



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : Génie civile et Architecture

Département de Génie civile

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : CHERIFI Ryma Hibat Errahman et

Et

SLIMANI Yasmine

DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE CIVIL

OPTION : MATERIAUX EN GENIE CIVILE

Thème

**ETUDE D'UN COMPOSITE A BASE DE CIMENT, SABLE DE
DUNES ET DECHETS DE PLASTIQUES**

Jury de soutenance :

Mr. GUEDDOUDA Med. Kamel	Professeur	Président
Mr. BENABBED Benchaa	MCA	Examineur
Mme. DAMENE Zineb	MCB	Rapporteur
Mr. SAITI Issam	Doctorant	Co-rapporteur

Promotion : Juin - 2018

ملخص:

هذه الدراسة تهدف لاستخدام الموارد المحلية مثل رمل الكثبان المتواجد بوفرة في جنوب الجزائر بالإضافة الى رسكلة مخلفات قارورات البلاستيك المستعملة بتقطيعها الى قطع واستعمالها كحصى من اجل انتاج مادة بناء متطورة تستجيب الى المتطلبات الاقتصادية و البيئية.

مبدأ هذا العمل التجريبي هو استبدال رمل الكثبان بقطع البلاستيك جزئيا بنسب مختلفة من 5٪، 10٪، 15٪، 20٪ الى 25٪ ودراسة خصائص هذا المركب المتحصل عليه.

أظهرت نتائج دراسة المركب الامثل من الناحية الميكانيكية (BSPET3) انه يحسن خصائص معينة مثل اللدونة، الخفة، الانكماش الهيدروليكي والناقلية الحرارية ويمكن ان تصنف على انها خرسانة خفيفة الوزن مع قوة عازلة. **كلمات مفتاحية:** خرسانة الرمل، تدوير، قطع بلاستيك، رمل الكثبان، إضافة.

Abstract:

This study aims to exploit local resources such as dunes sand that are in abundance in the southern Algeria, and the valorization of shredded bottles of polyethylene terephthalate (PET) as aggregates to produce a high performance composite material that meets the economic and environmental requirements.

The principle of experimental work is to substitute the PET aggregates partially in dune sand with different percentages of 5%, 10%, 15%, 20% and 25% and study the properties of the obtained sand concrete (BSPET). The study of the optimum BSPET3 composite results showed that PET substitution improves certain properties such as workability, density, hydraulic shrinkage, thermal conductivity, and can be classified as lightweight construction concrete with insulation capacity.

Key words: Sand concrete, PET, valorization, sand dune, substitution.

Résumé : Cette étude vise exploitation des ressources locales tels que les sables de dunes en abondance dans les régions du sud Algérien et la valorisation des déchets de bouteilles plastique de polytéréphtalate d'éthylène (PET) déchiquetés comme agrégat pour la production d'un matériau de construction performant qui répond aux exigences économiques et environnementales. Le principe du travail expérimental est de substituer des pourcentages de granulats PET dans le sable de dunes (5%, 10%, 15%, 20% et 25%) et d'étudier les propriétés du béton de sable obtenu. Les résultats d'étude du composite optimum BSPET3 a montré que la substitution du PET améliore certaines propriétés telles que la maniabilité, la légèreté, le retrait hydraulique, la conductivité thermique et peut être classé comme un béton léger de construction avec un pouvoir d'isolation.

Mots clés : Béton de sable, PET, valorisation, Sable de dunes, substitution.

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

*Nous tenons à remercier notre encadreur **Mme Zineb Damene**, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter nos réflexions.*

*Nous tenons également à adresser nos vifs remerciements à **Monsieur Mohammed Kamel GUEDDOUDA**, Professeur à l'Université de Laghouat, pour le grand honneur qu'il nous a fait en présidant le jury de soutenance.*

*Nous remercions également **Monsieur Benchaa BEABBED**, Maître de conférences à l'Université de Laghouat, pour avoir accepté d'évaluer ce travail et d'avoir accepté de faire partie de notre jury de thèse.*

*Nous adressons nos sincères remerciements à tous nos enseignants en particulier : **Mr B. KROBBA**, **Mr A. ZIREG** et **Mr T. BOUZIANI** pour leurs conseils enrichissants, leurs appuis et leurs disponibilités.*

*Nos grands remerciements vont également à **Mr Bachir Redouan MOKDAD** et l'ensemble du personnel du laboratoire de Génie civil de Laghouat ainsi qu'à tous les tous **les doctorants** qui nous ont aidé pendant nos travaille expérimental.*

*Nous tenons également à remercier Monsieur **FERHAT Ahmida** pour son appui pendant la réalisation des essais thermiques.*

*Nos grands remerciements vont à l'ensemble du personnel du **laboratoire de Génie mécanique** de Laghouat pour leurs aides et leur disponibilité.*

*A **nos collègues** fidèles et sincères qui nous ait accompagné pendant nos études universitaires.*

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Veillez trouver dans ce travail l'expression de notre respect le plus profond et notre affections la plus sincère.

Au nom de dieu le tout clément le tout miséricordieux

Dédicace

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leurs amours inconditionnels, leurs tendresses,
leurs soutiens et leurs prières tout au long de mes études,

Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie.

A ma source de bonheur, mon neveu Mustapha,

A mes chers frères, Ibrahim, Bachir et Benaïssa pour leurs appuis et leurs encouragements,

A mes chères sœurs Fatima Zohra, Mamy et Mariem pour leurs encouragements permanents,
et leurs soutiens moraux,

A mes chères amies, Bouchra, Fatima, Tourkia, Zineb, Soumia et Soumia et ceux que j'ai
oublié de citer, merci d'être toujours là pour moi.

A mon binôme Yasmine et toute sa famille.

A toute la famille CHERIFI, BENCHOUCHA et AMEUR pour leurs soutiens tout au long de
mon parcours d'études,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien
infaillible.

Ryma

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À dieu, pour m'avoir donné la force dans les moments difficiles pour éditer
ce mémoire

à l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de
joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que
dieu le garde « mon père ».

à la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de
mon cœur, ma vie et mon bonheur ; « maman que j'adore ».

A ma moitié que j'aime beaucoup et qui m'a soutenue tout au long
de ma vie : ma sœur jumelle ASMA

et bien sur a mon frère **Mustapha Yacine** et ma sœur **Amani** , sans
oublié mes grands-mères et mes tantes **BOUAMEUR** (soumia , hadja ,
naziha et zakia , aicha et fatima zohra) et leurs enfants.

A ma chère tante **SLIMANI zohra** et ma 3^{ème} sœurs **Mahi Radja et**
Taifouri Hassna

A Mes chères cousins **Mohamed Tiriri , omar el farouk Mahi** , que dieux
vous garde

A mes amis (fatima , lina , bouchra ,ahmed, ...)

A mon binôme RYMA hibat Errahman et toute la famille CHERIFI

A Mon professeur encadreur madame **Zineb Damene** pour son aide et sa
précieuse attention.

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à
mes côtés, et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études
supérieures

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit
de votre soutien infailible, Merci d'être toujours là pour moi.

Fasmine

Table de matières

Résumé

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des photos

Liste des symboles et notations

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I.1/Généralités sur les bétons de sable	3
I.1.1/ Définition du béton de sable	3
I.1.2/ Propriétés du béton de sable.....	3
I.1.2.1/Granulométrie et maniabilité	3
I.1.2.2/Comportement mécanique du béton de sable	4
I.1.2.3/ Compacité	6
I.2.2.4/Retrait	6
I.2.2.5/Fluage	7
I.2.2.6/Durabilité des bétons de sable.....	8
I.2.2.7/Résistance au gel et au dégel.....	9
I.1.3/Domaine d'application du béton de sable	9
I.2/ Introduction des déchets dans la composition des matériaux de construction	10
I.2.1/ Types de valorisation des déchets en génie civil	10
I.2.1.1/ Valorisation des Pneus usés	11
I.2.1.2/ Valorisation des déchets de la construction/démolition.....	12
➤ Valorisation des déchets de briques	12
➤ Valorisation des Sous-produits provenant des centrales thermiques	12
I.2.1.3/ Valorisation des déchets plastiques.....	13
I.3/Propriétés des bétons avec déchets plastique.....	20
I.3.1/ La maniabilité	20
I.3.2/ /La densité	21

I.3.3/ La résistance à la compression	22
I.3.4/La résistance à la traction par flexion	24
I.3.5/La conductivité thermique	25
I.3.6/L'absorption capillaire	26
I.3.7/L'attaque sulfatique	27
I.3.8/Retrait.....	28
I.4/Synthèse du chapitre	29

Chapitre II : Matière première et techniques expérimentales

II.1/ Introduction.....	30
II.2/ Caractérisation des matières premières	30
II.2.1/ Sable de dune	30
II.2.1.1/Analyse granulométrique.....	30
II.2.1.2/ Module de finesse	31
II.2.1.3/ Analyse minéralogique	31
II.2.1.4/ Equivalent de sable	33
II.2.1.5/ Analyse chimique	33
II.2.1.6/Caractéristique physique du sable de dune	34
II.2.2/ Ciment	34
II.2.2.1/ Consistance et la prise du ciment (EN 196-3).....	35
II.2.2.3/ Mesure de la finesse (EN 196-6).....	36
II.2.3/ Eau de gâchage	38
II.2.4/ PET	38
II.2.4.1/ l'analyse granulométrique du polyéthylène téréphtalate (PET)	39
II.2.4.2/Détermination de la masse volumique apparentes et la masse volumique absolus (NF P 18-555).....	40
II.3/ Essais expérimentaux effectués	41
II.3.1/ Essai d'écoulement (Essai au maniabilimètre B)	41
II.3.2. Essais de flexion et compression (EN 196-1).....	42
II.3.3. Masse volumique apparente	44
II.2.4. Retrait norme (NFP 15-433)	45
II.2.4/ Absorption capillaire.....	46
II.2.5. / Caractéristiques thermiques	47

II.2.5.1/ Méthode du fil chaud	48
II.2.6. La résistance au feu	51
II.2.7. La résistance au sulfate de magnésium ($Mg SO_4$)	52

Chapitre III : Discussion des résultats expérimentaux

III.1/ Introduction	54
III.2/Formulation du béton BSPET	54
III.2.1/Composition choisie	54
III.2.2/Mode de préparation des échantillons	55
III.2.3/ Etude du béton de sable BSPET à l'état frais	56
III.2.4/Masse volumique apparente sèche	59
III.2.5/ Etude de la résistance à la compression des bétons BSPET.....	60
III.3/Etude du béton BSPET3	62
III.3.1/ Résistance à la compression du BSPET3	62
III.3.2/ Résistance à la traction du BSPET3	63
III.3.4/ Mesure du Retrait	64
III.3.5/ Mesure de la sorptivité (l'absorption capillaire)	66
III.3.6/ Mesure de la porosité introduite	67
III.3.7/ Mesure de la conductivité thermique	69
III.3.8/ Résistance aux agressions chimique des sulfates	70
III.3.9/ Résistance au feu	74
III.4/ Synthèse du chapitre.....	78
 Conclusion générale et recommandations	79
 Références bibliographiques.....	81
 Annexes.....	85

Liste des tableaux

CHAPITRE I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau I. 1:certaine propriété des matières plastiques.....	18
Tableau I. 2: Propriétés mécaniques et thermiques des PET.	19

CHAPITRE II. CARACTERISATION DES MATIERES PREMIERES ET TECHNIQ EXPERIMENTALES

Tableau II. 1. Analyse chimique du sable de dune.....	34
Tableau II. 2 : Caractéristiques physiques du sable de dune.....	34
Tableau II. 3: Caractéristiques physiques du ciment utilisé.....	37
Tableau II. 4: Composition chimique du ciment utilisé.	37
Tableau II. 5: Composition minéralogique du ciment utilisé.....	38
Tableau II. 6: Caractéristiques physiques du PET	41

CHAPITRE III. MATERIAUX ET REULTATS EXPERIMENTAUX

Tableau III. 1: Optimisation des différentes compositions par l'essai au maniabilimètre B. ..	56
Tableau III. 2: Moyennes des masses volumiques apparentes sèches en fonction du pourcentage du PET utilisé.....	59
Tableau III. 3:Valeurs de la conductivité thermique.....	70
Tableau III. 4:Récapitulative des différents résultats.....	77

Liste des tableaux

Liste des figures

Chapitre I : synthese bibliographique

Figure I. 1. Maniabilité en fonction du module de finesse du sable.	4
Figure I. 2.Effets de la granularité sur la résistance du béton.	5
Figure I. 3.Influence du diamètre maximal des granulats sur la résistance en Compression du béton à 28 jours.	5
Figure I. 4.Evolution de la porosité en fonction du module	6
Figure I. 5.Retrait d’auto-dessiccation.	7
Figure I. 6.Retrait total.	7
Figure I. 7. Evolution du fluage dans le béton de sable.	8
Figure I. 8. La relation entre la maniabilité et le taux de déchets plastique incorporés.	20
Figure I. 9.Densité à sec par rapport au volume de sable remplacé par les PET.	21
Figure I. 10.Densité du mortier à base de déchets plastiques.....	22
Figure I. 11. La résistance à la compression en fonction du volume de sable remplacé par le PET.	22
Figure I. 12:Resistance a la traction en fonction du pourcentage des agrégats plastique.	24
Figure I. 13. La Conductivité thermique en fonction du volume de sable remplacé par PET.	24
Figure I. 14. Variation de la conductivité thermique en fonction du pourcentage volumique d'agrégats de PET substitués..	25
Figure I. 16.Absorption d'eau d’un mortier contenant PET	26

Chapitre II : Matière première et techniques expérimentales

Figure II. 1:Courbe granulométrique du sable de dune.	31
Figure II. 2:Diffraction aux rayons X du sable de dune(Damne et al, 2016).	32
Figure II. 3: Image au MEB du sable de dune (G=20x) (Bederina et al, 2005).....	32
Figure II. 4:Détermination de l'équivalent de sable.	33
Figure II. 5:Diffraction aux rayons X du ciment.	38
Figure II. 6:La courbe granulométrique du PET.	40
Figure II. 7:Dispositif de Maniabilimètre B.	42
Figure II. 8: Dispositif de flexion à trois points	44
Figure II. 9:Dispositif de compression.	45
Figure II. 10:Appareillage pour la mesure du retrait.	46
Figure II. 11:Schéma de l’essai de capillarité	47
Figure II. 12 :Schéma du montage de la méthode du fil chaud (Yves Jannot, 2008).	49
Figure II. 13:Schéma du montage expérimental (Goual MS, 2001).	50

Chapitre III : Discussion des résultats expérimentaux

Figure III. 1 : Variation du temps d'écoulement en fonction du rapport E/C des différentes pourcentages du PET.	57
Figure III. 2: Variation du rapport E/C des en fonction des différents pourcentages du PET.	58
Figure III. 3: Évolution de la masse volumique sèche en fonction du pourcentage du PET.	60
Figure III. 4: Evolution de la résistance à la compression à 14j en fonction des pourcentages de PET.	61
Figure III. 5: Développement de la résistance à la compression du BSPET3 en fonction de l'âge.	62
Figure III. 6: Développement de la résistance à la traction du BSPET3 en fonction de l'âge.	64
Figure III. 7: Evolution du retrait en fonction de l'âge.	65
Figure III. 8: Évolution de la masse d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps et sportivité S_w du BSPET et BSD.	67
Figure III. 9: L'évolution de la porosité introduite en fonction du pourcentage de PET substitué (Damene.,2017).	68
Figure III. 10: Thermogramme d'un échantillon BSPET3.	69
Figure III. 11: Evolution de la masse des échantillons en fonction du cycle d'immersion.	71
Figure III. 12: évolution de la perte en masse des bétons BSDA et BSPET.	73
Figure III. 13: Evolution de la résistance a la compression avant et après 6 cycles d'immersions.	73
Figure III. 14: La perte en masse en fonction des températures.	75
Figure III. 15: Résistance à la compression en fonction de la température.	76

Liste des photos

CHAPITRE I. REVUE SUR LA DOCUMENTATION

TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Photo I. 1. Images SEM montrant le contact entre PET et la matrice et le contact entre grain de sable et la matrice.	23
---	----

CHAPITRE III. MATERIAUX ET RESULTATS EXPERIMENTAUX

Photo II. 1: Ciment CPJ de LAFARGE.	35
Photo II. 2 : Perméabilimètre de Blaine.	36
Photo II. 3 : le PET utilisé.	39
Photo II. 4 : Les tamis utilisés de l'analyse granulométrique du PET.	40
Photo II. 5 : Maniabilimètre B (180x90x90mm).	42
Photo II. 6 : Presse utilisé pour l'essai de flexion	43
Photo II. 7: Presse utilisé pour l'essai de compression.	44
Photo II. 8: Vue d'une sonde de type fil chaud	48
Photo II. 9: Dispositif expérimental pour la mesure de la conductivité thermique	50
Photo II. 10: Echauffement des éprouvettes dans un four à moufle.	52
Photo II. 11: Immersion des éprouvettes dans la solution de Sulfate de magnésium	53

Chapitre III : Discussion des résultats expérimentaux

Photo III. 1: Malaxeur normalisé pour pâte et mortier.	55
Photo III. 2: Moule normalisé de 4x4x16 cm ²	56
Photo III. 3: Epreuve écrasé par compression.	62
Photo III. 4: Epreuve écrasé par compression avec 15% de PET.	63
Photo III. 5: Epreuve écrasé par traction avec 15% de PET.	64
Photo III. 6: Appareillage du retrait.	65
Photo III. 7: Montage expérimental utilisé dans l'essai d'absorption.	66
Photo III. 8: Images de microscope optique de (0.6mm) montrent l'adhérence matrice-PET.	68
Photo III. 9: Epreuves immergées dans la solution sulfatique (MgSO ₄).	71
Photo III. 10: Formation de dépôts de produits blanchâtre sur la surface d'éprouvette.	72

Liste des photos

Photo III. 11: Dégradation d'éprouvette immergée dans la solution MgSO_4 après 5 cycles...	74
Photo III. 12: Epreuve calcinée à 300°C	77
Photo III. 13: Epreuve calcinée à 400°C	77

Liste Des Abréviations

PET : Polyéthylène Téréphtalate.

BSPET : Béton de Sable avec PET

BS : Béton de Sable.

DP : Début de Prise

FP : Fin de Pris

HR : L'Humidité Relative.

SD : Sable de Dune.

ES_p : Equivalent de Sable au piston.

ES_v : Equivalent de Sable visuel.

E_b : Module d'élasticité du bétons.

ρ_b : Masse volumique apparente du béton en kg/m³.

R_t : Résistance à la traction (MPa).

F_t : Charge à la rupture (N).

R_c : Résistance à la compression (MPa).

M_f : Module de finesse.

A_{ab} : Surface absorbante de l'échantillon (4x4 =16 cm²).

ρ_w : Masse volumique de l'eau liquide (1 g/cm³).

ρ_{app} : Masse volumique apparente (kg/m³).

ρ_{abs} : Masse volumique absolue (kg/m³).

ρ₁, ρ₀ : Masse volumique du solide et du fluide en (g/cm³).

φ₀ : Puissance dissipée dans la résistance chauffante (w).

M : Masse du matériau.

V : Vitesse de décantation de la particule en (cm/s.).

η : Viscosité.

D : Diamètre de la particule.

G : Accélération de la pesanteur.

S : Surface spécifique (cm²/g).

K : Constante de l'appareil Blaine.

E : Porosité de la couche tassée.

t : Temps mesuré en secondes.

ρ : Masse spécifique du ciment (g/cm³)

C : Compacité.

P : Porosité.

S : Sable.

T : Température (°C).

S : Second.

λ : La conductivité thermique (W/m. k).

a : La diffusivité (m²/s).

MgSO₄ : Sulfate de magnésium.

BSAD : Béton de sable dunaire alluvionnaire.

Les Normes Utilisé

EN933-1 et EN 933-2 : Essai de caractérisation des matériaux - L'analyse granulométrique.

EN 196-1 : Déterminer la contrainte de flexion et compression d'un mortier.

EN 196-1 : Déterminer la contrainte de traction d'un mortier.

EN 196-3 : Détermination de la Consistance et la prise du ciment.

EN 196-6 : Mesure de la finesse du ciment.

EN 933-8 : Essai de L'équivalent de sable.

NF P 18-360 : Détermination du module de finesse de sable.

NF P 15-433 : Mesure de Retrait.

NF P 18.452 : Déterminer l'homogénéité du béton.

NF P 18-555 : Détermination de la masse volumique apparentes et la masse volumique absolus.

ISO 834-1 : Essai de la résistance au feu .

Introduction générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le plastique est l'une des innovations les plus importantes du 20^{ème} siècle, c'est un matériau omniprésent. En raison de ses caractéristiques avantageuses qui font qu'une croissance, remarquable de la consommation de plastique est observée partout dans le monde ces dernières années, ce qui augmente également la production de ses déchets.

Les déchets en matières plastiques, qui représentent une part importante des déchets solides municipaux, et qui posent un sérieux problème à cause de leur durée de vie élevée et parce que ce sont des déchets voyants **(GOUASMI, 2013)**.

Les premiers procédés mis en place pour traiter les déchets plastiques furent l'enfouissement et l'incinération. Toutefois, la croissance exponentielle de déchets plastiques amène à prévoir d'autres filières de recyclage. La réutilisation de ces déchets dans la construction pourra résoudre un double problème : d'une part les problèmes environnementaux et d'autre part les problèmes économiques et techniques rencontrés dans le domaine de la construction. En effet, certains déchets plastiques possèdent des qualités très importantes et leur introduction dans certains matériaux cimentaires de construction améliorent certainement leurs propriétés mécaniques ou thermiques. Un de ces produits c'est le polyéthylène téréphtalate **(GUENDOUIZ .M, 2017)**.

Au cours des dernières décennies, le polyéthylène téréphtalate (PET) est produit en grandes quantités dans les pays industrialisés et comme les déchets de PET ne sont pas biodégradables, ils peuvent rester dans la nature pendant des centaines d'années et causer trop de problèmes écologiques. Plusieurs travaux de recherche ont été menés récemment par un grand nombre d'auteurs dans le domaine de la science des matériaux appliquée aux industries du bâtiment **(Benosman et al., 2017)**.

En d'autre part, la valorisation des matériaux locaux, peu ou pas exploités, dans la construction est devenue actuellement une solution nécessaire aux problèmes économiques des pays, notamment des pays en voie de développement ; Parmi ces matériaux, l'Algérie possède un gisement très important de sable de dune qui couvre plus de 60% de la surface du pays, l'idée de promouvoir et d'introduire ce sable dans la confection des bétons et des mortiers s'avère très intéressante, non seulement d'un point de vue économique, mais également environnemental. Nombreux travaux de recherche ont été effectués sur l'utilisation du sable de dune dans le domaine de la construction en Algérie.

Ce travail vise à étudier la possibilité d'utiliser des déchets des bouteilles plastiques (PET-polyéthylène téréphtalate) dans le béton de sable dunaire sans aucune transformation sauf le broyage des bouteilles, afin de minimiser le coût du matériau final. L'influence de la proportion de ces déchets utilisés sur les propriétés physique et mécanique du nouveau matériau a été étudiée et analysée.

Sur ce, le travail expérimental est subdivisé en deux volets :

Le premier consiste en la recherche d'une composition optimale vis-à-vis de la résistance de la substitution partielle du sable par les agrégats du PET en passant par une étude de maniabilité des différents composites confectionnés qui vise la fixation d'un même temps d'écoulement pour tous les mélanges. Plusieurs pourcentages de substitutions ont été choisie pour cette partie d'étude. (5%, 10%, 15%, 20%, et 25%) de la quantité de sable.

Le deuxième consiste à étudier les propriétés physico-mécanique, thermique ainsi que la durabilité de la composition optimale choisie.

Quant à l'organisation du mémoire il est subdivisé en trois grands chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à des généralités sur le béton de sable, généralités sur les agrégats du PET suivie d'une revue sur la documentation de l'effet de l'ajouts de ce type d'agrégats sur les propriétés du béton de sable.
- Le deuxième chapitre constitue une description des techniques expérimentales utilisées et la caractérisation des matières premières.
- Le troisième chapitre est consacré à l'analyse et discussion des résultats expérimentaux relatifs au comportement physico-mécanique, thermique et chimique du béton de sable à base de PET, ciment en plus du sable de dune.

Enfin, et sur la base des résultats obtenus, le travail s'achèvera par une conclusion générale et des perspectives pour les recherches à venir.

CHAPITRE I

Synthèse bibliographique

Synthèse bibliographique

Ce chapitre est consacré aux différentes connaissances générales concernant les définitions et propriétés des matériaux qui font l'objet de cette recherche. Nous présentons tous les éléments bibliographiques recueillis des travaux de chercheurs qui sont utiles dans l'analyse du comportement des matériaux à élaborer dans cette recherche.

I.1/Généralités sur les bétons de sable

I.1.1/Définition du béton de sable

Le béton de sable est un matériau confectionné à partir de sable, de ciment, d'eau et de fillers naturels ou industriels où le gros granulat représente le sable ($D_{max} = 5 \text{ mm}$). Le béton classique consomme que 250 à 400 Kg/m³ de ciment, alors que le mortier utilise un fort dosage en ciment allant de 400 à 600 Kg/m³(**Sablocrete, 1994**).

- Il se distingue des mortiers par son dosage en liant moindre, sa résistance plus élevée et sa destination (essentiellement destiné aux usages traditionnels du béton) ;
- On distingue dans le béton de sable l'absence ou le faible dosage en gros granulats (une rigidification par des gravillons tels que le rapport G/S soit inférieur à l'unité peut être nécessaire), et l'incorporation d'ajouts ;
- Il ressemble au béton ordinaire par son dosage en liant et sa résistance similaire et parce qu'il peut être utilisé pour la réalisation des éléments de résistance pour bâtiments et chaussées(**Sablocrete, 1994**).

I.1.2/Propriétés du béton de sable

I.1.2.1/Granulométrie et maniabilité

La maniabilité est une propriété physique spécifique du béton sans tenir compte des conditions particulières d'utilisation pour un type donné d'application. Elle est définie comme

étant la propriété d'un mortier ou d'un béton fraîchement malaxé qui définit la facilité et l'homogénéité à être malaxé, mis en place, serré et fini (**Casanova P, 1996**).

Le béton de sable nécessite plus d'eau de gâchage que les bétons traditionnels, ceci se traduit par des valeurs E/C (eau/ciment) systématiquement supérieures à 0,5, ce rapport se situe entre 0,6 et 0,7. Cette particularité est due à une surface spécifique plus importante du mélange, d'ailleurs, si l'on considère non plus le rapport E/C, mais le rapport E/C+A (A=addition en fines activées), on obtient des valeurs similaires aux bétons traditionnels. La granulométrie du sable jouera également sur le besoin en eau, plus le sable est riche en éléments grossiers, plus la maniabilité s'améliore. Ceci se traduit par une relation entre module de finesse et maniabilité. (**Rezig Salima, 2012**).

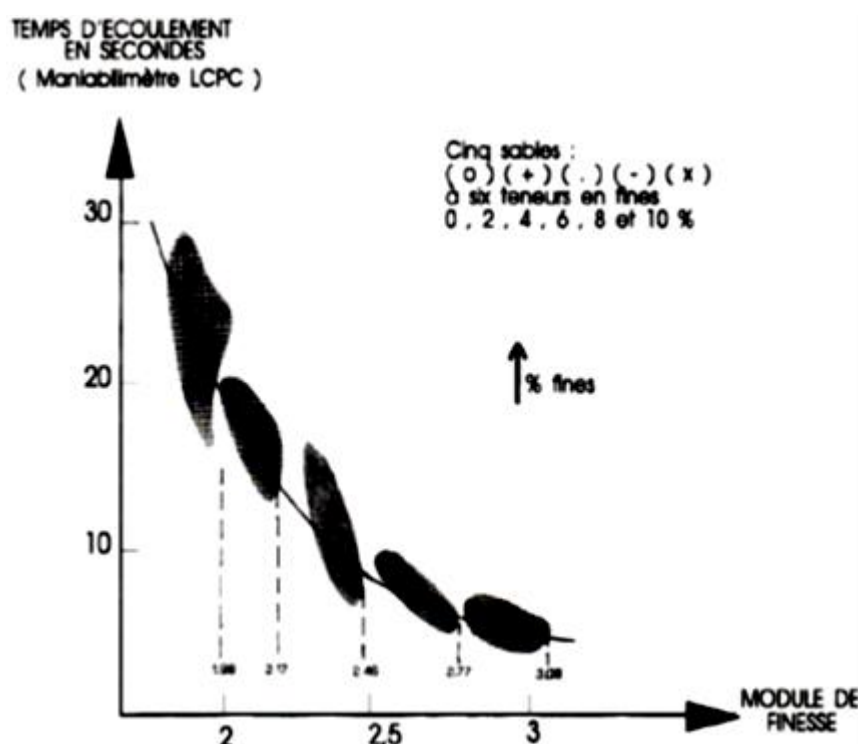


Figure I. 1. Maniabilité en fonction du module de finesse du sable (**Sablocrete, 1994**).

1.1.2.2/Comportement mécanique du béton de sable

Les performances mécaniques ne sont pas les seuls critères de jugement de la qualité d'un béton, même si la classification des bétons selon des performances mécaniques reste un repère dans l'esprit des utilisateurs. Aussi, même s'il est vrai que les résistances des bétons de sable sont en général inférieures à celles des bétons classiques d'une part, et que la cinétique de montée en résistance est plus lente ce qui peut en limiter l'usage pour des ouvrages mis en charge précocement, d'autre part, il est aisé d'obtenir des bétons de sable à hautes performances

mécaniques, même à court terme. La résistance dépend de la dimension du D_{max} des granulats voir **Figure I.2 et I.3.**(Sablocrete, 1994), (Bentata Aissa, 2004).

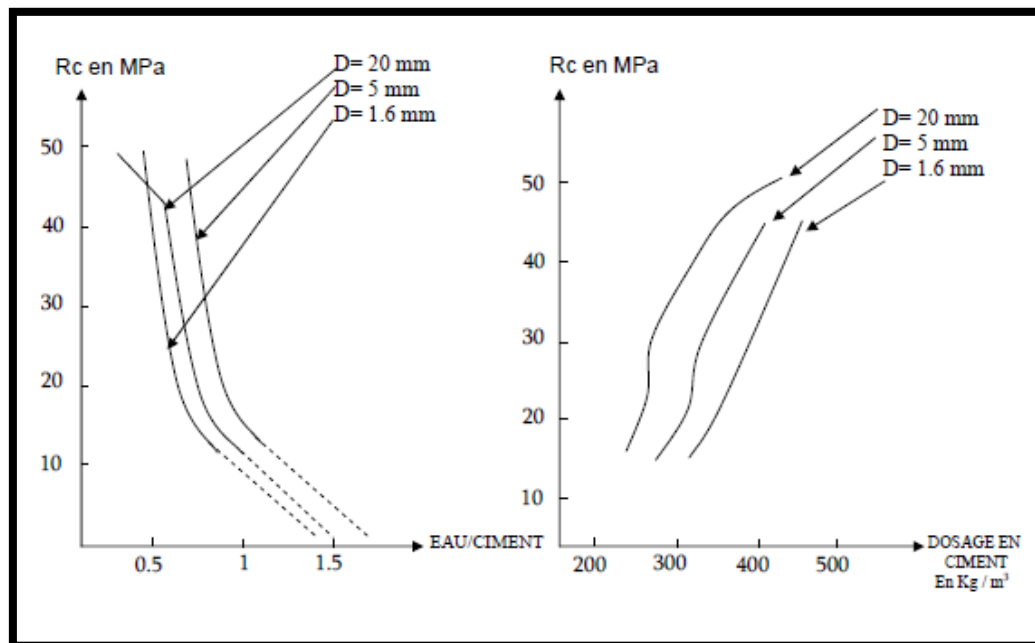


Figure I. 2.Effets de la granularité sur la résistance du béton.(Bentata Aissa, 2004).

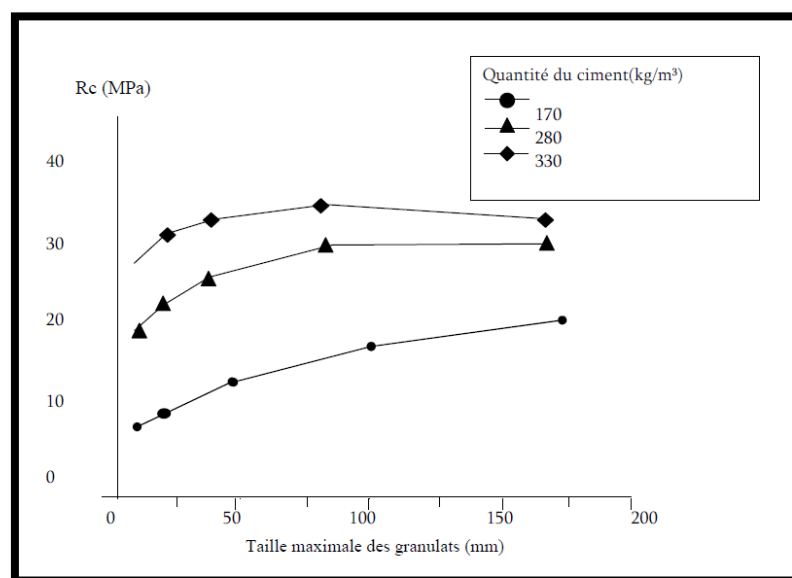


Figure I. 3.Influence du diamètre maximal des granulats sur la résistance en Compression du béton à 28 jours(Sablocrete, 1994).

Ces courbes montrent que la résistance en compression du béton dépend de la taille maximale des granulats, alors que l'augmentation de ce dernier augmente la résistance et vice versa.

I.1.2.3/ Compacité

La compacité d'un béton est définie comme le volume occupé par les éléments solides rapportés au volume total. Elle est bien sûr complémentaire à la porosité **(Dreux et Festa, 1998)**. Les bétons de sable possèdent le diamètre de granulats ($D < 5\text{mm}$), de ce fait, il est évident que le mélange sable- ciment présentera une porosité très élevée en comparaison avec celle d'un béton ordinaire. Cette porosité est due à une augmentation de la surface spécifique, en effet, plus le module de finesse augmente plus la porosité diminue **(Figure.I.4).(Chanvilard et Basyaux, 1996)**.

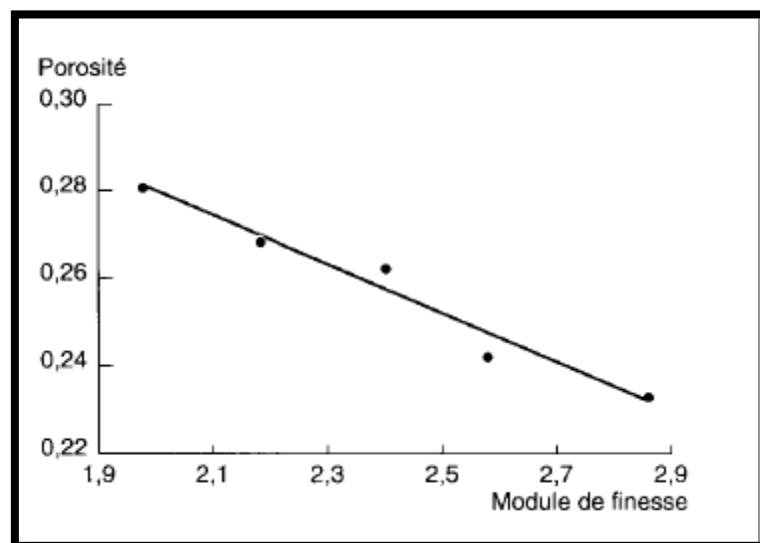


Figure I. 4.Evolution de la porosité en fonction du module **(Chanvilard and Basyaux, 1996)** .

I.2.2.4/Retrait

Le retrait est un phénomène simple qui, correspond à une contraction volumétrique que l'on observe quand le béton se dessèche. Il se développe dans les trois dimensions mais, en général, on ne l'exprime que sous la forme d'une déformation linéaire **(PC Aitcin, A Neville, P Acker, 1998)**.

Le retrait d'auto-dessiccation du béton de sable est caractérisé par une cinétique semblable à celle du béton classique **(figure I.5)**. Une différence de l'ordre de 10% existe par rapport à ce dernier **(figure I.6)**. Cette différence, couramment observée à l'intérieur même de la gamme des bétons, est due à une perte en masse plus rapide pour le béton de sable **(Rezig Salima, 2012)**.

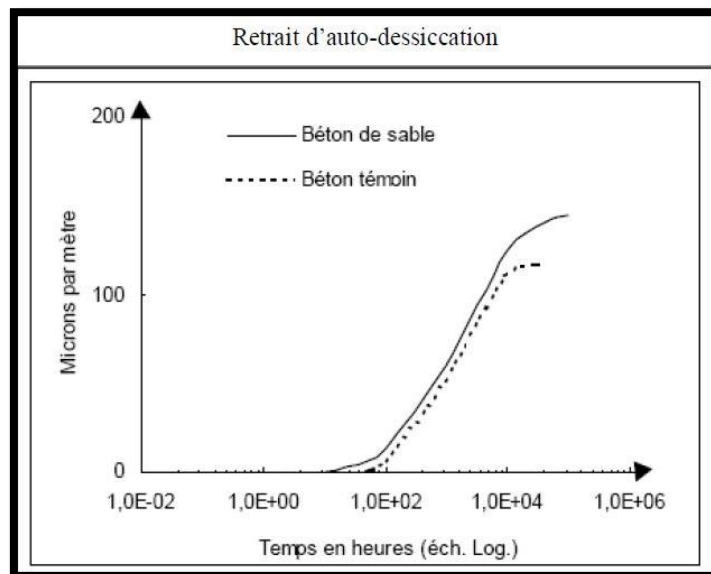


Figure I. 5.Retrait d'auto-dessiccation(Sablocrete, 1994).

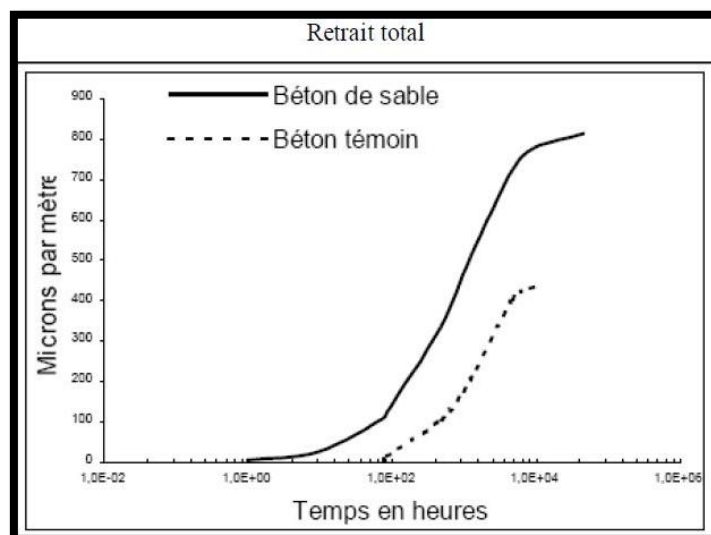


Figure I. 6.Retrait total (Sablocrete, 1994).

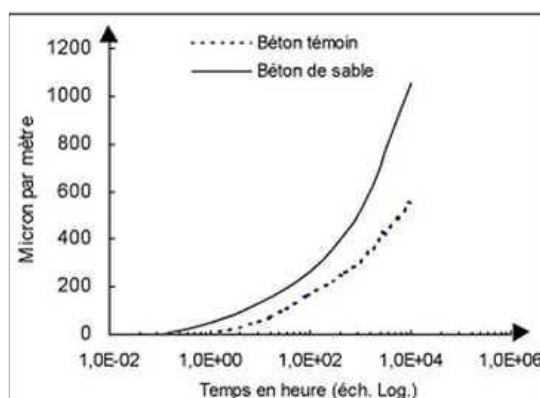
I.2.2.5/Fluage

Le fluage est un phénomène de déformation différée sous une charge fixe indéfiniment appliquée. Le phénomène peut être constaté avec la même intensité, en traction, en compression, en torsion...etc., il est étroitement lié à la structure du matériau que confirment par ailleurs les valeurs du module d'élasticité (Rezig Salima, 2012).

La cinétique de fluage propre n'est pas très différente des bétons ordinaires aux bétons de sable (Figure I.7) , alors que le fluage de dessiccation du béton de sable a une cinétique extrêmement rapide, deux fois plus importantes(Saiti Issam, 2014).

Les valeurs du fluage du béton de sable sont deux fois plus importantes que celles du béton ordinaire. Notons que ces résultats correspondent à un niveau de résistance en compression de 25 MPa. Un béton de sable plus résistant n'aura pas le même comportement et son fluage deviendra plus faible (Sahraoui and Nebih, 2015).

Fluage d'auto-dessiccation



Fluage total

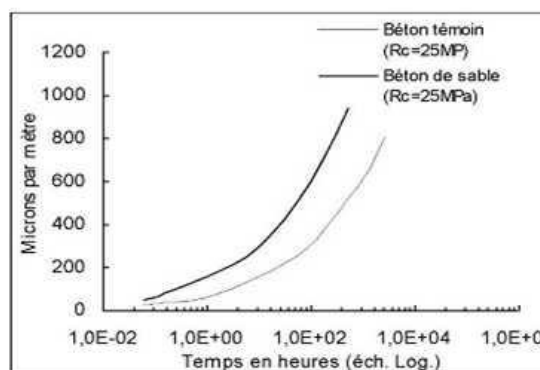


Figure I. 7. Evolution du fluage dans le béton de sable (Sablocrete, 1994).

1.2.2.6/Durabilité des bétons de sable

Conventionnellement, la durabilité d'un béton est liée à ses capacités d'échange avec le milieu extérieur. De ce fait, il est évident que les paramètres tels que la porosité, l'organisation géométrique des pores et la perméabilité sont des paramètres physiques du premier ordre de la durabilité. De même, les phénomènes internes tels que l'alcalisation ou l'attaque sulfatique différée sont aussi des processus d'altération du béton accélérés par les échanges hydrauliques avec le milieu extérieur (Rezig Salima, 2012).

Le béton de sable se distingue des bétons classiques par un fort dosage en sable ; de ce fait il contient généralement plus de pores de faible taille, donc un taux de vide élevé par rapport aux bétons classiques **(Belferrag Allaoua, 2006)**

La perméabilité varie en fonction de la taille des pores et de leurs continuités ; de ce fait un matériau ayant un taux de pores élevés, de tailles grandes et continues présente une perméabilité forte, ce qui conduit à une durabilité faible. En suivant cette hypothèse un béton de sable aura une perméabilité moins élevée d'où une durabilité plus forte **(Belferrag Allaoua, 2006)**.

1.2.2.7/Résistance au gel et au dégel

De même, la tenue au gel des bétons de sable formulés correctement est excellente. En effet, par comparaison à une étude menée sur un large éventail de formulations de bétons traditionnels, les bétons de sable à formulation et performance équivalentes résistent mieux au gel que les bétons traditionnels correspondants. Certains bétons de sable, même sans ajout d'entraîneur d'air, présentent une résistance au gel équivalent aux bétons classiques les plus performants de ce point de vue. Cette bonne tenue aux cycles gel- dégel, quand elle ne résulte pas d'une formulation visant, soit une très faible porosité, soit une porosité bien répartie par l'emploi d'entraîneur d'air, s'explique par la microstructure particulière des bétons de sable, qui est en général, caractérisée par une bonne répartition de micropores **(Sablocrete, 1994)**.

1.1.3/Domaine d'application du béton de sable

Les Bétons de Sable sont employés à grand échelle dans plusieurs domaines telle que le domaine de préfabrication : bordures et toitures, tuyaux, mobilier urbain, voûtes en voiles minces, caissons de plafond, cloisons et autres éléments constructifs d'immeubles, etc. Aussi dans le bâtiment, ou le béton de sable consiste à remplacer le béton ordinaire dans des structures en béton armé coulé et vibré, ou hyper compacté : (éléments horizontaux et verticaux, dalles, fondations ...etc.). On trouve également des réalisations en béton de sable dans le domaine des chaussées routières et aéroportuaires ainsi que dans des travaux de calage, de bourrage ou d'injection, sans oublier le plus important, son utilisation dans le domaine des réparations.

I.2/ Introduction des déchets dans la composition des matériaux de construction

Les déchets sont de bonnes sources de matières premières. Leurs récupérations et leurs recyclages peuvent aider à réduire l'utilisation de matériaux vierges pour la production de nouveaux produits(US EPA, 2015).

Les recherches actuelles en génie civil visent l'utilisation des déchets pour la production d'un éco-matériau répondant aux exigences économique et environnemental d'un développement durable.

Différents types des déchets tels que les déchets industriels peuvent remplacer sans inconvénient le sable dans un béton. Par exemple :

- ❖ Le laitier d'acier qui est utilisé uniquement comme matériau de remblai pour les routes.
- ❖ Les Sous-produits provenant des centrales thermiques et les Mâchefer utilisés principalement pour la fabrication de blocs de béton
- ❖ Les scories de charbons utilisés comme granulats légers pour la fabrication de blocs de béton léger telle que les Cendres volantes.
- ❖ L'exploitation des mines et des carrières produit de grandes quantités de déchets qu'ils pourraient cependant être utilisés pour la fabrication de briques, de blocs de béton autoclave ou à granulats légers. Aussi l'incorporation de granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usés dans un mortier confère au composite obtenu une plus grande capacité de déformation.
- ❖ Les déchets plastiques tels que le polyéthylène téréphtalate (PET), le polychlorure de vinyle (PVC), le polyéthylène haute densité (HDPE), les plastiques thermodurcissables, les déchets plastiques déchiquetés et recyclés, la mousse de polystyrène expansée (EPS), le plastique renforcé de fibre de verre (PRV), le polycarbonate, la mousse de polyuréthane, sont aussi utilisés comme agrégat, poudre ou comme fibre dans la préparation du béton.

I.2.1/ Types de valorisation des déchets en génie civil

Le recyclage des déchets touche deux impacts très importants à savoir l'impact environnemental et l'impact économique. Différents déchets sont utilisés dans le domaine de la construction et spécialement dans le ciment ou béton comme poudre, fibres ou agrégats. (Benimam et al, 2014) Certains procédés de valorisation ou de recyclage sont simples et bon

marché mais, à l'inverse, d'autres sont complexes, coûteux et peu rentables. le recyclage est une activité importante de l'économie et des conditions de vie des pays développés (**Saadani Sabrina, 2008**).

I.2.1.1/ Valorisation des Pneus usés

Cependant les pneus usés peuvent suivre différentes filières de valorisation :

- **Le réemploi** : Rechapage, revente d'occasion, réutilisation en ensilage par les agriculteurs.
- **La valorisation énergétique** : Le caoutchouc à un pouvoir calorifique élevé. Les déchets de pneus peuvent donc servir de combustible de qualité dans les cimenteries et chaudières industrielles.
- **La valorisation en matière** : Broyage en poudrette pour une utilisation en revêtement de sol.

L'incorporation de granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés dans un mortier confère au composite obtenu une plus grande capacité de déformation avant localisation de la microfissure. Le composite incorporant des granulats en caoutchouc est donc d'un intérêt évident dans toutes les applications où la lutte contre la fissuration due aux déformations est une priorité.

En Algérie le secteur d'activité œuvre en effet à renforcer ses actions en matière de valorisation des déchets et sous-produits industriels notamment les pneus usagés dans les travaux routiers et de génie civil. Cette démarche consiste évidemment à développer et appuyer l'utilisation de ce déchet industriel dans les divers travaux de Génie civil.

La valorisation de ce déchet industriel est à ses premiers balbutiements. Un premier chantier expérimental a été initié par le département ministériel, concernant l'utilisation des pneus réformés en tant que soutènement d'un talus de remblai dans un projet routier (contournement de Bou Smail). Les travaux déjà finalisés ont permis de mettre en œuvre 3500 pneus mis à disposition par Michelin Algérie (**Saadani Sabrina, 2008**).

Le broyage de pneus utilisés comme : remblais, confortement de digue et le recyclage sous forme de déchiquetés, granulats dans les applications du type enrobés, etc. Utilisation de granulats en caoutchouc issus de broyage de pneus usagés, en substitution volumique des granulats naturels dans la confection du béton (**Belferrag Allaoua, 2006**).

I.2.1.2/ Valorisation des déchets de la construction/démolition

La démolition des ouvrages en béton et l'industrie des matériaux de construction sont toujours accompagnées par des produits secondaires ou des déchets ; le stockage de tels déchets solides dans des dépôts favorise la pollution de l'environnement et puisque les réserves en granulats alluvionnaires vont s'épuiser, il est donc nécessaire de trouver un moyen pour valoriser ces produits et les réutiliser de nouveau comme granulats dans les bétons et les mortiers. Le béton recyclé est simplement du vieux béton broyé pour produire des granulats. Il peut être utilisé dans les couches de fondation comme dans du béton maigre et comme seule source de granulats ou remplacement partiel des granulats dans du béton neuf. Le béton fabriqué avec des granulats provenant du recyclage, présente généralement de bonnes qualités de maniabilité, de durabilité et de résistance à l'action du gel-dégel.

➤ *Valorisation des déchets de briques*

Il y a eu plusieurs recherches dans les possibilités d'utiliser la brique concassée comme granulats en béton. Les travaux, qui ont été réalisés en utilisant les types de brique qui sont utilisés communément dans la construction. Aujourd'hui, se sont concentrés plus sur les propriétés mécaniques du béton du granulat de brique, plutôt que sur les propriétés du granulat de la brique lui-même.

Le mortier fabriqué avec des sables provenant de déchets de briques, présente généralement de bonnes résistances à l'action du gel-dégel, à l'action du séchage et aux eaux usées (Saadani Sabrina, 2008).

➤ *Valorisation des Sous-produits provenant des centrales thermiques*

Comme les Mâchefer, Scories de sole et les Cendres volantes. La combustion du charbon aux fins de la production d'électricité donne plusieurs sous-produits. Dans les centrales électriques anciennes, les résidus de la combustion de la houille sont désignés sous le nom de « mâchefer ». Dans les centrales modernes, on utilise du charbon broyé ou pulvérisé pour la production de vapeur. Les petites particules qui sont transportées par les gaz de combustion sont recueillies par précipitation électrostatique ou par un autre moyen quelconque. Ces particules sont appelées « cendres volantes ». Certaines des particules de cendres forment des scories qui tombent au fond du four. Dans les fourneaux à température élevée, il se produit également des résidus fondus appelés laitier de charbon.

➤ *Valorisation des déchets provenant de l'exploitation de mines et de carrières*

L'exploitation des mines et des carrières produit de grandes quantités de déchets. Les déchets de minerais ne sont pas encore très utilisés étant donné qu'ils proviennent d'endroits très éloignés des régions peuplées. Ils pourraient cependant être utilisés pour la fabrication de briques, et de blocs de béton autoclavé ou à granules légers. Un des problèmes relatifs à l'usage de ces déchets découle de la diversité de leur composition.

I.2.1.3/ Valorisation des déchets plastiques

Les plastiques sont omniprésents dans notre vie. Au-delà de leurs atouts, une fois consommés, ils génèrent des déchets volumineux par rapport à leur poids.

Ces déchets occupent un volume important dans les points de collecte et autres installations de gestion de déchets dont les centres d'enfouissements techniques. Leur dissémination dans la nature est durable et inesthétique car leur biodégradabilité est, dans la plupart des cas, faible. Il y a donc lieu d'encourager leur recyclage.

La valorisation ou le recyclage des déchets plastique est très vaste à cause de la diversité de leurs types et de leur procédé de recyclage. Elles représentent jusqu'à 30% de la masse totale des ordures ménagères. Malheureusement, la multiplicité des types de matières plastiques, l'incompatibilité de certains polymères entre eux et la difficulté de reconnaître et de séparer les différents polymères induisent de nombreux problèmes au niveau, notamment, du tri sélectif, en particulier pour les déchets plastiques de post-consommation.

- On peut valoriser des déchets plastiques :
 - pour la fabrication des matériaux de construction tels que la tuile, la brique et le pavé autobloquant **(Rakotosaona et al, 2014)**.
 - Et pour produire de nouveaux matériaux, tels que les composites de ciment en substituant le PVC, le polystyrène, le polypropylène, ou les PET Sous forme de fibre, de poudre ou d'agréats dans le but d'améliorer certaines propriétés. Cette méthode apparaît comme l'une des meilleures solutions pour l'élimination des déchets plastiques, en raison de son avantage économique et écologique.

I.2.1.3.1/ Définition des PET

Le polyéthylène téréphtalate PET utilisé principalement pour les emballages de boisson, produit à partir de pétrole de la famille des thermoplastiques, il remplace progressivement le verre grâce à sa résistance aux chocs.

Les PET est constitué d'unité polymérisation du monomère téréphtalate d'éthylène avec des unités répétitive $C_{10}H_8O_4$ et ,par conséquent, la formule moléculaire du PET peut être représentée par $(C_{10}H_8O_4)_n$ (Suganthy and Chandrasekar, 2013).

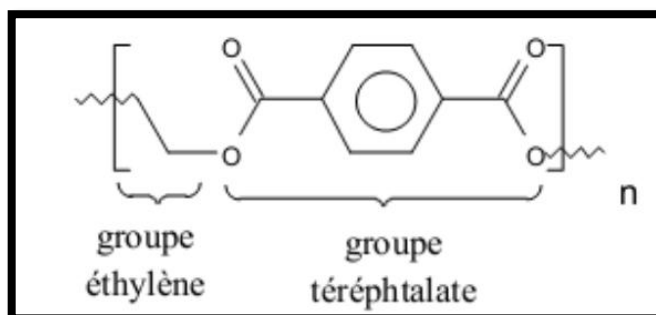


Figure I.1:Microstructure du poly(d'éthylène téréphtalate)(Mercier and Maréchal, 1993)

Le PET, C'est un polymère obtenu par la polycondensation de deux composants : le diméthyltéréphtalate et l'éthylène glycol. Les chaînes vont s'arranger et former des fibres résistantes. Le PET est surtout employé pour la fabrication de fils textiles, de films et de bouteilles.

I.2.1.3.2/ Types des PET**A. Fibre en plastique :**

On les trouve sous des formes et des dimensions diverses. Parmi les fibres les plus utilisées dans le renforcement des matériaux du Génie Civil et les Travaux Publics on peut citer : Les fibres de polypropylène, d'amiantes, de carbone, de verres, les fibres végétales et métalliques (Belferrag Allaoua, 2006).

Ils existent les monofilaments PET qui peuvent être soit signalables, soit non flagellables, droits ou serts, avec différents profils et diamètres, allant de 0,12 mm à 2,00 mm.

B. Les fines particules des PET

On obtient la poudre des bouteilles de PET par l'écrasement de ses dernière.

Les tailles moyennes des particules de PET étaient respectivement de 0,26 et 1,14 cm (respectivement petites et grandes) et ont été estimées sur la base de mesures effectuées sur des micrographies au moyen d'une loupe électronique (Albano et Al, 2009).

C. Agrégats

Le granulat en plastique est produit à partir de flops en plastique. Ce matériau est constitué de prédécesseurs et des grains de PET de taille égale, exempts de niveau microscopique (Nabajyoti Saikiaa B et Britoa J, 2012).

Ils existent :

- Les granulat déchiqueté (une forme angulaire) (photos 2.)
- Aggrégats de PET fins et grossiers (photo 3)
- Agrégat de PET en forme de pastille.

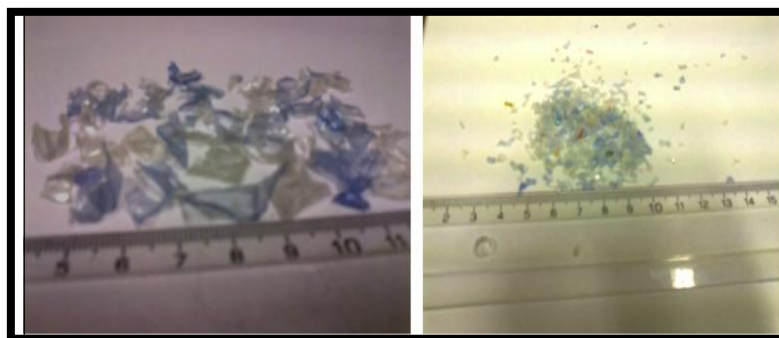


Photo I.1: PET agrégats fins et grossiers(Saikia and Brito, 2012).

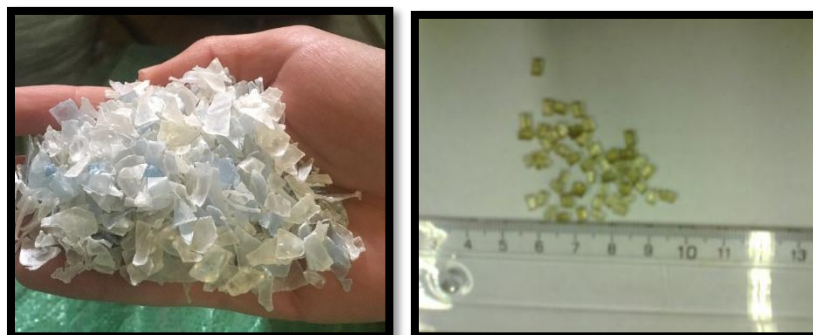


Photo I.2:PET d'une forme angulaire(à gauche) et forme de pastilles(à droite) (Saikia and Brito, 2012).

I.2.1.3.3/ Masse spécifique

La masse spécifique de la plupart des plastiques est bien plus faible que celle des métaux, ce qui est très utile lorsqu'on veut obtenir une diminution de poids car certains plastiques sont, à poids égal, plus résistants que les métaux. Cependant, à volume égal, c'est habituellement le contraire qui se produit. La masse spécifique des polymères et des plastiques se situe normalement entre 0.83 et 2.50 g/cm³. Pour les plastiques alvéolaires elle peut descendre jusqu'à 0.01 g/cm³ et pour les plastiques contenant des charges, elle peut atteindre 3.50 g/cm³.

I.2.1.3.4/ Propriétés thermiques et électriques

En tant que matériaux organiques, les polymères et les plastiques ont, à quelques exceptions près, une stabilité thermique bien plus faible que celle des métaux, surtout au contact de l'oxygène. Lorsqu'ils sont chauffés à des températures de plus en plus élevées, les matériaux thermoplastiques passent lentement de l'état solide plus ou moins rigide à l'état de liquide très visqueux. Même si sous l'effet de la chaleur les matériaux thermodurcissables ne perdent pas leur rigidité de façon appréciable, un chauffage trop intense ou prolongé provoque un durcissement excessif, une contraction, une carbonisation ou une désintégration. Les coefficients de dilatation thermique des plastiques (de 4 à 20 x 10⁻⁵/°C ; de 2 à 11 x 10⁻⁵/°F) sont beaucoup plus élevés que ceux des métaux ordinaires (de 1.0 à 2.5 x 10⁻⁵/°C ; de 0.6 à 1.4 x 10⁻⁵/°F). En général, les polymères et les plastiques dérivés sont de bons isolants électriques, certains excellents même, comme le polytétrafluoréthylène.

I.2.1.3.4/ Résistance au feu

Les plastiques se comportent différemment sous l'action du feu, certains s'enflamment, d'autres brûlent rapidement ou lentement, et d'autres sont autoextinguibles. La nature des polymères et des substances comme les charges, les matériaux de renforcement, les plastifiants ou les adjuvants ignifugeants, déterminent le degré d'inflammabilité. Les polymères halogénés, tel que le PVC ou le PVC chloruré, sont naturellement ignifuges, lorsqu'ils sont chauffés, ils libèrent des gaz halogènes qui interrompent la réaction d'oxydation en chaîne par radicaux libres. Cependant, si l'on ajoute des plastifiants, le PVC devient inflammable. La résistance au feu des plastiques peut être améliorée par l'adjonction d'adjuvants appropriés ou par l'emploi de polymères naturellement ignifugeants.

I.2.1.3.5/ Comportement mécanique

Les matériaux polymères sont utiles principalement en raison de leurs propriétés mécaniques. Par rapport aux métaux, les polymères et les plastiques ont un faible module

d'élasticité et leur rapport résistance/poids est plus élevé. Les objets et structures en plastique ont des degrés de résistance au choc très variables, allant de très fragile à très tenace.

Le comportement des polymères à la déformation diffère de celui des métaux de construction en ce qu'il n'est pas seulement fonction de l'ordre de grandeur de la contrainte, mais également de la durée d'application. Le fluage des polymères et des plastiques peut être important, même à la température ambiante, alors que pour les métaux, il ne l'est jamais au-dessous de 500°C. De plus, la température et le mode d'application de la contrainte affectent beaucoup plus les propriétés mécaniques des polymères et des plastiques que celles des métaux. Ces propriétés peuvent aussi être influencées par le procédé de fabrication, un traitement ultérieur et l'âge du produit fini. Les polymères n'obéissent pas à la loi de Hooke, mais ont un comportement dit viscoélastique.

Le préfixe "visco" veut dire que le matériau possède certaines des caractéristiques des liquides visqueux, ce qui implique une dépendance du facteur temps. Suivant ce comportement, les polymères amorphes peuvent avoir 3 types de réaction à la déformation par contraintes non destructives (relativement faibles), selon la durée de l'application de celles-ci : élasticité instantanée (ou de Hooke), élasticité retardée ou différée (haute élasticité) et écoulement visqueux.

1.2.1.3.6/ Résistance au choc

La résistance au choc donne une mesure de la ténacité ou de la capacité du matériau de résister à la rupture sous l'effet d'un impact à grande vitesse. Dans des conditions normales d'utilisation, les polymères peuvent être soit fragiles soit tenaces. Par exemple, le polystyrène, le poly (méthacrylate de méthyle) ainsi que le PVC non modifié et non plastifié sont habituellement fragiles ; ils se cassent brusquement. La résistance au choc des polymères et des plastiques correspondants dépend de l'écart entre leur température de transition vitreuse (T_v) et la température d'utilisation ainsi que de leur taux de cristallinité.

1.2.1.3.7/ Résistance aux agents chimiques et aux intempéries

La résistance aux agents chimiques des matériaux polymères dépend de la nature du polymère. Les acides fortement oxydants peuvent s'attaquer aux plastiques et les décolorer ou les rendre fragiles. Les liquides organiques attaquent la plupart des polymères et des plastiques. Par exemple, les fuel-oils, les huiles et divers solvants organiques peuvent attaquer les plastiques et occasionner leur gonflement, leur amollissement ou les dissoudre. La température et la composition des plastiques déterminent leur résistance à ces agents chimiques. La plupart des

plastiques peuvent être utilisées comme matériaux de protection contre la corrosion. Cependant, en raison de leur résistance variable en fonction du milieu, il convient de bien choisir le plastique qui résiste le mieux à la corrosion dans les conditions particulières. La résistance des polymères aux intempéries, surtout à l'action du soleil varie considérablement. Par exemple, certains polymères et les plastiques correspondants ont fait preuve d'une très grande résistance aux intempéries, contrairement à d'autres dont la résistance s'est révélée très faible. Cependant, la plupart des "compounds" plastiques commerciaux peuvent être formulés de façon à offrir une bonne résistance aux intempéries.

I.2.1.3.8/ La densité

Les plastiques ont tous une densité différente ce qui permet aussi de les identifier partiellement. Pour pouvoir faire l'expérience, découpez des fragments d'emballage dans des parties pleines (les poches d'air fausseraient la densité) et disposez-les dans un verre transparent rempli d'eau. Les plastiques qui flottent sont le PP et le PE car ils ont une densité inférieure à 1. Le PS expansé flotte également grâce aux nombreuses bulles d'air qui y sont incluses.

Lorsqu'on ajoute du sel à l'eau, on remarque que les autres bouts de plastique s'élèvent progressivement : dans l'ordre on a le polystyrène (non expansé), le PVC et le PET.

Tableau I. 1:certaine propriété des matières plastiques.

TYPE DE PLASTIQUE	Propriétés générales
Polyéthylènes à haute densité	-Excellentes propriétés de barrière contre l'humidité -Excellente résistance chimique -résistantes au stress -Surface lisse et cireuse -Les films HDPE se plissent au toucher -Bouteilles pigmentées résistantes au stress
Polychlorure de vinyle	-Excellente transparence -Dur, rigide (flexible lorsqu'il est plastifié) -Bonne résistance chimique -Stabilité à long terme -Bonne aptitude aux intempéries -Propriétés électriques stables -Faible perméabilité aux gaz
Polyéthylène de Basse densité	-Dur et flexible -Surface cireuse -Doux - rayures facilement -Bonne transparence -Bas point de fusion -Propriétés électriques stables
Polypropylène	-Excellente résistance chimique -Haut point de fusion -Dur, mais flexible -Surface cireuse -Translucide

I.2.1.3.9/ Propriétés Physico-chimiques du PET

Le PET possède une température de transition vitreuse se situant autour de 80°C et une température de fusion élevée, environ 260°C, grâce à la présence d'un noyau benzénique. Le noyau confère aussi un aspect semi rigide au PET. Il possède également de bonnes propriétés mécaniques et thermiques, une grande résistance chimique et une faible perméabilité aux gaz.

Le PET est un polymère semi-cristallin, la masse volumique de la phase cristalline est de 1,515 g.cm⁻³ et celle de la phase amorphe est de 1,335 g.cm⁻³. Le polytéréphtalate d'éthylène

broyé doit être soumis à des essais de laboratoire, à savoir l'analyse granulométrique (**Gouisse Linda, 2007**).

I.2.1.3.10/ Propriétés Mécaniques et Thermiques du PET

Les propriétés mécaniques et thermiques du polymère polytéréphtalate d'éthylène sont exhibées par le Tableau suivant :

Tableau I. 2: Propriétés mécaniques et thermiques des PET (**Benosman et al, 2017**).

Point de fusion	254 °C
La conductivité thermique	0.13 W/m. K
La capacité thermique de masse	1.1-1.3 kJ / kg K
Champ d'application	-20 à +100 °C
La résistance à la traction	70 MPa
L'allongement à la rupture	70%
Le module de flexion (rigidité)	2.0 MPa
Densité	1.34 kg/dm ³
Perméabilité aux gaz	Médiocre
Perméabilité à l'humidité	Très bonne.
Module de traction	2.9 GPa
Résistance au choc	De 0 à +100°C
Température de mise en œuvre	280 à 320°C.

I.3/Propriétés des bétons avec déchets plastique

I.3.1/ La maniabilité

Il y a deux points de vue parallèles sur le comportement de la maniabilité du béton contenant des agrégats plastique.

Dans plusieurs études par exemple (**Jauberthie et al, 1999**) and (**Frigione, 2010**), une valeur inférieure d'affaissement du béton frais a été observée à raison de l'incorporation de plusieurs types de granulats plastiques de celle du mélange du béton conventionnel, il a été observé qu'une addition de plus en plus importante en matière plastique abaisse encore le taux d'affaissement.

D'autre part, dans quelques études(Choi et al, 2005) et (Wang et al, 2009) une augmentation de la valeur de l'affaissement due à l'incorporation de granulats en plastique est également signalée, l'augmentation de l'affaissement des mélanges de béton en raison de l'incorporation d'agrégats plastiques est due à la présence d'eau libre plus importante dans les mélanges contenant du plastique que dans le mélange de béton contenant un agrégat naturel, donc à la différence des granulats naturels, les agrégats en plastique ne peuvent pas absorber de l'eau lors du gâchage(Al-Manaseer and Dalal, 1997).

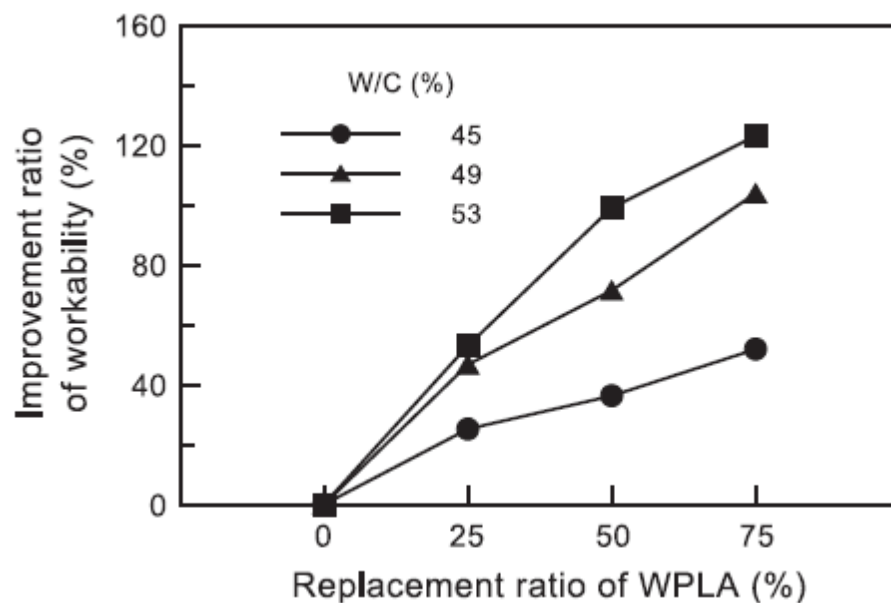


Figure I. 8. La relation entre la maniabilité et le taux de déchets plastique incorporés(Wang et al., 2009).

1.3.2//La densité

La masse volumique d'un béton dépend de sa composition en particulier de la densité des granulats utilisés. Selon plusieurs chercheurs (Hannawi et al, 2010 ; Saikia et Brito, 2012), l'incorporation de matières plastiques comme agrégat diminue généralement les densités à l'état frais et durcie du béton résultant du fait de la légèreté de l'agrégat en plastique.

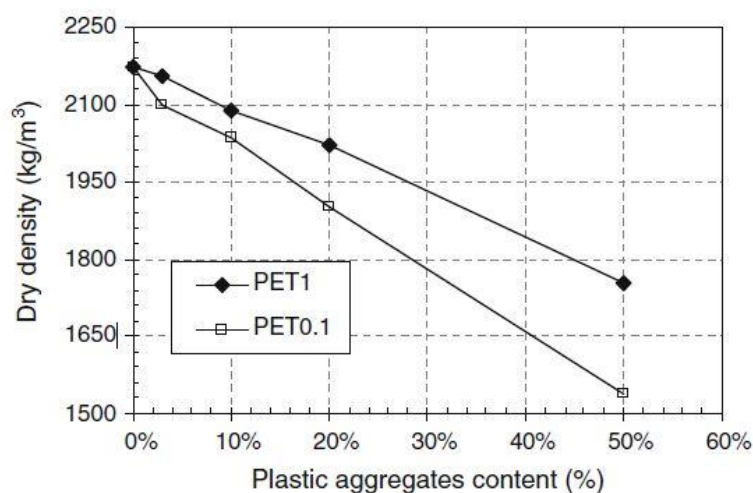


Figure I. 9.Densité à sec par rapport au volume de sable remplacé par les PET(Hannawi et al, 2010).

(Akçaözoglu et al, 2013) a montrés que les densités à l'état frais et durcis des composites contenant des déchets plastique ont diminué avec l'augmentation de la quantité d'agrégats de PET dans le mélange de béton. La réduction des poids unitaires peut s'expliquer par la faible masse volumique du plastique PET par rapport à l'agrégat conventionne.

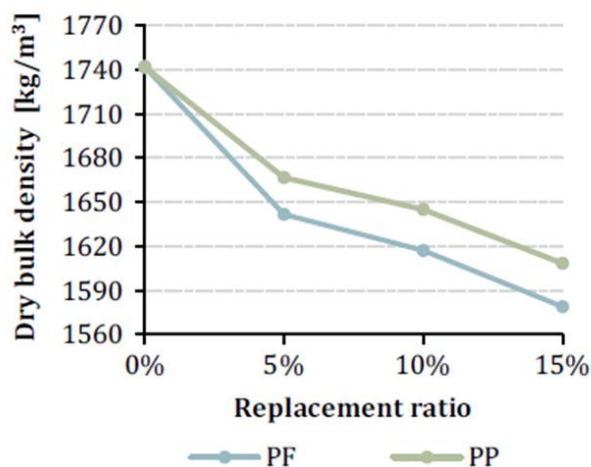


Figure I. 10.Densité du mortier à base de déchets plastiques(PF=PET flakes ;PP=PET pellets)(Marques da Silva et al, 2014).

1.3.3/ La résistance à la compression

La résistance à la compression du béton et du mortier de ciment est une propriété fondamentale qui a été étudiée en détails dans la plupart des travaux de recherche liées aux agrégats en plastique(Akçaözoglu et al, 2013) et (Yazoghli et al, 2005). Dans toutes ces études,

il a été montré que l'incorporation des agrégats de plastique a diminuée la résistance à la compression du béton / ou mortier résultant (**Kou et al, 2008**).

Selon (**Hannawi et al, 2010**) les résultats des essais de résistance à la compression pour les mélanges de mortier en plastique usagés montrent une diminution de la résistance à la compression en fonction du taux de déchets plastiques incorporés (**Figure I.11**). Cette tendance peut être attribuée à la diminution de la force d'adhérence entre la surface du plastique utilisé et la pâte de ciment comme il est montré dans la **photo I.1**.

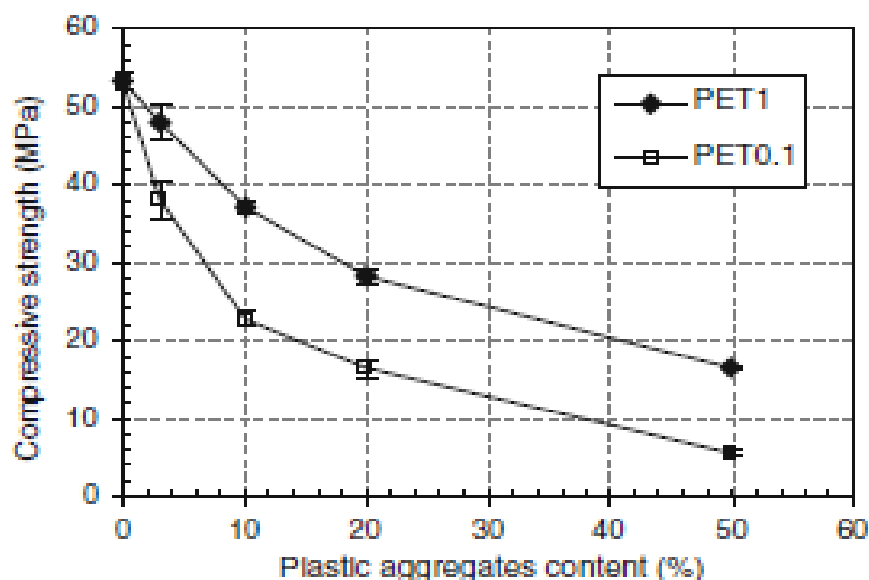


Figure I. 11. La résistance à la compression en fonction du volume de sable remplacé par le PET.

D'après (**Safi et al, 2017**), la diminution de la résistance à la compression en fonction du taux de déchets plastiques incorporés dans le béton a été liée à la mauvaise liaison entre la matrice et le PET, ou due à la faible ductilité du PET.

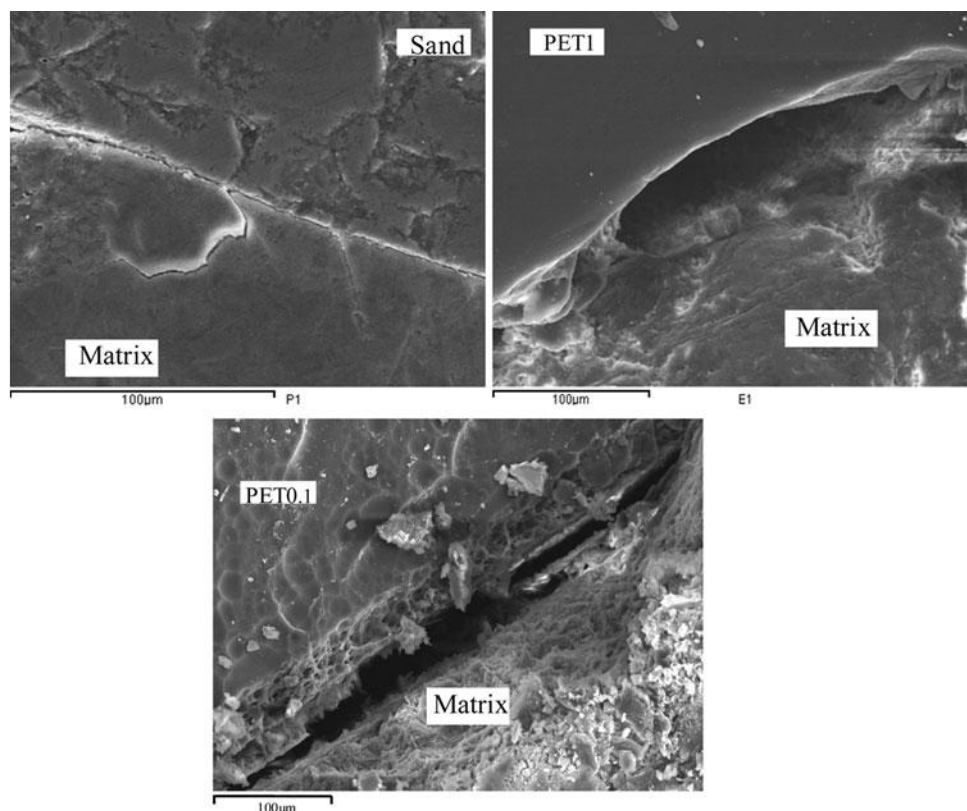


Photo I. 1. Images SEM montrant le contact entre PET et la matrice et le contact entre grain de sable et la matrice (Hannawi et al, 2010).

1.3.4/La résistance à la traction par flexion

Par rapport à la résistance à la compression, la résistance à la traction du béton est relativement faible mais on a parfois besoin de la connaître (Guendouze Mohammed, 2017). De manière similaire au comportement de la résistance à la compression, l'incorporation de tout type d'agrégat plastique abaisse la résistance à la traction par flexion du béton selon plusieurs études faites en ce type d'agrégats.

Selon (Albano et al, 2009) la diminution de la résistance à la traction par flexion est due à la porosité accrue du béton causée par l'incorporation de granulats PET ainsi que l'augmentation du rapport E/C.

(Wang Choi et al, 2009) Concluent après une enquête en utilisant le polyéthylène téréphtalate (PET) comme des agrégats que les résistances des mélanges de béton ont diminués de 19%, 31% et 54% avec l'augmentation des agrégats de PET de 25%, 50% et 75% respectivement.

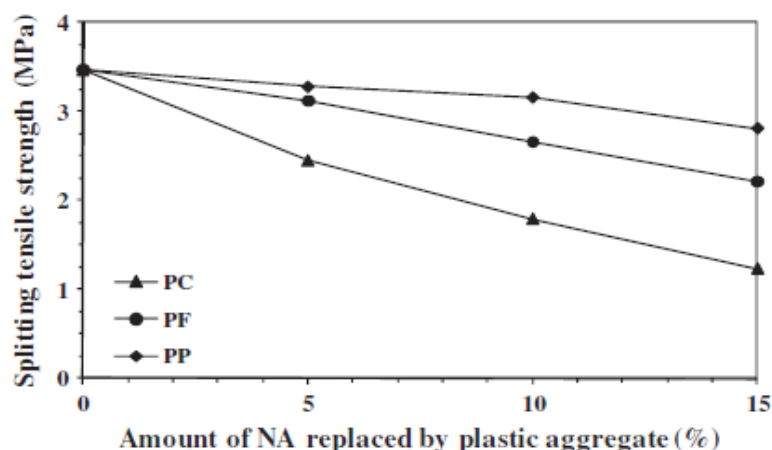


Figure I. 12:Resistance a la traction en fonction du pourcentage des agrégats plastique (Wang Choi et al, 2009).

I.3.5/La conductivité thermique

D'après (Hannawi et al, 2010), les agrégats plastiques ont tendance à ralentir la propagation de la chaleur qui à son tour diminue la conductivité thermique du composite. En outre, l'incorporation des agrégats plastiques cause une augmentation du volume des vides d'air, la conductivité globale a diminué en raison de la très faible conductivité thermique de l'air (0,024 W / m.K). **Figure I.14** présente une relation entre la conductivité thermique et la densité sèche des composites.

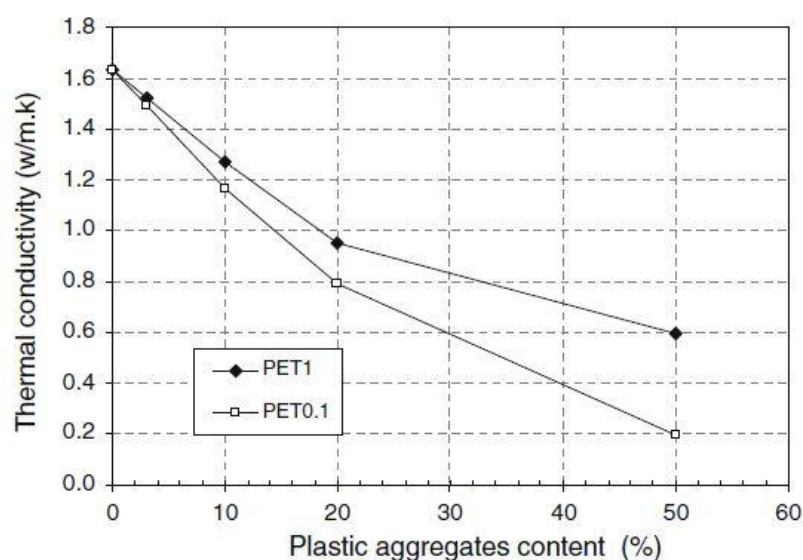


Figure I. 13. La Conductivité thermique en fonction du volume de sable remplacé par PET (Hannawi et al, 2010).

(Akçaözöğlu et al., 2013) ont aussi rapporté les mêmes résultats avec une substitution volumique du sable par le déchet en PET. Ils ont expliqué cette diminution par la faible conductivité thermique des déchets plastiques utilisés ainsi que la porosité plus élevée.

Selon (Yazoghli et al., 2005) Les résultats obtenus en mesurant les propriétés thermiques montrent que la conductivité thermique diminue avec l'augmentation du taux global de PET composite, Cette réduction est de 46% pour un taux de substitution volumique de 50% et 74%, améliorant ainsi les caractéristiques d'isolation du composite.

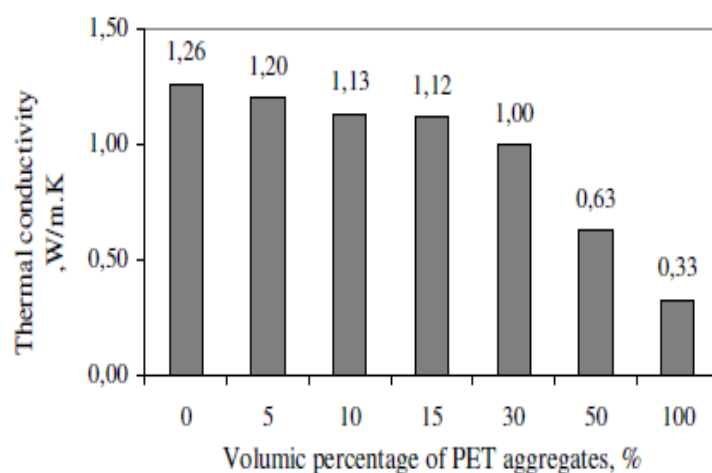


Figure I. 14. Variation de la conductivité thermique en fonction du pourcentage volumique d'agrégats de PET substitués.(Yazoghli et al., 2005).

1.3.6/L'absorption capillaire

D'après (Ge et al., 2014), l'absorption d'eau des mortiers fabriqués par PET a été faible, les éprouvettes ont été émergées dans l'eau pendant 7 jours, le taux d'absorption a été très faible par rapport au mortier normal (<0.47% de la masse). Les chercheurs suggèrent qu'en raison de sa haute résistance à l'érosion, il pourrait être utilisé dans des environnements agressifs.

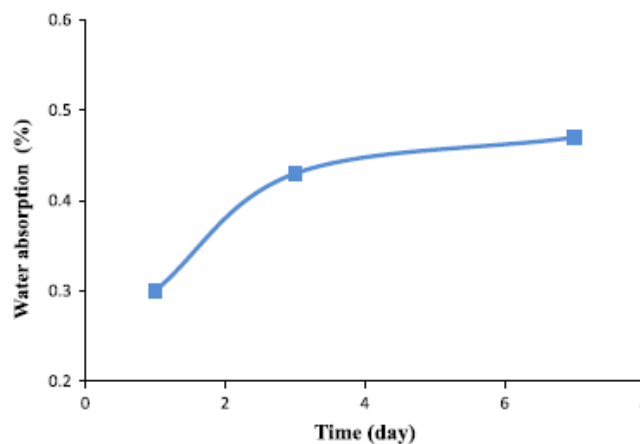


Figure I. 15.Absorption d'eau d'un mortier contenant PET (Ge et al., 2014).

Alors que (Marques da Silva et al., 2014) ont étudié l'effet de substitution du sable par les déchets plastique. Ils ont trouvé que l'absorption capillaire des mortiers a augmenté en fonction d'augmentation des déchets plastiques. Cette augmentation de la perméabilité est probablement liée à l'augmentation de la porosité interne due à la faible connexion de la matrice et de l'agrégat.

(Albano et al., 2009) aussi ont signalé que l'absorption d'eau est plus élevée pour les bétons contenant des granulats de PET par rapport aux bétons contenant uniquement les granulats naturels. L'absorption d'eau est en outre proportionnelle à la teneur croissante de PET dans le béton, l'augmentation de la taille des agrégats de PET et l'augmentation du rapport E/C. Selon les auteurs, la différence de la distribution granulométrique ainsi que la forme des granulats en plastique en comparaison avec l'agrégat fin naturelle étaient responsables de ce comportement.

1.3.7/L'attaque sulfatique

(Araghi et al., 2015) étudie, l'effet de l'attaque de l'acide sulfurique sur la résistance du béton inclus divers pourcentages de PET (0%, 5%, 10%, 15%) substitut comme agrégat dans le béton par la perte de masse et l'essai de vélocité.

Les résultats montrent que les valeurs de perte de poids pour les échantillons inclus 0%, 5%, 10%, 15% des particules de PET diminuent sont 53.92%, 49.8%, 51.95% et 35.29% respectivement. Donc, on pourrait conclure que des échantillons avec 15% de particules de PET ont des pertes de poids plus faibles et mieux résistants à l'attaque de l'acide sulfurique.

Les tests de vélocité ont été étudiés ; les diminutions dans les vitesses d'ultrason pour des échantillons (0 %, 5 %, 10 % et 15 % de particules PET) sont de 32.56 %, 22.65 %, 32.75 % et 20.7 %, respectivement. Il pourrait être exprimé que les échantillons de 15 % de particules PET, ont gardé leurs densités.

1.3.8/Retrait

Le phénomène de retrait est un facteur très important dans la pratique. Il correspond à des variations dimensionnelles mettant en jeu des phénomènes physiques avant, pendant et après la prise des bétons.

(Akçaözoglu et al, 2013) ont trouvé que l'incorporation du PET dans le béton provoque une augmentation du retrait des bétons légers, ce résultat est confirmé par autre études ainsi que **(Koide et al., 2002)**.

(Frigione, 2010) a mesuré la propriété de retrait d'un béton durci contenant du granulats de PET. Il a trouvé une augmentation dans les valeurs de retrait en raison de l'incorporation de granulats de PET dans le béton. Selon l'auteur, ce comportement est principalement dû au module d'élasticité inférieur de béton contenant un agrégat plastique que celui des bétons courants.

(Marques da Silva et al, 2014) et **(Soroushian et al, 2003)**. **(Marques da Silva et al, 2014)** expliquent cette diminution par la légère diminution de la capacité de séchage. Au fur et à mesure que l'évaporation de l'eau des capillaires entraîne un rétrécissement, une évaporation plus lente conduit à un rétrécissement plus faible, correspondant également à un rétrécissement plus faible, en raison du gain de rigidité avec le temps d'hydratation.

(Soroushian et al, 2003) explique les résultats obtenus du mélange optimal en raison de la capacité du plastique à réduire la largeur de la fissure de retrait car il se comporte comme des fibres et arrête les microfissures et pont à travers les fissures pour restreindre leur élargissement.

I.4/Synthèse du chapitre

Nous avons présenté dans cette étude bibliographique, une synthèse en premier lieu sur les bétons de sable, ces caractéristiques, ses utilisation ...etc. et nous avons retenu que les recherches sur ces bétons de sable dunaire avaient comme but la détermination d'une composition optimale et estimer ensuite ses performances potentielles grâce à l'utilisation des déchets de PET.

Les sables de dune présentent des caractéristiques chimiques et physiques très favorables à l'utilisation en construction, telles que leur propreté, et leur composition chimique siliceuse

En second lieu nous avons présenté une synthèse des connaissances actuelles sur les caractéristiques physiques et mécaniques des bétons de sable de dune avec les déchets plastiques.

Notre recherche bibliographique a mis en évidence l'influence notable des granulats PET sur les performances à l'état frais et à l'état durci des bétons. La principale distinction des bétons de granulats légers par rapport aux bétons de granulats rigides est la plus faible masse volumique qui diminue à la fois le module élastique et la résistance du béton.

CHAPITRE II

Matière première et techniques expérimentaux

Matériau première et techniques expérimentales

II.1/ Introduction

Dans le but d'une efficace exploitation des déchets PET dans le domaine des matériaux en génie civil.

Plus particulièrement leur utilisation dans un matériau à base de sable de dune. Notre matière première choisie pour l'élaboration du composite à base de sable de dune et déchets de plastique composé de :

- Sable de Dune.
- Déchets de PET.
- Ciment et eau.

Dans ce chapitre nous allons exposer tous les essais de caractérisation effectués pour l'identification de la matière première aussi que les techniques expérimentales effectuées une fois le produit est fini.

Notons que tous les essais ont été effectués au laboratoire de génie civil, de l'UATL.

II.2/ Caractérisation des matières premières

II.2.1/ Sable de dune

Le sable utilisé dans notre recherche expérimentale est le sable de dune ramené de la région nord de la ville de Laghouat. Ci-dessous les essais de caractérisation de ce sable.

II.2.1.1/Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est réalisée selon la norme (NF P94-056) qui permet de classer et de définir la granulométrie des matériaux employés dans la construction, d'après la grosseur des grains et la forme de la courbe granulométrique (Saiti Issam, 2014) .

Les résultats de cet essai ont permis de tracer la courbe granulométrique de ce sable illustré dans la **figure II.1** ci-dessous.

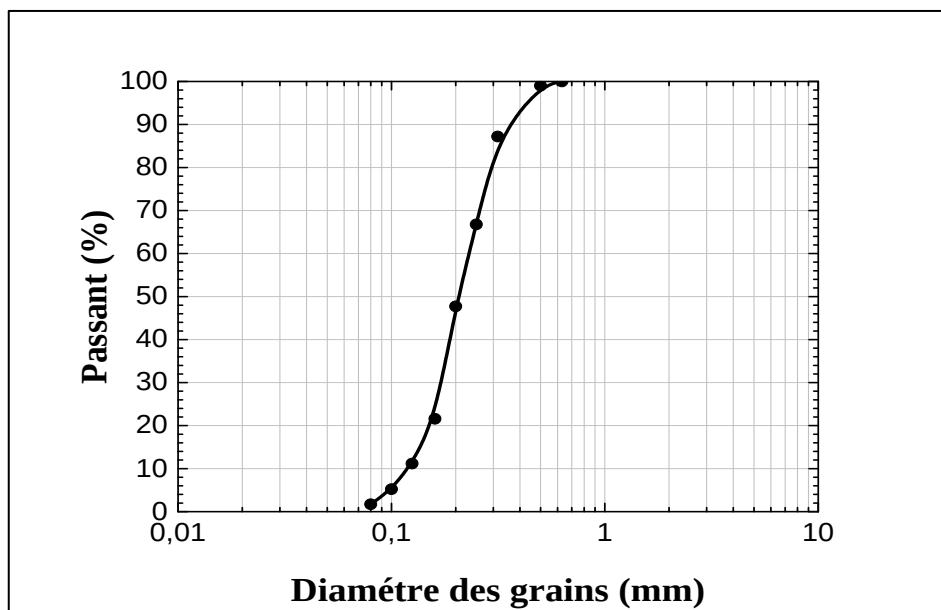


Figure II. 1: Courbe granulométrique du sable de dune.

II.2.1.2/ Module de finesse

D'après cet essai on peut aussi identifier la finesse du granulat soumis à l'essai grâce au module de finesse (**NF P 18-360**) noté M_f et donné par la formule suivante :

$$M_f = \frac{\Sigma \text{refus cumulée en \% pondéral des tamis (0.16-0.315-0.63-1.25-2.5-5mm)}}{100} \quad (\text{II.1})$$

D'après la formule $M_f = 1.22$

D'après ces résultats, on définit donc notre sable comme étant un sable fin de diamètre max ≤ à 0.63mm et de granulométrie serrée.

II.2.1.3/ Analyse minéralogique

L'analyse minéralogique effectuée par diffraction des rayons X (DRX) est représentée par le diffractogramme de la **figure II.2** qui confirme la présence de la silice SiO_2 qui caractérise la composante principale du quartz.

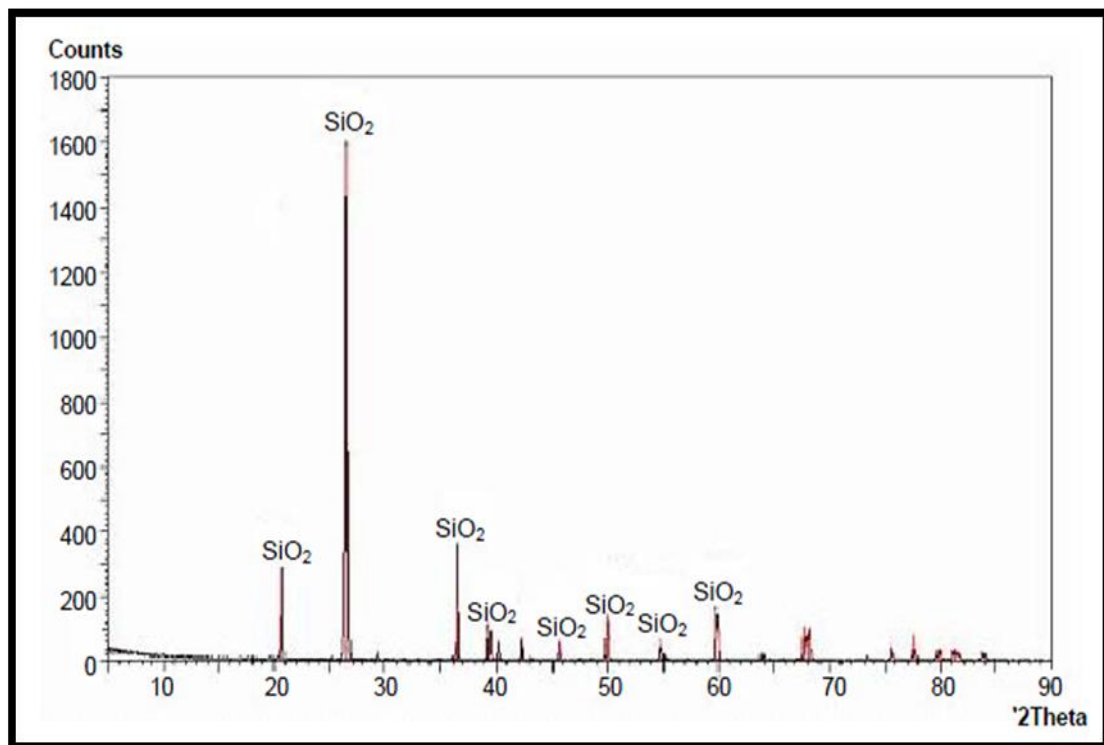


Figure II. 2: Diffractogramme aux rayons X du sable de dune (Damne et al., 2016).

Une photo du sable de dune visualisé au microscope électronique à balayage (M.E.B) montre que la majorité des grains possèdent des formes arrondies avec une faible angularité (**Figure II.3**).

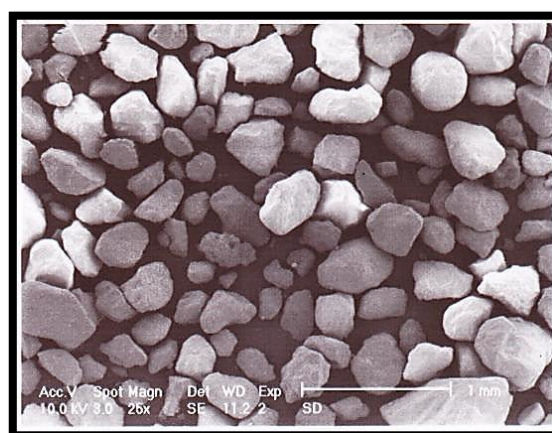


Figure II. 3: Image au MEB du sable de dune (G=20x) (Bederina et al., 2005)

II.2.1.4/ Equivalent de sable

L'essai est réalisé selon la norme (EN 933-8). L'équivalent de sable est le rapport multiplié par 100, de la hauteur de la partie sédimentée à la hauteur totale du floculat et de la partie sédimentée. Ces hauteurs sont déterminées dans une éprouvette où la prise d'essai a été traitée, dans des conditions définies, par une solution capable de faire flocculer les éléments fins. L'essai permet d'avoir une idée globale de la quantité et de la qualité des éléments fins contenus dans un sable en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments dits sableux et les éléments fins (argile, impuretés). (Dupain et al., 1995)et (Goual and Belmecheri, 2015).

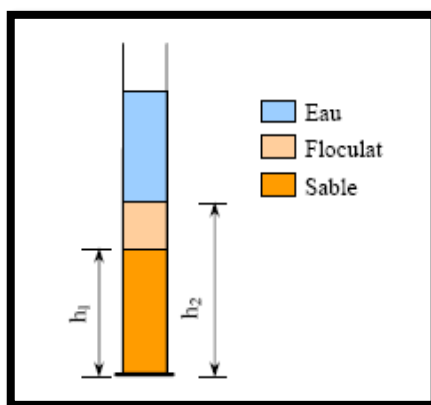


Figure II. 4:Détermination de l'équivalent de sable.

II.2.1.5/ Analyse chimique

Le résultat de l'analyse chimique du sable de dune utilisé est donné dans le **tableau II.1** ci-après :

Tableau II. 1. Analyse chimique du sable de dune. (Saiti Issam, 2014).

Teneurs en silice (SiO_2) %	95,87
Teneur en sulfate (SO_3) %	00,91
Matières organiques MO%	-----
Teneur en chlorures %	00,36
Carbonate de Calcium CaCO_3 %	02.50

Les résultats ci-dessus montrent que les sables utilisés sont des sables siliceux, ils sont constitués principalement de silice (SiO_2).

II.2.1.6/Caractéristique physique du sable de dune

Le **tableau II.2** regroupe l'ensemble des résultats des essais physiques effectués sur le sable dunaire.

Tableau II. 2 : Caractéristiques physiques du sable de dune (Damene et al., 2016).

Masse volumique absolue	$\rho_s = 2675 \text{ kg/m}^3$	NF P 18-555
Masse volumique apparente	$\rho_a = 1423.6 \text{ kg/m}^3$	NF P 18-555
Module de finesse	$M_f = 1.22$	NF P 18-360
Equivalent de sable	ESv= 97,74 % ESp=96,58%	EN 933-8
Compacité et porosité	$C_p = 53 \%$ $P = 47\%$	-
Valeur au bleu de méthylène	$V_B = 0,067 \text{ cm}^3/\text{g}$	NF P18-592

Les valeurs des modules de finesse confirment que le sable dunaire est plus fin, rappelons que pour un sable à béton traditionnel, ce module est compris entre 2,20 et 2,80

(Dreux and Festa, 1998) les valeurs de l'équivalent de sable et la valeur au bleu de méthylène mettent en évidence la propreté de sable (pauvres en éléments fins).

II.2.2/ Ciment

Un seul type de ciment a été utilisé au cours de cette étude expérimentale. Il s'agit d'un ciment portland composé CPJ-CEM II /B 42.5N selon la norme algérienne NA 442, (MATIN) confectionné et mis en sacs de 50 kg à M'sila par la cimenterie ACC « Algerian Cement Company » et possédant toutes les capacités liantes.



Photo II. 1:Ciment CPJ de LAFARGE.

II.2.2.1/ Consistance et la prise du ciment (EN 196-3)

L'essai de consistance normale est effectué avec l'appareil de Vicat selon la norme EN196-3. La consistance normale représente le pourcentage d'eau requis pour la fabrication d'une pâte de ciment de consistance normale. Elle est évaluée en mesurant l'enfoncement d'une tige cylindrique, sous l'effet d'une charge constante, dans la pâte. L'enfoncement est d'autant plus important que la consistance est plus fluide, cette consistance est alors appelée "CONSISTANCE DE VICAT". Ensuite l'évolution de la consistance de la pâte d'une consistance normalisée permettant ainsi d'évaluer la vitesse de durcissement de la pâte de ciment durant les premières heures qui suit l'addition de l'eau. (Saiti Issam, 2014).

Le début et la fin de la prise sont déterminés à l'aide de l'aiguille de Vicat qui est le moyen le plus couramment utilisé selon la norme française **EN 196-3**.

Le "temps de début de prise" repère donc le moment où l'hydratation du ciment passe de la période dite dormante à une période d'hydratation plus active au cours de laquelle la pâte de ciment connaît un brusque accroissement de sa viscosité jusqu'au moment où elle atteint la consistance d'un solide, c'est le temps de fin de prise.

II.2.2.3/ Mesure de la finesse (EN 196-6)

La finesse d'un ciment est généralement exprimée par sa surface massique : c'est la surface totale des grains contenus dans une masse unité de poudre. La surface massique est généralement exprimée en cm^2 de surface des grains de liant par gramme de poudre. L'essai consiste à faire passer un volume d'air connu au travers d'une poudre de ciment, en utilisant un perméabilimètre Blaine (**Photo II.2**) ; plus la surface massique de cette poudre est importante et plus le temps t mis par l'air pour traverser la poudre est long. La surface est proportionnelle à $\sqrt{t}$. La surface spécifique est calculée par la formule :

$$S = k \frac{\sqrt{e^3} \cdot \sqrt{t}}{\rho(1-e)\sqrt{n}} \quad (\text{II.7})$$

S – Surface spécifique (cm^2/g).

k – Constante de l'appareil. ($k=43$)

e – Porosité de la couche tassée. ($e=0,5$)

t – Temps mesuré en secondes.

ρ – Masse spécifique du ciment (g/cm^3).

η – Viscosité dynamique de l'air à la température d'essai (en poises). (**Saiti Issam, 2014**)



Photo II. 2 : Perméabilimètre de Blaine.

Les principales caractéristiques physiques de ce ciment sont résumées dans le **tableau II.3**

Tableau II. 3: Caractéristiques physiques du ciment utilisé.

Masse volumique absolue	$\rho_s=3100 \text{ kg/m}^3$
Masse volumique apparente	$\rho_a=1030.05 \text{ kg/m}^3$
Consistance normale	$E/C=0.25-0.28$
Début de prise	$DP=150-170 \text{ minute}$
Fin de prise	$FP =3 :30-4 :30 \text{ (h :mn)}$
Surface spécifique Blaine	$SSB=3700 \text{ cm}^2/\text{g}$

Les caractéristiques chimiques de ce ciment sont résumées dans le **tableaux II.4** ci-dessous :

Tableau II. 4: Fiche technique du ciment utilisé.

Teneur en SiO_2 %	17.49
Teneur en CaO %	62.78
Teneur en Al_2O_3 %	04.51
Teneur en Fe_2O_3 %	03.02
Teneur en K_2O %	00.64
Teneur en Na_2O %	00.05
Teneur en sulfate SO_3 %	02.5 ± 0.5
Teneur en MgO %	1.7 ± 0.5
Teneur en chlorures %	0.02-0.05
Perte de feu %	10.00 ± 2

La composition minéralogique du ciment indiquée dans le **tableau II.5** selon le diffractogramme de la **figure II.5** montre la présence de C_3S , C_3A , C_2S et C_4AF .

Tableau II. 5: Composition minéralogique du ciment utilisé.

Phase	Pourcentage
C_3S	60 % ± 3
C_3A	7.5% ± 1
C_2S	12 % ± 2
C_4AF	10 % ± 2

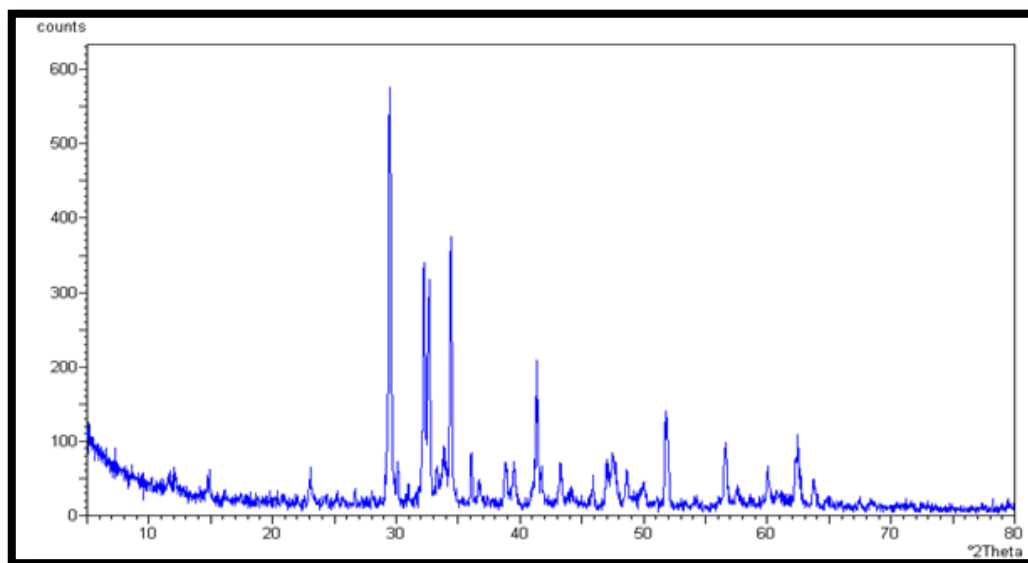


Figure II. 5: Diffractogramme aux rayons X du ciment.

L'analyse chimique ou (Composition minéralogique) du ciment a révélé que le ciment utilisé contient des pourcentages appréciables de chaux et de silice, cela peut conférer aux bétons élaborés les performances requises.

II.2.3/ Eau de gâchage

Nous avons utilisé pour la totalité de nos essais une eau potable du réseau domestique sans aucun traitement supplémentaire. Le PH mesuré régulièrement est voisin de 7,5.

II.2.4/ PET

Le polymère utilisé dans cette étude, est le polytéréphtalate d'éthylène connus sous le nom commerciale PET. Il s'agit d'un déchet ramené de l'usine AMMOURI situé dans la région ouest de Laghouat. Ce PET est obtenu par le broyage très fin des bouteilles de boisson. Il possède une température de fusion d'environ 248 °C.



Photo II. 3 : PET utilisé.

Avant son utilisation dans la confection des bétons, le polytéréphtalate d'éthylène broyé a été soumis à des essais de laboratoire à savoir : les masses volumiques apparente et absolue, l'absorption et l'analyse granulométrique.

II.2.4.1/ l'analyse granulométrique du polyéthylène téréphtalate (PET)

L'analyse granulométrique a été réalisée selon la norme **(EN933-1 et EN 933-2)**

On a utilisé des tamis des différents diamètres selon la granulométrie de PET comme dans la **figure** ci-dessous.



Photo II. 4 : Les tamis utilisés de l'analyse granulométrique du PET.

Les résultats de cette analyse sont présentés sur la **figure II.6** ci-dessous.

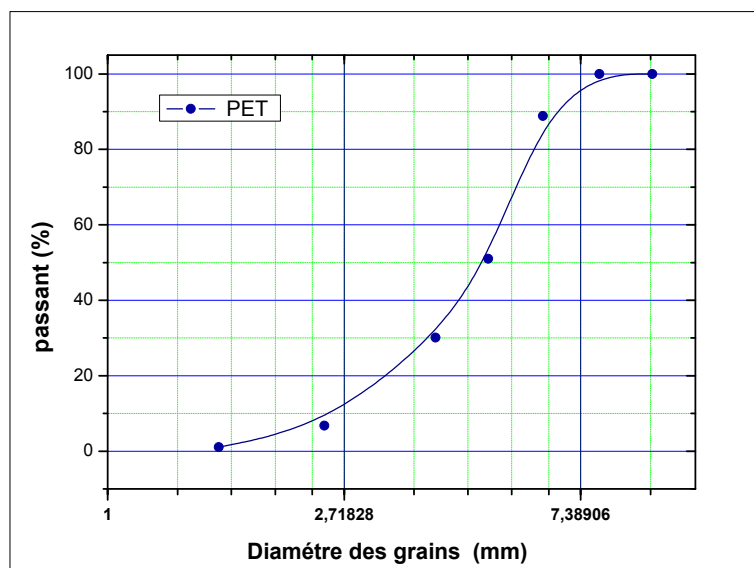


Figure II. 6:La courbe granulométrique du PET.

Selon la courbe granulométrique on remarque que les PET possèdent une granulométrie continue qui s'étale entre 1  8mm ($D_{max} = 8\text{mm}$).

II.2.4.2/Détermination de la masse volumique apparentes et la masse volumique absolus (NF P 18-555)

Les essais de caractérisation des PET sont effectués au laboratoire de génie civil sont regroupées sur le tableau II.6 ci-dessous

Tableau II. 6: Caractéristiques physiques du PET

Masse volumiques absolue (kg/m³) (NF P 18-555)	Masse volumiques apparente (kg/m³) (NF P 18-555)	L'absorption après 24h (%)
0.296	1.25	0

II.3/ Essais expérimentaux effectués

II.3.1/ Essai d'écoulement (Essai au maniabilimètre B)

La Norme **NF P18.452** utilisé pour déterminer l'homogénéité du béton par référence à sa maniabilité et sa plasticité. Le temps d'écoulement est mesuré à l'aide d'un maniabilimètre B (**photo II.5**), conformément à la norme **NF P18-452**. Le béton frais est mis dans le compartiment au volume supérieur, la cloison est enlevée et le vibreur enclenché. On mesure le temps mis par le matériau pour atteindre une hauteur repérée dans le compartiment vide.



Photo II. 5 : Maniabilimètre B (180x90x90mm).

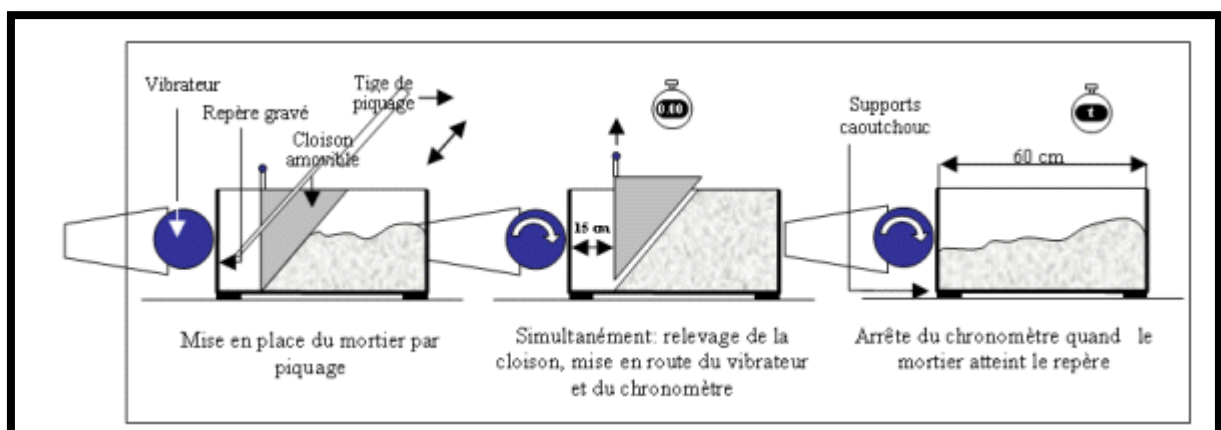


Figure II. 7: Dispositif de Maniabilimètre B.

D'après la valeur du temps d'écoulement (t), on peut conclure que le mortier est :

- ferme si $t \geq 40$ s
- plastique si $20 \text{ s} < t \leq 30 \text{ s}$
- très plastique si $10 \text{ s} < t \leq 20 \text{ s}$
- fluide si $t \leq 10 \text{ s}$. (J.P. Laurent, 1991)

II.3.2. Essais de flexion et compression (EN 196-1)

Le comportement mécanique de tous les bétons a été étudié en flexion simple (3 points) et en compression uniaxiale sur des éprouvettes prismatiques 40×40×160 mm, à l'âge 7, 14 et 28 jours. A chaque échéance, trois échantillons sont testés en flexion simple sur le bâti de flexion d'une presse de marque "CONTROLS" (échelle maximale de la force : 100 kN), asservie en force, suivant une vitesse de chargement de 0,05 kN/s.

Cet essai permet de déterminer la contrainte de traction d'un mortier, Il est mené conformément à la norme européenne **EN 196-1**.

On effectue la lecture de la charge P en KN sur l'écran de l'appareil.

La résistance à la rupture en traction par flexion est donnée au moyen de la formule suivante :

$$R_t = \frac{1,5F_t \cdot L}{b^3} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (\text{II.8})$$

L : Distance entre axes des rouleaux d'appuis de l'éprouvette 40x40x160 mm ($L= 100$ mm)

R_t : Résistance à la traction en MPa.

F_t : Charge à la rupture en N.

b : Largeur de la section carrée du prisme en mm ($b = 40$ mm). (**Damene et al., 2016**)

La **figure (III.8)** et la **photo (III.6)** montrent le dispositif de flexion :



Photo II. 6 : Presse utilisé pour l'essai de flexion

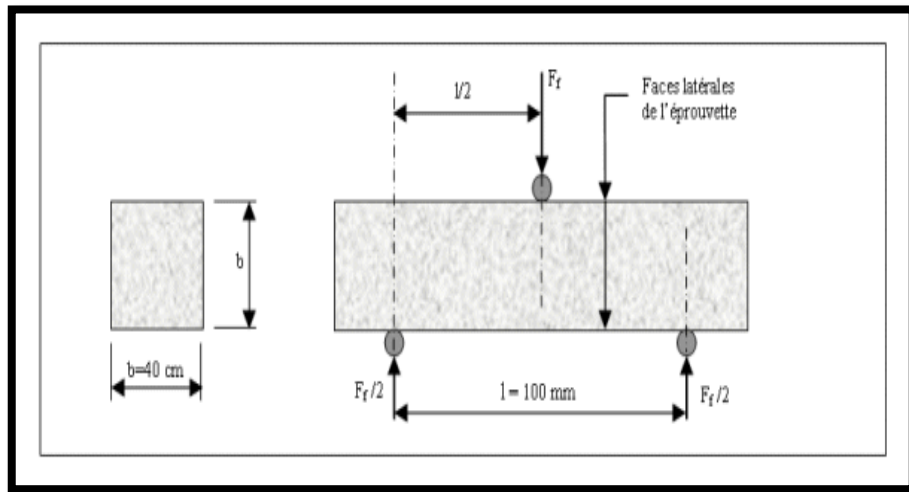


Figure II. 8: Dispositif de flexion à trois points

Les six morceaux d'éprouvettes obtenus après rupture en flexion sont alors soumis à une compression uniaxiale sur le bâti de compression de la même presse avec une vitesse de mise en charge de 2400 N/s. (Saiti Issam, 2014).

La contrainte de rupture vaudra :
$$R_c = \frac{F_c}{b^2} \quad (\text{II.9})$$



Photo II. 7: Presse utilisé pour l'essai de compression.

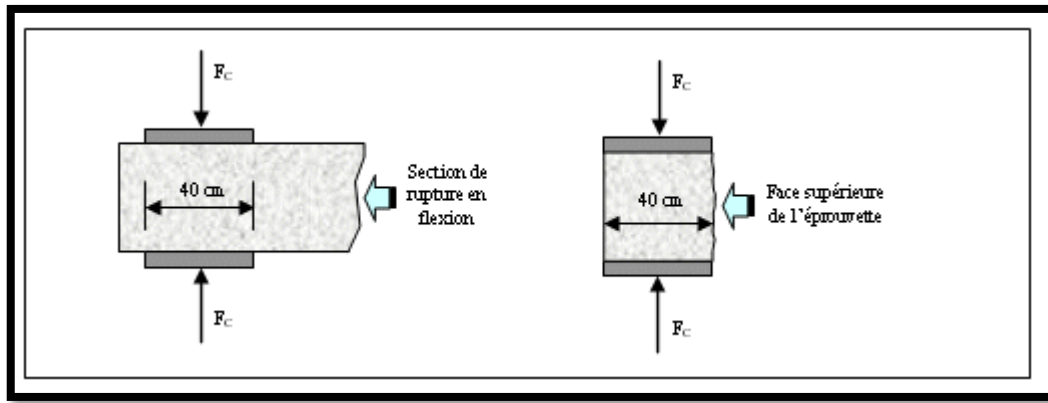


Figure II. 9: Dispositif de compression.

II.3.3. Masse volumique apparente

Par définition, la masse volumique apparente sèche ρ_{app} est le rapport de la masse de l'échantillon M à son volume apparent sec V_t . L'état sec est obtenu par séchage de l'échantillon en étuve à 105°C jusqu'à masse constante. Les pesées sont effectuées à 0.1g près et les dimensions des échantillons sont déterminées à l'aide d'un pied à coulisse avec une précision de 0.1mm. La masse volumique apparente est la moyenne des mesures effectuées sur trois échantillons de chaque composition. (Saiti Issam, 2014)

II.2.4. Retrait norme (NFP 15-433)

Le retrait est un phénomène simple qui correspond à une contraction volumétrique que l'on observe quand du béton se dessèche (PC Aitcin et al., 1998).

Il consiste à mesurer la variation dimensionnelle longitudinale relative par rapport à la longueur initiale de l'éprouvette après 24 heures de moulage ($L_0 = 16\text{cm}$). L'axe longitudinal de l'éprouvette étant vertical. On prend la moyenne des trois mesures sur trois éprouvettes de $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ conformément à la norme NF P 18-404 après démoulage à 24 h. Ils sont placés dans un retractomètre (Figure II.10) munis d'un comparateur qui permet de mesurer le retrait de l'éprouvette à tout moment à court et moyen terme (du 1^{er} jusqu'à 300 jours). La conservation des éprouvettes est faite à l'air libre dans le laboratoire à une température de 25 à 30°C . (Saiti Issam, 2014).

$$\frac{\Delta L}{L} = \left| \frac{L_f - L_i}{16} \right| \quad (\text{II.10})$$

Le retrait étant exprimé par

L_f : la longueur finale ;

L_i : la longueur initiale ;

L_0 : La longueur initiale après 24 heures de moulage. ($L_0 = 16$ cm).

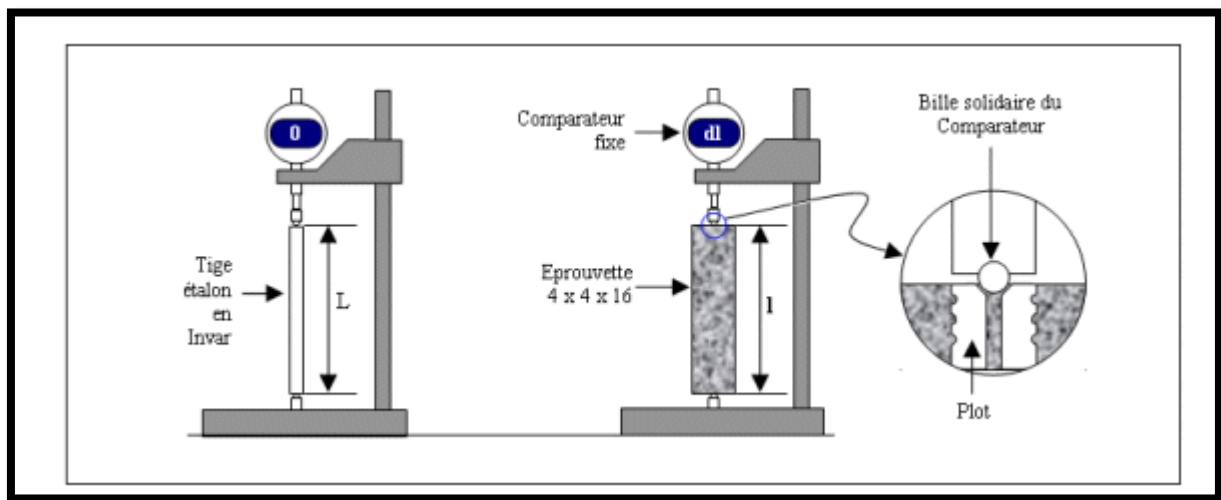


Figure II. 10:Appareillage pour la mesure du retrait.

II.2.4/ Absorption capillaire

L'absorption d'eau à l'intérieur du béton sec est connue pour dépendre de deux paramètres majeurs, la porosité effective du béton et la vitesse d'absorption par remontée capillaire (absorptivité) (**Assié Stéphan, 2004**).

Cet essai mesure le taux d'absorption de l'eau par succions capillaires des éprouvettes de mortier non saturées, mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique. Les éprouvettes seront préalablement conditionnées dans l'étuve environ 60°C jusqu'à une masse constante. L'essai de Sorptivité détermine le taux ou vitesse d'absorption par remontée capillaire d'une éprouvette 4x4x16cm³ placée sur de petits supports dans un bac contenant de l'eau suivant le schéma indiqué à la **Figure II. 11** de sorte que l'eau ne touche l'éprouvette que d'une hauteur de 5mm de la profondeur du bac, le reste de l'éprouvette est préalablement imperméabilisé

par un film plastique sur toutes les autres faces. On mesure alors l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps, le montage expérimental de l'essai d'absorption est clair dans la **figure II. 11**.

La sorptivité est définie par l'équation suivante : $i = Sw\sqrt{t}$ **(II.11)**

Ou Sw est la sorptivité du matériau et i est le volume d'eau absorbée par unité de surface. **(Neville, 1995)**

Le taux d'absorption volumique par unité de surface i à un instant t donné est calculé en utilisant la formule :

$$\frac{M(t) - M(0)}{\rho_w \cdot A_{ab}} \quad \textbf{(II.12)}$$

Où : $M(t)$: masse de l'échantillon humide à l'instant t ,
 $M(0)$: masse initiale de l'échantillon à l'état sec,
 ρ_w : masse volumique de l'eau liquide (1 g/cm^3),
 A_{ab} : Surface absorbante de l'échantillon ($4 \times 4 = 16 \text{ cm}^2$).

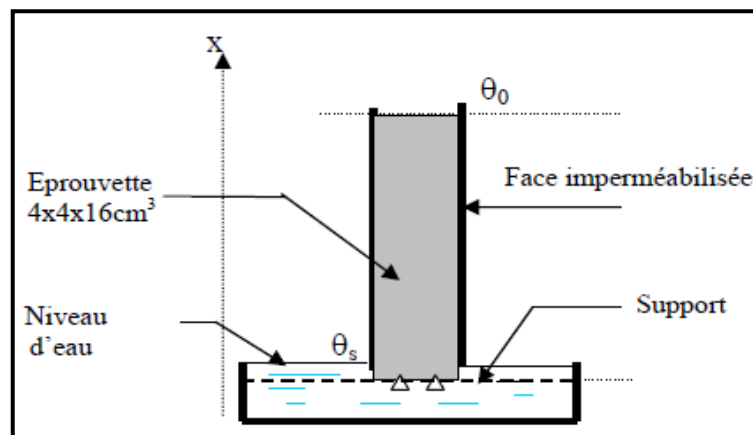


Figure II. 11: Schéma de l'essai de capillarité

II.2.5. / Caractéristiques thermiques

Les propriétés isolantes des matériaux de construction se quantifient au travers de deux paramètres usuels : La conductivité thermique « λ » et la diffusivité « a ».

La conductivité thermique « λ » est définie comme la quantité de chaleur qui traverse perpendiculairement pendant l'unité de temps l'unité de surface isotherme quand la température présente un écart de 1°C sur l'unité de longueur de distance. Plus le matériau est isolant et plus faible est sa conductivité thermique.

La diffusivité thermique « a » d'un matériau exprime la vitesse de propagation d'une perturbation thermique dans un milieu, elle est exprimée en (m^2/s). Plus la diffusivité d'un matériau est faible, plus le matériau est thermiquement isolant.

De nombreuses méthodes et différents instruments de mesure ont été utilisés pour la détermination de la conductivité thermique des matériaux.

La mesure utilisée dans notre cas est la méthode dite du **fil chaud**. (Damene et al., 2016)

II.2.5.1/ Méthode du fil chaud

C'est une méthode de mesure de la conductivité thermique des matériaux isolants. On place un fil chauffant entre les surfaces de deux échantillons du matériau à caractériser. On applique un échelon de flux de chaleur constant ($\varphi = 0$ si $t < t_0$ et $\varphi = \varphi_0$ si $t \geq t_0$) au fil chauffant et on relève l'évolution de la température $T_s(t)$ de ce fil. Pendant le temps où la perturbation n'a pas atteint les autres faces des échantillons, c'est-à-dire où l'hypothèse du milieu semi-infini est valide, on peut considérer que le transfert au centre de l'échantillon autour du fil est radial. La modélisation de ce transfert de chaleur permet de calculer l'évolution de la température au centre de l'échantillon. On applique une méthode d'estimation de paramètres pour calculer les valeurs de la conductivité thermique λ (Yves Jannot, 2008)

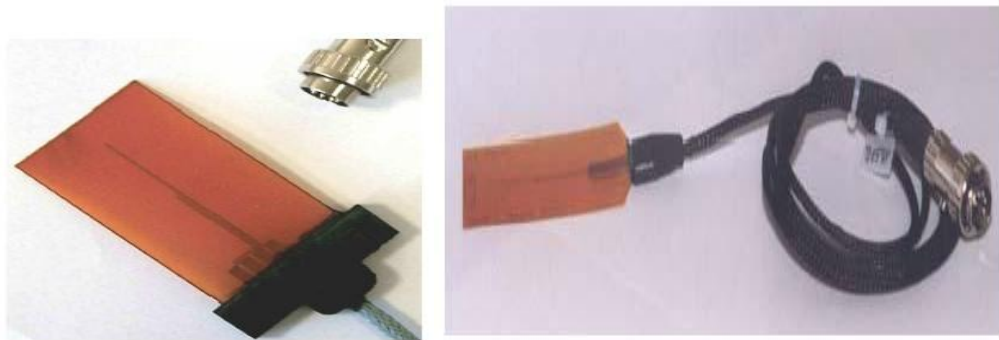


Photo II. 8: Vue d'une sonde de type fil chaud

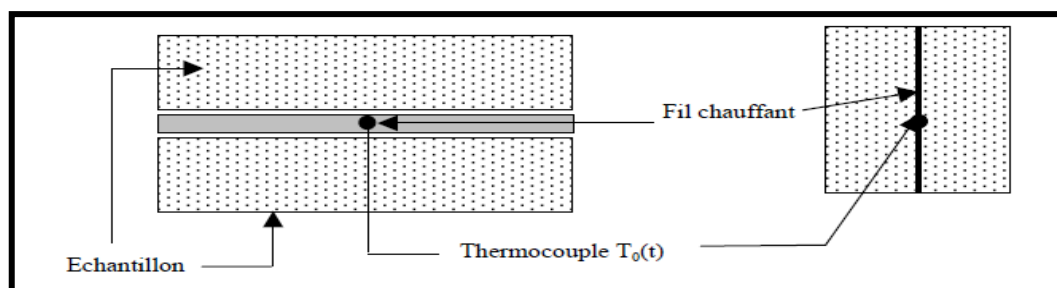


Figure II. 12 : Schéma du montage de la méthode du fil chaud (Yves Jannot, 2008).

L'essai consiste à délivrer un flux de chaleur dans la sonde (fil chaud) de dimensions (40x60mm) disposé en sandwich entre deux échantillons identiques de mêmes dimensions (en polystyrène expansé afin de protéger les échantillons contre les échanges de températures avec l'extérieur) (40x40x80 mm) serrés dans le dispositif comme il est indiqué dans la **photo II.9**. On obtient par la suite les graphes des températures expérimentales enregistrées à chaque seconde.

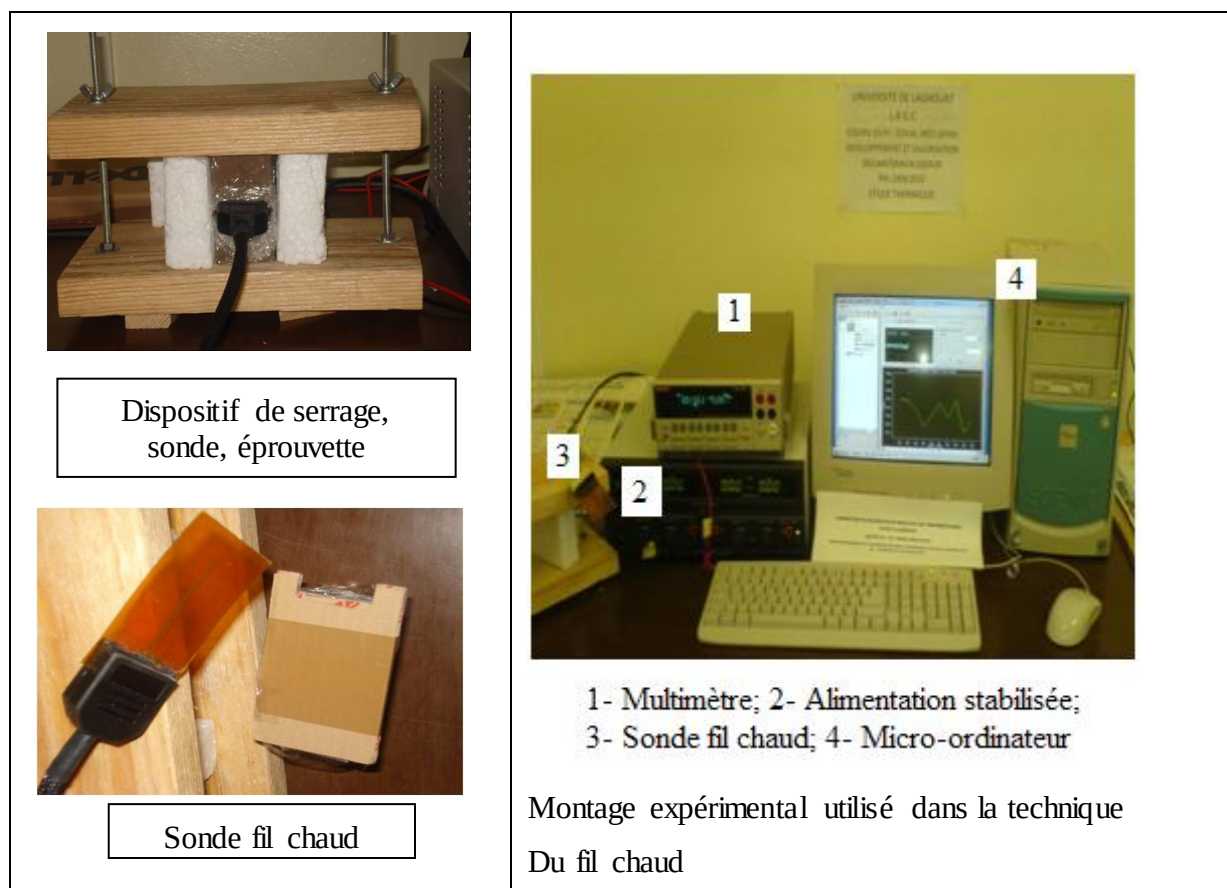


Photo II. 9: Dispositif expérimental pour la mesure de la conductivité thermique (Saiti Issam, 2014)

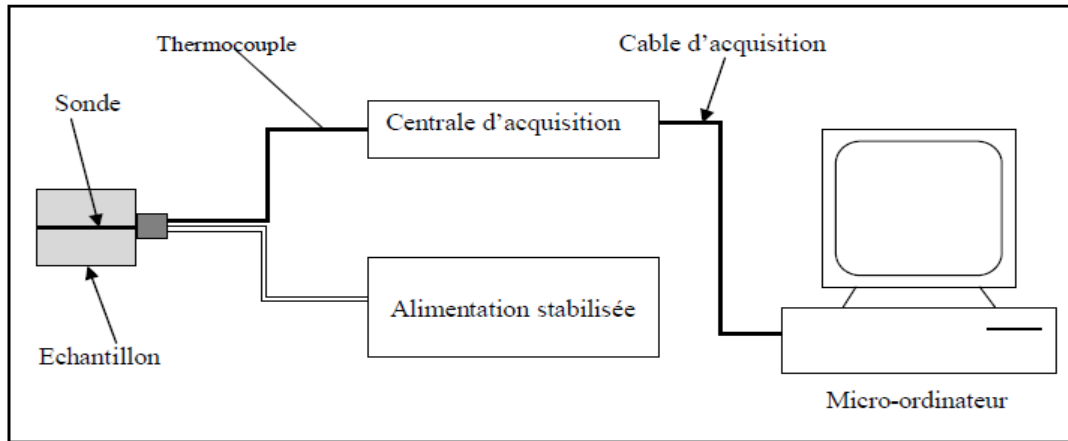


Figure II. 13:Schéma du montage expérimental (Goual MS, 2001).

L'essai a été réalisé par le thermocouple de la sonde qui est reliée à une centrale d'acquisition de type « **Keithley-2700 Multimeter** », qui permet de suivre l'évolution de la température en fonction du temps dans la sonde. Les mesures sont ensuite communiquées à travers un câble d'acquisition au micro-ordinateur via une carte d'interface. La compensation de la jonction froide du thermocouple se fait automatiquement à l'aide d'un microprocesseur intégré dans la centrale d'acquisition. La puissance électrique ϕ_0 dissipé dans l'élément chauffant est déterminée connaissant l'intensité de courant $I(A)$ le traversant qui peut être lue à travers une alimentation stabilisé type « **Elektro-Automatik** », et la différence de potentiel entre ses extrémités $U(V)$ soit :

$$\phi_0 = U \times I \quad (\text{II.13})$$

Etant donné que l'on cherche simplement à estimer le temps pendant lequel le milieu reste semi-infini, La modélisation du système fil chaud (Cérézo Véronique, 2005) permet d'écrire l'équation suivante :

$$T_s(t) - T_s(0) \approx \frac{\phi_0}{4\pi\lambda L} \ln(t) + \phi_0 \left[R_c - \frac{\ln\left(\frac{r_0}{\sqrt{a}}\right)}{2\pi\lambda L} + \frac{\gamma}{4\pi\lambda L} \right] \quad (\text{II.14})$$

R_c : Résistance de contact à l'interface résistance chauffante / échantillon

λ : Conductivité thermique de l'échantillon

a : Diffusivité thermique de l'échantillon

r_0 : Rayon du fil chauffant

L : Longueur du fil chauffant (égal à 6cm dans notre cas)

Φ_0 : Puissance dissipée dans la résistance chauffante

L'inertie de la sonde et la résistance de contact n'influent pas sur la température aux temps longs.

II.2.6. La résistance au feu

Les demis prismes d'éprouvettes 4×4×16cm sont préalablement préparées pour le traitement thermique, elles sont exposées à l'air libre au laboratoire pendant 6 jours puis étuvées à 105°C pendant plusieurs jours jusqu'à stabilisation de leurs masses. Ensuite, elles sont chauffées dans un four à moufle (**Photo II.10**) à différentes températures 200°C, 400°C et 600°C avec une vitesse de chauffe égale à 10°C/min puis maintenues en température dans le four pendant 1 heure conformément à la norme ISO 834. Tous les demi-prismes d'éprouvettes sont refroidis à l'air (en dehors du four) pendant 24 heures puis écrasées.

Pour chaque température des mesures de pertes de masse sont effectuées. Le degré de déshydratation [Perte de masse (%)] est évalué par la relation suivante

$$[\text{Perte de masse (\%)}] = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (\text{II.15})$$

Avec M_1 , M_2 les masses des éprouvettes avant et après chauffage respectivement. (**ISO 834-1**).



Photo II. 10: Echauffement des éprouvettes dans un four à moufle (Sahraoui. M and Nebih. I, 2015)

II.2.7. La résistance au sulfate de magnésium ($MgSO_4$)

Le sulfate utilisé dans cette étude est le sulfate de magnésium $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ extra pur. La solution dans laquelle les éprouvettes ont été immergées est dosées à **1.8%** de $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ selon (Hartshorn et al., 2002), c'est-à-dire en dissolvant 38.2g $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ dans une litre d'eau distillée. La préparation de la solution de $MgSO_4$, consistait à faire chauffer l'eau distillée avant d'ajouter la quantité déterminée de sulfate de magnésium et ceci pour permettre la dissolution totale du sulfate de magnésium qui se trouvait sous forme de petits cristaux blancs. Ensuite cette solution est versée dans des bacs en plastique dans lesquelles on a disposé les échantillons destinés pour l'études de la durabilité envers les sulfates (Damene, 2005).

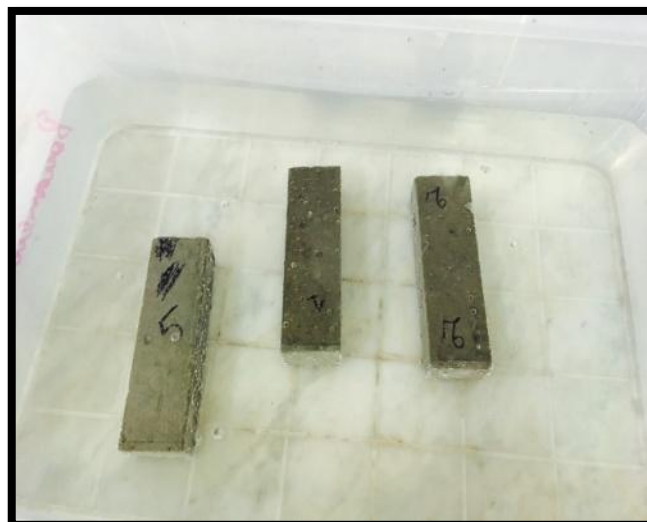


Photo II. 11: Immersion des éprouvettes dans la solution de Sulfate de magnésium

CHAPITRE III

Discussion des résultats expérimentaux

Discussion des résultats expérimentaux

III.1/ Introduction

Notre étude consiste à l'élaboration d'un béton léger à base de sable de dune et déchet de plastique (polyéthylène téréphtalate) comme granulats léger substitué dans le sable. Ce composite sera appelé BSPET.

Le travail expérimental mené est subdivisé en trois volets :

En premier lieu : on cherche à voir l'influence de la substitution de PET sur la maniabilité du béton de sable pour chaque pourcentage du PET (5% ,10%,15%,20%,25%).

En deuxième lieu : on optimise les rapports E/C pour chaque pourcentage de PET puis on déduit le pourcentage optimal ayant la meilleure résistance à la compression.

Le troisième volet consiste à discuter les résultats des propriétés physico-mécanique et thermique ainsi que les résultats de durabilité de la composition choisie pour l'étude.

III.2/Formulation du béton BSPET

III.2.1/Composition choisie

La confection d'un béton de sable consiste à définir la composition du mélange optimal des différents constituants dont on dispose ainsi que le dosage en eau et les agrégats.

Suite à des études antérieures (**Damene et al, 2014**) concernant le choix de la composition d'un béton à base de sable dunaire selon le rapport C/S, nous avons opté à l'élaboration du béton de sable avec le rapport C/S=2/3 au lieu de 1/3 qui a montré des faibles performances à cause de sa faible teneur en ciment ; pour cela on a augmenté le rapport à 2/3 qui donne les meilleures performances mécaniques. La confection de ces bétons consistait à faire varier un pourcentage de substitution de granulats de déchets PET dans le sable et d'optimiser la quantité d'eau nécessaire pour un béton plastique facile à mettre en moule. Pour cela on a fait varier le rapport E/C de 0.45 à 0.55 par pas de 0.01.

Les pourcentages de déchets PET substitués dans la masse de sable de dune pour obtenir un béton de sable avec des granulats PET nommé **BSPET** sont : (5%, 10%, 15%, 20% et 25%).

III.2.2/Mode de préparation des échantillons

a) Malaxage

Le mélange ciment-eau est mélangé pendant 30 secondes à vitesse lente à l'aide d'un malaxeur à mortier normalisé (**photo III.1**). Le mélange sable -PET bien homogénéisé est ensuite introduit graduellement pendant 30 secondes, on reprend le malaxage pendant 30 seconde a vitesse rapide puis un arrêt pour raclez les parois et le fond de la cuve pendant 15 secondes. On reprend ensuite le malaxage pendant 1.15minute a vitesse lente puis deux minute à vitesse rapide afin d'homogène la pâte.

La mis en moule doit se faire immédiatement après l'essai de maniabilité dans notre cas dans des moules normalisés (**photo III.2**). Ces moules servent au moulage de 3 éprouvettes prismatiques de béton de dimension 4x4x16 cm³, puis ils sont conservés dans les conditions de laboratoire ($T=15\pm5^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative de $60\pm5\%$) durant 24h.



Photo III. 1:Malaxeur normalisé pour pâte et mortier.



Photo III. 2: Moule normalisé de 4x4x16 cm²

Après 24 heures, on démoule les éprouvettes et on les place dans la chambre de conservation conditionnés de température de $25\pm 5^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative de $85\pm 5\%$.

III.2.3/ Etude du béton de sable BSPET à l'état frais

L'étude des bétons de sable BSPET à l'état frais consistait à l'étude de maniabilité des différentes compositions confectionnées avec différents rapport E/C dans le but de chercher les quantités d'eau nécessaires pour avoir un béton plastique, le principe d'optimisation est de déterminer les rapport E/C qui donnent le même temps de maniabilité d'écoulement au maniabilimètre B. Ce temps qui est fixé à 5 secondes (béton plastique et facile à mettre en moule).

Tableau III. 1: Optimisation des différentes compositions par l'essai au maniabilimètre B.

	Pourcentage de PET substitué	E/C	Temps (secondes)
BSPET0	0%	0.45	5.14
BSPET1	5%	0.44	4.43
BSPET2	10%	0.43	5.78
BSPET3	15%	0.43	5
BSPET4	20%	0.43	5.61
BSPET5	25%	0.49	5

La figure III.1. Représente la variation du temps d'écoulement en fonction du rapport E/C des différents pourcentages du PET en fonction du rapport E/C, et la figure III.2 représente la variation du rapport E/C en fonction des pourcentages en granulats PET substitués dans le béton de sable dunaire.

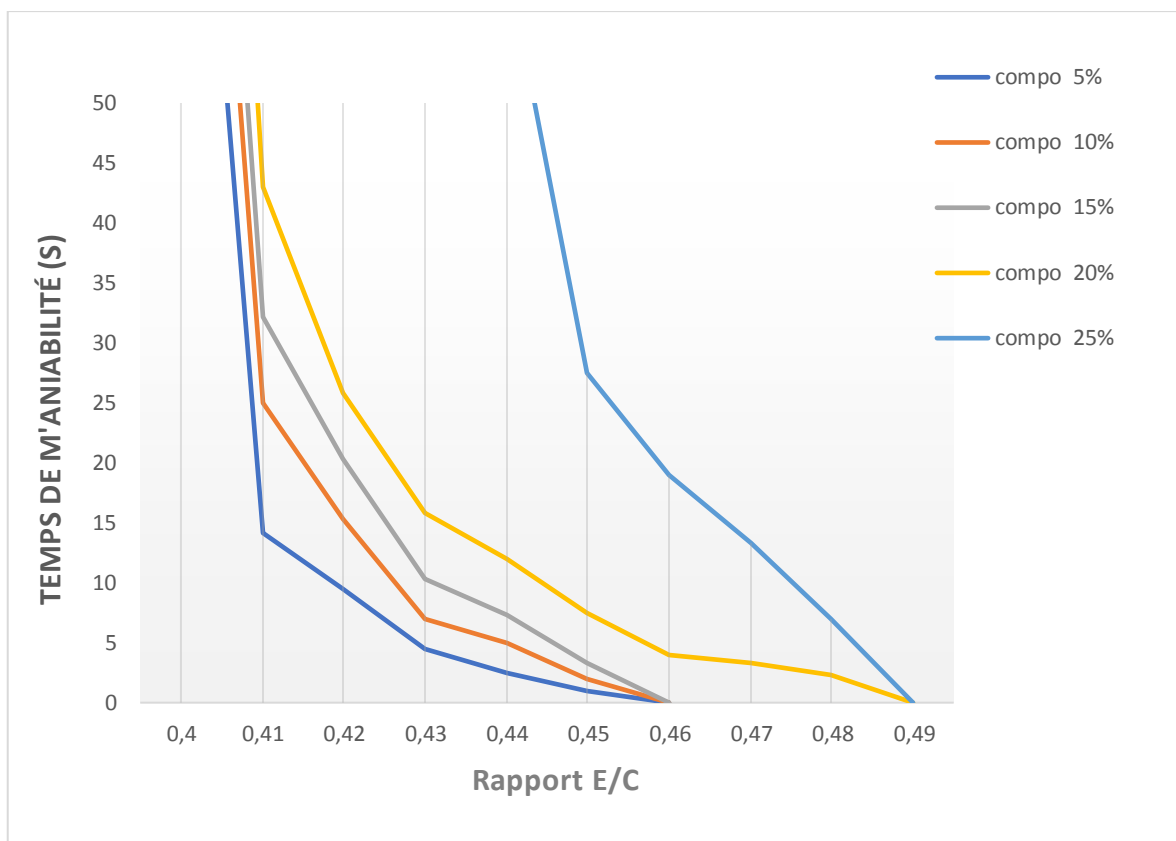


Figure III. 1 : Variation du temps d'écoulement en fonction du rapport E/C des différentes pourcentages du PET.

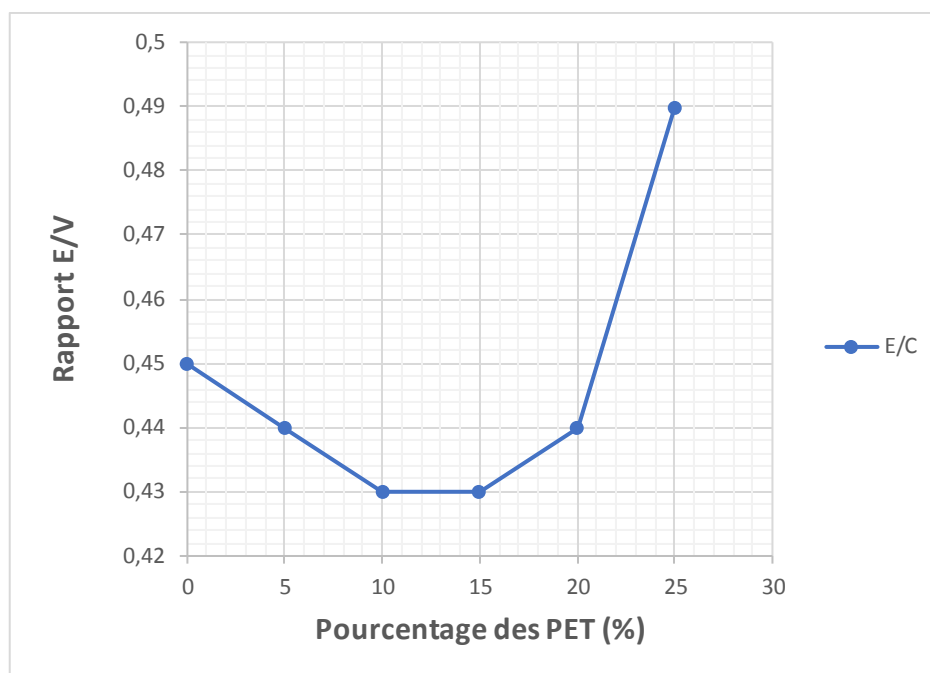


Figure III. 2: Variation du rapport E/C des en fonction des différents pourcentages du PET.

Ces résultats montrent que le rapport E/C diminue avec l'ajout des granulats PET dans la composition ceci est révélé pour les pourcentages (5%,10 %,15%). Par contre au-delà de 15%, on remarque que l'augmentation de pourcentage du PET substitué dans le béton de sable BSPET fait augmenter le rapport E/C. on a noté lors du malaxage une mauvaise maniabilité pour les pourcentages de 20% et 25% ce qui nous a obligé d'augmenter la quantité d'eau. Ceci est confirmé dans les travaux de **(Rai et al, 2012)** qui a reporté dans ses études que la substitution des granulats PET dans le sable avec un pourcentage de 5% jusqu'à 15%, entraîne une diminution de la maniabilité qui atteint les 37% tandis que quand la quantité des PET dépasse 20% la pâte devient ferme et demande plus d'eau.

(**Batayneh et al, 2007**) trouve qu'il y a deux point de vues parallèles sur le comportement d'ouvrabilité du béton contenant un agrégat plastique.

Dans la majorité des études comme l'étude de **(Ismail and A Al-Hashmi, 2007)**, qui assure que la valeur d'affaissement du béton frais est plus faible par rapport à celle du mélange de béton conventionnel, ceci est due à l'ajout croissant des agrégats en plastique qui abaisse encore la valeur d'affaissement ce qui est en accord avec nos résultats.

(Saikia et Brito, 2012) voit que, les raisons de la plus faible valeur d'affaissement du mélange de béton contenant des granulats plastiques sont les arêtes vives et la granulométrie angulaire des granulats plastiques.

Contrairement (**Wang Choi et al, 2009**), remarquent une augmentation de la valeur d'affaissement due à l'incorporation d'agrégat plastique ; cette dernière est en raison de la présence d'eau libre dans les mélanges contenant du plastique que dans le béton mélange contenant des granulats naturels seuls, les granulats plastiques ne peuvent pas absorber l'eau pendant le mélange. L'ouvrabilité du béton diminue en raison de la résistance offerte par les agrégats. En outre, leur étude a aussi montré que la forme et la taille du PET ajouté ou remplacé possède un grand effet sur les propriétés à l'état frais.

III.2.4/Masse volumique apparente sèche

La masse volumique des bétons légers est l'une des caractéristiques les plus importantes. Sur la base de cette caractéristique nous pouvons classer notre béton et indiquer son domaine d'application. Elle est définie comme le rapport de la masse de l'échantillon à son volume apparent à l'état sec. Les masses sèches des bétons durci ont été déterminées par pesée à l'âge de 14 jours après séchage à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante.

Tableau III. 2: Moyennes des masses volumiques apparentes sèches en fonction du pourcentage du PET utilisé.

Pourcentage du PET	Masse volumique sèche (kg/m ³)
Témoin (0% PET)	2070.01
5%	1952.39
10%	1916.74
15%	1893.94
20%	1889.06
25%	1883.54

La figure III.3 permet de constater que la masse volumique apparente sèche du matériau étudié diminue lorsque le dosage en PET substitué dans le sable des béton BSPET augmente.

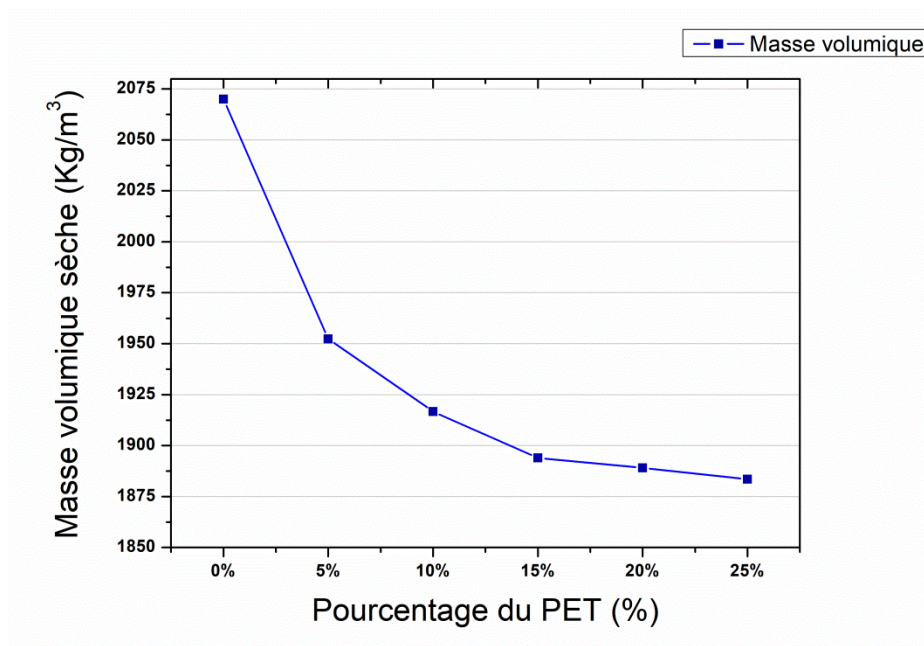


Figure III. 3: Évolution de la masse volumique sèche en fonction du pourcentage du PET.

La diminution de la masse volumique est de l'ordre de 5.7%, 7.4%, 8.7% et 9% respectivement pour les dosages en PET (5%, 10%, 15%, 20% et 25%). Notons que cette légère diminution est aussi confirmée dans la littérature (**Yazoghli et al, 2007**). Quoique ce taux de réduction est faible ; on observe plus la quantité des granulats PET augmente, plus la densité diminue, cela est dû à la nature légère des granulats de PET. Ces résultats sont en accord avec les résultats de (**Saikia and Brito, 2014**)et (**Akçaözoğlu et al, 2010**).

III.2.5/ Etude de la résistance à la compression des bétons BSPET

Des essais d'écrasement des éprouvettes confectionnés pour les différents composites (BSPET0, BSPET1, BSPET2, BSPET3, BSPET4, BSPET5) sont effectués à l'âge de 14 jours pour voir l'influence de la substitution des granulats en plastique sur la résistance à la compression. Les résultats illustrés sur le graphe de la **figure III.4** ; ont montré l'existence d'un optimum de substitution des granulats en plastique qui donne le meilleur comportement vis-à-vis de la résistance à la compression.

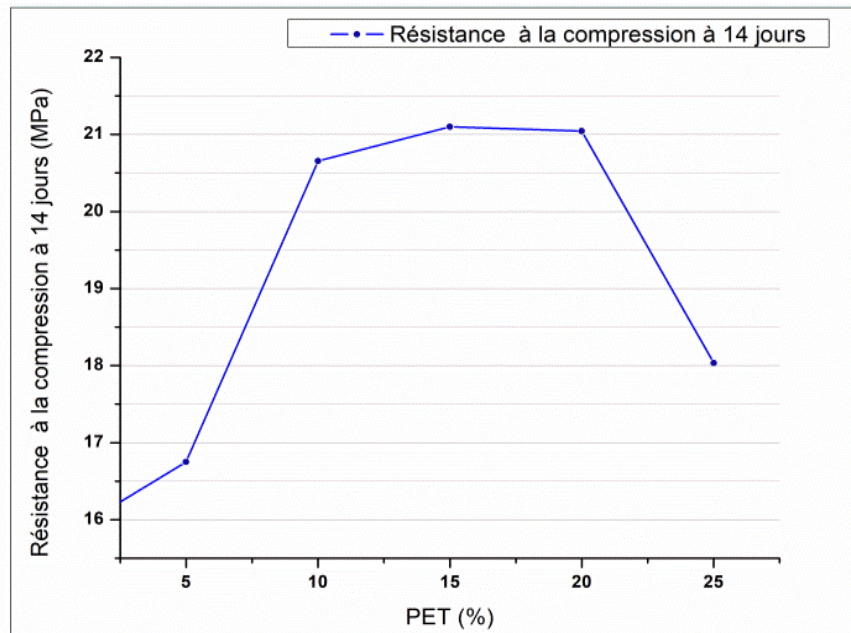


Figure III. 4: Evolution de la résistance à la compression à 14j en fonction des pourcentages de PET.

D'après figure III.4 ci-dessous, nous constatons que la résistance à la compression à l'âge de 14 jours augmente avec l'augmentation du pourcentage des PET.

On remarque que la résistance à la compression est en augmentation par rapport au pourcentage des PET, elle est de 15.71 MPa pour un béton témoin BSPET0. Et elle vaut 16.75 MPa pour un pourcentage de 5% de PET.

Cet augmentation continue jusqu'à qu'elle atteigne une valeur maximale pour un béton BSPET3 (15%) qu'il une résistance égale à 21.10 MPa c'est-à-dire une augmentation de 34%, puis elle diminue lorsque le dosage en PET augmente au-delà de 15%, la résistance décline jusqu'à 18.03 MPa pour une béton de 25% de PET (BSPET5), c'est-à-dire une diminution de presque 15% par rapport au BSPET3 (15%).

Nos résultats sont en accord avec (Saikia et Brito, 2014) et (Yazoghli et al, 2007), qui explique que les facteurs qui peut être responsable de la faible résistance à la compression du béton contenant un pourcentage élevé des agrégats de plastique sont: (1) la très faible force d'adhérence entre la surface des déchets plastiques et la pâte de ciment; (2) la nature hydrophobe des déchets plastiques, qui peuvent inhiber la réaction d'hydratation du ciment en limitant le mouvement de l'eau.



Photo III. 3: Echantillon éclaté par compression.

III.3/ Etude du béton BSPET3

III.3.1/ Résistance à la compression du BSPET3 (15%)

Les résultats de la résistance à la compression de notre mélange optimale BSPET3 sont illustrés dans la **figure III.5** qui représente la résistance à la compression de 7, 14, 28 et 60 jours.

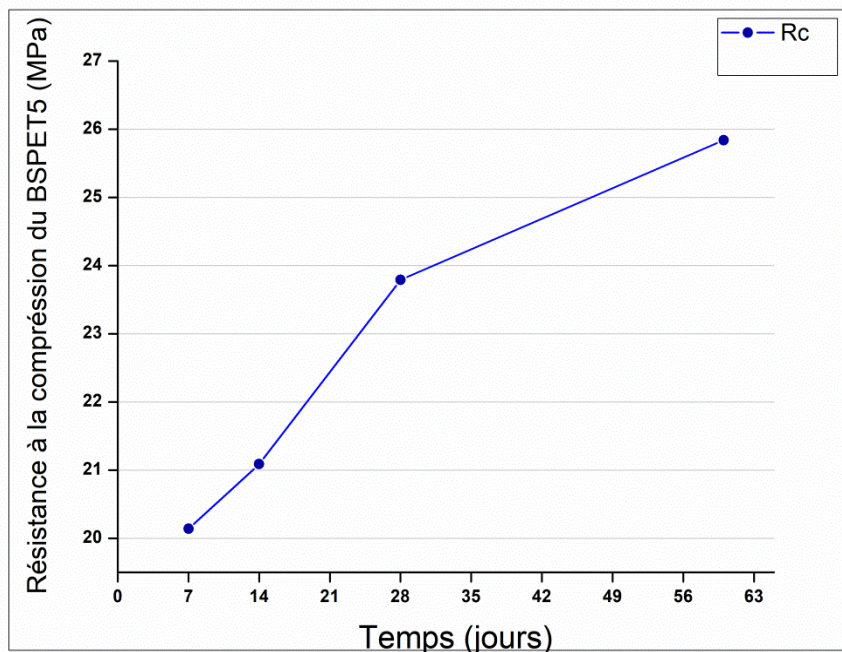


Figure III. 5: Développement de la résistance à la compression du BSPET3 en fonction de l'âge.

D'après la **figure III.5** ci-dessus, nous constatons que la résistance à la compression du composite BSPET3 augmente avec l'âge mais la variation est légère ; elle est de 20.14 MPa à 7 jours et elle vaut 23.78 MPa à 28 jours d'âge.

La résistance à la compression à l'âge de 28 jours est proche de celle à 60 jours ce qu'il le confirme (**Rahmani et al, 2013**).



Photo III. 4:Eprouvette écrasé par compression avec 15% de PET.

III.3.2/ Résistance à la traction du BSPET3

Les résultats de la résistance à la traction de notre composite BSPET3 sont présentés dans la **figure III.6** qui représente la courbe de la résistance à la traction à 7j, 14j, 28j et 60 jours.

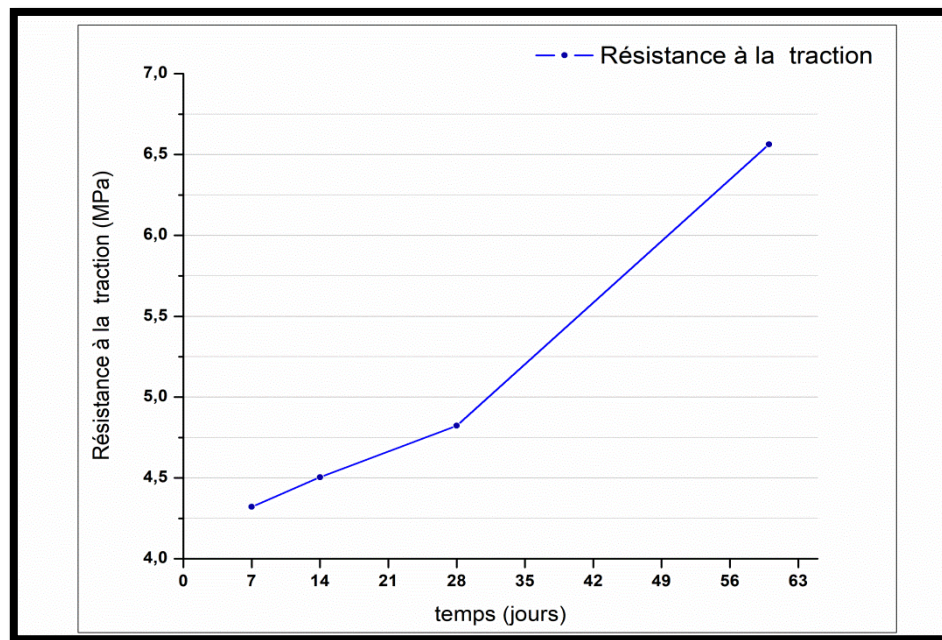


Figure III. 6:Développement de la résistance à la traction du BSPET3 en fonction de l'âge.

D'après la **figure III.6** ci-dessus, nous constatons que la résistance à la traction augmente aussi légèrement en fonction de l'âge (7j, 14j, 28j et 60j). Elle est de l'ordre de 4.32 MPa à l'âge de 7jours jusqu'à 6.56 MPa à l'âge de 60 jours.

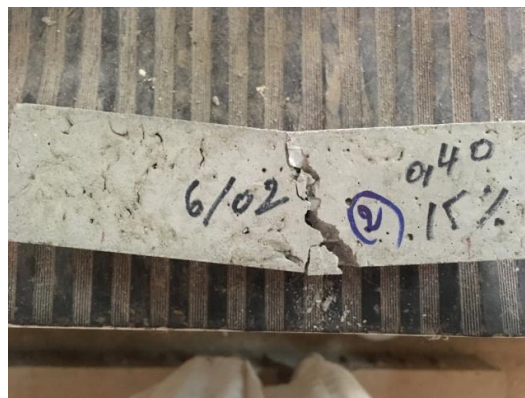


Photo III. 5:épreuve écrasé par traction avec 15% de PET.

III.3.4/ Mesure du Retrait

Les mesures de retrait sont effectuées sur les éprouvettes en utilisons le montage illustré dans la **photo III.3** aux échéances suivantes :

- ❖ Au démoulage, mesure d'origine des variations.

- ❖ A 1,2,3,4,7, 14 et 28 jours après la confection des éprouvettes.
- ❖ Les valeurs de retraits obtenues sont illustrées dans la courbe de la **figure III.7**.



Photo III. 6: Appareillage du retrait.

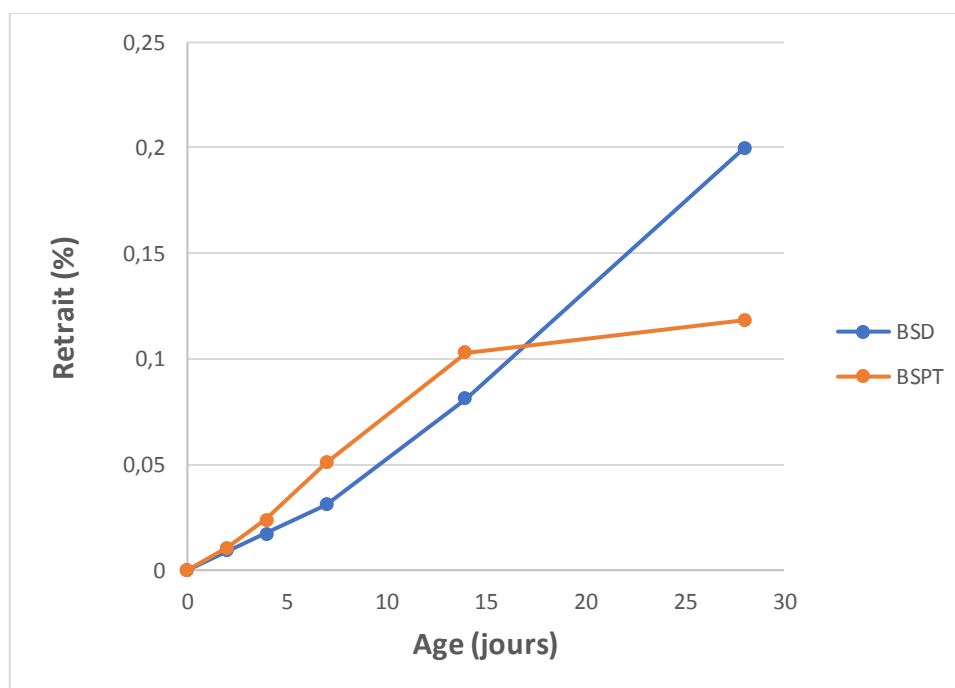


Figure III. 7: Evolution du retrait en fonction de l'âge.

La figure III.7 présente l'évolution du retrait en fonction de l'âge, les résultats montrent que l'incorporation des agrégats de PET dans le béton de sable dunaire fait augmenter légèrement le retrait au cours des 14 premiers jours de durcissement. Mais après le 14^{ème} jour, le retrait du BSPET reste constant par rapport au béton de sable dunaire témoin dont le phénomène de retrait continue à évoluer.

Nos résultats sont en accord avec la littérature. (Marques da Silva et al, 2014) expliquent cette diminution par la diminution légère de la capacité de séchage. L'évaporation de l'eau capillaires entraîne un rétrécissement, une évaporation plus lente entraîne un rétrécissement plus lent, correspondant également à un rétrécissement plus faible, en raison du gain de rigidité avec le temps d'hydratation.

(Soroushian et al, 2003) explique les résultats de retrait obtenus du BSPET en raison de la capacité du plastique à réduire la largeur de la fissure de retrait car il se comporte comme des fibres et arrête les microfissures et fait un pont à travers les fissures pour restreindre leur élargissement.

III.3.5/ Mesure de la sorptivité (l'absorption capillaire)

L'essai d'absorption a été effectué sur 6 éprouvettes pendant 120mn, la masse d'eau est mesurée pendant chaque période du temps, les résultats sont représentés dans la figure III.8



Photo III. 7:Montage expérimental utilisé dans l'essai d'absorption.

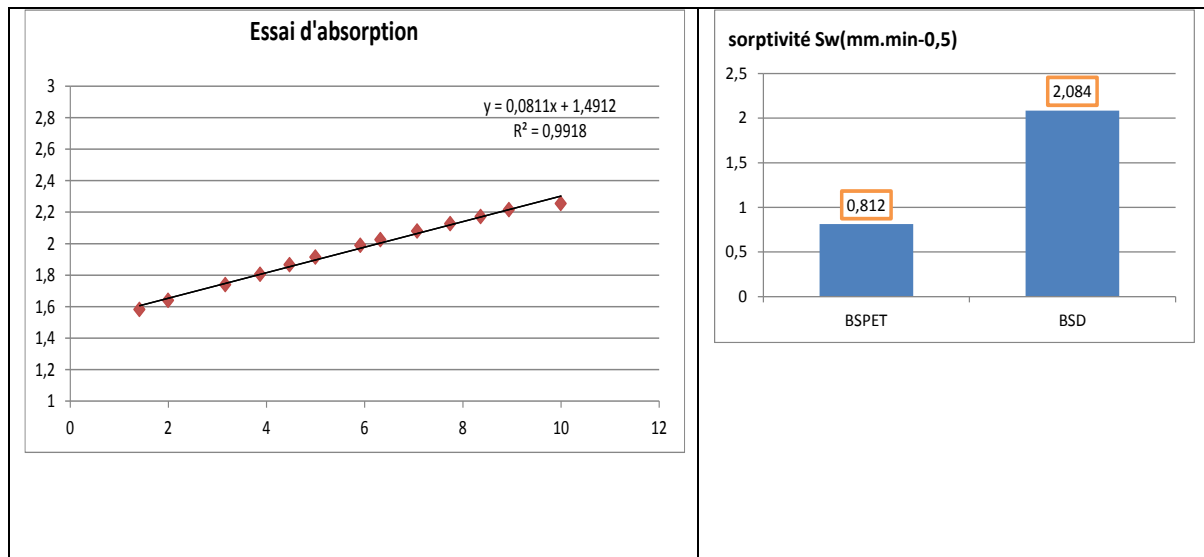


Figure III. 8.Évolution de la masse d’eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps et sportivité S_w du BSPET et BSD.

Selon l’évolution de la masse d’eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps et les valeurs de sportivité. Il paraît que le BSPET3 absorbe moins vite que le BSD. Il possède une absorption très faible par rapport au béton de sable dunaire, la valeur de la sportivité diminue de plus de 50% ; ceci s’explique par une diminution considérable des pores capillaires lorsqu’on introduit les granulats PET (Ge et al, 2014)

En accord avec (Yazoghli et al, 2007) et (Choi et al, 2009) la sportivité a diminué dans le **BSPET3** par rapport au béton témoin à cause de la propriété hydrophobe des PET qui a contribué à ralentir la propagation des eaux, selon (Yazoghli et al, 2007) le coefficient de sportivité peut être 10 fois plus faible et par rapport au béton classique, cela met en évidence la durabilité présente en cas de contact avec eau contenant des agents agressifs.

III.3.6/ Mesure de la porosité introduite

La porosité introduite est reliée à la densité apparente ρ_{PET} sèche du béton BSPET par la relation suivante : $\rho_i = 1 - \frac{\rho_0}{\rho_{PET}}$

Où ρ_0 est la densité apparente sèche du béton BSD (sans PET).

Les résultats obtenus sont tracés sur le graphe de la **figure III.9**.

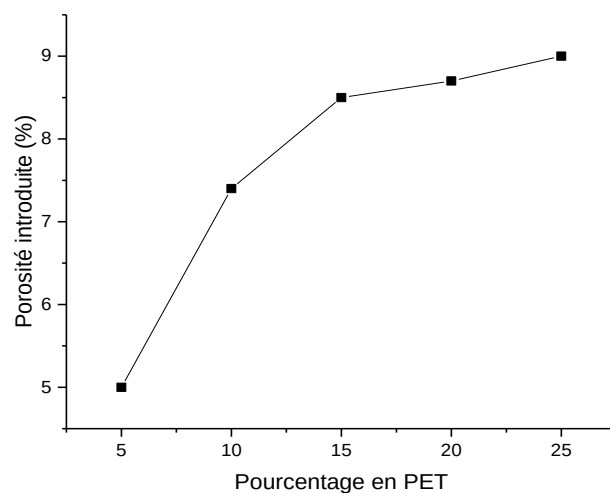


Figure III. 9: L'évolution de la porosité introduite en fonction du pourcentage de PET substitué (Damene, 2017).

L'évolution de la courbe montre qu'une augmentation du taux de substitution de granulats PET augmente le développement de la porosité présente dans la matrice. Ceci est peut-être dû à la mauvaise liaison entre les granulats (forme des PET) et la matrice voir (**photo III.8**) (Porrero et al, 2004).



Photo III. 8: Images de microscope optique de (0.6mm) montrent l'adhérence matrice-PET.

III.3.7/ Mesure de la conductivité thermique

Pour mettre en évidence les propriétés d'isolation thermique du BSPET, L'essai est effectué par la méthode du fil chaud à l'état sec des éprouvettes. Les résultats sont illustrés dans la figure III.10.

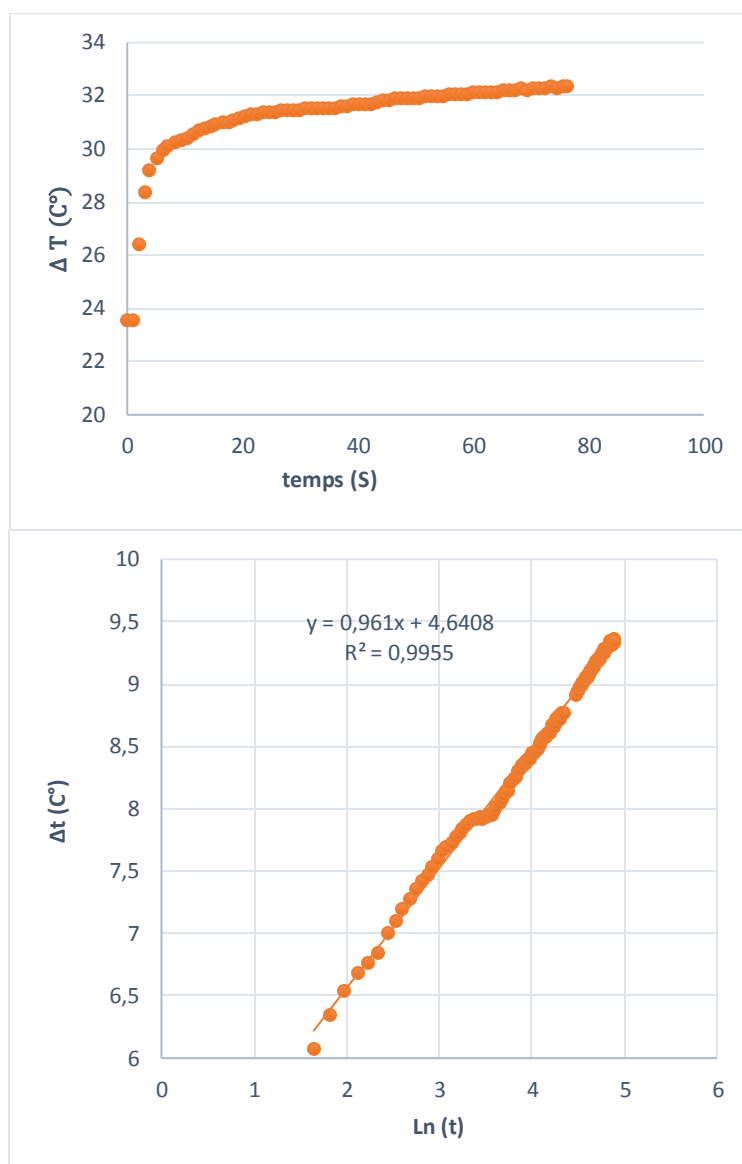


Figure III. 10:Thermogramme d'un échantillon BSPET3.

La valeur de la conductivité thermique λ du BPET3 a été définie d'après le thermogramme ci-dessus. Les résultats sont montrés dans le **tableau III.3** ci-dessous.

Tableau III. 3:Valeurs de la conductivité thermique.

Bétons	BSD (Saiti Issam, 2014)	BSPET3	BSDC (%Al=0.4) (Saiti Issam, 2014)
Conductivité thermique (λ) W / (m.K)	1, 447	1. 046	0. 733

D'après le **tableau III.3** on constate que la conductivité thermique du BSPET est inférieure à celle de béton de sable dunaire. L'incorporation du PET dans le sable réduit la densité et entraîne une diminution de la conductivité par rapport au BSD de 28%. En effet, la conductivité thermique dépend de la densité, de l'état d'humidité ainsi que des caractéristiques des constituants du matériau. Plus le matériau est dense, plus sa conductivité thermique est élevée (**Damene Z, 2017**). Nos résultats d'essai de la conductivité thermique, sont en concordance avec la littérature (**Akçaözoglu et al, 2013; Hannawi et al, 2010; Yazoghli et al, 2005**).

(**Akçaözoglu et al, 2013**) ont expliqué cette diminution par la faible conductivité thermique des agrégats plastiques utilisés ainsi que la porosité plus élevée du composite. (**Hannawi et al, 2010**) montrent que l'incorporation des agrégats plastiques cause une augmentation du volume des vides d'air, la conductivité globale a diminué en raison de la très faible conductivité thermique de l'air (0,024 W / (m.K)).

III.3.8/ Résistance aux agressions chimique des sulfates

Les éprouvettes soumis à des cycles séchage-mouillage dans la solution sulfatée (**photo III.9**) ont été pesées après chaque cycle, cette procédure est effectuée en vue d'accélérer l'attaque chimique. Les résultats des pesées sont illustrés dans **la figure III.11**.



Photo III. 9: Eprouvettes immergées dans la solution sulfatique (MgSO_4).

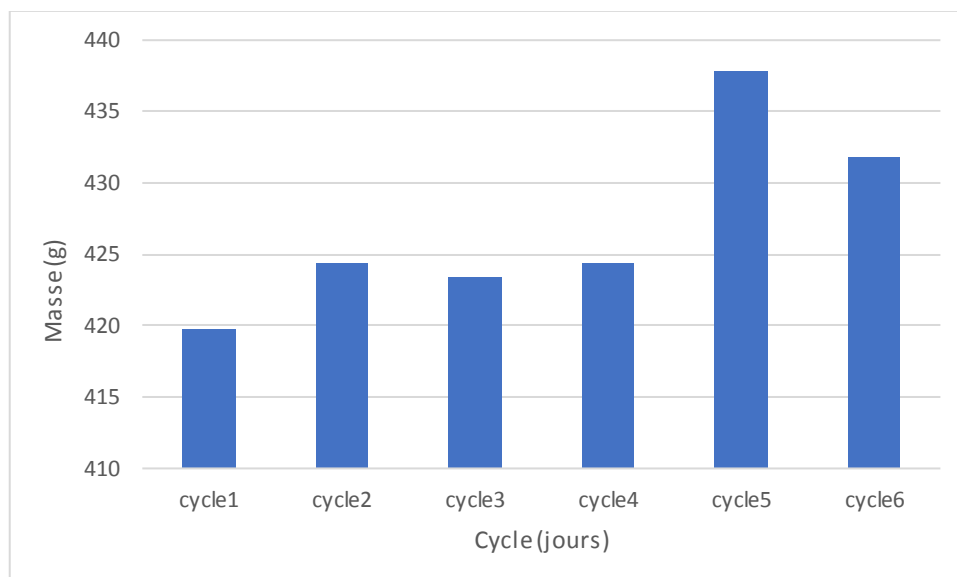


Figure III. 11: Evolution de la masse des échantillons en fonction du cycle d'immersion.

La figure III.11 représente l'évolution de masse des échantillons immergés dans la solution sulfatique (1.8% MgSO_4) après des cycles de séchage à l'étuve et d'immersion dans la solution du sulfate. On remarque que la masse a augmenté depuis le deuxième cycle d'immersion, ceci est dû à la formation de produits chimique expansifs qui sont responsable de l'augmentation de la masse ; un phénomène qui précède la dégradation.

Selon (**E.Attiogbe and H. Rizkalla, 1988**), le gain de poids est attribué à la réaction entre la solution sulfatique et les résultants du ciment, dont la transformation du calcium hydroxyde (CaOH_2) en sulfate de calcium (gypse)(CaSO_4) qui à son tour, peut être converti en sulfoaluminate de calcium (Ettringite). Chacune de ces réactions implique une augmentation de volume des solides réactifs (**photos III.10 et III.11**).



Photo III. 10: Formation de dépôts de produits blanchâtre sur la surface d'éprouvette.

(**E.Attiogbe and H. Rizkalla, 1988**) comparent l'expansion des éprouvettes qui ont été soumis à des cycles séchage-mouillage à celle des éprouvettes qui ont été immergées en continu jusqu'à la fin du programme d'essai. Les éprouvettes qui ont subi un cycle séchage mouillage ont montré un plus grand gain de masse que les autres.

Ceci suggère que les cycles d'exposition humide et sèche aux solutions sulfatiques accélère le degré de détérioration du béton. L'augmentation de la perméabilité du béton due aux fissures de séchage conduirait à un plus grand volume de matériau attaqué par les sulfatiques.

En comparant l'évolution de la perte en masse du béton BSPET avec celle d'un béton de sable dunaire auquel on a substitué du sable alluvionnaire BSAD (**Damene Z, 2005**) (Voir **figure III.12**) ci-dessous. On remarque l'évolution de la perte en masse du BSPET est moins importante par rapport au BSAD, ceci peut être expliqué par le fait que l'ajout des granulats PET réduit la perte en poids. Donc les PET possède un effet bénéfique sur la durabilité vis-à-vis de l'agression chimique.

En d'autres termes, si le but est pour augmenter la durabilité du béton, fournir des particules de PET dans le béton pourrait être efficace. Donc, ce type de béton pourrait être applicable dans les cas où l'objectif est une plus grande durabilité (Araghi et al, 2015).

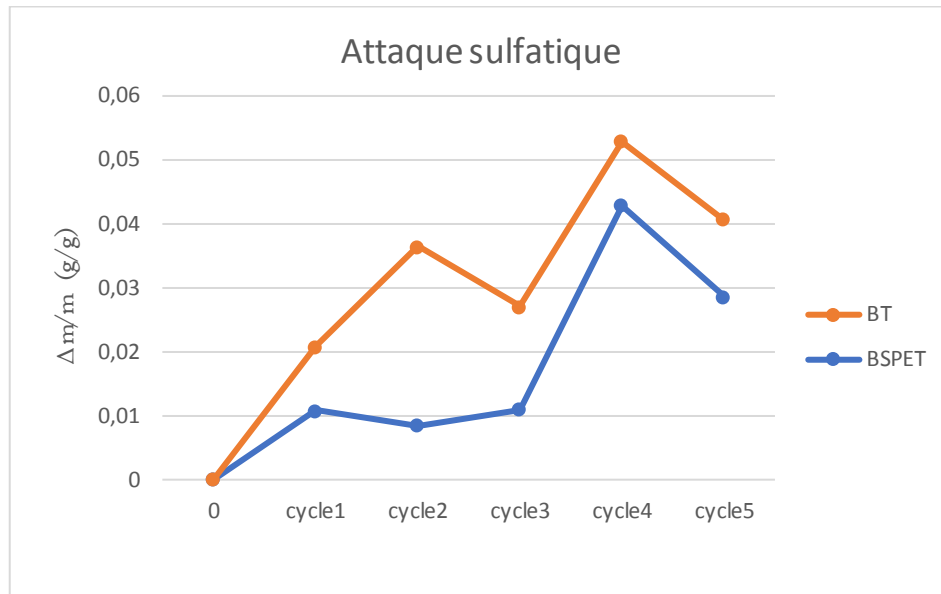


Figure III. 12:évolution de la perte en masse des bétons BSDA et BSPET.

Des essais d'écrasement sont effectués sur les échantillons après 6 cycles d'immersions (35jours) dans la solution $MgSO_4$ pour voir l'influence de l'agression chimique sur la résistance à la compression de ces composites après l'attaque aux sulfates. Les résultats sont présentés sur l'Histogramme de la **figure III.13** Ci-dessous.

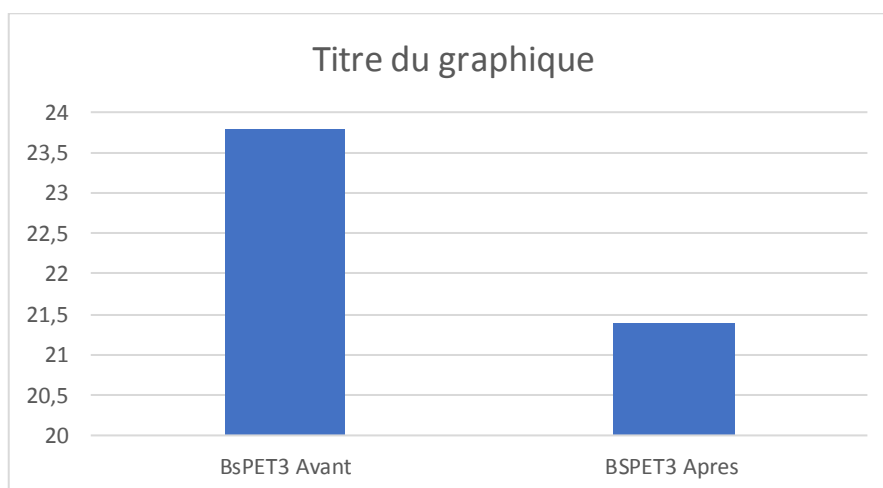


Figure III. 13:Evolution de la résistance a la compression avant et après 6 cycles d'immersions.

On remarque que la résistance à la compression a diminué légèrement après les 6 cycles d'immersion dans le MgSO_4 , avec un taux de 10% de chute.

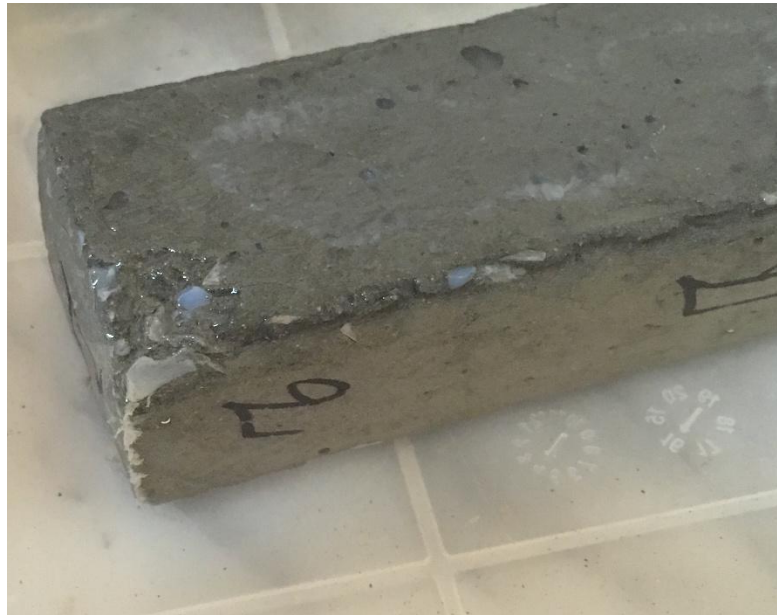


Photo III. 11: Dégradation d'éprouvette immergée dans la solution MgSO_4 après 5 cycles.

(Araghi et al, 2015) Ont trouvé d'après l'essai de l'attaque chimique en utilisant une solution de 5% de MgSO_4 que les échantillons avec 15% de particules de PET ont des pertes de poids le plus faibles et une meilleure résistance à l'attaque de l'acide sulfatique pendant la durée d'essai, cette conclusion peut confirmer nos résultats.

III.3.9/ Résistance au feu

Afin de déterminer le comportement au feu du béton BSPET3 contenant 15% d'agrégats de PET. Des demis prisme ont été placés dans un four à moufle, la température à l'intérieur du four a été augmentée jusqu'à une température prédéterminée, les plaques ont été maintenues à cette température pendant 2 h, puis le chauffage a été arrêté immédiatement. Les températures choisies pour cette étude étaient de 200 C° , 300 C° , 400 C° .

Après refroidissement de l'échantillon à température ambiante, la perte en masse a été mesurée ainsi que la résistance à la compression. En parallèle, des échantillons non chauffés ont été testés (BT). Leurs résultats sont présentés sur la figure III.12.

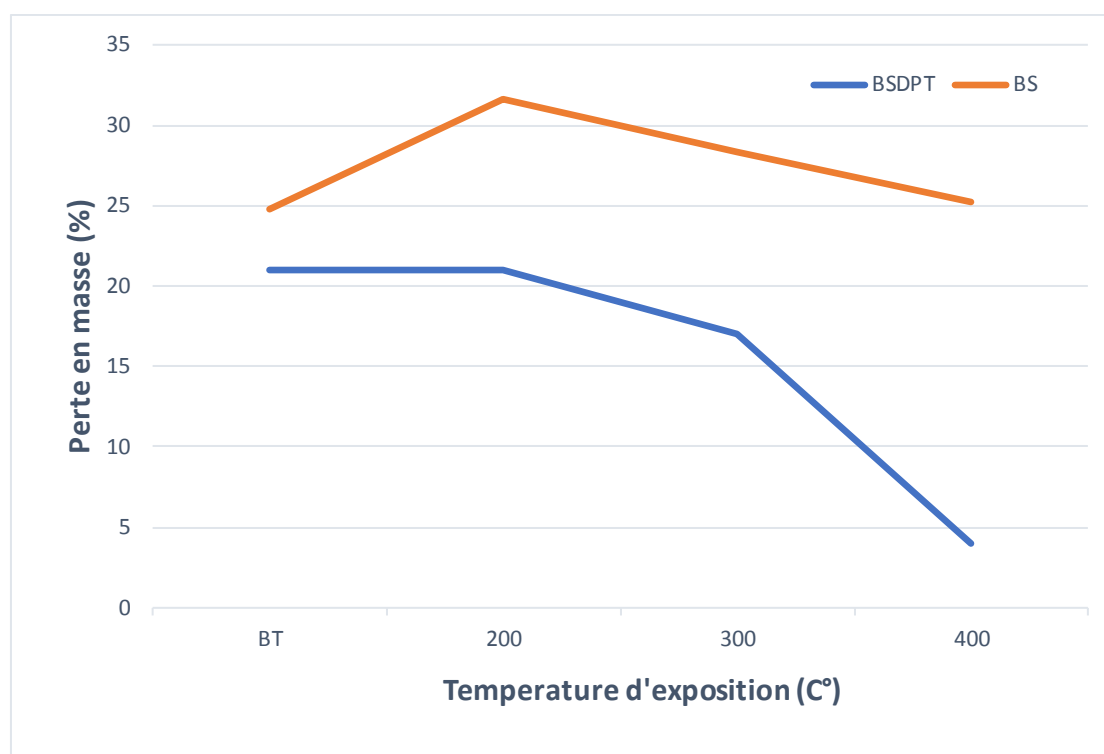


Figure III. 14:La perte en masse en fonction des températures.

On constate l'augmentation de la température est accompagnée d'une perte en masse ; pour une température du 200C°, 300C°, 400C° les pourcentages de la perte en masse sont 6.7%, 8.24% et 13.5% respectivement ; donc plus la température augmente, plus on perd dans la masse du béton (détérioration).

La figure III.15 ci-dessous, présente la résistance à la compression des éprouvettes en fonction de la température pour un bétons de sable (BS), et béton de sable avec PET (BSPET3)

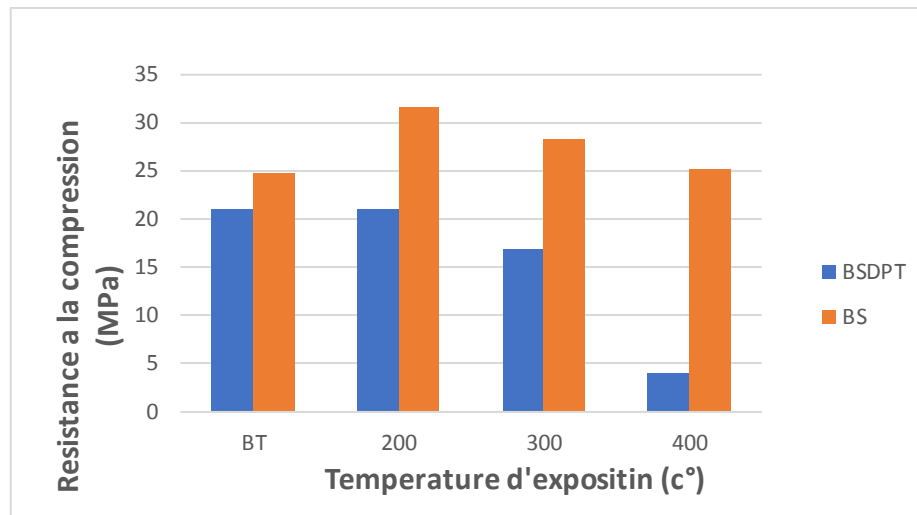


Figure III. 15: Résistance à la compression en fonction de la température.

On constate qu'il y a une diminution dans la résistance à la compression en augmentant la température pour chaque type du béton, La chute de la résistance pour le BSPET est plus remarquable que celle du BS.

La résistance à la compression diminue considérablement concernant les éprouvettes soumises à 400C° jusqu'à 82% de perte par rapport au béton témoin.

(Albano et al, 2009) expliquent ce résultat par le fait que l'agrégat de PET est plus sensible à la température que l'agrégat de sable naturel. Le changement de volume et la dégradation des particules PET produisent moins de cohésion entre les composants du béton.

La stabilité thermique des agrégats de PET diminuait en raison de la dégradation hydrolytique des particules de PET. La formation de groupes terminaux carboxyle et hydroxyle s'est produite en raison de la réaction d'une molécule d'eau avec une molécule de PET, qui a accéléré sa décomposition. En outre, la vapeur d'eau était difficile à être soumise à des hautes températures, de sorte que la pression de vapeur favorise la formation de fissures dans le béton.



Photo III. 12:Eprouvette calcinée a 300C°



Photo III. 13:Eprouvette calcinée a 400C°.

D'après les **photos III.12** et **III.13** on constate que l'augmentation de la température accompagne une dégradation critique des éprouvettes.

Selon (**Lima et al, 2012**) au-dessus de 100 ° C, l'eau libre retenue par capillarité à l'intérieur du béton commence à s'évaporer. Ce processus se termine entre 200 ° C et 300 ° C

sans aucun changement majeur dans le béton. La déshydratation de la matrice cimentaire se produit entre 300 ° C et 400 ° C, ce qui conduit à une perte de résistance importante et à l'apparition de fissures superficielles. À des températures plus élevées (entre 400 ° C et 800 ° C), les différentes dilatations thermiques des composants du béton provoquent des contraintes internes et des fissures subséquentes.

III.4/ Synthèse du chapitre

Ce chapitre a été consacré à présenter et interpréter les résultats des essais physico-mécaniques, thermiques et chimiques des bétons de polyéthylène téréphtalate élaborés BSPET, ainsi que les variations dimensionnelles de ces derniers. Cette partie nous a permis de prendre connaissance des classes de bétons légers en fonction de leurs densités et les valeurs limites des résistances mécaniques et de la conductivité thermique λ .

Tableau III. 4:Récapitulative des différents résultats.

	BSD	BSPET
ρ (kg/m³)	2070,01	1893.94
ρ_i (%)	/	8,5
R_{c28} (MPa)	25,09	23,8
$\lambda_{sec w}/(m.K)$	1.447	1. 046
S_w (mm.mn^{-0.5})	2.084	0.081
Classe	Classe I	

D'après le tableau, on conclue que le BSPET3 est un béton de construction avec une bonne capacité d'isolation.

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

CONCLUSION GENERALE

Ce travail avait pour objectif l'étude de la formulation et la caractérisation physicomécanique et thermique d'un composite ciment-sable de dune au quel on a substitué des déchets de plastique (PET). Il s'agit de montrer les potentialités d'utiliser les ressources locales, notamment les sables de dunes, et le recyclage des déchets de plastique dans le domaine de construction, en vue de développer un matériau de construction mécaniquement et thermiquement performant, et répondant aux exigences d'économie et de développement durable.

Afin d'atteindre cet objectif, on a subdivisé ce travail en deux volets : le premier consiste en la détermination d'une composition optimale du mélange ciment-sable de dune et PET à partir de la résistance mécanique. Le deuxième volet consiste à examiner les performances physico-mécanique, thermique et de durabilité du béton de sable de polyéthylène téréphtalate BSPET. Les résultats expérimentaux de cette étude ont permis de conclure ce qui suit :

- La maniabilité du béton de sable BSPET augmente en fonction de l'augmentation du pourcentage en déchets plastique jusqu'à 10 à 15% où l'ajout des PET a montré un besoin dans la quantité d'eau. Ce qui implique que plus le taux de substitution des granulats PET est élevé, plus le rapport E/C augmente.
- La densité a été allégée en augmentant le pourcentage des déchets ajoutés.
- La résistance à la compression augmente avec l'augmentation des déchets ajoutés jusqu'à un optimum de 15%, puis elle diminue en fonction de pourcentage de déchets de plastique ajoutés.
- L'incorporation des déchets de plastique dans le béton de sable dunaire augmente légèrement le retrait à jeune âge, mais après le 14^{ème} jours, le phénomène de retrait se trouve stabilisé par rapport au béton de sable dont le retrait continue à évoluer.
- La sorptivité diminue avec l'introduction du déchet PET de plus de 50% par rapport au béton de sable dunaire.
- L'incorporation des déchets améliore les propriétés d'isolation en diminuant la conductivité thermique.
- L'attaque accélérée au sulfate de Magnésium $MgSO_4$ provoque une augmentation de la masse due à la formation des nouveaux composants expansifs (ettringite secondaire)

et une chute de résistance légère d'environ 10%. Comparé avec un béton de sable mélange, le BSPET a montré une réduction dans la perte en masse ainsi qu'une diminution dans la chute de résistance.

- D'après l'essai de la résistance aux feux, le béton de déchets plastique BSPET peut résister si la température ne dépasse pas 300C°.

Sur la base des résultats obtenus, on peut conclure que ce nouveau composite BSPET des déchets plastiques avec les matériaux locaux (sables de dunes) semble offrir un alternatif économique, environnementale et technologique, il aiderait à résoudre certains problèmes relatifs à la gestion des déchets solides créés par la production des plastiques et pourrait être un facteur économique générateur de valeurs ajoutés, aussi il peut répondre à certaines demandes moins coûteuses dans le secteur de la construction.

Recommandations et perspectives de recherches

- Pour les futures recherches, nous recommandons d'utiliser les déchets plastique avec la composition C/S=1/3 pour une éventuelle comparaison.
- De faire une analyse détaillée de la porosité, de la distribution et de la taille des pores (porosimétrie au mercure).
- D'étudier les propriétés de tous les composites élaborés à différents pourcentages.
- L'utilisation des fine d'ajout tels que les fines de brique et l'argile calcinée dans le composite pour améliorer les performances mécaniques.
- Pour rassurer la durabilité de ce types de composites, L'étude de l'attaque sulfatique a long terme et l'étude d'autres altérations du béton ; carbonatation et pénétration des ions chlorures...est nécessaire.

Références Bibliographiques

- Akçaözöğlü, S., Akçaözöğlü, K., Duran Atiş, C., 2013. Thermal conductivity, compressive strength and ultrasonic wave velocity of cementitious composite containing waste PET lightweight aggregate (WPLA). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.012>
- Akçaözöğlü, S., Atiş, C.D., Akçaözöğlü, K., 2010. An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. *Waste Management* 30, 285–290. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.033>
- Albano, C., Camacho galindez, N., Hernández, M., Matheus, A., Gutiérrez, A., 2009. Influence of content particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratio. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.05.007>
- Al-Manaseer, A.A., Dalal, T.R., 1997. Concrete containing plastic aggregates.
- Araghi, H.J., Nikbin, I.M., Reskati, S.R., Rahmani, E., Allahyari, H., 2015. An experimental investigation on the erosion resistance of concrete containing various PET particles percentages against sulfuric acid attack. *Construction and Building Materials* 77, 461–471. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.037>
- Assié Stéphan, 2004. Durabilité des bétons autoplaçants (Doctorat). INSA de Toulouse, France.
- Attigbe, E., H. Rizkalla, S., 1988. Response of concrete to sulfuric acid attack 85.
- Azhdarpour, A.M., Nikoudeh, M.R., Taheri, M., 2016. The effect of using polyethylene terephthalate particles on physical and strength-related properties of concrete; a laboratory evaluation. *Construction and Building Materials* 109, 55–62.
- Batayneh, M.K., Marie, I., Asi, I., 2007. Use of selected waste materials in concrete mixes 27. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.07.026>
- Bederina, M., Mouldi, K., Dheilly, R.M., Quéneudec, M., 2005. Reuse of local sand: Effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concretes 35. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.006>
- Belferrag Allaoua, 2006. Valorisation des fibres métalliques issues des déchets pneumatiques dans les bétons de sable de dunes (Doctorat). KASDI Merbah de Ouargla.
- Belmechri Oum Habiba, 2012. Etude d'un composite à base de sable de dune, Ciment et granulats en billes de polystyrène expansé (Magistère). UATL.
- Benabed, B., Azzouz, L., Kadri, E.-H., Kenai, S., Belaidi, A.S.E., 2014. Effect of fine aggregate replacement with desert dune sand on fresh properties and strength of self-compacting mortars. *Journal of Adhesion Science and Technology* 28, 2182–2195.
- Benimam, S., Debieb, F., Bentchikou, M., Guendouz, M., 2014. Valorisation et Recyclage des Déchets Plastiques dans le Béton. *MATEC Web of Conferences* 11, 01033. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20141101033>
- Benosman, A., kazi, N., Senhadji, Y., Taibi, H., M, M., 2017. Mechanical strengths of modified PET mortar composites in aggressive MgSO₄ medium: ACI & B.S predictions 4. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1173375>
- Bentata Aissa, 2004. ETUDE EXPERIMENTALE D'UN BETON DE SABLE. (Magistère). UNIVERSITE DE OUARGLA.
- Casanova, P., 1996. Béton renforcés de fibres métalliques du matériaux à la structure.
- Cérézo Véronique, V., 2005. Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique. Institut National des Sciences Appliquées, Lyon.
- Chanvilard, G., Basyaux, O., 1996. Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées.
- Choi, Y.-W., Moon, D.-J., Chung, J.-S., Cho, S.-K., 2005. Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.014>

- Choi, Y.W., Moon, D.J., Kim, Y.J., Lachemi, M., 2009. Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles. *Construction and Building Materials* 23, 2829–2835.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.036>
- Ciment Matine [WWW Document], 2017. . Lafarge Algérie - Ciment, béton, granulats. URL https://www.lafarge.dz/ciment_matine (accessed 5.28.18).
- Coppola, B., Courard, L., Michel, F., Incarnato, L., Di Maio, L., 2016. Investigation on the use of foamed plastic waste as natural aggregates replacement in lightweight mortar. *Composites Part B: Engineering* 99, 75–83.
- Coppola, B., Courard, L., Michel, F., Incarnato, L., Scarfato, P., Di Maio, L., 2018. Hygro-thermal and durability properties of a lightweight mortar made with foamed plastic waste aggregates 170. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.083>
- Damene, Z., 2005. COMPORTEMENT PHYSICI-MECANIQUE ET RESISTANCE AUX SULFATES DE MORTIER A BASE DE CIMENT ALGERIENS (Magistère). UATL.
- Damene, Z., Goual, M., Saiti, I., 2016. Valorisation Of Sand Dune And Waste Brick Filler In Elaboration Of Cellular Concrete: Mechanical And Thermal Properties.
- Damene, Z., Goual, M., Saiti, I., Benhassine, N., Ferhat, A., 2014. Study of the Effect of Aluminum Content and C / S Ratio on the Physico-Mechanical and Thermal Properties of a Lightweight Concrete Made From Sand Dune. *Journal of Fundamental and Applied Sciences* 6, 222–230.
- Dreux, G., Festa, J., 1998. Nouveau guide du béton et ses constituants. Edition Eyrolles.
- Dupain, R., Lanchon, R., Saint-Arroman, J., 1995. Granulats, sols, ciments et bétons. Edition Casteilla.
- Eldarwish, A., Tlili, A., Soroushian, P., Ostowari, K., 1999. Experimental investigation of the optimized use of plastic flakes in normal-weight concrete 51.
<https://doi.org/10.1680/mac.1999.51.1.27>
- Frigione, M., 2010. Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete 30.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.030>
- Ge, Z., Huang, D., Sun, R., Gao, Z., 2014. Properties of plastic mortar made with recycled polyethylene terephthalate 73. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.005>
- Goual, M., Belmecheri, O.H., 2015. Etude d'un composite à base de sable de dune, Ciment et granulats en billes de polystyrène expansé. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2777.8402>
- Goual, M.S., 2001. Contribution à l'élaboration d'un procédé de valorisation de co-produits argileux. Cas du béton argileux cellulaire obtenu par réaction avec l'Aluminium pulvérulent: caractérisation et comportement thermo hydrique. Thèse de Doctorat d'État, département de Génie civil, École Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie.
- Gouasmi Mohamed Touhami, M.T., 2013. EFFETS D'AGREGATS LEGERS A BASE DE POLYTEREPHTALATE D'ETHYLENE SUR LES PROPRIETES DES MORTIERS (Magistère). UNIVERSITÉ D'ORAN.
- Gouissem Linda, 2007. Contribution à l'amélioration des propriétés du poly éthylène téréphtalate PET recyclé (Magistère). Université Ferhat Abbas-Setif.
- Guendouze Mohammed, M., 2017. Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un Eco-matériaux de construction à base de déchets plastique : application au béton de sable. (Doctorat). YAHIA FARÈS DE MÉDÉA.
- Hannawi, K., Kamali-Bernard, S., Prince, W., 2010. Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates 30.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.03.028>

- Hartshorn, S., Sharp, J., Swamy, R., 2002. The thaumasite form of sulfate attack in Portland-limestone cement mortars stored in magnesium sulfate solution. *Cement and Concrete Composites* 24, 351–359.
- Ismail, Z., A Al-Hashmi, E., 2007. Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement 28. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.08.023>
- Jauberthie, R., Rendell, F., Laquerbe, M., 1999. Dégradation des mortiers sous différents milieux sulfatiques.
- Koide, H., Tomon, M., Sasaki, T., 2002. Investigation of the use of waste plastic as an aggregate for lightweight concrete. <https://doi.org/10.1680/scc.31777.0018>
- Kou, S.C., Lee, G., Poon, C.S., Lai, W.W.L., 2008. Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes 29. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.06.014>
- Lafarge Algérie - Ciment, béton, granulats [WWW Document], 2015. . Lafarge Algérie - Ciment, béton, granulats. URL <https://www.lafarge.dz/> (accessed 5.28.18).
- Lima, J., 2012. Fire behaviour of concrete produced with selected plastic waste aggregates.
- Marques da Silva, A., Brito, J., Veiga, M., 2014. Incorporation of fine plastic aggregates in rendering mortars 71. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.026>
- Mercier, J.P., Maréchal, E., 1993. Chimie des polymères: synthèses, réactions, dégradations. PPUR presses polytechniques.
- Neville, A.M., 1995. Properties of concrete. Longman London.
- Neville, A.M., Brooks, J.J., 1987. Concrete technology.
- PC Aitcin, A Neville, P Acker, 1998. Les différents types de retrait du béton 41–52.
- Porrero, J., Ramos, C., Grases, J., Grases, j, G., 2004. Manual del Concreto Estructural.
- Rahmani, E., Dehestani, M., Beygi, M.H.A., Allahyari, H., Nikbin, I.M., 2013. On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Construction and Building Materials* 47, 1302–1308. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.041>
- Rakotosaona, R., Ramaroson, J. de D., Mandimbisoa, M., 2014. Valorisation à l'échelle pilote des déchets plastiques pour la fabrication de matériaux de construction.
- Rezig, S., 2012. Optimisation de la formulation du béton de sable dans le cadre de valorisation des matériaux locaux. (masters). Université Mohamed Khider Biskra.
- Saadani Sabrina, S., 2008. Comportement des bétons à base de granulats recyclés (Magistère). Université Constantine 1.
- Sablocrete, 1994. Bétons de sable, Presses des ponts. ed. Paris, France.
- Safi, B., Sebki, G., Chahour, K., Belaid, A., 2017. RECYCLING OF FOUNDRY SAND WASTES IN SELF-COMPACTING MORTARS: USE AS FINE AGGREGATES. <https://doi.org/10.5593/sgem2017/41/S18.023>
- Sahraoui, M., Nebih, I., 2015. Le béton de sable à base de déchets de caoutchouc (Master). Dr. YAHIA FARES DE MEDEA.
- Saikia, D.N., Brito, J., 2014. Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049>
- Saikia, D.N., Brito, J., 2012. Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation: A review. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.066>
- Saiti Issam, 2014. Étude d'un procédé d'élaboration d'un béton léger cellulaire à base de sable de dune de la région de GHARDAIA (Magistère). KASDI MERBAH -OUARGLA.
- Seghiri, M., Boutoutaou, D., Kriker, A., Ibrahim Hachani, M., 2017. The Possibility of Making a Composite Material from Waste Plastic 119. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.065>

- Sharma, R., Bansal, P., 2015. Use of different forms of waste plastic in concrete – a review. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.042>
- Soroushian, P., Plasencia, J., Ravanbakhsh, S., 2003. Assessment of reinforcing effects of recycled plastic and paper in concrete 100.
- Suganthi, P., Chandrasekar, D., 2013. Utilization of pulverized plastic in cement concrete as fine aggregate.
- US EPA, O., 2015. Hazardous Waste [WWW Document]. US EPA. URL <https://www.epa.gov/hw> (accessed 5.24.18).
- Yazoghli, O., Dheilly, R.M., Quéneudec, M., 2007. Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites 27. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.03.012>
- Yazoghli, O., Dheilly, R.M., Quéneudec, M., 2005. The valorisation of plastic waste: thermal conductivity of concrete formulated with PET.
- Yeşilata, B., Isiker, Y., Turgut, P., 2008. Thermal insulation enhancement in concretes by adding waste PET and rubber pieces. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.014>
- Yves Jannot, Y., 2008. séminaire de formation à la Métrologie Thermique. Laboratoire d’Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA), Laboratoire d’Energie Appliquée (LEA), Dakar 12.

Annexes



متين
Matine



Ciment portland au Calcaire

NA442 CEM II/B-L 42,5 N

Matine Ciment gris pour bétons de haute-performance destiné à la construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments

Matine
NA442 CEM II/B-L 42,5 N

Matine est certifié, conforme à la norme Algérienne (NA442 – 2013) et Européenne (EN 197-1)

AVANTAGES PRODUIT



- Une résistance initiale élevée pour vos ouvrages nécessitant un décoffrage rapide
- Favorise la maniabilité du béton et le maintien de sa rhéologie
- Une Classe Vraie qui offre une haute performance au béton.
- Meilleure durabilité du béton.

 A member of
LafargeHolcim

Photo 1: Fiche produit Ciment Matin. (Lafarge Algérie - Ciment, béton, granulats, 2015)

APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments
- Préfabrication légère
- Béton de haute performance



FORMULATION CONSEILLÉE

	Ciment 	Sable (sec) 	Gravillons (sec) 	Eau (litres) 
		0/5	8/15mm 15/25mm	
Dosage pour béton C25/30	X 1 	+  X7	+  X5	+  X4 + 25 L

Remarque: un bidon = 10 Litres

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

• Analyses chimiques

	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	10.0±2
Teneur en sulfates (SO3) (%)	2.5±0.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.7±0.5
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	0.02-0.05

• Temps de prise à 20° (NA 230)

	Valeur
Début de prise (min)	150±30
Fin de prise (min)	230±50

• Composition minéralogique du Clinker (Bogue)

	Valeur
C3S (%)	60±3
C3A (%)	7.5±1

• Résistance à la compression

	Valeur
2 jours (MPa)	≥ 10.0
28 jours (MPa)	≥ 42.5

• Propriétés physiques

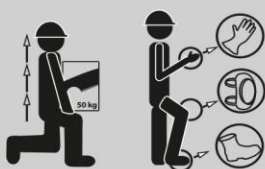
	Valeur
Consistance Normale (%)	26.5±2.0
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm²/g) (NA231)	3 700 - 5 200
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1 000
Expansion (mm)	≤ 3.0

Conditionnement: Sac et vrac

CONSIGNES DE SÉCURITÉ

1- PROTÉGEZ VOTRE PEAU : Portez les équipements adaptés dans vos chantiers: casques, lunettes, gants, genouillères, chaussures et vêtements de sécurité.

2- MANUTENTION : levez le sac en pliant les genoux et en gardant le dos droit.



A member of
LafargeHolcim

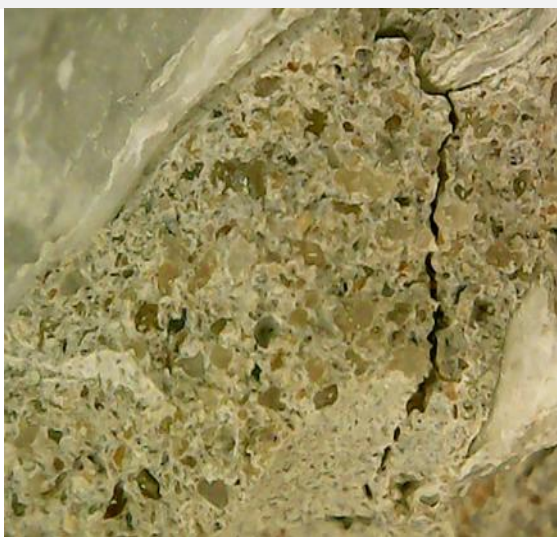
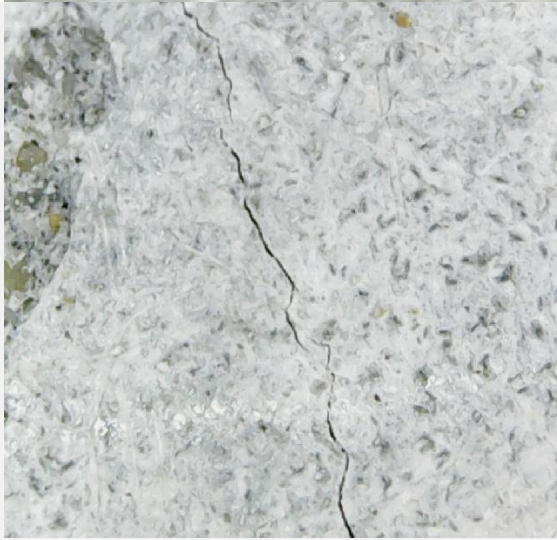
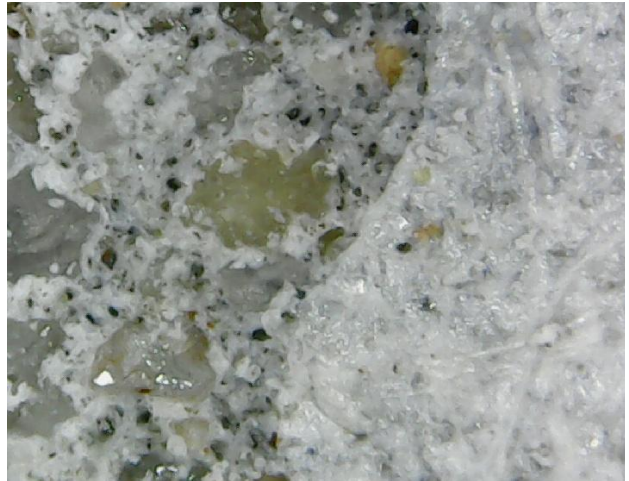
LAFARGE ALGÉRIE

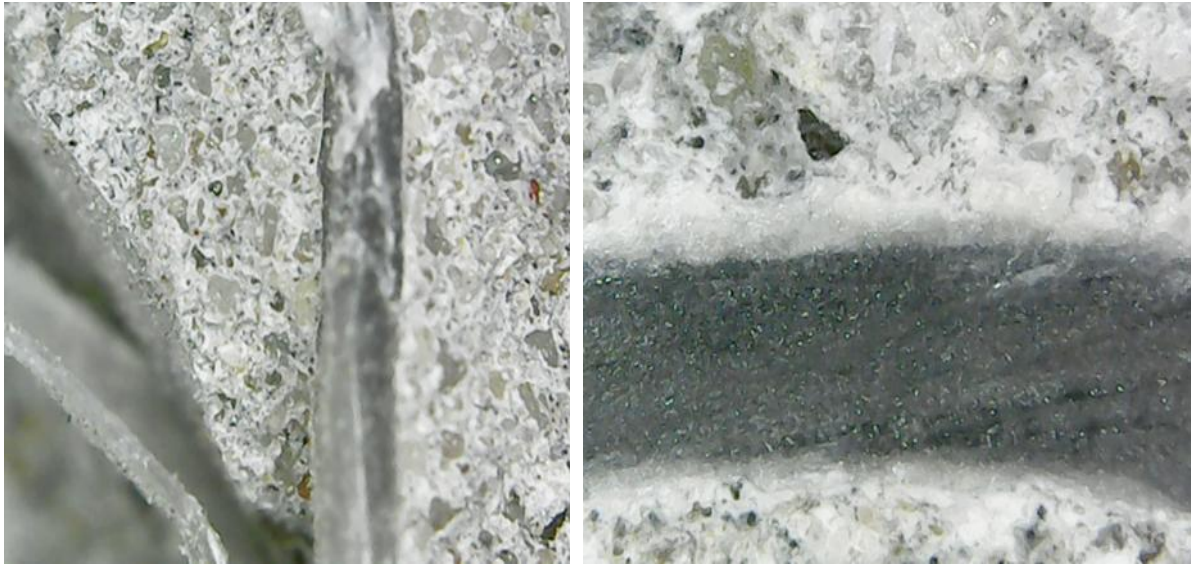
Centre commercial Bab Ezzouar, Tour n°02,
Etages 05 & 06, Bab Ezzouar Alger, Algérie
Tél: + 213 (0) 21 98 54 54
Fax: + 213 (0) 23 92 42 94
www.lafargealgerie.com
dz.satisfaction-clients@lafargeholcim.com
Tél: 021 55 55 98

Conditionnement : sac et vrac

LAFARGE
لافارج

Photo 2:Fiche produit Ciment Matin.(Lafarge Algérie - Ciment, béton, granulats,2015)





Photos 3:Photos en Microscope optique d'éprouvette de BSPET (0.6mm).