des déchets est une solution radicale pour réduire l'effet des déchets sur l'environnement.

2.11.1 Les déchets de palmiers dattiers

Une croissance rapide du palmier dattier, sa surface presque doublé entre 2000 et 2020. Le palmier dattier est largement planté pour divers usages. Dans des zones arides et chaudes comme le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord, il est considéré comme la principale source de produits essentiels [80].

Selon Al-Khayri et al. [81], les palmiers dattiers sont exploités à 360 intérêts. Ils sont plantés dans 94 pays avec environ 11,8 millions d'hectares, Essentiellement en Asie (8,18 millions d'hectares), en Afrique (1,66 million d'hectares) et en Amérique du Sud (1,01 million d'hectares) [82]. Par exemple, les palmiers dattiers couvrent 72% de la superficie des cultures permanentes en Arabie Saoudite [83].

Généralement, les déchets de palmiers dattiers résultent de l'élagage effectué saison après saison, peuvent être estimés à une moyenne de 35 kg par arbre [84]. Par conséquent, des quantités considérables de déchets pourraient être générées et déposées dans des décharges, présentant ainsi des dangers pour l'environnement et accroissant les risques d'incendie.

La figure 2.20 présente les différentes composantes d'un palmier. Les fibres, les feuilles, les grappes et les pétioles sont étudiés comme des matériaux de construction potentiels [82].

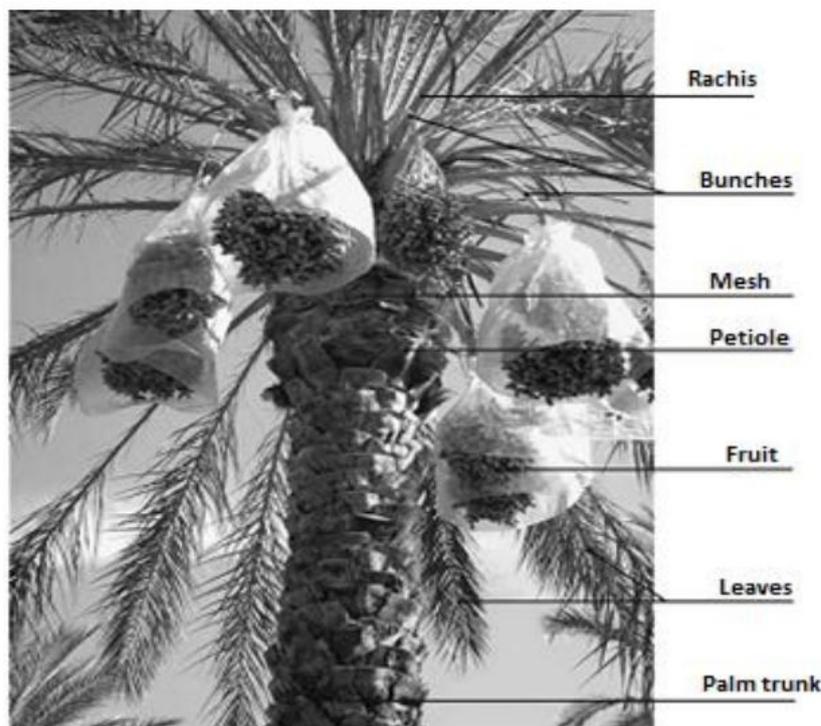


Figure 2.20: Parties aériennes du palmier dattier [133]

2.11.1.1 Les fibres de palmiers dattiers

Les fibres de palmiers dattier (FPD) sont parmi les fibres naturels disponibles, économiques, résistantes et écologiques les plus abondants dans plusieurs pays, ces fibres sont obtenues à partir de grandes quantités de déchets générés par le palmier, souvent éliminées sans être exploitées de manière adéquate. Les FPD présentent l'avantage spécifique d'un rapport résistance/coût plus élevé que les autres fibres naturelles et synthétiques [85]. Un palmier dattier typique est normalement taillé chaque année pour couper les branches et les fibres de l'arbre. À partir d'un seul arbre, entre 10 et 15 branches sont coupées, générant plus de 20 kg de fibres et de feuilles sèches, qui ne sont généralement pas recyclées ou utilisées correctement, Bien que la fibre de palmier dattier (FPD) présente une teneur élevée en cellulose, lignine, hémicellulose et autres composés, en Arabie Saoudite, chaque année, plus de 500 000 tonnes de déchets de palmiers, y compris les fibres, sont générées. et ne sont généralement pas utilisées de manière optimale [86]. Sur ces quantités, environ de 15 000 tonnes de déchets sont issus par les FPD [87].

La fibre de palmier dattier (FPD) a été incorporée dans le mortier et le béton conformément à plusieurs études. D'autres composés améliorés par le DPF comme le gypse et les briques d'argile (Tableau 2.6).

VALORISATION DES DÉCHETS MINÉRAUX ET VÉGÉTAUX

Tableau 2.6 : Revue de la littérature sur l'exploitation des déchets de fibres de palmiers dattiers dans divers matériaux de construction (FPD)

Composites	Ref	Longueurs et pourcentages des (FPD)	Résultats
Mortiers	[90]	(3 mm et 6 mm) (5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 % et 30 % du poids total)	La densité et la conductivité thermique du mortier diminuent avec l'augmentation des teneurs des FPD ; cette diminution est plus prononcée pour les FPD de plus faible taille. De même, la résistance à la compression du mortier diminue avec l'augmentation de la teneur en FPD. À une teneur en FPD de 5 %, une diminution de 92 %, 91,9 % et 95 % pour les FPD de 3 mm, le FPD de 6 mm et leurs combinaisons, respectivement ; cependant, ils ont atteint des résistances acceptables à des concentrations plus faibles des FPD, inférieures ou égales à 15 %, qui peuvent être utilisées pour des applications structurelles et pour améliorer l'isolation thermique.
Mortiers Bétons	[91]	(0 à 51%)	Les FPD réduisent le poids unitaire du composite de ciment, l'ajout de 51 % de FPD entraîne une réduction de 30 % et 39 % des densités à l'état frais et à l'état durci, respectivement. En outre, les FPD augmentent l'absorption d'eau et la porosité du mortier, avec une augmentation de 71 % de la porosité pour une addition de 51 % de FPD. La conductivité thermique du mortier a également diminué avec l'ajout de FPD, avec une diminution de 42 % et 70 % à l'état saturé et à l'état sec, respectivement.

VALORISATION DES DÉCHETS MINÉRAUX ET VÉGÉTAUX

	[92]	0% à 51% par volume	La ductilité du mortier augmente avec l'augmentation de la teneur en FPD; cependant, la résistance à la flexion et la résistance mécanique du mortier diminuent avec l'augmentation de l'ajout de FPD. Une réduction allant jusqu'à 63 % et 81,5 % a été enregistrée pour les résistances à la flexion et à la compression, respectivement, En outre, la conductivité thermique et la diffusivité du mortier diminuent avec l'augmentation de l'ajout de FPD. Pour une addition de 51% de FPD, une réduction de 70% et de 52% a été rapportée pour les conductivités thermique et de diffusion, respectivement.
	[93]	(1%, 3% et 5% par volume) (5mm, 10 mm et 15 mm)	La contrainte et le module de flexion, la résistance et le module de compression augmentent ou diminuent en fonction des combinaisons variables ; ils ont obtenu les résistances à la flexion les plus élevées en utilisant 1 % de fibres d'une longueur de 5 mm, lorsqu'elles ont été traitées avec 3 % de NaOH pendant 8 heures ; cela a montré une augmentation de la contrainte et du module de flexion de 27,5 % et 18,9 %, respectivement, par rapport au mortier de contrôle.
	[94] et [95]	(0 %, 2 %, 4 %, 6 %, 8 % et 10 % en volume)	Les FPD diminuent la densité, la résistance à la flexion et la ténacité à la rupture du mortier. La résistance à la flexion a diminué de 9 %, 17 % et 52 % avec l'ajout de 2 %, 4 % et 10 % de FPD, respectivement ; ils ont attribué la diminution de la résistance à la flexion à la porosité élevée résultant de l'ajout de fibres et au module d'élasticité plus faible de la fibre par rapport au mortier. La ténacité à la rupture a diminué de 7 %, 32 % et 66 % avec l'ajout de 2 %, 6 % et 10 % de FPD, respectivement ; ils ont attribué cette diminution à la mauvaise liaison entre la fibre et la matrice de ciment. En revanche, ils ont constaté une amélioration de la ductilité avec l'ajout de fibres. Il y a eu une augmentation de 27% à 162% avec l'ajout de 2% à 10% de FPD.

VALORISATION DES DÉCHETS MINÉRAUX ET VÉGÉTAUX

Bétons	[96]	(2 % et 3 % par volume) (15 mm et 60 mm)	L'augmentation de la longueur et du pourcentage des fibres améliore la résistance à la compression, Cependant, l'augmentation de la longueur et du pourcentage de fibres a amélioré le comportement ductile du béton. La résistance à la flexion, mesurée en termes de charge-déflexion, diminue également avec l'augmentation du volume de fibres. A 28 jours, la charge de la première fissure pour le béton FPD 3-60% mm était inférieure à celle du béton de contrôle d'environ 65% ; ils ont attribué cette diminution aux propriétés mécaniques médiocres du FPD et à l'adhérence de l'interface fibre-pâte de ciment, et ont recommandé que les FPD doivent être traités avant d'être utilisés dans le béton.
Bétons	[87]	(1 %, 1,5 % et 2 % par volume) (2 cm, 3 cm et 4 cm)	La conductivité thermique augmente avec la longueur de la fibre et diminue avec l'augmentation du volume de la fibre en raison de l'augmentation de la teneur en vides dans la matrice de ciment. Le matériau de béton le plus isolant a été obtenu en utilisant 2 % de FPD avec une longueur de 2 cm, avec une réduction de la conductivité thermique d'environ 40 %. En outre, la capacité thermique spécifique a augmenté tandis que la diffusivité thermique du béton a diminué avec l'augmentation de la teneur en fibres et la diminution du volume de fibres.
	[97]	(0,5, 1, 1,5, 2 et 2,5 % par masse) (5 cm, 6 cm et 7 cm)	Une diminution de l'ouvrabilité et de la résistance à la compression Cependant, ils ont observé une augmentation de la résistance à la compression avec l'ajout de 0,5 % à 5 cm de FPD, qui était supérieure à celle du béton ordinaire. En outre, ils ont signalé une augmentation de la résistance à la flexion avec l'ajout de FPD et l'augmentation de la longueur ; ils ont attribué l'augmentation de la résistance à la flexion au comportement de traction ductile de la fibre.

VALORISATION DES DÉCHETS MINÉRAUX ET VÉGÉTAUX

	[98]	(0,1% et 0,2% par volume) (2 cm et 6 cm)	<p>Les résultats obtenus ont permis de tirer les conclusions suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - L'augmentation de la teneur en fibres réduit la densité du béton de sable en raison de la faible densité des FPD, tout en augmentant son ouvrabilité. - Le coefficient d'absorption élevé des FPD est la cause principale de l'augmentation de l'absorption totale du béton de sable renforcé par des fibres. - L'introduction de fibres de palmier dattier dans le béton de sable génère une porosité supplémentaire à l'interface entre les fibres et le béton. - Les fibres humides (superficiellement sèches) contiennent une quantité d'eau qui ralentit la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques dans le béton de sable. - La résistance à la compression du béton de sable augmente lorsque la longueur des fibres augmente et que la proportion de FPD augmente. Cependant, la résistance à la flexion augmente de manière significative lorsque la proportion de FPD dans le mélange augmente.
Composites de gypse	[99]	0 %, 2 %, 4 %, 6 %, 8 % et 10 %	<p>Une diminution de la maniabilité avec l'augmentation de la teneur en FPD dans le composite. La résistance maximale à la compression a été atteinte avec le composite contenant 4% de FPD, après quoi la résistance diminue avec l'augmentation de la teneur en fibres, ce qu'ils ont attribué à la densité et à la résistance plus faibles des fibres. Le FPD augmente le module de rupture plastique et la résistance à l'impact du composite. La propriété la plus améliorée du composite de gypse avec l'ajout de FPD est sa résistance à l'impact, avec une amélioration d'environ 50 %.</p>

VALORISATION DES DÉCHETS MINÉRAUX ET VÉGÉTAUX

Composites de gypse	[92]	5 %, 10 %, 15 % et 20 % en poids	Leurs conclusions ont montré que la densité du composite diminuait avec l'augmentation de la teneur en FPD, où une réduction allant jusqu'à 44% a été rapportée avec l'ajout de 20% de FPD, ce qui donne au composite l'avantage d'une résistance sismique et un coût de manutention plus faible. En outre, la conductivité thermique, la diffusivité thermique, l'effusivité thermique et la capacité des composites diminuent toutes avec l'augmentation de la teneur en FPD. L'ajout de 20 % de FPD aux composites a entraîné une réduction de 61,5 %, 39,58 %, 50,5 % et 36,22 % de la conductivité thermique, de la diffusivité, de l'effusivité et de la capacité, respectivement. Par conséquent, il est recommandé d'ajouter jusqu'à 20 % de FPD dans les composites de gypse afin d'améliorer les propriétés thermiques pour un bâtiment durable.
	[100]	0%, 1,2%, 3%, 5%, 7%, 8% et 10% en poids.	En ce qui concerne propriétés mécaniques, les résistances à la compression et à la flexion du composite diminuent avec l'augmentation de la quantité de fibres, les composites contenant des FPD de 3 mm montrant des résistances plus élevées que ceux avec des FPD de 6 mm. L'ajout de 1,2 % de FPD a réduit la résistance à la compression des composites à base de 3 mm et 6 mm de 58 % et 45%, respectivement, à 14 jours, et de 15% et 4% à 28 jours, respectivement. L'ajout de 1,2 % de FPD a entraîné une diminution de la résistance à la flexion de 45 % et 31 % pour les composites à base de FPD de 3 mm et de 6 mm- FPD, respectivement, à 14 jours, et de 33 % et 26 %, respectivement, à 28 jours. En termes de propriétés thermiques, l'incorporation de FPD aux composites de gypse réduit leur conductivité thermique des composites, l'ajout de 10 % de FPD a provoqué une réduction de la conductivité thermique de 62 % et 66 % pour les composites 3 mm- FPD et 6 mm- FPD, respectivement.

VALORISATION DES DÉCHETS MINÉRAUX ET VÉGÉTAUX

Briques d'argile	[101]	0 et 3 % en poids	Les caractéristiques thermiques de la brique d'argile ont été observées à s'améliorer proportionnellement à l'accroissement des concentrations de fibres et de sable de dune. Ceci se traduit par une diminution de la capacité thermique spécifique, de la diffusivité et de l'effusivité thermiques, ainsi que de la conductivité thermique. Par exemple, l'introduction de 3 % de FPD a entraîné une baisse de 6 %, 57 % et 6 % de la capacité thermique spécifique, de la conductivité thermique et de la densité, respectivement.
Briques d'argile	[102]	0 à 3 %	Une amélioration des propriétés thermiques, mais ils ont observé une diminution des résistances mécaniques dans les composites avec l'augmentation de l'ajout de FPD.
	[103]	0 %, 1 %, 2 % et 3 % du poids	<p>En termes de conductivité thermique, pour le composite d'argile contenant 30 % de sable, ils ont constaté une réduction de 7,04 %, 18,3 % et 32,4 % pour des teneurs en FPD de 1 %, 2 % et 3 %, respectivement. Pour le composite contenant 20 % de sable, ils ont constaté une diminution de 1,6 %, 11 % et 28,13 % pour des teneurs en FPD de 1 %, 2 % et 3 %, respectivement. Par ailleurs, ils ont remarqué que la résistance thermique du composite augmentait en proportion de la concentration de FPD.</p> <p>Pour le composite contenant 20 % de sable, ils ont constaté une augmentation de 2,9 %, 5,9 % et 16 % pour des teneurs en FPD de 1 %, 2 % et 3 %, respectivement. Pour le composite contenant 30 % de sable, ils ont enregistré une augmentation de 2,3 %, 8,1 % et 9,2 % pour des teneurs en FPD de 1 %, 2 % et 3 %, respectivement.</p>

2.12 Conclusion

Dans notre environnement, il y a une grande quantité de déchets de palmiers dattiers, notamment les fibres (FPD), et des matériaux de démolition tel que les briques et les granulats de béton recyclé. La récupération de ces résidus réduire leur impact environnemental en

VALORISATION DES DÉCHETS MINÉRAUX ET VÉGÉTAUX

diminuant l'utilisation de granulats naturels tout en améliorant les caractéristiques physiques, mécaniques et la durabilité des composites.

Chapitre 3

***CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET
PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL***

3 CHAPITRE 3 : CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET PROCTOCOLE EXPÉRIMENTAL

3.1 Introduction

Ce chapitre vise à identifier les éléments essentiels nécessaires à la fabrication des bétons de sable et à évaluer leurs caractéristiques physiques, chimiques, mécaniques. Il décrit aussi les diverses procédures expérimentales pour formuler différentes gammes du béton de sable.

Une modélisation par un plan d'expérience est intéressante pour découvrir les facteurs influençant sur la qualité du béton de sable.

3.2 Matériaux utilisés

Deux types de béton de sable sont examinés ; un béton de sable témoin et un béton de sable recyclé les bétons se composent de :

3.2.1 Sable de naturel

C'est un sable d'oued de granulométrie (0/5) prélevé de la région de Liwa (Biskra), en Algérie.

3.2.2 Sable recyclé

Issu du broyage et du tamisage des débris d'une dalle de démolition (figure 3.1), ce sable a une fraction similaire à celle du sable naturel (0/5 mm).

Les deux sables sont bien montrés sur la figure 3.2. L'analyse granulométrique et les propriétés physiques des deux sables sont illustrées dans la figure 3.3 et le tableau 3.1.



Figure 3.1: Démolition d'une nouvelle dalle (Wilaya de Biskra)



Figure 3.2: Les différentes catégories de sables

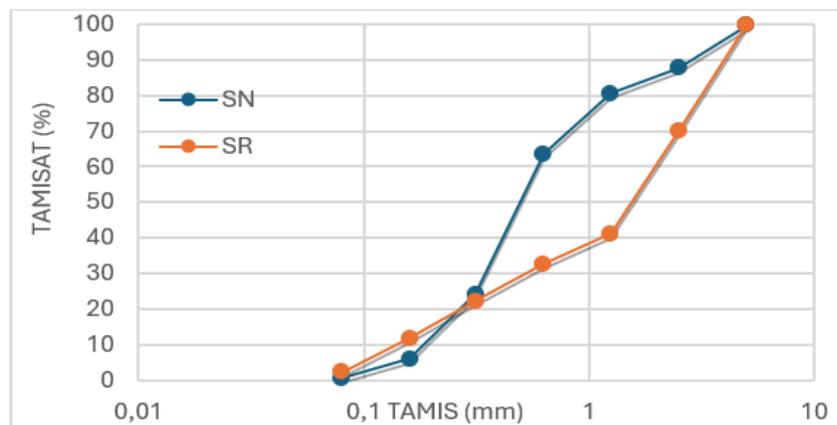


Figure 3.3: Analyse granulométrique des sables

Tableau 3.1: propriétés physiques des sables

	Sable naturel	Sable recyclé
Masse volumique apparente (lâche / compacte) kg/m^3	1510/1620	1183/1194
Masse volumique absolue g/cm^3	2.58	2.46
Module de finesse	2.38	3.22
Equivalent de sable visuel Esv (%)	79.22	80.20
Compacité (%)	64.40	52.17
Porosité (%)	35.60	47.33
Teneur en eau (%)	1.48	1.4
Absorption (%)	6.19	15

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Les résultats tableau 3.1 révèlent que le sable recyclé est plus absorbant que le sable naturel. En effet, les changements ci-après ont été appliquées au sable recyclé :

- Réduction du taux de fines pour égaliser celui du sable naturel (les particules fines inférieures à 1,6 mm ont été éliminées).
- Addition d'une quantité d'eau équivalente à environ 15 % du volume total d'eau utilisé dans les compositions de 75 % et de 100 % du sable recyclé.

Note : la proportion 15% est correspond le niveau d'absorption d'eau du sable recyclé.

3.2.3 Ciment :

Il s'agit d'un ciment Portland CEM I 42.5 N SR3 LH (ciment résistant aux sulfates) produit par l'usine "Biskria Cement SPA" à Biskra, en Algérie. Sa masse volumique absolue est de 3,12 g/cm³. Le tableau 3.2 présente la composition chimique de ce ciment.

Tableau 3.2: composition chimique (%) de ciment

La perte au feu	MgO	SO₃	Cl	Résidu insoluble
< 3	< 3.5	2.2- 2.6	< 0.04	< 0.75

3.2.4 Filler calcaire (Fc)

C'est un filler naturel extrait d'une carrière située dans la wilaya de M'sila (Algérie), avec un diamètre de 80 micromètres ($\phi = 80 \mu\text{m}$), Sa surface spécifique est de 7200 /cm²/g avec une masse volumique absolue de 2.68 g/cm³.

3.2.5 Fillers de béton recyclé (FR)

Issus de broyage des échantillons en béton, ont une masse volumique absolue 2.51 g/cm³ et une surface spécifique de 6000 cm²/g.

3.2.6 Fillers de brique recyclé (BR)

Résultant de broyage des déchets de briques, ont une densité absolue de 2,56 g/cm³ et une surface spécifique de 6000 cm²/g.

Les trois types de fillers utilisés sont bien illustrés dans la figure 3.4. Les figures 3.5 et 3.7 représentent la microstructure de ces fillers analysés par le microscopie Électronique à Balayage (MEB) et leur diffraction des Rayons X (DRX) respectivement.

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

D'après la figure 3.5, le filler calcaire et la brique se caractérisent par leur finesse et leur forme sphérique, tandis que les grains du fillers recyclés sont recouverts par les produits hydratés du ciment.

La figure 3.6 illustre la granulométrie laser des fines suivantes : ciment CRS, filler calcaire, filler recyclé et la brique recyclée, les courbes montrent que le filler calcaire a une finesse plus élevée, suivi par le filler de brique.

Les tableaux 3.3 et 3.4 présentent la composition chimique et la composition minéralogique des fillers.



Figure 3.4: Fillers utilisés

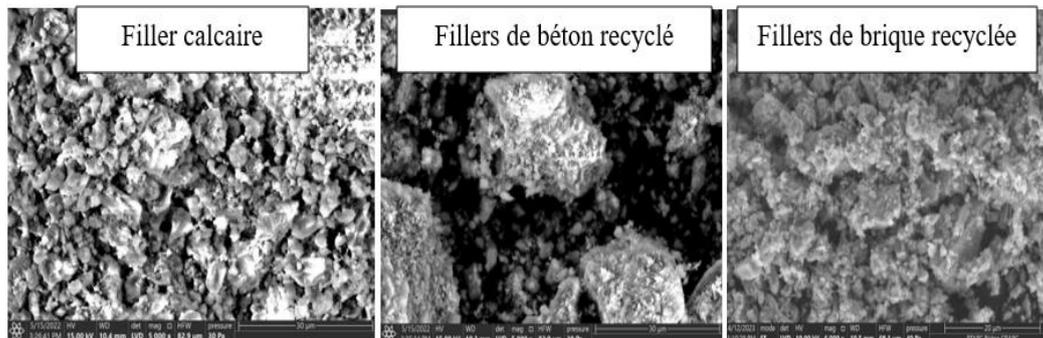


Figure 3.5: MEB des fillers

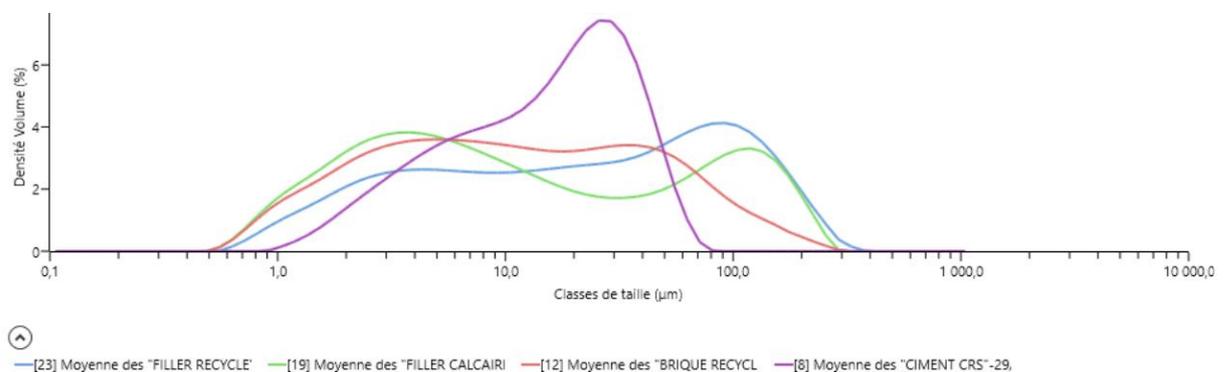


Figure 3.6: Analyse granulométrique par laser des fines (ciment, filler calcaire, filler recyclé et brique recyclée)

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

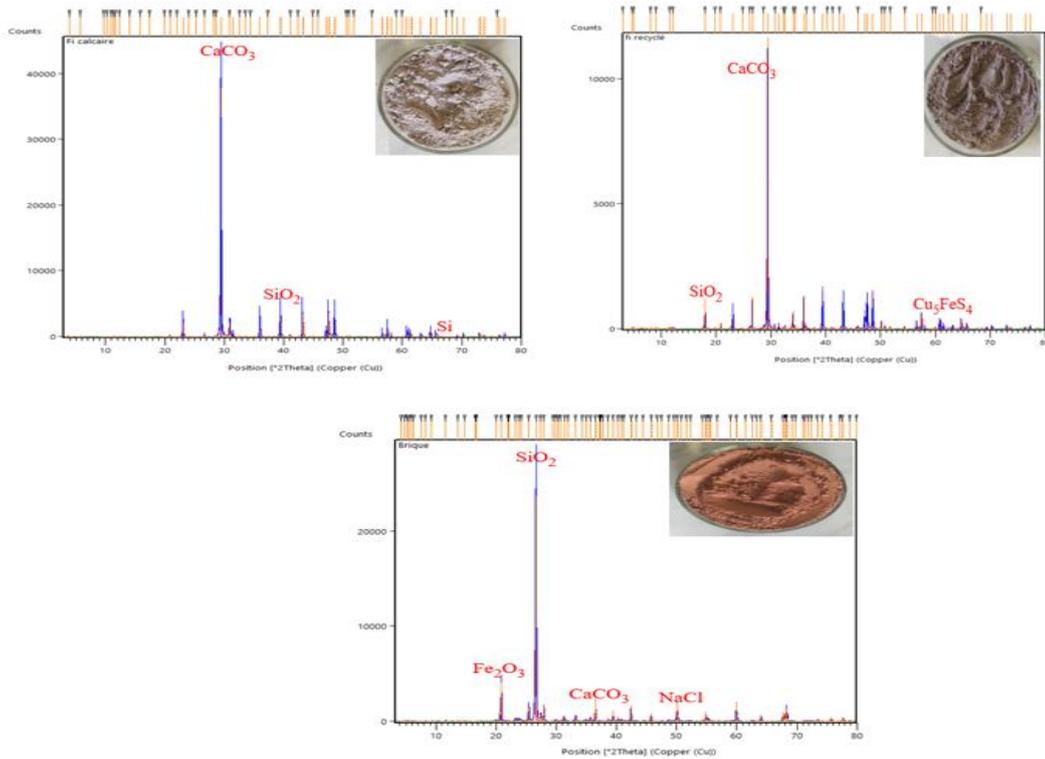


Figure 3.7: DRX des fillers utilisés

Tableau 3.3: Composition chimique des fillers utilisés

Filler	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Mg O	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Cl	
Filler calcaire (Fc)	1,64	0,56	0,24	53,13	0,23	0,21	0,07	0,04	0,01	
Filler de béton recyclé (FR)	6.73	2.34	1.27	48.20	1.27	1.19	0.30	1.86	1.84	0.04
Filler de brique recyclée (BR)	59,40	10,63	6,54	10,64	1,77	2,59	1,30	Na ₂ O 0.00		

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Tableau 3.4: Composition minéralogique des fillers recyclés (FR et BR)

CODE	R_wp	Calcite	Dolomite	Quartz	Pyrite	Illite	Chlorite	Kaolinite	Albite	CO2_XRD
FR	7,00	94,00	0,64	3,40	0,10	1,00	0,00	1,14	0,00	41,60
BR	6,00	11,00	2,61	59,00	0,40	15,00	0,70	2,05	9,40	6,09

3.2.7 Eau de gâchage

L'eau utilisée c'est l'eau de robinet, elle contribue à l'hydratation de ciment et en facilitant la fluidité de la pâte.

3.2.8 Adjuvant

Superplastifiant MEDA PLAST 40 haut réducteur d'eau sous forme de liquide de couleur marron, extrait sec 40% et un PH = 8.2, ayant une densité de 1.2.

3.2.9 Fibres de palmiers dattiers

Issus de déchets de palmiers dattiers ont une masse volumique apparente de $1,84 \text{ g/cm}^3$, et une masse volumique absolue de $0,55 \text{ g/cm}^3$ leur degré d'absorption d'eau estimée de 1,85 %. Les étapes de fabrication de ces fibres sont bien déterminées dans la figure 3.8 :

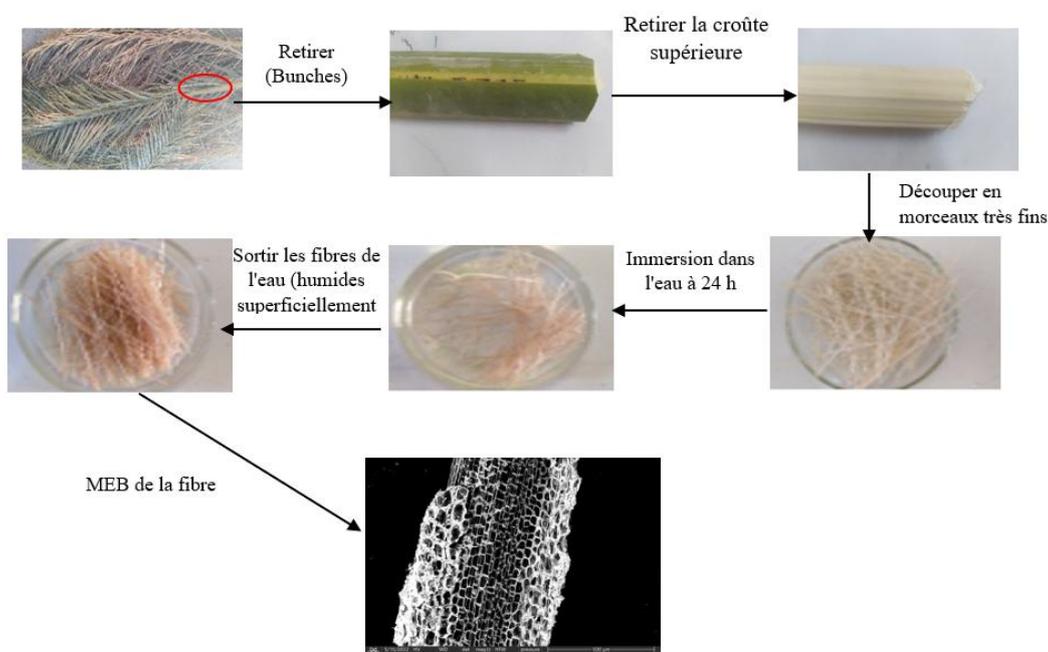


Figure 3.8: Etapes d'obtention les fibres de palmiers dattiers

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

3.3 Formulation des bétons de sable élaborés

Les compositions des bétons de sable étudiés montrés dans les tableaux 3-6 et 3-7) sont formulées selon la méthode expérimentales SABLOCRETE [6].

3.3.1 Formulation du béton de sable témoin

La méthode SABLOCRETE [6] passe par les étapes suivantes :

3.3.2 Formulation du béton de sable témoin C* (sans fines d'addition)

Le but principal de cette étape est d'évaluer maniabilité du mélange (ciment, sable, eau et adjuvant) pour le volume d'un mètre cube. Ce mélange doit présenter une maniabilité comprise entre 7 et 10 secondes selon les critères de la maniabilité LCL.

Nous avons initialement sélectionné une quantité de ciment de 350 kg et maintenu un volume d'eau constant à 220 L donc on a un rapport E/C égale à 0.62 avec une considération de 3 % d'air occlus.

3.3.3 Évaluation du dosage en sable

La quantité de sable est déterminée en se référant au tableau ci-dessous :

Tableau 3.5: Tableau d'aide pour la détermination de la quantité du sable

Composants	Dosage en masse (kg)	Masse volumique	Dosage en volume (L)
Ciment (C)	350	3.12	112
Eau (E)	220	1	220
Sable (S)	X	2.58	X/2.58
Filler (F)	0		
Superplastifiant (SP)	3.5	1.2	2.9
Air (A)			30
Somme	573.5+ x		1000

Donc : $1000 = 365 + (X / 2.58)$

$X = 1638.3 \text{ Kg}$ c'est -à- dire $S = 1638 \text{ kg}$

Ce qui donne une formule de 2212 kg/m^3 [$573.5+1638$] (masse volumique apparente théorique MVAT).

3.3.4 Optimisation de la maniabilité et le dosage en sable

Dans cette étape, nous apprêtons à préparer un lot de mélange en utilisant la formule que nous avons déterminée précédemment (350 kg de ciment, 220 L d'eau, 3,5 kg d'adjuvant et 1638 kg de sable) Ensuite :

- Nous procéderons à la mesure du temps d'écoulement (t) à l'aide de la maniabilité à mortier suivant la norme NF P 18 452.
- Nous allons calculer la densité apparente réelle (MVAR) du béton.

Le MVAR est le rapport entre masse du béton frais et le volume qu'il occupe.

L'objectif est de préparer un mélange d'un mètre cube de manière que la densité apparente théorique (MVAT) sera identique avec la densité apparente réelle (MVAR), et que le temps d'écoulement se situera entre 7 et 10 secondes.

$$S_i = S_{i-1} - (MT_{i-1} - MA_{i-1}) \pm V * \text{Masse vol. du sable} \quad (3.1)$$

S_i : le dosage en sable nécessaire.

S_{i-1} : le dosage en sable calculé par la formule.

MT_{i-1} : la masse volumique apparente théorique.

MA_{i-1} : la masse volumique apparente réelle mesurée après le temps d'écoulement du mélange gâchée à partir de la formule.

V: le volume d'eau retiré ou ajouté.

Lorsque le temps d'écoulement avec le maniabilimètre est inférieur à 7 secondes, un volume V d'eau doit être retranché (représenté par - V dans l'équation), tandis que s'il dépasse 10 secondes, un volume V d'eau doit être ajouté pour rendre le béton plus maniable (représenté par +V dans l'équation).

Après le passage par les étapes précédentes : on a trouvé $S_i = 1359$ kg et $t = 8$ s.

3.3.5 Estimation du dosage optimal des fines d'addition

Dans cette phase, les fines d'addition, représentées par le filler calcaire dans notre cas, doivent être intégrées. Ce matériau est généralement utilisé en quantités allant de 0 à 250 kg. Pour déterminer la quantité optimale à employer, la formulation de 5 ou 6 gâchées est très important

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

pour choisir la quantité optimale du filler calcaire, permettant d'obtenir une maniabilité de 7 à 10 secondes sans changement de volume, Ce qui signifie que (MVAR = MVAT).

Nous avons réalisé 5 gâchées de bétons contenant 5 dosages en filler calcaire (110, 120, 130, 140 et 150 kg), le dosage optimal qui donne un temps d'écoulement de 7 à 10 s et (MVAR = MVAT) est 150 kg.

3.4 Les séries du béton de sable

3.4.1 Béton de sable témoin (BS 0/0)

D'après la méthode expérimentale [6] nous avons déterminé les valeurs exactes pour les composants suivants : ciment, sable, filler calcaire, eau et adjuvant (superplastifiant). Le tableau 3-6 résume la quantité des composants.

Tableau 3.6: Composition du béton de sable témoin en kg/m^3

Nominations		Ciment (Kg)	Sable d'oued (Kg)	Filler calcaire (kg)	Eau (L)	Super- plastifiant (kg)
Béton de sable témoin	BS 0/0	350	1359	150	220	3,5

3.4.2 Béton de sable à base des fillers recyclés (BS/FR) et (BS/BR)

Dans cette série, les pourcentages du filler recyclé 25 %, 50 %, 75 % et 100 % sont calculées par rapport à la masse du filler calcaire.

3.4.3 Béton de sable à base des fillers combinés (BS/FR/BR)

Dans cette gamme, le filler calcaire est substitué par un mélange comprenant 33,33 %, 50 % et 100 % de fillers recyclés (FR/BR).

3.4.4 Béton de sable à base du sable recyclé (BS/SR)

Dans cette gamme le volume de sable naturel est substitué par des pourcentages de sable recyclé (25 %, 50 %, 75 % et 100 %).

3.4.5 Béton de sable à base des fibres de palmiers dattiers (BS/FPD)

Dans cette série, les fibres de palmiers dattiers sont incorporés par deux proportions (0,1 % et 0,2 %) et avec deux longueurs (2cm et 6cm) par rapport au volume total du béton.

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

3.4.6 Béton de sable à base de fibres et des fines recyclés (BS/FR/FDP)

Cette gamme est une combinaison de différents pourcentages (50% et 100%) de fines de béton avec des teneurs et longueurs variées (0,1 % et 0,2% / 2cm et 6cm) des fibres de palmiers dattiers.

Les quantités de chaque constituant des gammes mentionnés sont présentés dans le tableau 3.7.

Tableau 3.7: Compositions des différentes séries du béton de sable en kg/ m³

Nominations		Ciment	Sable d'oued (Kg)	Filler calcaire (kg)	Sable recyclé (kg)	Filler recyclé (kg)	Brique recyclé (kg)	Eau (L)	Superplasti-fiant (kg)
BS/FR	BS 25% FR	350	1359	112.5	0	37.5	0	220	3,5
	BS50% FR		1359	75		75	0	220	
	BS 75% FR		1359	37.5		112.5	0	220	
	BS100%FR		1359	0		150	0	220	
BS/BR	BS25% BR	350	1359	112.5	0	0	37.5	220	3.5
	SC 50% BR		1359	75		0	75	220	
	BS 75% BR		1359	37.5		0	112.5	220	
	SC100%BR		1359	0		0	150	220	
BS/FR/BR	BS50% FR	350	1359	75	0	75	0	220	3.5
	SC 50% BR			75		0	75		
	BS 50% FR /50% BR			0		75	75		
	BS100%FR			0		150	0		
	SC100%BR			0		0	150		
	BS 0/0			150		0	0		
	BS 33,33% FC/33,33% FR/33,33% BR			50		50	50		
BS/SR	BS25% SR	350	1035,05	150	323,94	0	0	220	3.5
	SC 50% SR		711,1		647,89		220		
	BS 75% SR		387,16		971,82		220,5		
	SC100%SR		0		1359		220,5		

Les dosages en composants du béton de sable à base des fibres de palmiers dattiers sont présentés dans le tableau 3.9.

Note : le plan de mélange est appliqué sur les séries suivants ; béton de sable à base de fibres de palmiers dattiers et béton de sable à base des fillers combinés.

3.5 Optimisation par plan d'expérience

Le but de l'optimisation par un plan d'expérience est de réduire le nombre des essais au laboratoire et déduire les paramètres les plus influençant sur la qualité du béton de sable. Cette optimisation est faite par le logiciel de JMP 16.

3.5.1 Logiciel JMP

Ce logiciel offre aux utilisateurs d'explorer les données de manière visuelle, analyser les aspects critiques, et utiliser ces informations pour prendre des décisions plus éclairées et basées sur les données. Contrairement aux feuilles de calcul ou à d'autres logiciels statistiques, JMP est spécialement conçu pour s'adapter à votre approche tout au long du processus analytique [88].

3.5.2 Les plans d'expérience

Le but de la conception expérimentale est d'identifier, de sélectionner et d'organiser les expériences d'une façon économique, l'influence des paramètres sur la réponse du produit [89]. Ils peuvent être utilisés dans divers domaines et industries dès lors qu'on cherche la relation entre la réponse (y) et les facteurs (x_i) influençant sur cette réponse, les plans d'expériences sont à considérer lorsque l'on explore une fonction de la forme [90] :

$$y = f(x_i) \quad (3.2)$$

L'expérimentateur doit élaborer un plan d'expérience approprié pour répondre à une question spécifique. Ainsi, il est crucial de sélectionner ou de concevoir le plan qui permettra d'obtenir les informations souhaitées. Par conséquent, il n'est pas envisageable d'employer un même plan expérimental pour optimiser les facteurs influents et le modèle efficace. L'utilisation des plans d'expérience requiert l'application d'une méthodologie spécifique. Cette démarche peut être subdivisée en trois grandes étapes :

1. Formulation du problème expérimental : Cette phase initiale comprend les étapes préliminaires pour définir clairement la problématique :
 - Identification des variables à étudier.
 - Définition des paramètres à optimiser.

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

2. Analyse du problème : Cette étape consiste à choisir une stratégie de construction d'un plan d'expérience approprié. Pour notre étude, nous utiliserons un plan de mélange (surfaces d'iso-réponses).
3. Analyses et résultats : Cette dernière étape implique des analyses statistiques et graphiques approfondies ainsi que l'interprétation et la validation des résultats obtenus [4].

Les paramètres contrôlés durant les expériences sont désignés comme des facteurs, et les différentes valeurs qu'un facteur peut prendre sont appelées niveaux. Dans le cas courant où il n'y a que deux niveaux, ils sont souvent notés comme "bas" et "haut", représentés respectivement par -1 et +1 (ou parfois 1 et 2) [89]. L'ensemble des valeurs d'un facteur se varie entre son niveau bas et son niveau haut [90].

La réponse désigne la quantité mesurée lors de l'expérimentation. Le plan d'expérience vise à créer une interaction entre ces deux paramètres : le facteur et la réponse mesurée [4].

3.5.2.1 Les plans de mélanges

Le plan de mélange est courant de d'expliquer l'évolution d'une propriété à mesure de la teneur des divers composants [91]. Ces composants interagissent entre eux dans le mélange. Dans un plan de mélange, il est essentiel que la somme des proportions de facteurs égale à 100% [90].

➤ **Plans de mélanges centrés :**

Dans la littérature, ces plans sont aussi désignés sous le nom de plans Simplex-centroïde, se définit par l'inclusion systématique d'un point central, ce qui les distingue des plans en réseau. Ce point central représente une composition qui contient des proportions égales de chacun des composants du mélange.

Le N exprime le nombre de mélange étudiés dans niveaux centraux, avec q composants, est déterminé selon l'équation suivante :

$$N = 2^q - 1 \quad (3.3)$$

Prenons l'exemple du plan de mélanges centré impliquant trois constituants, où il y a 7 compositions distinctes à examiner [92]:

$$N = 2^3 - 1 = 8 - 1 = 7 \quad (3.4)$$

➤ **Choix des facteurs**

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Le triangle illustré dans la figure 3.9 est utilisé pour représenter graphiquement les interrelations entre les trois composantes (F_C : filler calcaire, F_R : filler recyclé et B_R : brique recyclée) d'un mélange. Ce diagramme ternaire montre que le point zéro (0,00) correspond à la valeur la plus basse de chaque composante ; F_C , F_R , B_R , tandis que le maximum est représenté par (1,00). Le point P_c représente le point centre à savoir le mélange qui contient 33.33% de F_C , 33.33% de F_R et 33.33% de B_R à la fois.

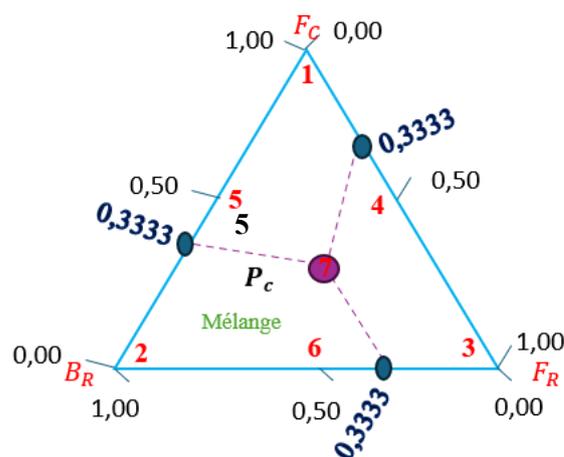


Figure 3.9: Visualisation des mélanges à trois composants à l'aide d'un triangle équilatéral
La matrice des essais du plan de mélange est représentée dans le tableau suivant :

Tableau 3.8: Matrice d'expérience du plan de mélange

Essai n°	Filler calcaire (Fc)	Filler recyclé (FR)	Brique recyclée
	Facteur 1	Facteur 3	Facteur 2
1	1	0	0
2	0	0	1
3	0	1	0
4	0,5	0,5	0
5	0,5	0	0,5
6	0	0,5	0,5

3.5.3 Les plans factoriels complets

Ces plans comportent deux niveaux pour chaque facteur, offrant ainsi une gamme restreinte de variations. Toutes les combinaisons possibles de niveaux sont explorées lors des expériences, et ces plans sont compatibles aussi bien avec des variables continues que discrètes.

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Pour deux facteurs, l'espace d'étude est représenté sous forme d'un carré. La figure 3.10 présente un plan factoriel complet à deux facteurs.

➤ Choix des facteurs

La figure 3.10 représente un plan factoriel complet avec deux facteurs, chacun ayant deux niveaux (2^2). Cette notation se traduit comme suit : L'indicateur 2 exprime le nombre des facteurs (proportion et longueur de la fibre), et l'autre indicateur 2 indique les niveaux des facteurs (2 cm, 6 cm et 0,1 %, 0,2 %). Les points expérimentaux sont déterminés par les valeurs minimales (2 cm et 0,1 %) et maximales (6 cm et 0,2 %) des facteurs. Ce plan peut être visualisé dans un espace expérimental, où les points d'expérience sont ajoutés en fonction de leurs coordonnées.

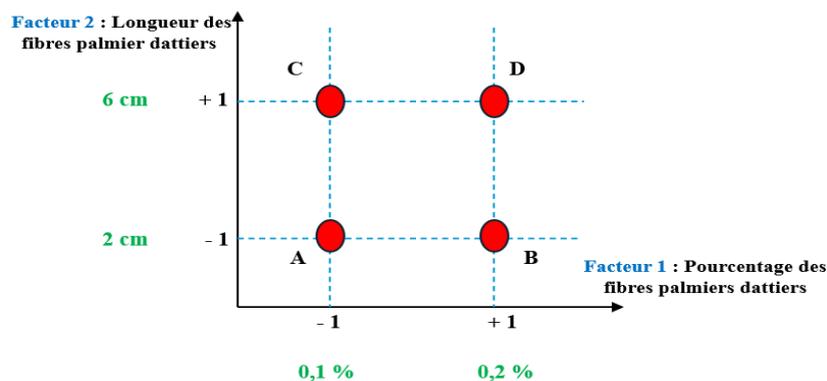


Figure 3.10: Illustration d'un plan expérimental

Les démarches expérimentales peuvent être systématisées en un tableau, comme présenté dans le tableau 3.9. On a la possibilité d'utiliser les unités de mesure habituelles (cm et %) ou bien d'adopter des valeurs codifiées pour représenter ces grandeurs.

Tableau 3.9: Matrice d'expérience du plan factoriel 2^2

Essai n°	Longueur (cm)	Pourcentage (%)
	Facteur 1	Facteur 2
1 C1	-1	-1
2 C2	+1	-1
3 C3	-1	+1
4 C4	+1	+1
Niveau -1	0,1	2
Niveau +1	0,2	6

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX ET PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Les quantités des différents composants sont spécifiées dans le tableau 3-10.

Tableau 3.10: composition du béton de sable à base de fibres de palmiers dattiers (BS/DPF)

Code	Ciment (kg)	Filler calcaire (kg)	Longueur des fibres (cm)	(%) des fibres (kg)	Sable (Kg)	Eau (L)	Super-plastifiant (kg)
C 1	350	150	2	2,08	1359	220	3,5
C 2	350	150	6	2,08	1359	220	3,5
C 3	350	150	2	4,16	1359	220	3,5
C 4	350	150	6	4,16	1359	220	3,5

3.6 Méthode de malaxage et conservation

Les constituants secs (ciment, sable et agrégats) sont mélangés à sec pendant 1 minutes. Lors du malaxage, 70 % de l'eau de gâchage est ajoutée. Ensuite, le reste de l'eau et l'adjuvant sont incorporés, et le mélange est poursuivi pendant 2 minutes.

Les éprouvettes préparées sont compactées à l'aide d'une table à chocs (15 coups) afin d'éliminer l'air emprisonné et d'assurer un bon compactage. Les éprouvettes ont été stockés au laboratoire à température ambiante pendant 24 heures. Enfin, ils ont été démoulés et placés dans un bac d'eau pendant 14, 28, 180 et 365 jours à 20 ± 2 C° jusqu'au moment de l'expérimentation. Trois échantillons sont préparés pour chaque essai.

3.7 Les essais effectués

3.7.1 Essai de maniabilité et de densité fraîche

Pour l'essai, il faut d'abord verser le mélange dans le moule tronconique, puis le lisser à l'aide d'une règle. Ensuite, 15 chocs doivent être appliqués pendant 15 secondes. Enfin, les mesures de l'étalement vertical d_1 et horizontal d_2 peuvent être prises.

L'étalement de mortier suivant la norme ASTM C 1437 est donné par l'équation (1) :

$$E\% = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (3.6).$$

Un récipient de 1 litre est utilisé pour mesurer la densité du béton de sable frais SC. Selon l'équation (2) :

$$\rho_f \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{\text{masse de béton de sable (g)}}{\text{volume du récipient (cm}^3\text{)}} \quad (3.7).$$

3.7.2 Essais d'absorption par immersion

Cet essai a été effectué sur des échantillons cubiques mesurant 5x5x5 cm³, conforme à la norme NF EN 13369, dans le but d'évaluer la porosité interne du matériau. Cet essai consiste à mettre les éprouvettes en béton de sable dans une étuve et à les peser périodiquement jusqu'à ce que leur poids demeure constant. Ensuite, Les échantillons sont partiellement conservés à 20 ± 2°C de température dans l'eau pendant 24 heures afin d'atteindre une saturation totale du matériau, Cette méthode permet de calculer précisément le volume des vides exprimé par le coefficient d'absorption par immersion (A_B) qui déterminé suivant l'équation ci-après :

$$A_B = \frac{M_a - M_s}{M_s} * 100 \quad (3.8).$$

3.7.3 Essai de l'absorption capillaire (sportivité)

La sorptivité c'est l'augmentation de la masse ou le volume d'un échantillon immergé partiellement dans bac d'eau de manière que l'eau ne recouvre l'échantillon que sur une hauteur de 5 mm. Les éprouvettes sont positionnées avec leur face inférieure reposant sur des supports et leurs faces latérales sont imperméabilisées avec une résine époxydique, assurant ainsi un contact unidirectionnel avec l'eau à travers la surface inférieure.

La masse de chaque éprouvette est calculée des périodes de 1,4,9,16,25,36,46 et 64 minutes. La sportivité (S) est déterminée en utilisant l'équation suivante :

$$S = \frac{Q}{\sqrt{t}} \quad (3.9).$$

3.7.4 Essai de la porosité accessible à l'eau

L'objectif de cet essai est de mesurer le volume des vides d'un matériau. Elle est réalisée conformément à la norme ASTM C 642 - 06, sur des échantillons cubiques de dimensions 5x5x5 cm³. Placer ces échantillons dans une casserole et faire bouillir durant 5 heures, puis les laisser se refroidir durant 14 heures.

Ensuite, les échantillons sont soumis à une pesée hydrostatique pour évaluer leur volume, ainsi qu'à une pesée à l'air. Finalement, ils sont séchés une étuve à 105°C pour obtenir une masse stable, Signifie l'état sec du solide. la porosité accessible à l'eau est calculé selon la formule suivante :

$$P \% = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} * 100 \quad (3.10).$$

3.7.5 Essai de retrait

La variation de la longueur d'un éprouvette en béton est calculée suivant la norme NF P 15-433, cette variation est généralement désignée par ε , elle est calculée selon l'équation :

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta L(t)}{L} \quad (3.11)$$

3.7.6 Essais mécaniques

Les tests mécaniques sont réalisés selon la norme N F EN 196-1, à des échéances de 14, 28, 180 et 365 jours. Les résistances à la compression (R_c) et à la flexion (R_f) sont calculés suivants les équations 7 et 8 :

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (3.12)$$

$$R_f = \frac{M}{I} * y \quad (3.13)$$

3.7.7 Essai de la vitesse d'impulsion ultrasonique

C'est un essai non-destructive réalisé sur un échantillon de béton durci pour évaluer sa qualité.

Les tests de vitesse d'impulsion ultrasonique ont été effectués en conformité avec la norme NF EN 12504-4. Cet essai repose sur la propagation d'ondes sonores à travers le matériau par l'intermédiaire d'un émetteur d'impulsions placé sur une face du matériau. Cette méthode évalue le temps nécessaire à l'onde pour traverser le matériau.

3.7.8 Essais microstructuraux (MEB)

C'est une technique qui permet d'obtenir des images à haute précision de la surface d'un échantillon en se basant sur les interactions entre les électrons et la substance.

3.8 Conclusion

Ce chapitre s'est concentré sur une description complète des matériaux utilisés dans cette étude, englobant leurs caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques. Ainsi, les techniques de caractérisation des différents types de béton de sable examinés.

Chapitre 4

RÉSULTATS ET DISCUSSION

4 CHAPITRE 4 : RESULTATS ET DISCUSSION

4.1 Introduction

Ce chapitre analyse l'influence des granulats recyclés (sable et fillers recyclés) et des fibres de palmier dattiers sur les différentes caractéristiques du béton de sable à partir d'un plan d'expérience « plan factoriel complet et plan de mélange ».

4.2 L'effet des fillers recyclés sur les propriétés du béton de sable

Les fillers de béton recyclé et de la brique recyclés sont ajoutés avec des proportions bien définies ; 25%, 50%, 75% et 100% par rapport à la masse du filler calcaire, pour analyser leur impact sur les propriétés frais et durcis du béton de sable.

4.2.1 Les propriétés à l'état frais

4.2.1.1 Maniabilité

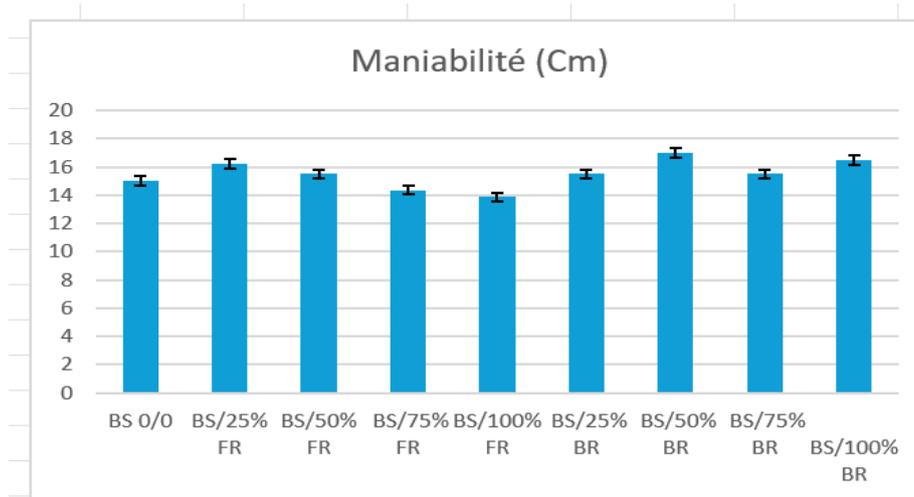


Figure 4.1: Evolution de la maniabilité du béton de sable en fonction de la teneur en filler recyclés (FR et BR)

Il y a une augmentation de maniabilité remarquable dans les mélanges du béton de sable à base des fines de béton recyclés (BS/FR), à 25% FR elle atteint 16,25 cm puis elle diminue pour atteindre 13,87 cm à 100% FR. L'amélioration notable du mélange BS/25% FR est due à la finesse du filler recyclé, qui est inférieure à celle du filler calcaire, l'eau requise pour le mouillage des grains de calcaire est plus grande que celle pour le mouillage des FR ; cependant au-delà d'un certain pourcentage, la maniabilité se réduit avec 4,2 % à 10 % selon le taux de remplacement, à cause l'absorption d'eau élevée par des fillers recyclés (FR). La composition minéralogique ainsi que l'interaction entre les fines et les adjuvants réducteurs d'eau peuvent également avoir un impact sur la plasticité du béton de sable [93], [94].

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans la même figure, l'introduction de fillers provenant de briques recyclées BR est également démontrée, les BR n'exerce pas la même influence sur la maniabilité, cette dernière augmente en fonction de l'augmentation du taux des BR. Selon Irki, et al. [95], Zhao al. [96] à mesure que la taille des particules de briques recyclées (BR) diminue progressivement, la maniabilité du mélange s'améliore. Cette réduction de taille détruit certains des pores des briques recyclées, ce qui limite leur capacité à absorber l'eau. En outre, la forme sphérique de la poudre de brique minimise la résistance au frottement et la viscosité du mélange, ce qui nécessite moins d'eau [96].

4.2.1.2 La densité fraîche

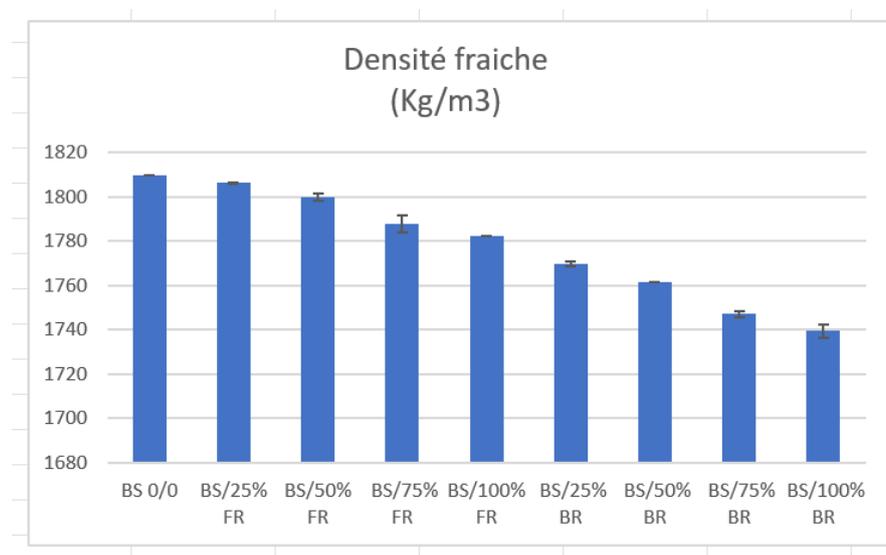


Figure 4.2: Effet des fillers recyclés (FR, BR) sur la densité fraîche du béton de sable

La densité du béton de sable se réduit significativement à mesure que la proportion des fillers recyclés (FR, BR) augmente, mais reste inférieure à la densité du béton de sable BS 0/0. Le béton avec fillers recyclés (FR) présente une légère diminution d'environ 0,87 % par rapport au béton témoin (BS 0/0), ceci est due aux masses volumiques absolues proches des deux fillers (filler calcaire FC et filler de béton recyclé FR). La même observation concernant le béton de sable à base des briques recyclées (BR), il présente une réduction de 3,17% en comparaison du béton de sable témoin (BS 0/0).

La faible densité du béton de sable contenant des fillers recyclés est due à la densité absolue des fillers réduite ce qui augmente le volume dans la structure.

4.2.2 Les propriétés à l'état durci

4.2.2.1 Retrait

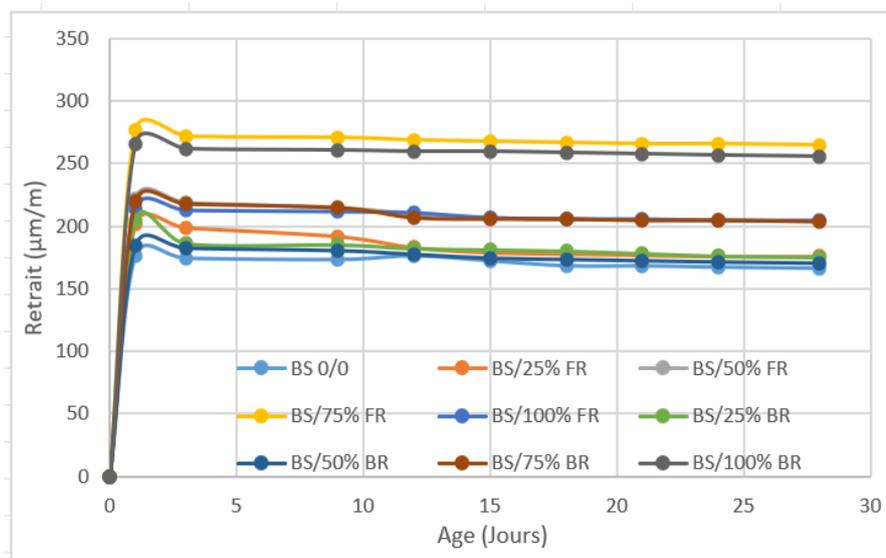


Figure 4.3: Développement de retrait de séchage des bétons de sable à base des fillers recyclés (FR, BR)

Inferieurs ou égale à 50 % des fillers recyclés, les mélanges du béton de sable (BS/50% FR), (BS/50% BR), (BS/25% FR) et (BS/ 25% BR) présentent un retrait similaire au béton de sable témoin (BS 0/0), puisque le taux de filler calcaire (F_c) est supérieur ou égale à la quantité des fillers recyclés ce qui augmente la surface spécifique du mélange et rend la structure plus dense et la quantité d'eau évaporée plus faible.

Ma et al [97] Ils ont indiqué que le retrait de séchage maximal des matériaux cimentaires, contenant respectivement 7,5%, 15% et 30% de la brique recyclée est inférieur de 3,6%, 6,3% et 11,6% par rapport au groupe témoin. Ge et al [73] ont noté qu'en remplaçant 10 % du ciment par des BR, le retrait autogène du béton pouvait être significativement réduit, avec une diminution moyenne de 35,9 %. Cette réduction du retrait est principalement attribuée à la réaction d'hydratation faible et précoce des BR dans le béton, Cela conduit à une diminution des produits hydratants primaires et à la création de pores plus petits.

Cependant, le béton de sable incorporant de 50 % des fillers recyclés présente un retrait supérieur que celle du béton de sable témoin, une élévation de 59,63 %, 23,49%, 22,89% et 54,21% pour les mélanges (BS/75% FR), (BS/100% BR), (BS/75% FR) et (BS/ 100% BR) respectivement, la même conclusion est constatée par des différents chercheurs qui ont introduit les fines recyclées dans leurs matériaux cimentaires. [79] [79] et [98] [98] ont observé une

RÉSULTATS ET DISCUSSION

augmentation du retrait dans le béton contenant des BR, attribuée à l'absorption élevée d'eau par les BR.

4.2.3 La résistance à la compression

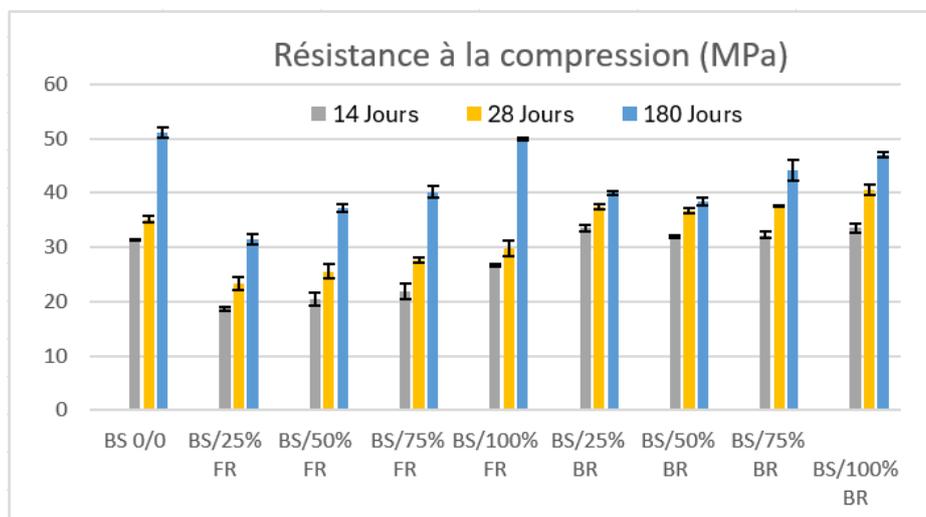


Figure 4.4: Impact de taux des fillers recyclés (FR, BR) sur la résistance à la compression du béton de sable

Il y a une augmentation significative de la résistance à la compression du béton de sable à base de FR à 14, 28 et 180 jours. Cependant, cette résistance reste inférieure à celle observée dans le béton de sable témoin, surtout à court terme. À 180 jours, la réduction de la résistance des mélanges SC/25% FR, SC/50% FR, SC/75% FR et SC/100% FR est respectivement de 62,57%, 27,15%, 21,33% et 2,29%. Ces résultats indiquent que les fillers recyclés peuvent améliorer la résistance en raison de leur finesse ce qui rend la structure plus dense. À 180 jours, la résistance des BS/100% FR est similaire avec celle du BS 0/0 grâce à l'effet de durcissement interne des BS/100% FR.

Ceci est dû au fait que l'eau initialement absorbée à l'intérieur des pores est disponible pour l'hydratation de ciment. La structure angulaire et la rugosité des fillers recyclés améliorent la résistance du ciment dans le béton en facilitant la cohésion entre les particules [99].

A court terme (14 et 28 jours), la résistance des bétons de sable à base des BR est plus élevée par rapport à celle du béton de sable témoin (SC 0/0). Cependant, à long terme (180 jours), cette résistance diminue, les mélanges (SC/25% BR), (BS/50% BR), (SC/75% BR) et (SC/100% BR) enregistrent une amélioration de 6,49%, 4,41%, 6,88% et 15,71% respectivement à 28 jours ; et une réduction à 180 jours de 21,65 %, 24,80%, 13,46% et 7,75% par rapport au BS 0/0.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'amélioration de la résistance à la compression des BS/BR est due à la réaction pouzzolanique des BR, selon la composition chimique des BR montré dans le tableau 3.2 (chapitre 03), il est évident que la somme d'alumine des oxydes de silicium est supérieure à 50% donc les BR sont des matériaux à pouvoir pouzzolanique favorisant ainsi le développement des hydrates.

Pour ces raisons, l'intégration de la brique en tant qu'additif pouzzolanique peut améliorer la résistance mécanique des matériaux cimentaires. En outre, les fines de la brique peuvent renforcer la microstructure en comblant les pores capillaires [100], [97].

4.2.4 La résistance à la flexion

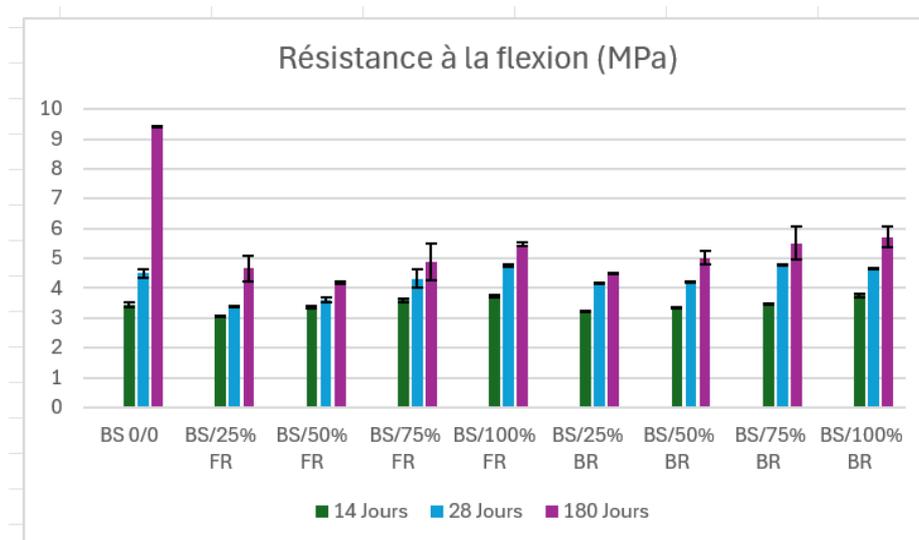


Figure 4.5: Développement de la résistance à la flexion des bétons de sable contenant des fillers recyclés (FR, BR)

Une réduction significative de la résistance à la flexion des bétons de sable à base de fillers recyclé (BS/FR et BS/B) en comparaison du mélange témoin. La réduction moyenne est estimée de (0,86 %, 4,88 % et 49,25 %) à 14, 28 et 180 jours respectivement concernant les BS/FR, une constatation similaire est rapportée par [101].

D'autre part les mélanges BS/BR ont présenté une diminution moyenne de (0,28%, 1,11% et 45,10%) dans les âges 14, 28 et 180 jours respectivement. Rani et Jenifer [102] ont observé que les bétons contenant 10 % et 20 % des BR ayant une résistance à la flexion plus élevée rapport au béton traditionnel. Lorsque le remplacement atteint 30 %, la résistance à la flexion diminue mais reste comparable à celle du BS 0/0. Tandis que, la résistance de BS/BR était similaire à celle du béton témoin à 28 jours lorsque le taux de remplacement du filler est supérieur ou égal à 50 % du BR.

4.2.5 Les propriétés de durabilité

4.2.5.1 L'absorption par immersion

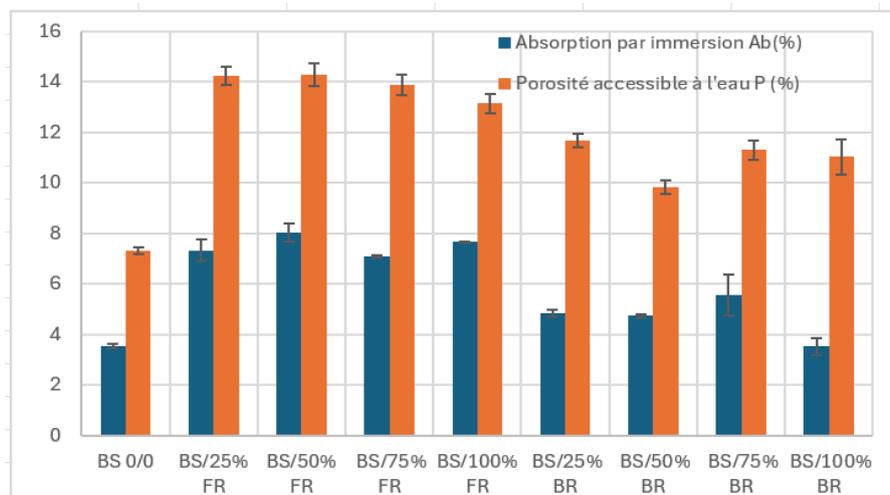


Figure 4.6: Effet des fillers recyclés (FR, BR) sur l'absorption par immersion et porosité accessible du béton de sable

Une augmentation significative de l'absorption par immersion du béton de sable contenant des FR a été observée. Les valeurs de l'absorption des BS/FR sont doublées par rapport au BS 0/0. Cependant le coefficient d'absorption d'eau moyen des mélanges (BS/FR) est supérieur avec 113,45 % que celui du béton de sable témoin (BS 0/0). Cette augmentation est attribuée à la structure poreuse générée par les fillers recyclés, donc une quantité élevée du mortier adhérent accroît la porosité du béton.

Une absorption moyenne de (BS/BR) est plus élevée de 32,35 % que ceux du béton de sable témoin (BS 0/0) à base du filler calcaire (FC). Logiquement l'augmentation est attendue parce que les (BR) ayant une capacité d'absorption plus forte en comparaison avec les (FC). D'autre part la grande finesse du (FC) rend le béton de sable témoin plus compact avec une capacité d'absorption réduite. Généralement, les bétons à base des fillers recyclés ayant une grande surface spécifique présentent des pores moins importants et structure plus compacte que celles contenant des fillers ayant une surface spécifique plus faible.

Vis-à-vis la porosité accessible à l'eau, en constatant que les fillers recyclés (FR et BR) exercent la même influence que l'absorption par immersion. Cependant la porosité moyenne des mélanges (BS/ FR) et (BS/BR) est supérieure avec 89,95% et 49,18% respectivement en comparaison avec le béton de sable témoin (BS 0/0). En général, il existe une corrélation entre deux essais : l'absorption d'eau par immersion et la porosité accessible à l'eau, comme l'ont

RÉSULTATS ET DISCUSSION

confirmé plusieurs chercheurs ; que l'essai d'absorption d'eau est efficace pour surveiller les changements de porosité totale du béton [103] [103] [104].

4.2.5.2 La sorptivité

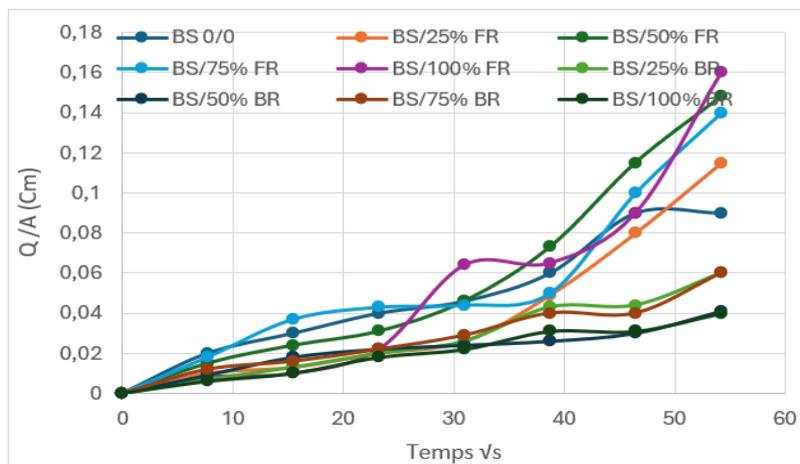


Figure 4.7: Sorptivité du béton de sable à base des fillers recyclés (FR, BR)

Les fines de béton recyclés ont un impact significatif sur la sorptivité du béton de sable, Les BS/FR ayant une sorptivité plus élevée par rapport au BS 0/0. Cette augmentation est à cause de la faible adhérence entre les fines recyclés et la matrice cimentaire, donc le volume des vides augmente ce qui favorise la pénétration d'eau, Les valeurs d'absorption capillaire augmentent avec l'augmentation des FR; toutefois le mélange BS /25 % RF a un coefficient d'absorption supérieur à celui de SC 0/0 avec 27,77%, d'autre part le coefficient d'absorption du mélange BS/100% FR est supérieur à BS 0/0 de 77,77% , [105] [105] a observé une augmentation notable de la sorptivité avec 70,3 % lorsque des fines recyclés à 100 % étaient ajoutés. En revanche, lorsque taux des fines recyclés atteint 30%, la sorptivité augmente de 34,4 %. Cette variation semble être directement influencée par le dosage en fines introduit. La porosité propre des fins recyclés entraîne une augmentation des contraintes capillaires par conséquent, une forte absorption d'eau et plus d'absorption capillaire [106].

Sur la même figure, en remarquant un effet positif du BR sur la capacité d'absorption du béton de sable, la valeur optimale est enregistrée dans mélange BS/100% BR (55,55 % différence avec le béton de sable témoin), dans des études similaires affirment que la réaction pouzzolanique rend le réseau capillaire plus complexe. Cela conduit à une absorption d'eau plus lente et plus difficile [72], [107].

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats révèlent qu'il existe une relation entre la résistance du béton contenant des BR et leur coefficient d'absorption. Cette relation est due à l'effet des hydrates formés lors de la réaction pouzzolanique BR, qui contribue à améliorer la cohésion du béton de sable.

4.2.6 La vitesse d'impulsion ultrasonique

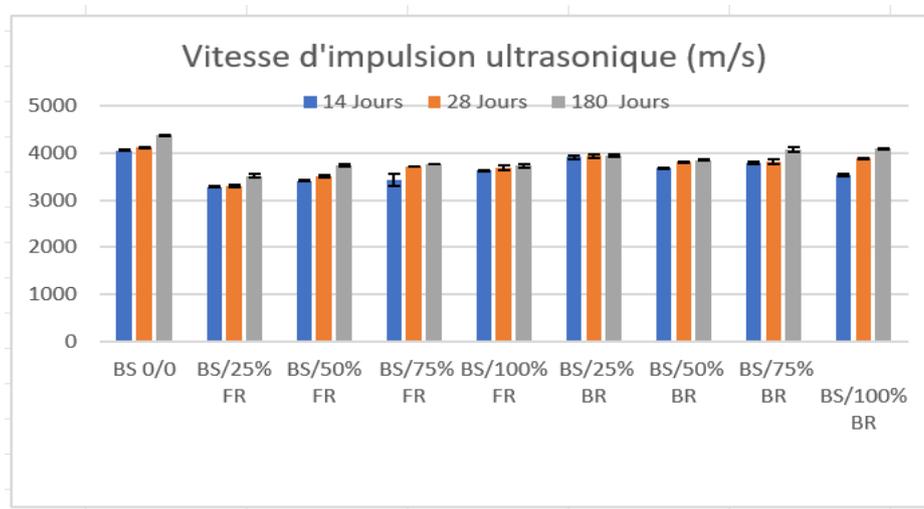


Figure 4.8: Evolution de la vitesse d'impulsion du béton de sable à base des FR et BR

La vitesse d'impulsion des BS /FR et BS/BR est inférieure que celle du béton de sable témoin (BS 0/0). Pour le béton BS/FR, une diminution moyenne de la vitesse d'ultrason estimée de 15,27%, 13,93% et 15,69% a été observée à 14, 28 et 180 jours, respectivement. Cette réduction est due à densité réduite des mélanges due au volume de vides créé par les fillers FR. Chakradhara et Rao [108] ont constaté une réduction de la vitesse d'impulsion pour les bétons à base des fines recyclés.

Les bétons BS/BR présentent un comportement comparable à celui des BS/FR dans la même figure, la diminution moyenne des BS/BR est estimée à 8,06% à 14j, 6,43% à 28j et de 8,84% à 180j en comparaison au béton de sable témoin BS 0/0. Les résultats obtenus sont attendus puisque les BR sont moins fines par rapport au filler calcaire FC.

4.3 Microstructure (MEB) des Bétons de sable à base des fillers FR/BR

Comme l'illustre la figure 4.9, la structure du béton de sable témoin (BS 0/0) est plus compacte. Elle présente une forte adhérence entre la pâte de ciment et le granulats de sable naturel. Le C-S-H a une structure arrondie, tandis que l'ettringite se présente sous forme de cristaux fibreux.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

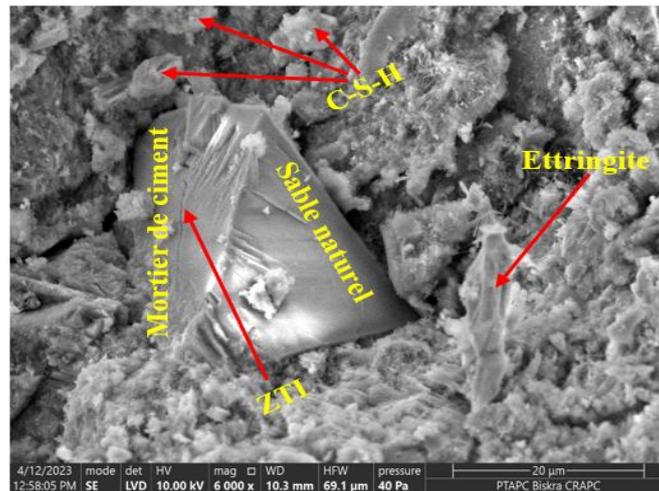


Figure 4.9: MEB du BS 0/0

Les mélanges de (BS/100% FR et BS/100% BR) ayant une microstructure plus poreuse et moins dense par rapport au béton témoin BS 0/0 (figure 4.10 a et b), Les pores sont répartis sur toute la surface (voir figure 4.10b). La zone de transition interfaciale est plus large que celle observée avec des granules de ciment non hydratés (voir figures 4.10a et b), ce qui indique une hydratation incomplète du ciment. [109]. [109] ont validé que les points lumineux indiquent une hydratation plus lente que celle du béton témoin.

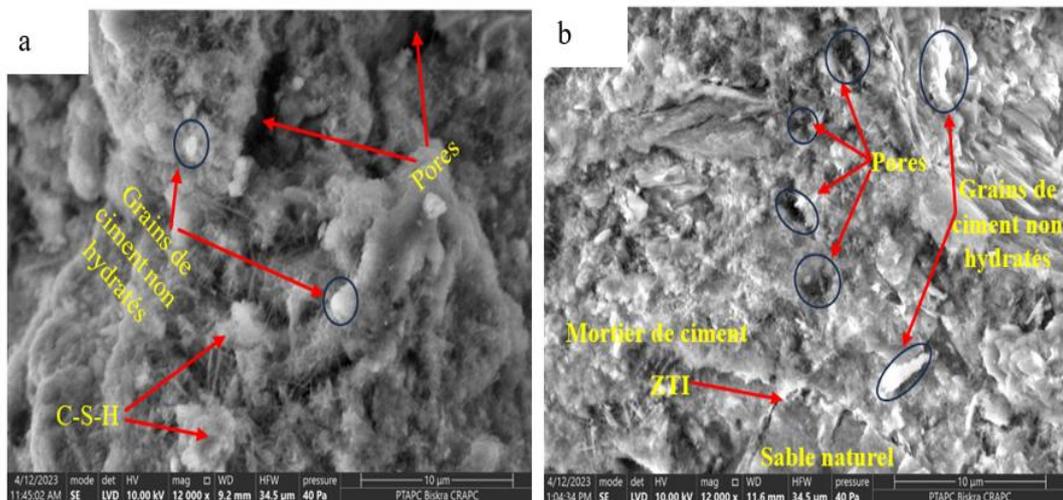


Figure 4.10: a : MEB du béton de sable (BS/100%BR), b : MEB du béton de sable (BS/100% FR)

D'après la figure 4.11 (a et b), il est clair que la structure des bétons de sable contenant 50 % de FR (BS/50% FR et BS/50% BR) est très différente de la structure de BS 0/0, cependant le volume du gel des C-S-H se montre plus grand par rapport au BS 0/0 (figure 4.11). La ZTI entre

RÉSULTATS ET DISCUSSION

le ciment et le sable apparaît exhiber une fragilité notable (figure 4.11, a). Cependant, la figure 4.11, b présente volume important des pores avec des grains de ciment non hydratés.

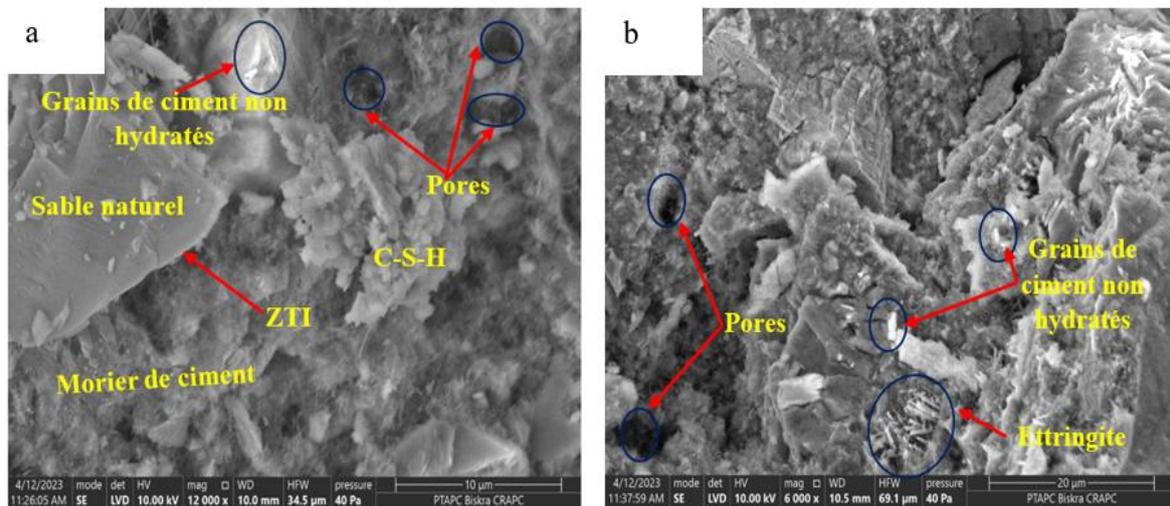


Figure 4.11: a : MEB du mélange de (BS/50% BR), b : MEB du mélange de (BS/50% FR)

4.4 Optimisation de la maniabilité et la résistance à la compression des mélanges ternaires (FC, FR, BR)

4.4.1 Modèle mathématique, résumé de l'ajustement et estimation des coefficients

Dans cette étape en choisissant les points d'essais comme indiqué au tableau 4.3. Les variables indépendantes sont : FC, FR, BR, cependant les réponses choisies sont la maniabilité (E) et la résistance à la compression (Rc 28j).

Les tableaux 4.1 et 4.2 présentent les valeurs estimées par le logiciel pour les réponses étudiés, les modèles mathématiques obtenus sont représentés dans les équations suivantes :

$$\begin{aligned} E \text{ (cm)} = & 15,049242 * Fc + 13,549242 * FR + 19,549242 * BR + 4,0151515 Fc * FR + \\ & 10,015152 Fc * BR - 14,98485 FR * BR \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} Rc_{28j} \text{ (MPa)} = & 35,461364 * Fc + 29,821364 * FR + 38,321364 * BR - 33,74727 Fc * FR - \\ & 12,22727 Fc * BR - 49,98727 FR * BR \end{aligned} \quad (4.2)$$

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Tableau 4.1: Résumé de l'ajustement

Résumé de l'ajustement	Maniabilité E (Cm)	Résistance à la compression Rc 28j (MPa)
R carré	0,992887	0,946163
R carré ajusté	0,957323	0,676977
Racine de l'erreur quadratique moyenne	0,565752	3,807078
Moyenne de la réponse	16	29,58429
Observations (ou sommes pondérées)	7	7

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Tableau 4.2: Estimation des coefficients

Estimations des coefficients				
Maniabilité E (cm)				
Terme	Estimation	Erreur standard	t ratio	p-value. > t
$\alpha 1$: Fc (Mélange)	15,049242	0,563605	26,70	0,0238*
$\alpha 2$: FR (Mélange)	13,549242	0,563605	24,04	0,0265*
$\alpha 3$: BR (Mélange)	19,549242	0,563605	34,69	0,0183*
$\alpha 4$: Fc*FR	4,0151515	2,590732	1,55	0,3648
$\alpha 5$: Fc*BR	10,015152	2,590732	3,87	0,1611
$\alpha 6$: FR*BR	-14,98485	2,590732	-5,78	0,1090
Résistance à la compression Rc 28j (MPa)				
Terme	Estimation	Erreur standard	t ratio	p-value. > t
$\alpha 1$: Fc (Mélange)	35,461364	3,79263	9,35	0,0678
$\alpha 2$: FR (Mélange)	29,821364	3,79263	7,86	0,0805
$\alpha 3$: BR (Mélange)	38,321364	3,79263	10,10	0,0628
$\alpha 4$: Fc*FR	-33,74727	17,43363	-1,94	0,3036
$\alpha 5$: Fc*BR	-12,22727	17,43363	-0,70	0,6106
$\alpha 6$: FR*BR	-49,98727	17,43363	-2,87	0,2136

Le tableau 4.1 indique que les modèles montrent des niveaux élevés de corrélation ($R^2 = 0,99$ pour E (cm) et $R^2 = 0,95$ pour Rc à 28 jours). L'analyse révèle que les coefficients linéaires ($\alpha 1$, $\alpha 2$ et $\alpha 3$) sont hautement significatifs pour la maniabilité, avec des valeurs de P très faibles ($p < 0,05$).

Le tableau 4.2 montre que les deux facteurs (BR, FC) influencent davantage la maniabilité et la résistance à la compression en comparaison avec le FR.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.4.2 Effet principal

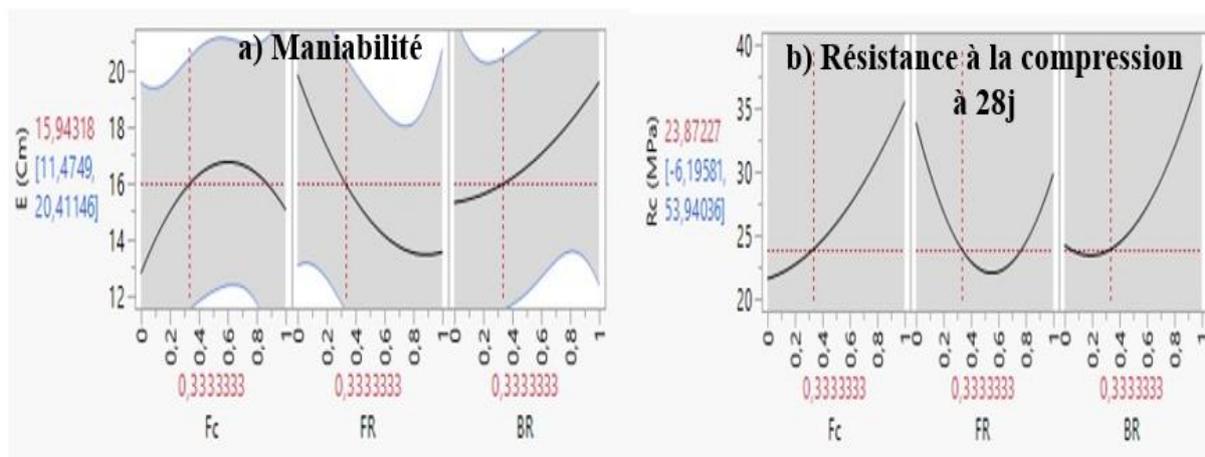


Figure 4.12: Evolution des effets principaux

La figure 4.12 montre que l'incorporation des BR améliorent les réponses (maniabilité et résistance mécanique) puisque les BR présentent une fonction qui s'accroît progressivement.

4.4.3 Courbes iso-réponses

Les courbes iso-réponses permettent d'examiner la relation entre trois variables (facteurs) dans un tracé qui sert à visualiser les résultats d'une expérience avec plusieurs réponses, ces courbes indiquent que l'évolution de BR en fonction de FC et FR est réversible.

La figure 4.13 indique que plus la teneur en brique recyclé (BR) dans le système ternaire (Fc - FR - BR) augmente, la maniabilité est plus élevée. La maniabilité optimale est enregistrée dans le mélange (Fc= 20%, FR= 10% et BR= 70%).

D'après la figure 4.14, il y a une amélioration significative de la résistance à la compression en fonction de l'augmentation du pourcentage des BR. Cette amélioration est due à l'activité pouzzolanique des BR. La résistance maximale est enregistrée dans le mélange (Fc= 10%, FR= 2% et BR= 88%).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

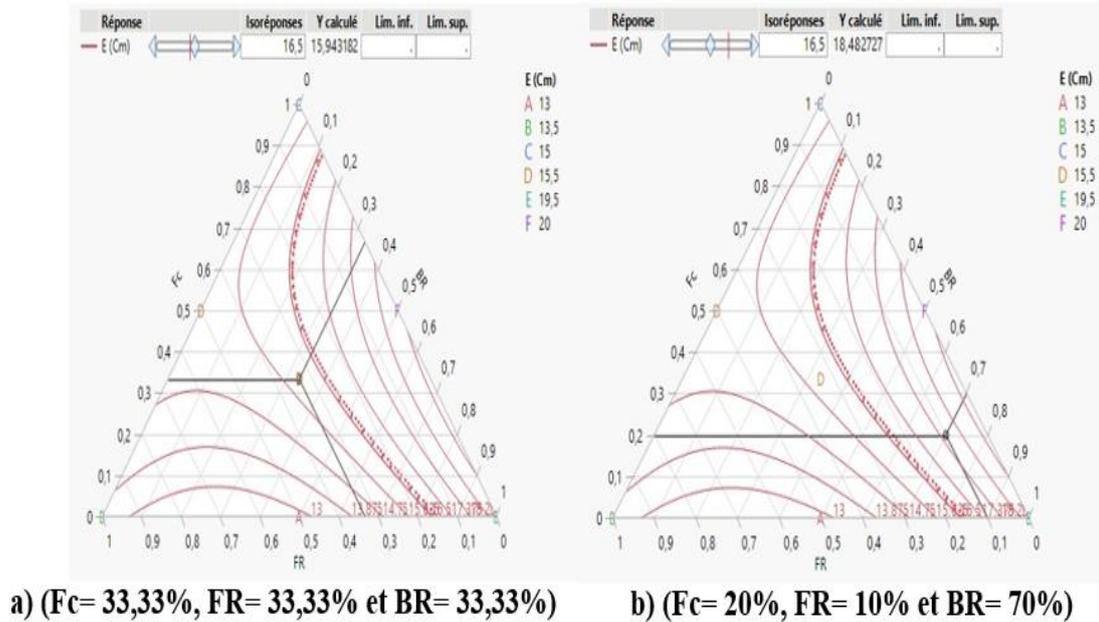


Figure 4.13: Courbes iso-réponses de la maniabilité

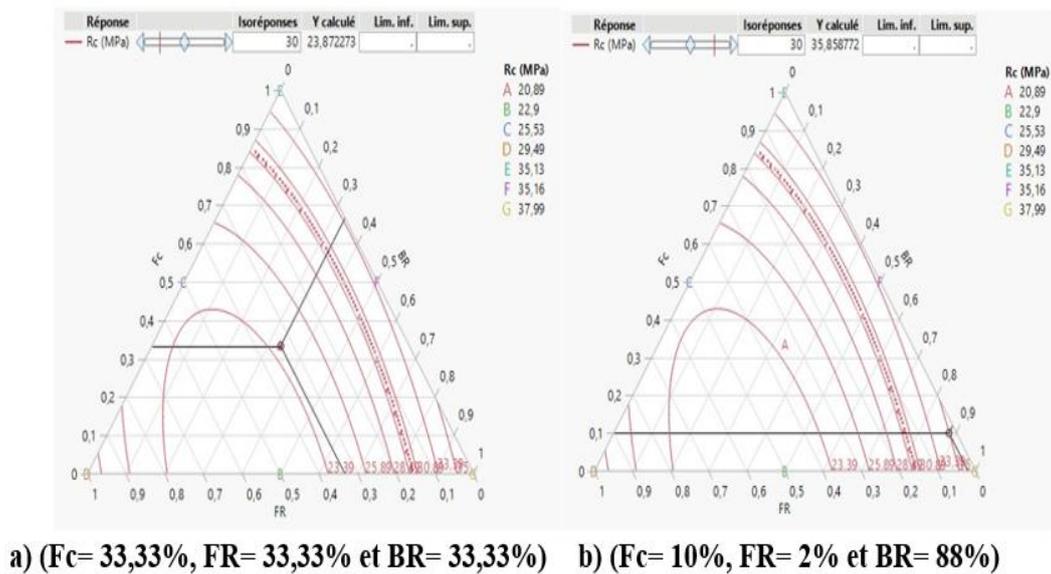


Figure 4.14: Courbes d'iso-réponses de la résistance à la compression

4.5 Microstructure des bétons de sable contenant de fillers combinées (F_c , FR , BR)

Selon la figure 4.15 (a), il est évident que cette structure est moins résistante en comparaison avec celle du BS 0/0, elle contient un volume important des pores avec plus des grains de ciment non hydratés. Dans la figure 4.16-b- l'ettringite est bien identifié, Il aide efficacement à compacter la matrice cimentaire.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

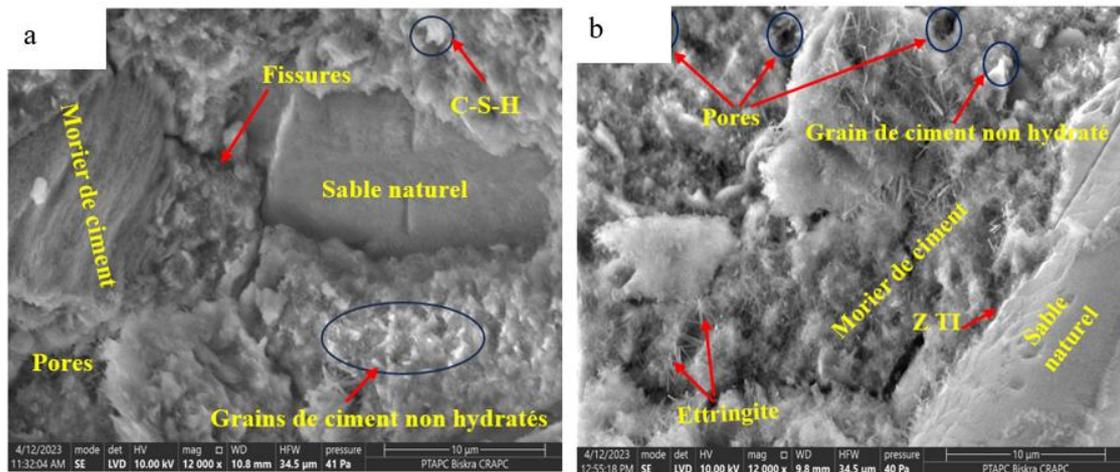


Figure 4.15: a : MEB du mélange de (BS/50% BR et 50% FR), b : MEB du mélange de (BS/33,33% Fc – 33,33% FR et 33,33% BR)

4.6 L'effet des sables recyclés (SR) sur les propriétés du béton de sable

4.6.1 A l'état frais

4.6.1.1 Maniabilité

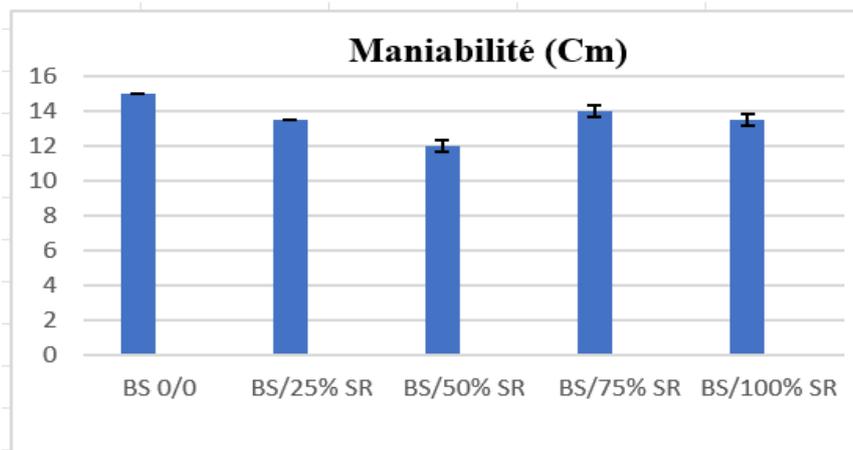


Figure 4.16: Evolution de la maniabilité des BS en fonction de la teneur en SR

Une réduction observée de la maniabilité avec l'augmentation la proportion de sable recyclé dans le béton, mais reste inférieure à la proportion de béton de sable témoin (BS 0/0), les sables recyclés SR ont un degré d'absorption plus élevé en comparaison avec celui du sable naturel SN, Kenai et Debieb [103] ont confirmé que pénétration d'eau dans les bétons augmente proportionnellement avec l'augmentation de la teneur en granulats recyclés. Cette réduction est causée par l'ancienne couche de mortier adhérent à la surface de l'agrégat recyclé, ce qui accroît la friction interne dans le mélange frais.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Note : la maniabilité des mélanges BS/75% SR et BS/100%SR a été ajustée en tenant compte de leur absorption (15 %) pour le reste du travail.

4.6.1.2 La densité

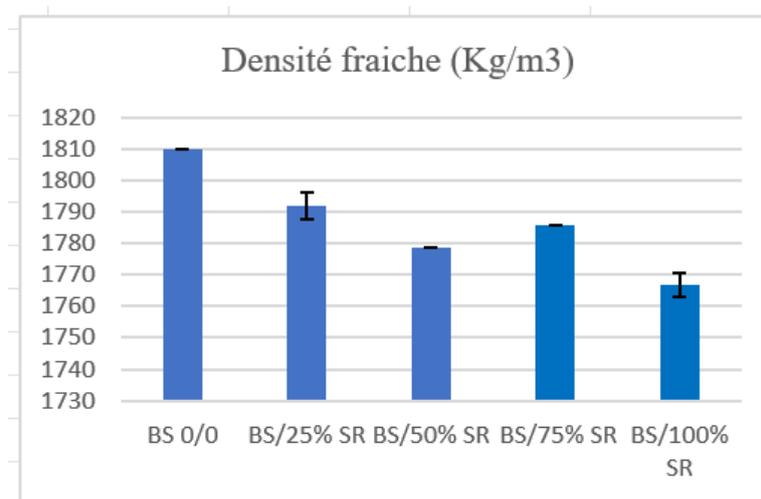


Figure 4.17: Densité fraîche du béton de sable à base du sable recyclé

Une réduction progressive de la densité dans les mélanges BS/SR par rapport au BS 0/0 la diminution de densité est estimée de 1% pour BS/25% SR, 1,7% pour BS/50% SR, 1,8% pour BS/75% SR et 2,4% pour BS/100% SR. D'après les résultats de Thomas et al [110] ont confirmé que le béton contenant du granulat recyclé GR a une densité plus faible que les mélanges correspondants contenant du granulats naturels GN. Généralement les BS/SR sont moins denses que le BS 0/0 à cause de la faible densité des SR, Behera et al. [58] ont indiqué que la densité plus faible est due à la faible gravité spécifique des granulats recyclés (GR).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.6.2 A l'état durci

4.6.2.1 Retrait

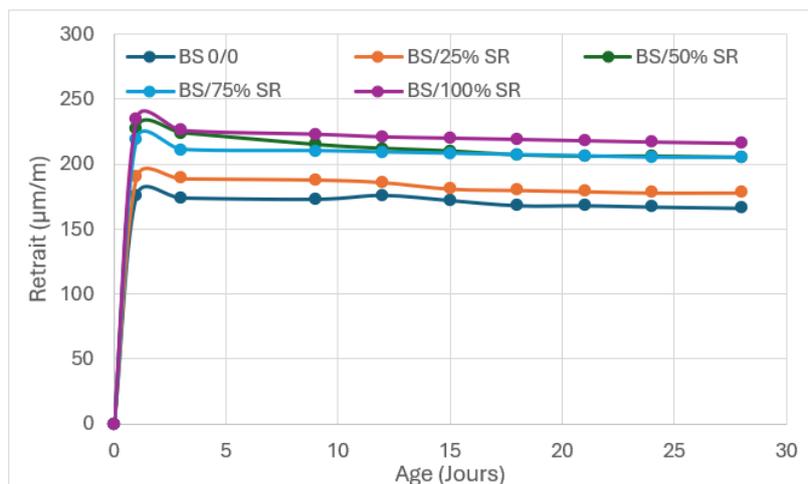


Figure 4.18: Retrait de séchage de béton de sable recyclé

Le retrait de séchage de BS/SR est plus élevée par rapport au celle du BS 0/0, il atteint sa valeur maximale dans le mélange BS/100% SR, il présente un retrait supérieur à celui du BS 0/0 avec 30,12%. Ces résultats étaient attendus puisque les pores créés par le sable recyclé favorisent considérablement l'évaporation de l'eau. Certains chercheurs ont trouvé le même résultat ; Behera et al. [58] ont confirmé que le retrait du béton inclus granulats recyclés (GR) se situait entre 15% et 60%. Whiting et al. [89] ont démontré que le niveau de retrait est similaire à celui du béton conventionnel lorsque le taux de substitution est inférieur (20 %) à un stade précoce.

4.6.2.2 Résistance à la compression

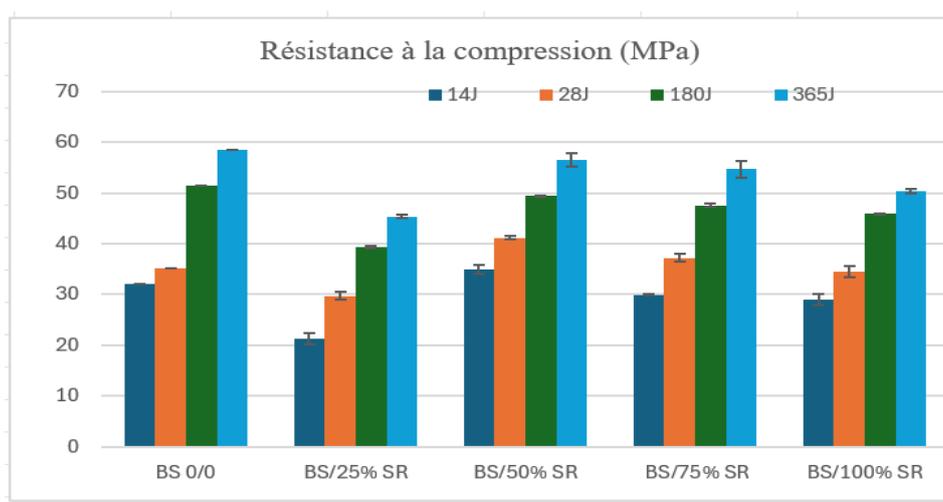


Figure 4.19: Résistance à la compression du béton de sable en fonction de pourcentage de sable recyclé

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les mélanges de BS/SR ont le même comportement dans toutes les échéances (à court et à long terme), ils ont toujours des résistances mécaniques inférieures à celle de BS 0/0, cette diminution est attendue puisque le mortier adhérent au sable recyclé crée une faible liaison entre la matrice cimentaire et le sable recyclé, les réductions mesurés sont de (22,51%, 3,48%, 6,69% et 13,93%) pour les mélanges (BS/25% SR, BS/50% SR, BS/75% SR et BS/100% SR) respectivement. Hansen [111] Haddad et al [112] ont trouvé une diminution progressive de la résistance à la compression avec l'augmentation de dosage en granulats recyclés (GR).

4.6.2.3 La résistance à la flexion

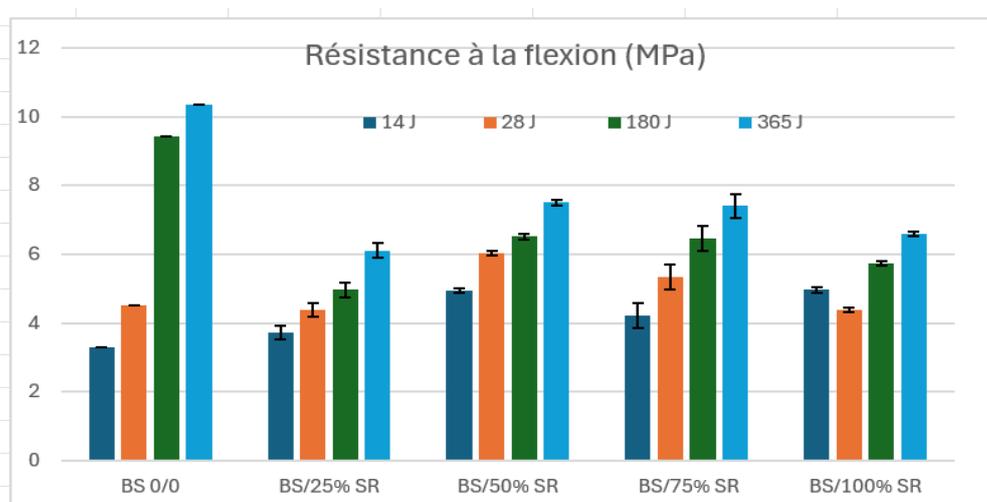


Figure 4.20: Résistance à la flexion du béton de sable en fonction de l'ajout des SR

Les résultats de la résistance à la flexion des BS/SR sont inférieurs à celle du béton de sable témoin BS 0/0 à long terme, par contre elle est du même ordre à court terme (14 et 28 j), les meilleures résistances sont 7,5 MPa et 7,4 MPa, qui sont obtenus à 365 jours pour les mélanges BS/50% SR et BS/75% SR respectivement; Ainsi, ils montrent des réductions d'environ 27,53% et 30,24% par rapport au béton témoin; habituellement les BS/SR sont moins résistants que les BS 0/0; Silva et al. [113] ont montré que la texture rugueuse des GBR ainsi le mortier adhérent aux granulats recyclés réduisent la résistance à la flexion du béton.

4.6.2.4 Absorption par immersion et porosité accessible à l'eau

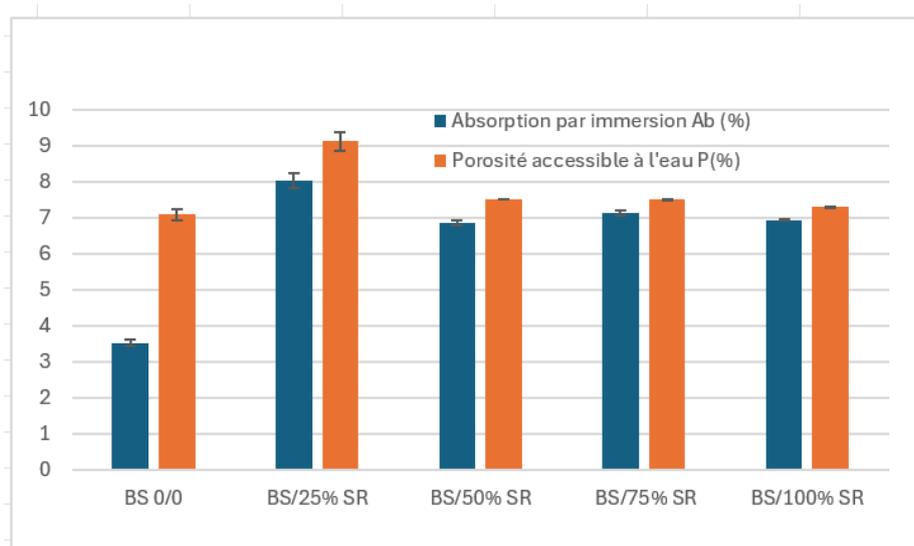


Figure 4.21: Effet de la teneur en sable recyclé sur l'absorption par immersion et porosité accessible à l'eau du béton de sable

Les valeurs de l'absorption et la porosité des mélanges de BS/SR sont supérieures par rapport au BS 0/0, pour le BS/25% SR les valeurs atteignent le maximum 8,035% pour l'absorption par immersion et 9,13% pour la porosité accessible à l'eau. [57] [57] a démontré que la nature poreuse du granulat recyclé (GR) est responsable de sa capacité d'absorption d'eau plus élevée, car les pores permettent une absorption accrue. En outre, Behera et al [58] a corroboré cette idée en soulignant une relation inverse entre la présence de mortier adhérent et la qualité du GR. Ainsi, la capacité d'absorption d'eau anormalement élevée du granulat recyclé est largement attribuée à la présence de ce mortier attaché.

4.6.2.5 Vitesse d'impulsion ultrasonique

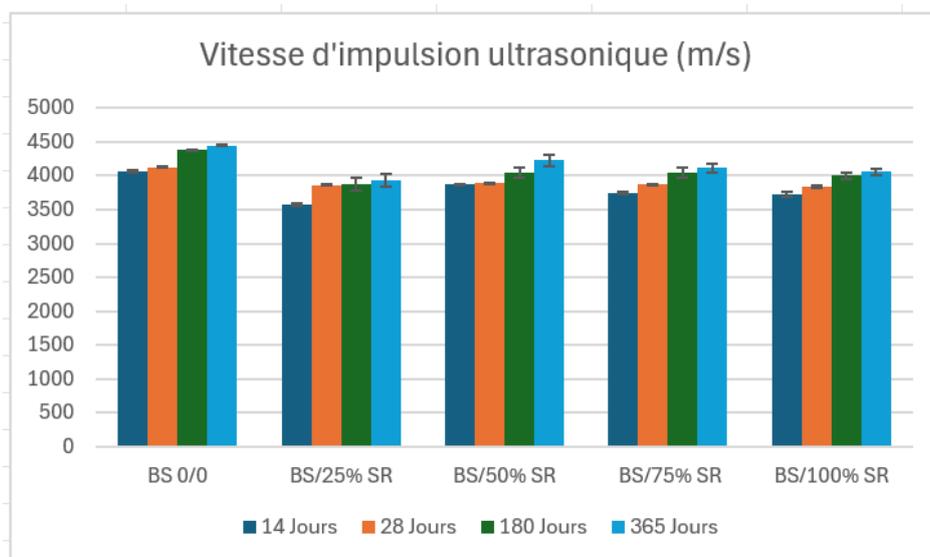


Figure 4.22: Vitesse d'impulsion ultrasonique des bétons de sable recyclés

Le mélange BS/50% SR montre une vitesse d'impulsion optimale de 4225 m/s à 365 jours, elle est inférieure de 4,62% par rapport au BS 0/0, il est clair que la vitesse dans les mélanges BS/SR est inférieure à celle du béton de sable témoin dans toutes les échéances ; plusieurs chercheurs comme, Kwan et al [114] ont affirmé que la porosité de béton du sable recyclé ralentisse la vitesse d'impulsion ultrasonique.

4.7 Optimisation de la teneur et la longueur des fibres de palmiers dattiers (BS/FPD) dans le béton de sable

Dans notre cas d'étude nous avons choisi d'utiliser des fibres végétales provenant de déchets de palmiers dattiers, ils sont incorporés avec un dosage réduit de 0.1 % et 0.2 % par rapport au volume du béton de sable, en présentant deux dimensions 2 cm et 6 cm.

4.7.1 Maniabilité

Le béton de sable fibré présente une maniabilité plus élevée par rapport au BS 0/0. La maniabilité optimale ($E = 18,25$ cm) est observée dans la composition C4 forte dosage et longueur de fibres (0,2%, 6 cm). Cette élévation est due à l'état saturé des fibres du palmier qui favorise la présence d'eau libre dans le mélange. Cependant, plusieurs études ont montré que l'ajout des fibres à l'état sec dans la matrice cimentaire affecte la maniabilité [115].

RÉSULTATS ET DISCUSSION

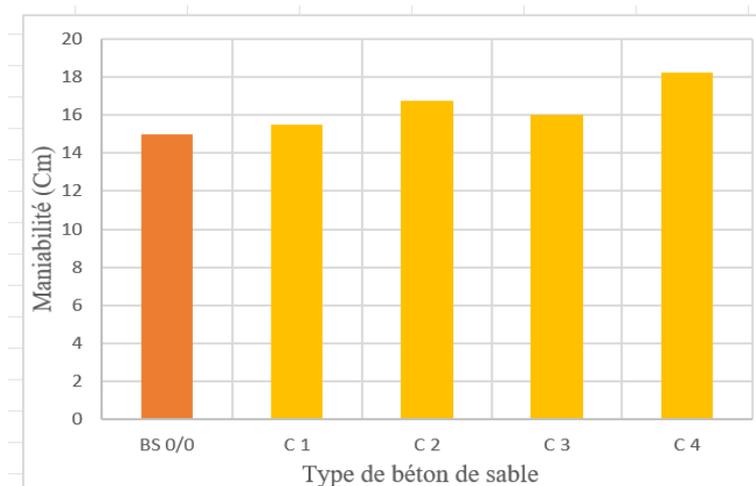


Figure 4.23: Maniabilité des bétons de sable fibrés

4.7.2 Densité

La densité des bétons de sable fibrés à 28 jours est toujours inférieure par rapport au celle du BS 0/0. Les mélanges C1 et C4 affichent une densité inférieure d'environ 0,4 % et 0,9 % respectivement en comparaison de BS 0/0. Ces résultats sont confirmés par Benaniba et al. [116], Campos et al. [117] et Taoukil et al. [118].

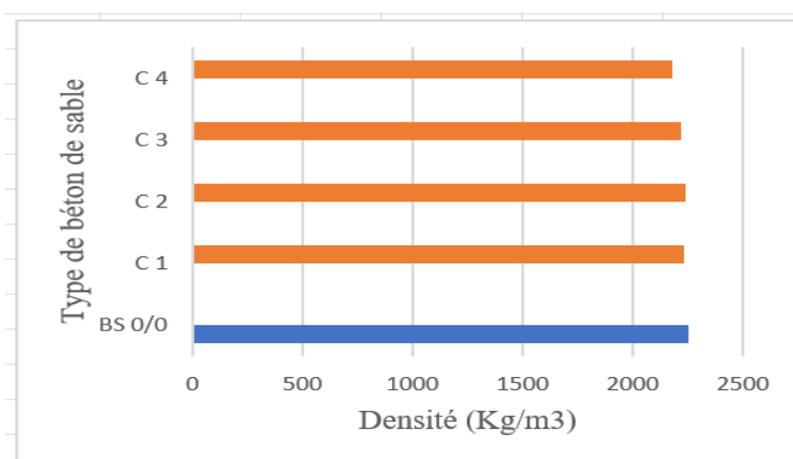


Figure 4.24: Densité du béton de sable fibré après 28 jours

4.7.3 Résistance à la compression

Les résultats de la résistance à la compression du béton de sable fibrés sont illustrés dans la figure 4.26. une diminution progressive de la résistance du béton de sable fibré par rapport au BS 0/0, des études similaires affirment l'ajout des fibres végétales réduit la résistance à la compression du béton [119], [120] et [121].

RÉSULTATS ET DISCUSSION

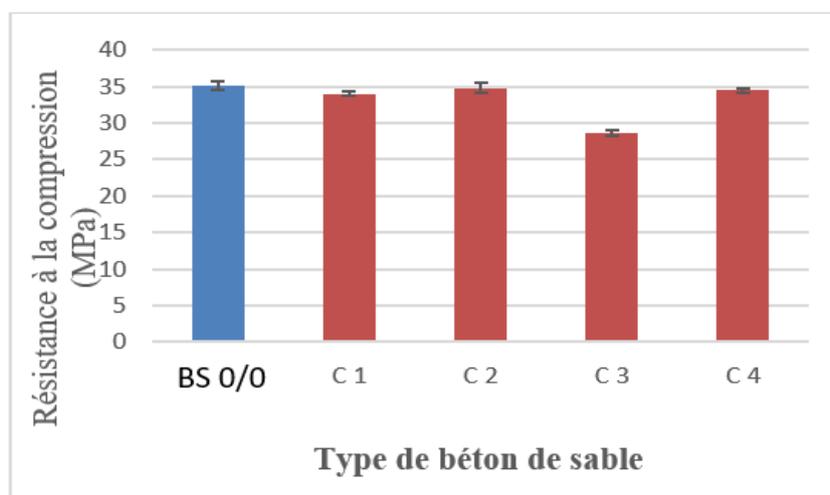


Figure 4.25: Résistance à la compression du béton de sable fibré

4.7.4 Résistance à la flexion

Selon la figure 4.26, il y a une amélioration significative de la résistance à la flexion du béton de sable fibré par rapport au béton de référence BS 0/0, la valeur optimale a été enregistrée dans la composition C4 (0.2% et 6 cm FPD), elle est élevée de 42% par rapport au BS 0/0. Généralement l'incorporation de fibres végétales est cruciale pour accroître la résistance à la flexion des matériaux cimentaires [122], [123], [119] et [124].

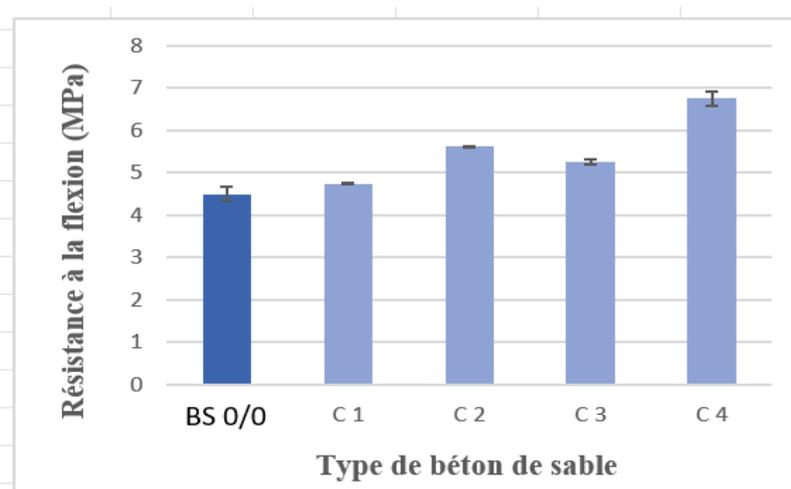


Figure 4.26: Résistance à la flexion du béton de sable fibré

4.7.5 Absorption par immersion

Selon la figure 4.27 il est clair que le béton de sable fibré présente un potentiel d'absorption d'eau supérieure par rapport au béton de sable témoin. L'absorption des compositions C1, C3 et C4 est plus élevée que celle du béton témoin de 67%, 87% et 64% respectivement. L'augmentation de l'absorption d'eau est attribuable à la nature lignocellulosique des fibres, qui

RÉSULTATS ET DISCUSSION

peuvent absorber jusqu'à 300 % de leur masse sèche pendant le mélange ou le durcissement. Cette propriété favorise la formation de microfissures dans la matrice cimentaire, entraînant ainsi un taux d'absorption d'eau plus élevé [125], Ibrahim et al [126] ont signalé une augmentation de l'absorption avec 4,9 %, 21 % et 30,5 % pour les bétons à base de 1 %, 2 % et 3 % de fibres traitées au NaOH respectivement. Ce traitement a notablement réduit la teneur en lignine et en hémicellulose des fibres ce qui peut entraîner un gonflement de leur épaisseur en raison de l'accumulation d'eau dans les parois cellulaires.

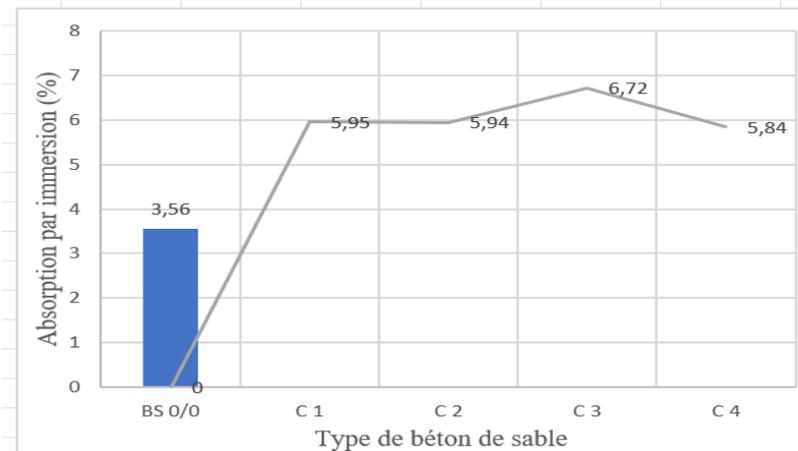


Figure 4.27: Absorption par immersion du béton de sable fibré

4.7.6 Sorptivité

La figure 4.28 montre une élévation progressive de la sorptivité avec 75% a été enregistré dans la composition C2 en comparaison avec le BS 0/0. L'ajout de fibres au béton crée une porosité supplémentaire à l'interface entre les fibres et la matrice cimentaires [127], [128]. Ceci explique l'augmentation de l'absorption capillaire, ces résultats sont en accord avec les références [129], [130] et [131].

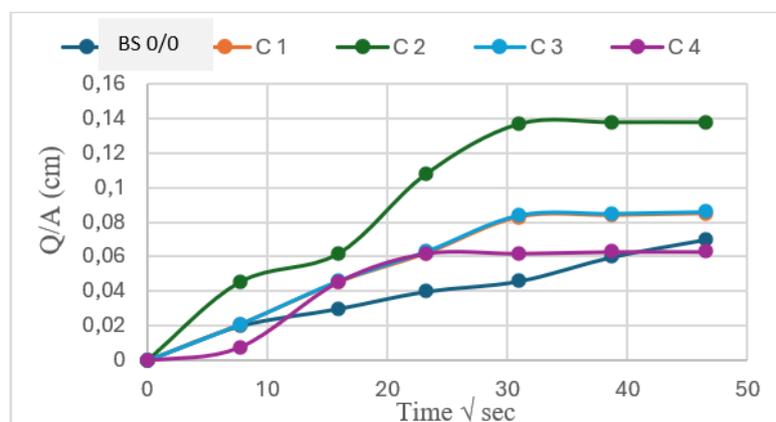


Figure 4.28: Sorptivité des bétons de sable fibrés (BS/FPD)

RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.7.7 La vitesse d'ultrason

La figure 4.29 montre que les bétons de sable fibrés présentent une diminution légère mais notable des valeurs la vitesse d'impulsion ultrasonique (VIU), atteignant jusqu'à 2 % par rapport au béton de sable standard. Les fibres saturés (superficiellement sèches) renferment une quantité d'eau qui ralentit les VIU. Des similaires études Althoey et al [132] Ont signalé diminution de la vitesse ultrasonique du béton en fonction de l'augmentation du pourcentage des fibres végétales.

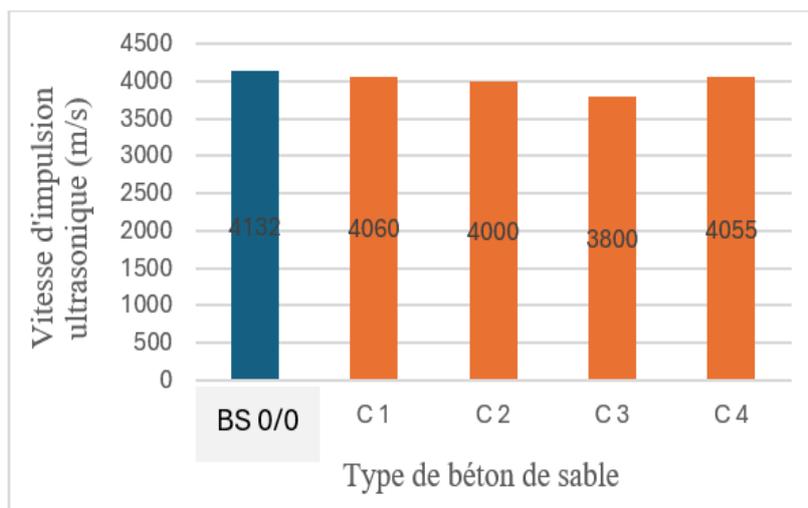


Figure 4.29: Vitesse ultrasonique du béton de sable fibré

4.7.8 Optimisation des résistances mécaniques

Pour déduire les facteurs les plus influents (quantité de fibres, longueur des fibres) et réaliser une modélisation précise et par suite faire une optimisation on a utilisé un plan factoriel complet 2². A partir des données expérimentales, les analyses ont été réalisés à partir du logiciel JMP 16 pour évaluer les résistances mécaniques du béton de sable fibré.

4.7.8.1 Modèle mathématique

Le modèle de régression linéaire a été généré à partir des données expérimentales, comme le montrent les équations (4.3) et (4.4) ci-dessous. Les équations représentent de manière adéquate la relation entre les paramètres indépendants (LF, PF) et les réponses. En outre, les résistances du béton de sable fibré ont été prédites avec un coefficient de détermination $R^2= 1$.

$$R_{C\ 28j} \text{ (MPa)} = 32.94 + 1.655*LF -1.43*PF + 1.285 LF*PF \quad (4.3)$$

$$R_{f\ t\ 28j} \text{ (MPa)} = 5.595+ 0.59*LF+ 0.41*PF+ 0.155 LF*PF \quad (4.4)$$

RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.7.8.2 Effets principaux

La figure 4.30 présente le facteur le plus influent sur la résistance mécanique du béton de sable, l'effet principal exprime l'importance des effets de chaque facteur. L'amplitude positive indique que la réponse augmente avec des niveaux plus élevés de ce dernier [133].

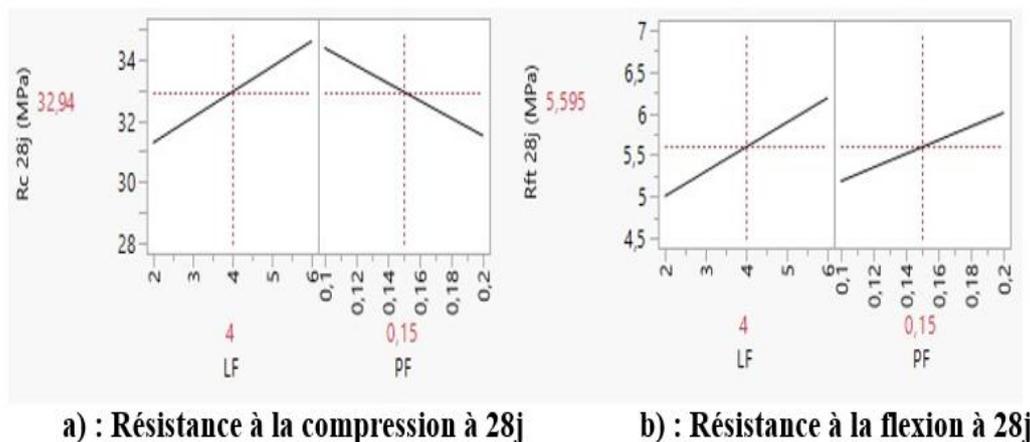


Figure 4.30: Effets principaux des résistances mécaniques à 28j

4.7.8.3 L'effet d'interaction

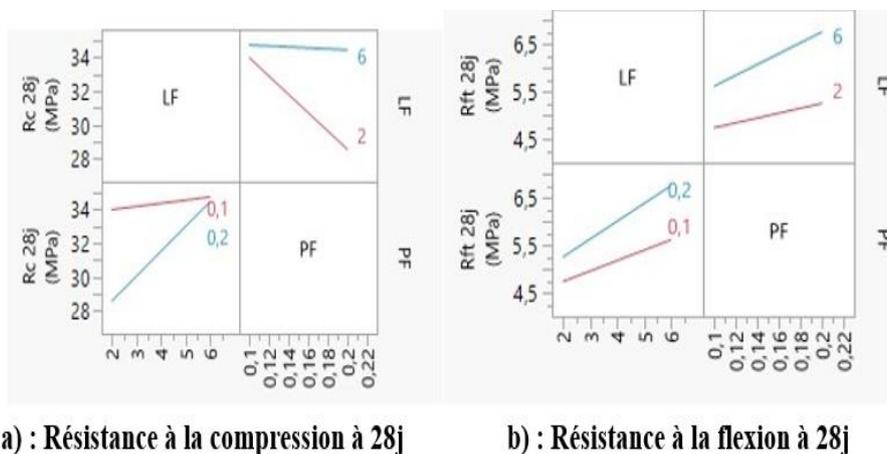


Figure 4.31: Effet d'interaction des résistances mécaniques à 28j

L'effet d'interaction se produit lorsque l'effet d'une variable indépendante change en fonction du niveau d'une autre variable indépendante. En d'autres termes, il indique les effets interactifs combinés de deux paramètres, lorsque la réponse d'un paramètre (de faible à élevé) dépend du niveau d'un second paramètre. En outre, il a été démontré graphiquement que lorsque deux lignes représentant deux paramètres sont parallèles, Il n'existe pas d'interaction entre ces deux facteurs (cas de la résistance à la flexion).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.7.8.4 Profileur de surface

La figure 4.32 montre que la résistance à la compression maximale est atteinte lorsque le niveau de LF est plus élevé et que la résistance minimale est obtenue lorsque le niveau de PF est maximal. Cependant, l'optimale de la résistance à la flexion est atteint lorsque les deux facteurs (PF et LF) sont à le plus haut.

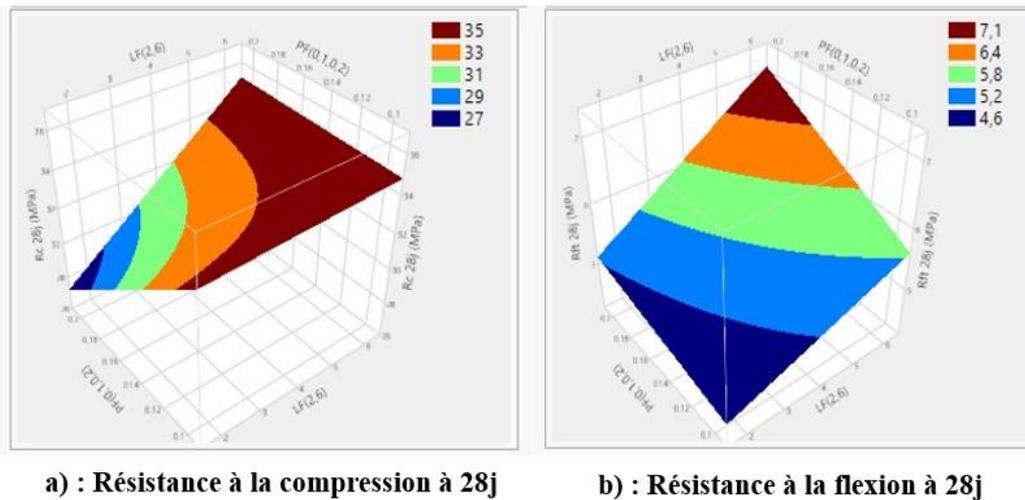


Figure 4.32: Profileurs de surface des résistance mécaniques

4.8 Conclusion

La présente étude vise à estimer l'effet des déchets recyclés (sable, fillers et fibres recyclés) sur la qualité du béton de sable à l'aide d'un plan d'expérience (plan factoriel complet et plan de mélange)

Les conclusions retenues confirment que :

- L'activité pouzzolannique des BR améliorent la résistance à la compression du béton de sable notamment pour les mélanges (BS/50% BR et BS/ 100% BR), cependant les fillers de béton recyclés (FR) exercent une influence moins importante sur les caractéristiques du béton de sable.
- Le plan d'expérience est une méthode efficace pour estimer les effets des facteurs (Fc, FR et BR ou LF, PF et PFR), sur les caractéristiques mécaniques du béton de sable.

CONCLUSION
GÉNÉRALE ET
PERSPECTIVES

5 CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Cette étude vise à atteindre les objectifs mentionnés précédemment, la fabrication des bétons de sable durables et respectueux de l'environnement en utilisant des matériaux recyclés, d'abord en remplaçant les fillers naturels (calcaire) par des fillers recyclés (béton recyclé et débris de brique finement broyés) ensuite en remplaçant le sable naturel par des sables provenant du béton recyclé . Le renforcement de la matrice cimentaire du béton de sable est effectué par l'incorporation des fibres de palmiers dattiers dans sa composition. Selon la littérature, l'utilisation des déchets minéraux (sable et fillers recyclés) et des déchets végétaux (fibres de palmiers dattiers recyclés) ont un impact significatif sur les propriétés physiques et mécaniques du béton de sable, à la fois dans son état frais et durci.

L'attention s'est portée sur la caractérisation des matériaux de base utilisés et les méthodes expérimentales employées. Tous les matériaux utilisés dans cette étude ont été identifiés et les principales techniques expérimentales utilisées ont été exposées.

Les essais effectués ont également permis d'optimiser la composition des bétons de sable en utilisant des matériaux locaux de la région de Biskra. L'utilisation de la théorie des plans d'expériences permet une modélisation expérimentale des effets des paramètres étudiés (notamment les fillers de béton et de la brique recyclée, les fibres de palmiers dattiers), ainsi que l'évaluation de la qualité de cette modélisation. Les modèles mathématiques dérivés de l'application de cette approche statistique ont facilité la visualisation de l'impact de chaque facteur étudié sur les propriétés des bétons de sable.

À la suite des expérimentations menées, les résultats de cette étude expérimentale mettent en évidence les points suivants :

- La résistance à la compression du béton de sable recyclé atteint plus de 50 MPa à 180 jours.
- L'efficacité des fillers de la brique recyclée sur l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques en comparaison avec le filler du béton recyclé.
- La substitution du sable naturel par le sable recyclé affecte le comportement du béton à l'état frais ; en revanche à l'état durci les résistances en compression sont comparables par rapport au béton de sable témoin.

CONCLUSION GÉNÉRALE

- L'utilisation de l'approche de plan factoriel complet 2^2 et l'approche du plan de mélange dans cette expérimentation s'est avérée être une méthode efficace pour examiner les impacts des deux facteurs (cas de plan factoriel 2^2) et des trois facteurs (cas du plan de mélange) dans les systèmes binaires et ternaires respectivement sur les caractéristiques physiques et mécaniques des bétons de sable.
- Les données recueillies lors des tests réalisés nous ont permis d'établir des modèles prédictifs pour l'ouvrabilité, la résistance à la compression et à la flexion à 28 jours.
- Les bétons de sable fibrés présentent une amélioration estimée de 42% de la résistance à la flexion par rapport au béton de sable témoin.

Les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse ouvrent de nombreuses perspectives, que l'on peut résumer en :

- Il est nécessaire d'approfondir l'étude expérimentale du comportement physico-mécanique des bétons de sable à base des produits recyclés afin de comprendre et de justifier leurs performances relatives en termes de durabilité face aux attaques chimiques agressives.
- Augmenter le dosage de fibres, analyser leur effet et étudier l'impact du traitement des fibres sur les propriétés du béton de sable.

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

6 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] S. Benamar, Z. E. A. Kameche, Y. Houmadi, and S. M. Aissa Mamoune, “Etude de comportement physique et mecanique des mortiers a base de dechet de brique,” *Commun. Sci. Technol.*, vol. 11, no. 2, pp. 9–22, 2022.
- [2] C. Settari, F. Debieb, E. H. Kadri, and O. Boukendakdji, “Assessing the effects of recycled asphalt pavement materials on the performance of roller compacted concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 101, pp. 617–621, 2015.
- [3] M. A. Kethiri, N. Belghar, M. Chikhi, Y. Boutera, C. Beldjani, and C. Tedeschi, “Experimental study on the effect of date palm powder on the thermal and physico-mechanical properties of gypsum mortars,” *Sustainability*, vol. 16, no. 7, p. 3015, 2024.
- [4] R. Universit, B. Universit, D. E. Universit, and B. E. Universit, “Doctorat en Génie Civil Etude de l ’ influence de la granulométrie et de la nature des granulats recyclés sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité des bétons par la méthode des plans d ’ expériences .”, <http://thesis.univ-biskra.dz/5954/1>
- [5] A. Zri, “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,” Lille 1, 2010.
- [6] P. SABLOCRETE, “Presse de l’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées,” *Bét. sable, Caractéristiques Prat. d’utilisation. Ed. Assoc. Amicale des Ingénieurs Anciens Elèves L’Ecole Natl. des Ponts Chaussées*, 1994.
- [7] J. J. Chauvin, “Béton de sable en Union Soviétique,” *Bull. liaison des Lab. des ponts chaussées*, vol. 174, pp. 61–69, 1991.
- [8] A. Belferrag, “Contribution à l’amélioration des propriétés mécaniques et rhéologiques des bétons de sable de dunes,” Université Mohamed Khider-Biskra, 2016.
- [9] K. GADRI, “Etude Expérimentale Sur La Compatibilité Déformationnelle Des Réparations En Béton De Sable,” Université Mohamed Khider-Biskra, 2018.
- [10] I. Joudi-Bahri, A. Lecomte, M. Ben Ouezdou, and T. Achour, “Use of limestone sands and fillers in concrete without superplasticizer,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 6, pp. 771–780, 2012.

- [11] P. Diederich, “Contribution à l’étude de l’influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton,” Toulouse 3, 2010.
- [12] A. Benaïssa, P. Morlier, and V. Tram, “Le béton de sable un matériau non fissurant,” *Rev. Algérie Equip.*, vol. 66, pp. 7–11, 1992.
- [13] H. S. Mueller and M. Haist, “FIB, structural concrete. textbook on behaviour, design and performance—updated knowledge of the CEB/FIP Model Code 1990,” *fib Bull.*, vol. 1, pp. 35–95, 2009.
- [14] P. Casanova, “Bétons renforcés de fibres métalliques-du matériau à la structure,” *ETUDES Rech. DES Lab. DES PONTS CHAUSSEES-SERIE OUVRAGES D’ART*, no. OA20, 1996.
- [15] S. Melais, M. F. Bouali, A. Melaikia, and A. Amirat, “Effects of coarse sand dosage on the physic-mechanical behavior of sand concrete,” *Frat. ed Integrità Strutt.*, vol. 15, no. 56, pp. 151–159, 2021.
- [16] K. Gadri and A. Guettala, “Evaluation of bond strength between sand concrete as new repair material and ordinary concrete substrate (The surface roughness effect),” *Constr. Build. Mater.*, vol. 157, pp. 1133–1144, 2017.
- [17] S. A. Al-Saleh, “Comparison of theoretical and experimental shrinkage in concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 72, pp. 326–332, 2014.
- [18] S. E. E. Khay, A. J. Slaoui, and J. Nejif, “PROPOSITION D’UN NOUVEAU BÉTON POUR LES STRUCTURES DE BÂTIMENT/PROPOSAL OF A NEW CONCRETE BUILDING STRUCTURES,” in *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics*, 2014, p. 55.
- [19] A. Benaïssa, P. Morlier, and C. Viguiier, “Microstructure du béton de sable,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 23, no. 3, pp. 663–674, 1993.
- [20] S. née Ouis, “Etude comparative entre les comportements mecaniques des beton ordinaire et beton de sable en compression mono-axiale,” Oran, Université Mohamed Boudiaf. Faculté de Génie Civile et d’Architecture, 2000.
- [21] O. Bourzik, K. Baba, N. Akkouri, and A. Nounah, “Effect of waste marble powder on the properties of concrete,” *Mater. Today Proc.*, vol. 72, pp. 3265–3269, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2022.07.184.

- [22] S. Cheng, Z. Shui, T. Sun, R. Yu, and G. Zhang, “Durability and microstructure of coral sand concrete incorporating supplementary cementitious materials,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 171, pp. 44–53, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.082.
- [23] C. Jiang, W. Guo, H. Chen, Y. Zhu, and C. Jin, “Effect of filler type and content on mechanical properties and microstructure of sand concrete made with superfine waste sand,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 192, pp. 442–449, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.167.
- [24] M. Djouhri, M. T. Bentebba, and N. Kebaili, “Influence des milieux de conservation sur les propriétés physico-mécaniques de béton de sable de dunes,” no. 1, 2019.
- [25] M. Mani, M. F. Bouali, A. Kriker, and A. Hima, “Experimental characterization of a new sustainable sand concrete in an aggressive environment,” *Frat. ed Integrità Strutt.*, vol. 15, no. 55, pp. 50–64, 2021.
- [26] R. Ben Othman, S. El Euch Khay, A. Loulizi, and J. Neji, “Laboratory evaluation of an ecological pavement construction material: Sand concrete reinforced with polypropylene fibres,” *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 23, no. 3, pp. 287–299, 2019.
- [27] T. Bouziani, A. Benmounah, Z. Makhloufi, M. Bédérina, M. Queneudec T’kint, and M. Queneudec Tkint, “Properties of flowable sand concretes reinforced by polypropylene fibers,” *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 28, no. 18, pp. 1823–1834, 2014, doi: 10.1080/01694243.2014.924176.
- [28] B. MOHAMED, “Étude des Propriétés Rhéologiques et Physico-mécaniques du Béton de Sable avec Référence particulière au Sable de Dune,” 2012.
- [29] G. CHAUVIN, J.-J1 ; GRIMALDI, “Les bétons de sable,” *Bull. liaison des Lab. des ponts chaussées(157) 9-15.*, 1988.
- [30] I. Benaissa, B. Nasser, S. Aggoun, and S. Malab, “Properties of fibred sand concrete sprayed by wet-mix process,” *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 40, pp. 2289–2299, 2015.
- [31] S. E. E. Khay, J. Neji, and A. Loulizi, “Shrinkage properties of compacted sand concrete used in pavements,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 9, pp. 1790–1795, 2010.
- [32] R. Kettab, A. Ghrieb, and A. Bali, “A study of dune sand concrete for aeronautical runways,” in *Recycling and Reuse of Waste Materials*, no. June, Thomas Telford Publishing, 2003, pp. 491–498.

- [33] M. SALL and G. A. TKACHENKO, “AMELIORATION DE LA DURABILITE DU BETON DE SABLE POUR REVETEMENT ROUTIER EN CLIMAT CHAUD ET SEC”.
- [34] K. Belmokretar, A. Kada, D. E. KERDAL, M. MOULI, and N. LEKLOU, “Evaluation de l’adhérence entre un béton de sable auto-plaçant comme nouveau matériau de réparation cimentaire et les substrats en béton, par un test d’arrachement direct,” *Acad. J. Civ. Eng.*, vol. 41, no. 4, pp. 36–44, 2023.
- [35] M. Bederina, B. Laidoudi, A. Goullieux, M. M. Khenfer, A. Bali, and M. Quéneudec, “Effect of the treatment of wood shavings on the physico-mechanical characteristics of wood sand concretes,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 3, pp. 1311–1315, 2009.
- [36] M. Hadjoudja, M. M. Khenfer, H. A. Mesbah, A. Yahia, and et al. Hadjoudja, M., M. Khenfer, “Statistical models to optimize fiber-reinforced dune sand concrete,” *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 39, pp. 2721–2731, 2014.
- [37] D. Benamara and L. Zeghichi, “Béton De Sable Haute Performance : Formulation , Et Durabilité,” *Ann. du bâtiment des Trav. publics*, p. 90, 2015.
- [38] H. Ben Salah, “Etudes des propriétés physico-mécaniques et durabilité d’un béton de sable à haute performance : expérimentation et statistique,” 2022.
- [39] H. PAULUS, M. Jagueneau, R. Lafon, and O. Waterblez, “Dosage rapide sur site des sulfates dans les granulats recyclés issus du BTP,” *Environnement, Ingénierie & Développement*, vol. N°71-oct, no. 1, pp. 17–24, 2016, doi: 10.4267/dechets-sciences-techniques.3401.
- [40] B. Wang, L. Yan, Q. Fu, and B. Kasal, “A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 171, no. May, p. 105565, 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105565.
- [41] N. D. Oikonomou, “Recycled concrete aggregates,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 27, no. 2, pp. 315–318, 2005.
- [42] R. Wang, N. Yu, and Y. Li, “Methods for improving the microstructure of recycled concrete aggregate: A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 242, p. 118164, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118164.
- [43] N. Kisku, H. Joshi, M. Ansari, S. K. Panda, S. Nayak, and S. C. Dutta, “A critical review

- and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 131, pp. 721–740, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.029.
- [44] L. W. Zhang, A. O. Sojobi, V. K. R. Kodur, and K. M. Liew, “Effective utilization and recycling of mixed recycled aggregates for a greener environment,” *J. Clean. Prod.*, vol. 236, p. 117600, 2019.
- [45] S. Marinković, V. Radonjanin, M. Malešev, and I. Ignjatović, “Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete,” *Waste Manag.*, vol. 30, no. 11, pp. 2255–2264, 2010.
- [46] M. L. Berndt, “Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 7, pp. 2606–2613, 2009.
- [47] M. Aria and C. Cuccurullo, “bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis,” *J. Informetr.*, vol. 11, no. 4, pp. 959–975, 2017.
- [48] K. Van Nunen, J. Li, G. Reniers, and K. Ponnet, “Bibliometric analysis of safety culture research,” *Saf. Sci.*, vol. 108, pp. 248–258, 2018.
- [49] O. S. Oshodi, B. O. Awuzie, J. Akotia, A. S. Ademiloye, and A. Ngowi, “A bibliometric analysis of recycled concrete research (1978--2019),” *Built Environ. Proj. Asset Manag.*, vol. 10, no. 5, pp. 725–736, 2020.
- [50] Alan D. Buck, “Recycled Concrete Aggregate As a Source of Aggregate,” 1976.
- [51] E. E. Anike, M. Saidani, E. Ganjian, M. Tyrer, and A. O. Olubanwo, “The potency of recycled aggregate in new concrete: a review,” *Constr. Innov.*, vol. 19, no. 4, pp. 594–613, 2019.
- [52] H. Zhang, Y. Wang, D. E. Lehman, Y. Geng, and K. Kuder, “Time-dependent drying shrinkage model for concrete with coarse and fine recycled aggregate,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 105, no. September 2019, p. 103426, 2020, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2019.103426.
- [53] Y. Abriak, “Valorisation des sédiments de dragage et des granulats de béton recyclés,” Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Lille Douai, 2023.
- [54] K. HADDAD, “Caractérisation des paramètres influençant la durabilité des matériaux

- cimentaires à base de matériaux de recyclages,” Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Algérie, 2018.
- [55] K. P. Verian, W. Ashraf, and Y. Cao, “Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 133, pp. 30–49, 2018.
- [56] V. W. Y. Tam, X. F. Gao, C. M. Tam, and C. H. Chan, “New approach in measuring water absorption of recycled aggregates,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 3, pp. 364–369, 2008.
- [57] A. Rao, “Experimental investigation on use of recycled aggregates in mortar and concrete,” *Civ. Eng. Dep. Eng. Indian Inst. Technol. Kanpur, India.*, 2005.
- [58] M. Behera, S. K. Bhattacharyya, A. K. Minocha, R. Deoliya, and S. Maiti, “Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete--A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 68, pp. 501–516, 2014.
- [59] C. S. Poon, Z. H. Shui, L. Lam, H. Fok, and S. C. Kou, “Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 1, pp. 31–36, 2004.
- [60] T. C. Hansen and H. Narud, “Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate,” *Concr. Int.*, vol. 5, no. 1, pp. 79–83, 1983.
- [61] J. Li, “Study on mechanical behavior of recycled aggregate concrete,” 2004.
- [62] I. B. Topcu and S. Sengel, “Properties of concretes produced with waste concrete aggregate,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 8, pp. 1307–1312, 2004.
- [63] S. W. Tabsh and A. S. Abdelfatah, “Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 2, pp. 1163–1167, 2009.
- [64] B. A. Whiting, T. J. McCarthy, and E. Lume, “Drying shrinkage of concrete made from recycled concrete aggregate,” 2012.
- [65] Z. H. Duan and C. S. Poon, “Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars,” *Mater. & Des.*, vol. 58, pp. 19–29, 2014.

- [66] M. B. Leite and P. J. M. Monteiro, “Microstructural analysis of recycled concrete using X-ray microtomography,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 81, pp. 38–48, 2016.
- [67] M. Nedeljković, J. Visser, B. Šavija, S. Valcke, and E. Schlangen, “Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review,” *J. Build. Eng.*, vol. 38, no. May 2020, 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.102196.
- [68] T. Celik and K. Marar, “Effects of crushed stone dust on some properties of concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 26, no. 7, pp. 1121–1130, 1996.
- [69] J. M. V Gómez-Soberón, “Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, no. 8, pp. 1301–1311, 2002.
- [70] C. Neno, J. De Brito, and R. Veiga, “Using Fine Recycled Concrete Aggregate for Mortar Production 2 . Literature Review 3 . Sequence of Testing,” *Mater. Res.*, vol. 17, no. 1, pp. 168–177, 2014.
- [71] M. M. Atyia, M. G. Mahdy, and M. Abd Elrahman, “Production and properties of lightweight concrete incorporating recycled waste crushed clay bricks,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 304, p. 124655, 2021.
- [72] A. Schackow, D. Stringari, L. Senff, S. L. Correia, and A. M. Segadães, “Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 62, pp. 82–89, 2015, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2015.04.019.
- [73] Z. Ge, Y. Wang, R. Sun, X. Wu, and Y. Guan, “Influence of ground waste clay brick on properties of fresh and hardened concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 98, pp. 128–136, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.100.
- [74] Z. He *et al.*, “Research progress on recycled clay brick waste as an alternative to cement for sustainable construction materials,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 274, p. 122113, 2021.
- [75] U. Sharma, N. Gupta, and K. K. Saxena, “Comparative study on the effect of industrial by-products as a replacement of cement in concrete,” *Mater. Today Proc.*, vol. 44, no. xxxx, pp. 45–51, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.06.211.
- [76] Z. Duan, S. Hou, J. Xiao, and B. Li, “Study on the essential properties of recycled powders from construction and demolition waste,” *J. Clean. Prod.*, vol. 253, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119865.

- [77] R. Liu, “Experimental Study on the Construction Waste Clay Brick Powder as Active Admixture,” 2017.
- [78] C. Z. Xue, A. Q. Shen, Y. T. Chang, and D. Liang, “The study of the construction waste brick powder’s activity,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 1079, pp. 309–311, 2015.
- [79] A. Naceri and M. C. Hamina, “Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar,” *Waste Manag.*, vol. 29, no. 8, pp. 2378–2384, 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2009.03.026.
- [80] R. Belakroum *et al.*, “Design and properties of a new sustainable construction material based on date palm fibers and lime,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 184, pp. 330–343, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.196.
- [81] et al Al-Khayri, J. M., P. M. Naik, “Advances in date palm (*Phoenix dactylifera* L.) breeding,” *Adv. Plant Breed. Strateg. Fruits*, vol. 3, pp. 727–771, 2018.
- [82] S. O. Bamaga, “Physical and mechanical properties of mortars containing date palm fibers,” *Mater. Res. Express*, vol. 9, no. 1, p. 15102, 2022.
- [83] A. O. KM Al-Fuhaid, A Al-Afalique, “The famous date varieties in the kingdom of Saudi Arabia,” vol. 13, pp. 1–39, 2006.
- [84] L. I. El-Juhany, “Surveying of lignocellulosic agricultural residues in some major cities of Saudi Arabia,” *Res. Bull.*, vol. 1, no. 100, pp. 50–53, 2001.
- [85] A. Djoudi, M. M. Khenfer, A. Bali, and T. Bouziani, “Effect of the addition of date palm fibers on thermal properties of plaster concrete: Experimental study and modeling,” *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 28, no. 20, pp. 2100–2111, 2014, doi: 10.1080/01694243.2014.948363.
- [86] A. A. Wazzan, “The effect of surface treatment on the strength and adhesion characteristics of phoenix *dactylifera*-L(date palm) fibers,” *Int. J. Polym. Mater. Polym. Biomater.*, vol. 55, no. 7, pp. 485–499, 2006, doi: 10.1080/009140391001804.
- [87] M. Adamu, F. Alanazi, Y. E. Ibrahim, H. Alanazi, and V. C. Khed, “A Comprehensive Review on Sustainable Natural Fiber in Cementitious Composites: The Date Palm Fiber Case,” *Sustain.*, vol. 14, no. 11, pp. 1–31, 2022, doi: 10.3390/su14116691.
- [88] https://www.jmp.com/fr_fr/software.html, “Logiciel JMP”.

- [89] J. Goupy, “Les plans d’expériences,” *Rev. Modul.*, no. 34, pp. 74–116, 2006.
- [90] J. Goupy, “Tutoriel: Les plans d’expériences,” *Rev. Modul.*, p. 43, 2006, [Online]. Available:
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Tutoriel+LES+PLANS+D+?+EXPERIENCES#0%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Tutoriel+LES+PLANS+D+?+EXPERIENCES#0>
- [91] J. Goupy, *Application des plans d’expériences*. Dunod, Paris, 2003.
- [92] Goupy J. et Creighton L, *Introduction aux plans d’expériences*. Dunod, Paris, 2006.
- [93] M. Westerholm, “Rheology of the mortar phase of concrete with crushed aggregate,” Luleåtekniska universitet, 2006.
- [94] H. Justnes and S. Ng, “Concrete Admixtures--Interactions with Cement, Supplementary Cementing Materials and Fillers,” in *3rd International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete*, 2014, p. 136.
- [95] I. Irki, F. Debieb, S. Ouzadid, H. L. Dilmi, C. Settari, and D. Boukhelkhel, “Effect of Blaine fineness of recycling brick powder replacing cementitious materials in self compacting mortar,” *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 9, pp. 963–975, 2018, doi: 10.1080/01694243.2017.1393202.
- [96] Y. Zhao, J. Gao, C. Liu, X. Chen, and Z. Xu, “The particle-size effect of waste clay brick powder on its pozzolanic activity and properties of blended cement,” *J. Clean. Prod.*, vol. 242, p. 118521, 2020.
- [97] Z. Ma, Q. Tang, H. Wu, J. Xu, and C. Liang, “Mechanical properties and water absorption of cement composites with various fineness and contents of waste brick powder from C&D waste,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 114, p. 103758, 2020, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103758.
- [98] P. Rovnan^{\`}ik, B. \vRezn^{\`}ik, and P. Rovnan^{\`}iková, “Blended alkali-activated fly ash/brick powder materials,” *Procedia Eng.*, vol. 151, pp. 108–113, 2016.
- [99] H. Donza, O. Cabrera, and E. F. Irassar, “High-strength concrete with different fine aggregate,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, no. 11, pp. 1755–1761, 2002.
- [100] O. M. Olofinnade, A. N. Ede, J. M. Ndambuki, and G. Bamigboye, “Structural properties

- of concrete containing ground waste clay brick powder as partial substitute for cement,” in *Materials Science Forum*, 2016, pp. 63–67.
- [101] Z. Zhao, S. Remond, D. Damidot, and W. Xu, “Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 81, pp. 179–186, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.037.
- [102] M. U. Rani and J. M. Jenifer, “Mechanical Properties of Concrete with Partial replacement of Portland Cement by Clay brick powder,” *IJERT--International J. Eng. Res. Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 181–2278, 2016.
- [103] S. Kenai and F. Debieb, “Caractérisation de la durabilité des bétons recyclés à base de gros et fins granulats de briques et de béton concassés,” *Mater. Struct. Constr.*, vol. 44, no. 4, pp. 815–824, 2011, doi: 10.1617/s11527-010-9668-7.
- [104] S. M. Levy and P. Helene, “Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 11, pp. 1975–1980, 2004.
- [105] E. Wirquin, R. Hadjieva-Zaharieva, and F. Buyle-Bodin, “Use of water absorption by concrete as a criterion of the durability of concrete-application to recycled aggregated concrete,” *Mater. Struct.*, vol. 33, pp. 403–408, 2000.
- [106] L. Evangelista and J. de Brito, “Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 32, no. 1, pp. 9–14, 2010, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.09.005.
- [107] S. Donatello, M. Tyrer, and C. R. Cheeseman, “Comparison of test methods to assess pozzolanic activity,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 32, no. 2, pp. 121–127, 2010.
- [108] M. Chakradhara Rao, “Influence of brick dust, stone dust, and recycled fine aggregate on properties of natural and recycled aggregate concrete,” *Struct. Concr.*, vol. 22, pp. E105–E120, 2021.
- [109] R. Kumar, S. C. B. Gurram, and A. K. Minocha, “Influence of recycled fine aggregate on microstructure and hardened properties of concrete,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 69, no. 24, pp. 1288–1295, 2017.
- [110] J. Thomas, N. N. Thaickavil, and P. M. Wilson, “Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates,” *J. Build. Eng.*, vol. 19, pp. 349–365, 2018.

- [111] T. C. Hansen, *Recycling of demolished concrete and masonry*. CRC Press, 1992.
- [112] K. Haddad, O. Haddad, S. Aggoun, and S. Kaci, “Correlation between the porosity and ultrasonic pulse velocity of recycled aggregate concrete at different saturation levels,” *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 44, no. 11, pp. 911–917, 2017.
- [113] R. V Silva, J. De Brito, and R. K. Dhir, “Tensile strength behaviour of recycled aggregate concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 83, pp. 108–118, 2015.
- [114] W. H. Kwan, M. Ramli, K. J. Kam, and M. Z. Sulieman, “Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 26, no. 1, pp. 565–573, 2012.
- [115] A. M. Neville and J. J. Brooks, *Concrete technology*, vol. 438. Longman Scientific & Technical England, 1987.
- [116] S. Benaniba, Z. Driss, M. Djendel, E. Raouache, and R. Boubaaya, “Thermo-mechanical characterization of a bio-composite mortar reinforced with date palm fiber,” *J. Eng. Fiber. Fabr.*, vol. 15, p. 1558925020948234, 2020.
- [117] A. Campos *et al.*, “Morphological, mechanical properties and biodegradability of biocomposite thermoplastic starch and polycaprolactone reinforced with sisal fibers,” *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 31, no. 8, pp. 573–581, 2012.
- [118] D. Taoukil, A. El Bouardi, T. Ajzoul, and H. Ezbakhe, “Effect of the incorporation of wood wool on thermo physical proprieties of sand mortars,” *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 16, pp. 1003–1010, 2012.
- [119] M. S. Ammari, B. Belhadj, M. Bederina, A. Ferhat, and M. Quéneudec, “Contribution of hybrid fibers on the improvement of sand concrete properties: Barley straws treated with hot water and steel fibers,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 233, p. 117374, 2020.
- [120] M. Bederina, T. Bouziani, M. Khenfer, and M. Queneudec, “Water absorption and its effect on the durability of sand concrete lightened by the addition of wood shavings,” in *MATEC Web of Conferences*, 2012.
- [121] L. M. Zhou, Y. W. Mai, L. Ye, and J. K. Kim, “Techniques for evaluating interfacial properties of fibre-matrix composites,” *Key Eng. Mater.*, vol. 104, pp. 549–600, 1995.
- [122] L. Nilsson, “Reinforcement of concrete with sisal and other vegetable fibres,” *NASA*

STI/Recon Tech. Rep. N, vol. 76, p. 30405, 1975.

- [123] D. G. Swift and R. B. L. Smith, *Sisal fibre reinforcement of cement paste and concrete*. 1978.
- [124] O. Z. Jaradat, K. Gadri, B. A. Tayeh, and A. Guettalaa, “Influence of sisal fibres and rubber latex on the engineering properties of sand concrete,” *Struct. Eng. Mech.*, vol. 80, no. 1, pp. 47–62, 2021.
- [125] N. Benmansour, B. Agoudjil, A. Gherabli, A. Kareche, and A. Boudenne, “Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building,” *Energy Build.*, vol. 81, pp. 98–104, 2014.
- [126] Y. E. Ibrahim, M. Adamu, M. L. Marouf, O. S. Ahmed, Q. A. Drmosh, and M. A. Malik, “Mechanical performance of date-palm-fiber-reinforced concrete containing silica fume,” *Buildings*, vol. 12, no. 10, p. 1642, 2022.
- [127] T. Tioua, A. Kriker, G. Barluenga, and I. Palomar, “Influence of date palm fiber and shrinkage reducing admixture on self-compacting concrete performance at early age in hot-dry environment,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 154, pp. 721–733, 2017.
- [128] B. Haba, B. Agoudjil, A. Boudenne, and K. Benzarti, “Hygric properties and thermal conductivity of a new insulation material for building based on date palm concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 154, pp. 963–971, 2017.
- [129] M. Chikhi, “Young’s modulus and thermophysical performances of bio-sourced materials based on date palm fibers,” *Energy Build.*, vol. 129, pp. 589–597, 2016.
- [130] I. Yadegaran, M. Mahoutian, M. Shekarchi, and N. A. Libre, “106. Effect of polypropylene fibers on shrinkage of self-compacting concrete,” in *5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, 2007, pp. 707–713.
- [131] A. El Hilali, “Experimental study of the rheological behavior and self-compacting concrete (SCC): influence of limestone and fine plant fibers,” MSc thesis. France: University of Cergy Pontoise, 2009.
- [132] F. Althoey *et al.*, “Behavior of concrete reinforced with date palm fibers,” *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 22, p. 7923, 2022.
- [133] T. Krishnan and R. Purushothaman, “Optimization and influence of parameter affecting

the compressive strength of geopolymer concrete containing recycled concrete aggregate: using full factorial design approach,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, p. 12013.