



Université Mohamed Khider –Biskra
Faculté d'Architecture, de l'Urbanisme, de Génie Civil et de l'Hydraulique
Département de Génie civil et d'Hydraulique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies

Filière : génie civil

Spécialité : matériaux en génie civil

Réf. :

Présenté et soutenu par :
MENACER Mostapha.
Le: mercredi 4 juin 2025

Formulation et caractérisation d'un béton de sable contenant de la cendre des déchets des palmiers dattiers.

Jury :

Encadreur : Dr. GADRI Karima.

Année universitaire : 2024 - 2025

Dédicace

Je dédie ce modeste travail, accompli avec fierté et gratitude,

*à mes chers parents, clés du paradis et lumière de mon
chemin,*

à ma chère épouse, mon soutien fidèle dans chaque étape,

*à mes enfants, source de joie et de fierté,
à tous les membres de ma famille, pour leur présence
constante,*

et à tous mes amis, avec mes salutations les plus sincères

Remerciements

Louange à Dieu, grâce à dont les bonnes actions s'accomplissent, et avec Son aide le travail est réalisé ; à Lui revient toute reconnaissance, du début à la fin.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements et ma profonde gratitude à ma directrice de recherche, Karima Gadri.

Je n'oublie pas non plus de remercier tous les enseignants qui nous ont accompagnés durant ces années d'études, et qui ont joué un rôle important dans notre formation scientifique et intellectuelle.

J'adresse également mes plus sincères remerciements aux membres du jury d'avoir bien voulu accepter d'évaluer ce modeste travail.

Je remercie de tout cœur tous ceux qui m'ont tendu la main, que ce soit de près ou de loin, par un mot, un conseil ou un encouragement. À vous tous, j'adresse ma profonde reconnaissance et mon respect.

À ma chère famille, mon épouse et mes enfants, merci du fond du cœur pour votre soutien, votre patience et votre encouragement constants.

À mes amis fidèles, merci pour votre courage à partager avec moi les moments de fatigue, de joie et de stress... Vous avez été et restez une part essentielle de cet accomplissement

ملخص

يأتي هذا العمل في إطار نهج استعادة النفايات الزراعية، وخاصة الرماد الناتج عن حرق نفايات النخيل، بهدف تطوير الخرسانة الرملية البيئية والاقتصادية والفعالة والمتينة. تم صياغة ستة تركيبات من الخرسانة الرملية بدون أو مع دمج رماد نفايات النخيل (DPD). يتم دمج الرماد كحشو؛ عن طريق استبدال حشو الحجر الجيري تدريجياً برماد DPD، بمعدلات استبدال متزايدة بنسبة 0%، 10%， 20%， 30%， 40% و50%. تم تقييم أداء الخرسانة من خلال سلسلة من الاختبارات: قابلية التشغيل، والكتافة، والامتصاص الكلوي والشعري، والمسامية المفترحة، والمقاومة الميكانيكية، والسلوك في البيئة الحمضية.

تظهر النتائج أن إضافة رماد DPD إلى الخرسانة الرملية مفید حتى حد معین، بین 10 و30٪ ما یسمح بالحصول على: كثافة جيدة، وتعزيز تدريجي للخصائص الميكانيكية ومقاومة أفضل للبيئات العدوانية (HCl و H_2SO_4).

الكلمات الرئيسية:

نفايات النخيل – الرماد – الرمل والخرسانة – الامتصاص – المتانة – الاكتناف

Résumé

Ce travail s'inscrit dans une démarche de valorisation des déchets agricoles, en particulier les cendres issues des déchets brûlés des palmiers dattiers, dans le but d'élaborer un béton de sable écologique et économique, à la fois performantes et durables. Six compositions de béton de sable ont été formulées sans et avec une incorporation de la cendre des déchets des palmiers dattier (CDPD). La cendre est incorporée comme filler ; en remplaçant progressivement le filler calcaire par de la cendre DPD, à des taux de substitution croissantes de 0%, 10 %, 20 %, 30 %, 40 % et 50 %. Les performances des bétons ont été évaluées à travers une série d'essais : maniabilité, masse volumique, absorption total et capillaire, porosité ouverte, résistance mécanique, et comportement en milieu acide.

Les résultats montrent que l'incorporation de la cendre DPD L'ajout de cendre DPD au béton de sable est bénéfique jusqu'à un certain seuil, entre 10 et 30 % qui permet d'avoir : une bonne densité, un renforcement progressif des propriétés mécaniques et une meilleure résistance aux milieux agressifs (HCl et H_2SO_4).

Mots clés :

Déchets palmiers dattier – cendre- béton de sable- absorption- durabilité- compacité

Abstract

This work is part of an approach to reclaiming agricultural waste, in particular ash from burnt date palm waste, with the aim of developing an ecological and economical sandcrete that is both high-performance and durable. Six sandcrete compositions were formulated with and without the incorporation of date palm waste ash (CDPD). The ash was incorporated as a filler, gradually replacing the limestone filler with DPD ash at increasing substitution rates of 0%, 10%, 20%, 30%, 40% and 50%. Concrete performance was assessed through a series of tests: workability, density, total and capillary absorption, open porosity, mechanical strength and behavior in acidic environments.

The results show that the incorporation of DPD ash to sand concrete is beneficial up to a certain threshold, between 10 and 30% which provides: good density, progressive strengthening of mechanical properties and better resistance to aggressive media (HCl and H₂SO₄).

Key words :

Date palm waste - ash- sand concrete- absorption- durability- compactness

Table des matières

Dédicace	
Remerciement	
ملخص	i
Résumé	i
abstract	ii
Table des matières	I
Liste des tableaux	IV
Liste des figures	V
Liste des symboles	VII
Introduction générale	02
CHAPITRE I : Généralité Sur Les Bétons De Sable	
I.1. Introduction	05
I.1.1. Historique des bétons de sable	05
I.1.2. Définition et composants du béton de sable	05
I.1.2.1. Les sables	05
I.1.2.2. Classification des sables selon leurs provenances	06
I.1.2.a. Sables d'origine naturelle	06
I.1.2.b. Sables d'origine artificielle	06
I.1.2.c. Sables d'origine volcanique	07
I.1.3. Propriétés des bétons de sables	07
I.1.3.1. Résistance et maniabilité	08
I.2. Les ciments	08
I.2.1. Eau de gâchage	09
I.2.2. Les adjuvants	10
I.2.2.1. Les fines d'ajout (fillers)	10
I.2.2.2. Filler calcaire	11
I.3. Les ajouts minéraux	11

I.3.1. Ajouts Cimentaire	11
I.3.2. Rôle des ajouts minéraux	12
I.3.3. Principaux ajouts	12
I.3.3.1. La poussière	12
I.3.3.2. pouzzolane	12
I.3.3.3. Fumée de silice	13
I.3.3.4. Laitier de haut fourneau	14
I.3.4. Cendres volantes	14
I.3.4.1. Composition chimique	15
I.3.4.2. Utilisation des cendres volantes	15
I.3.4.3. Cendre de foyer	15
I.3.4.4. Cendre de biomasse	16
I.3.4.5. Cendre de bois	16
I.3.4.6. Utilisation de cendres de bois	16
I.3.4.7. Cendres de papeterie	16
I.3.4.8. La cendre issue des déchets des palmiers dattiers	17
I.3.4.9. Étapes simples pour extraire la poudre de cendre	17
I.4. Conclusion	19
CHAPITER II : Matériaux, Mélanges Et Procédures	
II.1. Introduction	21
II.2. Matériaux utilisés et propriétés	21
II.2.1 Sable	21
II.2.2 Ciment	22
II.2.3. Eau de gâchage	23
II.2.4 Adjuvants	23
II.2.5 Filler calcaire	23
II.2.6 La cendre des déchets des palmiers dattiers (CDPD)	24
II.3. Formulation du béton de sable	25

II.4. Malaxage et confection des éprouvettes	26
II.5. Essai réalisés	27
II.5.1. Maniabilité	27
II.5.2. Essai de compression	28
II.5.3. Essais de traction par flexion 3 points	29
II.5.4. Vitesse du son (Ultrasonique)	29
II.5.5 La masse volumique	30
II.5.5.1. Absorption totale	31
II.5.5.2. La porosité accessible à l'eau	32
II.6. Durabilité	32
II.7. Conclusion	34
CHAPITER III : Résultats Et Interprétation	
III.1. Introduction	36
III.2.Effet de la teneur des cendres sur la maniabilité des bétons sable	36
III.2.1. propriétés mécaniques	37
III.2.2. Résistance à la compression	37
III.2.2.1. Résistance à la traction par flexion	38
III.2.2.2. Vitesse des ondes soniques	40
III.3.3.Effet des Propriétés physique des bétons sable	41
III.3.3.1. La masse volumique	41
III.3.3.2. Absorption d'eau totale	42
III.3.3.3. Porosité	43
III.4.Effet sur la durabilité	44
III.4.1.Résistance à la compression :(HCl)	44
III.4.2.Résistance à la compression :(H ₂ SO ₄)	45
III 4.3. Perte de masse dans le milieu (HCl)	46
III 4.4. Perte de masse dans le milieu (H ₂ SO ₄)	47
III 5.Conclusion	48

Conclusion Générale	
Conclusion Générale	52
Références Bibliographiques	54
Annexes	56

Liste des tableaux

Les tableaux	N°: Page
CHAPITRE I : Généralité	
Tableau I.1. Relation entre la granulométrie et le dosage en ciment	06
CHAPITER II : Matériaux, mélanges et procédures	
Tableau II.1. Propriétés physiques du sable utilisé	18
TableauII.2. Caractéristiques physiques du filler calcaire	19
Tableau II.3. Composition chimique du filler calcaire (%)	19
Tableau II.4. les caractéristiques physiques des cendres DPD	20
Tableau II.5. Composition des mélanges du béton de sable avec et sans cendres CDPD	21
Tableau II.6. Valeurs usuelles d'étalement	23
Tableau II.7. Evaluation de la qualité du béton en fonction de vitesse de son	25

Liste des figures

LES FIGURES	N°: Page
CHAPITRE I : Généralité	
Figure (1.6): Classification des sables selon leurs provenances	07
Figure (I.2) : pouzzolane naturelle (KIRPACH, 2001).	13
Figure (I.3) : fumée de silice (KIRPACH ; 2001).	14
CHAPITER II : Matériaux, mélanges et procédures	
Figure II.1. La courbe granulométrique du sable utilisé	20
Figure II.2. Ciment utilisé (CEM II/A-L 42.5R)	21
Figure II.3 Extraction des cendres de palmiers dattiers	23
Figure II.4. Etape de Fabrication de béton	25
Figure II.5 : Table de secousses	26
Figure II.6 : Essai de la résistance à la compression.	26
Figure II.7. Essai de la traction par flexion.	27
Figure II.8. Instrument de mesure la vitesse du son dans le béton.	27
Figure II.9. Mesures des dimensions de l'éprouvette (4x4x16) cm.	28
photos II.10.acide sulfurique H ₂ SO ₄	30
photos II.11.acide chlorhydrique (HCl) à 35%;38%.	30
photos II.12.atttaques acide H ₂ SO ₄	31
photos II.13.atttaques acide (HCl)	31
CHAPITER III : Résultats et interprétation	
Figure III.1 : Effet de cendre sur la maniabilité.	34
Figure III.2. L'effet de cendre sur la résistance à la compression.	35
Figure III.3. L'effet de cendre sur la résistance à la traction.	36
Figure III.4. Effet de cendre sur la vitesse de son	37
Figure III.5. Effet de cendre sur la masse volumique	38

Figure III.6. Effet de cendre sur l'absorption d'eau totale	39
Figure III. 7. Effet de cendre sur la porosité	40
Figure III.8. L'effet de milieu agressif (HCl) sur la résistance à la compression.	41
Figure III.9. L'effet de milieu agressif (H_2SO_4) sur la résistance à la compression.	42
Figure III.10. L'effet de milieu agressif (HCl) Perte de masse.	43
Figure III.11. L'effet de milieu agressif (H_2SO_4)Perte de masse.	44

Liste des symboles

BSC: Béton de sable sans cendre DPD

BSC10 : Béton de sable avec 10% de cendre DPD + 90% Filler Calcaire.

BSC20 : Béton de sable avec 20% de cendre DPD + 80% Filler Calcaire.

BSC30 : Béton de sable avec 30% de cendre DPD + 70% Filler Calcaire.

BSC40: Béton de sable avec 40% de cendre DPD + 60% Filler Calcaire.

BSC50 : Béton de sable avec 50% de cendre DPD + 50% Filler Calcaire.

E/C : Rapport massique de l'eau sur ciment.

Introduction Générale

Introduction générale

La croissance rapide du secteur de la construction entraîne une demande accrue en matériaux, notamment en ciment, dont la fabrication est à la fois énergivore et fortement émettrice de gaz à effet de serre. Dans ce contexte, la recherche de solutions durables, écologiques et économiquement viables est devenue une priorité. Parmi les approches explorées, l'intégration de déchets agricoles dans les formulations de béton représente une alternative prometteuse. En particulier, le palmier dattier, arbre emblématique des régions sahariennes, génère chaque année une grande quantité de résidus (tiges, feuilles, grappes, fibres, etc.) qui, une fois brûlés, produisent une cendre riche en éléments minéraux potentiellement valorisables.

Ces cendres, issues d'une combustion contrôlée, sont souvent riches en silice amorphe, en alumine et en d'autres oxydes aux propriétés pouzzolaniques. En les incorporant comme ajout minéral dans le béton, il est possible d'améliorer certaines propriétés mécaniques et de durabilité, tout en réduisant la teneur en clinker, et donc l'impact environnemental du ciment.

Malgré le potentiel de ces cendres végétales, leur influence sur le comportement du béton de sable reste peu documentée et peut varier considérablement selon la teneur incorporée, la finesse, la réactivité chimique et la nature des interactions avec les autres constituants du béton. Ainsi, **dans quelle mesure les cendres issues des déchets brûlés du palmier dattier peuvent-elles améliorer ou altérer les propriétés physiques et mécaniques du béton de sable, et sous quelles conditions leur utilisation est-elle réellement bénéfique ?**

Objectif de l'étude

L'objectif de cette recherche est d'évaluer expérimentalement l'effet de l'incorporation de différentes proportions de cendres de palmier dattier sur la maniabilité, la résistance à la compression et à la traction par flexion du béton de sable, à court et moyen termes et durabilité. Cette étude vise à déterminer les formulations optimales permettant de concilier performance mécanique, durabilité et respect de l'environnement, tout en valorisant un déchet local abondant.

Cette démarche vise à démontrer la faisabilité technique d'un béton plus écologique, tout en valorisant un déchet agricole abondant et disponible localement, s'inscrivant pleinement dans une logique d'économie circulaire et de développement durable.

Ce mémoire est structuré en deux grandes parties principales.

La **première partie** est consacrée à une étude bibliographique :

Chapitre I.

Ce chapitre est dédié à la présentation générale du béton de sable : ses constituants et ces propriétés ; ces applications et limites d'utilisation. Ainsi une vision générale sur les déchets du palmier dattier et la cendres précisément issue de ces derniers dans le béton.

La **deuxième partie** porte sur l'étude expérimentale et comprend deux chapitres :

Chapitre II.

Il est consacré à la **caractérisation des matériaux** utilisés dans la formulation du béton de sable, à savoir le ciment, le sable, le filler calcaire et les fibres issues de grappes de palmier dattier. Ce chapitre décrit également les **protocoles expérimentaux** mis en œuvre pour l'évaluation des performances des bétons élaborés.

Chapitre III.

La phase expérimentale du travail que nous avons réalisé, est décrite comme la fabrication de béton de sable avec l'ajout de déchets de palmier dattier (cendres) dans certaines proportions à chaque fois et la réalisation de plusieurs essais, dont certains à l'état frais (manipulation) et d'autres à l'état durci (résistance à la compression, et la résistance de la traction par flexion, la vitesse de son, la masse volumique, l'absorption totale, et certains essais relatifs à la durabilité (milieux acides).

Enfin, nous tirons une conclusion générale basée sur les résultats que nous avons obtenus avec précision.

CHAPITRE I:

Généralités Sur Les

Bétons De Sable

I.1. Introduction

Ce chapitre a pour but de présenter le béton de sable en définissant ses composants fondamentaux, tout en offrant une vue d'ensemble sur ses propriétés principales, ses avantages ainsi que ses limites d'utilisation. Il abordera également la valorisation des déchets issus des palmiers-dattiers dans le secteur de la construction, en mettant en évidence l'utilisation des cendres obtenues après leur combustion comme additions dans la formulation des bétons.

I.1.1 Historique des bétons de sable [1]

Le béton sableux, riche en sable, est un matériau de base utilisé depuis l'Antiquité, notamment par les Romains. Son usage moderne débute en France au XIXe siècle grâce à F. Coignet, qui a réalisé des ouvrages sans gravier. En 1918, en Russie, Nicolas de Rochefort a montré que le broyage conjoint de sable et clinker permettait d'obtenir une résistance comparable à celle du béton classique. L'URSS, manquant de gravillons, a largement adopté ce béton dès 1941. Après la Seconde Guerre mondiale, le béton sableux a regagné en intérêt en raison de la rareté des gros granulats et de la disponibilité du sable, devenant ainsi sujet de nombreuses recherches récentes

I.1.2.Définition et composants du béton de sable [2]

Le béton de sable est un matériau de construction composé principalement de sable, de fines d'ajout, de ciment et d'eau. Il est défini selon la norme (NF P 18-500) [3], c'est un béton dans lequel le sable constitue l'unique granulat utilisé, sans ajout de gravier ou de granulat grossier. Il est élaboré à partir de:

- Sable naturel ou concassé, ayant une granulométrie continue (généralement ≤ 5 mm).
- Ciment, de type CEM I ou CEM II selon la norme EN 197-1.
- Eau, conforme à la norme EN 1008
- Adjuvants (facultatifs), comme les plastifiants ou super plastifiants, selon la norme EN 934-2. [4].

I.1.2.1. Les sables [5]

Par « sables », on désigne l'ensemble des granulats (0/D) conformes aux définitions données par les normes NF P 18-101 et NF P 18-301. Il peut s'agir aussi bien de sables

naturels d'origine alluvionnaire ou de ballastière, que de sables de carrière obtenus par concassage de roches massives ou détritiques.

Aucun critère strict de granulométrie n'est exigé, a priori, pour la réalisation d'un béton de sable La seule véritable restriction concerne la propreté des sables. Par ailleurs, les sables naturellement riches en fines exigent généralement un apport en eau plus important, ce qui conduit à une baisse de la résistance du béton.Dans la pratique courante, il est donc préférable de se limiter à l'emploi de sables propres, adaptés à la formulation des bétons classiques [6].

I.1.2.2. Classification des sables selon leurs provenances [5]

Les types de sable peuvent être classés comme suit:

I.1.2.2.a. Sables d'origine naturelle

Ce sont les plus courants, formés naturellement par l'érosion des roches :

- **Sables alluvionnaire** : transportés par les rivières (sables fins, bien arrondis, propres).
Figure 1
- **Sables éoliens** : transportés par le vent (très fins, bien triés, souvent trouvés dans les déserts). Figure 2
- **Sables marins** : extraits des plages ou du fond marin (peuvent contenir du sel, nécessitent un lavage avant usage). Figure 3
- **Sables lacustres** : issus de l'érosion dans les lacs (souvent riches en argile ou matière organique).

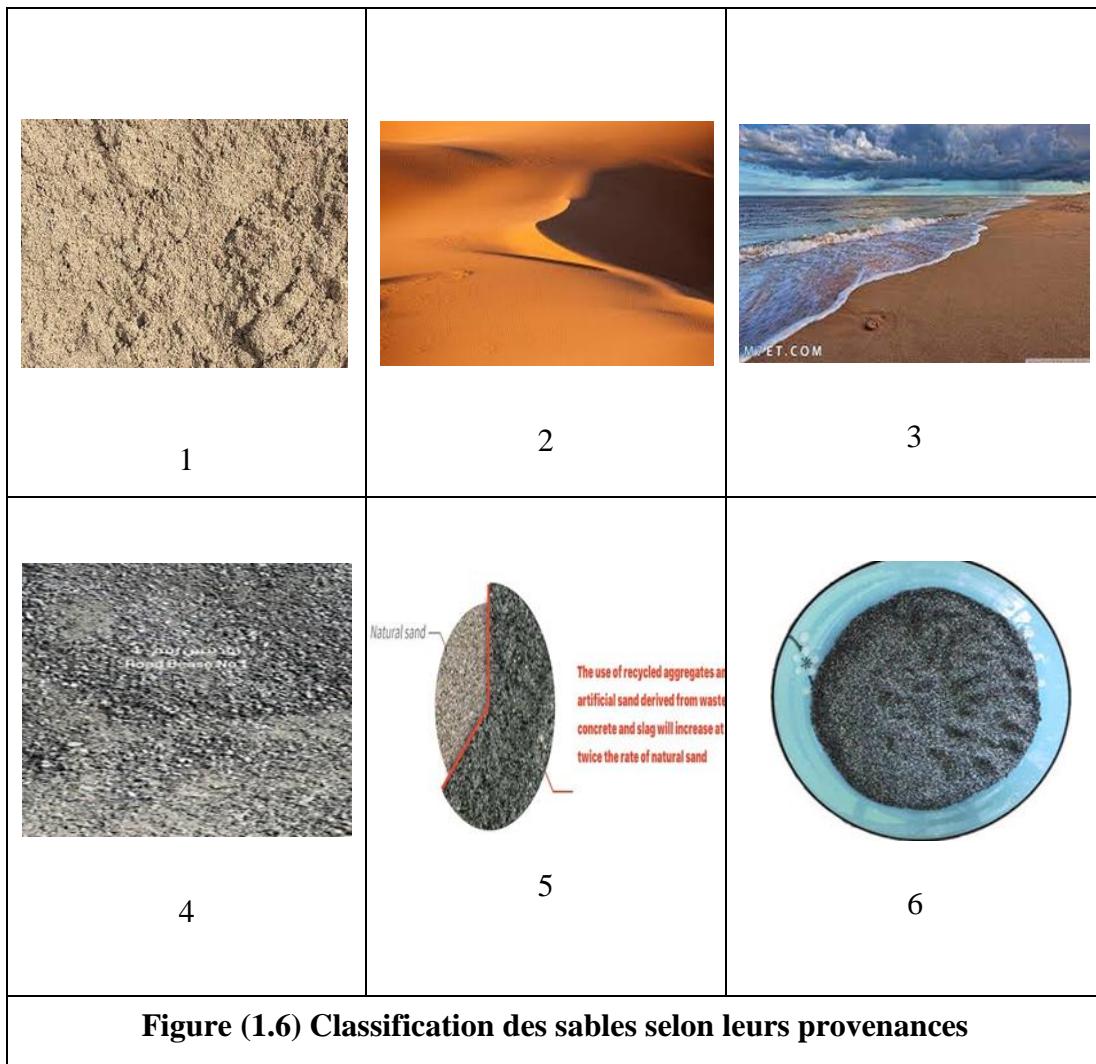
I.1.2.2.b. Sables d'origine artificielle

Produits par des procédés humains :

- **Sables concassés** : obtenus par broyage de roches (granite, calcaire, etc.), grains anguleux, utilisés en construction. Figure 4
- **Sables recyclés** : proviennent de matériaux de construction démolis (béton, briques, etc.). Figure 5

I.1.2.2.c. Sables d'origine volcanique

- Issus de l'érosion ou fragmentation des roches volcaniques (ex. : pouzzolane), souvent foncés et légers. Figure 6



I.1.3. Propriétés des bétons de sables : [11].

Lorsqu'un concepteur opte pour l'utilisation du béton de sable comme matériau dans un élément de construction, il adopte une démarche de type « pensée béton ». Cette approche consiste à choisir un matériau répondant aux critères qui ont contribué au succès du béton traditionnel, notamment en termes de performances mécaniques, de durabilité, mais également d'image et de comportement. Les propriétés du béton durci sont fortement influencées par celles du béton frais. Parmi ces dernières, l'ouvrabilité (ou maniabilité) et la compacité sont des paramètres essentiels. L'ouvrabilité dépend principalement du rapport

eau/ciment (E/C), du module de finesse du sable, ainsi que du type et de la teneur en fines (ajouts minéraux). Il est établi que le béton de sable nécessite une quantité d'eau plus importante que le béton classique pour atteindre une maniabilité acceptable.

Par ailleurs, il est évident que le mélange ciment-sable présente une porosité plus élevée comparée à celle du béton traditionnel, en raison de l'absence de gravier. Cet inconvénient peut toutefois être compensé par l'ajout de fines de bonne qualité, visant à améliorer la compacité du matériau. Il est donc indispensable de sélectionner des sables présentant une répartition granulaire optimale.

En définitive, le concepteur doit rechercher un compromis entre la maniabilité du béton de sable et sa compacité, afin de garantir à la fois la facilité de mise en œuvre et les performances mécaniques et durables attendues du matériau [13]

I.1.3.1. Résistance et maniabilité : [11]

Les bétons de sable constituent une catégorie de bétons caractérisés par une excellente ouvrabilité, parfois supérieure à celle des bétons traditionnels, notamment grâce aux avancées dans les techniques d'adjuvancement, de formulation et de mise en œuvre. Bien que leur résistance à la compression soit généralement inférieure à celle des bétons classiques, il est néanmoins possible d'obtenir des bétons de sable à hautes performances mécaniques et à bonne maniabilité.

Le dosage en ciment varie entre 250 et 450 kg/m³, et la compacité optimale est atteinte par l'ajout de fines et de plastifiants. La résistance à la compression à 28 jours se situe entre 12 et 60 MPa, selon la composition. La résistance dépend de plusieurs paramètres, tels que la finesse et la nature des additions minérales, ainsi que le diamètre maximal des granulats (D_{max}). Même si la classification des bétons selon leurs performances mécaniques reste une référence, la qualité d'un béton ne se limite pas à sa résistance. Ainsi, les bétons de sable ne visent pas à remplacer mécaniquement les bétons ordinaires, mais à offrir une alternative qualitative adaptée à des usages spécifiques requérant une grande maniabilité et de bonnes performances [14].

I.2. Les ciments

Comme pour le béton classique, le ciment utilisé pour la confection d'un béton de sable doit être conforme à la norme NF P 15-301 [7].

Le choix du ciment dépend de plusieurs facteurs :

- Classe de résistance,
- Caractéristiques d'hydratation,
- Agressivité du milieu,
- Et, de manière plus générale, de la composition du béton et de l'usage prévu [6].

Ciment Portland composé (CEM II)

C'est le type de ciment le plus répandu parmi les liants hydrauliques. Il est constitué d'un mélange de clinker et de gypse.

- Le clinker est un produit obtenu par cuisson à environ 1450°C d'un mélange de calcaire et d'argile.
- Lors du durcissement, le ciment subit un retrait (diminution de volume), ce qui peut provoquer l'apparition de fissures [8].

Autres types de ciments utilisables :

- **CEM I** : Ciment Portland pur, sans ajouts.
- **CEM III** : Ciment de haut fourneau (riche en laitier).
- **CEM IV** : Ciment pouzzolanique (contient des cendres volcaniques).
- **CEM V** : Ciment au laitier et aux cendres volantes.

I.2.1. Eau de gâchage

Selon la norme NF P18-303, l'excès de fines augmente le rapport E/C. Pour le réduire, on utilise des plastifiants et des fillers afin de limiter l'eau tout en maintenant la qualité du béton [9].

I.2.2. Les adjuvants

Les adjuvants sont des substances ajoutées au béton pour modifier certaines de ses propriétés sans en altérer la composition de base. Ils sont classés selon leur action principale, bien qu'ils puissent avoir des effets secondaires multiples. Dans le béton de sable, on utilise généralement les mêmes adjuvants que dans les bétons traditionnels, afin de conserver les mêmes caractéristiques. Toutefois, en raison des spécificités du béton de sable, l'utilisation de plastifiants ou de super plastifiants est privilégiée. Ces adjuvants améliorent la maniabilité du

béton, généralement en augmentant sa résistance grâce à une réduction de la teneur en eau et à la défloction des fines particules.

Les adjuvants utilisés doivent être conformes à la norme NF EN 934-2-A2 [4].pour garantir leur efficacité et leur sécurité. Parmi les principaux types d'adjuvants, on trouve :

1. **Superplastifiants-hauts réducteurs d'eau** : Ces adjuvants permettent de réduire la quantité d'eau nécessaire dans le mélange, ce qui améliore la résistance du béton. Leur dosage moyen varie entre 0,8 et 3 % du poids du ciment.
2. **Plastifiants-réducteurs d'eau** : Ces produits augmentent la maniabilité du béton tout en diminuant sa teneur en eau. Leur dosage moyen se situe entre 0,3 et 0,5 % du poids du ciment.
3. **Accélérateurs de durcissement** : Ils favorisent un durcissement plus rapide du béton, ce qui est particulièrement utile dans des conditions climatiques froides. Leur dosage moyen est compris entre 0,8 et 2 % du poids du ciment.
4. **Retardateurs de prise** : Ces adjuvants ralentissent le processus de prise du béton, ce qui peut être nécessaire pour les applications où un temps de travail prolongé est requis. Leur dosage moyen varie entre 0,2 et 0,5 % du poids du ciment.
5. **Entraîneurs d'air** : Ils introduisent de petites bulles d'air dans le béton pour améliorer sa résistance aux cycles de gel et de dégel. Leur dosage moyen est de 0,05 à 0,2 % du poids du ciment.
6. **Accélérateurs de prise** : Ces adjuvants accélèrent la prise du béton, ce qui permet une solidification plus rapide. Leur dosage moyen est de 1 à 3 % du poids du ciment.

Ces adjuvants sont essentiels pour améliorer les performances des bétons et précisément les bétons de sable en fonction des exigences spécifiques de chaque chantier et doivent être utilisés conformément aux normes techniques en vigueur.

I.2.2.1. Les fines d'ajout (fillers)

La caractéristique fondamentale du béton est sa compacité, qui influence directement ses performances mécaniques et sa durabilité. Plusieurs paramètres déterminent cette compacité, notamment [10]:

- La granulométrie du mélange ;
- La teneur en eau ;
- L'énergie de mise en place (vibration, compactage, etc.).

- L'optimisation de la compacité, en lien avec la granulométrie, repose sur un principe fondamental : les particules fines combinent les vides laissés par les particules plus grossières, selon le modèle des "tables gigognes". Dans le béton, ces fines sont principalement constituées de ciment.
- Il se trouve que la quantité de ciment nécessaire pour garantir la résistance mécanique du béton coïncide généralement avec la quantité de fines requises pour assurer une bonne compacité. Cette correspondance est connue sous le nom de la règle des vides remplis, une règle essentielle dans la formulation des bétons. se traduit par la règle bien connue de :

$C = 550/\sqrt[5]{D}$ ou $700/\sqrt[5]{D}$ (Tableau I.1). Donnant le dosage minimum en ciment en fonction du diamètre (D) du granulat employé [11].

Tableau I.1. Relation entre la granulométrie et le dosage en ciment [11].

Granularité	$\sqrt[5]{D}$	$550/\sqrt[5]{D}$	$700/\sqrt[5]{D}$	
0/25	1.904	290	370	BETON
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	MORTIER
0/4	1.320	415	530	
0/2	1.149	480	610	
0/1	1.000	550	700	

On distinguera deux types de fines : les fines actives (laitiers moulu, cendre volantes, fumée de silice, pouzzolanes broyées, fines de verre...) et les fines inertes (fines calcaires, ou de broyage déroches massives....) [11].

Les dosages en fines d'addition seront souvent importants : entre 70 et 220 Kg/m³ et même au-delà. Par voie de conséquence leurs caractères (nature géologique, forme, etc.) vont influer grandement sur les caractéristiques de la formule employée. On peut constater que, à dosage constant en fines d'addition : [11].

- la maniabilité est améliorée quand le rapport eau/ciment augmente.

- pour un rapport eau/ciment fixé, la maniabilité dépend de la nature et du dosage en fines d'addition

Ce mot filler provient de l'anglais « to fill » signifiant remplir, dont le plus gros grain de ces matériaux ne dépasse pas 0.2mm. L'ajout de fillers permet souvent d'améliorer certaines propriétés du béton à l'état frais (accroissement de la maniabilité, réduction du ressage, . . .) et du béton durci (diminution de la perméabilité et de la capillarité, réduction des risques de fissuration, . . .) [12]. L'effet du filler sur la maniabilité dépend surtout de sa finesse. Si le filler est finement broyé, il y aura réduction de la quantité d'eau pour une maniabilité fixe [11].

I.2.2.2. Filler calcaire : [5].

Le filler calcaire n'est pas classé comme une pouzzolane, car il ne présente pas de réactivité chimique. Sa principale caractéristique réside dans sa finesse, ce qui permet d'optimiser la granulométrie des mélanges de béton.

L'ajout de filler calcaire peut remplir diverses fonctions, telles que la correction de la courbe granulométrique d'un ciment déficient en particules fines, ainsi que l'amélioration de la granulométrie du sable dans le cas des bétons de sable. De plus, les fillers calcaires peuvent influencer le processus d'hydratation, en étant présents dans les pores capillaires, ce qui rend plus difficile la percolation de l'eau. Ils peuvent également affecter les paramètres rhéologiques du béton, modifiant ainsi son comportement vis-à-vis du fluide et de la mise en forme.

I.3. Les ajouts minéraux

I.3.1. Ajouts Cimentaire

Les ajouts cimentaires sont des matériaux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore le plus souvent au ciment Portland et donnent ses propriétés au béton, grâce à une activité hydraulique et/ou pouzzolanique. (Dreux ; 1998). Parmi les ajouts les plus connus, on peut citer :

- les cendres volantes,
- Fillers calcaires,
- La poussière,
- le laitier granulé de haut fourneau (LGHF),
- les fumées de silice,
- pouzzolanes.

I.3.2. Rôle des ajouts minéraux

L'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa Maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée (sauf pour les matériaux de très grande surface active, comme les fumées de silice). Ensuite, les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques. Enfin, parce qu'ils permettent une moindre chaleur d'hydratation des ciments mélangés, les ajouts cimentaires améliorent la résistance à la fissuration.

I.3.3.Principaux ajouts

Selon certains chercheurs, les particules de clinker de dimension supérieure à 60 µm ne subissent pas une hydratation complète même au cours du durcissement à long terme, pour cette même raison les particules de clinker de telle dimension pourraient être remplacées par celles de matériaux inertes (N F P 18- 305).

En outre, les particules les plus fines d'un ajout inerte servent à remplir les pores de la pâte de ciment, ils jouent le rôle de micro agrégats. Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés qui, par leur composition granulométrique améliorent les propriétés physiques du ciment Portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau, ...). Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires et la poussière.

I.3.3.1.La poussière

La poussière est une matière à particules fines, récupérée à la sortie du four, lors de son passage avec la fumée, sa finesse est comprise entre 7000 et 9000 cm^{2/g}. le ciment composé avec la poussière a des caractéristiques mécaniques et une résistance au gel-dégel comparable à celle du ciment sans ajouts. Le temps de prise, le fluage et le retrait augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout.

I.3.3.2. pouzzolane

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels La pouzzolane est une roche naturelle constituée par des scories (projections) volcaniques basaltiques ou de composition proche. Elle possède une structure alvéolaire. La pouzzolane est généralement rouge ou noire, Capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédant des

propriétés liantes (Venuat ; 1989).Les normes françaises donnent les définitions suivantes des pouzzolanes entrant dans la fabrication des ciments :

• Pouzzolane naturelle :

Les pouzzolanes naturelles sont des produit généralement d'origine volcanique, ou des roches sédimentaires, présentant des propriétés pouzzolaniques Figure (I.2) [15]. Elles sont essentiellement composées de silice réactive dans des proportions supérieures à 25%, d'alumine et d'oxyde de fer.



Figure (I.2) : pouzzolane naturelle (KIRPACH, 2001).

• Pouzzolane artificielle :

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques.

Les roches traitées thermiquement : argiles, schistes, latérite, bauxite et moler. Le professeur Massaza classe les pouzzolanes en trois catégories.

- Les constituants actifs : phase vitreuse plus au moins altérée, opale, terre de diatomées, zéolites cristallisées.
- Les constituants inertes : phase cristallisée autre que les zéolites.
- Les constituants nocifs : substances organiques et argiles gonflantes

I.3.3.3.Fumée de silice

Les fumées de silice (figure I.3) [15], constituées de particules environ 100fois plus petites que les grains de ciments avec un diamètre moyen de l'ordre de 1/10 de micron, présentent des propriétés pouzzolanique en raison de leur forte teneur en silice amorphe. En outre, en raison e leur finesse, elles compétent la granulométrie des ciments .ces deux effets

entraînent à la fois une forte augmentation e la compacité et une amélioration des résistances mécaniques du fait de la réaction pouzolanique des fumées de silice.

Elles doivent contenir au moins 85% de silice réactive, la réaction pouzzolanique s'avérant plus élevée que celles des pouzzolane naturelles ou cendres volantes.

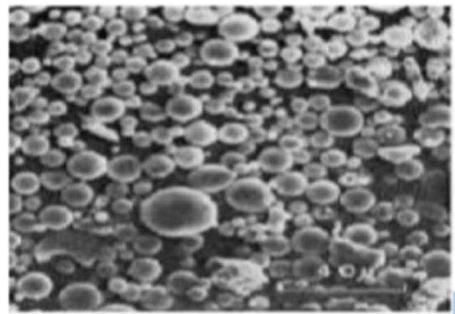


Figure (I.3) : fumée de silice (KIRPACH ; 2001).

I.3.3.4. Laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un déchet produit lors de la fabrication de la fonte. Il est refroidi rapidement à l'eau pour devenir un matériau granulaire. Ce matériau est ensuite ajouté au clinker et broyé pour fabriquer du ciment. Il possède des propriétés hydrauliques, activées par le clinker. Son durcissement est plus lent que celui du ciment Portland et il produit moins de chaleur.

➤ Autres ajouts

I.3.4. Cendres volantes

Les cendres volantes sont un produit minéral pulvérulent issu du dépoussiérage des fumées émises par les centrales thermiques fonctionnant au charbon pulvérisé. Elles présentent des propriétés pouzzolaniques, notamment lorsqu'il s'agit de cendres silico-alumineuses. En présence de chaux, elles permettent la formation de composés aux propriétés similaires à celles d'un liant hydraulique.

I.3.4.1. Composition chimique

Les cendres volantes sont principalement composées de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3), ainsi que de faibles quantités d'oxydes alcalins et alcalino-terreux, incluant la chaux (CaO) sous forme composite. Leur composition varie selon la nature du charbon utilisé.

I.3.4.2. Utilisation des cendres volantes

Les cendres volantes ont souvent été utilisées en :

- Pour Béton (la cendre s'y substitue au sable ou au clinker).
- Remblai et matériau de comblement ou lissage (en construction routière principalement et pour combler des tranchées).
- Joint de carrelage .
- Remblais fluides/Matériau de Remplissage à Faible Résistance.
- Stabilisation /solidification de déchets.
- Clinkers de ciments (la cendre y remplace partiellement l'argile).
- Matériau de Comblement de mines et autres cavités.
- Stabilisation de sols mous (argileux).
- Sous-couche routière.
- diction de brique (la cendre y joue un rôle d'agrégat de substitution).

I.3.4.3. Cendre de foyer

Les cendres des foyers sont des sous-produits des centrales thermiques au charbon, récupérés a' la base des fours. Elles se présent sous la forme d'un sable plus ou moins scoriacé de dimension comprise entre 30um et 30mm, avec parfois quelques rares éléments pouvant aller jusque 100mm. [16] (PREDIS ; 2018).

Cendres de foyers sont largement utilisées dans toutes les couches des structures routières comme des remblais ou assises de chaussées.

I.3.4.4. Cendre de biomasse

La cendre de biomasse est une matière minérale issue de la combustion de bois et d'autre biomasse, elles peuvent contenir aussi des métaux lourds et ont un pH élevé. [17] (Viviani ; 2018).

Leur utilisation dans la production de matériaux de construction représente actuellement les plus grandes opportunités de valorisation, notamment comme composant dans les ciments et bétons (effet pouzzolanique et activateur chimique).

D'autres pistes étudiées sont leur incorporation comme charge minérale dans les Peintures, matières plastiques et mélanges bitumineux. Leur capacité d'adsorption importante pourrait aussi permettre une valorisation qui serait moins chère que le charbon actif. Enfin, la Récupération des imbrûlés (cendres encore riches en C) peut trouver une valorisation en tant que combustible, sorbant, fillers, pigment, ou biochar. [18] (Martin, 2015).

I.3.4.5. Cendre de bois

Les cendres de bois viennent de la combustion du bois dans les chaufferies. Ce sont des résidus, mais ils peuvent être réutilisés. Elles servent parfois comme engrains pour les sols. On peut aussi les utiliser dans l'industrie ou la construction. Elles sont donc utiles dans plusieurs domaines.

I.3.4.6. Utilisation de cendres de bois

En technique routière, cendre de bois pourraient entrer dans la constitution de remblais et sous couches de chaussées en tant que :

- liant à faible caractère pouzzolanique.
- correcteur granulométrique ou filler dont le rôle est de compléter la granulométrique d'un Matériau pauvre en fraction fine (inférieure à 500 µm). [17] (BAALI et all 2015)

I.3.4.7. Cendres de papeterie

Les cendres de papeterie sont Sous-produit essentiellement composées de calcium, de silicium et d'aluminium : à eux trois, ils représentent entre 70 et 90 % des matériaux. [19] (SEGUI ;2011).

Les compositions chimiques des cendres résultent des compositions des charges

minérales (kaolin, carbonate de calcium naturel ou précipité, dioxyde de titane, talc, silice colloïdale) utilisées comme pigment dans le papier et les encres mais aussi des agents coagulants utilisés lors de l'étape de désencrage des boues de recyclage.

I.3.4.8. La cendre issue des déchets des palmiers dattiers

Les déchets du palmier dattier, tels que les feuilles sèches (palmes), les fibres et les tiges (jrid), sont des résidus agricoles riches en matière organique. Ces déchets peuvent être recyclés et utilisés dans des applications utiles, notamment pour produire des fibres et des cendres provenant des résidus brûlés des palmiers dattiers. Qui peuvent contribuer à l'amélioration des propriétés de certains matériaux de construction comme le béton, ainsi les ciments.

Les déchets du palmier dattier, lorsqu'ils sont brûlés à des températures modérées (entre 500 et 700 °C), produisent une cendre riche en oxydes minéraux. Cette cendre peut être utilisée comme adjuvant pouzzolanique dans les mélanges de béton, en particulier lorsqu'elle est combinée avec de la chaux (hydroxyde de calcium Ca(OH)_2). Cette combinaison favorise des réactions chimiques bénéfiques qui améliorent les propriétés mécaniques et physiques des bétons.

I.3.4.9. Étapes simples pour extraire la poudre de cendre :

- **Collecte des déchets végétaux :** Les parties sèches du palmier, telles que les palmes, les fibres et les tiges, sont collectées après avoir été nettoyées de la poussière et des impuretés.
- **Séchage des déchets :** Les déchets sont exposés au soleil pendant plusieurs jours pour éliminer toute l'humidité, ce qui est essentiel pour assurer une bonne combustion.
- **Combustion des déchets :** Les déchets secs sont brûlés dans un récipient métallique ou une fosse préparée à cet effet. La combustion doit être modérée à forte afin d'obtenir une cendre fine sans carbone non brûlé.
- **Refroidissement de la cendre :** Une fois la combustion terminée, les cendres sont laissées à refroidir complètement à l'air libre.
- **Broyage de la cendre :** Après refroidissement, la cendre est broyée à l'aide d'un moulin domestique ou d'un mixeur puissant jusqu'à obtenir une poudre fine.
- **Stockage de la poudre :** La poudre obtenue est conservée dans des récipients propres et secs, à l'abri de l'humidité pour préserver sa qualité.

Les déchets du palmier dattier, lorsqu'ils sont brûlés à des températures modérées (entre 500 et 700 °C), produisent une cendre riche en oxydes minéraux. Cette cendre peut être utilisée comme adjuvant pouzzolanique dans les mélanges de béton, en particulier lorsqu'elle est combinée avec de la chaux (hydroxyde de calcium Ca(OH)_2). Cette combinaison favorise des réactions chimiques bénéfiques qui améliorent les propriétés mécaniques et physiques du béton de sable.

I.4. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une description générale du béton de sable, en exposant ses constituants et ses propriétés. Nous avons également abordé certains types de cendre, notamment la cendre issue des déchets de palmier dattier. L'objectif de cela est d'ajouter la cendre comme matériau de remplissage actif avec ses composants, afin d'améliorer la compacité, ce qui permet d'atteindre une haute résistance, une densité accrue, et une réduction de la porosité.

CHAPITRE II

Matériaux, Mélangés Et Procédures

II.1. Introduction

Ce chapitre présente de manière détaillée les matériaux de base utilisés dans cette étude, suivi de la méthodologie de formulation et des compositions des mélanges. Il expose également les différents essais expérimentaux effectués pour caractériser les propriétés physiques et mécaniques des échantillons, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.

II.2. Matériaux utilisés et propriétés

Les caractéristiques des matières utilisées pour la confection des bétons de sable sont présentées ci-après.

II.2.1 Sable

Deux types de sables ont été utilisés : le sable de carrière extrait de la carrière d'Aïn Touta, et le sable de l'oued provenant de la région d'El Baâj. Après une analyse granulométrique réalisée conformément à la norme NF P 18-304, il a été constaté que le sable de carrière est classé comme grossier ($M_f = 3,66$), tandis que le sable de l'oued est considéré comme fin ($M_f = 1,78$). Sur la base de ces résultats, il a été décidé de mélanger les deux sables à parts égales 50% chacun. Le mélange a donné un sable avec une granulométrie moyenne qui appartient au fuseau granulaire, comme il est présenté dans la figure II.1. Le mélange de sable à présenter un module de finesse $M_f = 2,6$

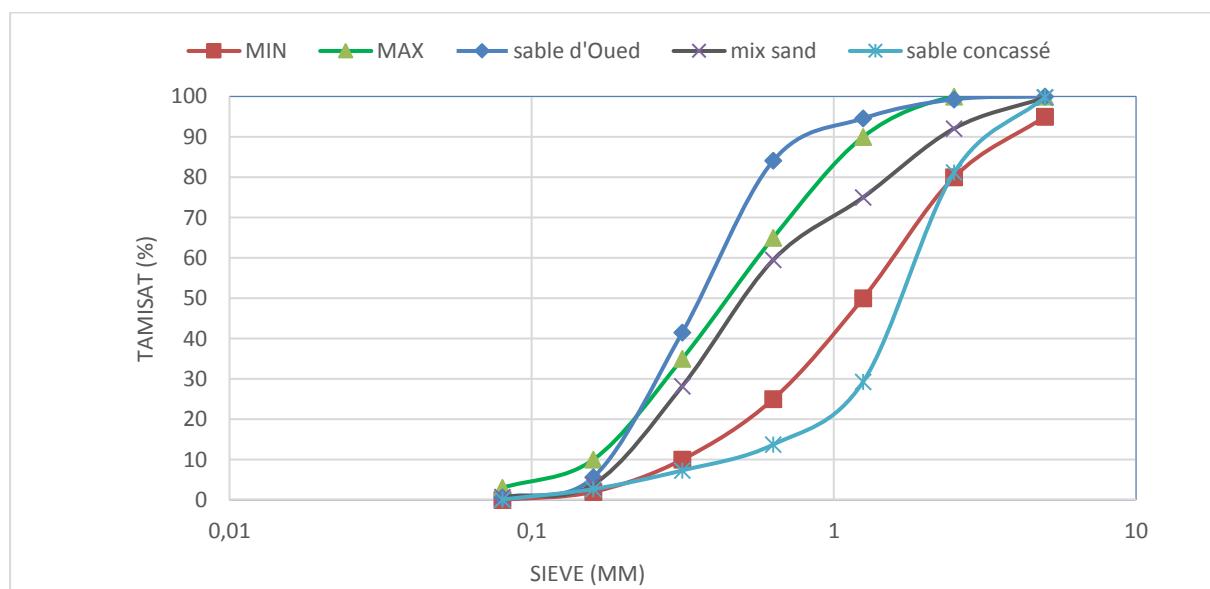


Figure II.1. La courbe granulométrique du sable utilisé

Ce sable à présenter les caractéristiques physiques suivantes mentionnées dans le tableau II.2.

Tableau II.1. Propriétés physiques du sable utilisé.

Propriétés physiques	Valeurs
Module de finesse	2,6
La masse volumique apparente (g/cm ³)	1,46
La masse volumique absolue (g/cm ³)	2.62
Compacité (%)	55,7

II.2.2 Ciment

Tous les mélanges ont été fabriqués avec un seul type de ciment (CEM II/A-L 42.5R) Ciment Portland au Calcaire (CPC) provenant de la cimenterie (BC) de Biskra.

La masse volumique absolue de ce ciment est **2,95 g/cm³**



Figure II.2. Ciment utilisé (CEM II/A-L 42.5R)

II.2.3. Eau de gâchage

L'eau utilisée est celle du robinet laboratoire de génie civil de l'Université de Biskra. Nous supposons qu'elle répond à toutes les prescriptions de la norme (NF EN 1008) en matière de béton.

II.2.4 Adjuvants

Un superplastifiant haut réducteur d'eau de nouvelle génération de forme liquide de couleur brun claire, densité $1,060 \pm 0,010$, d'un PH $4,0 \pm 1,0$, et d'une teneur en chlore $\leq 0,1\%$. La plage de dosage recommandée est de 0,2 à 3 % du poids de liant selon performances recherchées.

II.2.5 Filler calcaire

Il s'agit de roches calcaires broyées, disponibles dans la majorité des Carrières d'Algérie. Le filler calcaire utilisé dans cette étude provient De la carrière d'Oum Settas (El Khroub), de diamètre moyen $23\mu\text{m}$.

Tableau II.2. Caractéristiques physiques du filler calcaire.

Densité apparent (g/cm^3)	Densité absolue (g/cm^3)
1,14	2,7

Tableau II.3. Composition chimique du filler calcaire (%) (Fiche technique).

%	SiO ₂	Cao	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Cl ⁻	L.O.I
Filler calcaire	0,01	55,88	0,01	0,01	0,14	0,01	0,01	0,11	0,005	43,9

II.2.6 La cendre des déchets des palmiers dattiers (CDPD)

Dans cette étude nous avons utilisé des cendres provenant des résidus des palmiers dattiers brûlés, cette cendre été utilisée comme filler dans la composition du béton de sable.

Afin d'avoir cette cendre ; on est passé par des étapes simples pour extraire la poudre de cette dernière :

- **La Collecte :** Les parties sèches du palmier, telles que les palmes, les fibres et les tiges, ont été collectées après avoir été nettoyées de la poussière et des impuretés, Figure II.3.a
- **Séchage:** Les déchets ont été exposés au soleil pendant plusieurs jours pour éliminer toute humidité, ce qui est essentiel pour assurer une bonne combustion.
- **Combustion des déchets :** Les déchets secs sont brûlés dans un récipient métallique ou une fosse préparée à cet effet. La combustion doit être modérée à forte afin d'obtenir une cendre fine sans carbone non brûlé, Figure II.3.b
- **Refroidissement de la cendre :** Une fois la combustion terminée, les cendres sont laissées à refroidir complètement à l'air libre.
- **Broyage:** Après refroidissement, la cendre est broyée à l'aide des mains, puis on est passé à un tamisage fin à l'aide d'un tamis 0,08 mm pour avoir une cendre fine, Figure II.3.c
- **Stockage de la cendre :** La poudre de cendre obtenue est conservée dans des récipients propres et secs, à l'abri de l'humidité pour préserver sa qualité.



a



b



c

Figure II.3 Extraction des cendres de palmiers dattiers

Les caractéristiques physiques des cendres des déchets des palmiers dattiers (CDPD) sont présentées dans le tableau II.4

Tableau II.4. les caractéristiques physiques des cendres DPD.

masse volumique apparente (g /cm ³)	masse volumique absolue (g /cm ³)	Diamètre maximale (mm)
1,2	2,25	< 0.08

II.3. Formulation du béton de sable

Comme nous avons dit auparavant la formulation consiste à trouver la compacité optimale des bétons de sable, ce qui permet de réduire la porosité, d'augmenter la densité, d'améliorer les résistances mécanique, de diminuer la perméabilité et améliorer la durabilité.

Cette méthode est basée sur le critère d'optimisation de la compacité du squelette granulaire. Partant d'une composition de base avec un choix fixe du dosage de ciment (C) à 350 kg/m³, la quantité de sable est évaluée par un coefficient de compacité (γ) du mélange [20]. Le coefficient de compacité (γ) est égal à 0,76

Qui correspondant à un mélange avec $D_{max} \leq 5\text{mm}$ et une consistance plastique. Le dosage du sable [S] étant déterminé selon la formule suivante : $[S] = 1000\gamma - C$.

Dans le cadre de cette étude, six formulations de béton de sable ont été préparées, comme présenté dans le tableau II.5. En plus du béton témoin sans incorporation de cendre DPD, cinq mélanges ont été élaborés en remplaçant progressivement le filler calcaire par de la cendre DPD, à des taux de substitution croissants de 10 %, 20 %, 30 %, 40 % et 50 %.

Tableau II.5. Composition des mélanges du béton de sable avec et sans cendres CDPD.

ciment (Kg)	Sable (Kg)	Filler calcaire (Kg)	(%)	cendre (Kg)	(%)	E/C (0,6)	Sup (1,8 %)
BSC	350	1467	216	100	0	0	210 Kg
BSC10	350	1467	194,4	90	18	10	210Kg
BSC20	350	1467	172,8	80	36	20	210Kg
BSC30	350	1467	151,2	70	54	30	210 Kg
BSC40	350	1467	129,6	60	72	40	210 Kg
BSC50	350	1467	108	50	90	50	210 Kg

BSC: Béton de sable sans cendre **CDPD**

BSC10 : Béton de sable avec **10%** de cendre **CDPD**

BSC20 : Béton de sable avec **20%** de cendre **CDPD**

BSC30 : Béton de sable avec **30%** de cendre **CDPD**

BSC40: Béton de sable avec **40%** de cendre **CDPD**

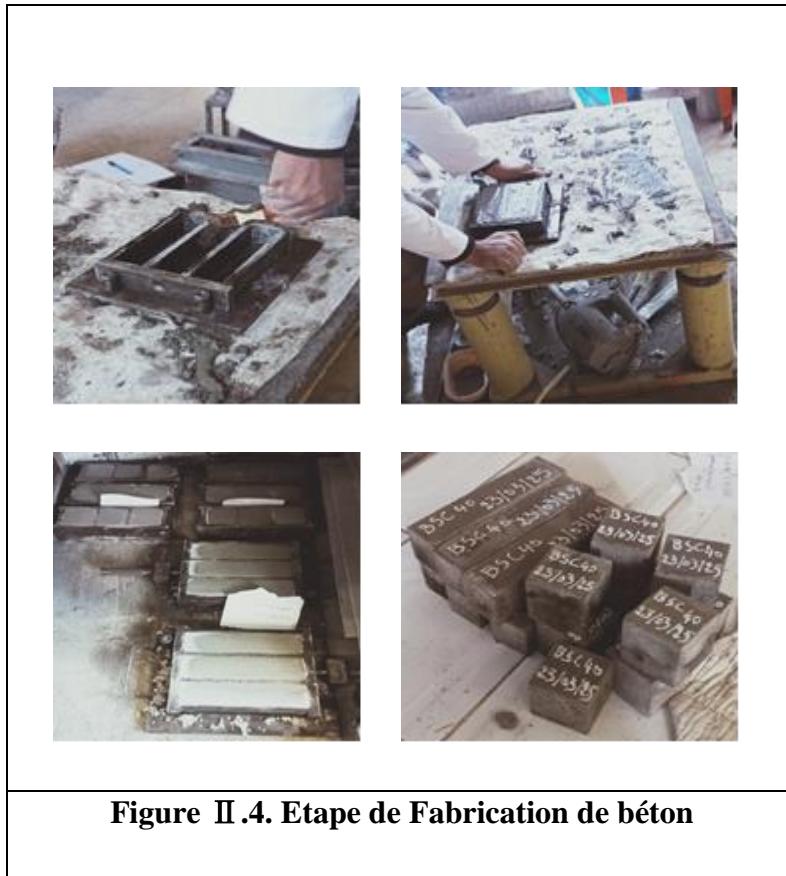
BSC50 : Béton de sable avec **50%** de cendre **CDPD**

II.4. Malaxage et confection des éprouvettes

Les mélanges du béton de sable ont été coulés dans deux types de moules (4x4x16) cm³ et (5x5x5) cm³ préalablement huilés, et le béton frais a été placé en deux couches, en utilisant une table vibrante pendant 10 secondes pour chaque couche.

Immédiatement après le coulage, tous les échantillons ont été couverts pour éviter l'évaporation excessive et le retrait plastique.

Après 24 heures de fabrication, les moules ont été retirés et les échantillons ont été conservés dans l'eau pendant (7, 28 et 56 jours). Schéma suivant est exprimé les étapes procédure de étape de Fabrication de sable. Figure II .4

**Figure II .4. Etape de Fabrication de béton**

II.5. Essai réalisés

II.5.1. Maniabilité

L'essai du contrôle de l'ouvrabilité flow test est appliqué selon la norme EN 12-358 ; on est passé par les étapes suivantes :

- Humecter la table ; y placer le cône.
- Remplir le cône de béton comme pour le cône d'Abrams, mais en 2 couches seulement. Nettoyer la surface libre de la table ; ôter le moule.
- Imprimer (rotation régulière) 15 secousses en 15 secondes.
- Il s'est produit un étalement : mesurer le nouveau diamètre D.
- En calculant le taux d'expansion : $\varepsilon \% = \left(\frac{D-d}{d} \right) \times 100$.

Evaluation de l'ouvrabilité selon le pourcentage d'étalement (Tableau II.6).

Tableau II.6. Valeurs usuelles d'étalement.

Etalement (%)	Ouvrabilité
10 à 30	Très ferme
30 à 60	Ferme
60 à 80	Normal
80 à 100	Mou
Plus 100	Très mou

**Figure II.5 : Table de secousses**

II.5.2. Essai de compression

La résistance à la compression a été mesurée selon la norme NF EN 196-1 par compression axiale pour d'éprouvettes cubique de dimensions $(5 \times 5 \times 5) \text{ cm}^3$ à l'âge de 7, 28 et 56 jours.

$$R_c = F_c / S \text{ (MPa)}$$

**Figure II.6 : Essai de la résistance à la compression.**

II.5.3. Essais de traction par flexion 3 points

La résistance mécanique à la traction par flexion 3 points est déterminée d'après la norme

NF EN 12390-5 (2000) sur des éprouvettes 4x4x16 cm³

Les résultats à la flexion sont obtenus aux 28 et 56 jours.

La résistance à la flexion est calculée au moyen de l'équation suivante :

$$RT = \frac{3}{2} \times \frac{FL}{b \times d^2}$$

L : est l'écartement entre les rouleaux d'appui, en millimètres.

F : la charge maximale appliquée, en newtons.

b. d : sont les dimensions latérales de l'éprouvette, en millimètres.



Figure II.7. Essai de la traction par flexion.

II.5.4. Vitesse du son (Ultrasonique)

Connu sous le nom d'essai aux ultrasons, le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par la propagation d'ondes longitudinales (de à compression) à parcourir une distance donnée et par conséquent la vitesse correspondante de propagation de cette onde dans le béton. (28 jours-56 jours)



Figure II.8. Instrument de mesure la vitesse du son dans le béton.

La qualité du béton est déterminée selon l'importance de vitesse (Tableau II.8).

$$V = \frac{D}{t} \times \frac{m}{s} = (\text{m/s})$$

Tableau II.7. Evaluation de la qualité du béton en fonction de vitesse de son.

Qualité	Vitesse de propagation (m/s)
Excellente	Supérieur à 4200
Bonne	3700 - 4200
Douteuse	3200 - 3700
Mauvaise	2500 - 3200
Très mauvaise	Inférieure à 2500

II.5.5 La masse volumique

Après 28 et 56 jrs de conservation à l'eau. Nous sortons l'échantillon et le laissons sécher au four pendant 24 heures (M1), puis nous pesons l'échantillon. Après avoir mis l'échantillon dans l'eau et le peser après 24 heures (M2).

La densité, appelée masse volumique, est une caractéristique physique des corps qui exprime la relation entre le volume unitaire et la masse unitaire d'une substance ou d'un corps. La masse volumique d'un corps est égale à sa masse totale divisée par son volume total et est donnée par la relation : $M_v = M/V$

M : La masse totale

V : Le volume total.

La masse est déterminée par des pesées de l'éprouvette (4x4x16) cm

Le volume est déterminé par mesures des dimensions de l'éprouvette (4x4x16) cm à l'aide du pied de coulis



Figure II.9. Mesures des dimensions de l'éprouvette (4x4x16) cm.

II.5.5.1. Absorption totale

La capacité d'absorption d'un béton donne une idée générale sur la présence et l'importance des vides (pores). C'est une manière comme une autre de tester la compacité de mélange. Plus le béton est compact plus sa capacité d'absorption est faible et donc plus il est étanche. Cette capacité d'absorption est déterminée par une méthode simple, les éprouvettes de mortier sont pesées après leur passage à l'étuve à 105°C d'où elles ne sont retirées qu'après Stabilisation de leur poids (soit MS), ensuite elles sont entièrement trempées dans l'eau pendant 24 heures, puis retirées et pesées, (soit Mh). Les valeurs sont prises par la moyenne de Trois pesées par éprouvettes de chaque béton. La capacité d'absorption est donnée par la

Formule suivante :

$$A\% = \frac{M_h - M_s}{P_s} \times 100$$

M_h : La masse humide

M_s : La masse sèche

II.5.5.2. La porosité accessible à l'eau

La porosité est une propriété très importante des mortiers de réparation, car elle influence leur résistance et durabilité. Pour cette raison, il est essentiel de la mesurer correctement dans cette étude.

L'essai a été réalisé selon la norme ASTM C642-06 (2006). Le but est de calculer la porosité accessible à l'eau, c'est-à-dire la quantité de vide que l'eau peut occuper à l'intérieur du matériau. Pour cela, quatre pesées ont été effectuées :

➤ **Étapes de pesée :**

- **Masse sèche (M1) :**

L'échantillon est séché dans un four entre 100°C et 110°C jusqu'à ce que sa masse devienne stable.

- **Masse après immersion (M2) :**

Une fois sec, l'échantillon est plongé dans l'eau à 21°C pendant au moins 48 heures. Ensuite, on essuie sa surface et on le pèse.

- **Masse après ébullition (M3) :**

L'échantillon est placé dans de l'eau bouillante pendant 5 heures, puis laissé à refroidir pendant 14 heures minimum à une température entre 20°C et 25°C. On essuie la surface avant de peser.

- **Masse immergée (M4) :**

Enfin, l'échantillon est suspendu dans l'eau à l'aide d'un fil, et on mesure sa masse apparente dans l'eau.

$$P\% = (M3 - M1) / (M3 - M4) \times 100$$

II.6. Durabilité

Le béton peut subir des dégradations sous l'effet de divers types d'acides, tels que l'acide sulfurique, nitrique, phosphorique, acétique, lactique, etc. Parmi ceux-ci, l'acide sulfurique est reconnu comme l'un des agents les plus agressifs, notamment dans les environnements tels que les conduites d'égouts, où il est fréquemment présent. Dans le cadre

de cette étude, après une période de cure standard de 28 jours, des éprouvettes en béton de dimensions (4 × 4 × 8 cm).

Les moitiés obtenues ont ensuite été immergées séparément dans deux récipients contenant chacun une solution chimique spécifique :

- Le premier récipient contenait une solution Acide sulfirique (H_2SO_4) (photos II.10.)
- Le second contenait une solution d'acide chlorhydrique (HCl) (photos II.11.)



photos II.10.acide H_2SO_4



photos II.11.acide (HCl) à 35%;38%.

Un suivi régulier de la variation de masse a été effectué environ tous les trois jours, dans le but d'évaluer l'impact des deux environnements acides sur les caractéristiques physiques des échantillons de béton.

➤ **But.**

Réaliser des essais sur les attaques de béton par des solutions s'acides et de sulfates.

Une dégradation progressive des échantillons avec une perte de masse a été observée au cours d'un suivi périodique sur une durée de 24 jours, comme illustré dans les photos (II.12., II.13.)



photos II.12.atttaques acide H_2SO_4



photos II.13.atttaques acide (HCl)

- détermination la Perte en masse dans les d'eaux milieux agressifs
- détermination La résistance à la compression.

➤ **Étapes de pesée :**

M1 : masse de l'éprouvette avant l'immersion.

M2 : masse de l'éprouvette après l'immersion

$$\text{Perte de masse (\%)} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100$$

II.7. Conclusion

Ce chapitre vise à valoriser l'utilisation des matériaux locaux dans la formulation des mélanges cimentaires. Nous avons étudié les propriétés physiques et mécaniques de chaque matériau utilisé. Tous les mélanges ont été préparés avec des proportions bien définies, en incorporant une charge composée de cendre et de calcaire. L'étude a porté sur les deux états du béton : frais et durci, en analysant leurs caractéristiques respectives.

CHAPITRE III :

Résultats et

Interprétation

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des essais réalisés sur le béton de sable additionné de matériaux de remplissage (filler) issus des déchets de palmier dattier (cendres). Ces essais ont été effectués en laboratoire conformément à un programme expérimental détaillé dans le chapitre II.

L'objectif de ce travail est d'établir une comparaison entre le béton modifié et le béton de référence comme suit :

- **Béton de référence (BSC)** : Béton de sable sans aucun matériau de remplissage.
- **Béton de sable avec cendres de palmier dattier (BSC%)** : Béton contenant différentes proportions de cendres (10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %) en pourcentage du poids du calcaire.

Les essais effectués sur ces mélanges ont été répartis en deux catégories :

- **Essais à l'état frais** : Maniabilité (ouvrbilité).
- **Essais à l'état durci** : Résistance à la compression, résistance à la traction par flexion, vitesse des ondes ultrasonores, masse volumique, absorption d'eau totale, porosité et durabilité.

III.2. Effet des cendres sur la maniabilité des bétons sable

La figure III.1 illustre l'effet des cendres, on peut voir que la maniabilité du béton de sable avec filler calcaire et filler de cendre.

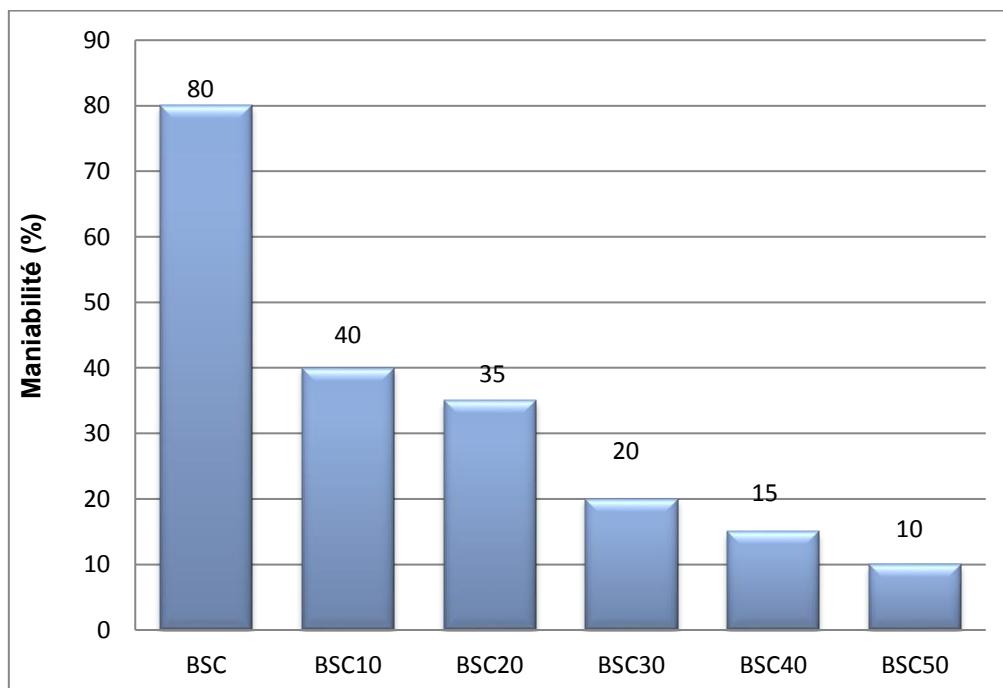


Figure III.1 : Effet de la cendre DPD sur la maniabilité.

On remarque une baisse importante et continue de la maniabilité en fonction du pourcentage des cendres. On trouve une chute de la maniabilité de **80 % à 10 %** entre la référence (BSC) et le béton contenant 50 % de cendre (BSC50), soit une **réduction de 87,5 %**. En note la plus forte baisse est de 50 % dès les **premiers 10 %** d'ajout de cendres. Sachant que Les **cendres de DPD** sont souvent riches en particules fines, poreuses, et absorbantes, ce qui mène à :

- **Accroître la demande en eau** pour une consistance équivalente similaire a un effet d'éponge.
- **Accroître la surface spécifique** du mélange, nécessitant plus de liant ou d'eau pour le même niveau d'enrobage.

III.2.1. propriétés mécaniques

III.2.2. Résistance à la compression

➤ **Effet de l'ajout de cendre sur la résistance à la compression :**

Les résultats de la résistance à la compression sont prisent a l'âge de 7-28 et 56 jours comme il est présenté dans les figure (III.2)

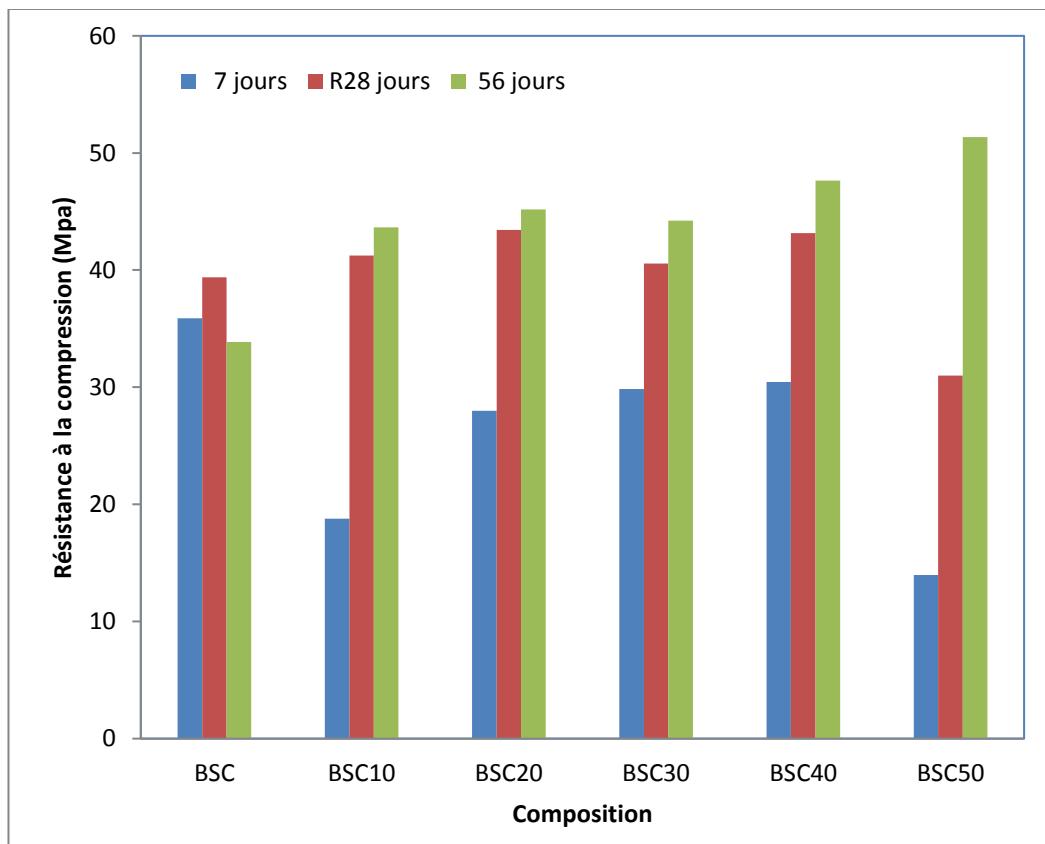


Figure III.2. L'effet de la cendre DPD sur la résistance à la compression.

Le graphique montre l'évolution de la résistance à la compression à 7, 28 et 56 jours. Les résultats obtenus mettent en évidence un comportement différencié selon le taux de substitution et l'âge du béton.

Il est remarqué à **7 jours**, il y a une baisse significative de la résistance pour l'ensemble des formulations contenant des cendres, en particulier pour BSC10 et BSC50, avec des valeurs nettement inférieures à celle du béton de référence (BSC).

Cependant, une **montée progressive des résistances** est constatée aux âges de **28 et 56** ; qui peut être expliqué par la réactivité pouzzolanique des cendres et qui se manifeste avec le temps. La silice réagit avec la chaux ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) pour former des **composés cimentaires secondaires** (CSH), améliorant la structure. Cet effet est **lent mais bénéfique**, ce qui explique la **hausse continue jusqu'à 56 jours**. À forte teneur, les cendres agissent comme **filler actif**, remplissant les vides et densifiant la matrice.

Ces résultats confirment que les cendres de palmier, bien calcinées, jouent à la fois un rôle de filler et de liant secondaire à long terme, en densifiant la structure du béton.

Ces observations démontrent que les cendres de DPD, malgré leur impact négatif à court terme, permettent une amélioration notable de la résistance mécanique à long terme, particulièrement à des taux de substitution élevés (30 à 50 %), à condition que le temps de cure soit suffisant. Une substitution optimisée entre 20 et 40 % semble offrir le meilleur compromis entre résistance initiale acceptable et performances mécaniques durables.

III.2.2.1. Résistance à la traction par flexion

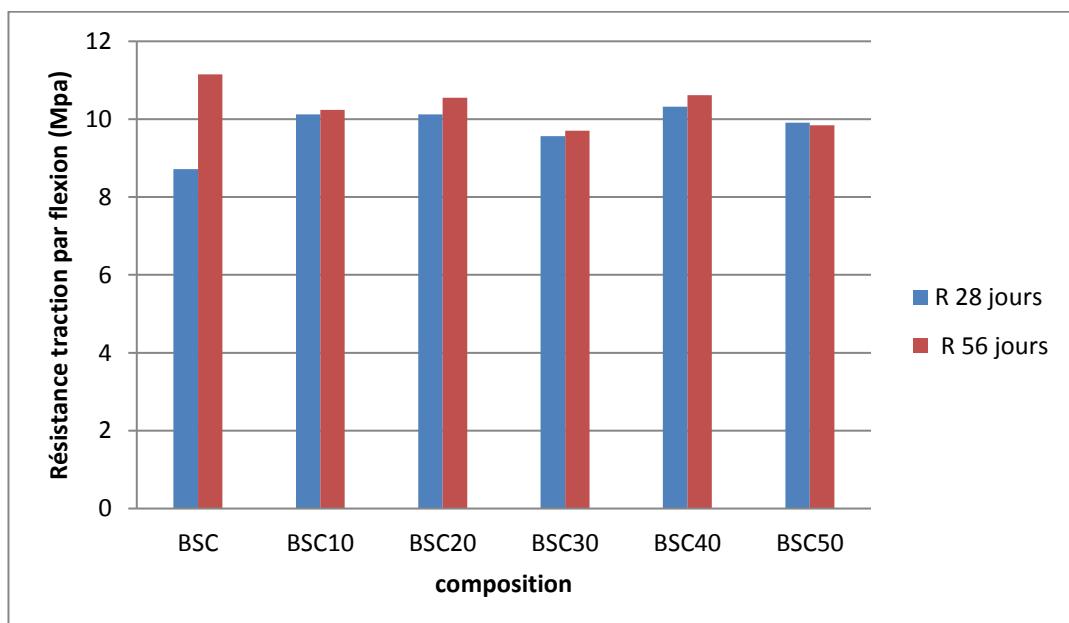


Figure III.3. L'effet de la cendre DPD sur la résistance à la traction par flexion.

La figure III.3 présente l'effet des cendres sur la résistance à la traction par flexion Ce graphique montre l'évolution de la résistance à la traction par flexion à 28 et 56 jours. Il est remarqué :

- À **28 jours**, la formulation BSC (sans cendres) présente une résistance inférieure à celle de plusieurs bétons contenant des cendres (notamment BSC10, BSC20 et BSC40).
- À **56 jours**, le béton de référence montre une résistance plus élevée que toutes les formulations à base de cendres, sauf BSC10, BSC20 et BSC40, qui affichent des performances similaires voire légèrement meilleures.
- Les formulations BSC10, BSC20 et BSC40 montrent une **bonne synergie** entre l'effet filler et l'activité pouzzolanique, ce qui se traduit par des **résistances à la flexion comparables voire meilleures** que le témoin. En revanche, à **50 % de substitution** (BSC50), une légère **diminution** est observée par rapport aux autres compositions, traduisant un **effet de dilution** du ciment portland trop important.

Ce qui peut être expliqué comme suivant :

- **Réactivité pouzzolanique des cendres** : avec le temps, les cendres réagissent avec la chaux libérée pour produire des CSH secondaires qui **renforcent l'interface pâte/matrice**, essentielle pour la résistance à la traction/flexion.
- **Effet de densification (filler)** : à des taux modérés (10 à 40 %), les cendres **comblent les vides**, améliorent la compacité du béton et favorisent une meilleure **adhérence interne**, ce qui profite à la résistance à la flexion.
- **Limite à forte teneur** : à 50 %, la quantité de ciment actif est réduite, ce qui peut affecter la cohésion globale du béton malgré l'effet pouzzolanique, expliquant la légère baisse.

III.3.2.2. Vitesse des ondes soniques

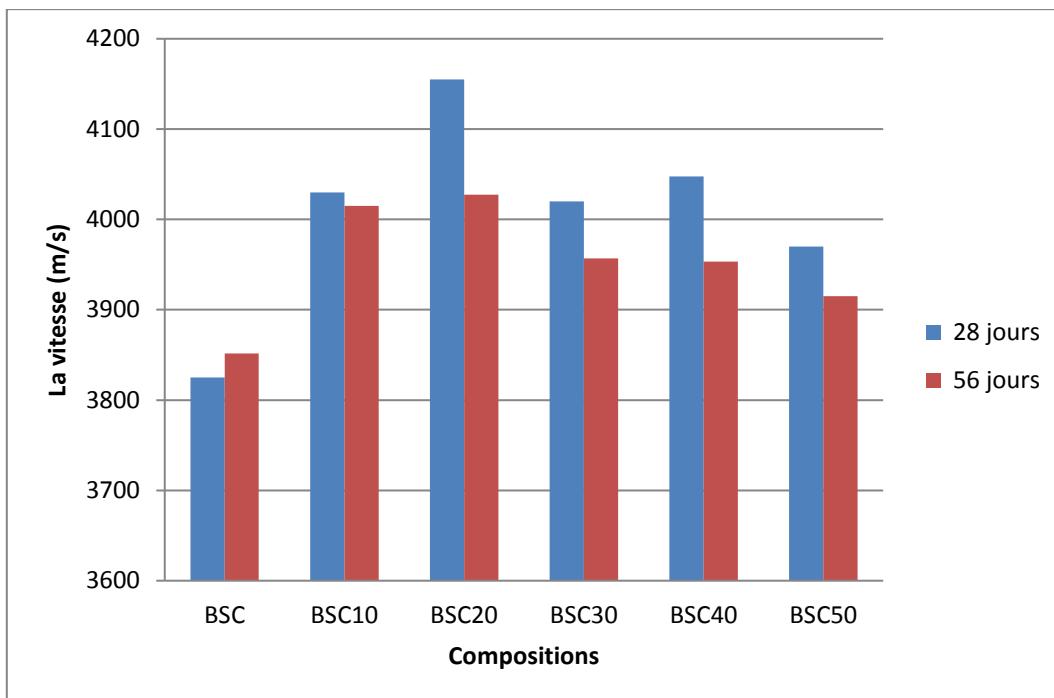


Figure III.4. Effet de la cendre DPD sur la vitesse ultrasonore

La figure III.4 montre l'effet de la vitesse ultrasonore de cendre DPD dans le béton de sable ; cette figure illustre

- La vitesse ultrasonore est généralement plus élevée pour les compositions BSC10, BSC20, et BSC30, avec un pic notable à BSC20, puis elle diminue pour BSC40 et BSC50.
- La vitesse ultrasonore dans le béton dépend de sa densité, de sa rigidité et de ses propriétés internes.
- Jusqu'à une certaine proportion de cendre (notamment autour de BSC20), la vitesse ultrasonore augmente, ce qui indique une amélioration de la densité et de la rigidité du béton. La cendre peut contribuer à une meilleure compacité et une meilleure liaison dans la matrice du béton.
- Au-delà de cette proportion (vers BSC40 et BSC50), la vitesse diminue, suggérant une dégradation de la structure interne, probablement à cause d'un excès de cendre qui pourrait provoquer une porosité accrue ou une moindre cohésion.

On constate l'incorporation de cendre dans le béton de sable a un effet optimal à une certaine proportion (autour de BSC20), où la vitesse ultrasonore atteint son maximum, indiquant une meilleure densité et rigidité. Au-delà, la performance mécanique semble diminuer, probablement à cause d'une porosité accrue ou d'une mauvaise cohésion interne.

III.3.3.Effet des Propriétés physique des bétons sable

III.3.3.1. La masse volumique

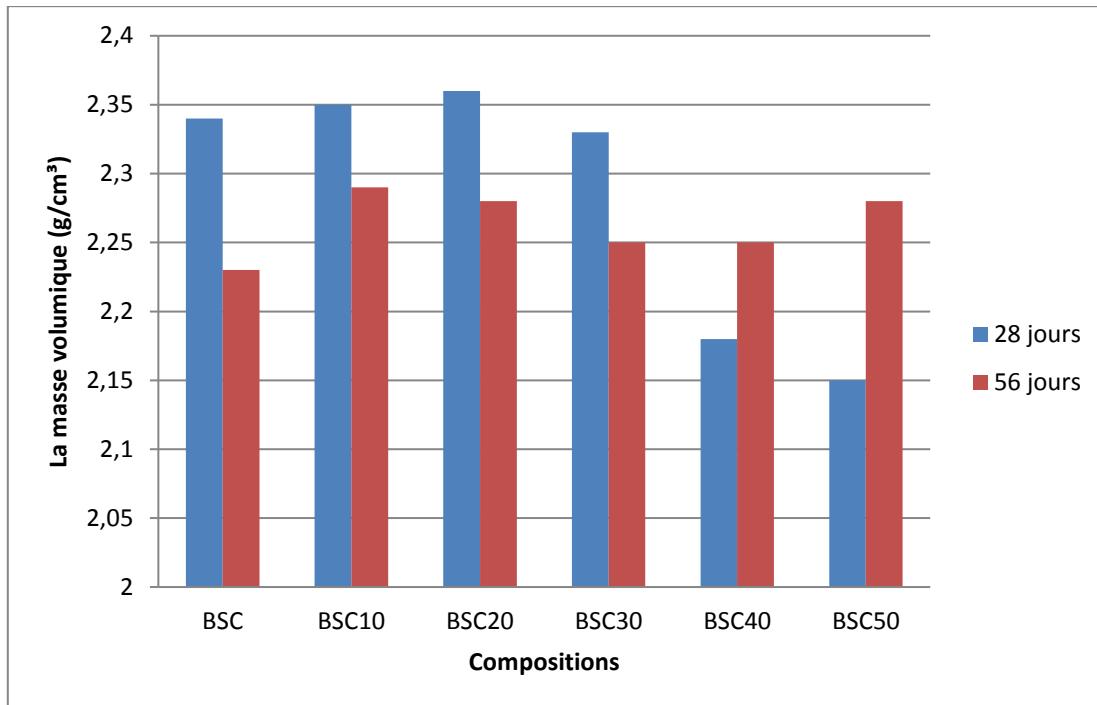


Figure III.5. Effet de la cendre DPD sur la masse volumique

D'après la figure III.5 qui montre l'effet de cendre DPD sur la masse volumique ; on a les remarques suivantes

- La masse volumique est la plus élevée à 28 jours pour BSC10, puis pour BSC20, ce qui indique que l'ajout de cendre à ces niveaux favorise une meilleure densité du béton. La cendre peut contribuer à réduire la porosité et à améliorer la compacité de la matrice.
- La masse volumique diminue sensiblement pour BSC40 et BSC50, surtout à 28 jours ; ce qui suggère que l'excès de cendre peut introduire plus de porosité ou de défauts internes, réduisant ainsi la densité du matériau.
- A l'âge de 56 jours, la masse volumique tend à augmenter pour toutes les compositions, notamment pour BSC50.

On constate a des proportions modérées (autour de BSC10 et BSC20) améliorent la densité du béton, tandis qu'un excès (BSC40 et BSC50) réduit cette densité. La croissance de la masse volumique avec le temps confirme la maturation continue du matériau, avec une meilleure densification pour les compositions optimales.

III.3.3.2. Absorption d'eau totale

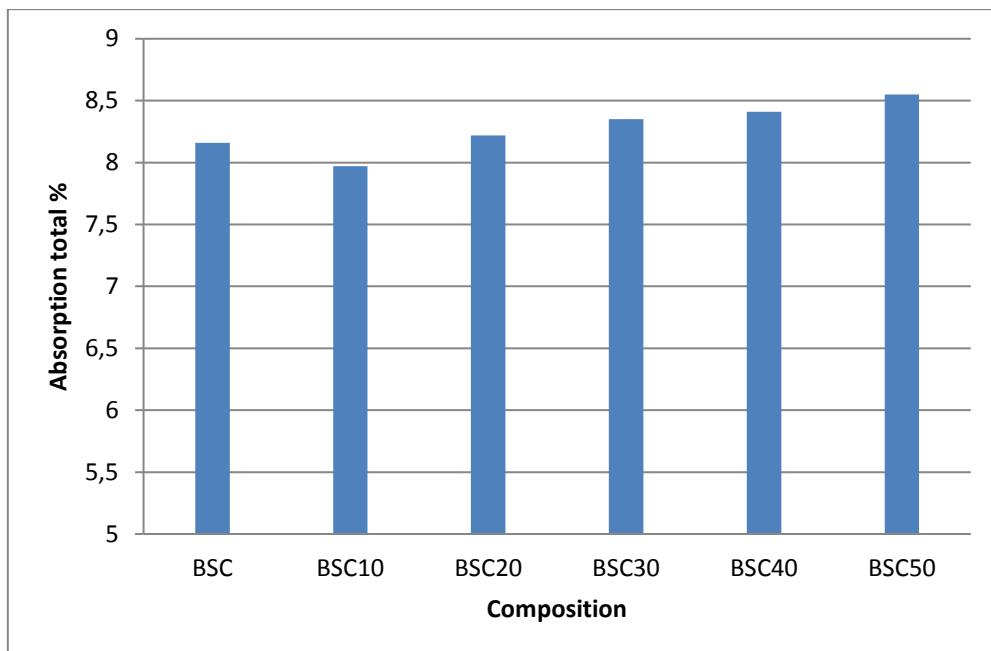


Figure III.6. Effet de la cendre DPD sur l'absorption d'eau totale

L'absorption d'eau est un paramètre crucial pour évaluer la porosité capillaire et, par conséquent, la durabilité des bétons. L'analyse des résultats présentés dans La figure III. 6 montre une variation significative de l'absorption d'eau en fonction du pourcentage de cendre incorporée. La composition BSC10, contenant 10 % de cendre DPD, présente le taux d'absorption le plus faible comparé au béton de référence (BSC) et aux autres formulations. Cette amélioration peut être attribuée à un double effet :

- d'une part, l'effet filler, où les particules fines de la cendre comblient les vides entre les grains du squelette granulaire, ce qui densifie la matrice et réduit la porosité ouverte ;
- d'autre part, l'effet pouzzolanique, où la silice contenue dans la cendre réagit progressivement avec la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) issue de l'hydratation du ciment, formant des produits cimentaires secondaires (CSH) qui renforcent la structure interne du béton.

Cependant, à partir d'un taux d'incorporation supérieur à 10 %, on observe une tendance inverse avec une augmentation progressive de l'absorption d'eau. Cette évolution peut s'expliquer par une sursaturation en matière fine, pouvant perturber la bonne hydratation du ciment. De plus, une partie de la cendre non réactive peut agir comme un simple substitut inerte, augmentant la porosité capillaire. À forte teneur, la mauvaise dispersion des cendres dans le mélange peut également conduire à des zones hétérogènes et plus perméables.

Ainsi, il ressort de cette étude qu'un taux modéré d'ajout de cendre DPD ($\approx 10\%$) est bénéfique, tandis qu'un excès peut compromettre l'étanchéité et la durabilité du béton en raison d'une porosité accrue.

III.3.3.3. Porosité

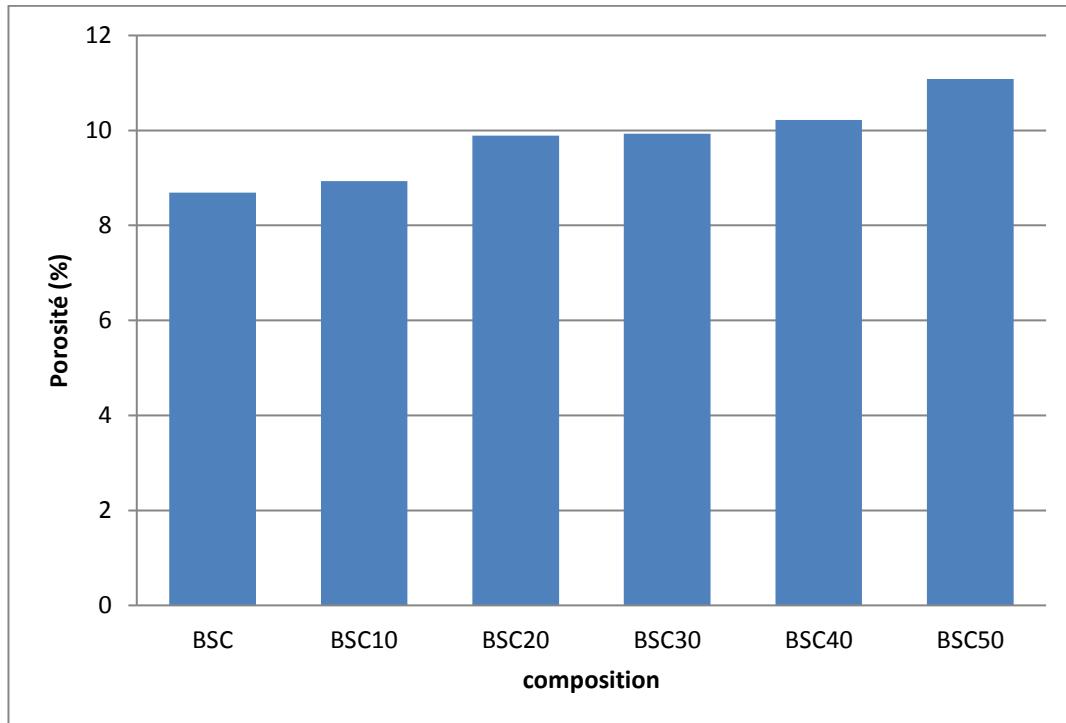


Figure III. 7. Effet de la cendre DPD sur la porosité

L'analyse des résultats obtenus dans la figure III.7 ; après 28 jours de cure met en évidence une augmentation progressive de la porosité totale des différentes compositions de béton incorporant des cendres de DPD, en comparaison avec le béton de référence (BSC), qui ne contient aucun ajout. En effet, ce dernier présente la porosité la plus faible, évaluée à 8,69 %, tandis que la formulation contenant 50 % de cendre (BSC50) atteint une porosité maximale de 11,08 %.

Cette évolution indique clairement que l'augmentation du taux de substitution du filer calcaire par la cendre entraîne une hausse de la porosité du béton de sable. Ce comportement peut être attribué à plusieurs facteurs :

- Finesse et nature des cendres : bien que les cendres possèdent un certain effet pouzzolanique, leur pouvoir liant immédiat est inférieur à celui du ciment Portland. Ainsi, à haut taux de remplacement, la matrice cimentaire est moins dense à court terme, ce qui laisse subsister davantage de microcavités et pores ouverts.
- Réactivité retardée : bien que les cendres de DPD puissent participer aux réactions pouzzolaniques à moyen et long terme, leur faible réactivité initiale ne permet pas de compenser immédiatement la perte de compacité engendrée par la substitution du ciment.

En conclusion, l'utilisation des cendres de DPD dans le béton de sable induit une augmentation de la porosité totale, particulièrement marquée à forts taux de substitution. Il en découle une nécessité de maîtriser la proportion optimale d'incorporation, de manière à bénéficier de leurs effets bénéfiques à long terme sans compromettre la structure poreuse du matériau.

III.4. Effet sur La durabilité

Une exposition des mélanges été appliquée dans deux milieux agressifs, les milieux qui ont été choisis:

- 1- Attaque des chlorures : les éprouvettes ont été mises dans l'acide chlorhydrique (HCl) à une concentration de 10% pendant une durée de 28 jours.
- 2- Attaque sulfatique : les éprouvettes ont été mises dans l'acide sulfurique (H_2SO_4) à une concentration de 10% pendant une durée de 28 jours.

Afin d'évaluer la résistance des mélanges, deux tests ont été effectué : la perte en masse et l'écrasement des éprouvettes sous une force de compression.

Les résultats ont montrés :

III.4.1. Résistance à la compression (HCl)

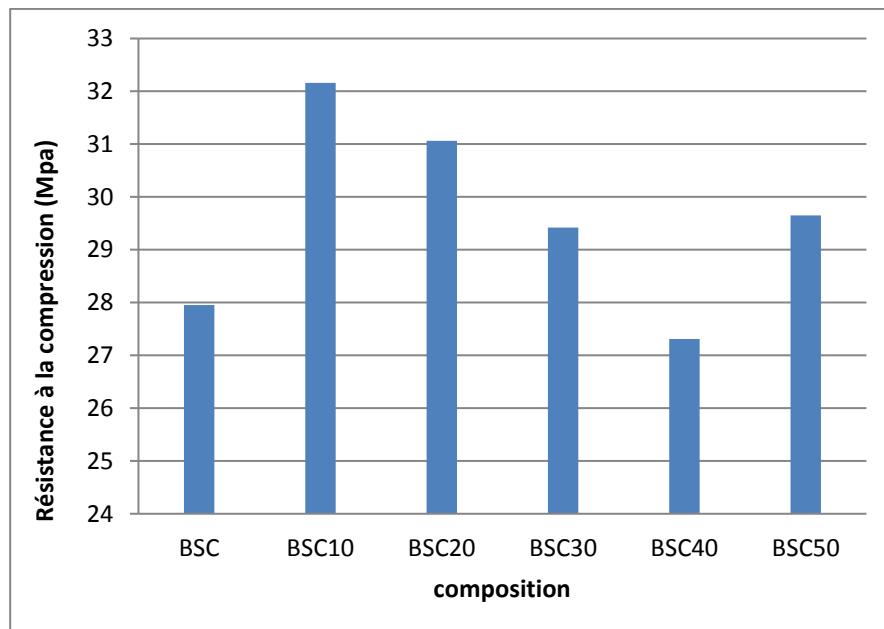


Figure III.8. L'effet HCl sur la résistance à la compression.

La figure III.8 présente l'effet de l'HCl sur la résistance à la compression des mélanges aux cendres DPD. Les résultats montrent que les formulations à faibles dosages en cendre,

notamment BSC10 (32,16 MPa) et BSC20 (31,06 MPa), présentent une résistance supérieure à celle du béton de référence BSC (27,95 MPa). Cette amélioration peut être attribuée à l'effet pouzzolanique des cendres : la silice réactive contenue dans les cendres interagit avec la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) pour former des composés cimentaires secondaires de type C-S-H, contribuant à la densification de la matrice et à une meilleure résistance aux environnements agressifs. Cette réaction pouzzolanique, bien que lente, permet de combler les vides, réduire la perméabilité et freiner la pénétration des ions acides.

Cependant, à des taux plus élevés de substitution (au-delà de 20 %), une baisse progressive de la résistance est observée, avec une valeur minimale pour la composition BSC40 (27,31 MPa). Cette dégradation peut s'expliquer par un excès de cendres inertes ou peu réactives, qui diluent la quantité de ciment actif, réduisent la formation des hydrates primaires, et entraînent une augmentation de la porosité. Ainsi, la structure devient plus vulnérable à la pénétration de l'acide et à la lixiviation des produits d'hydratation. Toutefois, une légère remontée de la résistance est observée pour BSC50 (29,65 MPa), suggérant qu'à très forte teneur, les cendres peuvent jouer un rôle de microfiller, contribuant mécaniquement à la réduction des vides et à la limitation partielle de l'agression acide.

III.4.2.Résistance à la compression :(H_2SO_4)

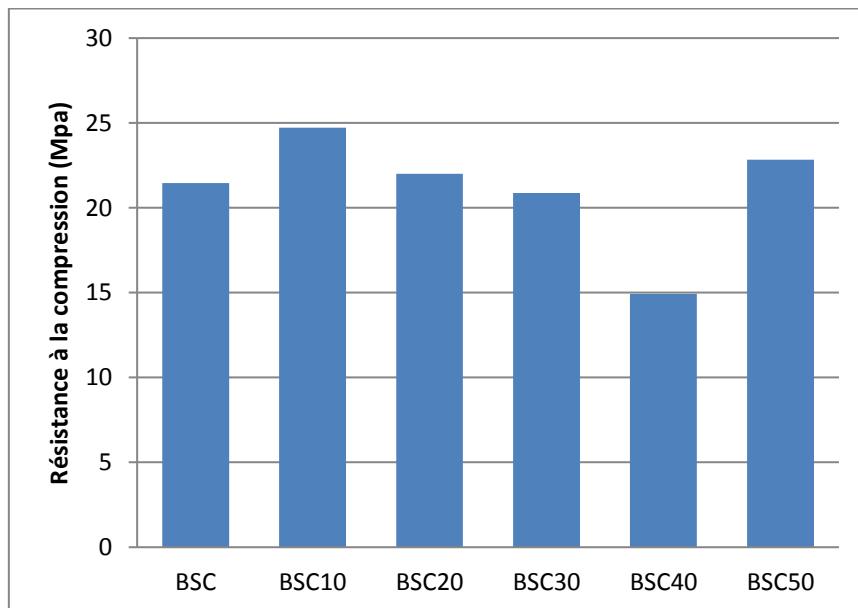


Figure III.9. L'effet du H_2SO_4 sur la résistance à la compression.

La figure III.9 montre l'effet de H_2SO_4 sur la résistance à la compression des mélanges aux cendres DPD. Les résultats montrent que la formulation BSC10 présente la résistance la plus élevée (24,72 MPa), dépassant celle du béton de référence (BSC = 21,6 MPa), ce qui

confirme l'effet bénéfique d'un ajout modéré de cendre sur la durabilité chimique du béton. Cette amélioration s'explique par l'effet pouzzolanique, réduisant les composés sensibles aux attaques acides, et par un effet filler qui densifie la matrice.

En revanche, à des taux plus élevés (BSC20 à BSC40), une diminution progressive de la résistance est observée, la valeur minimale étant atteinte à BSC40 (14,93 MPa). Cette perte de performance est due à la réduction de la teneur en liant actif, à l'augmentation de la porosité, et à la vulnérabilité accrue aux attaques chimiques.

Enfin, BSC50 montre une légère remontée de la résistance (22,84 MPa), qui pourrait être attribuée à une meilleure compacité ponctuelle ou à un effet colmatant des fines cendreuses.

On constate qu'un ajout modéré de cendre DPD (notamment à 10 %) améliore nettement la résistance du béton en milieu sulfurique. Au-delà de cette proportion, l'effet devient contre-productif, à cause de la dilution du liant actif **et de** l'augmentation de la porosité.

III 4.3. Perte de masse dans le milieu (HCl) :

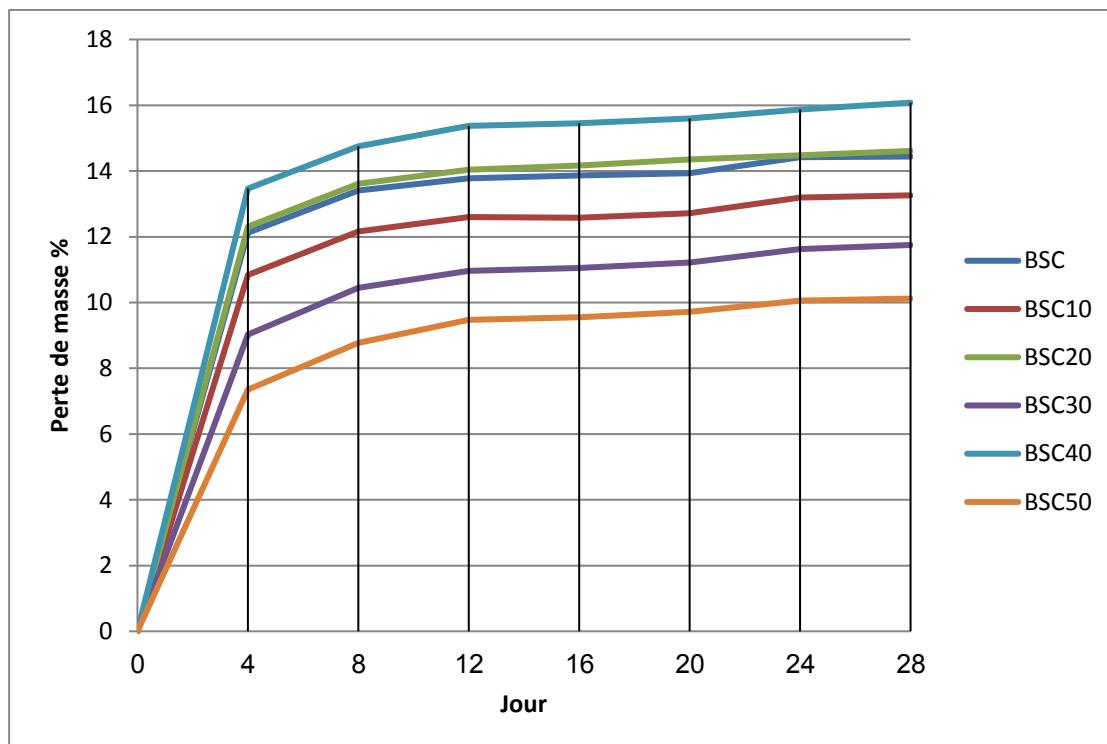


Figure III.10. L'effet de HCl sur la perte de masse.

III 4.4. Perte de masse dans le milieu (H_2SO_4) :

D'après la figure III .10 on trouve que les différentes formulations ont montré une perte en masse variable, indiquant des niveaux de dégradation chimique distincts :

- **BSC50** (50 % de cendre) présente la **meilleure résistance avec la plus faible perte de masse (10,12 %)**, grâce probablement à une meilleure compacité de la matrice.
- **BSC30** montre également une bonne tenue (11,75 %), témoignant d'un comportement stable en milieu acide.
- **BSC10** et **BSC20** ont des pertes proches de celle du béton de référence (**13,26 % et 14,61 % contre 14,44 % pour BSC**), traduisant une amélioration limitée.
- **BSC40**, malgré une teneur élevée en cendres, affiche la **plus forte perte de masse (16,08 %)**, suggérant une mauvaise interaction ou une porosité accrue à cette formulation.

En fin ; les ajouts modérés à élevés de cendre DPD (jusqu'à 30 %) peuvent améliorer la résistance chimique du béton dans un environnement acide HCl, mais **un dosage mal maîtrisé (comme BSC40)** peut entraîner une dégradation accrue.

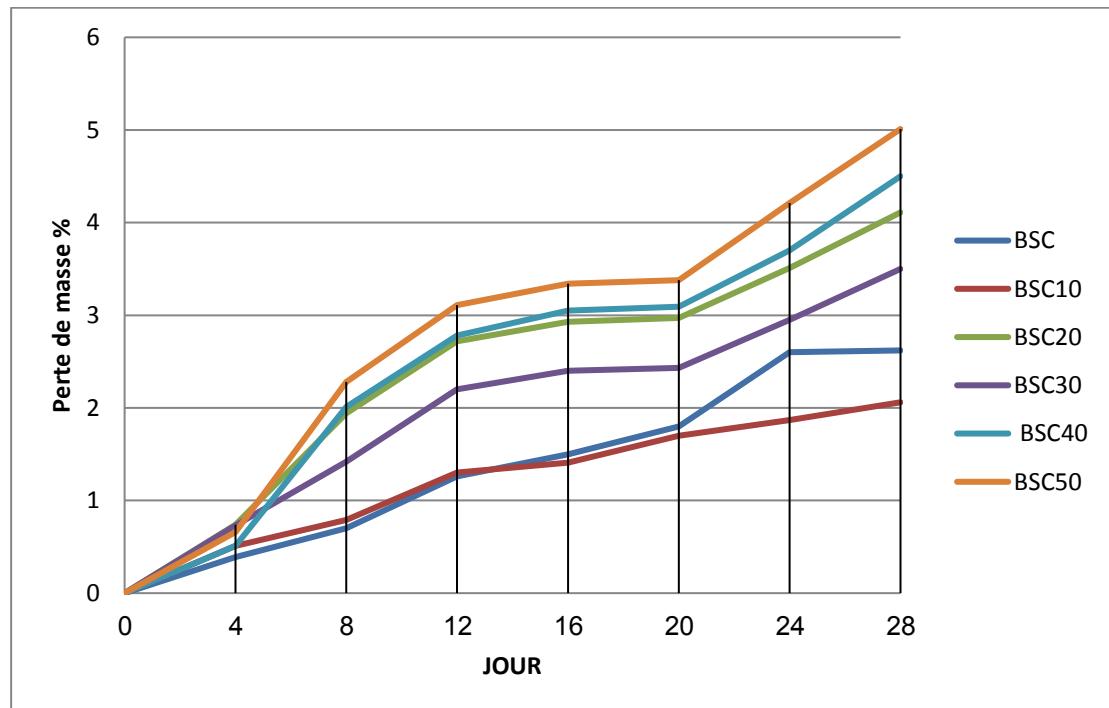


Figure III.11. L'effet du H_2SO_4 sur la perte de masse.

La courbe illustrée dans la figure III.11 montre les résultats suivants :

- **Un ajout modéré de cendre DPD (BSC10)** améliore la résistance à l'acide, avec **la plus faible perte en masse (2,06 %)**, inférieure à celle du béton témoin (2,62 %).
- **BSC30** reste relativement performant (3,50 %), mais au-delà, la perte augmente significativement.
- **BSC50**, avec 50 % de cendre, enregistre la **plus forte dégradation (5,01 %)**, indiquant qu'un excès de cendre compromet la résistance chimique du béton.

Globalement, les **pertes en masse dans H₂SO₄ sont plus faibles** que dans HCl. Cela peut s'expliquer par :

- La nature différente des attaques chimiques : **HCl dissout principalement les hydrates de calcium**, tandis que **H₂SO₄ réagit avec le calcium pour former du gypse**, qui **colmate temporairement** les pores en surface et ralentit l'agression.

En conclusion, **des ajouts raisonnés de cendre (10–30 %)** offrent une meilleure protection du béton en milieu sulfurique, tandis que **des dosages excessifs réduisent sa durabilité**.

III.5. Conclusion

L'étude que nous avons menée dans ce chapitre constitue la base principale de notre programme expérimental, qui vise à formuler et caractériser un béton de sable à base de fillers actifs (la cendre de palmier dattier). Nous avons étudié l'effet de ces ajouts sur les propriétés mécaniques, physiques et la durabilité.

Cette étude nous a permis d'aboutir aux résultats suivants :

L'incorporation de la cendre de palmier dattier (DPD) dans le béton de sable constitue une approche prometteuse en matière de valorisation des déchets agricoles et de production de bétons plus durables et éco-responsables. L'analyse expérimentale menée a permis de mettre en évidence les effets de cette incorporation sur les différentes propriétés du béton, avec des comportements fortement dépendants du taux de substitution.

➤ Propriétés fraîches – Maniabilité

L'ajout de cendre DPD entraîne une **baisse significative de la maniabilité**, attribuée à la finesse, la porosité et le caractère absorbant des particules de cendre. Dès 10 % de substitution, une chute de 50 % est observée, témoignant d'un fort besoin en eau pour maintenir la consistance.

➤ Propriétés mécaniques – Compression et flexion

- À **7 jours**, les résistances mécaniques diminuent, surtout aux faibles et fortes teneurs (BSC10 et BSC50), reflétant un retard dans les réactions hydrauliques.
- À **28 et 56 jours**, une **amélioration progressive** est notée, surtout entre 20 et 40 %, grâce à la **réactivité pouzzolanique** de la cendre et son effet de **filler**, comblant les pores et densifiant la matrice.
- En **flexion**, les compositions BSC10, BSC20 et BSC40 affichent les meilleures performances à long terme, traduisant une bonne interaction entre effet de comblement et réactivité chimique.

➤ Durabilité – Résistance en milieux acides

- En milieu **chlorhydrique (HCl)**, les formulations avec 10 à 30 % de cendre montrent une meilleure résistance à la compression et une **perte en masse réduite**, avec un minimum atteint à BSC50.
- En milieu **sulfurique (H₂SO₄)**, les résultats sont globalement moins bons que dans HCl, mais BSC10 et BSC30 se distinguent encore par leur **meilleure tenue**, avec des pertes en masse plus faibles que le béton de référence. L'excès de cendre (BSC50) reste toutefois défavorable.

➤ Propriétés physiques

- **Vitesse ultrasonique** : elle atteint un pic pour BSC20, indiquant une meilleure compacité et cohésion. Elle baisse au-delà, en raison d'une porosité accrue.
- **Masse volumique** : une amélioration est notée pour BSC10 et BSC20. Aux taux plus élevés, la masse volumique chute, révélant une structure interne plus poreuse.
- **Absorption d'eau** : BSC10 montre le **taux le plus faible**, grâce à l'effet densifiant de la cendre. À plus de 10 %, l'absorption augmente, reflet d'une porosité plus marquée.
- **Porosité** : elle augmente avec le taux de cendre, atteignant un maximum à 50 %, ce qui impacte négativement la durabilité si le taux est excessif.

❖ EN FIN on peut conclure ce qui suit

L'ajout de cendre DPD au béton de sable est bénéfique jusqu'à un certain seuil. Un **taux optimal entre 10 et 30 %** permet :

- une **bonne densité**,
- un **renforcement progressif** des propriétés mécaniques,
- une **meilleure résistance aux milieux agressifs** (HCl et H₂SO₄),

- une réduction de l'absorption d'eau et des pertes en masse,
tout en valorisant un déchet local abondant.

Cependant, **au-delà de 40-50 %**, les effets deviennent globalement négatifs, avec une augmentation de la porosité, une baisse de la compacité et une maniabilité très réduite, compromettant la durabilité globale.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce travail s'inscrit dans une démarche de valorisation des déchets agricoles, en particulier ceux issus du palmier dattier, à travers leur incorporation sous forme de cendre (DPD) dans le béton de sable. L'objectif principal était d'évaluer l'influence de cette cendre sur les propriétés physico-mécaniques, la durabilité et la performance globale du béton, tout en explorant ses avantages environnementaux et économiques.

Les résultats expérimentaux ont permis de mettre en évidence plusieurs conclusions majeures :

Des performances techniques

- L'introduction de la cendre DPD entraîne une **baisse de la maniabilité** dès les premiers pourcentages, due à sa forte porosité et son pouvoir absorbant, ce qui impose un ajustement du rapport eau/liant ou l'utilisation d'adjuvants plastifiants.
- Sur le plan **mécanique**, une nette amélioration est observée à moyen et long terme (28 et 56 jours), grâce à la **réactivité pouzzolanique** de la cendre et à son effet **filler**, particulièrement pour des taux de 20 à 40 %. Ces pourcentages optimaux assurent un bon compromis entre performance mécanique et densification de la matrice.
- Les essais en **traction/flexion** confirment cette tendance, avec de bonnes performances pour les compositions contenant 10 à 40%, traduisant une meilleure cohésion interne et une interface pâte-granulat renforcée.
- Les propriétés **physiques**, telles que la **masse volumique**, la **vitesse ultrasonique** et **l'absorption d'eau**, montrent également des améliorations notables à faibles et moyens taux de cendre, avant de se dégrader à 50 %, à cause d'une porosité accrue ou d'un excès de matière inerte.
- En termes de **durabilité**, les résultats montrent que les bétons contenant de la cendre DPD offrent une **meilleure résistance en milieux acides**, notamment HCl et H₂SO₄, avec des pertes en masse réduites et une meilleure tenue à la compression pour les compositions optimisées.

Conclusion finale

L'ensemble des résultats démontre que la cendre de palmier dattier peut être utilisée de manière efficace comme une substitution active du filler dans le béton de sable, à condition de maîtriser le **taux d'incorporation**. Un **dosage optimal situé entre 10 % et 30 %** permet d'atteindre un équilibre satisfaisant entre **performances mécaniques, durabilité, compacité et impact environnemental**. Cette approche s'inscrit pleinement dans la logique de **construction durable**, tout en **valorisant une ressource locale** souvent négligée. Elle ouvre ainsi la voie à des solutions constructives innovantes, économiques et respectueuses de l'environnement, particulièrement adaptées aux zones sahariennes et aux régions productrices de palmier dattier.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1]	Benaissa. A., (2009). Déformations différées d'un béton de sable. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux. Laboratoire régional des ponts et chaussées.
[2]	Sablocrete, Bétons de sable , Projet national de recherche-développement . France, Paris : Presses de l'Ecole nationale des ponts et chaussées. 1994.
[3]	AFNOR NF P 18-500, "Béton de sable," no. 1, pp. 1–12, 1995.
[4]	AFNOR NF EN 934-2/A2, "Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Partie 2 : Adjuvants pour béton - Définitions et exigences," Afnor, vol. 33, no. 0, 2006.
[5]	REZIG.S, Optimisation de la formulation du béton de sable dans le cadre de valorisation des matériaux locaux, MEMOIRE DE MAGISTER, Université Mohamed Khider –Biskra,pp8-12
[6]	SABLOCRETE, (1994). Béton de sable, Presse de l'école nationale des ponts et des chaussées, Paris, France.
[7]	AFNOR NF P15-301, "Liants hydrauliques Ciments courants Composition," no. 1, pp.1–25, 1994.
[8]	"Guide de prescription des ciments pour des constructions durables" .centre d'information sur le cimentasses applications. Collection technique Cimbéton,pp10-15
[9]	Presse d'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées., (1994). Béton de sable, caractéristiques et pratique d'utilisation. Projet « SABLOCRETE »
[10]	SABLOCRETE, « Bétons de sable : caractéristiques et pratique d'utilisation », Presses de l'école nationale des ponts et chaussées (1994).
[11]	GADRI.K, CONTRIBUTION A L'ETUDE D'UN BETON DE SABLE AVEC FIBRES ET RESINE DESTINE POUR LA REPARATION MINCE DES STRUCTURES,(2007), MÉMOIRE DE MAGISTER, UNIVERSITÉ MOHAMED KHIDER BISKRA,pp65-66
[12]	Sandrine Catinard, « Durabilité à long terme de matériaux cimentaires, avec ou sans fillers calcaire en contact avec des solutions salines ».Thèse (P.H.D), Université LAVAL (Québec) CANADA (2000).
[13]	J.J.Chauvin et G.Grimaldi, « Les bétons de sables » Bulletin liaison laboratoire, Ponts et chaussés N°157, Ref 3336, PP:9-15, (Sept-Oct 1988)
[14]	K.GADRI, "Etude Expérimentale Sur La Compatibilité Déformationnelle Des Réparations En Béton De Sable", mémoire de doctorat ,université Med Khaider , biskra (2018).
[15]	(KIRPACH, 2001) {C. KIRPACH ; Ciments Luxembourgeois, Séminaire- Béton2001 : Journée d'information technique ; 23 novembre 2001, P 7-21}.
[16]	(PREDIS ; 2018) {PREDIS-groupe de travail n°5 ; Améliorer la valorisation des déchets industriels en BTP ; 24/05/2018}.
[17]	(Viviani ; 2018) {M. Viviani ; Cendres de biomasse : valorisations ; 3 mai 2018}. (BAALI et all 2015) {K.BAALI et K.BELBARKA ; effet de l'ajout de la cendre des déchets de palmier sur les performances mécanique des tufs gypso-calcaire ; 2015 ; Master : Génie Civil : Constructions civiles et industrielles (C.C.I) : Université Kasdi Merbah – Ouargla.}.
[18]	(Martin, 2015) {P. Martin ; Midi de la biomasse, Pistes de valorisation des cendres de chaufferies biomasse en Wallonie ; 21 avril 2015}
[19]	(SEGUI ; 2011) {Pauline P.SEGUI ; élaboration de liants hydrauliques routiers à base de pouzzolane naturelle ou de cendre volante de papeterie ; 2011}.

REFERENCES NORMATIVES

<p>NF P 18-500: énonce les spécifications relatives aux bétons de sable, lorsqu'elles diffèrent de celles des bétons traditionnels.</p>
<p>NF EN 197-1 : énonce les Cinq types de ciment regroupent 27 ciments courant selon leur composition</p> <p>CEM I Cement Portland (1)</p> <p>CEM II Cement Portland composé (19)</p> <p>CEM III Cement de haut fourneau (3)</p> <p>CEM IV Cement pouzzolanique (2)</p> <p>CEM V Cement composé (2)</p>
<p>NF P 18-555: Granulats-Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et teneur en eau des sables, Norme Française.</p>
<p>NF P 18-301: définit les spécifications que doivent satisfaire les granulats destinés à la confection de bétons hydrauliques.</p>
<p>NF P 18-598: Dans la série des normes qui concerne les granulats, la présente norme définit une méthode d'évaluation de la propreté des fines d'un sable.</p>
<p>NF EN 933-1, 1997, « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 1: Détermination de la granularité. Analyse granulométrique par tamisage », AFNOR.</p>
<p>AFNOR, NF EN 12620, (2003), Granulats pour béton ; Indice de classement : P18-601.</p>
<p>NF P 15-301: le système français de normalisation et de certification des ciments</p>
<p>NF P 98-170: La présente norme fixe les niveaux de spécifications relatives à l'exécution et au contrôle des chaussées en béton de ciment coulé en place, serré par vibration ou fluidifié</p>
<p>NFP18-303: Les matériaux en suspension doivent être inférieurs à 0.5% de l'eau en masse pour le béton non armé.</p>
<p>NF EN 934-2-A2: Le présent document fixe les prescriptions et les exigences pour les adjuvants utilisés dans les bétons</p>
<p>EN 1008 La norme NF EN 1008 spécifie les critères d'acceptation de l'eau pour une utilisation en eau de gâchage pour béton conforme à la NF EN 206-1.</p>
<p>NF EN 196-1: La détermination des résistances mécaniques est réalisée conformément à la norme NF EN 196, partie 1. Cette norme décrit une méthode de détermination des résistances à la compression et à la flexion d'un mortier de ciment.</p>
<p>NF P 18-452: Normes AFNOR : « Béton- mesure du temps d'écoulement des bétons et des mortiers aux maniabilité », Mai 1988.</p>

Annexe

COMPOSITION

Clinker	Ajout calcaire	Constituant secondaire
(80 à 94) %	Catégorie A (06 à 20) %	(De 0 à 5) %

CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES

	Temps de prise	Stabilité
VALEUR	≥ 60 minutes	≤ 10 MINUTES

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

Résistance à la compression à 02 j	Résistance à la compression à 28 j
42.5 N	≥ 10.0 N / mm ²
42.5 R	≥ 20.0 N / mm ²

CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES

Teneur en sulfates (SO ₃)	Teneur en chlorures (Cl)
≤ 4.0 %	≤ 0.10 %

PACKAGING

Sacs 50 kg / Disponible en sac & Vrac