

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université 20 Août 1955-SKIKKA

Faculté de Technologie

Département : Génie civil



جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة

كلية التكنولوجيا

قسم الهندسة المدنية

MÉMOIRE

Présenté

A

L'UNIVERSITÉ 20 AOÛT 1955 SKIKDA

Pour obtenir le titre de

MASTER

Spécialité

GÉNIE CIVIL

Option

MATÉRIAUX EN GÉNIE CIVIL

Par

Belaid Moui Ilham

Thème

Influence d'un déchet recyclé sur les performances du béton

Soutenue le: **29/06/2024**

Membres de Jury:

M: Rammach Karim	MCA	Président	Université 20 AOÛT 55-SKIKDA
Mme: Mohamed Bouteban Yasmine	MCA	Examineur	Université de Constantine
Mme: Kherraf Leila	MCA	Promoteur	Université 20 AOÛT 55-SKIKDA
M: Abdelouahed Assia	PR	Examineur	Université 20 AOÛT 55-SKIKDA

Promotion: 2023-2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

A decorative border of black scrollwork surrounds the text. The scrollwork is intricate, with many loops and flourishes, framing the central text.

REMERCIEMENTS

En premier lieu, on tient à remercier de nous avoir donné le courage ET la force pour accomplir Ce travail ET nous le parions toujours qu'il soit à nos côtés.

Nous exprimons nos sincères remerciements à any familles pour leur sacrifice qu'elles ont faits pour que nous terminions nos études.

*ET très sincèrement notre encadreur **leila kherraf** Au terme de notre travaille nous tenons à remercier **Dani Mohamed.***

Enfin nous remerciant aussi toutes les personnes qui nous aidée de près ou de loin à la rédaction de Ce travail.

MERCI



DEDICACE

DEDICACE

Tout d'abord, je remercie 'Tout-Puissant pour la volonté et la patience qu'Il m'a données pour mener à bien ce travail.

Je dédie cet humble travail à : ma chère mère et mon cher père qui m'ont toujours soutenu

tout au long de ma vie, que Dieu les protège et les protège. et honorables membres de la famille Et à tous mes amis, collègues, professeurs et tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de ce travail

Sommaire

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale	(01)
Chapitre I .béton de sable.....	03
Introduction.....	03
I Historique de béton de sable.....	03
III.1. Définition béton de sable.....	04
III.2. Les composants du béton de sable.....	04
III.2.1. Les sables.....	04
III.2.2. Les fines d'ajouts.....	05
III.2.3. Les ciments	05
III.2.4. L'eau de gâchage	05
III.2.5. Les adjuvants	06
III.3. Autres ajouts	06
III.3.1. Les fibres.....	06
III.3.2. Les gravillons	06
III.3.3. Les colorants	06
IV. Formulation de béton de sable	06
IV.1 Approche théorique de la formulation de béton de sable	06
IV.2 Approche expérimentale de la formulation de béton de sable	09
V. Caractéristiques béton de sable.....	10
V.1 Maniabilité.....	10
V.2 Compacité.....	10
V.3 Comportement mécanique.....	11
V.4 Le retrait.....	11
Retrait V.4.1 de séchage.....	11

V.4.2 Retrait plastique	12
V.4.3 Retrait chimique (retrait endogène).....	12
V.5 Fluage	13
IV. Notion sur la durabilité.....	14
VI.1 Attaque chimique par différents milieux agressifs :.....	14
VI.1.1 Attaques des acides.....	14
VI.1.2 Les différents types des acides	15
VI.1.3 Mécanisme d'attaque.....	16
VI.1.4 Sources des acides.....	17
VI.2 Action des sels	17
VI.3 L'attaque par l'eau de mer.....	18
3.1 VI Les paramètres contrôlant la durabilité du béton en milieu marin ...	19
IV. Domaines d'emploi des bétons de sable	20
VII.1 Les bétons non vibrés	20
VII.2 Les bétons projetés	20
VII.3. Les travaux d'injection	21
VII.4. La préfabrication d'éléments destinés à rester apparents :.....	21
IV. Limites des bétons de sable.....	22
IX. Conclusion.....	23

Chapitre II : Fibres Métalliques et déchet de sable recyclé

II .1 Introduction.....	25
II.2 Définition de béton de fibres	25
II.3 Les fibres.....	26
II.3.1 Définition des fibres	26
II. 3.2 Différents types de fibres	26
II.3.2.1 Fibres métalliques.....	27
II.3.3 Critère de choix du type de fibres	28
II.4 Valorisation des déchets et activité de recyclage en construction.....	29
II.4.1 Introduction.....	29

II.4.2. Déchets et type des déchets.....	29
II.4.2.1 Déchet.....	29
II.4.2.2 Types de déchets.....	30
II.5 Clinker et déchet du clinker.....	33
II.5.1 Définition du clinker.....	34
II.5.2 Composition chimique de clinker.....	34
II.5.3 Composition minéralogique	34
II.5.4 Déchet du clinker.....	35
II.5.5 Préparation du sable déchet du clinker	35
II.6 Marbre et déchet du marbre.....	35
II.6.1 Définitions du marbre.....	35
II.6.2 Déchet du marbre	35
II.7 Faïence et déchet du faïence.....	36
II.7.1 Définition de la faïence.....	36
II.7.2 Déchet de la faïence.....	37
II.8. Conclusion.....	37

Chapitre III. Caractérisation des matériaux

III.1 Introduction.....	40
III.2 Les matériaux utilisés dans le béton.....	40
III.3 Caractéristiques des matériaux utilisées.....	40
III.3.1 Sable.....	41
III.3.1.1 Masse volumique absolue	41
III.3.1.2 Masse volumique apparente	41
III.3.1.4 Equivalent de sable.....	41
III.3.1.5 Analyse granulométrique	42
III.3.1.6 Module de finesse	42
III.3.2Ciment.....	42
III.3.3 Filler de calcaire	46
III.3.4 Les fibres.....	46
III.3.5 Adjuvant.....	47
III.3.6 Eau de gâchage.....	48
III.4. Conclusion	53

CHAPITRE IV : PROGRAMME EXPERIMENTALE ET METHODOLOGIES DES ESSAIS

IV.1 Introduction.....	55
IV.2 Programme expérimental.....	55
IV.2.1 Notation des mélanges retenus.....	55
IV.2.2 Formulation du béton de sable témoin BS (100%SD).....	55
IV.2.3 compositions des différents mélanges.....	56
IV.2.4 Confection des mélanges retenus.....	56
IV.3 METHODOLOGIE DES ESSAIS.....	59
IV.3.1 Essais effectués sur le béton à l'état frais.....	59
IV.3.1.1 Affaissement au cône d'Abrams.....	59
I.V.3.1.2 La densité fraîche.....	59
IV.3.1.3 Air occlus	60
IV.3.2 Essais à l'état durci	61
III.3.2.1. Essai de compression.....	61
III.3.2.2 Essai au scléromètre [NF EN 12504-2].....	62
III.3.2.3 Essai d'ultrason [NF EN 12504-4].....	62
IV.3.2.4 Retrait.....	63
IV.3.2.5 Gonflement	64
IV.4. Conclusion.....	66

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

Introduction.....	68
V.1. Caractérisation des bétons à l'état frais	68
V.1.1 L'ouvrabilité.....	68
V.1.2 La densité	69
V.1.3 L'air occlus.....	69
V.2 Caractérisation des bétons à l'état durci	70
V.2.1 La résistance à la compression	71
V.2.2 La résistance à la flexion	72
V.2.3 Résistance à la traction par fendage	72
V.2.4 L'attaque chimique.....	74
V.2.4.1 Acide HCl	74
V.2.4.2 Acide H₂SO₄.....	75
V.2.5 Essai ultrason et scléromètre.....	76
V.3 Conclusion	77

Liste des figures

Chapitre I .béton de sable

Fig.I.1 Métro de Saint Pétersbourg avec une voûte mince en béton de sable.....	3
Fig. I.2. Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles D du sable.....	8
Fig. I.3 : Effet de la granularité sur la résistance [Sablocrete, 1994].....	11
Fig.I.4 : Retrait béton de sable.....	12
Fig. I.5 Fluage: béton de sable.....	13
Fig. I.6 : La détérioration des silos-tours en béton due à l'attaque des acides d'ensilage.....	15
Fig.I.7 : représentation schématique des différents processus d'attaque du béton par l'eau de mer.....	19
Fig.I.8 : Le béton de sable en projection (Projection sur surface ancienne. Vue de détail.....	21
Fig.I.9 : Le béton de sable dans la préfabrication.....	22

Chapitre II : Fibres Métalliques et déchet de sable recyclé

Fig.II.1 Rôle des fibres dans la matrice de béton.....	26
Fig.II.2 Fibre métallique (DRAMIX).....	28
Fig.II.3 Stratégies de traitement des déchets.....	30
Fig.II.4 Valorisation des déchets.....	30
Fig.II.5 Production de déchets ultimes.....	31
Fig.II.6 Déchets inertes.....	32
Fig.II.7 Le clinker.....	34
Fig.II.8 Déchet du clinker.....	35
Fig.II.9 Les étapes de broyage du clinker.....	37
Figure.II.10 Déchet du marbre.....	37
Fig.II.11 Déchet de la faïence.....	37

Chapitre III. Caractérisation des matériaux

Fig.III.1 Broyage de déchet du clinker.....	41
Fig.III.2 recyclage mécanique de la faïence.....	41
Fig.III.3 La texture des sables utilisées.....	42
Fig.III.4 Courbes granulométriques des sables utilisées.....	44
Fig.III.5 Ciment composé CPJ-CEM II 42.5N de Hadjar Essoud.....	45
Fig.III.6 Filler de calcaire.....	46
Fig.III.7 Fibre métallique utilisé.....	47
Fig.III.8 Adjuvant utilisé.....	48
Fig.III.9 Masse volumique absolue.....	49
Fig.III.10 Masse volumique apparente.....	50
Fig.III.11 Coefficient d'absorption de sable.....	51
Fig.III.12 équivalents de sables.....	52
Fig.III.13 Essai analyse granulométrique.....	53

CHAPITRE IV : PROGRAMME EXPERIMENTALE ET METHODOLOGIES DES ESSAIS

Fig.IV.1 Malaxeur utilisé.....	57
Fig.IV.2 (a, b) Eprouvette avant et après le démoulage.....	58
Figure IV.3 : Conservation des éprouvettes dans un bain d'eau.....	58
Fig.IV.4 Essai d'affaissement.....	59
Fig.IV.5 Essai de la densité à l'état frais.....	60
Fig.IV.6 Mesure de l'air occlus.....	60
Fig.IV.7 Essai de compression.....	61
Fig.IV.8 Essai au scléromètre.....	63
Fig. IV.9 Essai ultrason.....	63
Fig.IV.10 Essai de retrait.....	64
Fig.IV.11 Essai de gonflement.....	65
Fig.IV.12 Essai attaque des solutions chimiques.....	66

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

Fig. V.1 : Variation de l'ouvrabilité en fonction de taux de substitution.....	68
Fig. V.2 : variation de la densité en fonction de taux de substitution.....	69
Fig. V.3 L'air occlus dans les bétons testés.....	70

Fig. V.4 : Evolution de la résistance à la compression des différents mélanges.....	71
Fig. V.5 : Résistance à la flexion des échantillons.	72
Fig.V.7 résultats traction par fendages des bétons.....	73
Fig.V.8 Résultats de retrait en $\mu\text{m}/\text{m}$	74
Fig.V.9. Perte de masse des bétons.....	75
Fig.V.10. Perte de masse des bétons.....	76

Liste des tableaux

Chpitre I .béton de sable

Tableau I.1. Composition théorique et expérimentale du béton de sable.....	10
---	----

Tableau2 : Composants du béton menacé par la corrosion.....	16
--	----

Chapiter II : Fibres Métalliques et déchet de sable recyclé

Tab.II.1 Classification des fibres.....	27
--	----

Tab.II.2 Composition chimique du clinker.....	34
--	----

Tab.II.3 Composition minéralogique du clinker.....	35
---	----

Chapitre III. Caractérisation des matériaux

Tab.III.1 Composition chimiques des sables utilisées.....	42
--	----

Tab.III.2 La masse volumique absolu.....	42
---	----

Tab.III.3 Les masses volumiques apparente.....	43
---	----

Tab.III.4 Coefficients d'absorption.....	43
---	----

Tab.III.5 Equivalent de sable.....	43
---	----

Tab.III.6 Résultat d'analyse granulométrique.....	43
--	----

Tab.III.7 Module de finesse.....	44
---	----

Tableau III.8 Caractéristiques Physiques du ciment CPJ 42.5.....	45
---	----

Tableau III.9 Caractéristiques mécaniques du ciment CPJ 42.5.....	46
--	----

Tableau III.10 Caractéristique Chimique du ciment CPJ 42.5.....	46
--	----

Tab.III.11 Caractéristique chimique de calcaire.....	47
---	----

Tab.III.12 caractéristiques de la fibre.....	48
---	----

Tableau III.13 Caractéristiques d’adjuvant utilisé.....48

**CHAPITRE IV : PROGRAMME EXPERIMENTALE ET
METHODOLOGIES DES ESSAIS**

Tab.IV.1 Notation des mélanges.....56

Tableau IV.2 : Composition d’un 1m³ de béton témoin.....56

Tableau IV.3 : Compositions des mélanges retenus.....56

RESUME

RESUME

Ce mémoire présente les résultats d'une étude expérimentale sur l'influence de la substitution partielle du sable de dune par du sable recyclé provenant de déchets de clinker et de faïence, ainsi que l'incorporation de fibres métalliques de type Dramix, sur le comportement du béton de sable à l'état frais et à l'état durci. Les matériaux utilisés proviennent de l'Est de l'Algérie. Les propriétés évaluées incluent l'ouvrabilité, la densité, l'air occlus, la résistance en compression, la résistance en traction par flexion et par fendage, la dureté, ainsi que la résistance chimique face aux attaques acides. Ces propriétés ont été comparées à celles d'un béton de sable sans fibres. Les résultats montrent une amélioration significative de l'ouvrabilité, de la teneur en air, et des résistances en compression, en flexion et en traction par fendage. toutefois, les pertes de masse sont plus importantes dans les bétons fibrés que dans le béton témoin dans le d'immersion dans l'acide H_2SO_4 .

Mots-clés : Fibre, Béton de sable, marbre, clinker, ouvrabilité, compression, flexion, attaques chimiques.

ABSTRACT

This thesis presents the results of an experimental study on the influence of partial substitution of dune sand with recycled sand from clinker and faience waste, as well as the incorporation of Dramix-type metallic fibers, on the behavior of sand concrete in both fresh and hardened states. The materials used originate from Eastern Algeria. Evaluated properties include workability, density, air entrainment, compressive strength, flexural and splitting tensile strengths, hardness, and chemical resistance to acid attacks. These properties were compared to those of sand concrete without fibers. The results show a significant improvement in workability, air entrainment, compressive, flexural, and splitting tensile strengths. However, there are higher mass losses in fiber-reinforced concretes compared to the control concrete during immersion in H₂SO₄ acid.

Keywords: Fiber, Sand concrete, Marble, Clinker, Workability, Compression, Flexural, Chemical attacks.

ملخص.

يقدم هذا البحث نتائج دراسة تجريبية حول تأثير الاستبدال الجزئي لرمال الكثبان بالرمال المعاد تدويره من نفايات الكنكر والفايانس، بالإضافة إلى إدخال ألياف معدنية من نوع Dramix على سلوك الخرسانة الرملية في حالتها الطازجة والمتصلبة. تأتي المواد المستخدمة من شرق الجزائر. تم تقييم خصائص مثل القابلية للتشغيل، الكثافة، الهواء الفائض، قوة الضغط، وقوة الشد بالانثناء وبالفتق، الصلابة، والمقاومة الكيميائية ضد هجمات الأحماض. تمت مقارنة هذه الخصائص مع تلك الخاصة بالخرسانة الرملية بدون ألياف. تُظهر النتائج تحسناً ملحوظاً في القابلية للتشغيل، والهواء الفائض، وقوة الضغط، والانثناء، وقوة الشد بالفتق. ومع ذلك، توجد فقدانات أكبر في الكتلة في الخرسانات المدعمة بالألياف مقارنة بالخرسانة الضابطة أثناء الانغماس في حمض H_2SO_4 .

الكلمات الرئيسية: ألياف، خرسانة رملية، ركام، كنكر، قابلية للتشغيل، ضغط، انثناء، هجمات كيميائية

cal profession, medical errors.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Depuis peu, l'utilisation des bétons fibrés s'est considérablement élargie à travers le monde. Ces bétons sont employés dans une grande variété d'applications, notamment en construction, en travaux routiers, en aménagement urbain et en génie civil. Cependant, dans certains pays, leur utilisation reste limitée en raison des coûts croissants des ressources fossiles et de l'exploitation intensive des granulats, ainsi que des impacts environnementaux liés à leur production. Cela pousse donc à rechercher d'autres sources de matériaux et de nouvelles filières de production.

Ce travail de mémoire s'inscrit dans ce contexte et a pour objectif l'évaluation de l'impact de l'utilisation des fibres métalliques dans un béton de sable fabriqué à partir de déchets locaux (déchet de faïence et déchet de clinker) et d'examiner les effets de leur incorporation dans la matrice cimentaire à l'état frais et durci, ainsi que sur certains aspects de durabilité.

Pour ce faire, une substitution volumique partielle du sable dunaire a été réalisée en utilisant un mélange de sable de déchets de faïence et de déchets de clinker à des taux de 10 % et 20 %. De plus, des fibres métalliques ont été ajoutées à des pourcentages de 0,25 % et 0,5 % respectivement.

Ce mémoire englobe l'ensemble des essais réalisés et des résultats obtenus et est structuré en cinq chapitres :

Chapitre I : Ce premier chapitre présente un état des connaissances sur le béton de sable.

Chapitre II : Ce chapitre traite de l'effet de l'utilisation des fibres et de quelques déchets dans le béton.

Chapitre III : Le troisième chapitre est consacré à la présentation des caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques des matériaux utilisés.

Chapitre IV : Dans le quatrième chapitre, le programme expérimental, les différentes compositions testées ainsi que les méthodes d'essais utilisées sont détaillées.

Chapitre V : Le cinquième chapitre relate les résultats expérimentaux obtenus ainsi que l'interprétation des phénomènes observés.

Enfin, une conclusion générale clôture notre étude.

CHPITRE I
BETON DE
SABLE

I- Introduction

Le béton se compose de caractéristiques morphologique, physico-chimiques et mécanique très divers : ciment, granulats, eau et le plus souvent d'adjuvants et d'ajout. Chaque composant joue un rôle différent dans le comportement des matériaux, particulièrement frais.

II- Historique de béton de sable

La technique des bétons de sable était tombée en sommeil vers les années 1920 aussi bien en Europe Occidentale qu'en ex URSS pour redevenir d'actualité pendant la deuxième guerre mondiale grâce au comportement de certaines pistes réalisées par l'Allemagne. A travers les différents secteurs (routes, autoroutes, aérodromes, bâtiments et composants du génie civil, ouvrages d'art), les soviétiques ont développé une méthodologie de formulation et surtout de mise en œuvre dans la préfabrication et la projection, Plusieurs ouvrages ont été réalisés à partir de ce matériau et constituent les premières applications de cette technique rapport-sable crête (1987-1991).

En 1954, le professeur REHBINDER et son équipe ont réalisées en Russie les premières expérimentations en laboratoire, l'idée de son travail est basée sur le broyage du mélange composé de ciment et du sable, et d'un agent de mouture sur actif. Un adjuvant réducteur est ajouté lors de malaxage. Les travaux donnent un béton de porosité aussi faible que possible, constitué de capillaires très fins et d'homogénéité maximale après mise en place.

En 1991, MIRONVOK et STERYNE présentent une étude sur des bétons de sable compact à l'aide de l'équipement à vibro-choc pour la fabrication de structures.

En France 1980, des travaux d'expérimentation ont été menés par GUINEZ.R, GLUAIS.G, DELUDE.P. Le but de ces recherches c'est de donner au maçon et entreprises du bâtiment un matériau hydraulique, à base de sable ayant des performances mécaniques modestes, d'autre part, des caractéristiques rhéologiques bien adaptées à une grande facilité de mise en œuvre, sans vibration avec un retrait limité.



Fig.I.1 Métro de Saint Pétersbourg avec une voûte mince en béton de sable

En Algérie en 1997, Une étude est faite par M. BENMALEK.ML sur le béton de sable de dunes. Cette étude a montré qu'en exploitant les caractéristiques physico-chimiques, ce type de sable pourrait bien constituer le squelette d'un béton pour peu que sa formulation soit judicieusement étudiée.[1]

III.1. Définition béton de sable :

Un béton de sable est un béton fin constitué par un mélange de sables, de ciments, d'additions et d'eau ; et éventuellement des adjuvants. Pour répondre aux besoins de certains usages, des ajouts spécifiques peuvent être envisagés : gravillons, fibres, colorants...

Un béton de sable chargé est un béton de sable comportant un ajout de gravillon avec un rapport gravillon (G) / sable (S) est inférieur à 0,7 ($G / S < 0,7$).

Par sables on entend tous granulats 0/D (plus gros grains) conformes aux définitions des normes en vigueur ; soit un sable naturel alluvionnaire ou de ballastière, soit un sable de carrière issu du concassage d'une roche massive ou détritique. D est inférieur ou égal à 4mm.

Mais on peut admettre l'emploi d'un granulat à granulométrie continue de 0mm jusqu'à 8mm tant que le rapport pondéral entre les éléments supérieurs à 4mm et les éléments inférieurs à 4mm reste inférieur à 0,7. [2]

III.2. Les composants du béton de sable :

Un béton de sable est composé de sable, de fines d'ajout, de ciment et d'eau, par rapport à cette composition de base et pour répondre aux besoins de certains usages, d'autres ajouts spécifiques peuvent être envisagés : gravillons, fibres, adjuvants.

III.2.1. Les sables :

Par sables en entend tous granulats 0/D conformes aux définitions des normes NF P 18-101 et NF P18-301*. Il s'agit soit d'un sable naturel alluvionnaire ou de ballastière, soit d'un sable de carrière issu du concassage d'une roche massive ou détritique.

Aucun critère granulaire n'est à priori exigible pour réaliser un béton de sable : on peut utiliser aussi bien un sable fin même (horométrique, type sable de dune) qu'un sable alluvionnaire moyen ou grossier ou de type (0/D) de concassage. La seule restriction d'emploi des sables réside dans leur propreté. Même si des études ont été faites sur les sables- pollués, aucune application n'a été réalisée avec ces sables. Les sables riches en fines naturelles

nécessitent généralement beaucoup plus d'eau de gâchage, ce qui entraîne une chute de la résistance. Mais il est plus prudent à ce stade de se limiter à l'utilisation des sables propres tels qu'ils sont employés pour les bétons classiques.

A- **Sable de dune** : c'est une variété des sables de mer. Il est donc très fin. Les sables de dune se trouvent dans les régions sud du pays. Ils sont situés en zone présaharienne. Les sables retenus sont ceux issus des dunes continentales. Ces dunes sont constituées des nombreux amas de sables fins accumulés dans certaines régions spécifiques du Sahara.

III.2.2. Les fines d'ajouts :

La compacité est l'une des qualités essentielles du béton, elle est en relation directe avec les principales caractéristiques du béton, comme la résistance en compression, en traction, le module de Young, le fluage... etc.

A- **Filler calcaire** :

Le filler calcaire est un matériau très finement broyé, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 μm , ayant une finesse à peu près identique à celle du ciment portland. Il a pour rôle de remplir les vides entre les sables.

L'addition de filler calcaire peut avoir plusieurs fonctions, comme par exemple compléter la courbe granulométrique d'un ciment déficient en grains fins, et compléter aussi la granulométrie du sable comme le cas des bétons de sable.

III.2.3. Les ciments :

Le choix du ciment pour confectionner un béton de sable est conforme à la norme NF P15-301, le choix du ciment est fait à partir de sa classe de résistance, de ses caractéristiques d'hydratation, de l'agressivité du milieu. D'une façon générale, de la composition du béton et de l'usage auquel il est destiné.

Pour bien exploiter l'activité hydraulique des fines d'additions au mélange du béton de sable, les ciments type CPA (ciment portland) sont préférables.

III.2.4. L'eau de gâchage :

L'eau utilisée pour la confection des bétons de sable est conforme à la norme NF P15-303 L'eau efficace comprend, en plus de l'eau de gâchage, une quantité non négligeable d'eau apportée par les additions d'adjuvants et autres ajouts et surtout par les sables.

III.2.5. Les adjuvants :

Les adjuvants sont les produits qui sont incorporés en très faible quantités aux bétons (dose inférieure à 5% du poids de ciment) avant ou pendant le malaxage, dans le but d'améliorer certaines propriétés, soit à l'état frais, ou pendant la prise et le durcissement, soit à l'état durci. On définit le superplastifiant d'après son action principale, même s'il a plusieurs actions secondaires.

III.3. Autres ajouts :

III.3.1. Les fibres :

Elles sont surtout utilisées dans le but de réduire le retrait au premier âge : dosage et nature sont des paramètres très importants pour assurer l'efficacité de cet ajout.

III.3.2. Les gravillons :

Le béton de sable peut contenir un certain pourcentage de gravillons et conserver sa dénomination de « béton de sable chargé ». En effet, tant que les gravillons sont dispersés dans le sable, et ne constituent pas un squelette structuré, le comportement reste le même, l'ajout de gravillons en faible dosage peut améliorer certaines caractéristiques du béton de sable telles que la maniabilité, le retrait, le fluage et la résistance mécanique.

En pratique, on pourra considérer qu'on a affaire à un béton de sable tant que le rapport massive G/S (gravillon/sable) reste inférieur à 0,7.

III.3.3. Les colorants :

Dans certains usages particuliers du béton de sable, les colorants utilisés dans le béton classiques peuvent également être utilisés, à condition de prendre soin de l'homogénéisation et la stabilité de la teinte au cours du temps, pour cela il est recommandé de procéder à une formulation appropriée à ce cas. [3]

IV. Formulation de béton de sable :

L'étude de formulation consiste à trouver le mélange optimal qui répond aux critères techniques et économiques fixés dans la norme.

IV.1 Approche théorique de la formulation de béton de sable :

Le problème de la formulation d'un béton s'articule sur l'optimisation de la compacité du squelette granulaire. Cette compacité est définie comme le rapport du volume développé

par les constituants solides sur le volume total et correspond au complément à l'unité de la porosité.

Etape 1 : l'estimation du dosage en fines

L'approche théorique commence par l'estimation du dosage en fines qui s'inspire principalement de la formule de CAQUOT qui a pu établir, à partir de résultats expérimentaux, une relation mathématique entre le volume des vides (v) d'un mélange granulaire et son étendue granulaire (d/D) :

$$V = V_0 (d / D)^{1/5}$$

Où,

V_0 : constante empirique, des valeurs de l'ordre de 0,7 à 0,8 permettent également d'obtenir une bonne estimation de la porosité du mélange granulaire.

d : correspond à la dimension du tamis retenant 90 % des granulats.

D : correspond à la dimension du tamis retenant 10 % des granulats.

Cette formule suppose que le mélange défini par son étendue granulaire est optimisé (la répartition des grains à l'intérieur de cette étendue granulaire est telle que le mélange présente une porosité minimale).

Pour l'optimisation la compacité des constituants du béton de sable, ces constituants sont séparés en deux fractions, les fines regroupant l'ensemble des grains de tailles inférieures à 80 μm et le sable couvrant l'étendue granulaire 80 $\mu\text{m}/D$ (D étant défini ici comme le diamètre maximal du sable).

Etape 2 : estimation de dosage en eau

Les vides inters granulaires se décomposent en la somme d'un volume d'eau (e) et d'un volume de vides piégés (v), porosité minimale théorique du béton est donnée par la relation de la compacité de CAQUOT :

$$(e + v)_{\min} = 0,8 (d/D)^{0.2}$$

d/D : l'étendue granulaire y compris les fines.

Le calcul de la porosité minimale nécessite la valeur de d , borne inférieure de l'étendue granulaire. L'estimation de cette valeur est délicate, compte tenu des effets de

floculation dans l'eau qui peuvent se produire à l'échelle des fines particules. Ainsi, dans le cas de mélange totalement défloculer, d peut être défini comme la moyenne harmonique de la dimension des grains du constituant le plus fin.

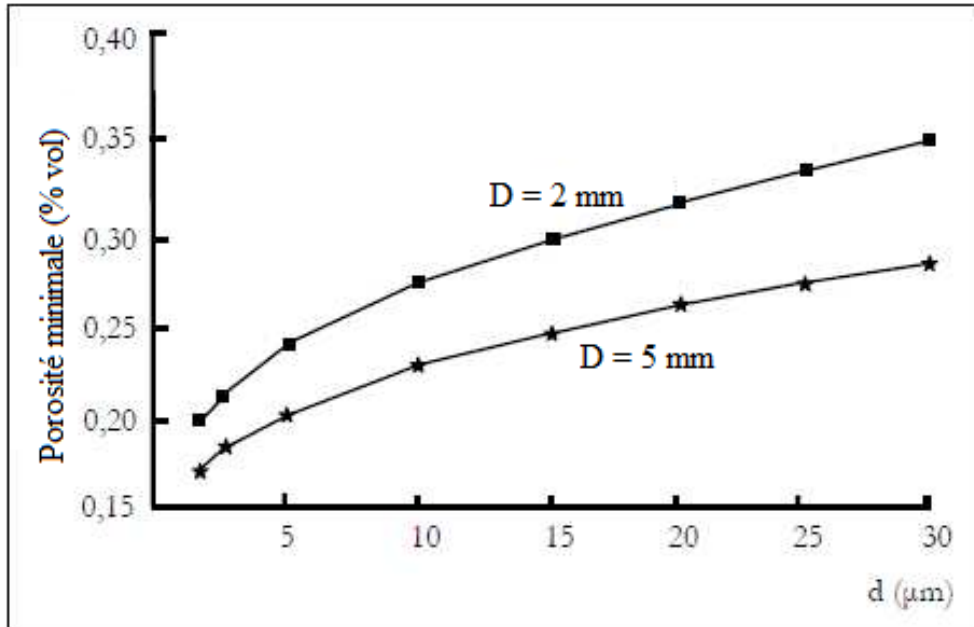


Fig. I.2. Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles D du sable.

Par sécurité, il sera préférable de mettre en œuvre un dosage en eau légèrement supérieur au dosage théorique obtenu au minimum de porosité, il faut préalablement évaluer la quantité d'air piégée. Dans le cas des bétons de sables, cette quantité est légèrement supérieure à ce qu'elle est dans les bétons ordinaires. Un ordre de grandeur peut être obtenu par la formule suivante, qui conduit à des teneurs en air de l'ordre de 3 à 5 %.

$$[\text{Vide}] = k [\text{eau}] \text{ (l/m}^3\text{)}$$

Avec k compris entre 0,2 et 0,25.

En ce qui concerne l'estimation du dosage en sable, il suffit de compléter au mètre cube la somme des dosages des constituants fines, eau et vides. Nous avons alors :

$$[\text{Sable}] = 1\ 000 - [\text{fines}] - [\text{eau+adj}] - [\text{vides}] \text{ (l/m}^3\text{)}$$

IV.2 Approche expérimentale de la formulation de béton de sable :

Différentes formulations de bétons de sable ont déjà été réalisées par cette méthode bétons de pieux, bétons routiers, bétons de projection, etc. et ont donné toute satisfaction.

L'objectif de la méthode expérimentale n'est pas d'expliquer ou de formuler les phénomènes qui entrent en jeu dans la formulation du béton.

Les différentes étapes de la formulation sont :

- Détermination d'une formule de base sans fines d'addition
- Choix de la teneur en ciment ;
- Fixation d'une teneur en eau ;
- Détermination d'un dosage en sable ;
- Réglage de la maniabilité et du rendement ;
- Détermination du dosage en fines d'addition ;
- Adaptation de la maniabilité à la mise en œuvre ;
- Contrôle des résistances ;
- Corrections éventuelles.

Le dosage en eau, il peut être évalué par une autre formule théorique en fonction de la porosité du squelette granulaire :

$$e = (800/1 + \nu) * (d/D)^{1/5}$$

ν : compris entre 0.1 et 0.15 ;

Enfin, on suit la même démarche que celle de la formule pour estimer le dosage en fine calcaire, puis il suffit de compléter au mètre cube la somme des dosages des constituants pour calculer le dosage en sable. [4]

Tableau I.1. Composition théorique et expérimentale du béton de sable.

Tableau : compositions théorique et expérimentale du béton de sable.

Référence		Composition théorique	Composition expérimentale	Composition corrigée
Formule	Sable [Kg/m ³]	1615	1601	1433
	Ciment [Kg/m ³]	335	350	350
	Addition [Kg/m ³]	154	140	140
	Adjuvant [%]	1*	1*	1*
	Eau [Kg/m ³]	175	180	210
Calcule	Masse totale [Kg/m ³]	2282.4	2274.5	2176.5
	Volume total [l/m ³]	1000	1000	1000
	e/C+k.A	0.36	0.5	0.67
	A/A+C	0.32	0.29	0.29
	Affaissement [cm]	/	3.9	5
* pourcentage du poids du liant équivalent				

V. Caractéristiques béton de sable

V.1 Maniabilité

En général, la maniabilité d'un béton dépend essentiellement de la quantité d'eau utilisée. Le béton de sable, où les granulats sont caractérisés par une grande surface spécifique, nécessite plus d'eau que le béton classique, ceci se traduit par des valeurs du rapport E/C systématiquement supérieures à 0,5 et se situe généralement entre 0,6 et 0,7. Cependant si l'on considère le rapport E/ (C+ F) (eau/ciment + filler), on obtient des valeurs similaires à celles des bétons classiques [5].

V.2 Compacité

La compacité d'un granulat est définie comme le rapport du volume solide sur le volume total et correspond à un complément à l'unité de la porosité. C'est l'un des paramètres qui influe sur les performances du béton. Elle est bien sûr complémentaire à la porosité [6].

Dans un mélange granulaire, plus le diamètre du plus gros grain diminue, plus la porosité augmente. C'est le cas des granulats des bétons de sable, où le diamètre ne dépasse pas 5 mm. Bien que dans ce cas-là cet inconvénient soit compensé par l'ajout de fines, le béton de sable reste toujours moins compact qu'un béton ordinaire.

V.3 Comportement mécanique

La résistance mécanique est l'une des caractéristiques majeures pour un béton. De ce fait, il est indispensable pour n'importe quelles études de prendre en considération les résistances à la rupture en traction et en compression.

On constate pour une même valeur du rapport E/C, que la résistance n'est pas trop influencée par le diamètre maximal des grains de sable (D_{max}) (Fig. I.12). Mais la maniabilité s'améliore avec l'augmentation de D_{max} . Par contre à des rapports E/C différents et à une maniabilité constante, la résistance diminue avec la diminution de D_{max} . Ceci est dû, comme nous l'avons déjà vu, au besoin plus élevé en eau. Notons qu'à une même maniabilité, la résistance du béton de sable dunaire est nettement inférieure à celle du béton de sable alluvionnaire [7].

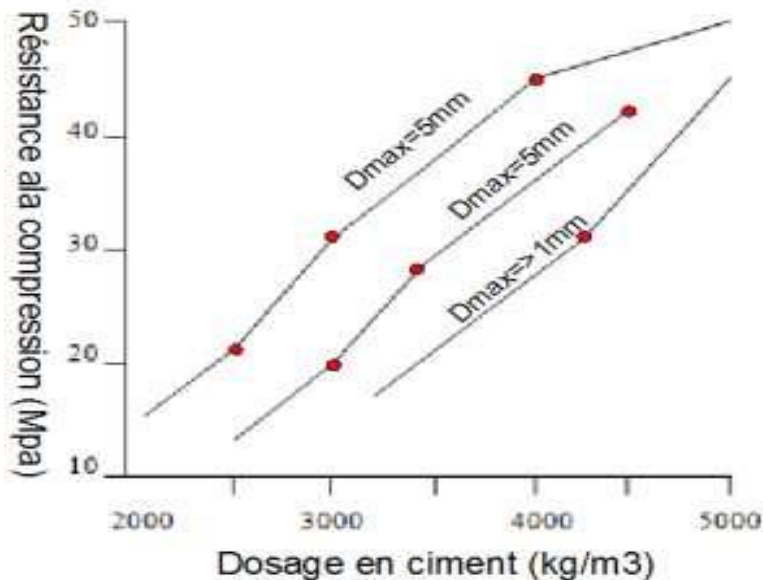


Fig. I.3 : Effet de la granularité sur la résistance [Sablocrete, 1994].

V.4 Le retrait

En l'absence de toute charge, le béton se déforme de façon spontanée, ses déformations sont liées à l'humidité du support de stockage. Pour les bétons conservés à l'air, les dimensions initiales diminuent. Il s'agit d'un phénomène connu sous le nom de retrait.

On a des principaux types de retrait :

V.4.1 Retrait de séchage

Qui est le retrait le plus célèbre. Il apparait au cours des premiers mois, c'est-à-dire lors du durcissement du béton.

V.4.2 Retrait plastique

Est due à une diminution du volume d'eau par évaporation, alors que le béton à l'état plastique et encore déformable.

V.4.3 Retrait chimique (retrait endogène)

Est celui qui se passe dans le béton qui durcit dû au développement de la réaction d'hydratation. La plupart des recherches ont envisagé des études sur ce qu'on appelle le béton de sable, cependant on remarque que le béton de sable de dunes présente des propriétés presque similaires à celles de béton ordinaire, tel que la résistance à la compression, l'ouvrabilité, l'élasticité, mais en revanche, le béton de sable de dunes donne des valeurs de retrait très importantes par rapport au béton ordinaire.[8]

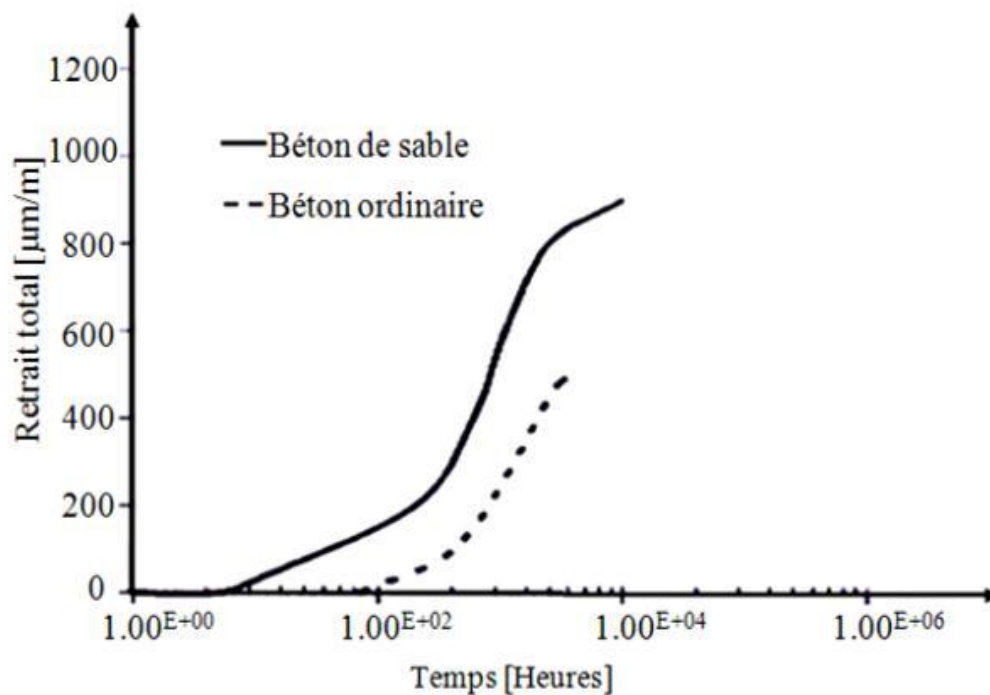


Fig.I.4 : Retrait béton de sable

V.5 Fluage :

Le fluage est une déformation qui résulte de l'effet d'une contrainte constante appliquée au béton. Afin d'atténuer ce phénomène, il est conseillé de réduire le dosage en ciment en ajoutant des granulats.

Les essais de fluage effectués ont concerné les bétons de sable et les bétons ordinaires afin de les comparer. La figure montre que la valeur du fluage du béton de sable est plus importante que celle du béton classique. Ceci est lié aux paramètres rentrant dans la composition des deux matériaux et qui influent systématiquement sur les déformations et donc sur les résistances. [9]

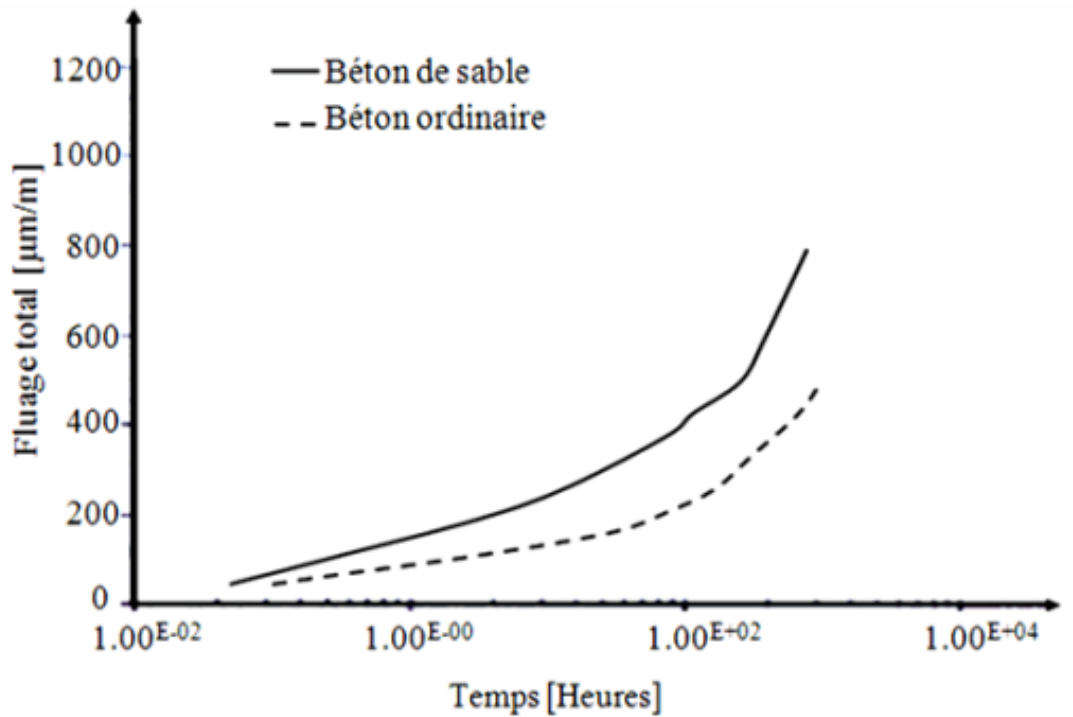


Fig. I.5: Fluage béton de sable

VI. Notion sur la durabilité

La durabilité du béton s'explique en grande partie, par la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans les réseaux poreux des bétons. Traditionnellement l'aptitude d'un béton à résister à la dégradation – c'est-à-dire sa stabilité - était d'apprécier par sa résistance à la compression. Bien qu'une forte résistance soit une propriété liée étroitement à la structure poreuse, à la perméabilité et la diffusivité et par conséquent à la durabilité. Ces deux grandeurs physiques permettent de caractériser l'aptitude des bétons à résister à l'intrusion des agents agressifs.

La perméabilité est relative au déplacement d'un fluide sous l'effet d'une pression motrice.

Elle dépend de la taille des espaces poreux dans lesquels s'écoule le fluide, ainsi que leur interconnecte la figure. La diffusivité est relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration. Contrairement à la perméabilité, la diffusivité dans un matériau poreux ne dépend pas de la taille des pores, elle dépend que de leur interconnexion.

VI.1 Attaque chimique par différents milieux agressifs :

Les ouvrages en béton peuvent se trouver dans des milieux, industriels au naturel, agressifs pour le béton et/ou l'action des armatures. En raison des interactions du béton avec des influences externes, la durabilité du béton peut être menacée et perdue. Parmi les facteurs menaçants on site, le cycle gel/ dégel, l'abrasion, corrosion d'acier, l'attaque chimiques qui peuvent détériorer le béton ACI Commette 201 à classé les attaques chimiques comme suit [10].

- Attaque acide.
- Attaque alcaline.
- Carbonatation.
- Attaque par les chlorures
- Lixiviation.
- Attaque par les sulfates.

VI.1.1 Attaques des acides

Les attaques acides se font principalement suivant un mécanisme de dissolution. Suivant le cas, le phénomène de dissolution peut être accompagné de la précipitation du sel formé lors de la réaction base + acide si le sel est peu soluble. Ce sel peut avoir un effet colmatant et ralentir les réactions de dissolution.

Le produit final de dégradation par un acide peut-être un gel de silice résultant de la décalcification totale des C-S-H qui, peut avoir un rôle protecteur à la surface du béton et ralentir les réactions. Ces auteurs insistent également sur le fait que les conditions de transport de l'agent agressif sont plus importantes que sa concentration.

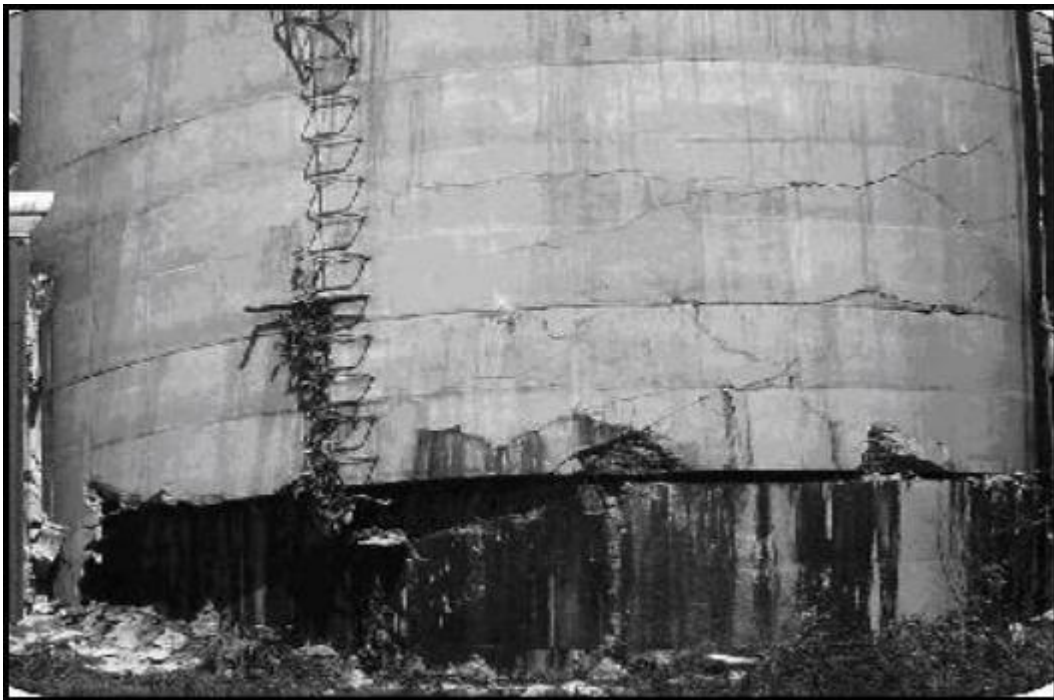


Fig. I.6 : La détérioration des silos-tours en béton due à l'attaque des acides d'ensilage.

VI.1.2 Les différents types des acides :

Les acides peuvent être divisés en acides organiques et acides inorganiques : l'acide chlorhydrique, l'acide nitrique et l'acide sulfurique par exemple sont des acides inorganiques

L'acide formique, l'acide acétique et l'acide oléique sont des acides organiques. Les acides inorganiques sont plus nuisibles pour le béton que les acides organiques.

A- Acides organiques :

Les acides organiques tels que l'acide acétique, lactique, butyrique, formique, contenus dans certains eaux usées, attaquent les constituants calciques du ciment. Ces acides faibles, peu dissociés, sont généralement modérément agressifs et provoquent des dégradations lentes.

B- Acides minéraux :

Les acides chlorhydriques et nitriques réagissent avec la chaux de ciment et donnent des sels très solubles, sont très agressifs vis-à-vis des ciments portland.

L'acide sulfurique H_2SO_4 est doublement agressif par son acidité et par l'anion SO_4^{2-} qui peut conduire à la formation de sels expansifs tel que le gypse et l'étrangéité.

L'acide phosphorique H_3PO_4 , qui entraîne la précipitation de phosphates de calcium très peu solubles, est modérément agressif.

VI.1.3 Mécanisme d'attaque

Le béton est très alcalin en nature, il est extrêmement susceptible à l'attaque de l'acide. Le mécanisme pour ce processus est très simple. De façon générale, les réactions chimiques et ou l'élimination physique n'endommage qu'un ou deux composants de la pâte de ciment.

Tableau2 : Composants du béton menacé par la corrosion.

Composants du béton	Désignation	Formule chimique
Pate de ciment	Hydroxyde de calcium (CH)	Ca (OH)₂
	Silicate de calcium hydraté (CSH).	3CaO·2SiO₂·3H₂O
	Aluminate de calcium hydraté	3CaO·Al₂O₃·6H₂O
	Aluminate de calcium ferrique hydraté	6CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃·12H₂O
Granulats	Calcaire (Carbonate de calcium)	CaCO₃
	Dolomite	Ca Mg (CO₃)₂
	Grès amorphe	SiO₂·xH₂O

Des acides plus agressifs tels que les acides chlorhydriques, acétiques, nitriques, et sulfuriques produisent les sels de calcium qui sont très solubles. Les acides moins agressifs tels que les acides phosphoriques et humiques produisent des sels de calcium avec une faible solubilité. Ces sels de basse solubilité peuvent agir en tant qu'inhibiteur partiel au processus global en bloquant les pores dans la pâte de ciment par lesquels l'eau passe. Ceci réduit la quantité de sels de calcium qui entrent dans la solution et retardent le processus global.

Un cas plus agressif et plus destructif d'attaque par l'acide se produit lorsque le béton est exposé à l'acide sulfurique. Le sel de calcium produit par la réaction de l'acide sulfurique et de l'hydroxyde de calcium est un sulfate de calcium qui cause alternativement une dégradation accrue due à l'attaque de sulfate.

VI.1.4 Sources des acides

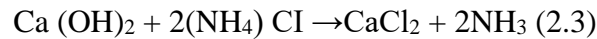
Les milieux acides les plus fréquents sont :

- Les eaux naturelles dans les tourbières et les marécages, où le pH peut s'abaisser jusqu'à 4.
- Les milieux industriels : dans les industries chimiques ainsi que les industries agroalimentaires.
- Les réseaux d'égouts : l'activité bactérienne conduit au dégagement d'hydrogène sulfuré par la transformation des produits soufrés qui, combiné à l'humidité atmosphérique se condensent sous forme d'acide sulfurique qui va attaquer le béton.
- Les pluies acides, qui contiennent principalement de l'acide sulfurique et de l'acide nitrique, ayant un pH entre 4.0 et 4.5, peuvent provoquer la dégradation de la surface exposée du béton.

VI.2 Action des sels :

De très nombreux sels attaquent la pâte de ciment durcie en formant des sels solubles dans l'eau, lesquels sont lessivés. Tous les sels de magnésium, à l'exception du sulfate de magnésium très difficilement soluble dans l'eau sont ainsi à même de remplacer les ions de calcium dans la pâte de ciment durcie. Il se forme à la surface du béton de l'hydroxyde de magnésium et des silicates de magnésium, qui empêchent une autre attaque. L'hydroxyde de magnésium se présente toutefois sous forme de masse molle, gélatineuse, qui est emportée par l'eau coulant plus rapidement. Les sels d'ammonium dissolvent sur tout le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de la

pâte de ciment durcie, ce qui engendre de l'ammoniac. Pour le chlorure d'ammonium, la réaction est par exemple :



Hydroxyde de calcium + chlorure d'ammonium chlorure de calcium + ammoniac

L'ammoniac libéré, une base se dissout dans l'eau. Il n'attaque pas le béton. Le carbonate d'ammonium et le fluorure d'ammonium, qui engendreraient du carbonate de calcium et de fluorure de calcium, des composés difficilement solubles, ne sont pas dangereux pour la pâte de ciment durcie. Contrairement à l'armature, la pâte de ciment durcie n'est altérée par les ions de chlorure que s'ils sont fortement concentrés. Dans l'eau de gâchage, les chlorures accélèrent l'hydratation du clinker Portland encore existant. Par réaction avec les aluminates hydratés, les ions de chlorure se transforment en chlore aluminates difficilement solubles, par exemple $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, partiellement fixés dans le béton.

VI.3 L'attaque par l'eau de mer

La durabilité du béton en milieu marin est un problème complexe en raison du nombre de facteurs pouvant intervenir lors d'une attaque par l'eau de mer qui se résument comme suit : complexité des conditions environnementales (immersion totale, marnage, aspersion, embruns). Complexité des réactions chimiques susceptibles de se produire en relation avec la diversité des ions présents dans l'eau de mer (action simultanée des chlorures, des sulfates, des carbonates), certaines réactions pouvant avoir un effet atténuateur (carbonatation, précipitation de brucite Mg (OH)_2).

Les principaux sels qui composent l'eau de mer sont les suivants :

- Le chlorure de sodium (Na Cl) qui est prépondérant ;
- Le chlorure de magnésium (MgCl_2) ;
- Le sulfate de magnésium (MgSO_4) ;
- Le sulfate de calcium (CaSO_4) ;
- Le chlorure de calcium (CaCl_2) ;
- Le carbonate acide de potassium (KHCO_3).

Dans les zones immergées en permanence, l'agressivité chimique de l'eau de mer vis-à-vis des bétons fabriqués suivant les règles de l'art est modérée et, sauf conditions exceptionnelles (gel par exemple) les dégradations restent superficielles. Dans ces zones, où

le béton est constamment saturé, les risques de corrosion des aciers sont également limités du fait du très faible coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'eau.

Les zones de marnage, les zones soumises à des projections ou des embruns sont les plus exposées en raison des actions physiques qui viennent se superposer aux processus chimiques effets mécaniques des vagues et érosion par les sables et graviers, cycles d'humidification/séchage, variations de température journalières et saisonnières, dissolution/recristallisation de sels (chlorure de sodium) ... Les risques de corrosion des aciers sont également les plus importants dans ces zones.

Dans les zones aériennes, le béton est exposé à l'air véhiculant du sel marin mais n'est pas en contact avec l'eau de mer.

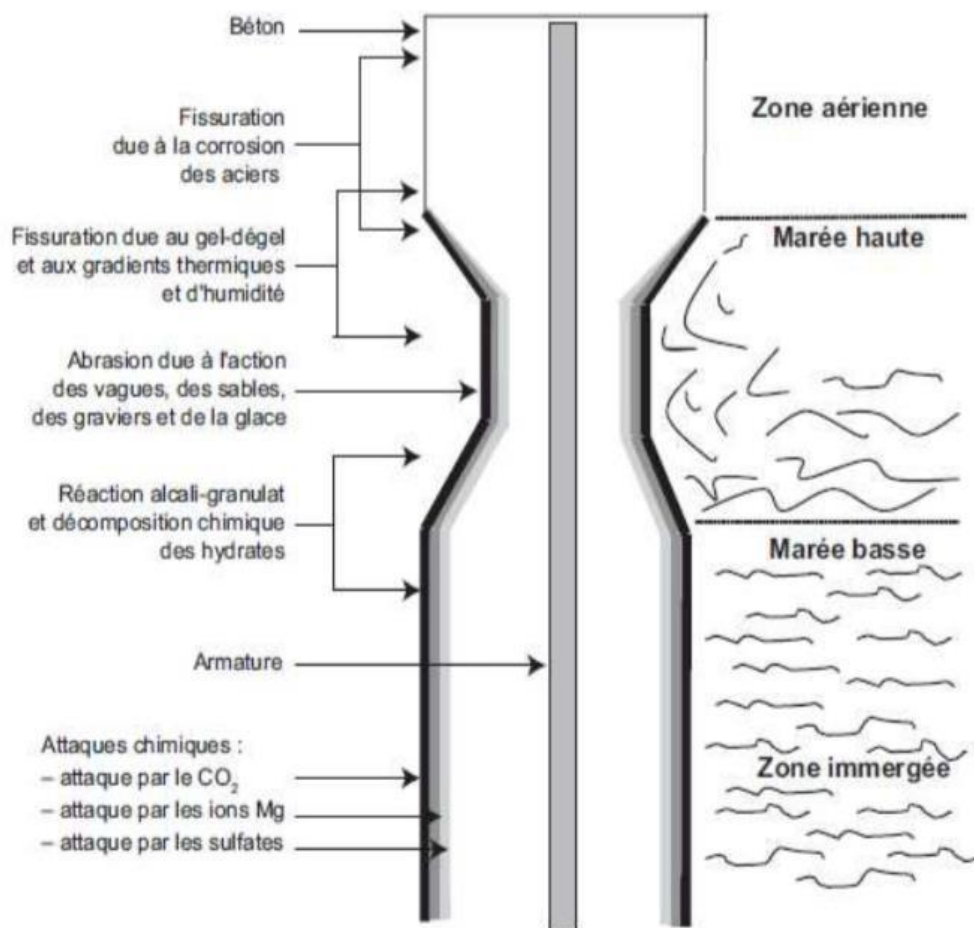


Fig.I.7 : représentation schématique des différents processus d'attaque du béton par l'eau de mer

VI.3.1 Les paramètres contrôlant la durabilité du béton en milieu marin :

- Perméabilité : Une faible perméabilité retarde la pénétration des ions agressifs.

- Rapport E/C : Un rapport E/C faible diminue la porosité, la perméabilité et retarde la pénétration des ions agressifs.
- Recouvrement : Il faut prévoir un bon recouvrement (60 mm) des aciers d'armature pour éviter la corrosion métallique. [11]

VII. Domaines d'emploi des bétons de sable :

Le béton de sable peut être utilisé dans différents domaines, et sous plusieurs formes. La plupart des applications actuelles du béton de sable tiennent davantage à ses propriétés spécifiques, par rapport au béton traditionnel, qu'à l'économie qu'il pourrait représenter en remplaçant celui-ci.

VII.1 Les bétons non vibrés :

Ces bétons sont souvent des bétons fluides utilisés notamment, lorsque la vibration est impossible, pour la fabrication des pieux forés et la réalisation de dallages autocompactants ou autonivelants.

VII.2 Les bétons projetés :

Ils se sont révélés particulièrement intéressants, techniquement et économiquement et se prêtent au renforcement de structure par projection, exemple :

- La réhabilitation de collecteurs d'assainissement.
- La stabilisation de parois ou talus.

En général, le béton de sable peut être également utilisé en projection dans des travaux de rénovation, de ponts, d'égouts visitables et de bâtiments.



Fig.I.8 : Le béton de sable en projection (Projection sur surface ancienne. Vue de détail.

VII.3. Les travaux d'injection :

A cause de sa petite granularité et sa maniabilité, le béton de sable est favorable aux techniques de reprise en sous-œuvre par injection ou coulage gravitaire :

- Le comblement de cavités.
- La réparation de fondation et renforcement d'ouvrages portuaires.

VII.4. La préfabrication d'éléments destinés à rester apparents :

Le souci esthétique est de plus en plus pris en compte dans toutes les constructions ; les bétons de sable permettent la réalisation d'effets architectoniques tant sur la forme que sur l'aspect. Le béton de sable peut être utilisé dans la préfabrication pour des murs architecturaux, pour des mobiliers urbains, en bâtiment et en voirie.



Fig.I.9 : Le béton de sable dans la préfabrication

VIII. Limites des bétons de sable :

A l'heure actuelle, les connaissances sur le béton de sable ne permettent pas un remplacement systématique du béton classique, soit pour des raisons économiques, soit pour des raisons techniques.

➤ **Raisons économiques :**

L'expérience a montré que, par l'utilisation des ajouts, on peut augmenter d'une façon considérable la résistance d'un béton de sable. Toutefois, la multiplication des ajouts ou l'augmentation du dosage en ciment ne sont pas sans incidence sur le coût. Dans la mesure où ce béton n'apporte pas "un plus" dans l'usage envisagé, il est donc inutile de chercher des performances supérieures. Tout sera donc fonction du contexte local en matière de granulats et de l'usage envisagé. En ce qui concerne notre pays il existe des déchets de carrière de concassage à partir desquels nous pouvons tirer des fillers. Il existe également des fillers naturels dans certaines régions, notamment dans le sud du pays.

➤ **Raisons techniques :**

On n'a que peu de connaissances sur les caractéristiques et le comportement du béton de sable, comme le retrait, le fluage et la durabilité, ce qui exclut, peut-être, ce matériau des éléments fortement sollicités ou précontraints.[12].

IX. Conclusion

Et avec cela nous arrivons à la conclusion de notre intéressant chapitre sur le "béton de sable".

Cet important sujet d'intérêt pour de nombreux ingénieurs civils et entrepreneurs de l'industrie de la construction a été discuté. Nous avons appris la définition du béton de sable et comment le préparer et l'utiliser dans les projets de construction.

Nous avons souligné que le béton de sable est une sorte de béton composé de sable, de ciment et d'eau, qui présente d'excellentes propriétés mécaniques et un faible coût. Et nous avons constaté qu'il est largement utilisé dans les structures simples et les structures à charge légère, telles que les petites fondations, les colonnes et les murs intérieurs.

CHAPITER II

Fibres Métalliques et déchet de sable recyclé

Chapitre II :Fibres Métalliques et déchet de sable recyclé

II .1 Introduction :

En 1910, Porter a suggéré pour la première fois l'utilisation de fibres métalliques dans le béton dans l'optique d'améliorer les performances mécaniques du béton.

Les fibres sont ajoutées dans la matrice, non pour améliorer la résistance à la traction par flexion du béton, mais surtout dans le but de contrôler la fissuration, d'empêcher la coalescence des fissures et de changer le comportement du matériau renforcé de fibres en cousant les fissures.

Cependant, le béton renforcé de fibres métalliques (BFM), en tant que matériau dans les applications industrielles, a vu le jour aux Etats-Unis au début des années 60 suite aux travaux de conduisant au dépôt d'un brevet. Il était produit en utilisant du ciment hydraulique classique, des granulats (sable et gravier), de l'eau et des fibres. Afin d'améliorer la maniabilité et la stabilité du béton renforcé de fibres, un super plastifiant peut également être ajouté dans le mélange. Ce béton n'est pas considéré comme un substitut du béton ordinaire, mais comme un matériau de type différent. [1]

II.2 Définition de béton de fibres :

Le béton de fibres est un matériau composite constitué d'une matrice béton et d'un renfort par inclusion directe de fibres isolées (dont les propriétés mécaniques résultent de la combinaison des propriétés du béton, des fibres et de l'interface entre les matériaux).

L'ajout des fibres a pour rôle principal dans le béton est de modifier ces propriétés. Les fibres sont des éléments discontinus, de nature variable, répartis uniformément dans la matrice et ayant une orientation aléatoire (naturelle) ou forcée. Les fibres sont capables de l'arrêt et coudre les fissures (Figure II-1) Les fibres aussi permettent d'améliorer ainsi le comportement post fissuration du béton. Ces dernières jouent un rôle de renforcement qui compense la fragilité du béton par couture de la microfissuration et la macro fissuration. Elles ont de plus, la capacité de transférer les charges, dès lors qu'une bonne adhérence fibre/matrice est assurée la distribution homogène des fibres dans le béton est donc la condition principale pour pouvoir parler d'un béton renforcé uniformément, avec les mêmes caractéristiques dans tous les points de la matrice.

CHAPITER II :FIBRES METALLIQUES ET DECHET DE SABLE RECYCLE

Par ailleurs, les fibres constituent une sorte de granulat filiforme gênant l'assemblage optimal du squelette des granulats. La géométrie des fibres, leur dosage, ainsi que la mise en place du matériau frais, sont des paramètres affectants très fortement le comportement global du matériau durci. [2]

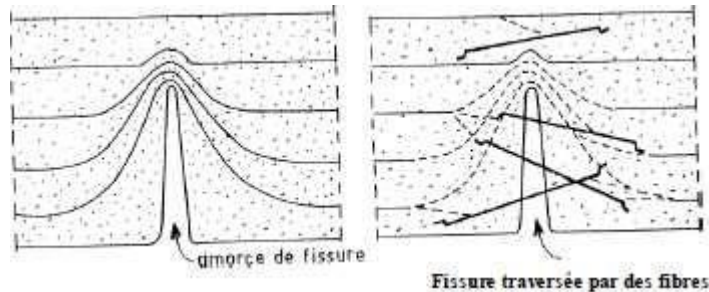


Fig.II.1 Rôle des fibres dans la matrice de béton.

II.3 Les fibres :

II.3.1 Définition des fibres :

Le terme Fibre se rapporte à un corps solide flexible, de forme sensiblement cylindrique, d'un diamètre de quelque centimètre dont la longueur égale à quelques milliers de fois ce diamètre. Ce terme est généralement aussi utilisé pour définir le constituant élémentaire des structures textiles. Par ailleurs, on distingue la fibre de longueur réduite ou fibre courte, de 20 à 150 mm, de la fibre de grande longueur ou filament continu.

Dans le rapport sur l'état de l'art publié par le comité 544, de L'American Concrete Institute en 1982 nous pouvons lire : "Les fibres sont produites à partir d'acier, de plastique, de verre et de matériaux naturels sous différentes formes et dimensions".

II. 3.2 Différents types de fibres :

Elle se classée en 3 grandes familles de fibres selon la nature des matériaux qui les composent comme le montre le tableau ci-dessous :

Tab.II.1 Classification des fibres.

Fibre	Matière de fibre
Les fibres métalliques.	<ul style="list-style-type: none">➤ Acier ;➤ Inox ;➤ Alliage amorphe.
Les fibres organiques.	<ul style="list-style-type: none">➤ Polypropylène ;➤ Polyéthylène ;➤ Polyamide (nylon) ;➤ Acrylique ;➤ Polyester.
Les fibres minérales.	<ul style="list-style-type: none">➤ Verre ;➤ Carbone.

II.3.2.1 Fibres métalliques :

Ce type de fibres, qui regroupe les fibres d'acier et les fibres de fonte amorphe, a été resté encore l'objet de recherche très importante dans le monde. On se limite aux fibres d'acier qui sont les plus utilisées dans le domaine de génie civil. En effet les propriétés mécaniques du béton renforcé par ces fibres sont influencées par la résistance d'adhésion interracial entre fibre et la matrice. Les fabricants des fibres d'acier ont essayé par tous les moyens d'améliorer l'adhérence en jouant sur l'irrégularité de la surface de la fibre. Ce qui les conduits aux nombreuses variétés de fibre qui se différencient les unes des autres par leurs diamètre, leur section (rond, carré, rectangulaire). Leur longueur et leur mode d'opération. Les diamètres des fibres d'acier varient généralement entre 0,1 et 0,7 mm, avec des longueurs de 10 à 70 mm.

Les fibres métalliques utilisées en dallage industriel sont les plus souvent des fibres tréfilées comportant généralement des fils de 1mm de diamètre. Les différentes fibres existantes se différencient les unes des autres par le type d'ancrage actif dans la matrice du béton. Il existe des fibres fabriquées avec un ancrage dit déformable, par exemple des fibres à crochets telles que celle commercialisées par la société Bekaert sous la marque "DRAMIX ». (Figure II.2).



Fig.II.2 Fibre métallique (DRAMIX).

II.3.3 Critère de choix du type de fibres :

Il existe différents types de fibres dont les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques diffèrent selon leur nature ou leur géométrie.

La nature, la forme, et les propriétés chimiques, physiques, et mécaniques des fibres choisies dépendent de :

- La qualité a conféré à la matrice cimentaire.
- La compatibilité avec les composantes de la matrice « ciment-granulats ».
- Une bonne adhérence avec la matrice cimentaire.
- Conservation de leurs propriétés dans le temps.

Les fibres couramment utilisées pour la fabrication de bétons renforcés de fibres sont généralement métalliques, synthétiques, de verre ou naturelles. Selon leur utilisation, ces différents types de fibres présentent des avantages ou des inconvénients. Certaines sont affectées par des dégradations chimiques dans les matériaux cimentaires ou présentent un mauvais comportement dans les milieux alcalins (certaines fibres de verre ou fibres naturelles).

Les fibres en amiante utilisées avec le ciment ont prouvé la bonne tenue, et la durabilité du composite dans le temps ; Par contre les fibres de verre leur performance mécanique chute par la réaction de ciment sur le verre (effet des alcalins) Malgré que ce problème soit solutionné en partie par une mise au point d'un verre à haute teneur en zirconium l'utilisation des fibres de verre est toujours limitée.

Les fibres de nylon et polypropylène sont instables devant l'action des rayons ultraviolets ils doivent être protégés.

CHAPITER II :FIBRES METALLIQUES ET DECHET DE SABLE RECYCLE

La technologie du béton armé a montré que l'acier a une très bonne compatibilité avec le béton :

- Protection par le ciment.
- Bonne adhérence.
- Coefficient de dilatation est presque le même.
- Grande résistance.

Par leurs propriétés et qualités les fibres métalliques sont les plus adaptables et les plus utilisées avec la matrice de béton. [3]

II.4 Valorisation des déchets et activité de recyclage en construction

L'évolution des mentalités et de la technique, avec les exigences en termes de protection de l'environnement de plus en plus contraignantes ainsi que la révision des repères économiques inspirés du développement durable font que le recyclage et la valorisation de sous-produits industriels constituent désormais un souci qui s'impose de plus en plus à l'homme.

La valorisation des déchets dans le génie civil est un secteur important dans la mesure où les produits que l'on souhaite obtenir ne sont pas soumis à des critères de qualité trop rigoureux.

La récupération et recyclage des déchets touchent deux impacts très importants, l'impact environnemental qui est résout par l'évacuation de ces déchets et l'impact économique qui est l'utilisation de ces derniers dans l'industrie ou dans le domaine de la construction, ces déchets ont l'avantage d'être disponibles en grande quantité et avec de faible valeur marchande [4].

II.4.2. Déchets : définition et différents types

II.4.2.1 définition

Le déchet est défini comme « Tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon ».

D'après la loi française du 15 juillet 1975 : « Est ultime un déchet résultant ou non du traitement des déchets et qui n'est plus susceptible d'être traité dans des conditions techniques et économiques du moment notamment par l'extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux » [4].

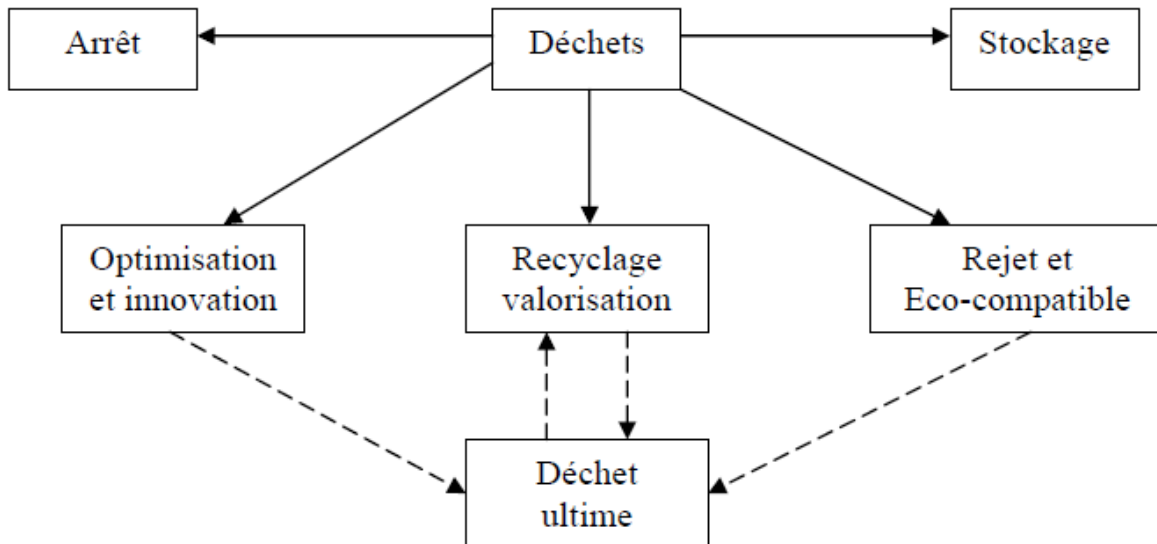


Fig.II.3 Stratégies de traitement des déchets.

II.4.2.2 Types de déchets

Il existe de nombreux types de déchets fabriqués par une variété de processus. Chaque type de déchets différentes méthodes de gestion associée.

A- Les déchets biodégradables

Résidus verts, boues d'épuration des eaux, restes alimentaires (pain, déchets de café) ..., qui s'assimilent en première approche à la biomasse. Ces déchets sont au moins pour partie détruits naturellement, plus ou moins rapidement, en général par les bactéries, champignons et autres micro-organismes et/ou par des réactions chimiques (oxydation, minéralisation), laissant des produits de dégradation identiques ou proches de ceux qu'on peut trouver dans la nature, parfois néanmoins contaminés par des résidus de pesticides, de métaux, dioxines, etc., selon leur origine. Ils peuvent être revalorisés par différentes filières (bioénergie, biocarburants, Compostage / amendements / engrais...).

B- Déchets ultimes

Tout déchet ménager et assimilé brut issu du ramassage parallèle à la collecte sélective, le refus de tri, le déchet industriel banal issu des ménages et des déchetteries ainsi que les boues de stations d'épurations. Outre les déchets ultimes : « ne sont plus susceptibles d'être traités dans les conditions techniques et économiques du moment ». Eux seuls devraient encore pouvoir être mis en décharge.

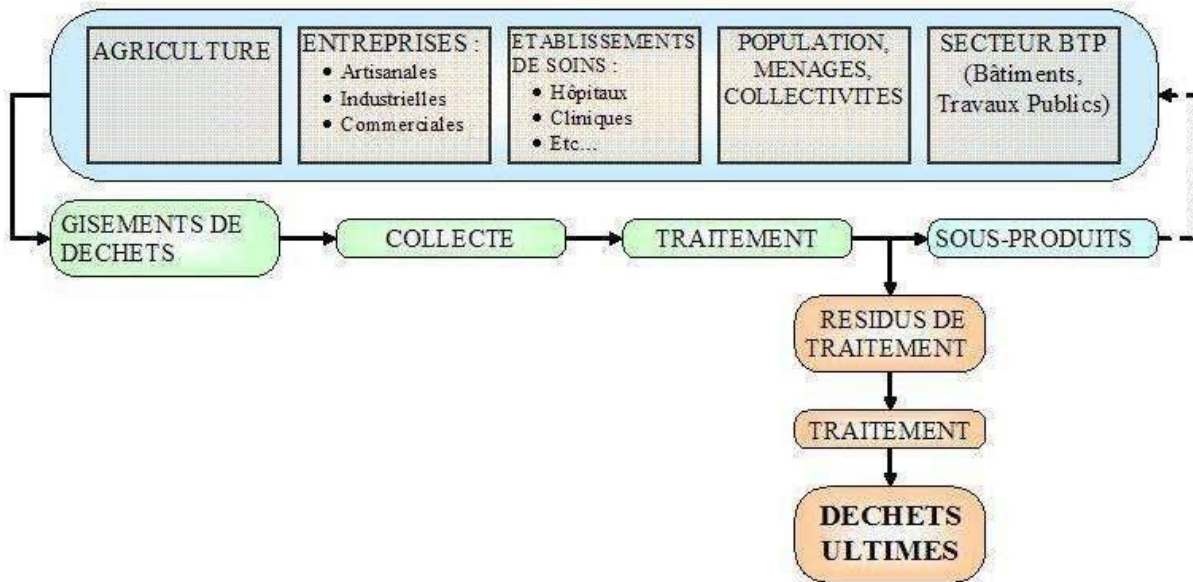


Fig.II.4 Production de déchets ultimes.

C- Déchets recyclables

Matériaux de construction, métaux, matières plastiques : ces matériaux peuvent être réutilisés tels quels dans d'autres domaines ou recyclés : par exemple, les métaux sont refondus et réintégrés dans de nouvelles pièces, les plastiques sont hachés et servent de rembourrage ou de combustible ... On s'intéresse sur les déchets de métaux (fer, aluminium, plomb,) qui possèdent une valeur marchande et qui se présentent sous 3 formes :

- Les chutes de fabrication (rebuts, limailles).
- Les objets métalliques en fin de vie (moteurs, outils, canalisations, câblages...)
- Les composés métalliques destinés à être traités pour en extraire le métal contenu (catalyseurs de pots d'échappement,).

D- Déchets usuels inertes

Les déchets usuels inertes sont produits par les ménages et les industries. Ils forment la part la plus large des déchets recyclables. Ils sont souvent simples à collecter et à transformer. Ils sont peut dangereux. En revanche, ils représentent des volumes importants à transporter et à stocker. [5]



Fig.II.5 Déchets inertes

II.4.3 Gestion des déchets

Depuis un passé récent, l'époque industrielle a généré des déchets de plus en plus nombreux et présentant une problématique nouvelle ; leur volume considérable, la non-bio dégradabilité ou la toxicité de certains d'entre eux, leur durée de vie et leur impact sur l'environnement.

La gestion des déchets est devenue une problématique inévitable de nos sociétés. Qu'ils soient issus de la consommation ou de procédés industriels, les contextes sanitaires, environnementaux, économiques ou juridiques ont rendu nécessaire la mise en place de plans de gestion.

La gestion des déchets est la collecte, le transport, le traitement (le traitement de rebut), la réutilisation ou l'élimination des déchets, habituellement ceux produits par l'activité humaine, afin de réduire leurs effets sur la santé humaine, l'environnement, l'esthétique ou l'agrément local.

A- Recyclage

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets et de réintroduction des matériaux dans le cycle de production d'autres produits équivalents ou différents. Le recyclage permet de réduire les volumes de déchets, et donc leur pollution, et de préserver les ressources naturelles en réutilisant des matières premières déjà extraites.

B- Valorisation

La valorisation est définie comme "L'élimination des déchets comporte les opérations de collecte, transport, stockage, tri et traitement nécessaires à la récupération des éléments et matériaux réutilisables ou de l'énergie, ainsi qu'au dépôt ou au rejet dans le milieu naturel de tous autres produits dans des conditions propres à éviter les nuisances. Avant de valoriser un déchet, il faut connaître son origine, l'analyser, caractériser son état actuel et son comportement dans le temps et évaluer sa traficabilité. Il s'agit donc de «mesurer pour connaître et connaître pour agir ».

L'approche globale du déchet permettra d'en définir son devenir, à savoir quel type de valorisation choisir.

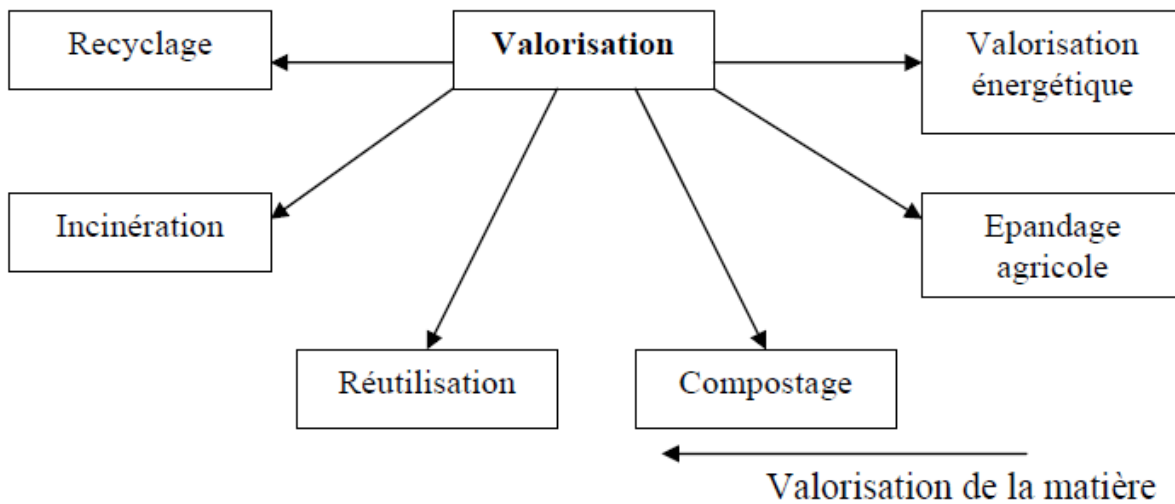


Fig.II.6 Valorisation des déchets.

II.5 Clinker et déchet du clinker

II.5.1 Définition du clinker

Le clinker, obtenu à la sortie des fours à la suite de la cuisson des matières premières constituées principalement de calcaire, d'argile et de matières de correction. C'est un matériau hydraulique se présentant sous la forme des petits nodules très durs composés essentiellement des quatre phases cristallines.



Fig.II.7 Le clinker.

II.5.2 Composition chimique de clinker

Le clinker est principalement composé d'oxydes métalliques, les quatre principaux : l'oxyde de calcium (CaO), de silicium (SiO₂), d'aluminium (Al₂O₃) et de fer (Fe₂O₃), représentant environ 95 % en masse. La composition chimique moyenne du clinker est présentée dans le tableau ci-dessous

Tab.II.2 Composition chimique du clinker.

Composants du clinker	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Notation cimentière	C	A	F	S	M	S	K	N
Teneurs %	62-67	2-9	1-5	19-25	0-3	1-3	0,6	0,6

II.5.3 Composition minéralogique

Le clinker se compose essentiellement de quatre phases cristallines, ce sont respectivement :

- Silicate tricalcique également dénommé « alite ».
- Silicate bi calcique ou « béliité ».
- Aluminate tricalcique C3A.
- Alumino-ferrite tétracalcique C4AF.[6]

Tab.II.3 Composition minéralogique du clinker.

Composants minéralogiques	Alite C_3S	Bélite C_2S	Célite C_3A	Célite C_4AF
Teneur en (%)	40 à 70%	10 à 30%	2 à 15%	0 à 15%

II.5.4 Déchet du clinker

Le déchet du clinker est un ancien clinker stocké ou le reste du clinker lors de l'analyse de son qualité et son composition au niveau du labo chimique de la cimenterie de Hadjar el soude.

**Fig.II.8** Déchet du clinker.

II.5.5 Problème du clinker incuit

La politique d'assurance de qualité adoptée par la SCT conduit au rejet des produits non conformes, tout au long de la chaîne de production, tel que le rejet du clinker incuit et mal cuit.

Ce clinker rejeté est dû aux erreurs de pilotage de la phase de cuisson, ainsi qu'aux arrêts et redémarrage du four à cause des coupures d'électricité, de panes ou des arrêts planifiés. Cela engendre des problèmes environnementaux et influe sur la production planifiée.

II.7 Faïence et déchet du faïence**II.7.1 Définition de la faïence**

Les faïences sont des terres cuites recouvertes en surface d'un émail qui les rend imperméables aux liquides. La fabrication s'effectue en deux stades : d'abord établissement et cuisson de l'objet, appelé alors "biscuit de faïence", puis émaillage et nouvelle cuisson pour durcir le décor. [8].

II.7.2 Fabrication de la céramique rouge**Tableau II.5** Ordre des étapes selon lesquelles sont élaborés les cramiques.

Famille de céramiques	1^{ère} étape	2^{ème} étape	3^{ème} étape
Céramiques traditionnelles ou techniques	Poudre	Mise en forme	Traitement thermique
Verres	Poudre	Traitement thermique	Mise en forme
Liants Minéraux	Traitement thermique	Poudre	Mise en forme

II.7 Les faïences

Sont des terres cuites recouvertes en surface d'un émail qui les rend imperméables aux liquides. La fabrication s'effectue en deux stades : d'abord établissement et cuisson de l'objet, appelé alors "biscuit de faïence", puis émaillage et nouvelle cuisson pour durcir le décor. Suivant la composition de la pâte et la nature de l'émaillage, on obtient des faïences différentes. Elles servent à l'exécution de poteries culinaires, de vaisselle plus ou moins décorée, d'appareils sanitaires ou de carreaux de revêtement. Si par émaillage la faïence est rendue imperméable, elle reste toutefois fragile et sensible aux brusques changements de température. C'est pourquoi les carreaux de faïence, qui offrent un choix de couleurs et de motifs variés, ne sont utilisés qu'en revêtement mural. Faciles à entretenir, ils ne sont pas Attaqués par les acides et ne se rayent que difficilement. Ils sont couramment employés pour protéger les murs des locaux humides (salles de bains, cuisines, etc.) ou pour créer une note décorative sur une table ou sur un plan de travail. En principe, ils résistent à la chaleur, veillez cependant à ne pas les exposer à une température trop élevée qui ferait fissurer l'émail et enlèverait au carreau ses qualités d'étanchéité. Les carreaux de faïence sont en général de forme carrée (150 mm x 150 mm ou 108 mm X 108 mm) ou rectangulaire (100 mm x 150

CHAPITER II :FIBRES METALLIQUES ET DECHET DE SABLE RECYCLE

mm), et d'une épaisseur assez faible, de 4 à 6 mm. Vous pourrez constater que, parmi les nombreuses fabrications présentées sur le marché, il existe parfois une énorme différence de prix de vente. Cela provient du mode de fabrication des carreaux qui peuvent être soit émaillés en continu sur une chaîne automatique (carreaux unis, jaspés...), soit émaillés, puis décorés à la main un par un pour reproduire un motif donné. Ce dernier procédé (encore utilisé de nos jours et dans la plus pure tradition artisanale) est évidemment d'un coût plus élevé.

II.7.2 Déchet de la faïence

Les déchets de la faïence utilisés au court de ce travail sont obtenus par le recyclage mécanique des déchets de faïence sous forme d'un sable (Fig. II.11). Après avoir étaient récupérés (triée), puis cassés de gros morceaux en petits ; ensuite séchés dans le four puis écrasés les petits morceaux avec le concasseur, extrudés sous forme du sable et incorporé dans la masse du béton du sable par substitution volumique du sable.



Fig.II.9 Déchet de la faïence.

II.8. Conclusion

Les déchets constituent un réel problème, inhérent à toute vie biologique et à toute activité industrielle, agricole ou urbaine, et à ce titre, la recherche de solutions est une vraie nécessité pour les collectivités. Le déchet est par définition « matière » et à ce titre la bio physicochimie, la mécanique et la thermique sont aux premières cheffes sollicitées pour le traiter.

Cette matière n'est pas banale. Elle a une vie, elle a souvent muté au cours de son existence pour se retrouver dans les poubelles et les décharges. Avec une telle diversité

CHAPITER II :FIBRES METALLIQUES ET DECHET DE SABLE RECYCLE

moléculaire, qu'il est nécessaire de trouver les moyens pour en extraire les fractions valorisables ou pour atténuer les capacités de nuisances.

Plusieurs types de déchets et de sous-produits peuvent être utilisés comme granulats. Le laitier de haut fourneau et les cendres volantes sont déjà exploités commercialement.

L'utilisation des divers déchets est fonction de leur rentabilité d'exploitation et de leurs propriétés.

De nombreux types de déchets ne pourront peut-être pas être utilisés à une grande échelle étant donné la diversité de leurs caractéristiques physiques et chimiques.

Chapitre III :
Caractérisation des
matériaux

III.1 Introduction

Dans ce travail nous avons jugé d'utiliser des matériaux disponibles en grande quantités dans la région de Skikda (sable de dune, filler de calcaire, fibres métalliques, ciment CPJ-CEM II / A 42.5 de Hadjar el soude). Ceci afin d'établir une formulation à moindre coût.

Avant de présenter la formulation nous allons présenter les résultats d'essais réalisés sur des matériaux utilisés dans la préparation du béton de sable fibrés.

III.2 Les matériaux utilisés dans le béton

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé les matériaux suivants :

- ✓ Un sable naturel de dune de provenance d'oued Zhour ;
- ✓ Deux sables recyclés, un sable recyclé de déchet de faïence noté (SF) et un sable de déchet de clinker noté (SC) ;
- ✓ Un ciment CEMII/A(CPJ) ;
- ✓ Les fibres métalliques de type DRAMIX ;
- ✓ Un adjuvant superplastifiant ViscoCrete 665 ;
- ✓ L'eau potable ;
- ✓ Les fillers calcaires

III.3 Caractéristiques des matériaux utilisées

III.3.1 Sable de dune

Dans cette étude et dans un cadre de valorisation nous avons tenté l'utilisation d'un sable de dune de couleur jaune provenant de la région d'Oued zhour de la ville de Skikda.

Ses caractéristiques physiques, et chimiques sont mentionnées dans les tableaux ci-dessous.

III.3.2 Sable de déchet de clinker

Les déchets du clinker utilisées au cours de ce travail sont obtenus par le broyage mécanique du déchet du clinker sous forme d'un sable (Fig. III.1). Après avoir étaient récupérés, puis broyé avec un concasseur ; ensuite tamisé avec le tamis 5 mm, extrudés sous forme du sable et incorporé dans la masse du béton du sable par substitution volumique du sable.



Fig.III.1 Broyage de déchet du clinker.

III.3.2 Sable de déchet de faïence

Les déchets de la faïence utilisés au court de ce travail sont obtenus par le recyclage mécanique des déchets de marbre sous forme d'un sable (Fig.III.2). Après avoir étaient récupérés (triée), puis cassés de gros morceaux en petits ; ensuite séchés dans le four puis écrasés les petits morceaux avec le concasseur, extrudés sous forme du sable et incorporé dans la masse du béton du sable fluide par substitution volumique du sable.



Fig.III.2 recyclage mécanique de la faïence.

La figure III.3 montre les sables utilisés dans cette étude.



Fig.III.3 La texture des sables utilisées.

Composition chimique

Le tableau III.1 affiche les résultats d'analyse chimiques des sables utilisées.

Tab.III.1 Composition chimiques des sables utilisées.

	SD	SC	SF
CaO	0.80	65.30	51.28
Al₂O₃	2.37	5.44	1.73
Fe₂O₃	1.14	3.15	0.72
SiO₂	94.50	21.69	20.59
MgO	0.15	1.46	0.54

La masse volumique absolu :

La masse volumique absolue **ps** est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains

Tab.III.2 La masse volumique absolu.

	Masse volumique absolu (g/cm³)
SD	2.64
SC	2.67
SF	2.68

Chapitre III :.....Caractérisation des matériaux

La masse volumique apparente.

- La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.
- La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté

Tab.III.3 Les masses volumiques apparente.

	Masse volumique apparente (g/cm ³)
SD	1.40
SC	1.61
SF	1.68

Coefficients d'absorption.

Le coefficient d'absorption de nos sables sont donnés dans le tableau III.3

Tab.III.4 Coefficients d'absorption.

	Coefficient d'absorption (%)
SD	0.29
SC	1.44
SF	5.72

Equivalent de sable.

Le tableau III. Résume l'équivalent de sables des sables utilisées.

Tab.III.5 Equivalent de sable.

	Equivalent de sable (%)
SD	80
SC	65
SF	54

Tab.III.6 Résultat d'analyse granulométrique.

Tamis (mm)	Sable de dune (SD)		Sable de Clinker (SC)		Sable de faïence (SF)	
	Refus % cumulus	Tamisât %	Refus % cumulus	Tamisât %	Refus % cumulus	Tamisât %
4	0	100	5	95	7	93
2	0	100	23	77	25	75
1	2	98	34	66	35	65
0.5	4	96	41	59	47	53
0.25	84	16	66	34	68	32
0.125	93	7	73	27	79	21
0.063	99	1	79	18	83	17

la figure III.4 représente la courbe granulométrique des sables utilisées.

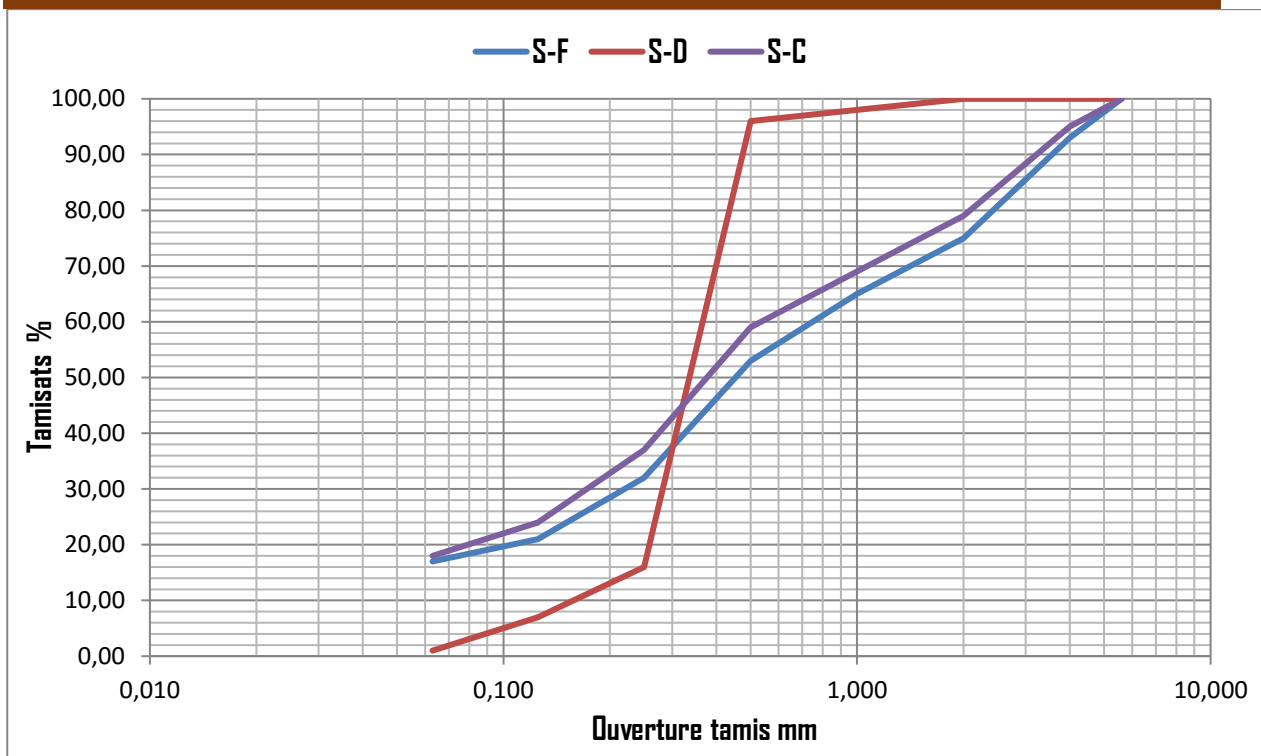


Fig.III.4 Courbes granulométriques des sables utilisées.

la figure III.4 représente la courbe granulométrique des sables utilisées.

Module de finesse.

La finesse d'un sable est estimée conventionnellement par une grandeur appelée module. Ce dernier est égal au (1/100) ème de la somme des refus. Exprimés en pourcentage des différents tamis de la série suivante : (0.125 - 0.250 – 0.5 – 1–2– 4 mm).

Un bon sable à béton ou mortier doit avoir un module de finesse d'environ 2.2 à 2.8. Au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins à très fins ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau.

$$M_F = \text{Somme } (R_c) / 100 \dots\dots\dots (III.5)$$

R_c : refus cumulé en (%) sous les tamis (0.125 ; 0.250 ; 0.5 ; 1 ; 2 ; 4).

Tab.III.7 Module de finesse.

	Module de finesse
SD	1.83
SC	2.42
SF	2.61

III.3.2 Ciment

Chapitre III :.....Caractérisation des matériaux

Le ciment utilisé est un ciment CPJ CEM II /A 42.5 disponible sur le marché fabriqué par la cimenterie de Hadjar el soude (Skikda).



Fig.III.5 Ciment compose CPJ-CEM II 42.5N de Hadjar Essoud

Les résultats des caractéristiques physiques, mécaniques, chimiques et minéralogiques sont représentées dans les tableaux suivants.

Tableau III.8 Caractéristiques Physiques du ciment CPJ 42.5.

Masse volumique Absolu (g/cm ³)	3.11
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.09
Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)	3330
Consistance (%)	25.5

Tableau III.9 Caractéristiques mécaniques du ciment CPJ 42.5.

Age	2 Jours	28 Jours
Résistance en traction par flexion en (Mpa)	4.2	8.1
Résistance en compression en (MPa)	20.3	48.4

Tableau III.10 Caractéristique Chimique du ciment CPJ 42.5

Chapitre III :.....Caractérisation des matériaux

Composition chimique		Composition minéralogique	
CaO	63.17	C ₃ S	62.45
Al ₂ O ₃	4.94	C ₂ S	12.35
Fe ₂ O ₃	3.32	C ₃ A	7.48
SiO ₂	20.62	C ₄ AF	10.09
MgO	1.16	/	/

III.3.3 Filler de calcaire

Fillers calcaires SFDM CFD15 fournie par L'ENG de la carrière de Constantine-Est de l'Algérie a une masse volumique absolue de 2.7 g/Cm³ et une SSB de 3900 cm²/g.

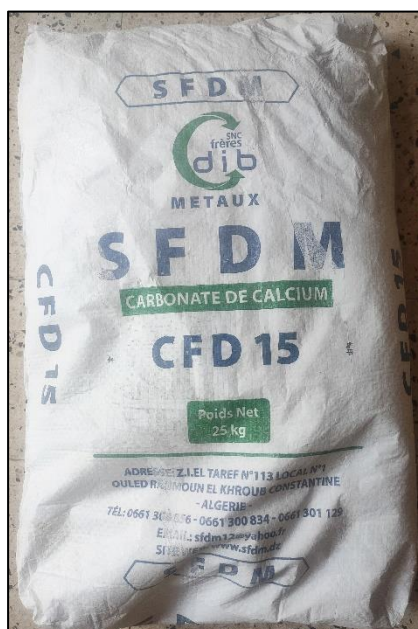


Fig.III.6 Filler de calcaire.

Les caractéristiques chimiques sont présentées dans le tableau III.11

Tab.III.11 Caractéristique chimique de calcaire.

Composant	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO
Teneur en %	55.94	0.03	0.02	0.04	0.20

III.3.4 Les fibres

Chapitre III :.....Caractérisation des matériaux

Les fibres utilisées sont des fibres métalliques DRAMIX commercialisées par-là de longueur de 50mm et de densité égale 7.9g/cm³.

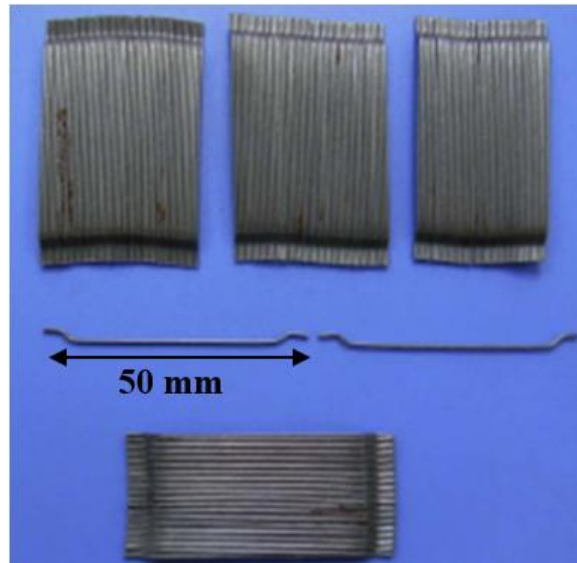


Fig.III.7 Fibre métallique utilisé.

Les caractéristiques de la fibre sont présentées dans le tableau III.11 :

Tab.III.12 caractéristiques de la fibre.

Fibre	/
Longueur (mm)	50
Diamètre (mm)	1.05
Densité (g/cm³)	7.9
Résistance à la traction (N/mm²)	1.15

III.3.5 Adjuvant

On a utilisé un super plastifiant haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.

Fourni par la société SIKA sous le nom ViscoCrete 665 (conforme à la norme EN 934-2).



Fig.III.8 Adjuvant utilisé.

Les caractéristiques de l'adjuvant sont présentées dans le tableau III.12.

Tableau III.13 Caractéristiques d'adjuvant utilisé.

Designations	Couleur	Densité	PH	Teneur en ions CL	Teneur Na2 O éq	Extrait Sec
Résultats	marron	1.085 g/cm ³	5	< 0.1%	< 1.0%	32%

III.3.6 Eau de gâchage

L'eau utilisée pour la confection des matériaux est celle du robinet du laboratoire (LTPEst).

III.4 commentaires sur les matériaux utilisés

- Les densités des sables recyclés sont supérieures de celle du sable de dune.
- L'équivalent de sable des sables recyclés sont inférieure à celui du sable de dune classé comme un sable très propre. A cette fin, les sables recyclés considérés comme des sables propres.
- Le sable de dune avait un module de finesse faible au contraire les sables recyclés ont un module de finesse préférentielle qui peut améliorer l'ouvrabilité du béton.
- Le coefficient d'absorption des sables recyclés est supérieur à celui du sable de dune ce qui engendre à une demande d'eau supplémentaire.
- Le ciment utilisé conforme la norme NA-442 donc notre ciment est CEMI-CPJ 42.5.
- Le filler utilisé c'est les fillers de calcaire qui avait une granulométrie presque inf. à 80µm pour toutes les particules.

Chapitre III :.....Caractérisation des matériaux

- L'adjuvant utilisé est conforme à la norme EN- 934-2 et compatible avec notre ciment.
- Les fibres métalliques ce sont des fibres normalisées.

III.5 Méthodes expérimentales de caractérisation des matériaux

III.5.1 Masse volumique absolue :

Cet essai est régi par la norme NFP 18-301 ; elle est définie comme étant la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat sans tenir compte des vides pouvant exister entre les grains.

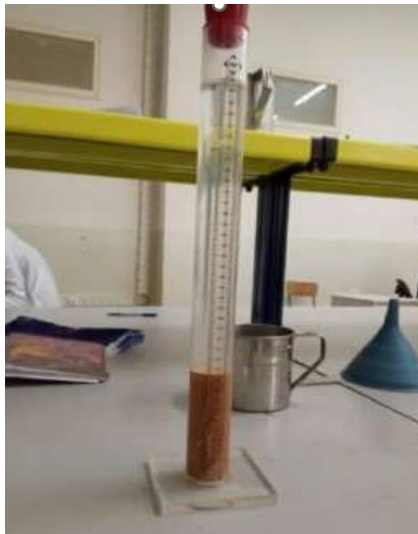


Fig.III.9 Masse volumique absolu.

Mode opératoire :

Généralement deux méthodes sont utilisées pour déterminer la masse volumique absolue :

- Méthode de l'éprouvette graduée.
- Méthode de la mesure au pycnomètre.

Dans cette étude nous avons utilisé la méthode de l'éprouvette graduée, elle est simple, rapide et utilise le matériel courant du laboratoire.

Cette méthode consiste à remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau, ensuite peser un échantillon sec M_s de granulats (environ 300g) et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air, le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume V_2 , la masse volumique absolue est alors donnée par la formule suivante :

Chapitre III :.....Caractérisation des matériaux

$P_s = (M_s / V_2 - V_1)$III.1

P_s : Masse volumique absolue.

M_s : Masse des grains solides.

V_1 : Volume de l'eau.

V_2 : Volume total (grains + solide).

La masse volumique absolue de nos sables utilisés sont affichés dans le tableau III.1.

III.5.2 Masse volumique apparente :

Cet essai est régi par la norme NFP18 – 301 ; elle est définie comme étant la masse à l'état naturel du matériau rapportée à l'unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides.



Fig.III.10 Masse volumique apparente.

Mode opératoire :

Cette méthode consiste à remplir un récipient dont le volume V est bien connu, par un échantillon sec de granulats, en prenant soin de bien raser le bord du récipient, peser l'échantillon sec M de granulats, on détermine la masse volumique apparente par la formule suivante :

$P_a = (M / V)$III.2

P_a : Masse volumique apparente ;

Chapitre III :.....Caractérisation des matériaux

M : Masse totale de l'échantillon ;

V : Volume total de l'échantillon.

La masse volumique apparente de nos sables sont mentionnés dans le tableau III.2

III.5.3 Coefficient d'absorption d'eau :

Il est défini par la norme NFP 18-555 ; cet essai sert à déterminer la porosité interne d'un granulats qui est défini comme étant le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon. Il est donné par la formule suivante :

$$A_b = ((M_a - M_s) / M_s) \cdot 100 \dots\dots\dots III.3$$

A_b : coefficient d'absorption d'eau des grains (%) ;

M_s : masse des grains de sable à l'état sec après passage à l'étuve à 105°C ;

M_a : masse des grains après imbibition.



Fig.III.11 Coefficient d'absorption de sable.

III.5.4 Equivalent de sable :

Cet essai est régi par la norme NFP 18-598 ; utilisé de manière courante pour évaluer la propriété des sables entrant dans la composition des bétons ou des mortiers, en déterminant la proportion des impuretés argileuses contenu dans le sable.

a) - Principe de l'essai :

L'essai est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier, il consiste à laver l'échantillon avec une solution lavante permettant de séparer les éléments fins argileux et en

Chapitre III :.....Caractérisation des matériaux

provoque la floculation, selon un processus normalisé, puis on laisse reposer le tout, au bout de 20 minutes, ensuite on mesure les hauteurs h_1 , h_2 .

Enfin nous déduisons l'équivalent de sable qui, par convention est :

$$E_s = (h_2 / h_1) \cdot 100 \dots\dots\dots(III.4)$$

E_s : Equivalent de sable (%) ;

H_1 : Hauteur de sable (propre + éléments argileux) ;

H_2 : Hauteur (sable propre seulement).



Fig.III.12 équivalents de sables.

III.5.5 Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique permet de déterminer les pourcentages pondérés respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Cet essai est défini par la norme NFP 18-560.



Fig.III.13 Essai analyse granulométrique.

Le tableau (III.6), présente le résultat moyen d'analyse granulométrique du sable de dune utilisé dans notre étude.

III.5.6 Module de finesse :

La finesse d'un sable est estimée conventionnellement par une grandeur appelée module. Ce dernier est égal au (1/100) èmme de la somme des refus. Exprimés en pourcentage des différents tamis de la série suivante : (0.125 - 0.250 – 0.5 – 1–2– 4 mm).

Un bon sable à béton ou mortier doit avoir un module de finesse d'environ 2.2 à 2.8. Au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins à très fins ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau.

$$M_F = \text{Somme } (R_c) / 100 \dots\dots\dots (III.5)$$

R_c : refus cumulé en (%) sous les tamis (0.125 ; 0.250 ; 0.5 ; 1 ; 2 ; 4).

III.6. Conclusion

Les essais de caractérisation effectués au laboratoire donnent une idée générale sur les caractéristiques principales des différents matériaux qui ont été incorporées dans les différentes formulations étudiées.

CHAPITRE IV :
PROGRAMME
EXPERIMENTALE ET
METHODOLOGIES DES ESSAIS

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présente en premier lieu le programme expérimental et la méthode de formulation des bétons de sable. Par la suite, les différentes compositions des mélanges obtenues, les méthodes expérimentales de fabrication des variétés de béton testées et finalement les essais réalisés sur les bétons élaborés.

IV.2 Programme expérimental

L'objectif de cette étude est d'analyser les changements des propriétés d'un béton de sable ordinaire en effectuant une substitution volumique partielle du sable dunaire par un mélange de sable de déchets de faïence et de déchet de clinker à des taux de 10 et 20%, ainsi que par l'ajout de fibres métalliques à des pourcentages de 0,25% et 0,5% respectivement.

IV.3 Formulation du béton de sable

L'approche de formulation qui a été utilisée est empirique, basée sur une méthodologie expérimentale s'appuyant uniquement sur le respect de certains des critères recommandés par la méthode théorique de SABLOCRETE (1994). Ces critères se résument en :

- ✓ Un rapport E/L compris entre 0.60 et 0.7.
- ✓ Un dosage en ciment très élevé $> 400 \text{ kg / m}^3$.
- ✓ Les dosages en fines d'addition entre 70 et 220 kg / m^3 .
- ✓ Le volume des vides compris entre 3 et 5 %.

IV.2.2 Formulation du béton de sable témoin BS (100%SD)

- ✓ **Détermination du dosage en ciment** : la masse du ciment est fixée à 420 kg/m^3
- ✓ **Détermination du dosage en fines** : pris égale 200 kg/m^3
- ✓ **Détermination du dosage en eau** : Le rapport E/L est maintenu constant avec une valeur égale à 0,60.
- ✓ **Détermination du dosage en superplastifiant** : la masse égale à 1.2% du poids de ciment.
- ✓ **Détermination du volume des vides [vides]** : le volume des vides est égal 30 litres.
- ✓ **Détermination du dosage en sable** : D'après la formule exposée par la méthode Sablocrete le dosage volumique du sable égale à : $[\text{Sable}] = 1000 - \text{ciment} - [\text{fines}] - [\text{eau}] - [\text{vides}] - [\text{superplastifiant}] \text{ l/m}^3$. Après l'ajustement de la formulation, on a trouvé un dosage en sable égale à 1338 kg/m^3 .

La formule a été testée expérimentalement et corrigée pour avoir un étalement de 18 cm et une résistance à 28 jours $\geq 25 \text{ MPa}$.

Tableau IV.1 : Notation des mélanges

Désignation	Quantité (kg/m ³)
Sable	1338
Ciment	420
Calcaire	200
Adjuvant	5.04
Eau	252

IV.2.3 Notation des mélanges confectionnés

La notation des mélanges effectués est comme indique dans le tableau IV.1 :

Tab.IV.1 Composition d'un 1m³ de béton témoin.

BF₀	Béton de sable avec 00% de substitution (témoin)	
BF_{0.25} D₁₀	Taux de fibre :0.25 %	Taux de substitution (SC+SF) :10%
BF_{0.25} D₂₀	Taux de fibre :0.25 %	Taux de substitution (SC+SF) :20%
BF_{0.50} D₁₀	Taux de fibre :0.50 %	Taux de substitution (SC+SF) :10%
BF_{0.50} D₂₀	Taux de fibre :0.50 %	Taux de substitution (SC+SF) :20%

IV.2.3 compositions des différents mélanges

Le Tableau IV.2 montre les différentes compositions réalisées (nous citons juste les matériaux dont la quantité est variable dans chaque variante).

Tableau IV.2 : Compositions des mélanges retenus

Mélange	SD (kg/m ³)	Fibre métallique	SC (kg/m ³)	SF (kg/m ³)
BF_{0.25} D₁₀	1198.3	19.85	70.14	67.85
BF_{0.25} D₂₀	1065.2	19.85	140.29	135.70
BF_{0.50} D₁₀	1192.5	39.70	69.80	67.52
BF_{0.50} D₂₀	1060	39.70	139.60	135.03

IV.2.4 Confection des mélanges retenus

A. Malaxage

Le malaxeur utilisé pour la fabrication des bétons est un malaxeur à un axe de rotation Horizontal planétaire de capacité de 120 litres.

La séquence d'introduction des différents matériaux est faite comme Suit :

- ✓ On verse (le sable dune plus les sable de 2 déchets) dans le malaxeur, puis une opération d'homogénéisation est entreprise pendant environ 30 secondes ;
- ✓ On verse le ciment et le filler calcaire à sec dans le malaxeur et on malaxe pendant 1 min ;
- ✓ Ensuite, on introduit par partie les fibres durant le malaxage à sec pendant 3-5 minutes
- ✓ On ajoute de l'eau et la moitié du super plastifiant et on malaxe pendant 1mi nute ;
- ✓ On ajoute enfin le reste de super plastifiant et on malaxe pendant 2 minutes ;
- ✓ On commence les essais à l'état frais immédiatement.



Fig.IV.1 Malaxeur utilisé.

B. Corps d'épreuves

Les corps d'épreuves ont été choisis selon les essais à réaliser de diverses formes et dimensions en conformité avec les normes en vigueur.

Les résultats, obtenus sur deux éprouvettes de chaque composition de même gâchée, du béton de sable, sont exprimés sous la moyenne de deux valeurs mesurées.

- ✓ Des prismes 7x7x28 cm : pour le retrait et la traction par flexion 7 et 28 jours ;
- ✓ Des cubes 15x15x15 cm : pour la résistance à la compression à 7 et 28 jours et la résistance à la traction par fendage.

✓ Des prismes 7x7x7 cm : pour l'essai de durabilité attaques chimique.



(a)

(b)

Fig.IV2 (a, b) Eprouvette avant et après le démoulage.

C. Conservation

Avant le démoulage toutes les éprouvettes ont été conservées pendant 24 heures dans la condition ambiante du laboratoire.

Après 24 heures, les échantillons ont été démoulés, nous sélectionnons chaque éprouvette avec un crayon résistant à l'eau et introduit les éprouvettes dans un bain d'eau a température $20^{\circ} + 1^{\circ}\text{C}$.



Figure IV.3 : Conservation des éprouvettes dans un bain d'eau.

IV.3 METHODOLOGIE DES ESSAIS

IV.3.1 Essais effectués sur le béton à l'état frais

Pour caractériser le comportement des bétons de sable à l'état frais, nous avons réalisé les essais suivants :

IV.3.1.1 Affaissement au cône d'Abrams

La consistance du béton de sable frais est mesurée généralement par l'affaissement au cône d'Abrams conformément à la norme NF P 18-451, cet essai consiste à remplir le moule conique normalisé fixé sur une plaque avec le mélange du béton. Le remplissage se fait en 3 couches de préférence de la même hauteur et on y applique 25 coups de tige d'une manière répartie. Après le remplissage le cône doit être arasé à l'aide d'une règle ou en faisant rouler la tige de piquage. On termine le teste par le soulèvement du cône et la mesure de l'affaissement du béton donné en cm.



Fig.IV.4 Essai d'affaissement.

I.V.3.1.2 La densité fraiche :

La densité apparente du béton frais ou la masse volumique est calculée en pesant un moule vide dont le volume est connu.

La formule de calcul est donnée comme Suit :

$$D = M - M_0 / V \text{ [g/cm}^3\text{]} \dots\dots\dots\text{IV.1}$$

D : Masse volumique du béton (g/cm³).

M : Masse du moule vide (g).

M_0 : Masse du moule rempli (g).

V : Volume du moule (cm³).



Fig.IV.5 Essai de la densité à l'état frais.

IV.3.1.3 Air occlus

La teneur en air occlus est mesurée à l'aide d'un aéromètre à béton, de 1 litre. Après le malaxage des constituants de béton, et suivant la norme NF EN 1015-7, on remplit la cuve d'aéromètre avec le béton frais. La partie supérieure reste fixée, on applique une pression à l'aide de la pompe manuelle jusqu'à ce que l'aiguille de l'appareil indique 0%. A ce moment, on ouvre la valve qui sépare les volumes des deux chambres, le mortier se comprime et le manomètre intégré dans l'aéromètre indique directement le pourcentage de l'air occlus.



Fig.IV.6 Mesure de l'air occlus.

IV.3.2 Essais à l'état durci

III.3.2.1. Essai de compression

L'essai de compression selon la norme NF EN 12390-3 consiste à appliquer une charge de compression axiale sur une éprouvette de béton jusqu'à la rupture. Les éprouvettes utilisées sont cubiques (15x15x15 cm). Si la surface de l'éprouvette est S (mm²) et la charge maximale enregistré au cours de l'essai est notée P (N), la résistance à la compression Fc est calculée par la relation :

$$F_c = P / S \text{ (N/mm}^2\text{)} \dots\dots\dots\text{IV.2}$$



Fig.IV.7 Essai de compression

IV.3.2.2 Résistance à la traction par flexion :

L'essai mécanique en traction par flexion (3 points) est établi à l'aide d'un dispositif à rouleau utilisé en flexion comportant deux appuis à rouleau sur lesquels reposent l'éprouvette prismatique et un troisième rouleau équidistant des deux premiers, transmettant une charge concentrée.

L'appareil utilisé est une machine asservie en contraintes. La résistance à la traction par flexion a été évaluée avec une vitesse d'application du chargement de 0,1 MPa/s

La résistance est calculée avec la relation :

$$R_t = 1,5FL / B^3 \text{ (N/mm}^2\text{)} \dots\dots\dots\text{IV.3}$$

F : Charge appliquée en N,

L : Distance entre les appuis (mm),

B : Coté de l'éprouvette en mm.



Fig.IV.8 Essai traction par flexion.

III.3.2.2 Essai au scléromètre [NF EN 12504-2]

L'essai au scléromètre est une méthode non destructive qui permet d'estimer la résistance du béton conformément à la norme NF EN 12504-2. Cette méthode permet de mesurer la dureté a la surface du béton et évaluer la qualité globale de l'ouvrage. Après avoir placé les points de mesure sur la surface de l'éprouvette conformément à la norme, l'éprouvette est fixée entre les deux supports d'une presse de compression, puis le scléromètre est appliqué aux points de mesure. La tige en acier sort du cylindre, appuie sur le béton et comprime un ressort. Ce ressort projette ensuite une masse dans la tige, qui revient à la surface du béton et entraîne le curseur de retour, permettant ainsi de lire l'indice de rebondissement. En moyennant ces indices et en utilisant une table de référence de l'appareil, on peut connaître la résistance du béton. Les essais de scléromètre sont effectués sur des éprouvettes cubiques de dimension 15*15*15 cm.



Fig.IV.8 Essai au scléromètre.

III.3.2.3 Essai d’ultrason [NF EN 12504-4]

La méthode de mesure en transparence (directe) conformément à la norme NF EN 12504-4 consiste à mesurer la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques longitudinales entre deux points désignés sur la surface de l'objet testé, en connaissant la distance entre ces deux points. La vitesse de propagation du son en km/s peut être calculée en utilisant la formule suivante :

$$V = L/t \text{ (km/s)IV.3}$$

V : représente la vitesse de propagation,

L : est la longueur de parcours en mm,

T : est le temps nécessaire à l'impulsion pour parcourir cette distance en μ s.



Fig. IV9 Essai ultrason.

IV.3.2.4 Retrait

CHAPITRE IV:.....PROGRAMME EXPERIMENTALE ET METHODOLOGIES DES

L'objectif de cet essai de mesurer, en fonction du temps, la variation de longueur due aux effets de l'hydratation et de la dessiccation des matériaux cimentaires. Cet essai est régi suivant la norme selon la norme NF P15-433. Cette mesure a été réalisée sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (7x7x28) cm. Après 24 heures, les éprouvettes sont démoulées et conservées à l'air ambiant du laboratoire. Les variations dimensionnelles ont été déterminées à l'aide d'un rétractomètre.

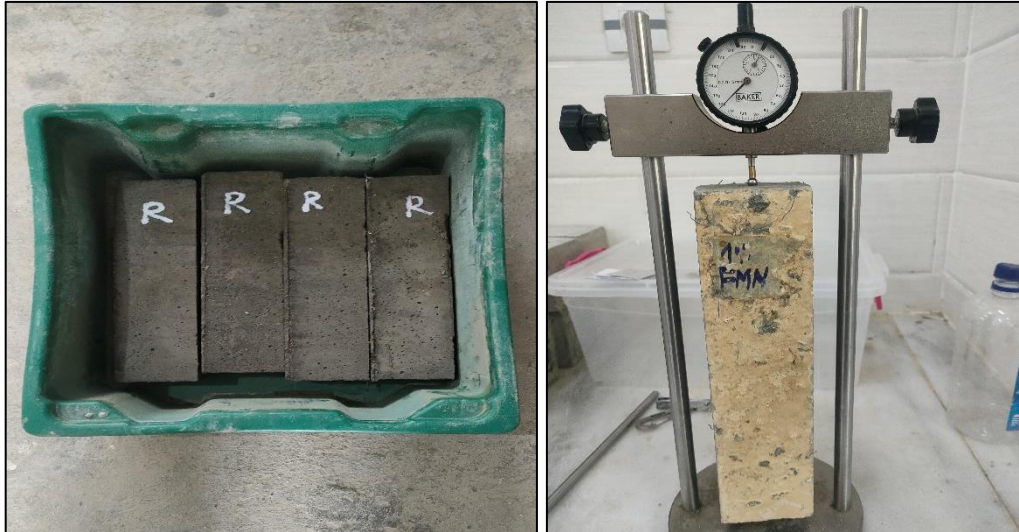


Fig.IV.10 Essai de retrait.

IV.3.2.5 Gonflement :

L'objectif de cet essai est de mesurer, en fonction du temps, les variations dimensionnelles des éprouvettes testés (7*7*28 cm).

Les éprouvettes sont conservées dans l'eau (Température ambiante).

À l'aide d'un rétractomètre à comparateur digital (précision $\pm 0,02$ mm), les mesures de variation dimensionnelle commencent après les décoffrages et sont effectuées ensuite avec une périodicité qui augmente avec le temps.

L'expression du gonflement se traduit par le rapport de la variation de longueur de l'éprouvette ($\Delta L/L$) en fonction du temps.

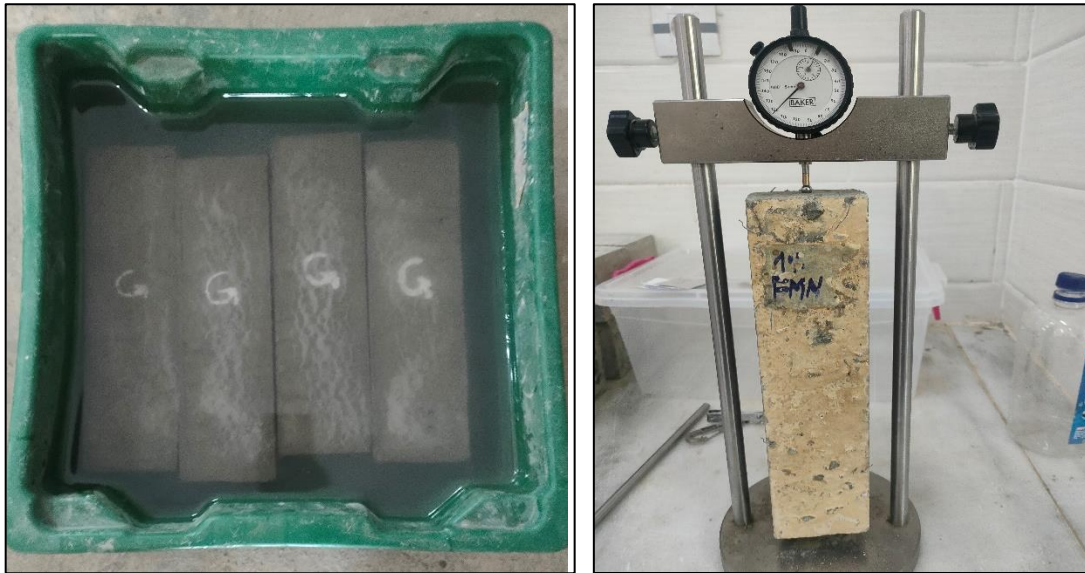


Fig.IV.11 Essai de gonflement.

Essai des attaques chimiques [ASTM C267-17]

La mesure de la résistance face aux attaques chimiques par les acides et les bases est effectuée sur des éprouvettes cubique (7x7x7) cm.

Après 28 jours de cure sous l'eau, les éprouvettes sont pesées pour déterminer M1, puis elles sont immergées dans les différentes solutions citées ci-dessous et renouvelées chaque 14 jours (Selon la valeur du PH) :

- 5% Acide chlorhydrique (**H Cl**).
- 5% Acide sulfurique (**H₂SO₄**).

La résistance due aux agressions chimiques des échantillons immergés dans ces solutions, est évaluée par leur perte de masse selon la norme ASTM C 267-96, les éprouvettes sont nettoyées avec l'eau puis laissées sécher à la température ambiante pendant 30 minutes. Ensuite, on procède à la pesée de ces dernières d'où la masse M2. Les mesures sont effectuées après 1, 7, 14, 21, 28, 56, 90 jours après l'immersion.

La résistance chimique est évaluée par la mesure de la variation de masse de l'éprouvette :

$$\text{Perte de masse \%} = ((M1-M2) / M) * 100$$

Avec :

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

M2 : masse de l'éprouvette après l'immersion.



Fig.IV.12 Essai attaque des solutions chimiques.

IV.4. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les points suivants :

- Le programme expérimental détaillé.
- La formulation des différents mélanges de béton, les paramètres de composition ainsi que le mode de fabrication et de conservation des éprouvettes.
- L'ensemble des essais réalisés sur le béton ainsi que les méthodes d'essais.

CHAPITRE V :

RESULTATS ET

DISCUSSIONS

V.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des différents essais effectués sur les bétons réalisés selon les compositions détaillées dans le chapitre précédent. Ces résultats incluent l'ouvrabilité, la masse volumique, l'air occlus, les résistances mécaniques, la dureté, le retrait et la résistance chimique face aux attaques acides. Nous étudions également l'effet de l'incorporation de sable mélangé avec des déchets de clinker et de faïence sur les propriétés des bétons, tant à l'état frais qu'à l'état durci, en comparaison avec le béton témoin.

V.1. Caractérisation des bétons à l'état frais

V.1.1 L'ouvrabilité

Les résultats de l'ouvrabilité issus de l'essai de d'affaissement des différents bétons, mesurés par le cône d'Abrams sont illustrés dans la figure ci-dessous.

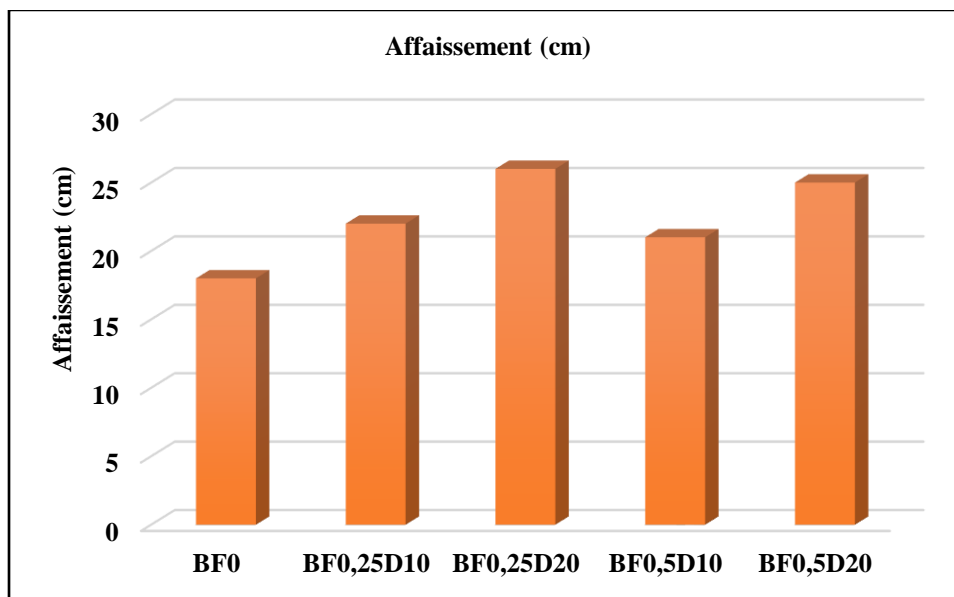


Fig. V.1 : Variation de l'ouvrabilité en fonction de taux de substitution.

D'après la figure V.1, on constate une augmentation de l'affaissement avec l'ajout d'un mélange de sable de déchets de clinker et de faïence. Cependant, les bétons avec un taux de 0,25 % de fibres métalliques présentent les valeurs d'affaissement les plus élevées comparativement aux autres bétons, qu'il s'agisse du béton témoin ou de ceux contenant un taux de 0,5 % de fibres. On note aussi que la gamme des bétons ainsi fabriquée demeure dans la catégorie des bétons fluides.

CHAPITRE V :RESULTATS ET DISCUSSIONS

Cette augmentation de l'ouvrabilité est due à l'effet des fines particules du sable de déchet de clinker et de faïence, qui ont des taux de fines élevés. Ces dernières s'insèrent dans les vides existants et libèrent par conséquent de l'eau emprisonnée, ce qui mène à une amélioration de l'ouvrabilité.

V.1.2 La densité

Les résultats de la masse volumique à l'état frais présentés dans la figure V.2 correspondent à une moyenne des valeurs obtenues pour trois mesures.

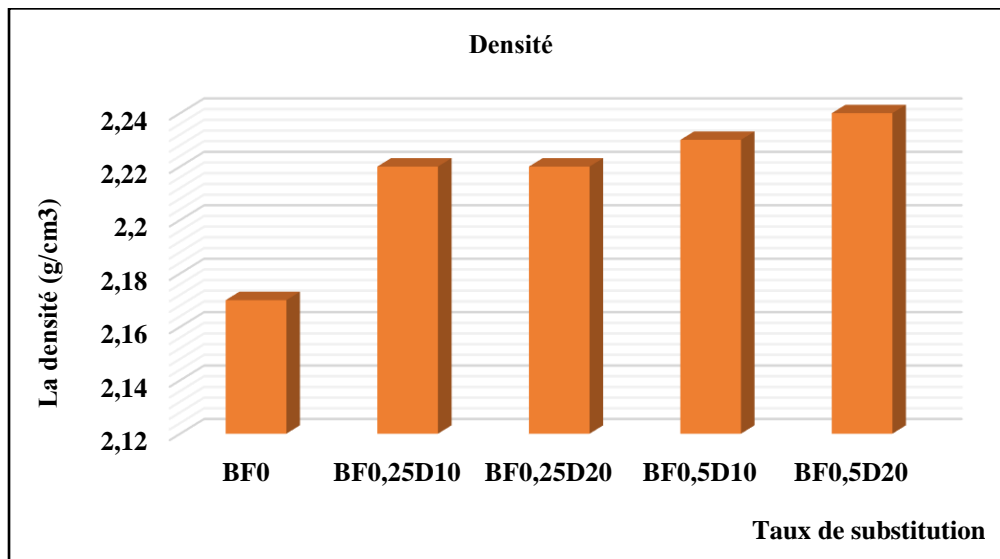


Fig. V.2 : variation de la densité en fonction de taux de substitution.

A travers la figure V.2, il est clair que la densité de l'ensemble des bétons de sable fibrés élaborés augmente en ajoutant des taux croissants de sable de déchets de clinker et faïence. Toutefois, la gamme des bétons ainsi obtenue reste celle du béton normal.

On note aussi, que le béton BF0.5D20 présente une densité maximale qui dépasse celle du témoin de 3%. Ce résultat est attendu du fait que les masses volumiques des sables issus de déchet de clinker, de faïence et des fibres métalliques ont des masses volumiques absolues supérieures à celle du sable de dune.

V.1.3 L'air occlus

La figure V.3 présente les résultats de mesures d'air occlus effectuées sur les différentes compositions de bétons, à base de sable de dune et de déchet de clinker et faïence.

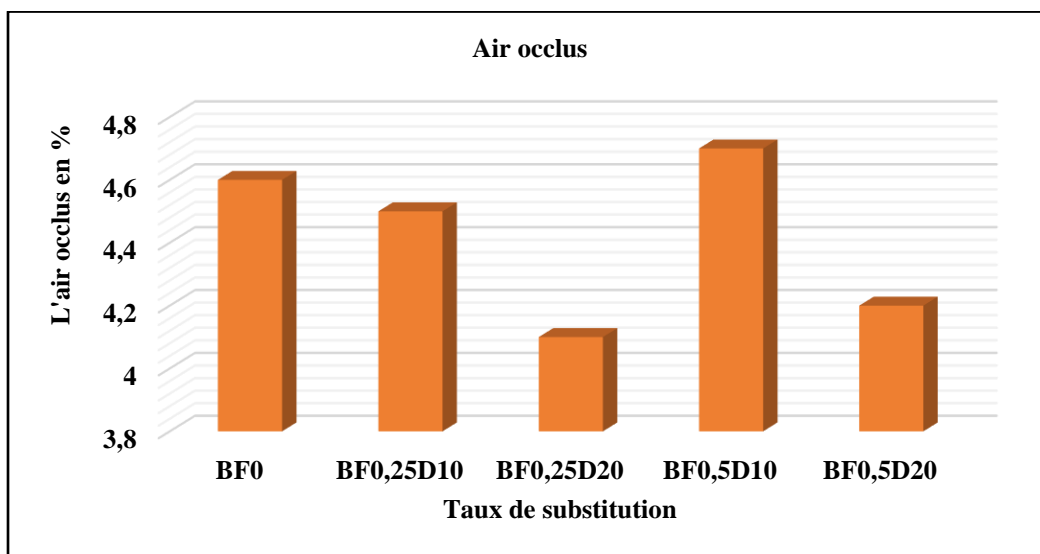


Fig. V.3 L'air occlus dans les bétons testés

En se référant à la figure V.3, on observe globalement une diminution de l'air occlus avec l'incorporation de mélange de sable de déchets. Toutefois les bétons contenant 0.5% de fibre métallique illustrent les valeurs les plus élevées par rapport aux bétons contenant 0.25% de fibre. La valeur maximale est illustrée par le béton BF0.5D10 et elle comparable à celle du témoin.

Cette diminution peut être expliquée par le fait que l'incorporation de sables de déchets diminuent le volume des macropores en provoquant un raffinement du système de pores.

V.2 Caractérisation des bétons à l'état durci :

La caractérisation des bétons de sable à l'état durci est basée sur l'étude des propriétés suivantes :

- La résistance à la compression à 7 et 28 jours.
- La résistance à la flexion à 7 et 28 jours.
- La résistance à la traction par fendage à 7 et 28 jours.
- Le retrait jusqu' au 65 Jours.
- L'attaque chimique dans des solution acides.

- Essai scléromètre.

V.2.1 La résistance à la compression :

La figure V.4 représente les valeurs moyennes de la résistance à la compression en MPa.

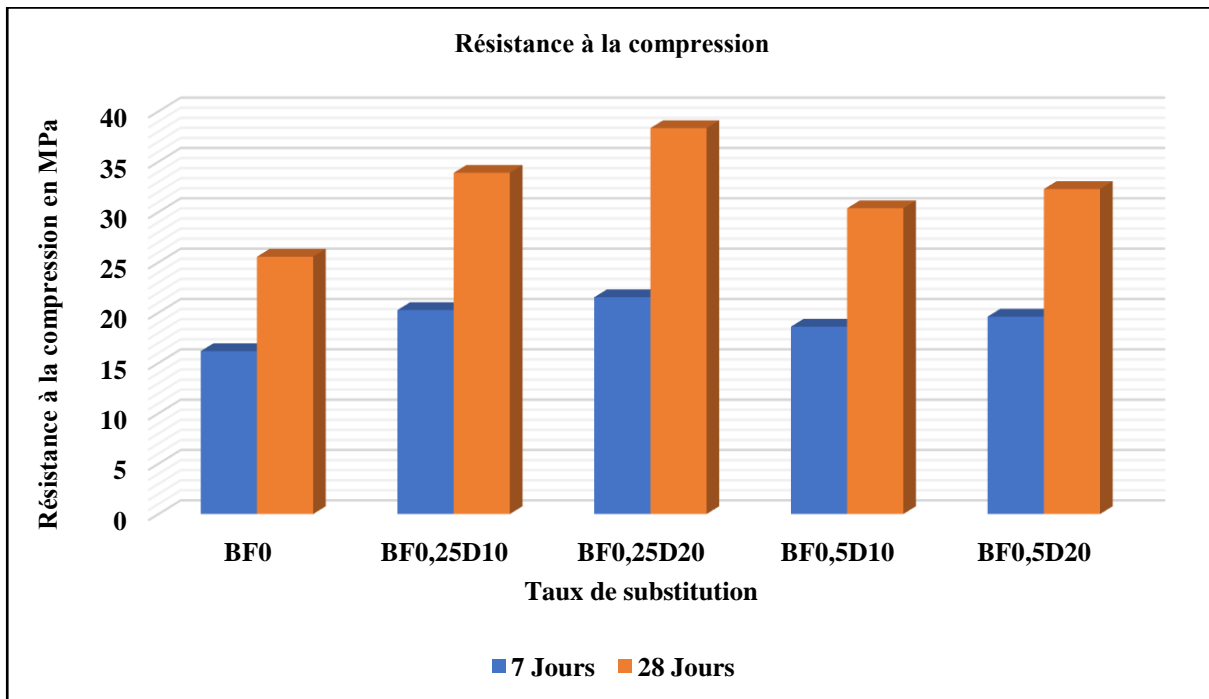


Fig. V.4 : Evolution de la résistance à la compression des différents mélanges.

D'après la figure V.4, on remarque une amélioration de la résistance à la compression des bétons de sables fibré contenant des taux variables de sable recyclés.

Il y a une augmentation de l'ordre de 32% à 7 jours et 39% à l'âge de 28 jours enregistré par le béton BF0.25D20.

Au jeune âge :

L'augmentation de la résistance aux jeunes âges est due à l'augmentation de la calcite et l'oxyde d'aluminium dans la composition du mélange ce qui facilite la granulation et assuré la qualité des hydrates formé au cours du temps.

A long terme :

L'introduction du sable de déchet de clinker et faïence a exercé une activité pouzzolanique, ce qui engendre un développement important dans les résistances au cours du temps.

Avec l'introduction des fibres métallique avec un dosage préférentiel, il y a une contribution à l'amélioration de la cohésion des bétons du fait que ces fibres aident à renforcer la matrice cimentaire dans le bon sens.

V.2.2 La résistance à la flexion :

La figure V.6 représente les valeurs moyennes de la résistance à la flexion en MPa.

Il y a plusieurs constatations :

Le comportement en traction est similaire à celui en compression, la résistance à la flexion augmente en fonction de l'âge pour tous les mélanges.

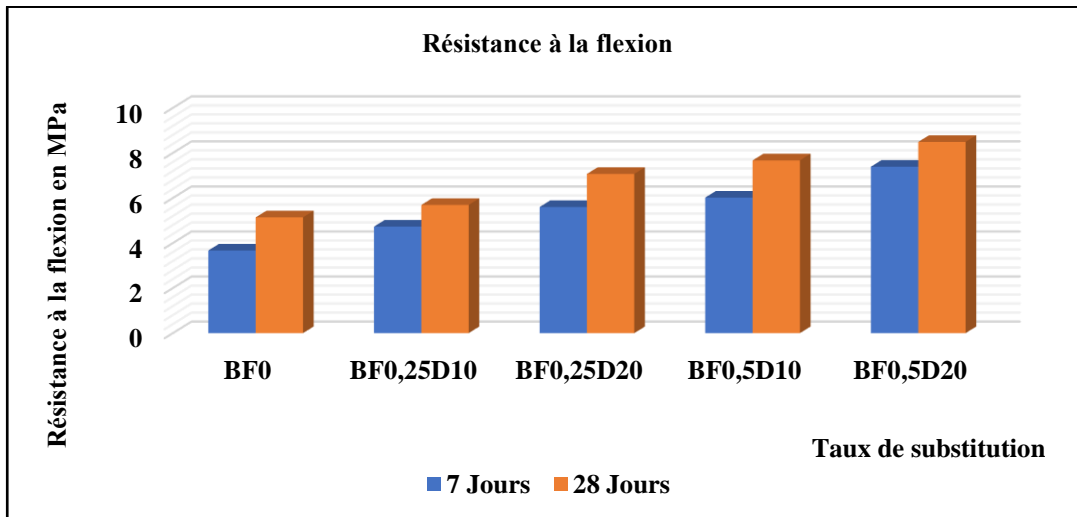


Fig. V.5 : Résistance à la flexion des échantillons.

D'après la figure V.5, on note une augmentation de la résistance en traction par flexion de tous les bétons de sable fibrés élaborés mais avec des gains différents. En addition, cette augmentation est proportionnelle avec le taux de substitution du sable de dune par le taux de sable recyclé.

A l'âge de 28 jours, l'amélioration de la résistance à la flexion est de 10,70% (BF0.25 D10), 33,92% (BF0.25 D20), 35,79% (BF0.5 D10) et 43,68% (BF0.5 D20)

A la lumière de ces résultats on peut déduire que le meilleur dosage est de 20% de sable recyclé incorporé dans le béton fibré de 0.5% de fibre métallique. Ceci est causé par une amélioration de la cohésion de la matrice cimentaire grâce a un effet de remplissage, de pouvoir hydraulique et d'un effet pouzzolanique de la part des fines particules du sable recyclé mais également de l'augmentation du taux de fibre qui joue un rôle important dans l'amélioration de la résistance en post fissuration.

V.2.3 Résistance à la traction par fendage :

Les résultats de la résistance à la traction par fendage sont présentés dans la Figure V.6

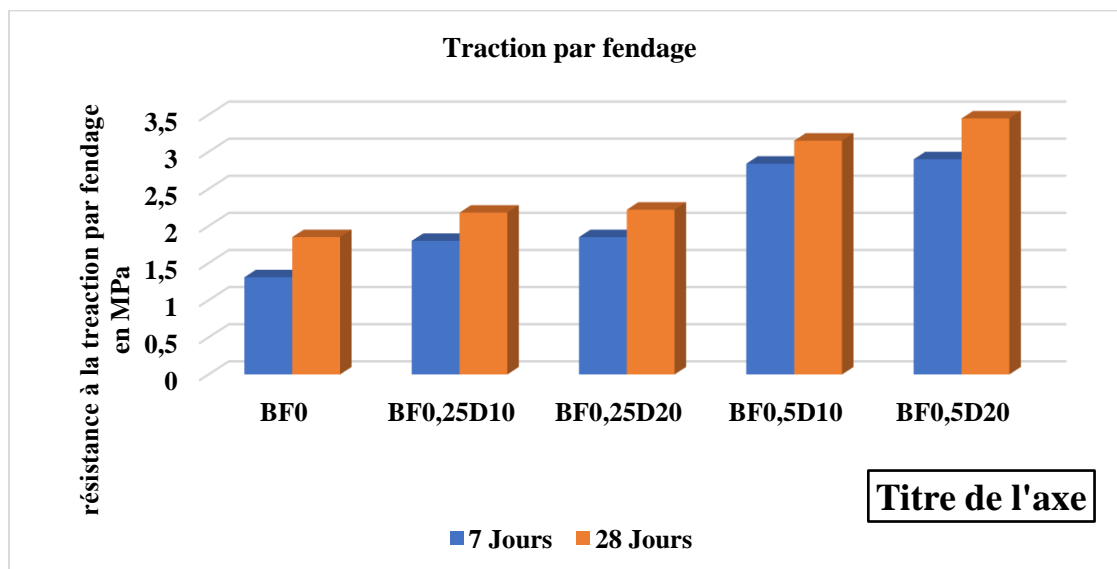


Fig.V.7 résultats traction par fendages des bétons.

Il est clair d’après la figure V.7, que les tendances observées pour la résistance en compression et en traction par flexion se reproduisent encore une fois, il y a une amélioration remarquable de résistance en traction par fendage en introduisant des taux croissants du sable recyclé et des fibres. Le béton le plus performant est celui contenant 20% de sable recyclé avec 0.5% de fibre métallique. Ce résultat peut être justifié par le fait de la présence d’un bon nombre de fibres, ayant une préférentielle orientation au sein de la matrice, ce qui aide à supporter les efforts de traction, en plus les sables recyclés améliorent la résistance par leur effet de remplissage et la bonne cohérence avec la matrice cimentaire.

V.2.4 Le retrait

La figure V.8 représente les valeurs de retrait en $\mu\text{m}/\text{m}$.

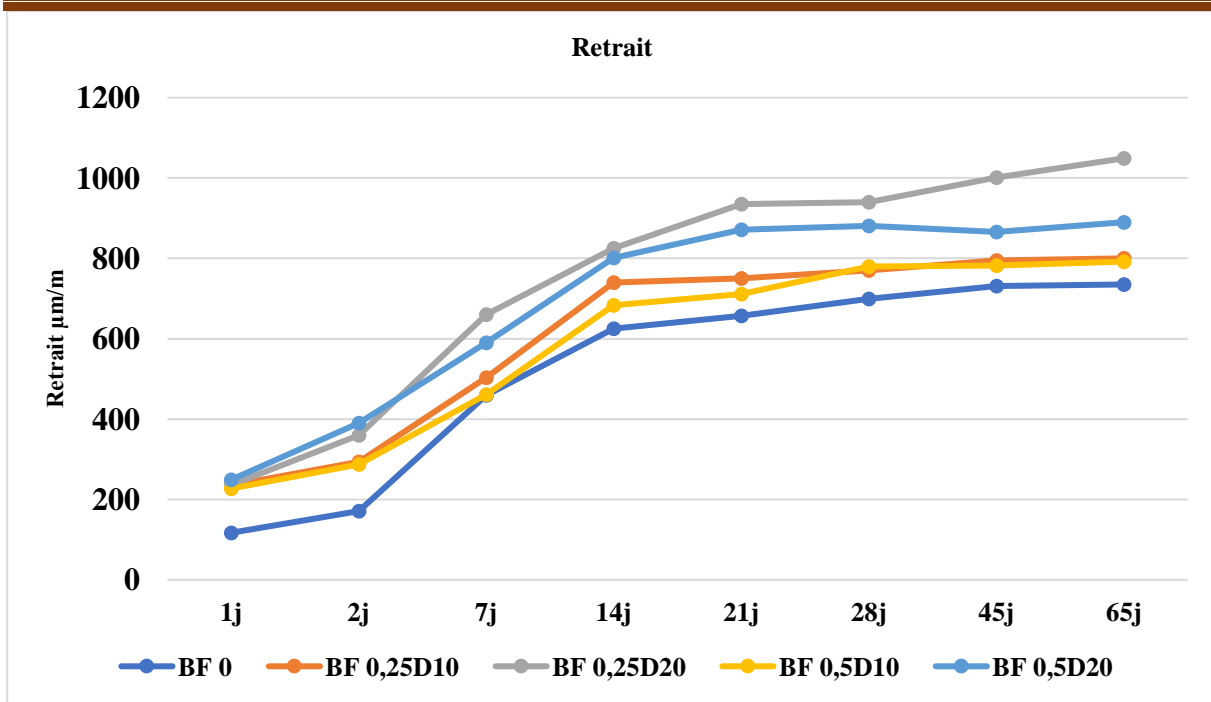


Fig.V.8 Résultats de retrait en µm/m.

La figure V.8 montre clairement que l’incorporation de sable recyclé à partir de déchets clinker et faïence a un impact négatif sur le retrait total des bétons.

Après 65 jours de conservation, les valeurs moyennes de retrait total de tous les bétons recyclés BF0.5D10, BF0.25D10, BF0.25D20, et BF0.25D20, sont plus élevées que celles enregistrées pour le béton de de référence. Ces valeurs enregistrées sont principalement dues à l’évaporation de l’eau retenue dans les grains de sable recyclés qui présentent une microstructure poreuse.

V.2.4 L’attaque chimique

V.2.4.1 Acide HCl

Les pertes de masse induites par l’attaque d’acide HCl sont présentés dans la figure ci-dessous.

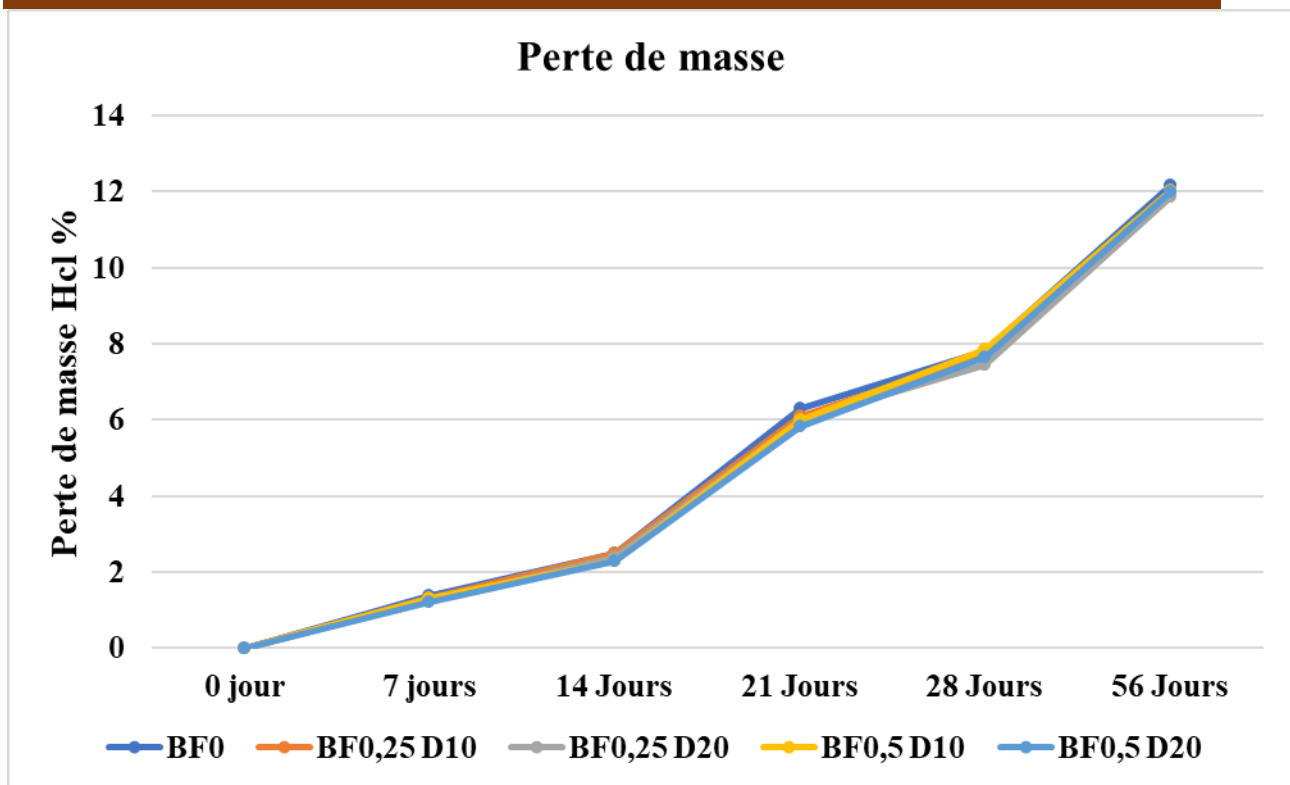


Fig.V.9. Perte de masse des bétons.

D’après la figure V.9, on constate que les pertes en masse des bétons fibrés à base de sable recyclé sont inférieures à celle illustrée par le béton témoin et depuis la première semaine jusqu’à 56 jours. Cette meilleur résistance vis-à-vis l’attaque par HCl est due essentiellement à l’effet des sables recyclés (particules fines) qui joue un rôle majeur dans la compacité de la matrice cimentaire.

L’incorporation des fibres métallique n’a pas eu d’impact positif sur la résistance des bétons vis-à-vis les agressions chimiques.

V.2.4.2 Acide H₂SO₄

Les pertes de masse résultantes par l’attaque d’acide H₂SO₄ sont présentés dans la figure ci-dessous.

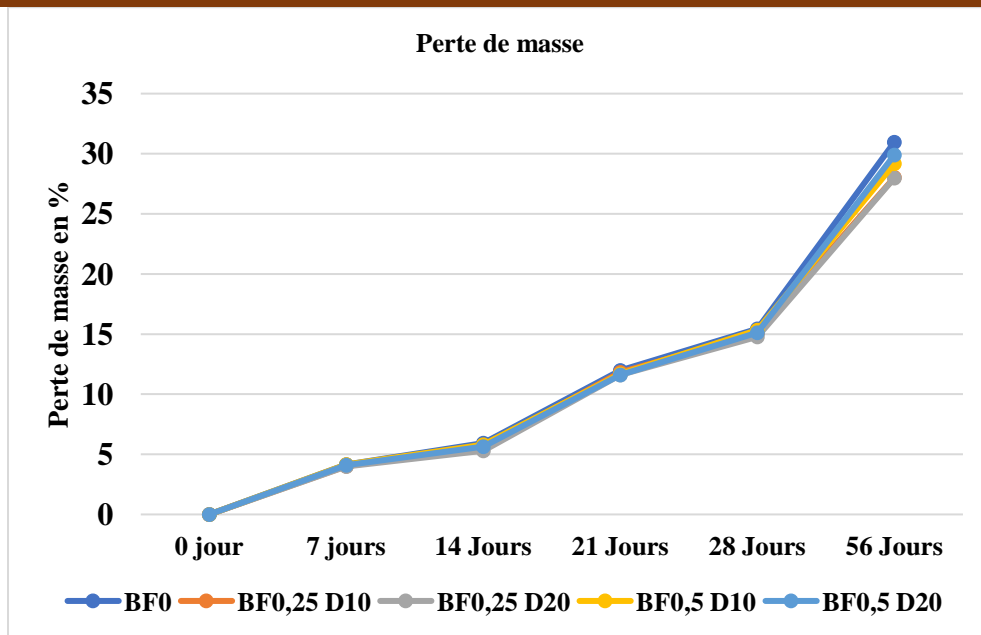


Fig.V.10. Perte de masse des bétons.

Après une immersion de 56 jours dans une solution d'acide sulfurique (H_2SO_4), les bétons contenant des fibres et du sable recyclé (clinker et faïence) présentent des pertes de masse inférieures à celles du béton témoin. En effet, les fines particules du sable recyclé contribuent à la densification des matrices cimentaires en améliorant le processus d'hydratation par une réaction pouzzolanique qui consomme la portlandite, qui est le composant le plus soluble et donc le premier à être lessivé lors de l'attaque par l'acide sulfurique (H_2SO_4).

V.2.5 Essai au scléromètre

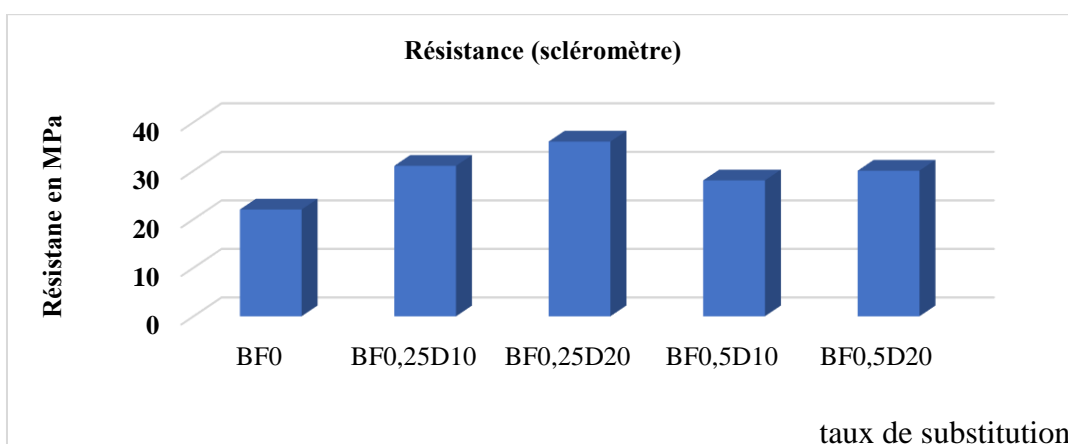


Fig.V11 Indice de rebondissements au scléromètre des bétons.

CHAPITRE V :RESULTATS ET DISCUSSIONS

D'après la figure V11 on remarque une augmentation de la dureté de surface des bétons de sables fibré contenant des taux de déchet de sable recyclés. La résistance maximale est donnée par le béton à 0.25% fibre et 20% de sable recyclé.

En fait, l'ajout de sables de déchets et des fibres a un effet positif sur la dureté de surface.

V.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats d'étude des propriétés à l'état frais et durci de bétons de sable fibré contenant partiellement un sable recyclé de déchets de clinker et faïence. Les conclusions suivantes sont à noter:

1. L'ouvrabilité du béton témoin s'améliore proportionnellement avec l'introduction des fibres métallique et du sables recyclés, cependant, les bétons avec un taux de 0,25 % de fibres métalliques présentent les valeurs d'affaissement les plus élevées comparativement aux autres bétons.
2. La densité de l'ensemble des bétons de sable fibrés élaborés augmente en ajoutant des taux croissants de sable de déchets de clinker et faïence.
3. Il y a une diminution de l'air occlus en incorporant les fibres et le sable recyclé dans la composition de référence. Toutefois, les bétons contenant 0.5% de fibre métallique illustrent les valeurs les plus élevés par rapport aux bétons contenant 0.25% de fibre.
4. Comparativement au témoin, il y a une amélioration de la résistance à la compression des bétons de sables fibré contenant des taux variables de sable recyclés. Le béton BF0.25D20 est le plus performant aux deux échéanciers 7 et 28 jours.
5. Les mêmes tendances observées pour la résistance en compression se reproduisent pour la traction par flexion, néanmoins, le béton à 20% de sable recyclé et 0.5% de fibre métallique est le plus résistant.
6. Une amélioration de résistance en traction par fendage est constatée en introduisant des taux croissants du sable recyclé et des fibres. Le béton le plus performant est celui contenant 20% de sable recyclé avec 0.5% de fibre métallique. Le rôle joué par la fibre métallique est évidente et prédominant dans l'augmentation des résistance surtout à la flexion à la traction par fendage.
7. L'introduction simultanée des fibres métalliques et du sable recyclé augmente le retrait des bétons confectionnés.

CHAPITRE V :RESULTATS ET DISCUSSIONS

8. En matière de résistance vis à vis l'attaque chimique par H_2SO_4 , les pertes de masse sont plus importantes dans les bétons fibrés que dans le béton témoin.

9. La résistance chimique des bétons confectionnés face à l'attaque de l'acide Hcl est plus élevée que celle de béton témoin à cause de l'amélioration de la compacité des bétons par les particules fines des sables recyclé.

10. La dureté de surface des bétons contenant les fibres métallique et le sable recyclé est meilleure que celle du témoin. La résistance maximale est donnée par le béton à 0.25% fibre et 20% de sable recyclé.

En conclusion, on peut dire que les résultats obtenus dans le cadre de cette étude confirment la faisabilité d'exploiter le sable de déchet de clinker et faïence ainsi que les fibres métalliques pour améliorer diverses caractéristiques des bétons de sable ce qui permettrait d'accroître leurs applications dans divers domaines surtout le béton structurel.

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'utilisation des déchets minéraux dans le béton de sable présente plusieurs avantages, notamment la réduction des déchets envoyés en décharge, l'amélioration des propriétés physiques, chimiques et de durabilité, la diminution des coûts de production, ainsi que la valorisation des sous-produits industriels. De plus, le renforcement des bétons de sable par des fibres est une technique prometteuse pour améliorer la résistance à la traction par flexion et réduire la fissuration. Combiner ces deux approches dans ce type de béton conduit à une construction plus durable et à une gestion plus efficace des ressources.

L'objectif de cette étude est d'analyser les changements des propriétés d'un béton de sable ordinaire en effectuant une substitution volumique partielle du sable dunaire par un mélange de sable de déchets de faïence et de déchet de clinker à des taux de 10 et 20%, ainsi que par l'ajout de fibres métalliques à des pourcentages de 0,25% et 0,5% respectivement.

Les propriétés examinées dans leur état frais incluent l'ouvrabilité, la densité et la présence d'air occlus. Une fois durci, des mesures de résistance à la compression, à la flexion, et au fendage, ainsi que des tests de dureté et de résistance aux attaques chimiques par les acides ont été réalisés pour évaluer l'impact de ces fibres sur les caractéristiques du béton, comparativement au béton témoin sans fibres.

Après cette étude expérimentale nous pouvons présenter les conclusions suivantes :

1. L'ouvrabilité du béton témoin s'améliore proportionnellement avec l'introduction des fibres métallique et du sables recyclés, cependant, les bétons avec un taux de 0,25 % de fibres métalliques présentent les valeurs d'affaissement les plus élevées comparativement aux autres bétons.
2. La densité de l'ensemble des bétons de sable fibrés élaborés augmente en ajoutant des taux croissants de sable de déchets de clinker et faïence.
3. Il y a une diminution de l'air occlus en incorporant les fibres et le sable recyclé dans la composition de référence. Toutefois, les bétons contenant 0.5% de fibre métallique illustrent les valeurs les plus élevés par rapport aux bétons contenant 0.25% de fibre.
4. Comparativement au témoin, il y a une amélioration de la résistance à la compression des bétons de sables fibré contenant des taux variables de sable recyclés. Le béton BF0.25D20 est le plus performant aux deux échéanciers 7 et 28 jours.
5. Les mêmes tendances observées pour la résistance en compression se reproduisent pour la traction par flexion, néanmoins, le béton à 20% de sable recyclé et 0.5% de fibre métallique est le plus résistant.
6. Une amélioration de résistance en traction par fendage est constatée en introduisant des taux croissants du sable recyclé et des fibres. Le béton le plus performant est celui contenant 20% de sable recyclé avec 0.5% de fibre métallique. Le rôle joué par la fibre métallique est évidente et prédominant dans l'augmentation des résistance surtout à la flexion à la traction par fendage.

CONCLUSION GENERALE

7. L'introduction simultanée des fibres métalliques et du sable recyclé augmente le retrait des bétons confectionnés.

8. En matière de résistance vis à vis l'attaque chimique par H_2SO_4 , les pertes de masse sont plus importantes dans les bétons fibrés que dans le béton témoin.

9. La résistance chimique des bétons confectionnés face à l'attaque de l'acide Hcl est plus élevée que celle de béton témoin à cause de l'amélioration de la compacité des bétons par les particules fines des sables recyclé.

10. La dureté de surface des bétons contenant les fibres métalliques et le sable recyclé est meilleure que celle du témoin. La résistance maximale est donnée par le béton à 0.25% fibre et 20% de sable recyclé.

En conclusion, on peut dire que les résultats obtenus dans le cadre de cette étude confirment la faisabilité d'exploiter le sable de déchet de clinker et faïence ainsi que les fibres métalliques pour améliorer diverses caractéristiques des bétons de sable ce qui permettrait d'accroître leurs applications dans divers domaines surtout le béton structurel.

REFERENCES

Références

Références

- [1] **LAZAR Mohamed Badreedine**, Etude de l'influence des fibres issues de déchets d'aluminium sur le retrait du béton de sable ; mémoire master, université Ouargla 2023.
- [2] **OUKIL Youcef**, Formulation et caractérisation d'un béton de sable à partir des déchets minéraux ; mémoire master, université Bouira 2017.
- [3] **SABLOCRETE**, (1994) « Béton de sable », Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, France.
- [4] **OUKIL Youcef**, Formulation et caractérisation d'un béton de sable à partir des déchets minéraux ; mémoire master, université Bouira 2017.
- [5] **SABLOCRETE**, Projet National de Recherche et Développement, "Bétons de sable : caractéristiques et pratiques d'utilisation", Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris 1994.
- [6] **DREUX G, FESTA J.**, (2002), Nouveau guide du béton et de ses constituants, Huitième édition, Edition Eyrolles.
- [7] **C.E.B.T.P, Dec.** (1986) : "Synthèse de connaissance sur le béton de sable" ; Opération 52 G 119 ; LRPC de bordeaux.
- [8] **LAZAR Mohamed Badreedine**, Etude de l'influence des fibres issues de déchets d'aluminium sur le retrait du béton de sable, mémoire de master ; université Ouargla 2023.
- [9] **SAHRAUOI Chahinez**, Étude de la durabilité du béton pouzzolanique fibré, mémoire de master ; université Ain-Temouchent 2020.
- [10] **ACI Committee,201** «Quid to durable concrete, American Concrete Instituel. Report » of ACI Committee,detrat,ACI 201.2R-77,deter,1982.37.
- [11] **SAHRAUOI Chahinez**, Étude de la durabilité du béton pouzzolanique fibré, mémoire de master ; université Ain-Temouchent 2020.
- [12] **REZIG Salima**, Optimisation de la formulation du béton de sable dans le cadre de valorisation des matériaux locaux, mémoire de magister ; Université du Biskra.