

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Année 2019

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Thème :

Formulation et comportement physico-mécanique des bétons de sable à base granulats de polystyrène recyclé

Domaine : Sciences et Technique

Spécialité :

GENIE CIVIL

OPTION

MATERIAUX EN GENIE CIVIL

Par :

1/ KOUIDI BOUCHRA

2/ ZEKRI SAFA

DIRECTEUR DU MEMOIRE : ACHOURA DJAMEL Pr : GENIE CIVIL, U B M ANNABA

DEVANT LE JURY

PRESIDENT : ARABI NOUREDDINE

Pr : GENIE CIVIL, U B M ANNABA

EXAMINATEURS : MELAIS FATMA ZOHRA

Dr : GENIE CIVIL, U B M ANNABA

Remerciement :

Au terme de ce travail nous tenant a remercié en premier le **BON DIEU** qui nous a donné la force, la volonté la patience pour achever ce mémoire.

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire de département de génie civil (matériaux de construction) à *l'université Badji Mokhtar Annaba*.

Nous remercions tout d'abord Monsieur **ACHOURA DJAMEL**, le directeur de ce travaille pour sa gentillesse, son aide, ses précieux conseils et pour la confiance qu'il nous a témoigné en dirigeant ce travail.

Nous remercions les enseignant du département de génie civil à l'université Badji Mokhtar Annaba, ainsi le que les membres du jury : Monsieur **ARABI NOUR EDDINE**, Professeur à *l'université Badji Mokhtar Annaba* et M^{elle} **FATMA ZOHRA MELAIS**, Doctorante à *l'université Badji Mokhtar Annaba*, pour avoir accepté d'examiner ce mémoire et juger ce travail, on leur exprime toute notre gratitude pour l'intérêt qu'ils ont accordé a ce travail.

Pour cette occasion nous tenant a remercions les ingénieurs du laboratoire de génie civil surtout **KHEIROU** et **KAMEL**.

En fin, nous voudrions exprimer notre reconnaissance à tous nos amis pour leur soutien moral, surtout.

Nous remercions également tous ceux qui ont participé de près au de loin a ce travail.

Pour terminer, nous tenant sincèrement à remercier du fond du cœur nos familles plus particulièrement nos parent, en reconnaissance de leur sacrifice et tout leur abnégation

Dédicaces

Je dédie ce projet :

A ma chère mère,

A mon cher père,

*Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir
et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.*

A mes frères, Mouad, Ikram, Rama, Rymess,

A ma chère sœur, Marwa et son mari Yacine et son fils Mohamed

Pour ses soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études.

A mon cher mari « Ishak »

Pour ton aide, tes conseils et tes encouragements.

A ma chère binôme, Bouchra

Pour sa gentillesse et sa sympathie.

*A tous les membres de ma famille, petits et grands Veuillez trouver dans ce modeste travail
l'expression de mon affection*

A la mémoire de tata « Djanet » rabi yarhamha

A mes chères cousines, Merci pour leurs amours et leurs encouragements

A mes chères ami(e)s, ghozlane, lyna, mouna

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

Safa

Dédicaces

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut...

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude,

L'amour, le respect, la reconnaissance...

Aussi, c'est tout simplement que

Je dédie cette thèse ...

À MES CHERS PARENTS

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

A MES CHERS ET ADORABLE SŒUR S

Je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

À MES CHERS ONCLES, TANTES et A MES CHERS COUSINS COUSINES

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

A LA MEMOIRE DE MES GRAND-PERES ET MA GRANDE MERE

J'aurais tant aimé que vous soyez présents. Que Dieu ait vos âmes dans sa sainte miséricorde

À MES AMIS DE TOUJOURS

En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble. Veillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

A mon binôme Safa

Pour sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

Bouchra

Résumé :

Ce mémoire est consacré à l'étude de la formulation et la caractérisation physico-mécanique des bétons de sable légers à base de granulats de polystyrène recyclé. L'utilisation de ce type de béton avec une masse volumique faible contribue à la réduction du poids de certains éléments de la structure et par la suite les dimensions des éléments porteurs, aboutissant à la réduction des efforts transmis au sol par les fondations. La technologie de ces bétons peut être profitable pour la construction, notamment dans les pays en voie de développement.

La proposition de ce type de bétons légers peut apporter une solution technique très intéressante au problème d'isolation thermique et acoustique dans les bâtiments et présente aussi un intérêt écologique ou environnemental par valorisation de déchets.

Cette étude est une contribution scientifique à la recherche d'un béton léger à base de granulats de polystyrène recyclé en substitution partielle aux granulats naturels. Elle vise la réduction de la consommation des granulats usuels et la conservation des ressources naturelles.

L'étude expérimentale porte sur l'influence de deux paramètres à savoir le pourcentage de granulats de polystyrène recyclé et le rapport eau/ciment sur les propriétés physiques et rhéologiques du béton à l'état frais ainsi que sur la masse volumique, la résistance mécanique la propagation des ondes ultra-soniques du béton à l'état durci.

Les résultats obtenus montrent la possibilité d'élaboration d'une nouvelle gamme de béton léger à base de granulats de polystyrène recyclé de bonne isolation thermique et de résistance mécaniques très acceptable.

Mots clés : Béton léger ; béton de sable ; **polystyrène recyclé**, propriétés physiques, propriétés mécaniques, Isolation Thermique.

ملخص :

تم تكريس هذه الأطروحة لدراسة الصياغة والتوصيف الفيزيائي والميكانيكي للخرسانة الرملية الخفيفة على أساس مجاميع البوليسترين المعاد تدويرها. يساهم استخدام هذا النوع من الخرسانة بكثافة منخفضة في تقليل وزن عناصر معينة من الهيكل وبالتالي أبعاد العناصر الداعمة ، مما يؤدي إلى تقليل القوى التي تنقلها الأسس إلى الأرض. تكنولوجيا هذه الخرسانة يمكن أن تكون مفيدة للبناء ، وخاصة في البلدان النامية.

يمكن أن يوفر اقتراح هذا النوع من الخرسانة الخفيفة الوزن حلاً تقنيًا مثيرًا للاهتمام لمشكلة العزل الحراري والصوتي في المباني ، كما أنه ذو أهمية بيئية أو بيئية عن طريق استرداد النفايات.

هذه الدراسة هي مساهمة علمية في البحث عن الخرسانة خفيفة الوزن على أساس المجاميع البوليسترين المعاد تدويرها كبديل جزئي للركام الطبيعي. ويهدف إلى تقليل استهلاك المجاميع المشتركة والحفاظ على الموارد الطبيعية.

تتناول الدراسة التجريبية تأثير معلمتين هما النسبة المئوية لمجموع البوليسترين المعاد تدويره ونسبة الماء / الأسمنت على الخواص الفيزيائية والريولوجية للخرسانة في الحالة المفرومة وكذلك على الكثافة والقوة الميكانيكية انتشار الموجات فوق الصوتية للخرسانة في حالة تصلب.

توضح النتائج التي تم الحصول عليها إمكانية تطوير مجموعة جديدة من الخرسانة خفيفة الوزن بناءً على مجاميع من البوليسترين المعاد تدويرها من العزل الحراري الجيد وقوة ميكانيكية مقبولة جدًا.

الكلمات الرئيسية: الخرسانة خفيفة الوزن. خرسانة رملية البوليسترين المعاد تدويره ، الخواص الفيزيائية ، الخواص الميكانيكية ، العزل الحراري.

Abstract :

This thesis is devoted to the study of the formulation and physico-mechanical characterization of light sand concretes based on recycled polystyrene aggregates. The use of this type of concrete with a low density contributes to the reduction of the weight of certain elements of the structure and subsequently the dimensions of the supporting elements, resulting in the reduction of the forces transmitted to the ground by the foundations. The technology of these concretes can be beneficial for construction, especially in developing countries.

The proposal of this type of lightweight concrete can provide a very interesting technical solution to the problem of thermal and acoustic insulation in buildings and is also of ecological or environmental interest by waste recovery.

This study is a scientific contribution to the research of a lightweight concrete based on recycled polystyrene aggregates as a partial replacement for natural aggregates. It aims to reduce the consumption of common aggregates and the conservation of natural resources.

The experimental study deals with the influence of two parameters namely the percentage of recycled polystyrene aggregates and the water / cement ratio on the physical and rheological properties of the concrete in the spawned state as well as on the density, the mechanical strength the propagation of ultra-sonic waves of the concrete in the hardened state.

The results obtained show the possibility of developing a new range of lightweight concrete based on recycled polystyrene aggregates of good thermal insulation and very acceptable mechanical strength.

Key words: Lightweight concrete; sand concrete; recycled polystyrene, physical properties, mechanical properties, thermal insulation.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE1

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES BETONS LEGERS ET BETONS DE SABLE

I.1. Généralité sur le béton léger.....	3
I.1.1. historique.....	3
I.1.2. Définition et classification de béton léger.....	3
I.1.3. Type de béton léger.....	4
I.1.3.1. Béton caverneux.....	5
I.1.3.2. Béton cellulaire.....	5
I.1.3.3. Béton à agrégat léger.....	5
I.1.4. Classification des granulats légers.....	6
I.1.5. Le rôle des granulats léger.....	8
I.1.6. Les avantage et inconvénients de béton léger.....	9
I.1.7. Le comportement de béton léger.....	10
I.1.8. Les propriétés des Béton léger	11
I.1.8.1. La porosité.....	11
I.1.8.2. La légèreté.....	11
I.1.8.3. la sensibilité à l'eau.....	11
I.1.8.4. La résistance la compression des bétons légers.....	12
I.1.8.5. Propriétés élastique des bétons légers.....	12

Sommaire

I.1.8.6. La masse volumique	12
I.1.8.7. La durabilité	12
I.2. Le béton léger a base des granulats de polystyrène.....	13
I.2.1. Les granulats de polystyrène.....	13
I.2.1.1. Origine et composition chimique.....	13
I.2.1.2. Fabrication du polystyrène expansé	14
I.2.2. Les propriétés de polystyrène	14
I.2.3. Les caractéristiques physique et mécanique de polystyrène.....	14
I.2.4. Les Avantages et domaine d'utilisation du béton de polystyrène.....	16.
I.2.5. Le comportement des bétons à base de granulats de polystyrène	16
I.2.5.1. Masse volumique	16
I.2.5.2. Résistance à la compression.....	16
I.2.5.3. Résistance à la traction	17
I.2.5.4. Retrait	17
I.2.5.5. Module d'élasticité	17
I.2.5.6. Propriétés thermiques	17
I.2.5.7. Durabilité	17
I.2.5.8. Rhéologie à l'état frais	17
I.3. Généralité sur le béton de sable.....	18
I.3.1. Historique de béton de sable.....	18
I.3.2. Généralité et définition de béton de sable.....	19
I.3.3. Les constituants de béton de sable.....	19
I.3.3.1. Les sables	19

Sommaire

I.3.3.2. Le ciment	20
I.3.3.3. Les fines d'ajouts, (filler).....	20
I.3.3.4. L'eau de gâchage	20
I.3.3.5. Adjuvants	21
I.3.3.6. Autre ajouts	21
I.3.3.6.1. Les fibres	21
I.3.3.6.2. Les gravillons	21
I.3.4. Les propriétés de béton de sable	22
I.3.4.1. La compacité	22
I.3.4.2. La maniabilité	23
I.3.5. Le comportement mécanique.....	24
I.3.6. Le retrait.....	25
I.3.7. Le fluage	26
I.3.8. Durabilité.....	27
I.3.9. Domaines d'utilisation des bétons de sable.....	27
I.4. Conclusion	27

CHAPITRE II : CARACTERISATIONS DES MATIERES PREMIERES

II. Caractérisation des matières premières	29
II.1. Introduction.....	29
II.1.1. Les sable	29
II.1.1.1. L'analyse granulométrique	30
II.1.1.2. Le module de finesse	31
II.1.1.3. Équivalent de sable	31

Sommaire

II .1.1.4. Masse volumique absolue	31
II .1.1.5. Masse volumique apparente	32
II.1.1.6. La compacité et la porosité	33
II.1.2. Le ciment	36
II.1.2.1. La consistance normale	36
II.1.2.2. Prise de ciment	36
II.1.2.3. La finesse du ciment	37
II.1.3. Les Fillers de laitier	38
II.1.4. Granulats de polystyrène	39
II.1.5. L'Adjuvant	40
II.1.6. L'eau de gâchage	40
II.2. Conclusion	40

CHAPITRE III : FORMULATIONS ET PROPRIETE DES BETONS D'ETUDE A L'ETAT FRAIS

III. formulation et propriétés des bétons d'étude à l'état frais.....	42
III.1. Introduction	42
III.2. Formulation des bétons d'étude.....	42
III.2.1. Approche théorique de formulation de SABLOCRETE	43
III.2.1.1 étapes de calcul	43
III.2.2. Composition de béton d'étude.....	44
III.2.3. Mode de préparation	46
III.3. Les propriétés du béton d'étude à l'état frais	47
III.3.1. Mesure de la maniabilité	47
III.3.1.1. L'influence de taux de grains de polystyrène sur la maniabilité	48

Sommaire

III.3.2. Masse volumique apparente	50
III.3.2.1. L'influence de taux des grains de polystyrène sur la masse volumique.....	51
III.4.Conclusion	52

CHAPITRE IV : CARACTIRISTIQUE PHISICO-MECANIQUE DUBETONS DE SABLE A BASE DES GRANULATS DE POLYSTYRENE

IV.1. Introduction.....	53
IV.2. Procédure expérimentale	53
IV.2.1.Choix des éprouvettes	53
IV.2.2. La vibration	53
IV.2.3. La conservation	54
IV.3. Propriétés physiques des bétons à l'état durci	54
IV.3.1. Masse volumique.....	54
IV.3.1.1. Les résultats et interprétation.....	54
IV .3.2. La capacité d'absorption d'eau	56
IV .3.2.1. Procédure expérimentale	56
IV .3.2.2.Les résultats et interprétation.....	57
IV.4. Les propriétés mécaniques	58
IV.4.1. Résistance en compression	58
IV.4.1.1.Procédure expérimentale.....	58
IV.4.1.2. Résultats et interprétations	59
IV.4.2. Résistance en traction par flexion	61
IV.4.2.1. Procédure expérimentale	61
IV.4.2.2.Résultats et interprétations	62
IV.4.3.. Evolution de la résistance a la compression en fonction de la masse volumique.....	64
IV.5.Contrôle non destructif par ultrason.....	65
IV .5.1. Résultats et interprétations.....	66

Sommaire

III.6. Conclusion	69
--------------------------------	-----------

Liste des tableaux

Tableau I.1. Caractéristiques physiques et mécaniques des bétons légers

Tableau II.1. Résultats de l'analyse granulométrique du sable de dune

Tableau II.2. Résultat de l'analyse granulométrique du sable de carrière

Tableau II.3. Caractéristique physique des sables

Tableau II.4. Caractéristiques physiques du ciment utilisé

Tableau II.5. Composition chimique de ciment

Tableau II.6. Pourcentage des différents constituants minéralogique du clinker

Tableau II.7. Propriétés physiques des fillers

Tableau II.8. Composition chimique du laitier

Tableau II.9. Caractéristique des billes de polystyrène

Tableau III.1. Composition des bétons de sable d'étude

Tableau III.2. Classe d'affaissement

Tableau III.3. Résultats des mesures d'affaissement de bétons d'étude

Tableau III.4. La masse volumique apparente de bétons de polystyrène a l'état frais

Tableau IV.1. Évolution de la masse volumique des bétons d'étude à l'état durci

Tableau IV.2. Evolution de la capacité d'absorption d'eau

Tableau. IV.3. Valeurs de la résistance à la compression des différents mélanges

Tableau IV.4. Valeurs de la résistance en traction des différents mélanges

Tableau. IV.5. Évolutions du temps et de la vitesse de propagation en fonction de taux de granulats polystyrène

Liste des tableaux

Tableau I.1. Caractéristiques physiques et mécaniques des bétons légers

Tableau II.1. Résultats de l'analyse granulométrique du sable de dune

Tableau II.2. Résultat de l'analyse granulométrique du sable de carrière

Tableau II.3. Caractéristique physique des sables

Tableau II.4. Caractéristiques physiques du ciment utilisé

Tableau II.5. Composition chimique de ciment

Tableau II.6. Pourcentage des différents constituants minéralogique du clinker

Tableau II.7. Propriétés physiques des fillers

Tableau II.8. Composition chimique du laitier

Tableau II.9. Caractéristique des billes de polystyrène

Tableau III.1. Composition des bétons de sable d'étude

Tableau III.2. Classe d'affaissement

Tableau III.3. Résultats des mesures d'affaissement de bétons d'étude

Tableau III.4. La masse volumique apparente de bétons de polystyrène a l'état frais

Tableau IV.1. Évolution de la masse volumique des bétons d'étude à l'état durci

Tableau IV.2. Evolution de la capacité d'absorption d'eau

Tableau. IV.3. Valeurs de la résistance à la compression des différents mélanges

Tableau IV.4. Valeurs de la résistance en traction des différents mélanges

Tableau. IV.5. Évolutions du temps et de la vitesse de propagation en fonction de taux de granulats polystyrène

Introduction générale

Introduction générale

Le béton est le plus connu des matériaux de construction, il est largement utilisé dans les domaines de bâtiment et travaux publics, cependant l'allègement de la structure des constructions est l'une des préoccupations majeures des concepteurs. Par sa masse synonyme d'une certaine inertie, il bloque la transmission des sons par vibration acoustique et ralentit le transfert de la chaleur. Cet effet tampon compense en partie le fait que le béton soit un matériau conducteur.

Globalement, le béton est donc performant du point de vue mécanique, mais il est moins intéressant du point de vue de l'isolation thermique.

De nouveaux matériaux sont alors apparus, rassemblés sous l'appellation de béton léger. Ces matériaux font référence à des bétons de masse volumique plus faible ($\rho \leq 1800 \text{ kg/m}^3$) que celle des bétons ordinaires et vise particulièrement une meilleure isolation thermique.

Ces bétons normalement réalisés par trois manières, en employant les agrégats légers, l'aération ou le gaz, ou en réduisant la partie fine du granulat. Dans chacun des trois cas la réduction de la densité du béton est réalisée par une augmentation des vides d'air dans le béton.

Pour développer un tel béton, deux éléments doivent être pris en considération : les concepts liés à la formulation des bétons légers et l'utilisation de granulats légers. Par ailleurs, il devient de plus en plus intéressant d'évaluer le potentiel des matériaux légers comme source de matières premières.

Les caractéristiques mécaniques des bétons de granulats légers dépendent fortement des propriétés et proportions de granulats présents dans la formulation, en particulier, de par leur forte porosité, les granulats légers sont beaucoup plus déformables que la matrice cimentaire et leur influence sur la résistance du béton est complexe.

Notre travail consiste à la substitution d'une partie de sable par les granulats de polystyrène recyclé dans la fabrication d'une nouvelle gamme de béton de sable léger. Cette étude expérimentale présente une analyse de l'influence des propriétés de ces granulats léger sur le comportement physico-mécanique de ce type de béton.

Le programme expérimental s'appuie sur la variation du pourcentage des granulats légers (polystyrène) à incorporer dans le béton, afin de voir ses effets sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques des bétons de granulats légers.

Les objectifs visés par travail sont :

Introduction générale

- Le premier est écologique qui consiste à récupérer un déchet d'emballage encombrant et son recyclage dans le domaine de construction.
- le second objectif est technique, consiste à l'étude d'un procédé d'allègement du béton de sable par incorporation des granulats de polystyrène dans la matrice.
- Le troisième concerne la confection et la caractérisation d'un béton léger et isolant à base des granulats élaborés.

Afin d'atteindre les objectifs tracés, on a subdivisé ce mémoire en quatre grands chapitres étroitement liés :

Le premier chapitre, comporte trois parties, est consacrée à la recherche bibliographique. Dans la première partie, nous exposons un aperçu détaillé sur les bétons léger, les différents types et classes du béton léger afin de caractériser ces propriétés. La deuxième partie fait un survol sur les bétons légers de polystyrène, Il expose leurs performances et leurs spécificités. La dernière partie comporte une description sur les bétons de sable : composition, principales applications et caractéristiques physico-mécaniques.

Le deuxième chapitre est consacré à la caractérisation physique et chimique des constituants (sables, ciment, filler, granulats de polystyrène, adjuvant).entrant dans la formulation des bétons de sable léger.

Le troisième chapitre présente une description des approches de formulation et la composition des bétons d'étude, ainsi que des propriétés rhéologiques et physiques des bétons frais.

Le quatrième chapitre est consacré l'étude expérimental comparative de l'influence du taux de substitution des sables naturels par les granulats de polystyrène recyclé, et présente tous les résultats obtenus des différents essais physico-mécanique réalisés sur les BS à l'état durci avec analyse et interprétation.

En fin une conclusion générale qui comporte une synthèse des résultats de cette recherche.

***Chapitre I : Généralités sur les bétons légers et béton
de sable***

I.1. Généralité sur le béton léger :

I.1.1. Historique:

L'idée d'utiliser des granulats légers pour la confection du béton en vue d'obtenir un matériau qui possède à la fois un faible poids, une résistance appréciable et une isolation thermique ou acoustique est assez ancienne.

L'historique de la production des agrégats légers à partir des sources naturelles remonte au temps des Préromains et continue aujourd'hui avec les roches volcaniques poreuses mais ces ressources sont limitées aux régions d'activités volcaniques.

En effet le Panthéon de Rome est un exemple de construction ayant nécessité l'emploi de béton léger. Cette structure est remarquable tant du point de vue architectural que structural. Son dôme, d'un diamètre de 43m est une réalisation architecturale majeure pour l'époque (138 avant J.C). A la base de la structure on retrouve un béton ordinaire, alors qu'un béton léger, contenant des pierres ponce, a été utilisé pour la construction de la coupole.

A partir de la fin du 19^{ème} siècle, avec le développement du béton armé, et à cause de la rareté des agrégats naturels poreux et à leur existence dans la plupart des pays développés, des recherches pour la fabrication d'agrégats légers artificiels commencèrent [1].

A partir de 1950, de nombreuses constructions à plusieurs étages furent conçues entièrement en béton léger pour bénéficier de l'avantage d'un faible poids mort.

De telles applications dans la construction stimulèrent la recherche concertée des diverses Organisations nationales et internationales sur les propriétés des bétons légers [2].

Grâce aux ajouts minéraux, aux adjuvants et aux granulats légers de grande qualité maintenant disponibles, il est aujourd'hui possible de fabriquer des bétons légers à haute performance dotés d'une très bonne rhéologie et d'une excellente durabilité.

Les conditions nécessaires pour développer au maximum leur résistance en compression ne sont toutefois pas encore complètement maîtrisées. En effet, bien que certaines formulations aient pu atteindre une résistance en compression de 70 à 100MPa à 28 jours, il est encore difficile d'obtenir plus de 60 MPa pour une masse volumique inférieure à 1900 kg/m³.

I.1.2.Définition et classification de béton léger :

Les bétons légers sont des bétons à haute porosité dont la masse volumique apparente varie dans les limites de 500 à 1800 Kg/m³. Les bétons, dont la masse volumique est inférieure à 500 Kg/m³ sont classés comme bétons extra-légers [3].

Chapitre I : Généralités sur les bétons légers et béton de sable

Du point de vue de leur application les bétons légers se répartissent en 3 types :

- Bétons pour isolation thermique.
- Bétons isolants et porteurs.
- Bétons de structure (porteurs).

Les principales caractéristiques des bétons légers sont représentées dans **le tableau I.1**.

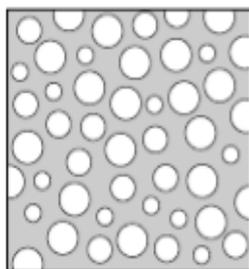
Tableau I.1 : Caractéristiques physiques et mécaniques des bétons légers

Destinations des bétons	Masse volumique en Kg/m³	Résistance à la Compression en MPa	Conductibilité thermique λ, W/m°C
Bétons isolants	< 500	< 2,5	< 0,2
Bétons isolants et porteurs	500 – 1400	3.5-15	0.2-0.5
Bétons de structure	1400-1800	15-40	0.5-0.9

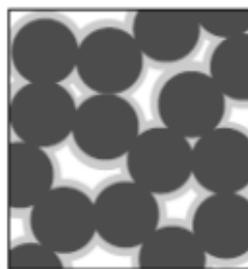
I.1.3. Les types de béton léger :

On distingue 3 types de bétons légers :

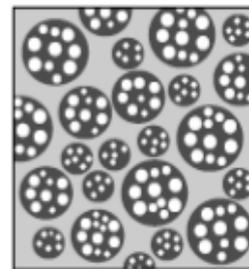
- Béton caverneux (sans sable).
- Béton à agrégats légers poreux.
- Béton cellulaire.



Béton cellulaire



Béton caverneux



Béton de granulats légers

Figure I.1 : Représentation schématique des différents types de béton léger [1]

Chapitre I : Généralités sur les bétons légers et béton de sable

I.1.3.1. Le béton caverneux :

Ces bétons sont composés d'un mélange de granulats normaux ou légers, enrobés de pâte de ciment les collant entre eux. La pâte de ciment ne remplit pas la totalité des vides interstitiels, et de l'air reste contenu entre les granulats. En fait, il s'agit de bétons dont on a supprimé tout ou partie de l'élément fin et du liant correspondant servant à son enrobage. Ces bétons ont donc une porosité élevée ; ils sont drainant [4]. Buts recherchés : béton économiques, gains de poids, bonne isolation thermique [5].

I.1.3.2. Le béton cellulaire :

Les bétons cellulaires sont des matériaux légers d'aspect très poreux et de couleur généralement blanchâtre ou grise. Leur dénomination provient de leur structure alvéolaire. Ils contiennent en effet une multitude de petites cavités sphériques ne communiquant pas entre elles dont la taille est de l'ordre du millimètre. On peut classer les bétons cellulaires en deux catégories selon leur mode de fabrication :

- ✓ **Le béton gaz (obtenue par réaction chimique)** : où les alvéoles sont obtenues par l'adjonction d'un produit chimique générateur de gaz jouant le rôle d'une levure (poudre d'aluminium ou de zinc, eau oxygénée, ou carbures de calcium par exemple) [6].

- ✓ **Le béton mousse (obtenue par réaction physique)** : où les cavités résultent de l'adjonction de substances qui moussent sous l'action d'un malaxage (détergents, savons, résines spéciales) Le béton cellulaire peut être obtenu avec des densités variant de 0,200 à 1,800 et des conductivités thermiques de 0,116 à 0,700 W/(mK) en fonction des domaines d'utilisation [7].

I.1.3.3. Béton à agrégats légers :

La masse volumique du béton peut varier d'un peu plus de 300 à environ 1850 kg/m³ et la résistance correspondante de 0,3 à 70 MPa, atteignant parfois même 90 MPa. La grande diversité de composition se retrouve dans la grande variété des propriétés des bétons de granulats légers [8] qui sont des matériaux poreux pulvérulents, naturels ou artificiels [9].

Les bétons légers de structure, utilisés pour la fabrication d'éléments porteurs, sont généralement fabriqués avec des granulats légers manufacturés (argile, schistes et laitiers expansés ou cendres volantes frittées). La résistance à la compression minimale recommandée par l'ACI est alors de 17 MPa à 28 jours. Les bétons légers de faible densité sont fabriqués avec des granulats ultra légers et très poreux (vermiculite exfoliée, perlite expansée) ou avec une matrice cellulaire. Dans ce dernier cas, l'incorporation de bulles d'air peut être faite par

génération de gaz dans le matériau à l'état plastique ou par entrainement d'air au cours du malaxage.

Ces bétons sont de très bons isolants Thermiques, mais ils doivent bien souvent être traités à l'autoclave pour atteindre une Résistance suffisante. D'autres granulats non absorbants et plus résistants sont aussi Disponibles (verre et polystyrène expansés). Les bétons de résistance modérée sont dotés de propriétés intermédiaires. Ils peuvent être fabriqués avec des granulats concassés naturels, comme la pierre ponce, les tufs et autres roches d'origine volcanique, ou avec un mortier aéré. La pierre ponce fut par ailleurs le premier granulats légers à être utilisé, notamment pour la construction du dôme du Panthéon et du Colisée à Rome [10].

I.1.4. Classification des granulats légers :

Les granulats légers se distinguent des autres granulats par leur faible masse volumique, celles-ci est inférieur à 1200 kg/m^3 [11], tandis que celle de la pierre naturelle est de 2700 kg/m^3 . L'écart de la masse volumique s'explique par la porosité élevée du granulats, ce qui se traduit par une faible densité apparente [8].

C'est-à-dire une importante proportion volumique de vides d'air contenus dans le granulats. Nous pouvons distinguer les granulats légers selon leur origine naturelle ou artificielle :

a) Matériaux naturels :

Les principaux granulats de cette catégorie sont, la pierre ponce, les scories, les cendres volcaniques et le tuf [8].

En les concassant, on obtient donc des granulats légers [12]. Les granulats légers naturels ne sont pas très utilisés même si leur emploi permet de confectionner des bétons de résistance moyenne [8]. Ce sont des matériaux minéraux naturels non préparé qui n'ont subi que de traitement mécaniques tels que lavage, broyage et tamisage [13,14].

La figure I.2 : présente quelques exemples de granulats naturels : OPS (oil Palm Shell), la diatomite et le laitier Volcanique.



Pierre ponce



OPS



Diatomite



Laitier volcanique

Figure I.2 : Différents granulats légers naturels [12]

b) Matériaux artificiels :

Des granulats légers peuvent être également produits artificiellement, soit à partir de matières premières naturelles comme l'argile, le schiste, l'ardoise, ou des matières spéciales dans certains régions, comme la vase à Taiwan; soit à partir de sous-produits industriels comme les laitiers, les cendres volantes frittées ou encore l'EPS (Polystyrène expansé)[12], soit végétal (copeaux de bois) et fibre cellulosique (cas de l'Alfa). Ces granulats sont souvent désignés par une variété de noms commerciaux, mais sont mieux classés en fonction des matières premières utilisées et du procédé de fabrication conduisant à l'expansion et, par conséquent, à une diminution de la densité apparente. On distingue :

➤ **Matériaux naturels ayant subi un traitement thermique :**

Ces matériaux sont des minéraux naturels préparés [15], ils sont mieux classés en fonction des matières premières utilisées et du procédé de fabrication conduisant à l'expansion et, par conséquent, à une diminution de la densité apparente [8]. Cette catégorie de granulats est la plus importante et on y trouve en particulier : l'argile, le schiste et l'ardoise expansées ou frittées, la perlite expansée et la vermiculite exfoliée.

- **Matériaux artificiels ne subissant pas de traitement thermique : comme le Mâchefer.**
- **Matériaux artificiels obtenus par divers traitements spéciaux : Comme le laitier expansé et les cendres volantes frittées [6].**

Figure I.3 présentes quelque exemple des granulats artificiel



Argile expansée



Schiste expansé



Laitier refroidi à l'air



Laitier expansé



Cendre volante



EPS

Figure I.3 : différent granulats léger artificiel [12]

I.1.5. Rôle des granulats léger :

La structure poreuse de ces granulats assure aux bétons légers des spécificités parmi

Lesquelles :

- Une bonne isolation thermique.
- Une faible masse volumique (100 à 1200 Kg/m³).
- Une résistance mécanique en moyenne de 10 MPa.
- La surface des granulats est rugueuse et fort développée.

Ces qualités des granulats influent essentiellement sur les propriétés du béton frais et durci. Ainsi, la porosité élevée des granulats légers leur permet d'absorber de grandes quantités d'eau. Le dosage en eau est de 200 à 300 litres/m³ de béton. De plus l'eau accumulée dans les

pores des granulats favorise le durcissement du ciment surtout dans la couche Superficielle du granulat.

I.1.6. Avantages et inconvénients de béton léger :

A. Avantage :

- Un matériau plus légers : ces bétons permettent ainsi une plus grande souplesse quant à la conception des ouvrages et induisent plusieurs économies.
- Meilleure isolation thermique.
- Meilleure tenue aux conditions extrêmes de température : gel et feu.
- Large choix de masses volumiques.
- Mise en œuvre simple et traditionnelle.
- Amélioration des conditions de manutentions dans le cas de la préfabrication.
- Utilisés en préfabrication, les bétons légers permettent aussi de diminuer les coûts de transport et d'installation.

B. Inconvénients :

- Les bétons légers sont néanmoins des matériaux fragiles et peu résistants à la traction.
- Résistance mécanique plus faible en général, dans le domaine des valeurs élevées.
- Sensibilité aux variations hygrothermiques plus grandes.
- Un dosage en ciment plus élevé, ce qui explique un surcoût.

Bien que dans certains cas les bétons légers puissent revenir plus cher par mètre cube qu'un béton ordinaire, la construction peut être moins onéreuse vu la réduction du poids mort.

Une juste comparaison ne doit pas se limiter uniquement au prix.

L'économie réside alors dans une recherche d'équilibre entre le prix du mètre cube du béton, sa densité et ses qualités mécaniques. La figure I.4 explique mieux ce constat.

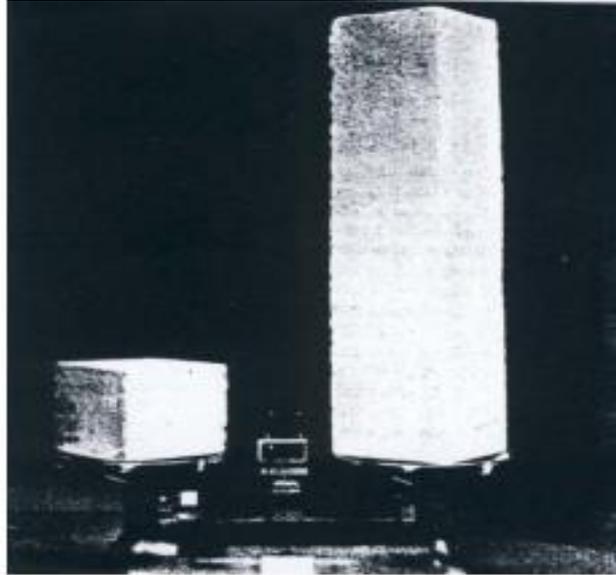


Figure I.4 : Béton normal à gauche et béton léger à droite Ayants le même poids [1]

I.1.7. Le comportement des bétons léger :

A. Mécanique :

Les granulats légers entraînent une modification du comportement et des niveaux de performances mécaniques du béton. En effet, le granulat léger est poreux donc moins résistant qu'un granulat usuel. Le fonctionnement mécanique et le mode de rupture des bétons légers sont donc modifiés par rapport à ceux d'un matériau contenant des granulats rigides [16].

Les niveaux de performances des bétons légers sont inférieurs à ceux des matériaux usuels de construction, puisque les granulats légers possèdent une porosité propre. Qui les rend déformables. D'une manière générale, la résistance en compression à 28 jours et le module d'élasticité E augmentent lorsque la porosité des granulats diminue.

B. Acoustique :

L'isolation acoustique obtenue par des parois homogènes en béton léger, est avant tout, une question de poids et d'imperméabilité à l'air ; il est dû à l'existence de nombreuses cellules fermées dans les agrégats. Certaines parois en bétons pleins de granulats légers, complétées par des enduits étanches, peuvent avoir des performances acoustiques supérieures à celle prévues par la « loi de masse ». Cette amélioration se manifeste pour des épaisseurs supérieures à 15 cm [17].

I.1.8. Les propriétés des bétons légers :

I.1.8.1.Porosité :

Le béton est constitué de plusieurs éléments solides (granulat, liant) et de plusieurs Familles de vides dont la taille varie de quelques dizaines d'Angstrom (Å) à quelques millimètres selon l'origine de ces porosités.

Les granulats possèdent une porosité intrinsèque due à la présence de l'air intra particule. Compte tenu de la taille caractéristique des capillaires (de l'ordre de la dizaine de μm), la porosité du granulat sera qualifiée de porosité microscopique [18].

I.1.8.2. Légèreté :

L'emploi de granulats légers a pour première conséquence une diminution de 20 à 30 % De la masse volumique de bétons. A titre de comparaison, la masse volumique d'un béton hydraulique est de l'ordre de 2300 kg/m^3 alors qu'elle se situe autour de 1600 kg/m^3 pour un béton d'argile expansée, entre 600 et 900 kg/m^3 pour un béton de bois et qu'elle varie entre 350 et 650 kg/m^3 pour un béton cellulaire (norme NF P 14-306). L'intérêt est d'avoir un matériau facile à mettre en œuvre lorsqu'il est vendu manufacturé sous forme de parpaings. De plus, ce matériau allégé nécessite des fondations moins importantes lors de la construction [18].

I.1.8.3. Sensibilité à l'eau :

Les granulats, poreux et perméabilité, permettant les transferts sous forme liquide et sous forme vapeur. Dans le cas d'eau liquide, on parle d'absorption et dans le cas d'eau vapeur, on parle de sorption-désorption.

La perméabilité représente la faculté qu'a un matériau de laisser un fluide s'écouler en son sein, sous l'effet d'un gradient de pression. Cette propriété de perméabilité n'existe donc que si le matériau possède une porosité non négligeable et que celle-ci est connectée. En revanche, un matériau peut être très poreux (le béton cellulaire) et peu perméabilité car les pores, non reliés entre eux, ne constituent pas des chemins continus, dans lesquels le fluide peut s'écouler. Porosité et perméabilité sont donc liées mais la première n'applique pas forcément la deuxième [18].

I.1.8.4. La résistance à la compression des bétons légers :

A la différence du béton traditionnel, la rupture en compression d'un béton léger se produit en général par cassure des granulats légers, dans des plans qui coupent le plus grand nombre possible de granulats légers la rupture des éprouvettes est ainsi caractérisée par un ou plusieurs plans parallèles au chargement et par le fendage des granulats. Les principaux facteurs ayant une influence sur la résistance en compression des bétons de granulats légers sont des caractéristiques des granulats et la composition du béton [18].

I.1.8.5. Propriétés élastiques des bétons légers :

Le module d'Young d'un béton léger est évidemment inférieur à celui du béton traditionnel en raison de sa faible masse volumique. Généralement Le module d'Young d'un béton léger est considère comme 0,5 à 0,75 de celui d'un béton traditionnel de même résistance. Une plus faible rigidité peut être parfois souhaitable pour les structures soumises à une sollicitation dynamique ou pour des structures en coques. Un faible module d'Young peut être à l'origine de désordre dans les structures en béton précontrainte suite à une relaxation des câbles de précontrainte et à la chute de tension qui en découle [18].

I.1.8.6. Masse volumique :

La masse volumique du béton représente l'une des caractéristiques les plus importantes dans le cadre de la présente recherche. La réduction de la masse volumique est rendue possible en changeant le type de granulat et en faisant varier les proportions des différents constituants.

I.1.8.7. Durabilité :

Les conditions d'exposition conditionnent souvent la conception du béton. En effet, les cycles de gel-dégel en présence ou non des sels fondants représentent un aspect critique de la durabilité des bétons légers exposés aux intempéries. Il est important de faire la distinction entre les deux types d'attaque par le gel, avec ou sans sels fondants, puisque les mécanismes de détériorations sont différents [19].

I.2. Béton léger à base de polystyrène :

La masse volumique des bétons traditionnels est de 2200 à 2300 kg/m³. Elle peut être abaissée, notamment par l'adjonction de matériaux plastiques expansés tels que des billes de polystyrène expansé. Les bétons obtenus présentent alors de meilleures propriétés d'isolation thermique et acoustique et pourraient avoir des applications intéressantes dans le domaine du bâtiment [20].

En outre, grâce à l'emploi des matrices cimentaires à ultra haute résistance, ces bétons de polystyrène peuvent avoir des résistances de bétons de structure. Par conséquent, ils représentent, grâce à leur légèreté, une solution technique intéressante pour les domaines du bâtiment, des ouvrages d'art. Par ailleurs, les bétons légers de polystyrène. Ont une faible conductivité thermique notamment pour un taux de billes très important (de l'ordre de 70%). Par conséquent, ils peuvent apporter une solution technique très intéressante au problème d'isolation thermique dans les bâtiments (à l'instar du Béton Isolant Porteur (BIP) du Centre Bâtiment CSTB) [21].

Le béton de polystyrène fait partie des bétons de granulats légers.

Bétons légers à base de billes de polystyrène expansé doivent être considérés à part. Leurs masses volumiques peut être comprise suivant les formulations 400 et 800 kg /m³ ou plus ; jusqu'à 1200 à 2000 kg /m³, en diminuant le pourcentage de polystyrène constituant le Gros Granulat par rapport au mortier [22].

I.2.1. Les granulats de polystyrène :

I.2.1.1. Origine et composition chimique :

Le polystyrène expansé est un matériau alvéolaire rigide, peu dense, dont les principales utilisations sont l'isolation thermique des bâtiments et emballage des produits industriels ou alimentaires [23].

Le polystyrène est un thermoplastique dur, c'est un polymère vinylique. Structurellement c'est une longue chaîne d'hydrocarbonés avec un groupe phényle attaché sur certains atomes de carbone [15], le polystyrène est fabriqué par polymérisation radicalaire à partir d'un monomère de styrène C₈H₈.

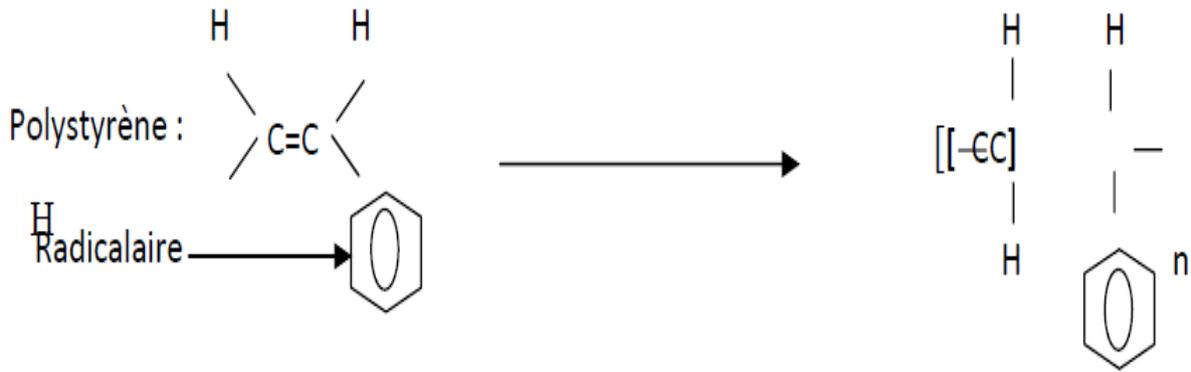


Figure I.5 : Polymérisation du styrène [24]

I.2.1.2. Fabrication du polystyrène expansé :

Le polystyrène brute est un matériau plus on moins lourds il se présente sous forme de perles. L'expansion de ces perles est réalisée par polymérisation du styrène (perles de polystyrène cristal) [24].

I.2.2. Propriétés de polystyrène :

Les propriétés les plus remarquables du polystyrène expansé sont :

- Sa faible masse volumique.
- Son pouvoir isolant thermique.
- Ses excellentes propriétés mécaniques (résistance en compression, capacité

D'amortissement des chocs).

- Son insensibilité à l'eau.
- Recyclable.

I.2.3. Caractéristiques physiques et mécaniques du polystyrène :

➤ Densité :

La densité du polystyrène à l'état brut voisine les 1000 kg/m³ [25]. Cette densité chute considérablement lorsque le polystyrène est expansé, elle est comprise entre 8 et 80 kg/m³. Il faut noter que cette différence remarquable est due à la présence de l'air dans le polystyrène expansé.

➤ Propriétés morphologique :

Les billes de polystyrène sont parfaitement sphériques. Cela permet d'être en accord avec les modèles d'empilement classiques [21]. La coupe d'une bille révèle une structure alvéolaire et une enveloppe constituée de deux membranes. Ceci explique d'une part son extrême légèreté et d'autre part sa totale imperméabilité à l'eau. En effet, des essais réalisés [21] ont montré que des billes de polystyrène immergées dans l'eau pendant, un mois n'ont pas absorbé d'eau. Enfin, ces billes sont hydrophobes et présentent des charges électrostatiques en surface.

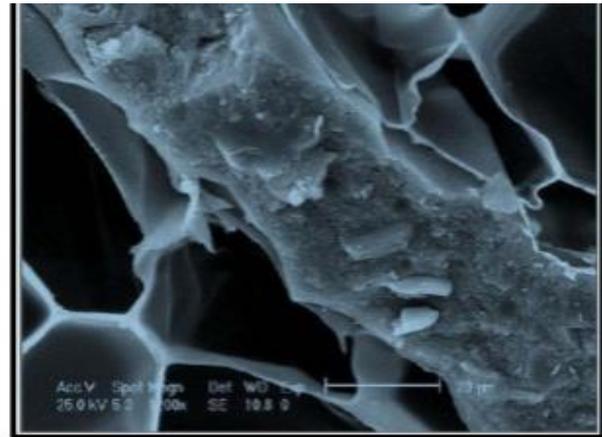
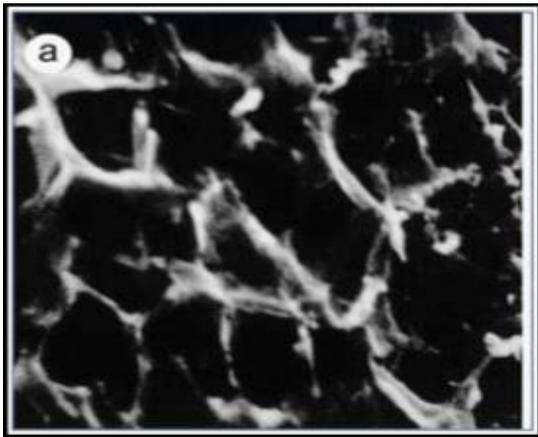


Figure I.6.1 : Microstructure d'une bille EPS [26]

Figure I.6.2 : Photo au MEB montrant les Billes de polystyrène et la matrice cimentaire (photo Berthelot : PCM - LCPC) [21]

➤ Résistance à la chaleur :

La résistance à la compression du polystyrène dépend essentiellement de sa densité, plus il est dense plus sa résistance est grande, mais à cause de sa flexibilité le polystyrène se comporte d'une manière assez complexe [24].

Les propriétés mécaniques des billes de polystyrène expansé sont négligeables devant celles de la matrice cimentaire. En effet, ces billes ont un module d'Young compris entre 4 et 8 MPa et une résistance en de compression de l'ordre de 80 MPa [21].

➤ Conductivité thermique :

Le polystyrène est un matériau très réputé par ces performances thermiques, il est très utilisé dans l'isolation thermique des constructions sous forme de panneaux de 5cm entreposés entre deux cloisons. La conductivité thermique du polystyrène dépend de sa porosité, elle-même dépendante du procédé d'expansion. Sachant que la mousse de PSE est constituée de 98 % d'air et de 2 % de polystyrène en volume, le bon coefficient d'isolation thermique est dû à la

Chapitre I : Généralités sur les bétons légers et béton de sable

présence d'air emprisonné dans les cellules [23]. En général elle varie entre 0,027 à 0,037 $W.m^{-1}.k^{-1}$ Ces valeurs sont considérées parmi les valeurs les plus faibles de la conductivité thermique des matériaux [15].

I.2.4. Avantages et domaine d'utilisation du béton de polystyrène :

Le béton de polystyrène est un matériau utilisé très récemment, il présente beaucoup d'avantage sur le plan technique et économique :

- Il est ultra léger, sans doute parmi les bétons les plus légers.
- Il est reconnu par sa faible absorption d'eau.
- Il est durable et résiste aux agents agressifs
- Mise en œuvre simple et traditionnelle.
- Moins de surcharge vis-à-vis d'un béton traditionnel.
- Résistant aux chocs.
- Il est considéré parmi les matériaux qui possèdent les meilleures performances thermiques et phoniques.
- Imputrescible.

En raison de ces performances physiques, le béton de polystyrène est largement utilisé dans le domaine de construction, on le retrouve dans les panneaux de revêtement, dans l'isolation des planchers et des blocs de béton porteurs, ainsi que dans d'autres applications spécialisées comme les pavés et les constructions marines flottantes et dans la protection de structures militaires enterrées.

I.2.5. Comportement des bétons à base de granulats de polystyrène :

I.2.5.1 masse volumique :

Le béton léger réalisé à l'aide du polystyrène expansé PSE donne l'avantage d'avoir toute une gamme de densités allant de 500 kg/m^3 à 2200 kg/m^3 , Grâce aux proportions utilisées de polystyrène expansé PSE ce qui conduit à une vaste gamme de béton léger donc une solution technique intéressante pour les domaines du bâtiment, des ouvrages d'art [27]

I.2.5.2 Résistance à la compression :

La résistance à la compression des bétons de polystyrène est fonction du dosage en granulats de polystyrène et de leurs tailles. Celle-ci peut être améliorée par des ajouts tels que la fumée de silice. Généralement, la résistance à la compression varie entre 0.2 et 23 MPa [27-28]

I.2.5.3 Résistance à la traction :

Elle varie entre 0.1 et 2.4 MPa. Elle peut être améliorée par incorporation de fibres telles que les fibres en acier [27]

I.2.5.4. Retrait :

Variable en fonction du dosage en polystyrène, il peut atteindre une valeur maximale de 1,2 mm/ m [27]. Ce matériau présente une grande élasticité.

I.2.5.5. Module d'élasticité :

Il est de l'ordre de 20.000 kg/cm² pour des bétons de 750 kg/ m³ de masse volumique apparente.

I.2.5.6.Propriétés thermiques :

Une des propriétés intéressantes des bétons légers est leur pouvoir d'isolation thermique dû aux nombreuses bulles d'air interposées dans l'épaisseur du béton. Les bétons de polystyrène expansés sont constitués des bonnes isolations thermiques, leur coefficient de conductivité étant de l'ordre de 0,20 pour des densités de 400 kg/m³ et 0,30 à pour des densités de 800 kg/m³ [28].

Les bétons légers de polystyrène ont une faible conductivité thermique notamment pour un taux de billes très important (de l'ordre de 70%) Elle varie en fonction de la densité du béton. Par conséquent, ils peuvent apporter une solution technique très intéressante au problème d'isolation thermique dans les bâtiments [29].

I.2.5.7.Durabilité :

Les billes de polystyrène sont parfaitement sphériques. La coupe d'une bille révèle une structure alvéolaire et une enveloppe constituée de deux membranes. Ceci explique d'une part son extrême légèreté et d'autre part sa totale imperméabilité à l'eau par conséquent qui est défini par sa résistance aux ions agressifs. En effet, des essais réalisés par Yamura et al. (Yamura et Yamauchi, 1982) ont montré que des billes de polystyrène immergées dans l'eau pendant un mois n'ont pas absorbé d'eau. Enfin, ces billes sont hydrophobes et présentent des charges électrostatiques en surface [29]

I.2.5.8.Rhéologie à l'état frais :

L'ouvrabilité, qui est une propriété importante du béton à l'état Frais définit la relation contrainte déformation du matériau, La détermination d'ouvrabilité du béton est exigé pour réaliser le béton de bon qualité.les caractéristiques fondamentales pour définir l'ouvrabilité incluent la viscosité, la cohésion, la mobilité, la stabilité, le compactibilité.

Une étude étendue à l'université de la technologie, Sydney sur la production et les propriétés du béton de polystyrène. Il a constaté que l'ouvrabilité de béton de polystyrène expansé pourrait être classée en fonction de l'indice de compactage.

Les propriétés mécaniques des billes de polystyrène expansé sont négligeables devant celles de la matrice cimentaire. En effet, ces billes ont un module d'Young compris entre 4 et 8 MPa et une résistance en compression de l'ordre de 80 kPa.

Grâce à l'emploi des matrices cimentaires à ultra haute résistance, les bétons de polystyrène peuvent avoir des résistances de bétons de structure [30]

I.3. Béton de sable :

I.3.1. Historique de béton de sable :

Le béton reste toujours le matériau le plus utilisé dans les constructions ou les ouvrages de génie civil dans la majorité des pays de monde. La première utilisation des bétons de sable a été sous forme de mélange de sable, de chaux, et d'eau [31].

En France le béton de sable trouve ses origines dans (le béton aggloméré) confectionné par F. Coinget en 1853, le béton aggloméré constitué de sable, de ciment de chaux et d'eau, les premières applications de cette technique on retrouve dans :

- ✓ Le mur de soutènement à Passy
- ✓ La maison Coinget à Saint-Denis
- ✓ La réalisation de la tour de port Saïd en Egypte de 52m d'hauteur
- ✓ Et de pont de New York

En ex : URSS en 1918 une expérience très originale fut faite par Nicolas Rochefort a consisté à broyer ensemble du sable et de clinker a parts égales puis à mélanger ce produit a de sable dans un rapport de 1 produit broyer a 3 sable. Les réalisations à base de ce type de matériau sont nombreuses nous donne notamment [32] :

- Les pistes d'aérodromes militaires de Pevco et Arkangelsk.
- Route et autoroute (ex : Serpoukhov-total).
- Bâtiments (toiture a plis, élément divers préfabriqués).
- Tunnels et métros (ombrelles d'étanchéité).

Chapitre I : Généralités sur les bétons légers et béton de sable

I.3.2. Généralité et définition du béton de sable :

La norme Française A.F.N.O.R.NF P18 500 (juin 1995) [33] définit le béton de sable comme Suit : « Le béton de sable est un béton fin constitué par un liant hydraulique, un (ou plusieurs) sable(s), des fines et de l'eau ; on utilise habituellement un (ou plusieurs) adjuvant(s) et on peut, éventuellement, admettre une quantité de gravillons. Les ajouts (fibres, colorants, ...) utilisés dans le béton traditionnel peuvent également être incorporés au mélange. L'incorporation de gravillons d/D autorise l'appellation « béton de sable » tant que le rapport massique G/S reste inférieur à 0,7(G= gravillon ; S= sable) : « on parle alors de béton de sable chargé »

Le béton de sable a les particularités suivantes :

- ✓ 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).

- ✓ Il se distingue d'un béton ordinaire par son dosage en sable(s) élevé, par l'absence ou le faible dosage en gros granulats (une rigidifiassions par des gravillons tels que le rapport G/S soit inférieur à l'unité pour être nécessaire), et l'incorporation d'ajout(s)
- ✓ 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.

I.3.3.Les constituants de béton de sable :

I.3.3.1. Les sables :

Les sable sont tous de granulats de grosseur 0/D, D=5mm, qui influe selon ses qualités : il participe à la résistance, il donne la cohésion de mélange, il doit être dense provenant de roches chimiquement inertes telle que : les calcaires durs, les granite et les quartzites. Suivant leurs grosseurs les sables sont classés en [34] :

- ✓ Sable fine de 0.03 à 0.315 *mm*.
- ✓ Sable moyen de 0.315 à 2*mm*.
- ✓ Sable gros de 2 à 5 *mm*

Ils peuvent aussi être distingués selon leur origine :

- Sables naturels roulés : (sable de rivière, sable de mer, sable de dune, sable de carrière)
- Sable artificiels : on peut les obtenir par :
 - ✓ broyage de certains déchets
 - ✓ transformation industrielle de l'argile
 - ✓ trempe à l'eau et a l'air du laitier de haut fourneau [35]

I.3.3.2. Le ciment :

Le ciment portland est un mélange composé suivant le cas de clinker, de gypse finement broyer et d'ajout éventuels .la taille des grains du ciment portland ordinaire varie de quelque micron à 200 microns. Ses caractéristiques granulaires sont exprimées à travers de sa granulométrie et de sa finesse. Cette finesse est souvent caractérisée par sa surface spécifique Blaine.

Majorité des compositions de ciment dans le but d'améliorer ses caractéristiques rhéologiques et /ou mécanique [35]

Dans de béton de sable, les ciments utilisés doivent être conformes aux normes. Ils peuvent avoir deux roules essentiels : assurer la résistance du béton et combler les vides entre les grains de sable [31]

I.3.3.3. Les fines d'ajouts, (filler) :

Une qualité essentielle du béton de façon générale est sa compacité. Les paramètres essentiels qui vont jouer sur la compacité sont :

- ❖ La granulométrie du mélange et sa teneur en eau,
- ❖ L'énergie de mise en place [36]

Des fillers de dimensions majoritairement inférieures à 80 μm sont utilisés pour remplir lesvides entre les grains de sable afin de réduire la quantité de ciment. Leur rôle assure deux fonctionsprincipales : l'une grossière de remplissage, l'autre d'ordre physico-chimique devant améliorer l'enchevêtrement cristallin et la cohésion du mélange [32].

Pour les bétons ordinaires les macro-vides des gros granulats sont remplis par le sable et les vides de sable sont remplis par le ciment. Pour les bétons de sable les vides entre grains de sable sont remplis par les fines d'ajout [37].

I.3.3.4. L'eau de gâchage :

La quantité d'eau totale qu'on ajoute au mélange sec du béton pour l'hydratation et le mouillage.

Cette quantité est déterminée en fonction de la composition et les moyens de mis en œuvre ; et il faut utiliser la quantité d'eau strictement nécessaire parce que l'eau en excès provoque une augmentation du retrait, de porosité et chute de la résistance.

I.3.3.5. Adjuvants :

Les adjuvants employés devront être conformes aux normes NFP 18-340. Généralement on utilise des plastifiants ou super plastifiants dont l'objectif est d'améliorer la maniabilité du béton de sable en réduisant la quantité d'eau ce qui augmente les caractéristiques du béton. Ils ont un rôle essentiel dans la technique des bétons de sable ; ils déflocculent les éléments fins et permettent de limiter le dosage en eau ; le rapport E/C dans les bétons de sable est plus élevé que dans les bétons traditionnels : diminuer ce rapport permet d'augmenter les performances (accroissement de la compacité et résistances) et de réduire les risques de retrait excessif [32].

D'autres adjuvants tels que les entraîneurs d'air sont ajoutés pour créer un réseau de microbulles d'air qui assurent la protection du béton de sable vis-à-vis du gel et des fondants utilisés en période hivernale. Leur utilisation est obligatoire dans les zones froides [36].

I.3.3.6. Autre ajouts :

Les fibres : fibre métalliques (en acier ou en fonte) ou de fibres de polypropylène, les gravillons et les colorants.

I.3.3.6.1. Les fibres :

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

On utilise dans la plupart des cas les fibres organiques pour contrecarrer les effets du retrait de prise et éviter la fissuration qui en résulte.

Si l'on veut améliorer la ductilité, on pourra utiliser des fibres d'acier ou des fibres de fonte amorphe.

I.3.3.6.2. Les gravillons :

Le béton de sable peut contenir un certain pourcentage de gravillons et prend la dénomination de « béton de sable chargé ». En effet, tant que les gravillons sont dispersés dans le sable, et ne constituent pas un squelette structuré, le comportement reste généralement le même [36].

L'ajout de gravillons, en faible dosage, a pour objectif d'améliorer certaines caractéristiques du béton de sable telles que la maniabilité, le retrait, le fluage et la résistance mécanique.

En pratique, on pourra considérer qu'on a un béton de sable tant que le rapport pondéral (G/S) reste inférieur à 0,7 [38], alors qu'il est compris entre 1,4 et 1,7 pour les bétons traditionnels.

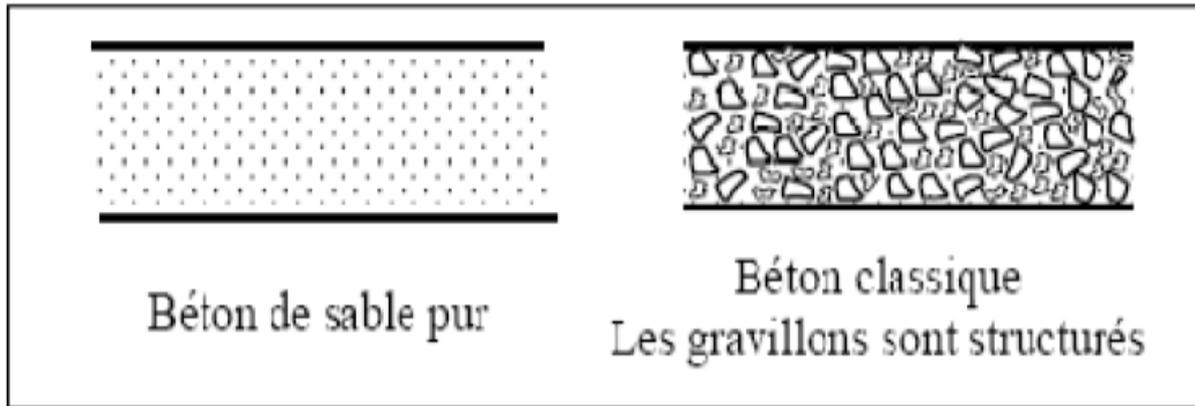


Figure I.7 : Différence entre béton de sable et béton ordinaire [36]

I.3.4. Les propriétés des bétons de sable :

I.3.4.1. La compacité :

La compacité est une qualité essentielle qui influe sur les performances du béton.

L'optimisation de la compacité relève d'une démarche visant à minimiser la quantité d'eau à ajouter au mélange sec et à optimiser la teneur des ajouts.

➤ Effet de la granulométrie du sable sur la compacité :

D'après plusieurs études expérimentales [36], il a été montré qu'un sable alluvionnaire ($D_{max} \cong 5\text{mm}$) nécessite moins de fines qu'un sable de dune ($D_{max} < 1\text{mm}$). Ceci pourra s'expliquer par le fait que la porosité dépend de la granulométrie du sable qui est une fonction de la nature du sable, et plus le sable est poreux (le cas d'un sable dunaire) plus on a besoin de fines. Bien que dans ce cas cet inconvénient soit compensé par l'ajout de fines qui améliore la compacité, le béton de sable reste toujours moins compact que le béton ordinaire [39]

➤ Effet de l'addition des fines :

En fonction de la finesse, du dosage en fines et du dosage en ciment, on a pu remarquer qu'il existe un dosage optimal à partir duquel la compacité commence à diminuer (figure I.8).

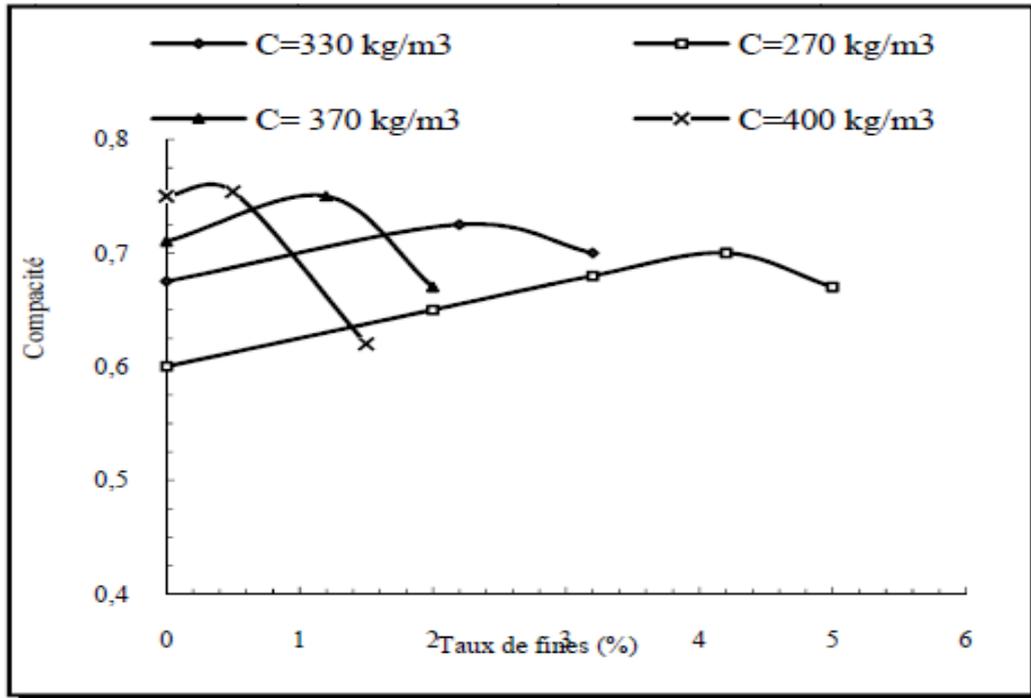


Figure I.8: effet le dosage en fine sur la compacité [40]

I.3.4.2. La maniabilité :

Le béton de sable se traduit par des valeurs E/C (eau/ciment) supérieur a 0.5 ce rapport généralement entre 0.6 et 0.7 qui due à une surface spécifique plus importante du mélange la maniabilité des bétons de sable dépend aussi de [31 ,41] :

- Le module de finesse de sable
- La nature et le dosage en fine.
- Le taux de gravillon dans le béton de sable [42]

La figure I.9 : Le module de finesse de sable augment quand le sable riche en éléments gros qui implique l'amélioration de la maniabilité.

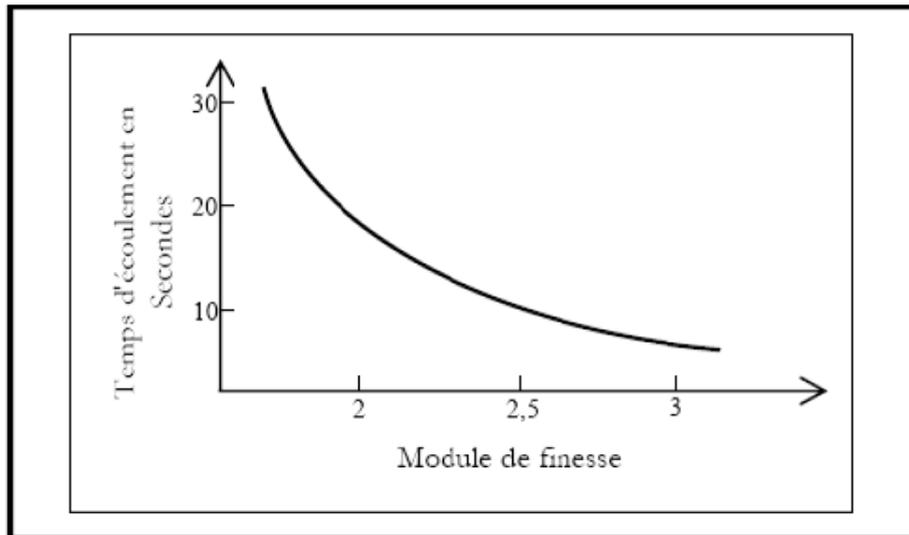


Figure I.9 : La maniabilité en fonction de module de finesse

- ✓ **La NATURE ET LE DOSAGE EN FINE** : La maniabilité est améliorée lorsque le rapport E/C est augmenté ; et pour un rapport E/C fixe, la maniabilité dépend de dosage en fine [31]

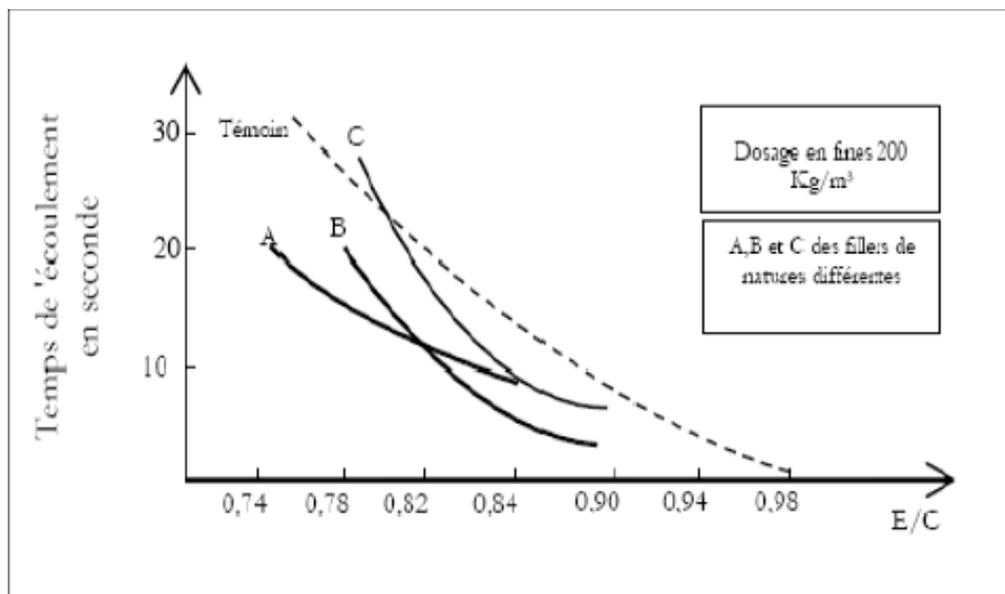


Figure I.10 : influence de la nature et du dosage en addition sur la maniabilité

I.3.5. Le comportement mécanique :

Les performances mécaniques restent parmi les critères les plus utilisées pour le jugement de la qualité des bétons et pour leurs classifications.

Généralement, les résistances mécaniques des bétons de sable sont inférieures à celles des bétons classiques. Cependant, cela n'empêche aucun cas d'obtenir des bétons de sable à haute performance mécanique, c'est dans ce sens que plusieurs comparaisons ont été faites dans l'objectif de voir dans quelles mesures les bétons de sable pourraient remplacer les bétons classiques.

La résistance est aussi dépendante d'un certain nombre de paramètres, en plus de la qualité et du dosage en ciment et du rapport E/C. On cite en particulier :

- La finesse de l'addition
 - Nature de l'addition
 - La dimension maximale
- **La finesse de l'addition :** plus l'addition est fine, plus elle est efficace au niveau du gain de compacté et donc du gain en résistance [31]
- **Nature de l'addition :** pour le même dosage en fin d'addition et pour le même rapport E/C on constate que la résistance mécanique est très variable, ce qui explique que la nature des fines d'ajout influe aussi sur la résistance
- **La dimension maximale :** pour une même valeur du rapport E/C on constate que l'effet du diamètre d_{max} du plus gros granulat est peu important en tout état de cause, le béton très maniable dans le cas d'un 0/20 [32]

I.3.6. Retrait :

Le retrait c'est un phénomène de raccourcissement qui accompagne la prise du ciment, le durcissement sous l'eau diminue beaucoup les effets de retrait c'est pourquoi il convient de tenir les pièces humides en les arrosant pendant leur durcissement ou le béton très jeune qui peut se fissurerait facilement sous l'effet de retrait [41].

➤ **le retrait endogène :**

Il est lié aux facteurs internes d'échange entre l'eau et le ciment : avant et pendant la prise de 2 à 3 heures, une rétraction lors de l'introduction de l'eau de gâchage après une expansion due à la formation de l'étringite à cause du dégagement de chaleur. Après prise il y a une contraction thermique qui suit l'expansion et qui se stabilise au bout de quelques jours.

➤ le retrait de dessiccation :

Il est en fonction directe avec les conditions atmosphériques ambiantes. Et peut atteindre des valeurs deux fois plus importantes que celles des bétons classiques du moins pendant les deux premiers mois, ensuite il y'a une tendance à la stabilisation. Ce phénomène semble être lié à la taille et à la distribution des pores dans les bétons [43].

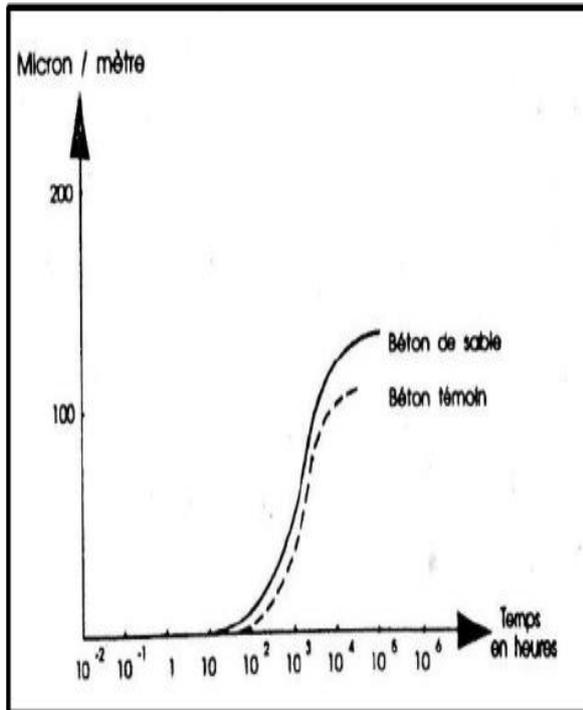


Figure I.11.1 : Retrait d'auto-dessiccation

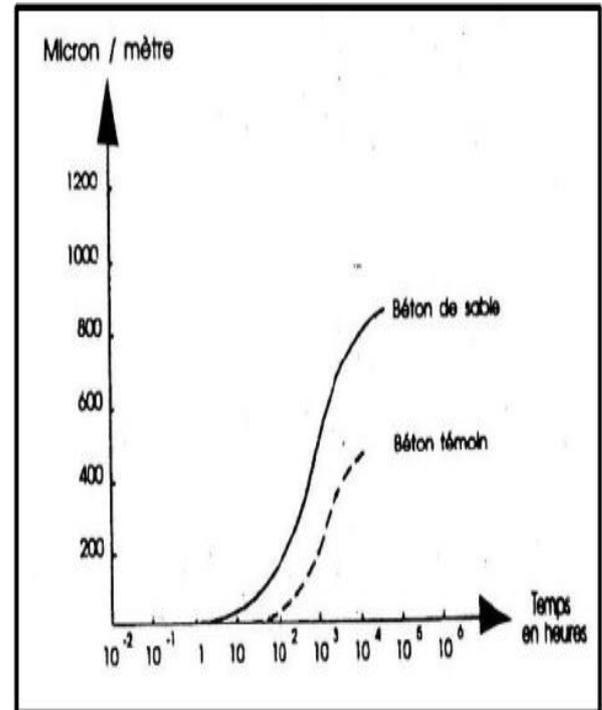


Figure I.11.2 : Retrait total

I.3.7. Fluage :

Le fluage c'est un phénomène de déformation différée sous l'effet d'une charge fixe indéfiniment appliquée [41].

La cinétique du fluage propre du béton de sable ne diffère pas beaucoup de celle du béton ordinaire, les études sur le béton de sable expliquent que le fluage propre était plus lent que celui d'un béton ordinaire pendant le premier mois, par contre à long terme la déformation du béton de sable devient plus importante que celle du béton ordinaire[31]

I.3.8. Durabilité :

La porosité, répartition géométrique des pores et perméabilité sont des paramètres physiques de premier ordre de la durabilité.

D'une façon générale, les bétons de sable sont plus poreux que les bétons traditionnels leurs pores plus nombreux, plus petites. Cette distribution poreuse particulière contribué pour une bonne part à leur bon comportement vis-à-vis des essais de durabilité.

I.3.9. Domaines d'utilisation des bétons de sable :

Le béton de sable est un matériau nouveau créé pour remplacer le béton classique dans certains éléments de structure, les principaux domaines d'utilisation des bétons de sable sont : [31,37].

- Travaux avec du béton injecté
- Travaux avec un fort cadrage
- Pilots de béton armé sur place
- Certains travaux de fondations pour les constructions
- Travaux pour terrasses
- Tuyaux de canalisation en béton simple ou armé
- Panneaux préfabriqués pour murs intérieurs et extérieurs portants ...etc.

I.4. Conclusion :

- ✓ Nous avons présenté dans cette étude bibliographique, une synthèse en premier lieu sur les caractéristiques physiques et mécaniques des bétons légers.

Cette étude a permis de mettre en évidence l'influence notable des granulats légers sur les performances mécaniques du béton léger, à l'inverse des granulats de densité normale. 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. La grande diversité de composition se retrouve dans la grande variété des propriétés des bétons de granulats légers qui sont des matériaux poreux pulvérulents, naturels ou artificiels. Ces bétons peuvent apporter une solution technique très intéressante au problème d'isolation thermique et acoustique dans les bâtiments.

- ✓ En second lieu nous avons présenté une synthèse des connaissances actuelles sur les bétons de polystyrène objet de notre étude et qui sont donc devenus des matériaux

Chapitre I : Généralités sur les bétons légers et béton de sable

particulièrement performants grâce aux qualités qui leur sont conférés par l'association de la matrice cimentaire et des granulats de polystyrène expansé :

- Masse volumique très faible.
 - Pouvoir isolant élevé.
 - Correction acoustique.
- Nous avons présenté à la fin de ce chapitre une synthèse bibliographique sur les bétons de sable qui concerne surtout les volets composition, domaine d'utilisation, propriétés physicomécaniques et durabilité.

***Chapitre II : Caractérisation des matières
premières***

II. Caractérisation des matières premières :

II.1. Introduction :

La caractérisation des matériaux utilisés dans la composition d'un béton joue un rôle très important sur ses propriétés et ses performances ultérieures. En effet, les propriétés essentielles du béton sont largement influencées par les caractéristiques de ses constituants.

De ce fait, la normalisation des modes d'essais et d'identification des composants d'un béton, selon les normes en vigueur, devient une condition nécessaire pour l'obtention d'un béton avec des résultats expérimentaux comparables avec ceux donnés dans la littérature.

Dans ce chapitre, on présente les différents matériaux utilisés dans la confection des bétons à étudier ainsi que les essais à effectuer selon les normes européennes.

Le choix des matériaux s'est porté sur leur disponibilité dans la région de l'est et leur conformité aux normes. Les matériaux utilisés sont :

1. Sable de dune
2. Sable de carrière
3. Ciment
4. Filler de laitier
5. Granulats de Polystyrène
6. Super plastifiant

II.1.1. Les sables :

Les sables sont des fractions des granulats pierreux dont les grains ont des dimensions comprises entre 0,080 mm et 5 mm ; il s'agit d'une définition globale, dont les bornes varient d'une classification à une autre. Ce sont aussi les matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 6,3mm et dont le passant à 80 microns n'excède pas **30%**

Dans notre travail expérimental nous avons utilisé deux types de sable :

- ❖ Un sable fin siliceux (sable de dune) de la région de Biskra
- ❖ Un sable de carrière de la région de Souk-Ahras, obtenue par la réduction de roches ou de gravier concassé en granulats fins.



Figure II.1 : Les sables

II.1.1.1. L'analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. On utilise une série des tamis (5/4 ; 3,15/2,5 ; 2/1,25 ; 1/0,63 ; 0,315/0,16 ; 0,125/0,08) conforme à la norme EN 933-2



Figure II.2 : Les séries des tamis

Dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas.

Le matériau est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtiens par vibration de tamis. La courbe qui relie le pourcentage des passants aux diamètres des Tamis est appelée courbe granulométrique.

II.1.1.2. Le module de finesse :

Le module de finesse d'un sable est égal au centième de la somme des refus, exprimés en pourcentages sur les différents tamis de la série suivante :

0.160 – 0.315 – 0.630 – 1.250 – 2.5 – 5mm

$$M_f = \frac{\Sigma \text{refus cumulés en \% pondéral des tamis (0.16 / 0.315 / 0.63 / 1.25 / 2.5 / 5mm)}}{100}$$

Le module de finesse est plus particulièrement appliqué aux sables dont il est une caractéristique importante. Un module de finesse est d'autant plus faible que le granulat est riche en éléments fins.

II.1.1.3. Équivalent de sable :

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).

$$E_s = \frac{h_1}{h_2} \times 100$$

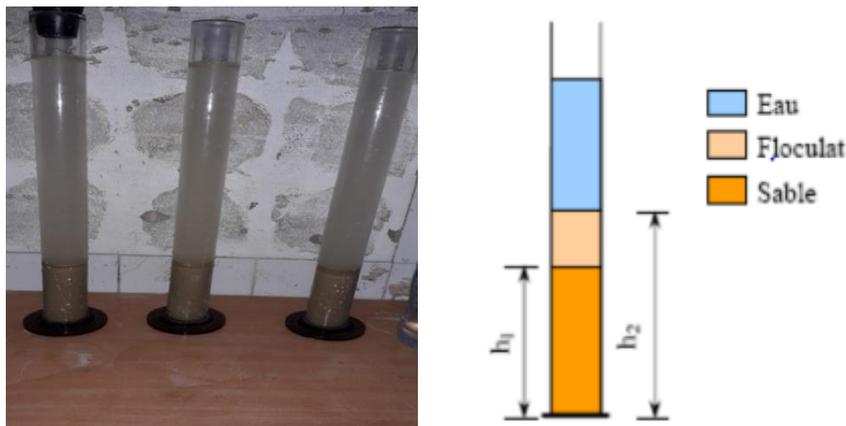


Figure II.3 : L'essai d'équivalent de sable

II.1.1.4. Masse volumique absolue (NF EN 1097-3) :

Elle est exprimée en Kg/m^3 . La masse volumique absolue est la masse par unité de Volume, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains.

Chapitre II : Caractérisation des matières premières

En utilisera les méthodes de l'éprouvette graduée et le pycnomètre et pour les liants on utilisera Le Chatelier et un liquide inerte vis-à-vis de la poudre (liant)

On calcule la valeur de la masse volumique par le rapport : $\rho = \frac{M}{V_{abs}} (g/cm^3)$



Figure II.4 : Densimètre Le Chatelier

II .1.1.5. La masse volumique apparente :

La masse volumique apparente est la masse d'un corps par unité de volume y compris les vides entre les grains. Cet essai est réalisé selon la norme **NF EN 1097-3**.

L'essai consiste à remplir un récipient vide de volume connu de matériau sec sans le tasser et peser ensuite cette quantité de matériau. On calcule la valeur de la masse volumique par le

rapport : $\rho = \frac{M}{V_{app}} (kg/m^3 - g/cm^3)$



Figure II.5 : L'appareillage de la masse volumique apparente

Chapitre II : Caractérisation des matières premières

II.1.1.6. La compacité et la porosité NF P 18-555 :

On définit la compacité d'un matériau comme le rapport du volume solide sur le volume Total. Et la porosité comme le rapport du volume des vides sur le volume total.

La compacité et la porosité sont souvent exprimées en %. La somme des deux est alors égale à 100% : **P+C=100**

Si l'on connaît la masse volumique apparente et absolue du matériau, il est aisé alors de calculer sa compacité et sa porosité selon la formule suivante :

$$c = \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \times 100 \qquad p = \left(1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}}\right) \times 100$$

- Les résultats de l'analyse granulométrique du sable dunaire et sable de carrière sont regroupés dans les tableaux (II.1 et II.2) et illustrés par les figures (II.6)

Tableau II.1 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable de dune

Tamis	Mi (g)	ai (%)	Ai	T (%)
5	1.33	0.396	0.396	99.60
4	1.3	0.132	0.528	99.47
3.15	4.3	0.437	0.965	99.03
2.5	5.9	0.599	1.564	98.44
2	8.2	0.833	2.397	97.60
1.25	29.1	2.95	5.347	94.66
1	18.7	1.900	7.247	92.76
0.63	96.9	9.849	17.096	82.904
0.315	541.7	55.062	72.158	27.84
0.16	129	13.112	85.27	14.73
0.125	122.6	12.461	97.731	2.26
0.08	15.7	1.597	99.326	0.674
FOND	7.2	0.731	100	0

Chapitre II : Caractérisation des matières premières

Tableau II.2 : Résultat de l'analyse granulométrique du sable de carrière

Tamis	Mi (g)	ai (%)	Ai	T (%)
5	2.5	0.251	0.251	99.749
4	6,2	0.622	0.873	99.127
3.15	70.5	7.080	7.953	92.047
2.5	138.2	13.879	21.832	78.168
2	379.4	38.103	59.935	40.065
1.25	1.8	0.18	60.115	32.81
1	82.2	8.225	68.37	30.41
0.63	165.2	16.591	84.961	15.039
0.315	144.8	14.542	99.503	0.497
0.16	3.4	0.341	99.844	0.159
0,125	1	0.100	99.944	0.056
0,08	0.5	0.050	99.894	0.106
Fond	0	0	99.894	0.1

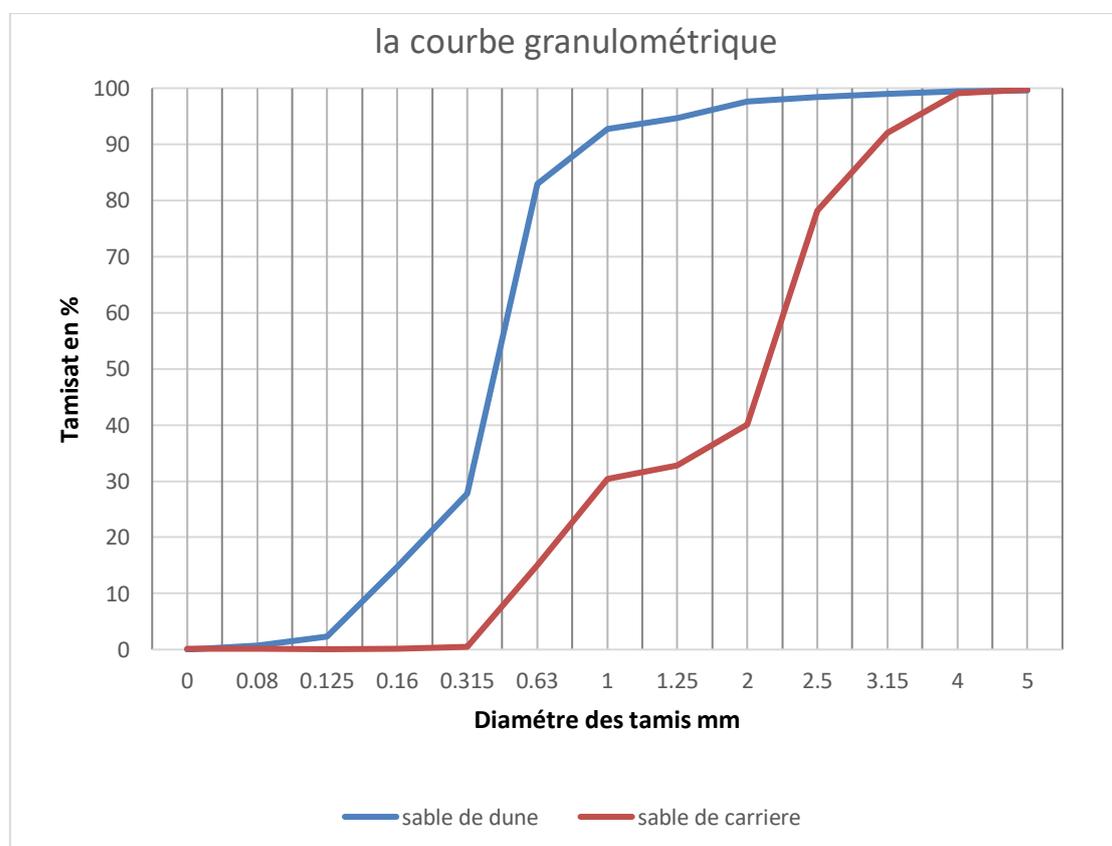


Figure II.6 : Courbe granulométrique du sable de dune et sable de carrière

Chapitre II : Caractérisation des matières premières

Remarque :

- ✓ D'après les courbes granulométriques des sables étudiés, on remarque que la granulométrie correspondant au sable de carrière est clairement plus étalée que celle de sable de dune. Cela nous laisse à préjuger que le sable de carrière pourrait donner des performances mécaniques meilleures que le sable de dune.

Les essais sont répétés trois fois pour chaque matériau la moyenne des essais constitue les valeurs dans les tableaux.

Les résultats des caractéristiques physiques des sables obtenus sont représentés dans le **tableau (II.3)**.

Tableau II.3 : Caractéristique physique des sables

	Unité	Sable de dune	Sable de carrière
Le module de finesse	-	1,8	2,6
La masse volumique apparente	(g/cm ³)	1,39	1,28
La masse volumique absolue	(g/cm ³)	2,60	2,65
La propreté	%	86,99	84,87
La compacité	%	53,46	48
La porosité	%	47	51,69

Remarque :

Nous pouvons constater d'après les résultats les remarques suivantes :

- ✓ Les valeurs de la masse volumique apparente et absolue pour les deux types de sable sont proches

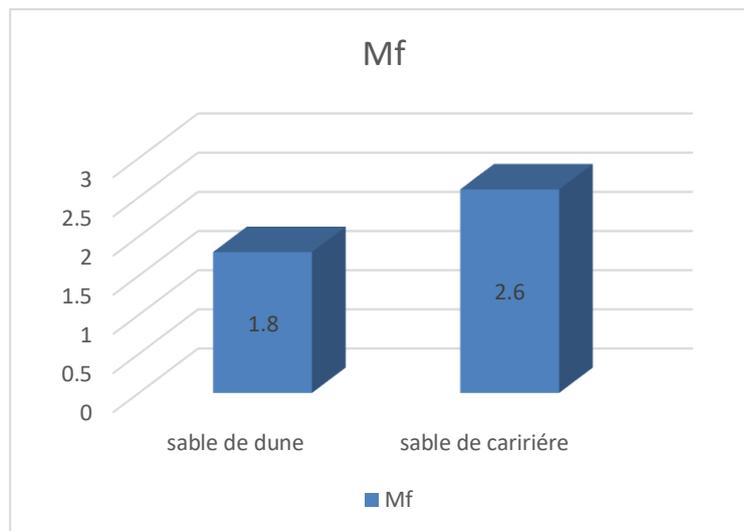


Figure II.7: Les modules de finesse et la porosité des sables

Remarque :

Nous pouvons constater d'après les résultats les remarques suivantes :

- ✓ Le module de finesse de sable de carrière est plus grand que celle du sable de dune.

II.1.2. Le ciment :

Au cours de cette expérimentation Nous avons utilisé un seul type de ciment. Il s'agit d'un ciment portland composé avec un ajout de laitier **CPJ-CEM II /A 42.5N**, confectionné et mis en sacs de 50 kg à par la cimenterie de **HADJAR-ESSOUD** et possédant toutes les capacités liantes.

II.1.2.1. La consistance normale :

L'essai de consistance normale (**Norme NF P 15 – 414**) permet de déterminer le pourcentage d'eau nécessaire pour fabriquer une pâte dite de consistance normale. Il s'agit de mesurer l'enfoncement d'une sonde normalisée de diamètre $\varnothing = 10$ mm, sous son propre poids dans une pâte préalablement préparée et contenue dans le moule de l'appareil de Vicat. La pâte est dite de consistance normale lorsque la différence entre la hauteur du moule et l'enfoncement de l'aiguille est égale à 6 ± 1 mm

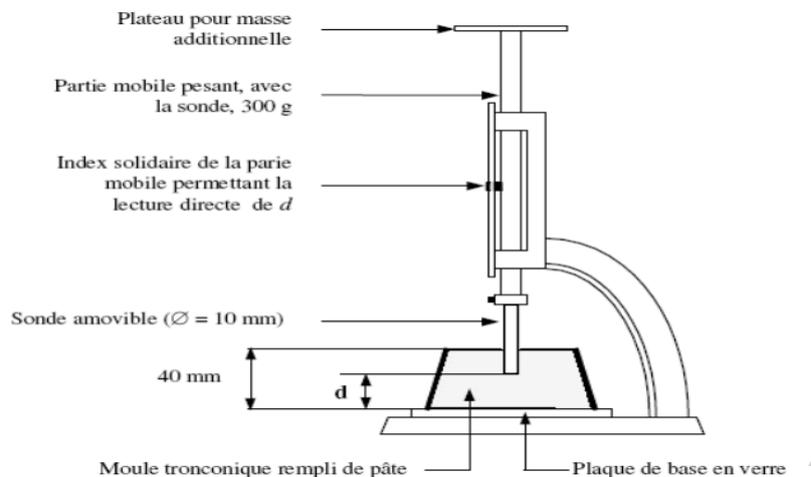


Figure II.8 : L'appareil de Vicat

II.1.2.2. Prise de ciment :

La durée de prise d'un ciment (Norme NF P 15 – 414) est généralement caractérisée par :

- ❖ Le temps de début de prise.
- ❖ Le temps de la fin de prise

Le début de prise correspond au moment où l'on observe une augmentation de la viscosité, ou raidissement de la pâte.

L'essai consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de consistance normalisée, l'appareil utilisé est l'appareil de Vicat, équipé d'une aiguille de 1.13 mm de diamètre. Quand,

Chapitre II : Caractérisation des matières premières

sous l'effet d'une charge de 300 g l'aiguille s'arrête à une distance du fond du moule égale à $4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, On dit que le début de prise est atteint.

Ce moment, mesuré à partir du début de malaxage, est appelé « temps de début de prise »

Le « temps de fin de prise » est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que 0.5 mm

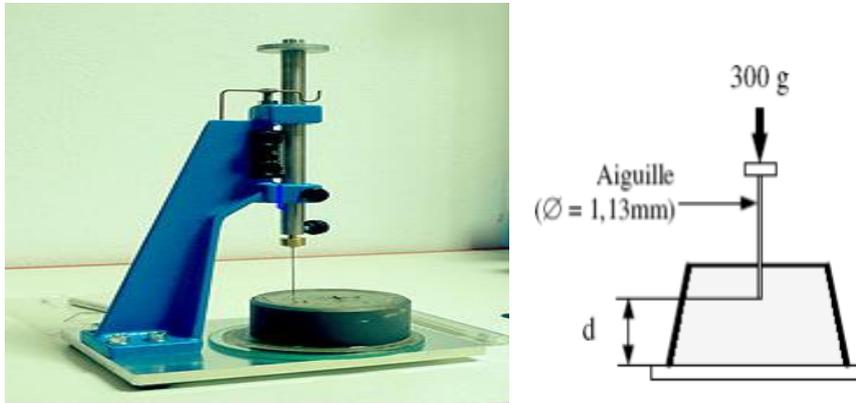


Figure II.9 : La prise de ciment

II.1.2.3. La finesse du ciment :

La finesse d'un matériau fin peut être caractérisée par sa surface massique. C'est la surface totale des grains contenus dans l'unité de masse de poudre. L'appareil utilisé pour déterminer la finesse de mouture est appelé Perméabilimètre de Blaine.

Les résultats sont fournis par la cimenterie de **HADJAR ESSOUD**.

- Les principales caractéristiques physiques et chimiques et minéralogiques de ce ciment sont résumées dans les tableaux **II.4**, **II.5** et **II.6** suivants :

Tableau II.4 : Caractéristiques physiques du ciment utilisé

Caractéristique	Unité	Valeurs
Masse volumique absolue	g/cm^3	3
Masse volumique apparente	g/cm^3	1.06
Consistance normale	%	29
Début de prise	h/min	2/34
Finesse de mouture (refus sur tamis)	%	9.6
Surface spécifique de Blaine	cm^2/g	3300-4000
Résistance à la traction à 28 j	MPa	6,5-8,5
Résistance à la compression à 28j	MPa	42,5-47

Chapitre II : Caractérisation des matières premières

Tableau II.5 : Composition chimique de ciment

Cao	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl ⁻	So ₃	p-a-f	Ca OL
55-65	5-6	22-28	3-3.6	1-2	0.1-0.16	0.3-0.6	0-0.01	1.8-2.5	1-2	0.8-1.8

Tableau II.6 : Pourcentage des différents constituants minéralogique du clinker

Constituants	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
%	55-65	10-25	8-12	9-13

II.1.3. Les Fillers de laitier :

Les fillers utilisés sont des fillers de laitier granulé obtenus par broyage des sous-produits de l'industrie sidérurgique de haut fourneau d'El-Hadjar.

L'addition minérale sous forme de fillers peut avoir trois effets différents :

- **Effet filler ou effet de remplissage** : remplissage inter granulaire et amélioration de la compacité
- **Effet physique ou de surface** : amélioration de la rhéologique par effet de la surface lisse des particules de fillers
- **Effet chimique ou pouzzolanique** : production des hydrates secondaire par réaction pouzzolanique avec la chaux .la réaction pouzzolanique est une réaction chimique entre la silice et la pentlandite

Les fines d'ajouts ou fillers utilisés sont des fillers de laitier obtenus par broyage au laboratoire. Les caractéristiques physiques et la composition chimique sont représentés respectivement aux **tableaux II.7 et II.8**.

Tableau II.7 : Propriétés physiques des fillers

Caractéristique	Unités	Valeurs
Masse volumique absolue	g/cm ³	2.85
Finesse de mouture	%	10.6
Surface spécifique de Blaine	cm ² /g	4200

Tableau II.8 : Composition chimique du laitier

Minéraux	fer	Mno	Cao	SiO ₂	soufre	Mgo	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O
Constituants en %	0.5-1.9	1.3-2.5	36-46	35-45	0.6-0.75	3-8	4-12	0.1	0.3	0.5

Chapitre II : Caractérisation des matières premières

II.1.4. Granulats de polystyrène recyclé :

Les granulats de polystyrènes expansés sous forme de billes utilisés dans notre étude sont obtenus du recyclage de l'emballage des machines d'électroménagers récupéré des magasins de l'électro- ménager.

- ❖ Philips : déchet des panneaux, plaques et emballage en polystyrène
- ❖ Brand : emballage en polystyrène

Ce sont des granulats organiques artificiels ; les échantillons se présentent sous forme de billes parfaitement sphériques ; l'enveloppe extérieure de ces perles est lisse et d'un grain serré ce, elles demeurent donc imperméables, même sous forte pression d'eau.



Figure II.10 : Les granulats de polystyrène recyclé

Tableau II.9 : Caractéristique des granulats de polystyrène recyclé

Caractéristique	Valeurs
Masse volumique	0.009 g/cm ³
Forme	sphérique
Couleur	Blanche

II.1.5. L'Adjuvant :

Les adjuvants sont des produits solubles dans l'eau qui, incorporés aux bétons à des doses qui doivent être inférieures ou égales à 5 % du poids de ciments, permettent d'améliorer certaines de ses propriétés. Ils sont définis par **la norme EN 934-2**.

Le super plastifiant est un produit qui améliore la plasticité d'un béton frais, sa stabilité (diminution du risque de ségrégation), et donc son ouvrabilité.

Le super plastifiant utilisé pour la formulation des bétons à base de granulats de polystyrène est superplastifiant de nouvelle génération commercialisé par la société **SIKA El DJAZAIR** sous l'appellation **SIKAPLAST BV 40 +**. Le dosage utilisé est de l'ordre 2 % du poids de ciment.

Chapitre II : Caractérisation des matières premières

Caractéristiques techniques

ASPECT / COULEUR Liquide brun foncé

DENSITÉ.....1,040 kg/l \pm 0,015

PH.....4,7 \pm 1

TENEUR EN IONS Cl..... \leq 0,10%

TENEUR EN NA₂O Eq..... \leq 0,5%

EXTRAIT SEC..... 11,5% \pm 1,5 % (en poids)

Stockage

18 mois à partir de la date de fabrication s'il est stocké dans l'emballage d'origine intact non entamé et à l'abri de l'humidité entre 5 et 30°C

II.1.6. L'eau de gâchage :

La qualité et le dosage de eau de gâchage peut avoir une influence sur le temps de prise, l'évolution des résistances et surtout la durabilité du béton.

Les conditions imposées à l'eau de gâchage sont précisées par la norme **FP18-303**.

Cette eau doit être propre et sans matière organiques, la norme n'autorise l'emploi de l'eau de mer que dans des cas très particuliers. L'eau utilisée dans notre étude est une eau potable de robinet de la ville d'Annaba.

II.2. Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la présentation des caractéristiques des matériaux utilisés dans la formulation des bétons d'études. D'après les différents résultats de caractérisation des matériaux on peut conclure que :

- ❖ Les valeurs de la masse volumique apparentes sont les plus faibles par contre celles des masse volumique absolue sont les plus grande pour les deux sables, ce qui est logique.
- ❖ Le sable de dune est un sable très fin de module de finesse 1.8 donc bien pour l'ouvrabilité combiné avec le sable de carrière un peu grossier ($M_f = 2.6$) peut donner une bonne granulométrie et une bonne compacité des mélanges.

Chapitre II : Caractérisation des matières premières

- ❖ Avec une valeur de l'équivalent de sable supérieur à 80% ($E_s > 80$) pour les deux sables utilisés, on conclure sables sont très propres et conforme à la norme.
- ❖ Les fillers de laitier granulé ont d'excellentes affinités avec le ciment et présentent caractéristiques physico-chimiques (finesse de mouture, composition chimique) qui peuvent améliorer la résistance et la durabilité par leurs effets de remplissage et pouzzolanique.
- ❖ La caractérisation des granulats de polystyrène utilisé a une très faible masse volumique par rapport à celle des granulats naturels ce qui présente un avantage technico-économique (légèreté, isolation thermique et phonique).
- ❖ Selon les résultats obtenus on peut conclure que tous les matériaux choisis sont de bonne qualité et conforme aux normes. Cela va nous aider à bien formuler les bétons de sable d'étude à base de granulats de polystyrène recyclé.

***Chapitre III : formulation et propriétés des bétons
d'étude à l'état frais***

Chapitre III : formulation et propriétés des bétons d'étude à l'état frais

III. formulation et propriétés des bétons d'étude à l'état frais :

III.1. Introduction :

La formulation ou l'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents composants (ciment, eau, adjuvants, ...) dont on dispose afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la réalisation d'un ouvrage résistant avec une durabilité accrue.

L'objectif principal de ce travail expérimental est d'étudier un procédé d'allègement d'un béton de sable par incorporation de billes de polystyrène de recyclage et d'aider à développer une compréhension améliorée des caractéristiques du béton de polystyrène.

La formulation des bétons d'étude consiste à faire varier deux paramètres qui sont les proportions de granulats de polystyrène (0 ; 10 ; 20 ; 30 ; 40 ; 50 ; 60 ; 70) % et de sable en substituant l'un par l'autre.

Ce chapitre est composé de deux parties : la première partie consiste à la détermination de la composition des bétons d'étude. La deuxième partie sera consacrée à la présentation et à l'interprétation des résultats de la caractérisation rhéologique des bétons de sable à base de granulats de polystyrène recyclé à l'état frais.

III.2. Formulation des bétons d'étude :

❖ Béton de sable :

L'étude de la composition d'un béton de sable consiste à définir le mélange optimal des différents constituants dont on dispose ainsi que le dosage en fines, adjuvants et eau.

Pour les bétons de sable deux méthodes de formulation sont proposées : une approche théorique de formulation (SABLOCRETE) et une expérimentale.

❖ Béton de polystyrène :

Après avoir déterminé la composition optimale du béton de sable (matrice), on procède à l'allègement du matériau par incorporation dans la matrice des granulats de polystyrène expansé en forme de billes. Les mêmes compositions optimales de béton de sable ont été utilisées.

Les dosages pondéraux en granulats PSE du béton de polystyrène recyclé sont déterminés par rapport au volume du sable utilisé. On a fait varier le dosage en polystyrène de 10% à 70% avec un pas de 10%. Les propriétés des bétons légers élaborés seront bien entendu confrontées aux mêmes propriétés des bétons témoins et confectionnés selon les mêmes procédés de mise en œuvre et de dosage en sable, ciment, fines et eau. Cependant, le seul paramètre variable d'un mélange à l'autre est le dosage en granulats de polystyrène recyclé.

Chapitre III : formulation et propriétés des bétons d'étude à l'état frais

III.2.1. Approche théorique de formulation de SABLOCRETE :

III.2.1.1 étapes de calcul :

- Estimation du dosage en fines d'un béton de sable :

Les fines sont constituées du ciment, des fines d'ajout (filler)

Le dosage volumique optimal des fines s'écrit :

$$[\text{Fines}] = 0.38 (0.38/D)^{1/5} \quad (1) \quad (\text{En \% volumique})$$

- Porosité et dosage en eau dans le béton de sable :

Au dosage en eau, sont subordonnées nombre de performances, et notamment le rebond du matériau. Un manque d'eau découle sur une hydratation insuffisante. A l'inverse, un excès d'eau affecte la consistance.

La relation mathématique de Caquot reliant le dosage en eau [e], le volume d'une part et l'étendue granulaire de l'autre, s'écrit :

$$[E/V]_{\min} = 0,8(d/D)^{1/5} \quad (3)$$

D : diamètre maximale

La valeur de « **d** » peut être définie comme la moyenne de la taille des grains (assimilés à un volume sphérique) du constituant le plus fin.

De ce fait, le diamètre moyen des grains est donné par la formule suivante :

$$d = \frac{60}{f \cdot \rho} \text{ mm} \quad (4)$$

f : surface spécifique cm^2/g

ρ : densité g/cm^3

Pour estimer la teneur en eau, le volume d'air doit être déterminé. Un ordre de grandeur peut être obtenu comme suit :

$$[\text{Vide}] = k [\text{eau}] \quad (5)$$

K : compris entre 0.2 et 0.25

- Estimation le dosage en sable :

$$[\text{Sable}] = 1000 - [\text{fines}] - [\text{eau}] - [\text{vide}] \quad (6) \quad \text{en } (l/m^3)$$

- Dosage en ciment et filler :

$$\frac{\text{filler}}{\text{ciment}} = X \quad (7)$$

$$\text{filler} = X \cdot \text{ciment} \quad (\text{Valeur massique})$$

- Estimation de la résistance en compression :

$$R_B = \frac{K_f \cdot R_c}{\left[1 + \frac{3.1(e+v)}{C(1+K_1+K_2)}\right]^2} \quad (8)$$

K_f : Coefficient granulaire (4,5 ÷ 5)

R_c : Classe de résistance de ciment (MPa)

Chapitre III : formulation et propriétés des bétons d'étude à l'état frais

(e+v) : volume d'eau +vide en litres

C : dosage en ciment

R_b : Résistance en compression à 28 jours(MPA)

K_1 Et K_2 : coefficient d'activité des fines d'ajouts

$$K_1 = K_{cv} \cdot \frac{cv}{c} + K_{LG} \cdot \frac{LG}{c} + K_{FS} \cdot \frac{FS}{c} (\text{active})$$

$$K_2 = K_{fil} \times \frac{fil}{c} (\text{Inerte})$$

$$0,2 < K_{CV} < 0,4 \quad 2 < K_{fs} < 3,3 \quad \text{Et} \quad K_1 \leq 0,5$$

$$0 < K_{fil} < 0,5 \quad K_2 \leq 0,2$$

$K_{cv}, K_{FS}, K_{LG}, K_{fil}$: coefficient d'équivalence en ciment des différentes additions en fines.

Cv, FS, FIL : dosage en cendre volante, fumée de silice et de fillers.

III.2.2. Composition de béton d'étude :

Dans notre étude nous avons utilisé l'approche théorique de formulation de **SABLOCRETE** avec ajustement pour la détermination de la composition des bétons de sable d'étude.

Les compositions des bétons de sable avec (**25%** sable de dune et **75%** sable de carrière) et **2%** du superplastifiant. la formulation du béton de sable de référence ou témoin est obtenue avec dosage de ciment fixe.

Le dosage en eau est ajusté de manière pour avoir un béton plastique avec un affaissement au cône d'Abrams de l'ordre de **6 à 9** cm.

L'ensemble des résultats de la formulation des bétons d'étude est récapitulé au niveau de **tableau III.1**

Chapitre III : formulation et propriétés des bétons d'étude à l'état frais

Tableau III.1 : composition des bétons de sable d'étude

Bétons de sable	Dosage en constituants (kg/m^3)								
	Ciment	Eau	Sable de dune	Sable de carrière	Grains de polystyrène		Filler	SP	E/C
						%			
BST	307,4	215,18	412.1	1260.07	-	0	184,44	9,8	0.7
BSP1	307,4	215,18	376,16	1150.18	0.578	10	184,44	9,8	0.7
BSP2	307.4	215,18	334,36	1022.37	1,157	20	184,44	9,8	0.7
BSP3	307.4	215,18	292.55	894.59	1.736	30	184,44	9,8	0.7
BSP4	307.4	215,18	250.75	766.77	2.314	40	184,44	9,8	0.7
BSP5	307.4	215,18	208.96	638.96	2.89	60	184,44	9,8	0.7
BSP6	500	184.44	167.18	257.2	3.858	60	184,44	9,8	0.6
BSP7	500	184.44	125.38	255.79	4.050	70	184,44	9,8	0.6

BST : béton de sable témoin avec **0%** de polystyrène

BSP1 : béton de sable avec **10%** de polystyrène

BSP2 : béton de sable avec **20%** de polystyrène

BSP3 : béton de sable avec **30%** de polystyrène

BSP4 : béton de sable avec **40%** de polystyrène

BSP5 : béton de sable avec **50%** de polystyrène

BSP6 : béton de sable avec **60%** de polystyrène

BSP7 : béton de sable avec **70%** de polystyrène

Chapitre III : formulation et propriétés des bétons d'étude à l'état frais

III.2.3.Mode de préparation :

Après avoir déterminé les proportions de chaque constituant, les étapes qui se suivent sont :

- Vérifier en premier le nombre et l'état des moules nécessaires pour les essais. Ces derniers doivent être graissés à l'aide d'une huile pour faciliter le décoffrage.
- Vérifier que les matériaux ne sont pas humides, sinon il faut les sécher préalablement dans l'étuve.
- Réunir tout le matériel nécessaire pour effectuer les essais.
- Préparer la quantité d'eau nécessaire pour la gâchée. Le super plastifiant est ajouté à un quart de l'eau de gâchage.
- Peser les matériaux secs (gravier, sable, ciment, filler).

❖ Malaxage :

Le malaxage a une influence essentielle sur les caractéristiques des bétons, il est indispensable pour que le sable soit régulièrement dispersé et que le ciment soit bien réparti entre et autour de tous les grains inertes, il faut en outre que le ciment ne soit pas regroupé en grumeaux, mais régulièrement entouré d'une particule d'eau.

Nous avons adopté un malaxage normalisé selon la norme européenne **EN 196-1** et nous avons fait en sorte qu'avec ce malaxage, le mélange soit le plus homogène possible.

Le mélange est effectué au moyen d'un malaxeur de 25 litres de capacité (**figure III.1**), les étapes comme suit :

- Introduire les matériaux secs dans le malaxeur (sable, filler et le ciment), Mettre le malaxeur en marche pour homogénéiser le mélange sec. Introduire les granulats de polystyrène et malaxer jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène.
- Laisser le malaxeur en marche et ajouter progressivement le trois quart d'eau (**75 %**)
- Ajouter un quart de l'eau de gâchage (**25 %**) (celle qui contient l'adjuvant).

Chapitre III : formulation et propriétés des bétons d'étude à l'état frais



Figure III.1 : Malaxeur utilisé

❖ **Mise en moule :**

La mise en moule du béton de sable est effectuée en introduisant celui-ci en deux couches. Le surplus du béton dans les moules est arasé, après finitions, les moules sont conservés dans les conditions de laboratoire ($T=24\pm 5^{\circ}\text{C}$ et une humidité relatif de $60 \pm 5\%$) durant 24h.

III.3. Les propriétés du béton d'étude à l'état frais :

III.3.1. Mesure de la maniabilité :

La mesure de l'affaissement a pour but de fournir un indice de la maniabilité du mélange. La maniabilité est une propriété intrinsèque du matériau frais. Elle détermine la facilité de sa mise en œuvre. Cette propriété peut affecter les caractéristiques mécaniques du matériau à l'état durci.

La maniabilité du béton est déterminée à l'aide de l'essai d'affaissement, cet essai consiste à remplir un cône normalisé de dimensions ($D=20$; $d=10$; $h=30$ cm) en trois couches de volumes égaux et à pilonner chacune d'elles de 25 coups répartis uniformément sur toute la surface. Par la suite, on retire le cône verticalement. On mesure ensuite l'affaissement à l'aide d'une règle.

• **Classe de l'affaissement :**

Le tableau suivant, nous donne les classes d'affaissement.

Chapitre III : formulation et propriétés des bétons d'étude à l'état frais

Tableau III.2 : classe d'affaissement

Consistance	Ferme	Plastique	Très plastique	Fluide
Affaissement en (cm)	≤ 4	5 à 9	10 à 15	≥ 16



Figure III.2 : Essai de l'affaissement au cône d'abrams

III.3.1.1.L'influence de taux de grains de polystyrène sur la maniabilité :

Les résultats de la variation de la maniabilité caractérisée par l'affaissement au cône en fonction de dosage des grains de polystyrène sont regroupés dans le **tableau III.3** et illustré par La **figure III.3**

Tableau III.3 : résultats des mesures d'affaissement de bétons d'étude

Taux des granulats de polystyrène (%)	0	10	20	30	40	50	60	70
Affaissement (cm)	8.2	12.6	16.6	23.8	25.4	26	13.4	16.3

Chapitre III : formulation et propriétés des bétons d'étude à l'état frais

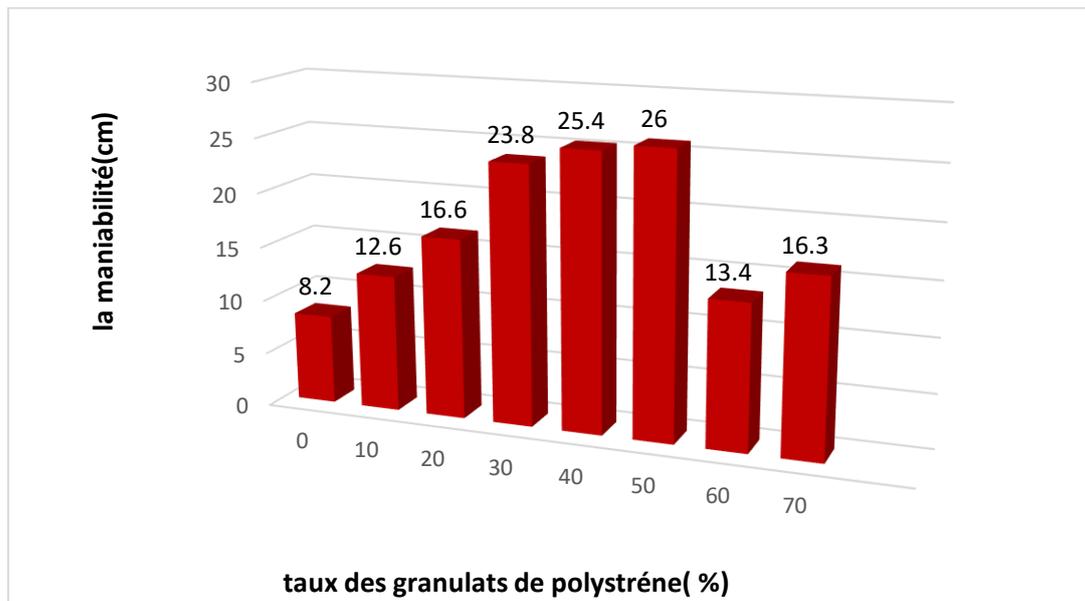


Figure III.3 : Variation de la maniabilité des bétons d'étude en fonction le taux des grains de polystyrène

❖ Interprétation :

Nous pouvons constater d'après les résultats de **tableau III.3** et figure **III.3** que la maniabilité caractérisée par l'affaissement est affectée considérablement par l'ajout et l'augmentation du taux des grains de polystyrène utilisés.

Nous distinguons quatre classes :

- A 0%, le béton est plastique
- (10 et (60 avec E/C = 0.6)) % : les bétons se rapportent à la deuxième classe (très plastique).
- (30-40-50-70) % : le mélange est fluide.

Nous devons signaler deux intervalles :

- **Quand P % ∈ [0 ; 50]** : on a observé une augmentation de la maniabilité du béton lorsque le teneur en polystyrène augmente notamment pour les grands teneurs en polystyrène.

D'après les résultats le **BSP5** qui est composé d'un pourcentage de **50%** polystyrène, atteint une valeur maximale de l'affaissement qui est de 26 cm avec une augmentation de l'ordre **217,07%** contrairement au **BST** qui donne une valeur inférieure par rapport aux autres bétons (8.2 mm).

- **Quand P % ∈ [60 ; 70]** : ce qui concerne le **BSP6** et le **BSP7** donne le but d'avoir un béton résistant et isolant et pour assurer le bon enrobage, des corrections sur le dosage de ciment et l'eau sont apportées pour les mélanges, avec l'augmentation de taux de polystyrène on remarque une augmentation de la maniabilité cette augmentation de

Chapitre III : formulation et propriétés des bétons d'étude à l'état frais

l'ordre **63,41%** et **98,78 %** respectivement pour les taux **60 %**, **70 %** mais les valeurs restent toujours inférieure par rapport à la valeur maximale (BSP5= 26cm) en raison à la correction des dosages de ciment et l'eau.

Le béton de sable à base de granulats de polystyrène a une valeur d'affaissement supérieure par rapport au BST. Cela est attribué à la nature physique et morphologique des grains de polystyrène, qui sont plus au moins sphérique et imperméable (non absorbant) à l'inverse des granulats minéral qui demande plus d'eau de mouillage.

III.3.2. Masse volumique apparente :

La masse volumique est sans contredit l'un des aspects techniques les plus importants pour la formulation de béton léger, la masse volumique apparente est la masse d'un corps par unité de volume total y compris les vides entre les grains des constituants.

La méthode préconisée pour évaluer la masse volumique du béton à l'état frais consiste à peser les moules juste après les remplies par le béton frais pour déterminer la masse du béton.



Figure III.4 : l'appareillage de la masse volumique a l'état frais

La masse volumique est donnée par La masse du béton divisée par le volume des éprouvettes.

$$\rho = \frac{M_r - M_v}{V} \quad (g/cm^3)$$

M_r : La masse des moules rempli (g)

M_v : La masse des moules vide (g)

V : volume des éprouvettes (cm^3)

Chapitre III : formulation et propriétés des bétons d'étude à l'état frais

III.3.2.2. L'influence de taux des grains de polystyrène sur la masse volumique :

Les résultats de variation de la masse volumique, qui sont caractérisés en fonction de taux de granulats de polystyrène recyclé, sont regroupés au **tableau III.4** et illustrés par **la figure III.5**

Tableau III.4 : la masse volumique apparente de bétons de polystyrène a l'état frais

Taux des granulats de polystyrène (%)	0	10	20	30	30	40	60	70
La masse volumique (g/cm ³)	2.26	2.22	2.08	1.95	1.87	1.52	1.61	1.41

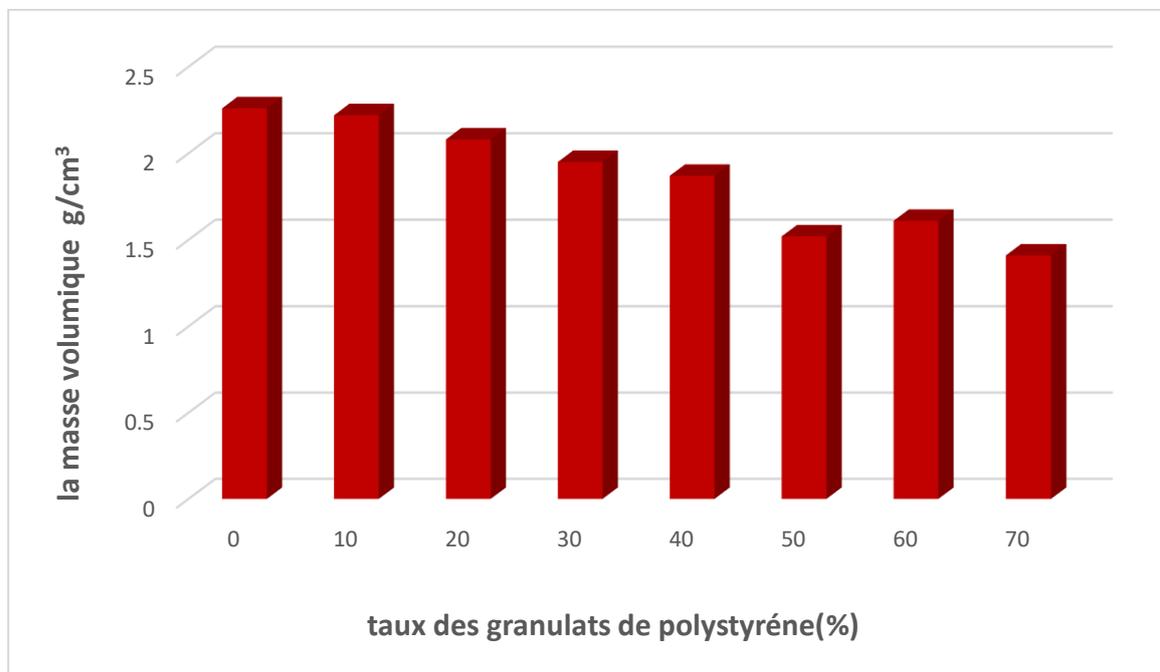


Figure III.5 : variation de la densité des bétons frais en fonction le taux des granulats de polystyrène

❖ Interprétation :

Le tableau III.4 et la figure III.5 montrent l'effet du taux de granulats de polystyrène sur la masse volumique. On peut remarquer que cette dernière est une fonction décroissante avec le dosage en polystyrène.

La masse volumique du béton témoins (sans grains de polystyrène) était de l'ordre 2.26 g/cm³ et après l'ajout des billes de polystyrène elle a diminué jusqu'à 1.41 g/cm³ cette diminution de l'ordre 37.61 % pour le taux 70 % de polystyrène.

Chapitre III : formulation et propriétés des bétons d'étude à l'état frais

Ce qui concerne le BSP6 on remarque une faible augmentation avec une valeur 1.61g/cm^3 cette augmentation dû à l'élévation de dosage en ciment mais elle reste dans la zone des bétons légers.

En effet, Les granulats de polystyrène recyclé sont des granulats légers ; l'augmentation de la quantité ajoutée en billes favorise la diminution de la densité du béton frais. Donc le rôle principal de ces granulats c'est la légèreté des bétons.

III.4. Conclusion :

On peut conclure que l'incorporation des grains de polystyrène influence considérablement les caractéristiques des bétons sa l'état frais (la maniabilité et la masse volumique).

- ✓ La maniabilité augmente si le pourcentage des grains de polystyrène augmente, alors ce paramètre a un effet significatif sur la maniabilité nous pouvons expliquer par une diminution de sable qui équivaut à une demande en eau plus faible et aussi dû au caractère des grains de polystyrène imperméable.

- ✓ Le BSP4 et le BSP5 donnent les grandes valeurs de la maniabilité.

- ✓ La densité diminuée avec l'augmentation de pourcentage en polystyrène cela est dû à la faible densité intrinsèque des grains de polystyrène.

- ✓ les bétons chargée (50-60-70) % de polystyrène donnent des densités inférieures à 1800kg/m^3 et qui seront classés dans la catégorie des bétons légers.

- ✓ Les granulats utilisés ont un rôle important dans la légèreté des bétons, ce qui présente un avantage de ces bétons du point de vu isolation thermique.

***Chapitre VI : Caractéristique physico-mécanique
des bétons de sable à base granulats de polystyrène***

Chapitre IV : caractéristique physico-mécanique des bétons de sable à base granulats de polystyrène recyclé

IV .Caractéristique physicomécanique des bétons de sable à base granulats de polystyrène :

IV.1. Introduction :

Après la caractérisation physique et chimique des matériaux utilisés, la formulation des bétons d'étude et la détermination des propriétés des bétons à l'état frais, nous consacrons le quatrième et dernier chapitre à la partie plus intéressante de notre étude qui concerne le comportement physico mécanique des bétons de sable à base des grains de polystyrène recyclés. L'étude expérimentale comporte la détermination la variation de la masse volumique, l'évolution de la résistance mécanique en compression et en traction, la capacité d'absorption d'eau ainsi que la propagation des ondes en fonction du taux de granulats de polystyrène.

IV.2. Procédure expérimentale :

IV.2.1.Choix des éprouvettes :

Des éprouvettes cubique (10×10×10) cm et prismatique (4×4×16) cm sont utilisées pour caractériser le comportement mécanique des bétons de sable d'étude par des mesures de la résistance de compression et de traction par flexion.



Figure IV.1 : Les moules utilisés

IV.2.2. La vibration :

La vibration est le moyen le plus courant pour donner au béton sa compacité maximale et pour éliminer les vides d'air, améliorent aussi les caractéristiques mécaniques et physiques du béton, tel que, la résistance en compression et l'imperméabilité. Un excès de vibration peut provoquer une ségrégation, cette dernière est causée par la différence de densité entre les petits éléments (ciment et filler) et les grands éléments (granulats et sables) du mélange.

Dans notre étude la vibration est réalisée sur une table vibrante.

Chapitre IV : caractéristique physico-mécanique des bétons de sable à base granulats de polystyrène recyclé



Figure IV.2 : La table vibrante

IV.2.3.La conservation :

Après 24 heures les éprouvettes sont démoulées et entreposées dans l'eau à une température ambiante jusqu'au moment de l'essai de l'écrasement.

IV.3. Propriétés physiques des bétons à l'état durci :

IV.3.1. Masse volumique :

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 28 jours après séchage à l'étuve jusqu'à masse constante.

La masse Volumique apparente est calculée comme la moyenne des trois mesures.



Figure IV.3 : La masse volumique des bétons à l'état durci

IV.3.1.1. Les résultats et interprétation :

Les valeurs moyennes de La masse volumique pour l'ensemble des mélanges sont regroupées dans le **tableau. IV.1** et présentées au niveau de **la figure IV.4**

Chapitre IV : caractéristique physico-mécanique des bétons de sable à base granulats de polystyrène recyclé

Tableau IV.1 : Évolutions de la masse volumique des bétons d'étude à l'état durci

Type de béton	Taux des granulats de polystyrène (%)	La masse volumique (g/cm^3)		
		à 7 jours	à 14 jours	à 28 jours
BST	0	2,26	2,26	2,27
BSP1	10	2,21	2,21	2,22
BSP2	20	2,09	2,09	2,10
BSP3	30	1,85	1,87	1,88
BSP4	40	1,75	1,77	1,77
BSP5	50	1,60	1,61	1,61
BSP6	60	1,46	1,48	1,48
BSP7	70	1,32	1,32	1,33

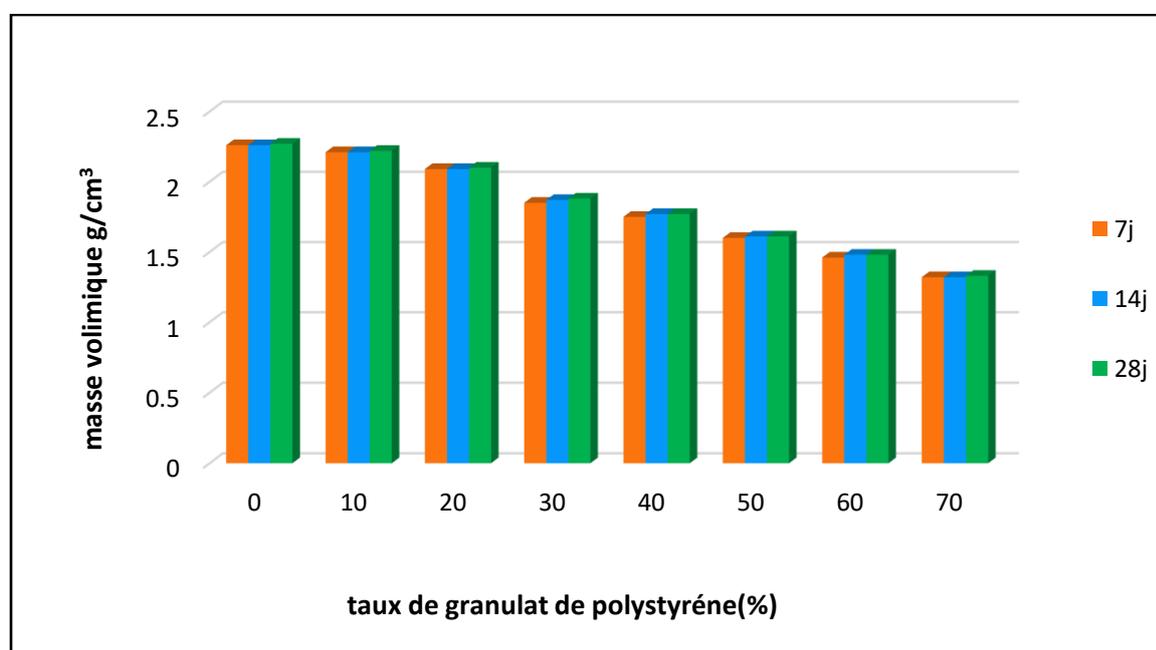


Figure IV.4 : Évolutions de la masse volumique fonction de taux de granulat de polystyrène

Chapitre IV : caractéristique physico-mécanique des bétons de sable à base granulats de polystyrène recyclé

- ✓ On remarque d'après le **tableau IV.1** et la **figure IV.4** une faible augmentation de la masse volumique en fonction de l'âge de durcissement. Cela s'explique par la densification de la matrice cimentaire.
- ✓ Le **tableau IV.1** et la **figure IV.4** illustre l'effet de la substitution du sable par un taux de grains de polystyrène sur la variation de la masse volumique à l'état durci. On constate avec l'augmentation des taux de polystyrène on observe une diminution de la masse volumique. Cette diminution est de l'ordre de (2,20% ; 8,09% ; 17,18% ; 22,02% ; 29,07% ; 34,80% ; 41,40%) à 28j respectivement pour les taux des grains (10% ; 20% ; 30% ; 40% ; 50% ; 60% ; 70%).

D'après les résultats on remarque clairement une grande différence entre la masse volumique du béton témoins et celle des autres types des bétons à base de granulats de polystyrène La masse volumique de béton de sable témoins est de $2,26\text{g}/\text{cm}^3$ à 28j et après l'ajout des de bille de polystyrène elle est diminuée avec 70% d'ajout de polystyrène jusqu'à $1,32\text{g}/\text{cm}^3$ à 28j cette diminution est de l'ordre 41,40% .et cette diminution peut être expliquée par la faible densité intrinsèque des granulats de polystyrène. Ce qui présente un avantage du point de vue isolation thermique et phonique.

IV .3.2. La capacité d'absorption d'eau :

IV .3.2.1. Procédure expérimentale :

C'est le rapport entre la masse d'eau absorbée par l'échantillon séché et la masse sèche de l'échantillon exprimé en pourcent, selon la norme NF P 18-555

L'absorption totale est donnée par la relation :

$$A_{bs} = \left(\frac{M_{\text{Sat}} - M_{\text{Sec}}}{M_{\text{Sec}}} \right) \times 100 (\%)$$

M_{Sec} : La masse de l'échantillon séché jusqu'à une masse constante entre deux pesées successives.

M_{Sat} : La masse après saturation (échantillon immergé pendant 24h dans l'eau)

Chapitre IV : caractéristique physico-mécanique des bétons de sable à base granulats de polystyrène recyclé

IV .3.2.2.Les résultats et interprétation :

Les valeurs moyennées de La capacité d'absorption pour les différents types des bétons sont regroupées dans le **tableau IV.2** et présentées au niveau de la **figure IV.5**

Tableau IV.2 : Évolutions de la capacité d'absorption d'eau des bétons d'étude

Types de béton	Taux des granulats de polystyrène (%)	$A_{bs}(\%)$
BST	0	4,67
BSP1	10	5,12
BSP2	20	6,36
BSP3	30	7,47
BSP4	40	7,68
BSP5	50	7,88
BSP6	60	9,59
BSP7	70	10,12

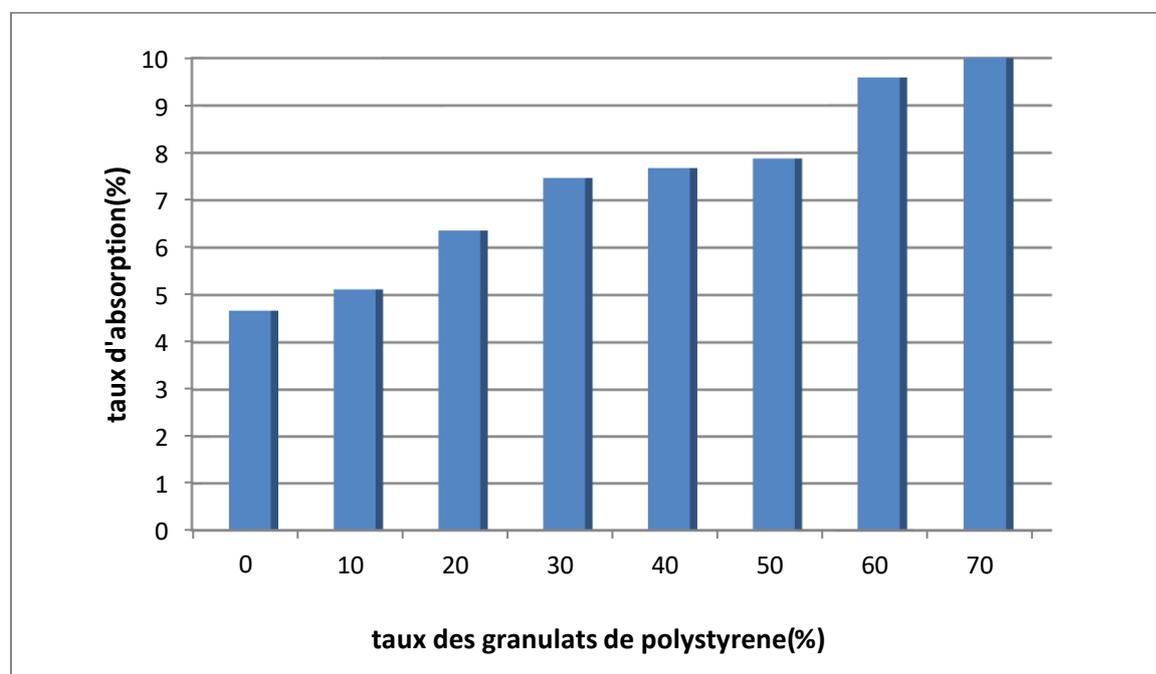


Figure IV.5 : Évolutions de l'absorption du béton de sable d'étude en fonction de taux des granulats de polystyrène recyclé

Chapitre IV : caractéristique physico-mécanique des bétons de sable à base granulats de polystyrène recyclé

Les résultats montrent que la capacité d'absorption des bétons de sable à base des granulats de polystyrène est plus élevée en fonction de taux des granulats de polystyrène.

Elle affiche une valeur minimale pour le mélange BST qui est de l'ordre de **4,67** ; ce qui montre que le béton témoins (sans bille de polystyrène) est le moins poreux.

Contrairement au béton **BSP 7** qui est composé de **70 %** des granulats de polystyrène représente une valeur maximale de la capacité d'absorption qui est de **10,12 %**. Avec une augmentation de l'ordre **116 %** par rapport au béton témoins .On estime que ceci est tout à fait logique en raison de la substitution de sable par les granulats de polystyrène.

En effet la substitution de sable par les granulats de polystyrène a un effet significatif sur la capacité d'absorption, cela peut être justifié par :

- Les granulats de polystyrène sont pas absorbent et donc ne nécessitent pas d'eau pour le mouillage, et par conséquent cet excès d'eau va s'évaporer pour crée une porosité supplémentaire.
- La granulométrie des granulats de polystyrène est présentée sous forme d'une seule fraction ce qui engendre une porosité inter granulaire. Cela permet une 'absorption plus élevée.

IV.4. Les propriétés mécaniques :

IV.4.1. Résistance en compression :

IV.4.1.1.Procédure expérimentale :

Les éprouvettes utilisées sont des éprouvettes cubique (10×10×10) cm. L'essai consiste à comprimer jusqu'à rupture de l'échantillon. La résistance à la compression est donnée par la relation suivante :

$$f_c = \frac{p}{S} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

f_c : Résistance à la compression en MPa

P : charge de la rupture en N

S : section d'éprouvette (mm²).

Chapitre IV : caractéristique physico-mécanique des bétons de sable à base granulats de polystyrène recyclé



Figure IV.6 : Machine de compression

IV.4.1.2. Résultats et interprétations :

Les valeurs moyennes de La résistance à la compression pour les différents types des bétons sont regroupées dans le **tableau IV.3** et présentées au niveau de **la figure IV.7**

Tableau. IV.3 : Valeurs de la résistance à la compression des bétons d'étude

Mélanges	Taux des granulats de polystyrène (%)	Résistance à la compression en MPa			
		à 7jours	à 14 jours	à 28jours	à 60jours
BST	0	21,75	32,04	39,64	47,62
BSP1	10	16,28	24,46	36,88	41,28
BSP2	20	15,28	21,44	21,99	27,37
BSP3	30	10,38	17,41	17,71	23,96
BSP4	40	7,54	10,78	12,88	17,75
BSP5	50	4,46	6,65	11,02	15,46
BSP6	60	11,68	13,59	21,83	26,87
BSP7	70	7,82	10,74	13,16	20,53

Chapitre IV : caractéristique physico-mécanique des bétons de sable à base granulats de polystyrène recyclé

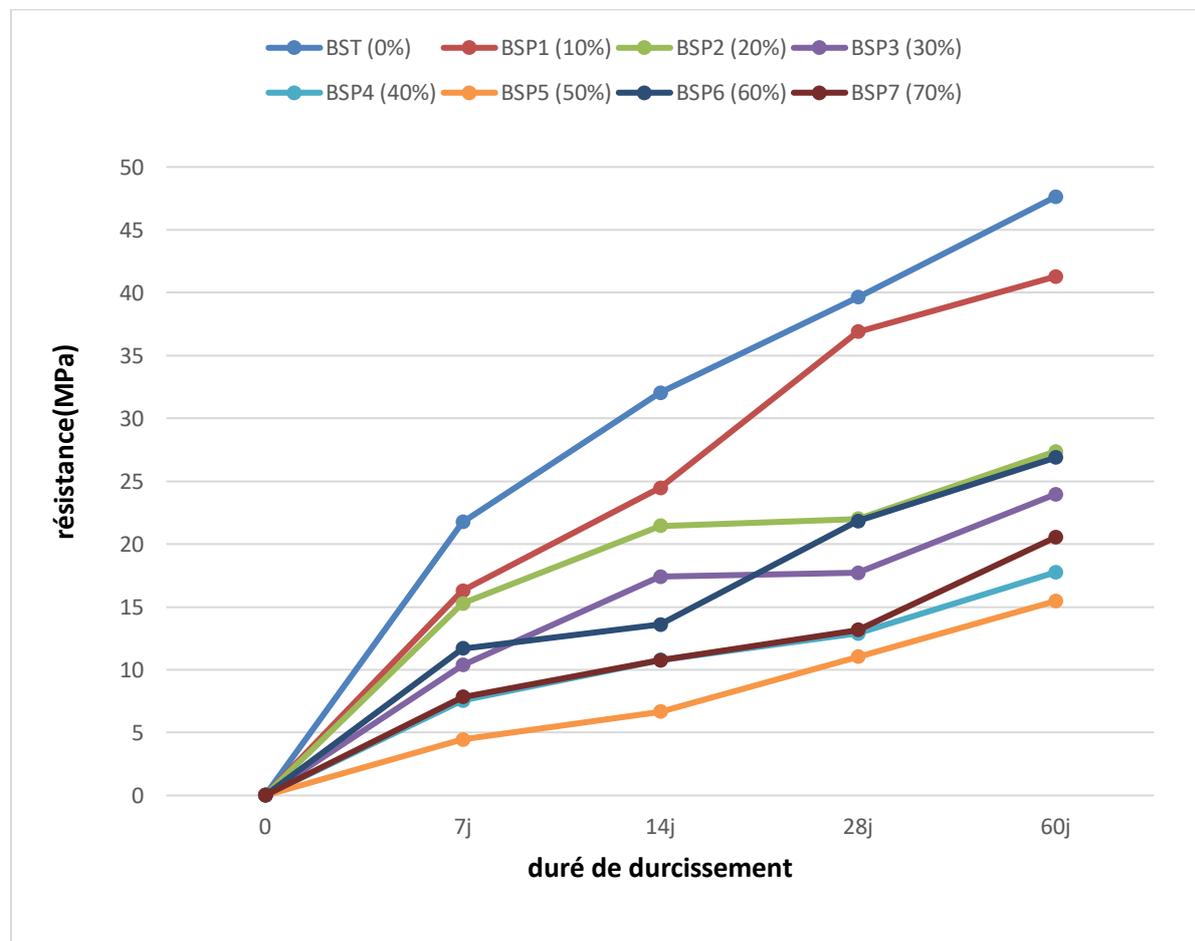


Figure IV.7 : Évolutions de la résistance en compression des bétons d'étude

Selon La figure IV.7 et le tableau IV.3, qui représentent l'évolution de la résistance à la compression des bétons de sable à base des granulats de polystyrène. On constate que :

- la résistance mécanique augmente en fonction de l'âge du durcissement pour l'ensemble des bétons testés. Cela est dû au processus d'hydratation des minéraux du ciment, et la formation progressive des hydrosilicates et des hydroaluminates de calcium (CSH et C3A) qui contribuent à l'augmentation de la résistance du béton dans le temps.

On prend l'exemple de béton de sable témoins, à Cour terme les valeurs des résistances enregistrées à 7j, 14j et 28j sont respectivement (21,75 ; 32,04 et 39,64 MPa).

- A moyen terme (60 jours) des gains de résistances sont obtenus. Ces gains de résistances en compression sont respectivement de l'ordre de (20,13 ; 11,93 ; 24,46 ; 35,26 ; 40,29 ; 23,08 ; 56) pour les taux en granulats de polystyrène respectivement de 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 et 70 %. Cette augmentation importante de la résistance est

Chapitre IV : caractéristique physico-mécanique des bétons de sable à base granulats de polystyrène recyclé

attribuée surtout à la formation des CSH secondaires obtenus suite à la réaction hydraulique latente entre la portlandite et le laitier granulé utilisé comme fine d'ajout.

- Les résultats obtenus montrent aussi que la résistance en compression diminue avec l'augmentation de taux des granulats de polystyrène. A cet effet le béton témoin enregistre une résistance en compression à 28j de l'ordre de 39,64 MPa par contre les résistances à la compression des bétons à base granulats de polystyrène en substitution au sable sont respectivement de l'ordre de (36,88 ; 21,99 ; 17,71 ; 12,88 ; 11,02 MPa). ce qui présente une diminution de la résistance de l'ordre (6,96 ; 44,52 ; 55,32 ; 67,50 ; 72,19 %) respectivement avec de taux des granulats de (10%, 20%, 30%, 40%, 50%). Cela dû à la nature de la liaison ou d'adhérence entre matrice cimentaire et les granulats organiques de polystyrène. Et afin de compenser cette chute de résistance, on a procédé à un ajustement de la formulation des mélanges BSP6 et BSP7 par réduction du rapport E/C. Ceci a amélioré la résistance tout en concevant la légèreté de ces bétons. Les valeurs obtenues pour les **BSP6** et **BSP7** (60% ; 70%) sont de l'ordre de **21,83** et **13,16** MPa. Ce qui enregistre une augmentation de la résistance par rapport aux autres mélanges (**BSP1 ; BSP2 ; BSP3 ; BSP4 ; BSP5**) malgré que le taux des granulats polystyrène est augmenté, donc grâce à la réduction du rapport E/C on a pu augmenter la résistance en compression de façon significative pour arriver à des résistances en compression des BSP6 dont le taux de granulat de polystyrène de 60 % équivalente à celles des **BSP2** dont le taux de granulat de polystyrène de 20%.

IV.4.2..Résistance en traction par flexion :

IV.4.2.1. Procédure expérimentale :

La rupture de chaque éprouvette en flexion a été effectuée conformément au dispositif décrit sur la **figure IV.8** L'essai de traction par flexion est réalisé à l'aide d'une machine de traction de capacité 150 KN (Voir la **figure IV.9**).

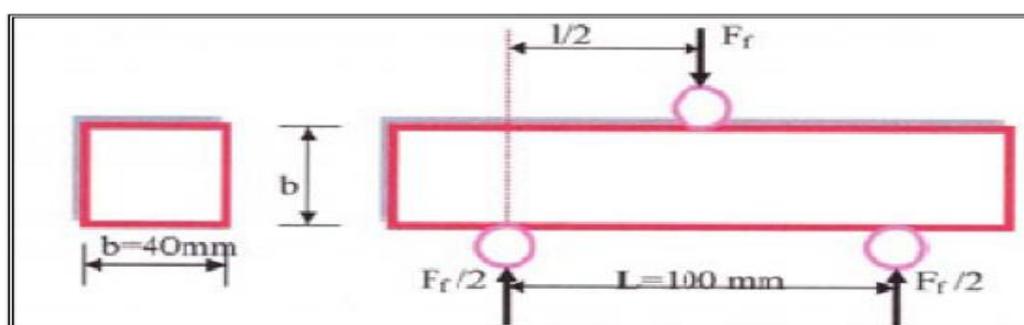


Figure IV.8 : Dispositif pour l'essai de résistance à la traction par flexion



Figure IV.9 : Machine de traction par flexion

Lors d'un essai de flexion en trois points, l'éprouvette de béton est soumise dans sa partie supérieure à des contraintes de compression et dans sa partie inférieure à des contraintes de traction.

Compte tenu que la résistance du béton à la traction est très faible par rapport à celle en compression l'éprouvette va se rompre dès que le béton aura atteint sa limite en traction.

La contrainte de rupture σ_T est calculée selon la formule suivante :

$$\sigma_T = \frac{2}{3} \times \frac{Pl}{b^3} (\text{N/mm}^2)$$

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

σ_T : Résistance à la traction en MPA.

P: Charge à la rupture en N.

b³ : Largeur de la section carrée du prisme en mm (**b = 40 mm**).

IV.4.2.2. Résultats et interprétations :

Les valeurs moyennes de La résistance à traction par flexion pour les différents types des bétons sont regroupées dans le **tableau IV.4** et présentées au niveau de la **figure IV.10**

Chapitre IV : caractéristique physico-mécanique des bétons de sable à base granulats de polystyrène recyclé

Tableau IV.4. Valeurs de la résistance en traction des bétons d'étude

Mélanges	Taux des granulats de polystyrène (%)	Résistances en traction par flexion en MPa			
		à 7 jours	à 14 jours	à 28 jours	à 60 jours
BST	0	5,55	7,84	8,26	8,68
BSP1	10	4,65	6,07	6,36	7,04
BSP2	20	4,60	4,77	5,73	6,12
BSP3	30	3,76	4,26	4,90	5,23
BSP4	40	3,32	4,05	4,36	4,96
BSP5	50	3,14	3,72	3,79	4,32
BSP6	60	5,25	5,69	7,85	8,11
BSP7	70	3,90	4,03	4,97	5,40

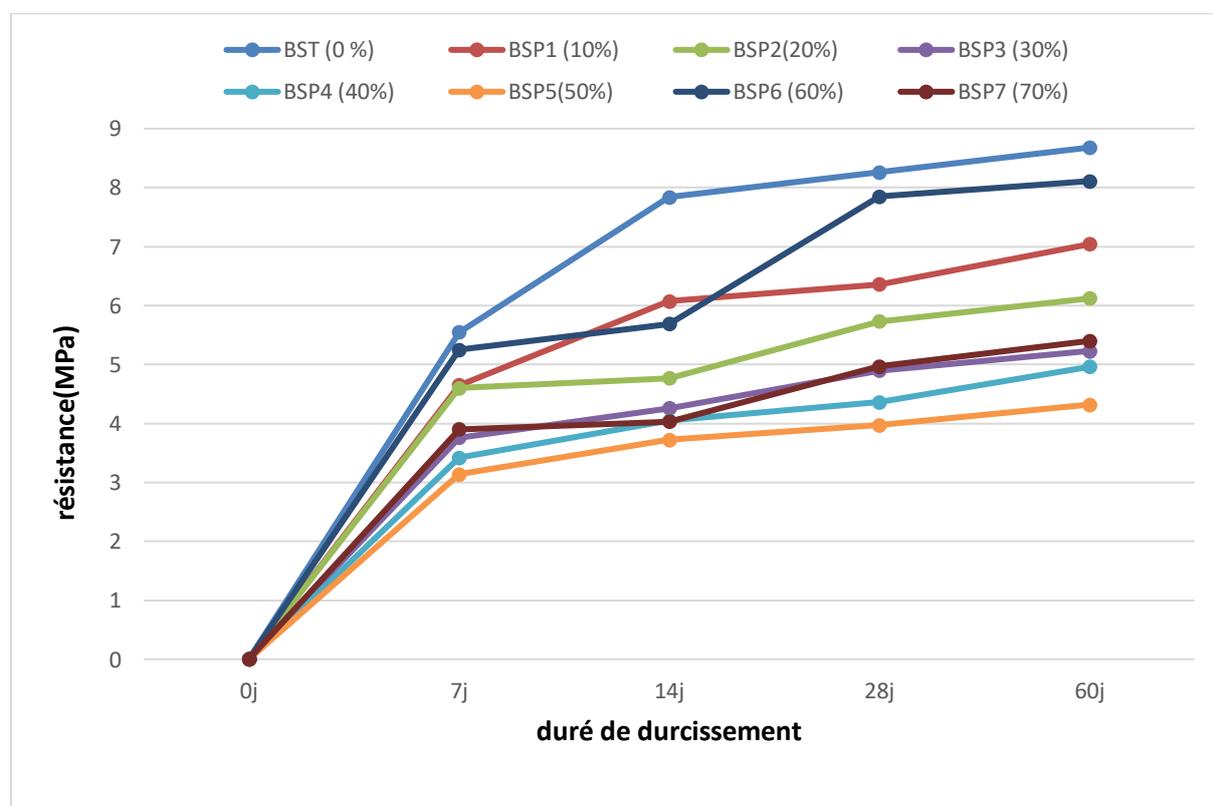


Figure IV.10 : Évolutions de la résistance en traction par flexion des bétons d'étude

Chapitre IV : caractéristique physico-mécanique des bétons de sable à base granulats de polystyrène recyclé

Selon la **figure IV.10** et le **tableau IV.3**, qui représente l'évolution de la résistance à la traction par flexion des bétons de sable à base des granulats de polystyrène, On constate que :

- la résistance mécanique augmente en fonction de l'âge du durcissement. Cela est dû au processus d'hydratation des minéraux du ciment, et la formation progressive des hydrosilicates et des hydro aluminates de calcium (CSH et C3A) qui contribuent à l'augmentation de la résistance du béton dans le temps.

On prend l'exemple de béton de sable témoins, les valeurs des résistances enregistrées à 7j, 14j et 28j sont respectivement **5,55 ; 7, 84 et 8,26 MPa**. A 60 jours une légère augmentation de la résistance de traction par flexion est obtenue. Cela est attribué à la densification de la matrice et donc l'amélioration de l'adhérence matrice-granulat.

- Les résultats obtenus montrent aussi que la résistance en traction par flexion diminue avec l'augmentation de taux des granulats de polystyrène. A cet effet le béton témoins enregistre une résistance en traction à 28j de l'ordre de **8,26MPa** par contre les résistances à la traction des bétons à base granulats de polystyrène en substitution au sables sont respectivement de l'ordre de (**6,36 ; 5,73 ; 4,90 ; 4,36 ; 3,79 ; 7,85 ; 4,97 MPa**).

Ce qui présente une diminution de la résistance de l'ordre (**23 ; 30,62 ; 40,67 ; 47,21 ; 54,11%**) respectivement avec de taux des granulats de (**10% ; 20% ; 30% ; 40% ; 50%**). Cela dû à la nature de la liaison ou d'adhérence entre matrice cimentaire et les granulats organiques de polystyrène. Et afin de compenser cette chute de résistance, on a procédé à un ajustement de la formulation des mélanges BSP6 et BSP7 par réduction du rapport E/C. Ceci a amélioré la résistance tout on concevant la légèreté de ces bétons. Les valeurs obtenues pour les BSP6 et BSP7 (**60% ; 70%**) sont de l'ordre de **7,85 et 4,97**. Ce qui enregistre une augmentation de la résistance par rapport aux autre types des bétons (**BSP1 ; BSP2 ; BSP3 ; BSP4 ; BSP5**) malgré que é le taux des granulats polystyrène est augmenté, Ces résultats peuvent être justifié par l'élévation du dosage en ciment et la réduction de dosage en eau ce qui améliore la compacité et réduit la porosité. Ceci présente un avantage pour ce type de béton.

IV.4.3. Évolutions de la résistance a la compression en fonction de la masse volumique :

Un béton léger est défini par deux caractères de base, dont dépendent les autres caractères ou données nécessaires au calcul. Il s'agit de :

- La masse volumique sèche ;
- La résistance à la compression à l'âge de 28 jours.

Chapitre IV : caractéristique physico-mécanique des bétons de sable à base granulats de polystyrène recyclé

A fin d'éclaircir la relation entre la résistance à la compression et La masse volumique, la **figure IV.11** illustre cette relation.

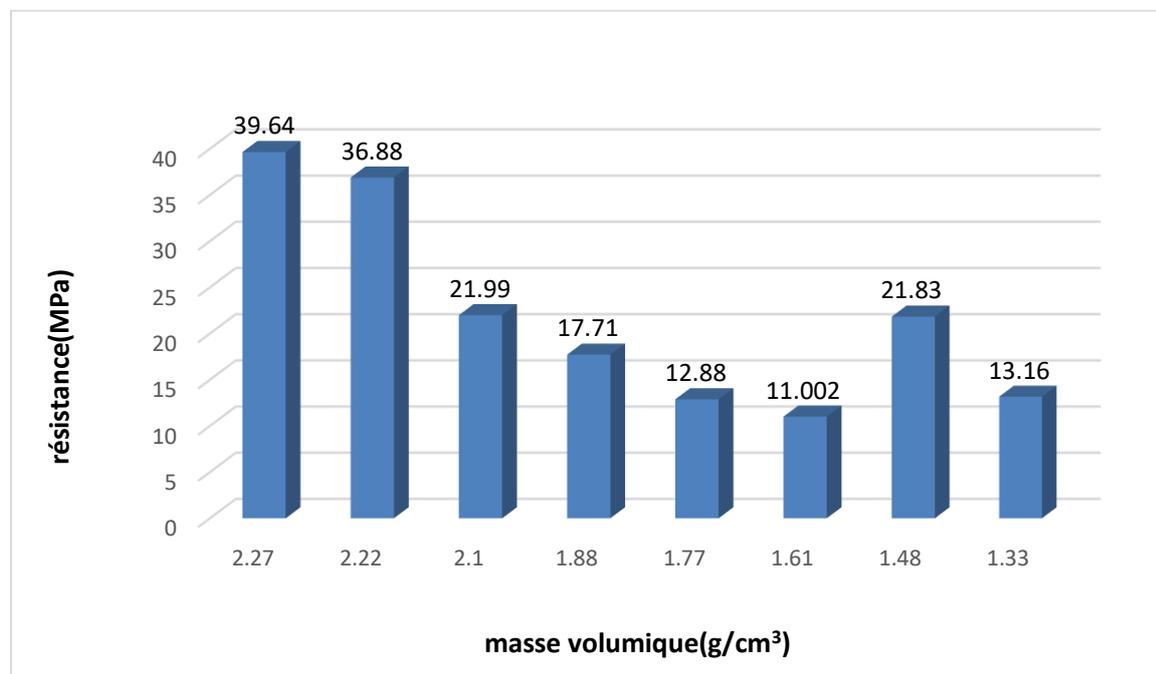


Figure IV.11 : Évolutions de la résistance à la compression à 28j en fonction de la masse volumique

Pour le même rapport E/C On remarque que la diminution de la masse volumique se traduit par une baisse de la résistance mécanique.

Par contre, grâce à la diminution du rapport E/C le BSP6 présente une résistance plus meilleure et une faible masse volumique (**1,48 g/cm³**). Cela peut s'expliquer par la présence d'une matrice cimentaire suffisante pour bien enrober le squelette granulaire et donner des résistances acceptables aux bétons de granulats de polystyrène avec des taux élevés.

Les résultats expérimentaux confirment une relation tout à fait évidente entre la densité et la résistance mécanique. Plus le matériau est dense plus sa résistance mécanique est élevée.

IV.5. Contrôle non destructif par ultrason :

Ces essais permettent de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales à travers un élément de béton. Pour déterminer la vitesse longitudinale, ont utilisé l'appareil ultrason. Cet appareil nous indique le temps (T) de propagation des ondes à travers une éprouvette de longueur (L) et de calculer la vitesse de propagation (V) selon l'équation suivant :

Chapitre IV : caractéristique physico-mécanique des bétons de sable à base granulats de polystyrène recyclé

$$V = \frac{L}{T} \text{ m/s}$$

V : vitesse de propagation.

L : distance entre les deux extrémités de l'échantillon en mètre.

T : temps de propagation

Cette méthode consiste à presser les deux têtes sur les faces de l'éprouvette nettoyées, en utilisant une pâte de contact qui facilite la transmission du son. Avant de commencer le contrôle de nos éprouvettes l'appareil doit être étalonné avec l'étalon.

IV .5.1 Résultats et interprétations :

Les valeurs de Contrôle non destructif par ultrason pour les différents types des bétons sont regroupées dans le **tableau IV.5** et présentées au niveau des **figures IV.12 et IV.13**

Tableau. IV.5 : Évolutions du temps et de la vitesse de propagation en fonction de taux de granulats polystyrène

Type de béton	Le temps (μs)		La vitesse $10^3(\text{m/s})$	
	Prisme	Cube	prisme	Cube
BST	34,8	22,3	4,59	4,48
BST1	35,5	22,8	4,50	4,38
BST2	36,2	23,5	4,41	4,25
BST3	36,7	24,1	4,35	4,14
BST4	37,1	24,3	4,31	4,06
BST5	38,5	25,8	4,15	3,87
BST6	39,8	28,7	4,02	3,48
BST7	40,16	29,06	3,98	3,37

Chapitre IV : caractéristique physico-mécanique des bétons de sable à base granulats de polystyrène recyclé

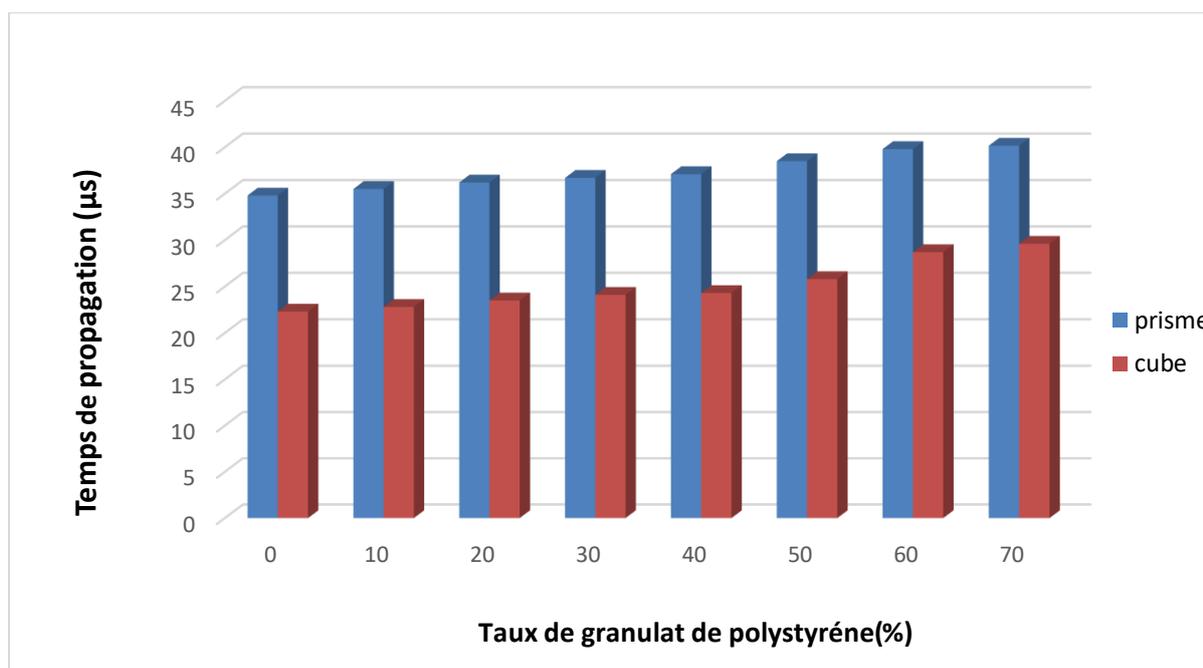


Figure IV.12 : Évolutions de temps de propagation en fonction de taux de granulats de polystyrène

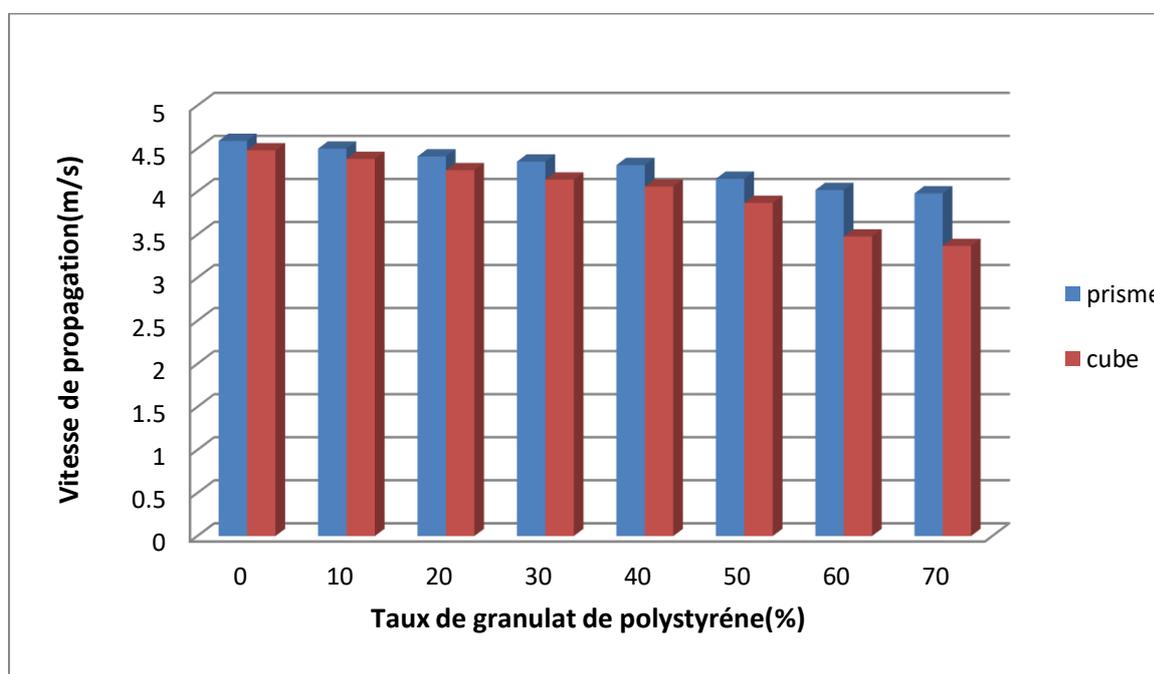


Figure IV.13 : Évolutions de vitesse de propagation en fonction de taux de granulats de polystyrène

Chapitre IV : caractéristique physico-mécanique des bétons de sable à base granulats de polystyrène recyclé

Selon les résultats obtenus dans le **tableau IV.5** et les **figures IV.12 ; IV.13** on remarque que le temps de propagations des ondes de béton de polystyrène à l'état durci est une fonction croissante, par contre la vitesse de propagation des ondes est fonction décroissante avec le pourcentage des granulats de polystyrène

On remarque que le temps de propagation du béton témoin sans granulats de polystyrène est nettement faible à celle des bétons à base de granulats de polystyrène recyclé.

Pour le taux de 70% de polystyrène le temps de propagation reste le plus élevé avec des valeurs respectivement de l'ordre de **40,16** et **29,06** (pour la vitesse les valeurs sont de l'ordre **(3,98 ; 3,37)**) pour les éprouvettes prismatiques et cubiques. D'une manière générale, nous constatons que les granulats de polystyrène ont participé à prolonger le temps de propagation des impulsions émises par l'appareil d'auscultation sonore et réduit la vitesse de propagation qui reflète une amélioration des propriétés thermiques et phoniques des bétons d'étude du fait que sa structure cellulaire fermée emprisonne l'air sous forme de petits volumes, le polystyrène expansé est un mauvais conducteur de la chaleur et cela donne un autre avantage pour le béton de polystyrène expansé.

Par conséquent une perte de la résistance mécanique a été enregistrée. L'incorporation des granulats de polystyrène a allégé le béton et a influencé la masse volumique et donc la vitesse de propagation des ondes ainsi que les propriétés thermiques et acoustiques. La relation entre la vitesse de propagation et la masse volumique est illustrée par **la figure IV.14**

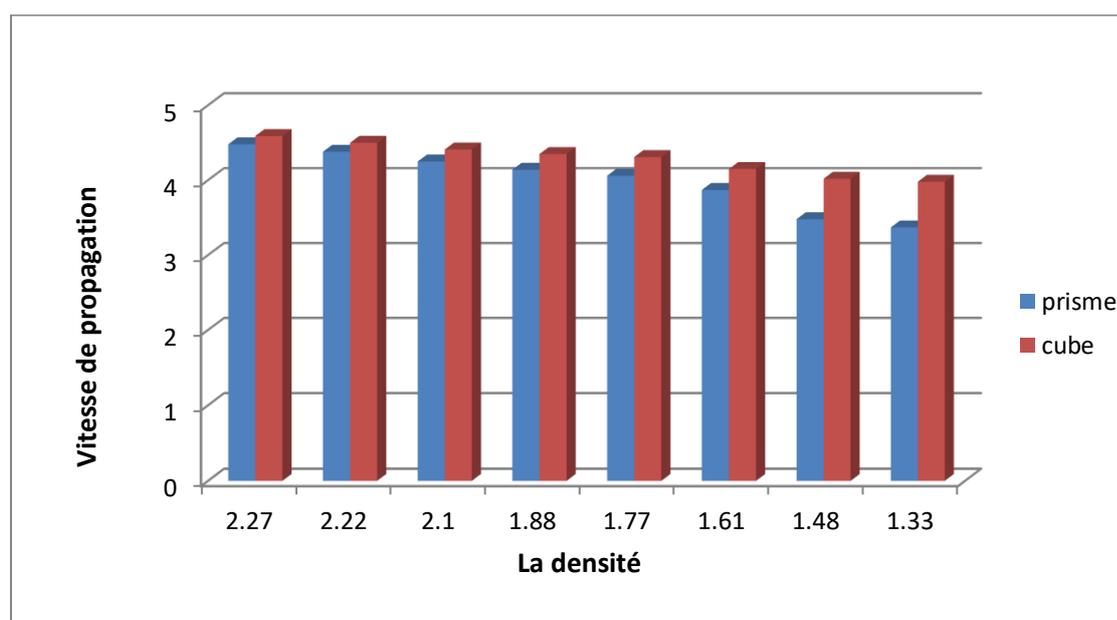


Figure IV.14 : Relation entre la densité et la vitesse de propagation

Chapitre IV : caractéristique physico-mécanique des bétons de sable à base granulats de polystyrène recyclé

D'après la **figure IV.14** on constate qu'avec l'augmentation du taux de granulats de polystyrène on a une diminution de la masse volumique cette diminution engendre une augmentation du temps de propagation des ondes et par conséquent diminution de la vitesse de propagation. Cela est dû à la structure poreuse des granulats de polystyrène. La vue macrostructurale d'un échantillon de béton de sable à base des granulats de polystyrène recyclé illustrée par **Figure IV.15** confirme ces constatations.

On a remarqué une distribution bien répartie et homogène des granulats de polystyrène dans la matrice cimentaire.



Figure IV.15 : Vue de la macrostructure des BS à base des granulats de polystyrène

IV.6. Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à présenter et interpréter les résultats des tests physico-mécaniques de béton de sable à base des granulats de polystyrène recyclé. À partir des résultats obtenus les conclusions suivantes peuvent être avancées :

- Une diminution de la masse volumique des bétons d'étude en fonction du pourcentage du polystyrène est obtenue. Cette diminution est attribuée à la faible densité intrinsèque des granulats de polystyrène.
- On peut considérer qu'avec un taux de polystyrène égale ou supérieure à 40%, on obtient un béton léger de masse volumique inférieure à **1800 kg/m³**

Chapitre IV : caractéristique physico-mécanique des bétons de sable à base granulats de polystyrène recyclé

- Grace à l'utilisation des granulats de polystyrène en substitution aux granulats naturels, une diminution de masse volumique de **2,22 à 1,33 g/cm³** est obtenue.
- Une diminution des résistances de compression et de traction en fonction de la teneur de granulats de polystyrène montre bien que la résistance, que ce soit en compression ou en traction par flexion a été constatée.
- Le béton léger à base de granulats de polystyrène expansé présente une résistance à la compression et à la traction par flexion plus faible que celle du béton témoin qui ne contient pas les billes de polystyrène. Même avec cette diminution, ces résistances restent bien dans les normes exigées pour un béton léger de construction (classe I), pour un béton de construction et d'isolation (classe II) et pour un béton d'isolation (classe III).
- Grace à un ajustement de la formulation des bétons de sable à base de granulats de polystyrène (réduction du rapport E/C), des améliorations très importantes en termes de résistance mécanique en compression sont obtenues. Ceci présente un avantage majeur dans la fabrication des bétons léger de bonne résistance mécanique et bonne isolation thermique.
- La substitution du granulat naturel minéral par des granulats de polystyrène recyclé a bien améliorée les propriétés isolantes du béton caractérisées par diminution de la vitesse de propagation des impulsions des ondes.

Conclusion général

Conclusion général

Ce travail avait pour objectif l'étude de la formulation et la caractérisation physico-mécanique d'un béton du sable à base des granulats de polystyrène recyclé. Il s'agit de montrer les potentialités de valoriser certains sous-produits industriels déchets d'emballage, particulièrement le laitier granulé et les granulats de polystyrène recyclé, en vue de développement d'un matériau de construction mécaniquement et thermiquement performant, et répondant aux exigences d'économie d'énergie et de développement durable.

Afin d'atteindre cet objectif, on a subdivisé ce travail en deux volets : le premier écologique, par la récupération d'un déchet encombrant et menaçant l'environnement. Le deuxième volet consiste en l'allègement de la pâte optimale par l'incorporation de différentes proportions des granulats de polystyrène recyclé en vue d'améliorer les performances d'isolation thermiques et phonique du béton de sable.

Par l'analyse des différents résultats obtenus nous pouvons énoncer :

La caractérisation des sables utilisés (sable de dune, sable de carrière) montre que ce sont des sables très propre avec des granulométriques différentes et complémentaires.

Bien que la relation existante entre la résistance et le rapport E/C soit incontestables, d'autres facteurs peuvent influencer la résistance, parmi eux les propriétés des granulats, la granulométrie, la forme et l'état de surface des granulats peuvent jouer un rôle secondaire sur la résistance du béton. La bonne granulométrie de mélange de sable de dune et sable de carrière donne des bétons les bonnes compacités et la meilleure résistance.

La substitution des granulats naturelle (les sables) par les granulats artificiels (polystyrène recyclé) dans le béton est bénéfique pour l'amélioration des propriétés thermique et phonique de ces matériaux.

Les caractéristiques du béton de sable à base des granulats de polystyrène recyclé à l'état frais sont influencées par la teneur de ces derniers. L'augmentation de taux des granulats de polystyrène améliore considérablement la maniabilité et réduit nettement la masse volumique.

Le dosage en granulat de polystyrène recyclé minimal nécessaire pour élaborer un béton léger doit être égal ou supérieur à 40 %.

Le béton léger réalisé à l'aide des granulats de polystyrène recyclé donne l'avantage d'avoir toute une panoplie de densités allons de $2,27\text{g/cm}^3$ à $1,33\text{g/cm}^3$ grâce à la faible densité intrinsèque des granulats de polystyrène.

Conclusion général

Le taux absorption de béton à base des granulats de polystyrène recyclé est plus élevé par rapport au béton témoin.

L'incorporation des granulats de polystyrène dans la composition des bétons de sable influence la résistance en compression. L'augmentation du dosage des granulats de polystyrène diminue la résistance. la diminution maximale de la résistance en compression par rapport au béton témoin est de l'ordre 66,80% pour un pourcentage 70% en polystyrène.

L'ajustement de la formulation des bétons de sable à base de granulats de polystyrène par réduction du rapport E/C, donne des améliorations très importantes en termes de résistance mécanique en compression tout en gardant une faible masse volumique. Ceci présente un avantage majeur dans la fabrication des bétons léger de bonne résistance mécanique et de bonne isolation thermique.

La résistance du béton est en fonction de la densité des granulats de polystyrène recyclé. Plus la densité des granulats est importante plus la résistance du béton est grande.

La substitution du granulat naturel minéral par des granulats de polystyrène recyclé a bien améliorée les propriétés isolantes du béton caractérisées par la diminution de la vitesse de propagation des impulsions des ondes.

Nous pensons que ce matériau ultra léger (Polystyrène recyclé), jouera un rôle très intéressant dans l'avenir, dans les nouvelles constructions par son isolation thermique et phonique.

L'utilisation des granulats de polystyrène en substitution partielle au granulats naturel dans la fabrication des bétons de sable léger a donné satisfaction des points de vue: maniabilité, résistance, économie et écologie. Grâce à cette utilisation, une nouvelle gamme de béton de sable léger avec laitier granulats de polystyrène a été définie . Ce type de BS peut satisfaire certaines exigences et améliorer le confort thermique de la construction.

***Référence
bibliographique***

Référence bibliographique

- [1] **P. Pimenta.j. Chandelier, Roubaud, F. Dutreil, H. Nicole:** Etude de faisabilité des procédés de construction à base de Béton de Bois, Cahier du CSTB, Livraison 346, N°2703 (1994).
- [2] **Bentchikou. M:** Contribution à l'étude et à l'élaboration de matériaux composites pour l'isolation thermique, Cas de béton de fibres de papiers recyclés, Thèse de doctorat de l'ENP d'Alger, (2008).
- [3] **Arabi Nouredine :** Cours béton léger : Définition et classification de béton léger, Université Badji Mokhtar Annaba, (2012).
- [4] **Benmalek. M.L. Derbala .R:** Elaboration et caractérisation d'un béton à base de sable dunaire et de sous-produits industriels, Université de Skikda et Guelma (Algérie), (9-11 février 2009).
- [5] **Bing Chen, Juanyu Liu :** Proprieties of light weight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber. Cement and Concrete Research 34, pp.1259-1263, (2004).
- [6] **Ziregue Ahmed :** valorisation de coproduits industriels influence de différents facteurs d'allégement sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques d'un béton amatrice calcaire-ciment., Thèse de Magister, l'UAT de Laghouat, (1993).
- [7] **JACOBS & MAYER:** Porosity and permeability of autoclaved aerated concrete October 14-16, (1992).
- [8] **Véronique CEREZO :** Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales, approche expérimentale et modélisation théorique, Thèse de doctorat INSA de Lyon, (2005).
- [9] **AAC:** Autoclaved aerated concrete CEB manual of design and technology, Lancaster England, The construction Press Ltd, (1978).
- [10] **A.Ledhem:** Contribution à l'étude d'un béton de bois, Mise au point d'un procédé de minimisation des variations dimensionnelles d'un composite argile-ciment-bois, Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon, (1984).
- [11] **Rogerlacroix-Albert Fuentes:** Traité de béton Armé, Editions Eyrolles, Paris, (1982).
- [12] **A. Steopoe:** "La durabilité du béton", Eyrolles, Paris. (1970).
- [13] **Gotteicha.M :** Contribution à la Caractérisation des bétons de sable à base de copeaux de bois traités, Thèse de Magister, U.A.T de Laghouat, (2005)
- [14] **G.Bauduin, DJ Mathieu et R.Phan tan Luu :** Mise au point d'un nouveau béton léger de polystyrène expansé –l'étude des constituants principaux vols ,23.N°6, PP.441-445, (1987).

Référence bibliographique

- [15] **George Dreux Jean festa** : Nouveau guide du béton et de ses constituants, Eyrolles Paris, (1998).
- [16] **Arnould.M et Virlogeux .M:** Granulats de béton légers, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées ; Paris, (1986).
- [17] **Rilem bimestriel** : Porosité accessible à l'eau, Vol.13-N° 75, P176, (mai-juin 1980).
- [18] **Thèse doctorat** : Caractérisation du comportement mécanique des bétons de granulats légers : expérience et modélisation, (2008).
- [19] **M. CONTANT** : Confection de bétons légers la fabrication d'éléments architecturaux ».Projet d'application présenté à L'école de technologie supérieure. Ecole de technologie supérieure L'université du Québec Edition, Montréal, (14 Avril 2000).
- [20] **M.S. Goual, F. De Barquin, M.L. Benmalek, A. Bali, M. Quéneudec** : Estimation of the capillary transport coefficient of Clayey Aerated Concrete using a gravimetric technique, Cement and Concrete Research, vol.30, 201-207 pp, (Juillet 2000).
- [21] **Yang Ke:** Caractérisation du comportement mécanique des bétons de granulats légers (expérience et modélisation), Thèse de doctorat de l'université de cergy-pontoise, (2008).
- [22] **Bentcliikou M** : Elaboration et étude de deux matériaux composites à Fibres Cellulosiques et matrice minérale et organique. Application à l'isolation thermique. Mémoire de Magister. Centre Universitaire de Médéa. Algérie. 102p, (Octobre 2000).
- [23] **A.Laukaitis, R.Zurauskas, J.Keiene** : The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties ; Cement concrete composite, 41-47 pp, (2005).
- [24] **Yves J ANNOT:** Métrologie thermique, Séminaire PER AUF, LEA Dakar, (12-18/11/08).
- [25] **Chauvin, J.J., Grimaldi, G:** Les bétons de sable; Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC) N°157 pp.9-15, (Sept. 1988).
- [26] **Berra Mario, Ferrara Gerardo** : Propriétés des bétons réalisés avec des granulats de différentes densités ; bulletin de l'assoocation internationale de Géologie de l'ingénieur N°30, Paris, (1984).
- [27] **K.w.Meeks and N.J.Carino:** Curing of High-performance Concrete Report of the state of the art, Building and Fire Research Laboratory National Institue of Standarts and Technology Gaithersburg, MD 20899,181pages, (Mars 1999).
- [28] **G. DREUX & J. FESTA** : Nouveau guide du béton et de ses constituants, 8ème Édition. Eyrolles,(Mai 1998).
- [29] **K. MILLED:** Effet de taille dans le béton léger de polystyrène expansé, Thèse de Doctorat. L'école Nationale Des Ponts Et Chaussées,(21 Novembre 2005).

Référence bibliographique

- [30] **B. SABAA& RASIAH SRI RAVINDRARAJAH** : Workability assessment for polystyrene Aggregate concrete, Centre University of Technology Sydney, Australia. 18-21pp,(October 1999).
- [31] **ACHOURA Djamel** : Contribution l'étude de la formulation et de la caractérisation des bétons de sable à base de laitiers de haut fourneaux d'EL-HADJAR, thèse de doctorat de génie civil ,175p, (2005).
- [32] **SABLOCRETE** : Béton de sable, caractéristiques et pratiques d'utilisation, presses de l'école nationale des ponts et chaussées (France) 230 pp, (1994).
- [33] **Tafraoui.A**: Caractérisation et valorisation du sable de l'erg occidental Algérien dans le BUHP et l'outillage. Thèse de doctorat de l'USTHB Alger, (2007).
- [34] **Kroba.B., Bouhicha.M., Kenai.S., Lakhdari.M.** : Formulation et durabilité d'un mortier à base de sable dunaire, colloque, sols et matériaux à problèmes, Tunisie, pp.297-305,(9-11février 2007).
- [35] **R.Lacroix, A. Fuentes et H.Thonier** : Traité de béton armé .Edition Eyrolles 1982.
- [36] **Cisse I. Laquerbe M.**: Caractérisation des bétons de sable routiers compactés: application a cas du Sénégal, Matériaux et construction, volume 32 , pp.151-157, (mars 1999).
- [37]**J.AMBROISE&J.PERA** : Etude des fillers rapport de recherche –développement, projet national SABLOCRETE –INSA de Lyon, (fevreier 1992).
- [38] **Benaissa. A.MORLIER. P.TRAM, V.** : Le béton de sable, un matériau non fissurant, Algérie-équipement, N°6, pp7-11, (2002).
- [39] **Ghrieb.A**: Etude d'un béton de sable de dune pour pistes aéronautiques. Thèse de magister, (ENP 2003).
- [40] **G. Chauvillard. O. Bssuvaux**: Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées, Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC), N°205, (Sept- Oct 1996).
- [41] **Dreux G &Festa J** : nouveau guide du béton et de de ses constituants, édition Eyrolles, paris ,409p, (1998).
- [42] **DENIS A. ATTAR A.BREYSSE D & CHAUVIN J. J** : effect of coarse aggregate on the workability of sandcrete, cement and concrete Research vol 32, pp701-706, (2002).
- [43] **Benabed.B, Azouz.L. Damene.Z.**: Comportement mécanique et durabilité des mortiers à base du sable de dune, colloque CMEDIMAT,(6-7 décembre 2005).

ANNEXE