

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ibn Khaldoun De Tiaret.
Faculté Des Sciences Appliquées
Département Génie Civil



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master
Filière : Travaux Publics
Spécialité: Voies et Ouvrages d'Art

Présenté par :
Fatnaci Youcef Abdelkader
Djellouli Djamel

Sujet du mémoire :

**Etude expérimentale sur les bétons légers à base de polystyrène :
amélioration des caractéristiques mécaniques**

Soutenue publiquement Le 25/06/2024 devant le jury composé de :

Pr Abdelkader SAOULA

Président

Pr Tayeb BENSATTALAH

Encadreur

Pr Tahar HASSAINE DAOUADJI

Co-encadreur

Pr Mohamed ZIDOUR

Examineur

Dr Aicha KABLIA

Examinatrice

Promotion :2023/2024

Remerciement

Nous remercions tout d'abord ALLAH le tout puissant d'avoir guidé nos chemins, de nous avoir donné la santé, la patience et la volonté tout au long de notre formation.

Nos remerciements s'adressent en suite à nos chers parents et à nos familles qui nous ont soutenu pendant toute ses années.

Nous souhaitons exprimer, tout particulièrement, nos vifs remerciements à notre promoteur Monsieur Tahar HASSAINE DAOUADJI professeur et chercheur à l'université de TIARET, de nous avoir fait confiance et accepté de diriger ce mémoire, nous remercions pour son aide et ses conseils

Nous exprimons aussi notre gratitude de notre profonde reconnaissance pour notre encadreur Monsieur Tayeb BENSATTALAH Professeur et chercheur à l'université de TIARET de nous avoir encadré, orienté ,aidé et conseillé et pour sa constante disponibilité

Nous remercions les membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner notre travail

Nous remercions également nos collègues Benabed Amar et Boffaroudj Ilyes de nous avoir aidés lors de nos durs travaux en laboratoire.

Dédicaces

Nous rends grâce à Dieu,

ET nous dédions ce mémoire à

Nos chers parents, pour tout leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de nos études.

Nos chers frères et sœurs à qui nous souhaitons un avenir plein de joie , de bonheur, de réussite et de sérénité.

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

À mes amis de toujours

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

Résumé

Afin de redynamiser le développement du secteur socio-économique de notre pays, et dans le cadre des recommandations et orientations du gouvernement; au sujet création des petites et moyennes entreprises puissantes qui vont devenir le moteur de la croissance des emplois et de la création de la richesse. C'est de ce contexte que nous proposons l'idée de l'amélioration des caractéristiques mécanique des bétons légers à base de polystyrène. A cet effet, et dans le cadre de l'amélioration du domaine de la construction comme les autres domaines, afin d'être à jour aux récents changements climatique et environnemental, notamment les risques majeurs à savoir les séismes. Il est donc devenu nécessaire de trouver des solutions pour au moins atténuer et réduire leurs dégâts sismiques à titre d'exemple. Pour cela nous proposons un béton à base de polystyrène classé comme nouveau matériaux de construction, en améliorant ces caractéristiques physiques à savoir la légèreté d'une part et les caractéristiques mécaniques en l'occurrence la résistance d'autre part. Ce nouveau béton à base de polystyrène amélioré répond bien aux défis économiques et qui présente plusieurs avantages, citons à titre d'exemple: la réduction des dommages et dégâts sismique, l'isolation phonique et acoustique pour réduire les transmissions des bruits et la température de l'extérieure vers l'intérieure et vice versa et la protection contre l'humidité. En conclusion ce nouveau produit sera proposé aux industriels, aux entrepreneurs et même pour les constructeurs privés.

Mots clés : Béton, résistance, légèreté, imperméabilité, économie, richesse .

Abstract

To revitalize the development of the socio-economic sector of our country, and in line with the government's recommendations and directives regarding the creation of strong small and medium enterprises that will become the engine of job growth and wealth creation, we propose the idea of improving the mechanical properties of lightweight concrete based on polystyrene. In this context, and within the framework of improving the construction sector as well as other fields, to stay updated with recent climatic and environmental changes, particularly major risks such as earthquakes, it has become necessary to find solutions to at least mitigate and reduce their seismic damage.

Therefore, we propose using concrete made from polystyrene, classified as a new construction material, by improving its physical properties such as lightness on one hand, and its mechanical properties such as resistance on the other. This new polystyrene-based concrete effectively meets economic challenges and offers several advantages, including: reducing seismic damage, providing sound and thermal insulation to reduce noise transmission and temperature from outside to inside and vice versa, and protection against humidity.

In conclusion, this new product will be offered to industrialists, contractors, and even private builders.

Keywords: Concrete, resistance, lightness, impermeability, economy, wealth.

ملخص

بهدف إعادة تنشيط و تطوير القطاع الاجتماعي والاقتصادي في بلدنا، وفي إطار توصيات وتوجيهات الحكومة بشأن إنشاء شركات صغيرة ومتوسطة قوية ستصبح محركاً لنمو الوظائف وخلق الثروة، نقترح فكرة تحسين الخصائص الميكانيكية للخرسانة الخفيفة القائمة على البولسترين. في هذا السياق، وفي إطار تحسين مجال البناء كباقي المجالات، لمواكبة التغيرات المناخية والبيئية الأخيرة، وخاصة المخاطر الكبيرة مثل الزلازل، أصبح من الضروري إيجاد حلول للتخفيف على الأقل من أضرارها وتقليل تأثيراتها المدمرة.

لذلك، نقترح استخدام خرسانة مصنوعة من البولسترين كمادة بناء جديدة، مع تحسين خصائصها الفيزيائية مثل الخفة من ناحية، والخصائص الميكانيكية مثل المقاومة من ناحية أخرى. هذه الخرسانة الجديدة المصنوعة من البولسترين المحسن تلبي التحديات الاقتصادية وتتمتع بالعديد من المزايا، نذكر منها: تقليل الأضرار والتلف الناتج عن الزلازل، العزل الصوتي والحراري لتقليل انتقال الضوضاء ودرجات الحرارة من الخارج إلى الداخل والعكس، والحماية من الرطوبة. في الختام، سيتم تقديم هذا المنتج الجديد للصناعيين والمقاولين وحتى للبنائين الخاصين. الكلمات المفتاحية: خرسانة، مقاومة، خفة، عدم نفاذية، اقتصاد، ثروة.

Table des matières

Résumé	iii
Abstract	iv
ملخص	v
Table des matières	vi
Liste des tableaux	x
Chapitre I Recherche bibliographique sur les bétons et les bétons légers	2
I.1 Généralité sur les bétons et les bétons légers.....	2
I.2 Classification et type des bétons légers	3
I.2.1 Classification de bétons légers.....	3
I.2.2 Les types des bétons légers	5
I.3 Composants des bétons légers	7
I.4 Formulations des bétons légers.....	9
I.5 Caractéristiques physique et mécanique des bétons légers	10
I.5.1 Caractéristiques physiques.....	10
I.5.2 Caractéristiques mécaniques.....	13
I.6 Comportement des bétons légers	14
I.7 Influence des granulats sur le comportement des bétons légers	15
I.7.1 Influence des caractéristiques des granulats légers.....	15
I.7.2 Influence de la composition des bétons	16
I.8 Avantages et inconvénients des bétons légers	18
I.8.1 Avantage	18
I.8.2 Inconvénients	18
I.9 Domaines d'utilisations des bétons légers.....	18
I.10 Conclusion	19
Chapitre II Béton léger à base de polystyrène	20
II.1 Introduction.....	20

II.2	Composition des bétons légers à base de polystyrène	21
II.2.1	Le liant	22
II.2.2	Sable.....	22
II.2.3	Polystyrène.....	22
II.3	Les granulats de polystyrène.....	23
II.3.1	Origine et composition chimique.....	23
II.3.2	Fabrication du polystyrène expansé.....	23
II.3.3	Propriétés de polystyrène	23
II.3.4	Les propriétés acoustiques	24
II.3.5	Les propriétés thermiques	24
II.4	Caractéristiques physiques et mécaniques du polystyrène	25
II.4.1	Densité	25
II.4.2	Propriétés morphologique.....	25
II.4.3	Résistance à la compression.....	25
II.4.4	Conductivité thermique.....	25
II.5	Avantages et domaine d'utilisation du béton de polystyrène	26
II.6	Comportement des bétons à base de granulats de polystyrène	26
II.7	Des Propriétés Du Polystyrène	28
II.8	Différence entre le polystyrène non traite et le polystyrène traite	28
II.8.1	Le polystyrène normal non traite	29
II.8.2	Le polys béto.....	30
II.9	Conclusion	30
Chapitre III Programme expérimental		31
III.1	Propriétés physiques des matériaux de constructions.....	31
III.1.1	Introduction.....	31
III.2	Description des essais expérimentaux	32
III.2.1	Essai de la masse volumique.....	32
III.2.2	Essai de la masse spécifique	34
III.3	Les matériaux naturels	36
III.3.1	Les granulats	36
III.4	Expérience de contrôle.....	38

III.4.1	Essai de l'équivalent de sable	38
III.4.2	Essai de foisonnement du sable	41
III.4.3	Essai au bleu de méthylène	42
III.4.4	Analyse granulométrique par tamisage.....	44
III.5	Les Ciments	48
III.5.1	Expérimentation.....	50
III.5.2	Essai sur bétons frais et durci.....	52
III.6	Propriétés mécaniques	57
III.7	Eau de gâchage	59
III.7.1	Introduction.....	59
III.7.2	Caractéristiques.....	60
III.8	Les Adjuvants	63
III.8.1	Définition	63
III.8.2	Principaux adjuvants et ajouts	63
III.9	Formulation des bétons : méthode de Dreux-Gorisse.....	66
III.9.1	Objectif	66
III.9.2	Définition du cahier des charges.....	66
III.9.3	Formulation de Dreux- Gorisse	68
III.10	confection des éprouvettes	76
III.10.1	Matériaux utilisé pour les essais expérimentaux	76
III.10.2	Matériels utilisé pour les essais expérimentaux.....	77
III.10.3	Procédure de coulage des bétons sur les moules	80
III.10.4	Essai sur éprouvette et poutre en béton.....	84
III.11	Conclusion :	88
Chapitre IV Présentation des résultats expérimentaux: analyse et interprétation		
.....		90
IV.1	Introduction.....	90
IV.2	Résultats expérimentaux	90
IV.2.1	Essai de compression sur éprouvette 16/32	90
IV.2.2	poutres de dimension 10x10x40	94
IV.2.3	Poutres de dimension 10x15x80	100

IV.2.4	poutres de dimension 10x20x120	103
IV.2.5	éprouvette de dimension 11/33	105
IV.3	Conclusion	107
Chapitre V Utilisation des bétons légers à base de polystyrène : Prototypes des éléments constructifs.....		108
V.1	Introduction.....	108
V.2	Les éléments non structuraux légers à base de polystyrène.....	111
V.2.1	Objectif de ces éléments	111
V.2.2	Présentations des éléments constructifs en béton léger bétons à base de polystyrène.....	112
V.3	Conclusion	116
Conclusion		117
Bibliographie.....		120

Liste des tableaux

Tableau I-1- Classification des bétons légers selon le guide ACI 213R-87.....	4
Tableau III-1- Valeurs préconiser pour l'équivalent de sable	40
Tableau III-2- Dimension minimal des tamis	45
Tableau III-3- Fuseau granulaire pour les sables	47
Tableau III-4- Fuseau granulaire pour les graviers.....	47
Tableau III-5- La composition chimique de ciment.....	48
Tableau III-6- Les composés minéralogiques d'un ciment portland	49
Tableau III-7- Hydratation du ciment : prise et durcissement.	50
Tableau III-8- Appréciation de la consistance du béton en fonction de l'affaissement au cône	53
Tableau III-9- Dimension des cylindres en cm et du vibreur en mm en fonction de D.....	54
Tableau III-10- Les principaux modes d'action des impuretés des eaux de gâchage.....	62
Tableau III-11- Affaissement au cône conseillé en fonction du type d'ouvrage à réaliser....	67
Tableau III-12- Correspondance entre classe vraie et dénomination normalisée des ciments.	67
Tableau III-13- Coefficient granulaire G' en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats D_{max}	68
Tableau III-14- Correction sur le dosage de pâte en fonction de D_{max}	70
Tableau III-15- K, fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment.....	71
Tableau III-16- Compacité du béton en fonction de D_{max} , de la consistance et du serrage ..	74
Tableau III-17- Présentations des dépenses composants les bétons.	76
Tableau IV-1- Essais d'écrasement de béton ordinaire sur éprouvette 16/32.....	92
Tableau IV-2- Essais d'écrasement de béton à base de 10 % de polystyrène sur éprouvette 16/32	93
Tableau IV-3- Essais d'écrasement de béton à base de 20 % de polystyrène sur éprouvette 16/32	93

Tableau IV-4- Essais d'écrasement de béton à base de 30 % de polystyrène sur éprouvette 16/32	94
Tableau IV-5- Essais de flexion trois points du béton ordinaire sur poutres de dimension 10x10x40.....	96
Tableau IV-6- Essais de flexion quatre points du béton ordinaire sur poutres de dimension 10x10x40.....	97
Tableau IV-7- Essais de flexion trois points du béton à base de 10 % de polystyrène sur poutres de dimension 10x10x40	97
Tableau IV-8- Essais de flexion quatre points du béton à base de 10 % de polystyrène sur poutres de dimension 10x10x40	98
Tableau IV-9- Essais de flexion trois points du béton à base de 20 % de polystyrène sur poutres de dimension 10x10x40	98
Tableau IV-10- Essais de flexion quatre points du béton à base de 20 % de polystyrène sur poutres de dimension 10x10x40	99
Tableau IV-11- Essais de flexion trois points du béton à base de 30 % de polystyrène sur poutres de dimension 10x10x40	99
Tableau IV-12- Essais de flexion quatre points du béton à base de 30 % de polystyrène sur poutres de dimension 10x10x40	100
Tableau IV-13- Essais de flexion du béton ordinaire sur poutres de dimension 10x15x80.	102
Tableau IV-14- Essais de flexion du béton à base de 10 % de polystyrène sur poutres de dimension 10x15x80.....	102
Tableau IV-15- Essais de flexion du béton à base de 20 % de polystyrène sur poutres de dimension 10x15x80.....	103
Tableau IV-16- Essais de flexion du béton à base de 30 % de polystyrène sur poutres de dimension 10x15x80.....	103
Tableau IV-17- Essais de flexion quatre points du béton ordinaire sur poutres de dimension 10x20x120 :	105
Tableau IV-18- Essais de flexion quatre points du béton à base de 30 % de polystyrène sur poutres de dimension 10x20x120 :	105
Tableau IV-19- Essais d'écrasement de béton non armé sur éprouvette 11/33	106
Tableau IV-20- Essais d'écrasement de béton armé sur éprouvette 11/33	107

Tableau V-1- familles d'éléments non structuraux du cadre bâti au sens du guide "Dimensionnement parasismique des éléments non structuraux du cadre bâti"	108
Tableau V-2- Composition et poids des échantillons de corps creux	113
Tableau V-3- Composition et poids des échantillons de Elément de maçonnerie	114
Tableau V-4- Composition et poids des échantillons de élément sandwich	115

Liste des figures

Figure I-1 - Essai du cône d'Abrams	12
Figure II-1 - Polymérisation du styrène.....	23
Figure III-1 - Mesure des masse volumique pour les trois matériaux composant le béton....	34
Figure III-2 - l'essai d'équivalent de sable.....	39
Figure III-3 - Relation entre l'indice sclérométrique et la résistance à la compression	56
Figure III-4 - Essai de compression simple.....	58
Figure III-5 - Essai de flexion simple.....	58
Figure III-6 - Abaque permettant la détermination de Copte	69
Figure III-7 - Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériau -références.	72
Figure III-8 – Résultats obtenus des pourcentages en volumes absolus de matériau.....	73
Figure III-9 – Lieu de carrière de kbouba	76
Figure III-10 – Matériaux composant le béton.....	77
Figure III-11 – Différentes types de coffrage utilisés	78
Figure III-12 – Les bétonnières	79
Figure III-13 –Appareil d'essai de compression	80
Figure III-14 – Appareil d'essai de flexion,	80
Figure III-15 - Préparation du béton : Mélangez le ciment, les granulats , polystyrène et l'eau dans un bétonnière	80
Figure III-16 – application des huiles sur les coffrages	81
Figure III-17 – Essai d'affaissement à l'aide du d'Abrams	82
Figure III-18 – Remplissage des éprouvettes	82
Figure III-19 – vibration le béton	83
Figure III-20 – Décoffrage des poutres pour béton (a, b et c) et éprouvette cylindrique (d) .	83
Figure III-21 – cure des béton	84
Figure III-22 – Essais d'écrasement sur éprouvette 16/32.....	85
Figure III-23 – Essais de flexion trois point sur poutres en béton	86
Figure III-24 – Essais d'écrasement sur poutres de dimension 10x10x40	87
Figure III-25 – Essais d'écrasement sur éprouvette cylindrique 11/33	88

Figure IV-1 – Contrainte de compression du béton en MPa en fonction du nombre de jours de durcissement pour une éprouvette 16/32.....	91
Figure IV-2 – Essai de flexion trois points d'une poutre de dimension:10x10x40.....	95
Figure IV-3 – Essai de flexion quatre points d'une poutre de dimension:10x10x40.....	96
Figure IV-4 – Essai de flexion trois points d'une poutre de dimension:10x15x80.....	101
Figure IV-5 – Essai de flexion quatre points d'une poutre de dimension:10x15x80.....	101
Figure IV-6 – Essai de flexion quatre points des poutres de dimension:10x20x120 Contrainte de flexion du béton en MPa à 28 jours	104
Figure IV-7 – Contrainte de compression du béton en MPa e pour des éprouvettes 11/33 à 28 jours.....	106
Figure V-1 - Exemple d'éléments structuraux et d'éléments non structuraux du cadre bâti	110
Figure V-2 - Chute d'éléments non structuraux : séisme de Boumerdes (21 mai 2003).....	111
Figure V-3 - Chute d'éléments non structuraux : séisme de Lorca 2011	111
Figure V-4 - Différents types de corps creux.....	113
Figure V-5 - Elément de maçonnerie	115
Figure V-6 - élément sandwich.....	116

Introduction générale

Le béton est un matériau de construction bien connu, largement utilisé dans les secteurs du bâtiment et des travaux publics. Toutefois, l'allègement des structures reste une préoccupation majeure pour les concepteurs. En raison de sa masse, le béton possède une certaine inertie, ce qui limite la transmission des sons par vibration acoustique et ralentit le transfert de la chaleur. Cette capacité tampon compense partiellement sa conductivité thermique. Ainsi, bien que le béton soit performant sur le plan mécanique, il présente des lacunes en matière d'isolation thermique. Pour remédier à cela, de nouveaux matériaux appelés bétons légers ont été développés. Ces bétons, dont la densité est inférieure à celle des bétons classiques (1800 kg/m^3), visent à améliorer l'isolation thermique. Ils peuvent être produits de trois manières : en utilisant des agrégats légers, en intégrant de l'air ou du gaz, ou en réduisant la proportion de fines dans le granulat. Dans chaque cas, la densité est réduite par l'augmentation des vides d'air dans le béton.

Pour créer un tel béton, il faut prendre en compte la formulation des bétons légers et l'emploi de granulats légers. L'évaluation du potentiel des matériaux légers en tant que matières premières devient également de plus en plus importante. Les propriétés mécaniques des bétons de granulats légers dépendent fortement des caractéristiques et des proportions des granulats utilisés. En particulier, les granulats légers, en raison de leur forte porosité, sont plus déformables que la matrice cimentaire, rendant leur influence sur la résistance du béton complexe.

Le béton ordinaire est l'un des matériaux de construction les plus courants et les plus utilisés dans le monde entier, malgré ses nombreux avantages, ce béton présente également des inconvénients, citons à titre d'exemple son poids qui est très important, en conséquence un dimensionnement aussi important au détriment de l'économie. Vu que le béton ordinaire est plus dense et plus lourd, ce qui peut entraîner des contraintes supplémentaires sur les structures et nécessiter des fondations volumineuses, autrement dit qu'il y aura un surcoût en

infrastructure et superstructure. En plus du surcoût, ce béton ordinaire à une conductivité thermique relativement élevée, ce qui peut entraîner des pertes de chaleur dans les bâtiments.

Afin de résoudre le problème économique cité précédemment qui est lié au poids du béton ordinaire, dans ce contexte nous voulons proposer comme solution de substituer quelque classe granulaire par un matériau très léger en l'occurrence les grains de polystyrène afin d'obtenir un béton léger. Ce nouveau béton à base de polyester qui sera utilisé comme: Corps creux pour les planchers (hourdis qui servira comme coffrage perdu), j'attire votre attention que le poids du nouveau planchers est estimé à moins de 40% par rapport au corps creux d'un béton ordinaire. Connaissant bien que l'effort sismique est une fonction linéaire du poids de la structure, et puisque notre structure est allégée à cause de l'utilisation du nouveau béton de polystyrène, dans ce cas nous obtenons un sous dimensionnement de la structure porteuse et conséquence nous enregistrons une réduction du montant de la construction.

Notre étude se concentre sur la substitution d'une partie du gravier par des granulats de polystyrène pour fabriquer une nouvelle gamme de béton de gravier léger. Cette recherche expérimentale analyse l'impact des propriétés de ces granulats légers sur le comportement physico-mécanique du béton, dont le programme expérimental examine la variation du pourcentage de granulats légers (polystyrène) incorporés dans le béton afin d'observer leurs effets sur les caractéristiques rhéologiques et mécaniques des bétons de granulats légers.

Le présent manuscrit est structuré comme suit,

Une introduction générale montrant la problématique et la solution proposée, de la substitution des béton ordinaires par les béton à base de polystyrènes,

Une recherche bibliographique sur les béton et les bétons légers, est présentée au premier chapitre,

Le deuxième chapitre est consacré à une présentation des bétons légers à base de polystyrène, objet de notre présente étude,

Afin d'atteindre nos objectifs, un programme expérimental sur la caractérisation des matériaux composant le béton, est présenté en troisième chapitre, ainsi que des tests sur les éléments d'éprouvettes et poutres de différentes dimensions,

Les résultats obtenus de cette campagne expérimentale, sont présentées en chapitre quatre, suivis des analyses et interprétation,

Le cinquième chapitre présente l'utilisation des bétons légers à base de polystyrène, où des prototypes des éléments constructifs sont montrées,

Chaque chapitre est terminé par une conclusion, où la synthèse générale de cette étude est présenté en conclusion générale, bien-sur des recommandations et des perspectives sont aussi présentées.

Chapitre I

Recherche bibliographique sur les bétons et les bétons légers

I.1 Généralité sur les bétons et les bétons légers

Le béton est un matériau composite constitué d'une matrice en ciment et d'inclusions de granulats ou agrégats (sables, graviers, cailloux) dont la répartition et la géométrie ne sont pas connues à priori et présentent souvent une dispersion importante. A cette hétérogénéité de composition vient s'ajouter une hétérogénéité dite structurelle. Elle consiste en l'existence de défauts initiaux (microfissures) au sein de la microstructure. La plupart de ces défauts se situent à l'interface entre les granulats et la pâte de ciment, cette interface constituant le lien le plus faible du matériau [1].

Celui-ci a pour rôle de se lier avec les gros granulats pour former un conglomérat solide. Les adjuvants et les additions servent à améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou durci. Le béton est né du besoin d'avoir un matériau de construction bon marché, malléable au moment de le mettre en place et résistant ensuite. La forme la plus ancienne du béton remonte à 7000 ans avant JC. Un matériau similaire était connu des égyptiens et des Romains, mais l'essor réel du béton tel qu'on le connaît aujourd'hui est dû à l'anglais Joseph Aspdin qui en 1824 fait breveter le ciment Portland [2].

Le béton léger fait partie de la gamme des bétons spéciaux ses caractéristiques, suggèrent de nouvelles application, ce qui le distingue du béton ordinaire est sa faible masse volumique. En effet la masse d'un béton de densité normale varie de 2200 à 2600 kg/m³, tandis que celle du béton léger oscille entre 300 et 1850 kg/m³ [5]. D'après ce que n'a vu précédemment les bétons légers sont des bétons dont la masse volumique est inférieure à 1800 kg/m³. Le béton léger est constitué en partie ou en totalité de granulats légers, de liants hydrauliques ou de résines synthétiques (époxydes, mousses de polyuréthane, etc.). En fait, la majorité de ces

bétons a une masse volumique faible, comparativement à celle des bétons conventionnels comprise entre 2200 et 2600 kg/m³ [6].

Ces bétons à des fins d'isolation et d'allégement ou les deux à la fois, il peut également être utilisé pour des éléments porteurs à condition que l'on possède les granulats permettant d'atteindre les résistances voulues, Donc les bétons légers de construction affectés par leurs masses volumiques et ces résistances variées. Bien utilisés, ces deux facteurs permettent d'apporter dans tous les domaines de la construction des solutions optimisées sur les plans constructif et économique ainsi qu'au niveau de la physique du bâtiment. Ils permettent ainsi d'avancer vers de nouveaux horizons de la construction. En fin Le béton léger se caractérise essentiellement par leur faible masse volumique, adaptable aux exigences, par leur excellent rapport poids/résistance et par leur bonne isolation thermique, leur résistance à la chaleur et au feu, leur résistance au gel ainsi que par leur insensibilité générale aux agressions physiques et chimiques traditionnelles dans le domaine de la construction [7].

I.2 Classification et type des bétons légers

I.2.1 Classification de bétons légers

L'accroissement d'air ou de vides dans le béton entraîne une diminution de sa résistance. Selon le guide ACI 213R-87, le béton léger est classé en trois catégories en fonction de sa masse volumique après durcissement et de ses propriétés mécaniques.

I.2.1.1 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.

I.2.1.2 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).

I.2.1.3 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 a été utilisé, notamment pour la construction du dôme du Panthéon et du Colisée à Rome [3].

Tableau I-1- Classification des bétons légers selon le guide ACI 213R-87.

Classification	Béton léger de structure	Béton léger de résistance modérée	Béton de faible résistance
$\rho(\text{kg/m}^3)$	1350-1900	800-1350	300-800
RC (MPa)	> 17	7 – 17	< 7

Selon leur utilisation dans les structures, les bétons légers peuvent être classés en fonction de leurs masses volumiques apparentes comme suit :

Des bétons de remplissage : leur masse volumique apparente est comprise entre 300 et 1000 kg/m^3 , leurs résistances en compression sont souvent faibles et leurs caractéristiques thermiques sont bonnes [3].

Des bétons porteurs isolants : leur masse volumique apparente est comprise entre 1000 et 1400 kg/m^3 , leurs résistances mécaniques sont nettement meilleures que celles des précédents et leurs caractéristiques thermiques sont acceptables. On les utilise généralement pour des éléments préfabriqués.

Des bétons de structure : Leur masse volumique est comprise entre 1400 et 1800 kg/m^3 . Ils sont destinés à la constitution des structures grâce à leurs résistances mécaniques qui peuvent être du même ordre que celles des bétons ordinaires. Leur pouvoir isolant est relativement faible [4].

I.2.2 Les types des bétons légers

I.2.2.1 Le béton cellulaire

Le béton cellulaire est issu de longues recherches, entamées il y a plus de 150 ans. A cette époque, zernikov étudie des mortiers à base de chaux vive et de sable portés à haute température [8]. Les bétons cellulaires sont généralement des mélanges de mortier contenant de petites bulles d'air. Ces mortiers consistent en un mélange de sables (granulats à base de silice ou légers) et de ciment Portland. Les bulles d'air sont créées à l'intérieur de la pâte à l'aide d'agents moussants spéciaux, qui sont ajoutés au béton pour générer un volume d'air significatif. Parmi ces agents figurent la poudre d'aluminium ou l'utilisation d'eau savonneuse lors du brassage. La poudre d'aluminium réagit chimiquement avec le ciment et l'eau lors du mélange pour produire des sels et de l'hydrogène, qui forment les petites bulles d'air. Ces processus nécessitent une grande précision et des calculs de dosage minutieux, et doivent être effectués en atelier plutôt que sur le chantier [7].

Le béton léger « cellulaire » ou « aéré » s'avère être le béton le plus susceptible de remplir les objectifs du système de plancher projeté. Le béton cellulaire est un matériau moulable, malléable, léger, durable et relativement résistant. Ce sont toutes des propriétés que les auteurs Agustin et al. (1990) démontrent comme étant des propriétés à rechercher pour l'habitation à faible coût. Le béton cellulaire non traité à l'autoclave, nécessite peu d'outillage spécialisé et peut être assemblé sans trop de machinerie [9]. Les bétons cellulaires ont généralement une masse volumique et une résistance à la compression extrêmement faibles. L'utilisation la plus courante des bétons cellulaires se limite au béton de remplissage dans des murs, plafonds, planchers ou comme matériaux de remblai [6].

I.2.2.2 Le béton caverneux

Les bétons caverneux sont obtenus en supprimant la totalité ou une partie du sable dans le béton (Connon, 1973). Un béton ne contenant pas de sable produit une agglomération de gros granulats dont les particules sont recouvertes par un film de pâte de ciment d'une épaisseur de 1 à 3 mm . Cette substitution crée à l'intérieur du béton de larges cavités (pores), responsables de la diminution de la masse volumique et de la baisse de résistance à la compression [6]. 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. Ces bétons ont donc une porosité élevée; ils sont drainant [9]. Ils sont fabriqués avec un minimum d'eau pour éviter le lavage de la pâte de ciment sur les granulats [7].

Le béton caverneux est un des types de béton léger obtenu quand on ne met pas de granulats fins dans le mélange. Ce béton ne compte que du ciment, de l'eau et de gros granulats. Il existe donc de gros vides au sein de la masse qui sont responsables de sa faible résistance. Toutefois la minuscule dimension de ces vides empêche tout mouvement capillaire de l'eau. La masse volumique du béton caverneux dépend de sa granulométrie [7]. La résistance en compression du béton caverneux est généralement comprise entre 1.5 et 14 *MPa*. On note une augmentation de la résistance avec l'âge semblable à celle des bétons de densité normale. La résistance en flexion est habituellement égale à 30 % de la résistance en compression, c'est-à-dire supérieure à celle du béton ordinaire (Malhotra, 1989). Le retrait du béton caverneux est considérablement plus faible que celui d'un béton de densité normale. Ce béton est très résistant au gel. Sa forte absorption d'eau le rend cependant inutilisable dans les fondations et dans les situations où il peut se saturer en eau [10]. Leur utilisation n'est généralement pas associée à la recherche de la légèreté du produit, mais bien davantage pour les particularités économiques occasionnées par la faible teneur en ciment. On les utilise principalement dans la confection de murs porteurs de bâtiments domestiques et dans les panneaux de remplissage de cadres de structure. Ainsi pour des ouvrages requérant des propriétés drainantes, tels les puits de captage des eaux de ruissellement, confection des éléments architecturaux [6].

I.2.2.3 Les bétons de granulats légers :

Le béton de granulats légers n'est pas une nouvelle invention dans la technologie du béton. Il est connu depuis les antiquités, il est donc possible de trouver plusieurs références liées à son utilisation. Nous avons utilisé des agrégats normaux d'origine volcanique tels que la pierre ponce, la scorie, etc. Les Sumériens l'ont utilisé dans le bâtiment de Babylone au 3ème millénaire A.C. Les Grecs et les Romains ont utilisé la pierre ponce dans la construction des bâtiments. Certaines de ces magnifiques structures de l'antiquité existent toujours, comme la

mosquée à Istanbul, en Turquie, construite par deux ingénieurs, Isidore de de Miletus et Anthemius de Tralles, commandée par l'empereur Justinien au IV^e siècle après J.C. Le temple romain, Panthéon, qui a été érigé entre 118 et 128 après J.C; les Romains utilisaient des agrégats naturels légers et des vases en argile creuse pour leur "opus Caementitium " afin de réduire le poids. On le retrouve aussi dans la construction des pyramides à l'époque des Mayas au Mexique [11].

Le béton est traditionnellement connu comme une matière grise lourde et froide avec une bonne résistance mécanique. Cependant, il est généralement connu que le béton n'est pas nécessairement seulement des blocs de gris lourds et tranchants. Il peut acquérir n'importe quelle forme, couleur, densité et résistance. La faible densité du matériau génère une bonne isolation thermique et permet de réduire le poids des structures. De plus, l'épaisseur des toits et des murs extérieurs peut être réduite. Par conséquent, si la même épaisseur est conservée, un degré d'isolation thermique plus élevé sera atteint. La masse volumique, par exemple, peut aller de 300 à 3000 kg / m³ ; conductivité thermique de 0,1 à 3 W / m.K ; et une résistance de 1 à 100 MPa ou même plus (Mueller et al, 2008). La densité est principalement contrôlée par le type d'agrégat utilisé. La résistance dépend également en partie du type de granulats utilisés pour fabriquer le béton [11].

I.3 Composants des bétons légers

Les bétons légers sont obtenus en jouant sur la composition (bétons caverneux) ou sur l'emploi de granulats allégés (des billes de schiste expansé, d'argile expansée ou de polystyrène, voire des particules de liège ou de bois remplacent les gravillons habituels). Des adjuvants comme les entraîneurs d'air peuvent aussi être ajoutés pour un allègement maximum. On peut également créer des vides par une réaction provoquant un dégagement gazeux : c'est le cas du béton cellulaire [13].

D'une façon générale, le principe de la détermination des proportions du mélange pour confectionner des bétons de granulats légers est pratiquement le même que celui concernant les bétons traditionnels ; toutefois un paramètre nouveau, la densité souhaitée, apparaît dans

l'énoncé du problème et c'est pourquoi nous avons étudié une méthode de composition prenant en compte ce paramètre [14].

Le calcul des quantités de granulats s'effectue en volume absolu, mais le dosage pondéral nécessite la connaissance de la masse spécifique des granulats pré mouillés qui, en général, n'est pas connue avec une très grande précision. Ces granulats présentent presque tous, en effet, une tendance très marquée à l'absorption d'eau. Par exemple, pour un granulat d'argile expansée 10/20 mm l'absorption en poids est indiquée en valeurs moyennes, [14] Par imbibition sous vide, l'absorption peut dépasser 75% pour les plus gros granulats. Cette tendance est due à la porosité << ouverte des granulats et elle est moins marquée lorsque ceux-ci sont superficiellement comme « vitrifiés ». C'est-à-dire, présentent une surface lisse peu « ouverte ». [14] De plus, selon le degré d'imbibition le foisonnement peut prendre une valeur importante surtout pour les éléments fins comme les sables concassés de granulats légers [14].

Il en résulte essentiellement deux conséquences :

- Le dosage pondéral des granulats est délicat et peut être source d'erreur selon le degré d'imbibition ; il est préférable, en générale, de prévoir un dosage volumétrique à moins de pouvoir contrôler efficacement le pourcentage d'eau absorbée et d'en tenir compte en majorant d'autant le poids des granulats supposés secs dans la formule de dosage.
- L'absorption importante qui se manifeste dès le début du gâchage diminue progressivement et rapidement le dosage en eau inter granulaire et de ce fait la plasticité du béton. Il est donc conseillé d'humidifier préalablement ces matériaux de façon à ralentir cette absorption d'eau et de stabiliser à peu près la plasticité du matériau au moins pendant sa période d'emploi que l'on s'efforce de rendre aussi courte que possible : certains professionnels préconisent. Pour l'argile expansée un pré mouillage entraînant une absorption d'eau de l'ordre de 10 à 15% en poids. D'autres sont partisans d'employer des granulats saturés égouttés [14].

Cependant ces matériaux sont trop différents de l'un à l'autre pour qu'une règle commune puisse leur être appliquée et une fois rapidement déterminée une formule de dosage

approximativement valable. L'expérimentation par des essais d'étude prend alors une part encore plus importante et nécessaire que pour les bétons classiques de granulats denses [14]. Absorption d'eau en poids par immersion pour un granulats légers (eau totale retenue absorbée et adsorbée). Ces valeurs sont données à titre indicatif car elles varient sensiblement d'un granulats à l'autre et selon que le granulats est plus ou moins égoutté [14].

I.4 Formulations des bétons légers

Formulation, utilisation et procédé d'obtention d'un béton léger structurel. Ce dernier c'est un type de matériau qui vous facilitera grandement la tâche. Ce béton est composé en majorité de constituants l'allégeant, ce qui le rend bien moins lourd qu'un béton ordinaire et par conséquent, bien plus pratique d'utilisation. Les matériaux lourds qu'on retrouve chez les bétons classiques tels que les granulats sont remplacés. A la place, il est possible d'ajouter des billes de polystyrène par exemple comme notre cas ici. Cette caractéristique rend ce béton très utile dans la réalisation de certains types d'ouvrages tels que pour les fondations ou dans l'isolation. Le domaine de l'invention est celui des bétons légers structuraux à faible conductivité thermique. De tels bétons peuvent être destinés à la réalisation de structures coulées en place, de structures préfabriquées ou d'éléments de structure préfabriqués pour bâtiments et structures de génie civil [45].

Donc Il existe différentes manières d'obtenir du béton léger :

- On peut fabriquer du béton léger grâce à des ingrédients permettant d'obtenir un matériau final allégé. A la place des granulats de type gravillons qu'on retrouve habituellement dans les bétons classiques, on introduit des granulats allégés tels que des billes de polystyrène ou des billes de schiste expansé.
- On peut également concevoir du béton léger en jouant sur la composition. Pour cela, il suffit de créer des vides d'air dans le béton, ce qui nous donne du béton caverneux.
- Il est également possible d'ajouter des adjuvants comme les entraîneurs d'air. Ces derniers, en étant ajoutés à la composition, permettent d'obtenir du béton plus léger en créant des vides d'air.

En ce qui concerne les méthodes de la détermination la formulation du béton léger, nous nous basons sur les méthodes existantes pour un béton classique (ordinaire) sauf que nous remplaçons le volume des granulats de type gravillons qu'on retrouve habituellement dans les bétons classiques, par le volume des granulats allégés tels que des billes de polystyrène

I.5 Caractéristiques physique et mécanique des bétons légers

I.5.1 Caractéristiques physiques

I.5.1.1 La masse volumique

La masse volumique a une définition un peu spéciale quand il s'agit d'un béton léger. En effet, trois masses volumiques différentes peuvent être définies : la masse volumique à l'état frais, la masse volumique à l'état séché à l'air [31] et la masse volumique à l'état séché au four. La masse volumique du béton fraîchement malaxé peut être facilement déterminée comme la masse volumique à l'état frais. Cependant, dans le processus de séchage à l'air, l'humidité sera perdue jusqu'à ce qu'elle atteigne une masse volumique à l'état séché à l'air. Si le béton est séché à 105 ° C, il a atteint sa masse volumique à l'état séché au four [31]. Ainsi, la masse volumique sèche ρ_{bs} du béton léger, est la masse volumique qu'aurait le béton léger si toute l'eau ne servant pas à l'hydratation du ciment s'évaporait. Elle peut être déduite de la masse volumique à l'état frais par la relation suivante :

$$\rho_{bs} = \rho_0 - EV_0 \quad (\text{eq I.1})$$

Où ρ_0 désigne la masse volumique réelle du béton frais et EV_0 la quantité d'eau évaporable du béton. [31]

Cette quantité peut être caractérisée par la relation suivante :

$$EV_0 = E + E_a - 0.25C \quad (\text{eq I.2})$$

Où E désigne la quantité d'eau de gâchage, E_a la quantité d'eau absorbée par les granulats légers, et C la quantité de ciment. Il a été noté, que l'écart entre la masse volumique sèche ρ_{bs} et la masse volumique du béton frais ρ_0 varie entre 150 et 250 kg/m³ [31]. La masse volumique à l'état séché à l'étuve, peut être égale approximativement à la masse volumique sèche. Plusieurs recherches montrent en effet, que quel que soit l'humidité initiale dans les

granulats, la masse volumique à l'état séché à l'air est supérieur de 50 kg/m³ à la masse volumique à l'état séché à l'étuve [35].

Ainsi, la prise de poids d'un béton léger immergé, ne dépasse pas 40 kg/m³ et est de 30 kg/m³ pour un béton traditionnel. Les auteurs expliquent essentiellement, ce gain de poids, expliqué par le remplissage des vides du mortier, et non par la migration d'eau vers les granulats légers, les pores de surface étant en grande partie bouchés par le mortier, au moment du malaxage et au début de la prise, du fait des échanges d'eau entre le mortier et les granulats légers [31].

I.5.1.2 L'absorption

L'absorption est un phénomène physique dans lequel le liquide migre de l'extérieur du milieu poreux vers l'intérieur en raison de la remontée capillaire. L'absorption conduit à une augmentation de la masse du matériau. Elle n'est possible que lorsque les capillaires du réseau poreux sont connectés pour permettre le transfert d'eau : c'est ce qu'on appelle des pores ouverts ou des pores connectés (les pores communiquent entre eux). Lorsque le matériau contient des pores emprisonnés comme du béton cellulaire, nous l'appelons pores occlus (porosité close ou porosité vacuolaire dénommée aussi porosité résiduelle). Ces pores ne sont pas impliqués dans le phénomène d'absorption [34].

I.5.1.3 La porosité

Généralement, le béton est composé de plusieurs éléments solides (granulats, liants) et de plusieurs types de vides dont la taille varie de quelques dizaines d'angströms (A_0) à plusieurs millimètres, selon la source de ces pores [31]. En raison de la présence d'air dans les particules, les granulats ont une porosité inhérente appelée Φ_g . Compte tenu de la taille caractéristique du capillaire (de l'ordre du μm), la porosité du granulat sera considérée comme la porosité microscopique [32].

La matrice du liant contient également des vides d'air qui apparaissent lorsque l'hydrate se solidifie et que le matériau sèche. Nous parlons de l'air infra-liant, qui peut déterminer la porosité inhérente du liant Φ_l . La taille caractéristique des pores existant entre l'hydrate de Ca (OH)₂ ou C-S-H varie entre 0,01 μm et 5 μm et la taille des pores créés par l'agent entraîneur

d'air varient entre 5 μm et 1000 μm . L'air intra-liant sera également considéré comme du micro air [32].

$$\phi_l = \frac{V_{vid}}{V_{liant}} \quad (\text{eq I.3})$$

Avec :

V_{vide} : volume des vides contenus dans la matrice de liant (m^3)

V_{liant} : volume total occupé par la pâte de liant (m^3)

Enfin, à l'origine des pores microscopiques du matériau, la disposition plus ou moins compacte (empilement de granulats et de liant) entre les différents composants crée des vides supplémentaires[31].

$$\phi_{meso} = \frac{V_{vid}}{V_t} \quad (\text{eq I.4})$$

Avec :

V_{vides} : volume des vides contenus dans le matériau autres que l'air intra-liant et intraparticule.

V_t : volume total occupé par le matériau (m^3) La porosité d'après est de l'ordre de 9% d'un béton hydraulique, de 36% d'un béton d'argile expansé, de 75 à 82% d'un béton cellulaire et de 52% d'un béton de bois [34].

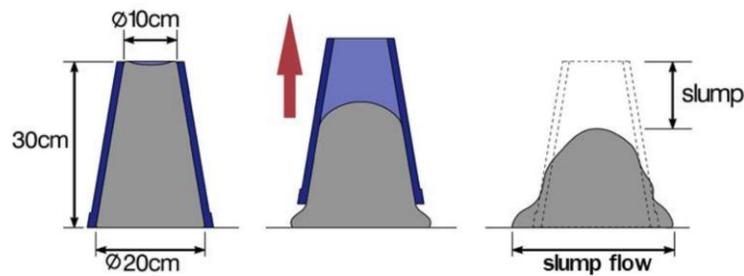


Figure I-1 - Essai du cône d'Abrams

I.5.2 Caractéristiques mécaniques

Les granulats légers modifient les performances et le niveau de performance mécanique du béton. En fait, les granulats légers sont poreux, ils sont donc moins résistants que les granulats ordinaires. Par conséquent, par rapport aux matériaux contenant des granulats rigides, le fonctionnement mécanique et les modes de rupture du béton léger changent [33]. Si le béton contient des granulats rigides plus résistants que le mortier, ceux-ci constitueront des difficultés pour le système. La contrainte exercée sur le matériau provoque une déformation importante du liant, tandis que la contrainte dans le granulat est négligeable. Par conséquent, une zone de concentration de contraintes est générée dans le mortier et cette zone peut se fissurer. Etant donné que l'adhérence entre le granulat et le mortier n'est pas suffisante pour résister au niveau de contrainte appliquée, une fissuration du mortier se produit autour des particules décollées de la pâte de ciment. Par conséquent, la résistance du béton est contrôlée par la résistance de la zone servant d'interface entre le mortier et le granulat rigide [33]. Au contraire, dans le cas d'un béton léger contenant des granulats de faible résistance, la contrainte se propage à travers la pâte, contournant la «faiblesse» du matériau. Le mortier est soumis à des contraintes élevées, de sorte que la déformation de la pâte et du granulat est très importante. Une fois les granulats écrasés, ils ne participent plus vraiment à la résistance du matériau et le mortier finit par céder. Par conséquent, la résistance à la traction du granulat contrôle la résistance à la compression du béton léger. Ce mode de rupture est possible car les granulats légers ont une surface poreuse plus grande, ce qui crée une excellente adhérence entre la pâte et le grain. Ce n'est donc pas la liaison au niveau de la surface de contact qui est détruite comme dans le cas de granulats rigides mais le granulat qui cède [33].

La diversité du béton léger apporte une large gamme de densité et de résistance. La plage de densité du béton de polystyrène à faible teneur en ciment est de 250 kg/m^3 , et la plage de densité de certains bétons d'argile expansée peut atteindre 1800 kg/m^3 . Corrélativement, on constate une évolution des résistances à la compression de 1 jusqu'à 30, voire 40 MPa [32]. La résistance à la traction est 9 à 10 fois inférieure à la résistance à la compression du béton traditionnel. Le béton léger peut atteindre un pourcentage plus élevé : RC est d'environ 35 à 40% du béton de bois et ses granulats sont comme des fibres pour armer le béton [32]. Le module d'élasticité, qui caractérise la loi de comportement de la déformation et de la charge

du matériau, est inférieur à celui du béton plus lourd, ce qui conduit à une déformation plus forte des pièces fléchies. Cette excellente déformabilité a amélioré la résistance aux chocs et aux vibrations [32].

I.5.2.1 Résistance à la compression

L'utilisation de granulats légers et la formulation de béton correcte peuvent obtenir une résistance à la compression comparable à celle du béton traditionnel. Au fil des ans, le développement des connaissances et de la technologie du béton a amélioré la performance du béton, y compris la performance du béton léger. Par exemple, l'utilisation d'additifs minéraux (fumée de silice, cendres volantes, scories) et d'adjuvants (agent entraîneur d'air, AEA, superplastifiant, SP, agent réducteur d'eau, WR et accélérateur de solidification) peut être particulièrement envisagée pour maintenir un bon fonctionnement tout en réduisant la possibilité de rapport E/L [37].

Dans le cas du béton léger, le granulat (léger) est différent du béton conventionnel et sa résistance est généralement inférieure à celle du mortier. D'autre part, en raison de sa surface poreuse et de l'adhérence qui en résulte, il y a une bonne adhérence entre le mortier et le grain. Donc la rupture passe par la destruction des granulats légers, sur le plan où une grande quantité de granulats est coupée [36].

I.5.2.2 Résistance à la traction

Comme le béton ordinaire, le béton léger à la traction est assez faible. Cela est particulièrement vrai pour le béton léger, car la propagation des fissures peut se produire à travers les granulats. Des résistances à la traction par fendage de 3,3 à 4,2 MPa pour des bétons d'une masse volumique de 1940 kg/m^3 , ou de 3,5 à 5,6 MPa pour des bétons, dont la masse volumique variait de 1620 à 1885 kg/m^3 , ont par exemple été rapportées [36].

I.6 Comportement 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 [15, 16]. 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 [13].

I.7 Influence des granulats sur le comportement des bétons légers

I.7.1 Influence des caractéristiques des granulats légers

Pour le béton traditionnel, le rapport E/C gouverne les caractéristiques mécaniques du béton. Pour le béton léger, la résistance à la compression du béton est aussi influencée par les caractéristiques des granulats légers. Examinons d'abord l'influence de la masse volumique des granulats. Selon [15], la résistance du béton est proportionnelle directement avec la masse volumique des granulats légers. Toutefois, Holm et Ries [17] aboutissent à la conclusion inverse en substituant des granulats normaux par des granulats légers dans des proportions de 25%, 50%, 75%, 100% en volume. La masse volumique des bétons ainsi formés, diminue successivement de 5%, 11%, 15%, 21%, variant de 2300 kg/m³ à 1800 kg/m³, mais, la résistance à compression à 28 jours ne varie pas, et reste autour de 40 MPa. Ce phénomène est aussi observé par le groupe de travail Euro Light Con [18]. Pour un béton de résistance faible à moyenne, ce phénomène peut être expliqué par l'amélioration de l'interface pâte/granulats qui compense la plus faible résistance des granulats légers. Pour les bétons de forte résistance, la masse volumique des granulats légers, et par conséquent leur résistance, constituent une limitation à l'augmentation de la résistance du béton avec l'amélioration de la résistance de la matrice. D'après les simulations numériques de Larrard [19], c'est seulement pour des bétons de résistance supérieure à 40 MPa que l'emploi de granulats légers diminue la résistance du béton.

La taille des grains est également un facteur influençant la résistance à la compression du béton léger. La limite imposée par la résistance des gros granulats sur la résistance du béton léger peut être contrecarrée par l'utilisation de granulats de dimension plus petite. En effet, la fragmentation des gros granulats se produit à travers les plus gros pores, qui sont ainsi éliminés. On peut constater l'influence positive sur la résistance du béton de cette diminution de la dimension maximale [16]. Ce phénomène est aussi vérifié par les travaux de Miled et al. [20] et de Ganesh Babu et Saradhi Badu [24] sur le béton de polystyrène, surtout pour les bétons à faible pourcentage de granulats, tandis qu'il est négligeable pour des fractions

volumiques importantes. Le plafond de résistance peut être augmenté sensiblement en réduisant la taille maximale des granulats. Cet effet est plus évident pour les granulats les moins résistants [21].

Certains auteurs évaluent la résistance en compression des bétons légers à partir de la résistance des grains. En effet, la résistance du béton léger diminue avec celle des granulats légers [22], [23]. On peut donc s'attendre à ce qu'il existe une relation assez directe entre la résistance du béton léger et celle des grains constitutifs. Ainsi, Arnould et Virlogeux proposent la relation empirique suivante [15] :

$$f_{c_{28}} = 18 + f_g \quad (\text{eq I.5})$$

Où $f_{c_{28}}$ désigne la résistance moyenne du béton à la compression à 28 jours exprimée en MPa, et f_g la résistance des grains, déterminée par l'essai au fil. Pour les bétons de granulats légers réalisés avec des granulats pré-mouillés dont l'humidité interne correspond à un temps d'immersion de 2 heures, la relation, pour une formulation particulière de béton, est donnée par [15]:

$$f_{c_{28}} = 18 + 4f_g + \left(1 + \frac{w^2}{20}\right) \quad (\text{eq I.6})$$

où w^2 est le pourcentage d'eau absorbée par les granulats légers au bout de 2 heures d'immersion. Cette formule prend en compte l'effet bénéfique du pouvoir absorbant des granulats sur l'adhérence pâte – granulat. Les auteurs précisent que ces relations n'ont été obtenues qu'à l'aide d'une seule formulation de béton et ne peuvent être généralisées qu'avec beaucoup de prudence. LO et al. soulignent le rôle de la porosité des granulats légers qui améliore la liaison pâte granulats [23]. Les grains les plus résistants présentent en général une coque plus dense et par conséquent un moindre pouvoir absorbant. La résistance du béton découle ainsi de deux caractéristiques antinomiques du granulat, qui jouent dans un sens ou l'autre selon le rapport E/C de la matrice. Au vu de ces résultats, il semble que les seuls critères de masse volumique et de résistance ne soient pas suffisants pour expliquer l'influence des granulats sur la résistance du béton.

I.7.2 Influence de la composition des bétons

La composition du béton, à travers le rapport eau sur ciment, le rapport volumique Granulat/Sable, la teneur en ciment et la résistance du ciment influencent par ailleurs la

résistance des bétons de granulats légers. La quantité d'eau gâchage est contrôlée par le rapport eau sur ciment. La résistance du béton en compression est d'autant plus élevée que le rapport de E/C est petit, c'est-à-dire que la quantité d'eau de gâchage est faible [25, 26]. Selon Arnould et Virlogeux [15], une réduction de 15 litres (par m^3) de la quantité d'eau de gâchage conduit à une augmentation de 5 à 10% de la résistance à la compression. Cependant, une trop faible quantité d'eau risque de ne pas pouvoir hydrater complètement le ciment, et peut entraîner une chute de résistance du béton. L'eau absorbée dans les granulats légers n'est pas immédiatement disponible pour le ciment et ne doit pas être prise en compte dans l'eau de gâchage. Son influence sur la résistance en compression n'est pas clairement établie. Si les granulats sont saturés, on peut supposer que le sens de migration de l'eau peut s'opposer à la pénétration de la pâte dans les pores des granulats légers et de réduire les liaisons entre le mortier et les granulats, donc la résistance du béton. Mais on peut aussi considérer que lorsque l'hydratation du ciment fait chuter l'humidité relative dans les pores capillaires de la pâte de ciment durcie, l'eau présente dans les granulats migre vers ces capillaires rendant possibles une hydratation supplémentaire et donc une amélioration de la résistance [22]. Ce mûrissement humide interne est d'autant plus efficace que le rapport E/C est faible ou que le béton contient de la fumée de silice. Les faibles rayons des capillaires de ces bétons « haute performance » expliquent l'intensité plus élevée des forces de succion [27]. De même, l'eau absorbée par les granulats légers permet de limiter efficacement le retrait du béton [30]. L'influence du rapport volumique Granulat/Sable (G/S) sur la résistance à la compression de bétons légers est également notée. Lorsque le rapport du volume absolu de granulats légers G au volume absolu de sable naturel S augmente, la masse volumique du béton diminue, et la résistance à la compression diminue aussi. Pour les bétons légers structuraux, le rapport volumique G/S est de l'ordre de 1,5 à 1,8. Il peut quelquefois atteindre 1,90, mais cela conduit alors à des bétons relativement fragiles [15].

La résistance à la compression du béton augmente par ailleurs avec le dosage en ciment. Morin note qu'au-delà d'une certaine augmentation de la quantité de ciment, la résistance augmente moins rapidement et semble tendre vers une limite [25]. De même Neville trouve qu'au-delà de 60/70 MPa, l'augmentation du dosage en ciment n'entraîne plus d'amélioration notable de la résistance [16]. Sahin et al. Indiquent qu'en moyenne, une augmentation de

10% du ciment donnera approximativement une augmentation de 5% de la résistance [28]. Cette propriété s'observe sur la courbe expérimentale présentée à la Figure I-26 qui montre l'évolution de la résistance à la compression de différents bétons en fonction de leur teneur en ciment. Wilson et Malhotra ont observé un résultat analogue sur un béton haute performance avec des granulats de schiste expansé [29]. L'augmentation de la résistance à la compression au-delà de 70 MPa peut être plus difficile en raison des limitations de résistance du granulats de schiste expansé du type de ciment utilisé.

I.8 Avantages et inconvénients des bétons légers

I.8.1 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.

I.8.2 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 [12].

I.9 Domaines d'utilisations des bétons légers

Les domaines d'emploi sont :

- Rénovation d'anciens planchers bois, remise à niveau de dalles, ravaillage de sols, chape légère (pour éviter de surcharger la structure et apporter une isolation complémentaire).
- Renforcement ou création de plancher.

-
- Structures légères, mais porteuse (possibilité d'augmentation des portées, diminution des descentes de charges dans les murs et les fondations).
 - Structures isolantes (mur, plancher, dalle).
 - Remplissage de vides et allègements des structures dans le domaine du génie civil (ouvrages d'art, remblais techniques).

I.10 Conclusion

Le béton léger, grâce à sa densité réduite et ses propriétés isolantes, présente plusieurs avantages par rapport au béton traditionnel. Il est couramment utilisé pour réduire la charge sur les structures, améliorer l'isolation thermique et acoustique, et pour des applications où la manipulation et le transport sont des préoccupations majeures. Cependant, il est important de noter que sa résistance est généralement inférieure à celle du béton conventionnel, ce qui limite son utilisation à certaines applications spécifiques. En résumé, le béton léger est une solution innovante et efficace pour des projets nécessitant des matériaux allégés et performants sur le plan énergétique.

Chapitre II

Béton léger à base de polystyrène

II.1 Introduction

L'utilisation du polystyrène dans le domaine de la construction demeure encore peu répandue dans notre pays, bien qu'il soit disponible sous forme de plaques offrant à la fois une isolation thermique et acoustique. Ce matériau novateur peut également être intégré dans la composition du béton pour créer des "placo-styrènes", des matériaux dix fois plus légers, trente fois plus isolants et tout aussi résistants que le béton conventionnel. En favorisant la réduction des pertes énergétiques, le polystyrène contribue à une économie d'énergie significative dans les foyers, permettant ainsi de diminuer jusqu'à 43% de la consommation énergétique totale. Cette économie découle notamment de l'élimination des ponts thermiques, en particulier au niveau des intersections entre les cloisons internes et les façades, ce qui réduit les coûts liés à la chauffage et à la ventilation pour les ménages. Dans un pays comme l'Algérie, caractérisé par des températures élevées, les matériaux d'isolation thermique revêtent une importance cruciale, et le polystyrène expansé se positionne comme un choix idéal. En effet, en absorbant l'excès de chaleur pendant la journée estivale, il crée un environnement sec et confortable, tout en prévenant la condensation de l'humidité sur les murs.

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 [39]. 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) [40].

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 peuvent être comprises 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 [41]. Grâce à sa légèreté on peut atteindre à des densités très basses. 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 et d'offshore. 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 [49].

II.2 Composition des bétons légers à base de polystyrène

Pour élaborer ces nouveaux bétons, on substitue totalement ou partiellement les granulats traditionnels par des perles de polystyrène expansé, jusqu'à obtenir un mélange présentant des propriétés granulométriques adaptées, offrant ainsi une large gamme de bétons légers de construction avec des densités et des résistances variées. Les matériaux utilisés dans la fabrication de ces bétons légers de polystyrène sont identiques à ceux des bétons conventionnels. En définitive, l'accent est davantage mis sur la densité volumétrique que sur la résistance mécanique. Étant donné que les granulats occupent une part importante du volume du béton, il est nécessaire d'explorer la substitution d'une partie de ces granulats par des matériaux légers, voire ultralégers.

II.2.1 Le liant

Le liant choisi est à base de ciment Portland. Compte tenu des dosages usuels pour les bétons à haute performance, le dosage total en liant est fixé de façon à offrir une pâte suffisamment dense et durable.

II.2.2 Sable

Tout type de sable adéquat pour la confection du béton de polystyrène, Le dosage en sable dans le mélange va combler la discontinuité granulaire qu'il y a entre le diamètre des grains de ciment et de polystyrène.

II.2.3 Polystyrène

La découverte du polystyrène remonte à 1839, mais son exploitation à grande échelle en Allemagne et aux États-Unis date des années 30 (première fabrication industrielle : 1933). Le polystyrène expansé a été inventé en 1944 par Ray Mc Intire (1919-1996) alors qu'il travaillait pour Dow Chemical sur les caoutchoucs flexibles. Cette découverte fût le fruit du hasard : l'idée de départ était de copolymériser du styrène et de l'isobutène sous pression. Le styrène fut le seul à se polymériser et l'isobutène se vaporisa, s'immisçant dans la matrice du polymère. Commercialisé sous le nom de Syrofoam, ce matériau rigide de faible densité a été d'abord été utilisé comme isolant thermique pour le bâtiment.

- Le PSE-M : est obtenu à partir d'un polystyrène "expansible" qui n'est rien d'autre qu'un polystyrène cristal auquel on a ajouté, en cours de polymérisation, un agent d'expansion (pentane, Tébullition = 35°C). Une pré-expansion est opérée à la vapeur d'eau puis une période de stabilisation permet aux perles de PS pré-expansées de perdre leur excédent d'eau. Enfin, dans un moule, on les expansé et on les moule à la vapeur.
- Le PSE-E : est quant à lui obtenu lors de l'extrusion (mise en forme à la chaleur) par injection sous pression d'un gaz dans le polymère cristal fondu. De par ses caractéristiques que lui confèrent ses 98% d'air, le PSE s'est imposé dans la formulation des béton léger comme granulats extra léger (la masse volumique). Les billes de polystyrène offrent une masse volumique apparente comprise entre 10 et 50 kg/m³[50] .

II.3 Les granulats de polystyrène

II.3.1 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 [42].

Le polystyrène est un thermoplastique dur, c'est un polymère vinylique. Structuellement c'est une longue chaîne d'hydrocarbonés avec un groupe phényle attaché sur certains atomes de carbone [38], le polystyrène est fabriqué par polymérisation radicalaire à partir d'un monomère de styrène C_8H_8 .



Figure II-1 - Polymérisation du styrène

II.3.2 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) [43].

II.3.3 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.

II.3.4 Les propriétés acoustiques

Rappelons que le son est une vibration acoustique capable une fois parvenue à l'oreille d'éveiller une sensation auditive. La propagation du son c'est à partir d'un ébranlement initial que va s'effectuer la propagation du son [53]. L'isolation acoustique a pour but de traiter la propagation des bruits entre deux locaux voisins. En effet, l'énergie acoustique se transmet entre des locaux voisins par trois voies [54] :

- La transmission directe : dépend de la nature de la paroi séparative ;
- Les transmissions latérales : dépendent de la nature des parois latérales et du type de liaison entre les parois ;
- Les transmissions parasites : dépendent des différents défauts de la paroi.

Depuis la conception des bétons légers de polystyrène, la compagnie Agrégats Artificiel a effectué divers essais pour déterminer les propriétés acoustiques des bétons légers [51]. Ces essais permettent de caractériser les propriétés intéressantes d'insonorisation du matériau béton léger de polystyrène. C'est intéressant pour nous de connaître le facteur de diminution acoustique de murs simples pour obtenir une isolation suffisante entre des locaux. Le facteur de diminution acoustique suit un certain nombre de lois. ont employé ces lois[51], et ils comparent la capacité d'isolation de divers matériaux fréquemment employés dans la construction avec le polysbété des bétons légers.

II.3.5 Les 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 constituent de bons isolations thermiques, leur coefficient de conductivité étant de l'ordre de 0.20, pour des densité de 400 kg/m³ et 0.30 à pour des densité de 800 kg/m³ [14]. La demande d'une isolation adaptée s'est considérablement accrue. En effet une bonne isolation thermique est économiquement rentable et les économies d'énergie sont devenues une préoccupation majeure des architectes, des concepteurs et des constructeurs. 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 [52].

II.4 Caractéristiques physiques et mécaniques du polystyrène

II.4.1 Densité

La densité du polystyrène à l'état brut voisine les 1000 kg/m^3 [48]. Cette densité chute considérablement lorsque le polystyrène est expansé, elle est comprise entre 8 et 80 kg/m^3 . Il faut noter que cette différence remarquable est due à la présence de l'air dans le polystyrène expansé.

II.4.2 Propriétés morphologique

Les billes de polystyrène sont parfaitement sphériques. Cela permet d'être en accord avec les modèles d'empilement classiques [40]. 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 [40] 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.

II.4.3 Résistance à la compression

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 [43]. 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 [40].

II.4.4 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 PSE est constituée de 98 % d'air et de 2 % de polystyrène en volume, le bon coefficient d'isolation thermique est dû à la présence d'air emprisonné dans les cellules [42]. En général elle varie entre 0,027 à 0,037 $W. m^{-1} . k^{-1}$ Ces valeurs leurs sont considérées parmi les valeurs les plus faibles de la conductivité thermique des matériaux [38].

II.5 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.

II.6 Comportement des bétons à base de granulats de polystyrène

Masse volumique : Le béton léger réalisé à l'aide du polystyrène expansé PSE donne l'avantage d'avoir toute une panoplie de densités allons de 500 kg/ m³ à 2200 kg/m³, grâce aux proportions utilisées de polystyrène expansé PSE ce qui conduit à une vaste intervalle de béton léger donc une solution technique intéressante pour les domaines du bâtiment, des ouvrages d'art [44].

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 [44, 14].

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 [44].

Retrait : Variable en fonction du dosage en polystyrène, il peut atteindre une valeur maximale de 1,2 mm/m [44]. Ce matériau présente une grande élasticité.

Module d'élasticité : Il est de l'ordre de 20.000 kg/cm² pour des bétons de 750 kg/m² de masse volumique apparente.

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 [45]. 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 [46].

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 [46].

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 [47].

II.7 Des Propriétés Du Polystyrène

Les performances techniques du polystyrène expansé lui permettent de jouer un rôle déterminant dans la construction moderne, La structure du PSE offre de nombreux avantages techniques[7] :

- Sa légèreté est une propriété intrinsèque,
- excellent pouvoir d'isolation thermique,
- protection sur mesure contre les chocs et les chutes,
- bon rapport résistance/légèreté : 98% d'air, 2% de produit,
- stabilité aux intempéries, neutralité pour l'environnement,
- aptitude au contact alimentaire,
- ignifugées,
- résistantes à haute température

II.8 Différence entre le polystyrène non traité et le polystyrène traité

Les polystyrènes sont des alvéoles plastiques de la famille de polymères, de styrène. Il y a des douzaines de types et de qualités différentes [7].

II.8.1 Le polystyrène normal non traité

Plusieurs recherches ont été effectuées sur des essais d'incorporation du polystyrène normal dans le béton. Nous pouvons constater que : Si nous mélangeons le polystyrène non traité normal avec le ciment et l'eau :

- Le polystyrène revient à la surface du béton et flottera.
- Le ciment tombe au fond à cause de la différence de densité entre le polystyrène expansé et le ciment. Cependant on peut réduire le phénomène "du retour à la surface par flottement du polystyrène", en employant des équipements spécifiques et si le béton est très épais (avec une petite quantité d'eau). Et aussi en employant du polystyrène perméable, car les alvéoles du polystyrène normal seront remplis d'eau pour réduire la différence de densité dans le mélange "eau /ciment/polystyrène" [7].

En conclusion l'emploi du polystyrène normal dans le béton a une pauvre image de fragilité, pour minimiser ces problèmes nos doivent traiter ces billes de polystyrène de façons d'améliorer ces caractéristiques. En Algérie la société Iberconstruction traite les billes de polystyrène qui sont fabriquées à l'usine ENL sise à la zone industrielle d'Oued Smar Alger pour obtenir le produit polys béto [50].

Les granulats Polys béto sont des agrégats artificiels. Associés à des liants hydrauliques et le plus souvent à du sable, ils sont employés pour la confection de chapes légères sur supports continus porteurs, pour la réalisation de parois et de produits manufacturés et comme remblai. C'est un agrégat léger qui s'emploie comme un agrégat traditionnel. Il est constitué par un polymère rigoureusement sélectionné expansé sous des contraintes spécifiques de température, de vitesse, et de pression, permettant ainsi aux alvéoles périphériques de s'opposer à la pénétration de l'eau. Il est calibré, traité en surface pour éviter toute ségrégation lors de la confection du béton. Incorporé au béton, le Polys Béto assure un allègement durable du béton, diminue les délais de prise, ouvre un large éventail de choix de densités. Il participe à l'isolation thermique du béton selon la densité. En Algérie, des demandes ont été formulées pour un avis technique préalable sur ce procédé nouveau, pour pouvoir introduire le matériau dans le marché de la construction. Pour cela plusieurs essais sont en cours pour vérifier les caractéristiques physico mécanique du procédé Polys béto [51].

II.8.2 Le polys béto

Le Polys béto est un agrégat artificiel conçu et réalisé pour alléger, isoler et améliorer certaines caractéristiques de résistance des bétons. Ces agrégats sont du polymère rigoureusement sélectionné et expansé sous des contraintes spécifiques de température, de vitesse, et de pression, permettant ainsi aux alvéoles périphériques de s'opposer à la pénétration de l'eau. Le polys béto est réalisé à base d'un styrène spécifique, expansé à seulement 80 fois pour obtenir une taille de diamètre de perle ou de bille égale au maximum à 3 mm . Donc, dès le début la matière première est complètement imperméable. Ces perles expansées sont alors traitées avec des additifs spécifiques pour d'abord les déchargez de leurs charges électriques, puis avec d'autres additifs, pour les chargez avec des charges électriques négatives, afin que toutes les perles aient les mêmes charges électriques, et auront tendance à se repousser. Ceci dans le but d'avoir toutes les perles avec des charges opposées, à celle du ciment Les charges électriques des perles seront neutralisées au contact de l'eau et du ciment. Ce qui leurs donnera une répartition entièrement homogène dans le béton. La structure de la surface des perles sera renforcée par leur propriété d'imperméabilisation, ce qui éliminera les risques de microbes et de germes. On aura moins besoin de perles pour alléger, d'où la consommation se verra réduite[51].

II.9 Conclusion

A partir des informations développées dans ce chapitre, on peut conclure que le béton à base de microbilles de polystyrène est une solution intelligente pour combler les points faibles du béton ordinaire surtout en matière de réduction de son poids pour limiter son impact sur la structure, plus spécialement lorsqu'il s'agit de la rénovation d'une ancienne construction.

Le béton léger à base de microbilles de polystyrène représente une solution abordable et économique parmi le reste des autres types de bétons légers. Ce qui ouvre la porte très grand à une étude approfondie sur les caractéristiques de chaque matériau qui compose le béton léger à base de microbilles de polystyrène ainsi que les caractéristiques du béton lui-même à l'état frais. Chose qu'on va développer dans le chapitre suivant

Chapitre III

Programme expérimental

III.1 Propriétés physiques des matériaux de constructions

III.1.1 Introduction

Les propriétés des matériaux de constructions déterminent le domaine de leur application. Ce n'est qu'en évaluant exactement les qualités des matériaux c'est à dire. Leurs propriétés les plus importantes, que l'on peut construire des ouvrages solides, durables et de haute efficacité économique et technique. Toutes les propriétés des matériaux de constructions d'après l'ensemble de leur indices sont divisées en propriétés physiques, chimiques et mécaniques, pour les deux premiers propriétés présentent certaine interaction dans le définition pour cela nous préférons les joindrez dans la même partie.

Définitions de quelques propriétés physiques des matériaux de constructions:

Un matériau est composé de grains solides, d'eau et d'air :

Avec : M_T la masse total du matériau

V_T le volume total ou humide du matériau

M_S la masse des grains solides du matériau

V_S le volume des grains solides du matériau

M_e la masse de l'eau

V_e le volume de l'eau

V_a le volume de l'air

V_v le volume de l'air

$$\text{Relation entre les composants du matériau :} \quad M_T = M_S + M_e \quad (\text{eq III.1})$$

$$V_T = V_S + V_v \quad (\text{eq III.2})$$

$$V_v = V_e + V_a \quad (\text{eq III.3})$$

- **Masse volumique:** c'est la masse total ou humide du matériau de l'unité de volume

$$\text{du matériau. } \rho_T = \frac{M_T}{V_T} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (\text{eq III.4})$$

- **Masse spécifique:** c'est la masse des grains solide du matériau de l'unité de volume

$$\text{des grains. } \rho_S = \frac{M_S}{V_S} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (\text{eq III.5})$$

- **Poids volumique:** c'est le poids total ou humide du matériau de l'unité de volume du

$$\text{matériau. } \gamma_T = \rho_T \cdot g \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^3} \right] \quad (\text{eq III.6})$$

- **Poids spécifique:** c'est le poids des grains solide du matériau de l'unité de volume

$$\text{des grains. } \gamma_S = \rho_S \cdot g \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^3} \right] \quad (\text{eq III.7})$$

- **Porosité :** c'est le degré de remplissage du volume de matériau par des pores, c'est à dire le pourcentage du volume des vides dans le volume de matériau.

$$P\% = \frac{V_{vide}}{V_{total}} \quad (\text{eq III.8})$$

- **Pores :** sont de petite alvéoles dans le matériau remplies d'air ou d'eau. Les pores peuvent être ouverts et fermés et de petites ou grandes dimensions.

- **Compacité:** c'est le pourcentage du volume des grains solide dans le volume de

$$\text{matériau. } C\% = \frac{V_{solide}}{V_{total}} = 1 - P \quad (\text{eq III.9})$$

III.2 Description des essais expérimentaux

III.2.1 Essai de la masse volumique

Principe: il consiste à déterminer la masse volumique du matériau, sa densité à l'état naturel (en présence des pores), avec laquelle on peut calculer la porosité, et la compacité du matériau.

Définition: la masse volumique est la masse de l'unité de volume du matériau à l'état naturel (pores et vides compris), en général, plus au moins poreux [55].

Matériel utilisé:

- Balance technique à 0.01g ;
- Etuve à $t= 105-110^{\circ}\text{C}$;
- Réchaud ou résistance électrique ;
- Pot métallique de 1 litre ;
- Règle plate métallique ;
- Entonnoir ;
- Tamis de 0.2 mm ;

Matériau d'analyse: « sable, gravier, ciment » ;

Mode opératoire :

- peser un récipient de capacité 1 ou 2 litre (V_0) et noter sa masse m_1 (g).
- verser la poudre de ciment ou du gravier ou du sable (secs) à l'aide de l'entonnoir dans le récipient et le disposer sans tassement par couches horizontales successives jusqu'au remplissage (pour la poudre de ciment la distance entre l'extrémité de l'entonnoir et le bord du récipient est de 5cm, et pour le gravier et le sable est de 10 cm).
- ensuite araser la couche supérieur du pot à l'aide d'une réglette que l'on anime d'un mouvement de « va et vient », peser le récipient plein : soit m_2 (g) sa masse [55].

Expression des résultats : La masse volumique : $\gamma_H = \frac{m_2 - m_1}{V_0}$ (eq III.10)

$$\gamma_{8/15} = \frac{1818 - 455}{1} = 1363 \text{ g/l}$$

$$\gamma_{3/8} = \frac{1792 - 455}{1} = 1337 \text{ g/l}$$

$$\gamma_{sable} = \frac{1851 - 455}{1} = 1396 \text{ g/l}$$



Figure III-1 - Mesure des masses volumiques pour les trois matériaux composant le béton

III.2.2 Essai de la masse spécifique

Principe: il consiste à déterminer la masse spécifique (la densité) du ciment; du gravier et du sable sur la base de laquelle et de la masse volumique on peut calculer la porosité et la compacité de ces matériaux.

Définition: la masse spécifique (densité) est la masse de l'unité de volume de la substance entièrement compacte (sans pores) [55].

Matériel nécessaire:

- Balance technique à 0.01g ;
- Etuve à $t=105$ à 110°C ;
- Coupelle ;
- Volumétre de « Chatelier » ;
- Tamis 0.315mm et 0.08mm ;
- Epruvette graduée, la petite et la grande ;
- Creuset et pilon de fonte ;
- Pot métallique de 1 litre ;

-
- Pétrole, benzène ou tétrachlorure carbone (CCL_4) ;
 - Règle plate métallique ;
 - Entonnoir ;

Matériaux d'analyse: « ciment, sable et gravier »

Mode opératoire:

1) cas des granulats « sable, gravier » : On utilise « *la méthode du flacon* » :

- on pèse un flacon de 1 litre pleine d'eau et on note M_0 (g) obtenue ;
- on pèse 500g de granulats (sable, gravier) secs M_1 (g), puis on les place au fond du flacon vide, et ensuite on complète le remplissage du flacon avec de l'eau ;
- on pèse et on obtient la masse M_2 (g) ;

Important :

- Essuyer soigneusement la flacon vide et après le remplissage.
- Faire couler lentement un filet d'eau, en remuant les granulats de manière à faire évacuer les bulles d'air.

2) cas du ciment : On utilise la *méthode du volumétrie de «Le Chatelier»*.

Le principe consiste à mesurer le déplacement le niveau du liquide contenu dans un récipient à col étroit lorsqu'on introduit la poudre, dont on cherche le volume absolu, la méthode nécessite une balance précise et un liquide inerte vis à vis de la poudre, pour le ciment, on utilise le pétrole ou le CCL_4 [55].

- tamiser la poudre ;
- sécher la coupelle dans l'étuve à température jusqu'au poids constant ;
- peser l'échantillon et la coupelle, noter la valeur : m_1 (g) ;
- verser le pétrole dans le volumétre (densimètre) jusqu'au niveau A (correspondant au volume V_1 (cm^3) du pétrole à température $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$;
- verser l'échantillon dans le densimètre peu à peu jusqu'au moment où le niveau du pétrole atteint le trait B quelconque (correspondant au volume V_2 (cm^3) du pétrole dans le densimètre.

Expression des résultats: - cas des granulats : $\gamma_0 = \frac{m_1 x \gamma_w}{(m_0 + m_1) - m_2}$ (g/cm³) (eq III.11)

- cas du ciment : $\gamma_0 = \frac{m_1 - m_2}{V_2 - V_1}$ (g/cm³) (eq III.12)

$$\gamma_s = \frac{50}{120 - 100} = 2.5 \text{ g/cm}^3$$

$$\gamma_g = \frac{330}{625 - 500} = 2.64 \text{ g/cm}^3$$

$$\gamma_G = \frac{330}{625 - 500} = 2.64 \text{ g/cm}^3$$

III.3 Les matériaux naturels

III.3.1 Les granulats

1. **Origine:** La désagrégation des roches primitives par l'eau, le vent, le gel, entraîne la formation de dépôts sédimentaires en couches meubles plus ou moins épaisses d'éléments de grosseurs très variables, allant du sable aux gros blocs, et de natures minéralogiques différentes.
2. **Définitions:** On appelle granulat, tout matériau inerte provenant de l'érosion de roches ou de leur broyage, utilisé dans la construction, et entrant dans la composition des mortiers et bétons.
3. **Classification :**
 - a. **d'après leur provenance ou leur fabrication:** on distingue
 - Granulats naturels utilisés directement sans aucun traitement mécanique provenant de rivière, de mer et de dunes; caractérisés par un point commun: **grains arrondis**. On obtient soit par dragage du lit des cours d'eau aux endroits donnant des matériaux siliceux propres et durs, soit par pompage (suceuse) d'anciens lits noyés dans la nappe phréatique après enlèvement de la couche de terrain superficielle impropre à la construction, soit à la pelle mécanique pour des lits à sec [55].
 - Granulats artificiels d'origine industrielle provenant de concassage de roches dures, caractérisés par un point commun : **grains anguleux**. On obtient, après

abattage de la roche à l'explosif, les cailloux passent dans divers broyeurs réduisant les blocs en éléments de plus en plus fins.

- b. d'après leur dimension:** la norme définit un type de granulat en fonction des grosseurs minimales et maximales de ses éléments, et cela à des tamis à mailles dont les ouvertures sont exprimées en millimètres.

D'après la classification d'Atterberg :

- roche diamètre plus de 200mm
- cailloux diamètre varie de 200mm à 20mm
- gravier diamètre varie de 20mm à 2mm
- sable gros diamètre varie de 2mm à 0.20mm
- sable fin diamètre varie de 0.2mm à 0.02mm=20 μ
- argile diamètre varie de 20 μ à 0.2 μ

4. Rôles des granulats dans la construction:

a. sables :

- ils entrent dans la composition des mortiers, des bétons, des matériaux préfabriqués où ils participent à la résistance à l'écrasement.
- ils donnent de la cohésion au mélange, mortier ou béton.
- il permet l'économie de liant sans réduire la résistance du mélange.
- il facilite la prise du liant en assurant la porosité du mortier.
- c'est une charge facilitant la manutention du mortier.
- c'est un excellent terrain de fondation

b. graviers :

- ils s'associent au mortier de sable, pour constituer un matériau nouveau qui est le béton
- ils participent également à la résistance à l'écrasement, aussi bien dans les bétons hydrauliques que dans les bétons hydrocarbonés.
- ils constituent de bonnes fondations pris en masse dans le sable.
- Ils servent d'hérissonnages dans les dallages.

5. Condition de dureté: pour répondre à la condition de dureté, il faut que le granulat résiste:

- A la compression c'est à dire l'écrasement
-

-
- A l'usure par frottement (soit par un corps étranger, soit par les éléments entre eux)
 - A la traction

Ils en résulte que:

- a. le technicien devra choisir les granulats provenant de roches dures et saines qui ne présentant ni plaquettes ni aiguilles
- b. le technicien devra éviter d'employer les granulats provenant des roches feldspathiques altérables à l'air et à l'eau qui sont fragiles et tendres, les granulats gypseux qui font gonfler le mortier et redevient mou, les sables de dunes très fins et les sables de dépôts géologiques (roches éruptives) qui sont trop fins, peu résistants et trop poreux [55].

6. Condition de pureté: il faut exiger la propreté du granulat, pour cela il est nécessaire de procéder à un contrôle rapide (en prendre une poignée et la froter entre les doigts: un sable parfaitement propre ne laisse aucune trace; s'il contient des impuretés, il laisse une trace grise, colorée due à la présence d'impuretés) puis remédier :

- par un lavage au jet, car un lavage naturel à la pluie n'enlève pas le film d'argile sur les grains et ce film retarde la prise, réduit la cohésion du mortier ou béton, nuit à l'adhérence du ciment
- par des expériences déterminant le pourcentage d'impuretés.

III.4 Expérience de contrôle

III.4.1 Essai de l'équivalent de sable

But : cet essai, est utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables utilisés pour la composition du béton. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers, une procédure normalisée permet de définir un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté du sable [55].

Principe : l'essai est effectué sur la proportion 0/5mm du matériau, on lave l'échantillon et on laisse reposer le tout pendant 20min, et on mesure les éléments suivant :

- hauteur h_1 : sable propre +éléments fines
- hauteur h_2 : sable propre seulement

On déduit l'équivalent de sable : $ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100$ (eq III.13)

selon que la hauteur h_2 est mesurée visuellement ou à l'aide du piston on détermine un : ESV (visuel) ou, ES (par piston).

Donc le but de l'essai d'équivalent de sable est de contrôler la propreté d'un sable.

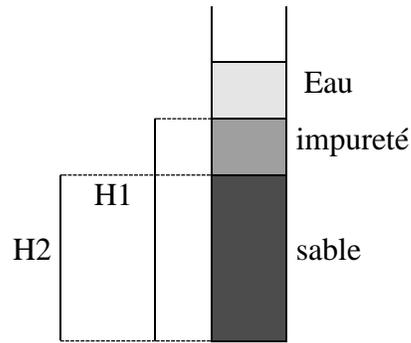


Figure III-2 - l'essai d'équivalent de sable

Produit : La solution lavante permet de séparer les éléments fins argileux et en provoque la floculation, sa composition est la suivante :

- 111g de chlorure de calcium anhydride ;
- 480g de glycérine à 99% glycérol ;
- 12 à 13g de solution aqueuse ;

La solution lavante utilisée dans l'essai, s'obtient en diluant une dose de 125 cm³ de solution concentrée dans 5l d'eau déminéralisée celle-ci se conserve pendant 2 à 4 semaines.

Equipement : Ce matériel est décrit par les normes ;

- éprouvette en plexiglas avec deux traits supérieur et inférieur ;
- entonnoir pour l'introduction du sable ;
- bonbonne de 5l pour la solution lavante avec son bouchon et le siphon et le tube souple de 1.5m
- tube laveur métallique plongeant ;
- machine agitatrice ;
- règle métallique pour la mesure ;
- piston taré à masse coulissante de 1kg pour la mesure de ES.

Mode opératoire :

- remplissage de la solution lavante jusqu'au premier trait ;
- pesée de 120g de sable sec ;
- imbibition du sable pendant 20 minutes dans la solution lavante ;
- éprouvette secouée (60cycles en 30 secondes) ;
- lavage du sable avec la solution lavant jusqu'au trait supérieur ;
- début de la décantation ;
- mesure de la hauteur de sable h_2 et de la hauteur h_1 de l'ensemble sable plus floculat après 20minutes de décantation ;
- mesure de la hauteur de sable h_2' au piston ;

Expression des résultats :
$$ESV = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad (\text{eq III.14})$$

$$ES = \frac{h_2'}{h_1} \times 100 \quad (\text{eq III.15})$$

Nota : voici en ce qui suit quelques valeurs souhaitables de l'équivalent sable.

- $ESV < 65$ et $ES < 60$: sable argileux, risque de retrait ou de gonflement.
- $65 < ESV < 75$ et $60 < ES < 70$: sable légèrement argileux, de propreté admissible.
- $75 < ESV < 85$ et $70 < ES < 80$: sable propre, convenant au béton à haute qualité.
- $ESV > 85$ et $ES > 80$: sable très propre, absence de plasticité.

Tableau III-1- Valeurs préconiser pour l'équivalent de sable

Valeurs préconiser pour l'équivalent de sable	
E.S.	Nature et qualité du sable
$E.S. < 65$	Sable argileux: risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité
$65 \leq E.S. < 75$	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour bétons de qualité
$75 \leq E.S. < 85$	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité
$E.S. \geq 85$	Sable très propre: l'absence presque de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau

III.4.2 Essai de foisonnement du sable

But : les granulats livrés sur chantier sont rarement secs, ils contiennent souvent un pourcentage d'humidité, il est nécessaire de connaître celui-ci pour déterminer la quantité d'eau de gâchage, d'autre part le volume du sable varie en fonction de son %d'humidité, il est donc indispensable et nécessaire de connaître cette variation lorsque les dosages se font en volume.

Définition : on appelle coefficient de foisonnement le rapport de la hauteur du sable humide (H_H) et sa hauteur sèche (H_S), ce coefficient varie en fonction du % d'humidité, le volume apparent d'un sable dépend de sa compacité, de sa porosité, et de son humidité.

Nota : le coefficient de foisonnement présente son maximum entre 3% et 7% d'humidité.

Matériel utilisé :

- Balance technique à 0.01g
- Etuve à $t= 105^{\circ}\text{C}-110^{\circ}\text{C}$
- Eprouvette graduée
- Récipients
- Truelle de maçon
- Tamis n° 5mm

Matériau d'analyse : « sable concassé, sable de oued ou sable de carrière ».

Mode opératoire :

- tamiser le sable sec à travers le tamis N°5 mm .
- peser une quantité de sable parfaitement sec correspondant à 500g (Ms).
- verser le sable dans une éprouvette graduée de 1000cm^3 , mesurer la hauteur (H_s) qu'il occupe.

- puis, verser le sable dans un récipient et ajouter la masse de l'eau correspondant à 1% de la masse du sable sec, le mélange une fois homogénéiser et verser dans l'éprouvette graduée, on mesure la hauteur (H_i) ;
- faire cette manipulation pour l'humidité du sable de 3%, 5%, 7%, 9%, 11%, 13% et 15% noter les résultats obtenus pour les différents dosages.
- tracer la courbe de variation du coefficient de foisonnement en fonction du % d'humidité du sable [55].

Expression des résultats :

- Coefficient de foisonnement : $C_F = \frac{H_i}{H_s} > 1$ (eq III.16)

- Augmentation du volume : $V\% = \frac{H_i - H_s}{H_s} . 100\%$ (eq III.17)

III.4.3 Essai au bleu de méthylène

But : cet essai permet de mesurer la capacité des éléments fins à absorber du bleu de méthylène, le bleu de méthylène étant absorbé préférentiellement par les argiles, les matières organiques et les hydroxydes de fer, cette capacité rend compte globalement de l'activité de surface de ces éléments.

On appelle « valeur de bleu » des fines, la quantité exprimée en gramme de bleu de méthylène absorbée par 100g de fines [55].

Principe: on injecte successivement des doses élémentaires d'une solution de bleu de méthylène dans le bain aqueux contenant la prise d'essai ,on contrôle l'absorption du bleu après chaque ajout ,en effectuant une tache sur un papier filtre « teste de la tâche» .

Appareillage :

- Balance : avec une précision de 0.1%.
- Chronomètre : au 1/10s.
- Tamis : de 0.08mm et 0.5mm ayant un diamètre de 150mm.
- Pissette : de 500ml.
- Bécher : plastique de 3l ayant un diamètre de 155mm.
- Spatule

Il existe un matériel spécifique :

- un burette de capacité 100 ou 50ml et de graduation 1/10 ou 1/5ml ou un micro pipette de 5ml et une de 2ml.
- papier filtre : quantitatif et sans cendres
- une baguette de verre : longueur 300mm, diamètre 8mm.
- un agitateur à ailettes, tournant entre 400 et 700 tr/min.
- un bac carré en matière plastique de 150mm de côté et 60mm de hauteur.

Produit utilisé: Solution de bleu de méthylène de qualité médicinale à $10\text{g/l} \pm 0.1\text{g/l}$, la durée maximale d'utilisation de la solution est de un mois, elle doit être conservée à l'abri de la lumière, eau déminéralisée ou distillée [55] .

Exécution de l'essai :

- Mettre 500ml d'eau déminéraliser dans la pissette ;
- Placer le sable dans le bac plastique, ajouter à l'aide de la pissette 100ml d'eau déminéralisée pour recouvrir le matériau, bien agiter l'ensemble avec la spatule.
- Verser en plusieurs fois le contenu du bac sur le tamis 0.08mm surmonté du tamis de décharge de 0.5mm, l'ensemble étant placé au-dessus du bécher de 3l, rincer pour faire passer la totalité du matériau restant dans le bac avec de l'eau qui reste dans la pissette.
- Sécher et peser les refus des deux tamis, soit M cette masse.
- La masse réelle « q » de fines soumises à l'essai est donnée par \rightarrow

$$q = \frac{100M_h}{100 + w} - M \quad (\text{eq III.18})$$

Détermination par dosage de la quantité de bleu absorbée :

- **Définition du test à la tâche :** Ce test consiste à prélever à l'aide d'une baguette de verre, une goutte de suspension que l'on dépose sur le papier filtre, la tache ainsi formée se compose d'un dépôt central de matériau, coloré d'un bleu généralement soutenu entouré d'une zone humide incolore. La goutte prélevée doit être d'un diamètre compris entre 8 et

12mm. Le test est dit positif si, dans la zone humide apparaît autour du dépôt central une auréole bleu clair persistante, il est négatif si l'auréole est incolore.

- **Dosage :** A l'aide de la burette, injecter « v' » millilitre de solution de bleu dans le récipient après 2min ajouter une dose de 5ml de solution de bleu, cette addition étant suivie du test de la tache sur le papier filtre. On procède ainsi jusqu'à ce que le test devient positif, a ce moment sans rien ajouter on laisse s'opérer l'absorption du bleu qui n'est pas instantanée tout en effectuant des test de minute en minute [55].

Si l'auréole bleu claire disparaît à la cinquième tache on procède à des nouvelles additions supplémentaires de bleu de 2ml, chaque addition est suivie de test de minute en minute.

Renouveler ces opérations jusqu'à ce que le test demeure positif pendant cinq minutes consécutives et le dosage est considéré comme terminer.

Expression des résultats :

$$\text{La valeur du bleu des fines : } V_{Bta} = \frac{V_1 - V'}{q} \quad (\text{eq III.10})$$

Exprimée en gramme de bleu pour 100g de fines, avec :

V_1 : étant le volume final de solution injecter en ml.

V' : volume de solution de bleu kaolinite.

q : masse réelle de fines soumises à l'essai.

III.4.4 Analyse granulométrique par tamisage

But : on sait que la résistance mécanique des bétons et mortiers dépend de leurs compacités, il est nécessaire de connaître les proportions relatives des différents calibres de granulats. L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la distribution en poids des différents particules d'un granulat suivant leur diamètre.

Principe: l'analyse granulométrique consiste à classer par un granulat donné à l'aide d'un jeu de tamis, les dimensions de mailles et le nombre de tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue .

Tableau III-2- Dimension minimal des tamis

Module	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Tamis	0.08	0.10	0.125	0.16	0.200	0.25	0.315	0.40	0.50
Module	31	32	33	34	35	36	37	38	39
Tamis	1.00	1.25	1.60	2.00	2.50	3.15	4.00	5.00	6.30
Module	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Tamis	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80

Matériel nécessaire :

- Un jeu de tamis (une série de tamis) ;
- Un cadre vibrant (tamiseur) ;
- Balance précise et une boîte de poids ;
- Un récipient contenant gravier ou pierre concassée ;
- Un récipient qui sera utilisé pour les pesées ;
- Echantillon de gravier et de sable concassé ;
- Chronomètre, et pied à coulisse .

Mode opératoire :

- La première opération consiste à tarer (à peser) le récipient de peser ;
- Choix des tamis utilisés ;
- Peser de 700g de gravier ou de sable ;
- Emboîter soigneusement les tamis les uns sur les autres (en ordre des dimensions des mailles décroissantes de haut en bas) ;
- Placer le fond du tamis sur la rondelle de centrage du cadre vibrant ;
- Emboîter ensuite la colonne de tamis constituée précédemment sur ce fond de tamis ;
- Verser cette pierre concassée sur le tamis supérieur, peu à peu et prendre précaution à ne pas faire tomber ;
- Mettre le cadre vibrant en marche à l'aide du contacteur, la durée est au moins 7minutes puis arrêter l'agitation ;

-
- Débloquer la colonne des tamis, puis séparer avec un grand soin les différents tamis ;
 - Il faut ensuite peser la masse des résidus sur chaque tamis à 1g près.

Expression des résultats : elle doit contenir les renseignements suivants :

- le numéro de l'échantillon.
- la masse totale de l'échantillon.
- masse des résidus sur chaque tamis de contrôle en (g).
- les résidus quotients en (%).
- les résidus totaux en (%).

Tracer de la courbe granulométrique :

La courbe granulométrique est établie en ordonnées rectangulaires :

- **Axe des abscisses :** Il est gradué linéairement en modules, deux autres graduations indiquent les valeurs correspondantes des diamètres des trous de passoires et des ouvertures des mailles carrées des tamis. Les modules varient de 20 à 50 et le diamètre des trous de passoires de 0.1 à 100mm, les ouvertures de mailles de tamis sont cotées de 0.08 (module 20) à 5mm (module 38). La division en : sable, gravillon, et cailloux, figure avantageusement au droit de la courbes, en correspondance avec les trois graduations précédentes.
- **Axe des ordonnées :** Cet axe sur lequel sont portés les tamisât, est gradué linéairement de 0 à 100.
- **Module de finesse :** Il est égal pour les sables au 1/100 de la somme des refus aux tamis de mailles suivants : 0.16; 0.315 ; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 ; 5mm.

Le module de finesse des courbes limites du fuseau est de 2.2 pour la courbe supérieur et de 2.8 pour la courbe inférieur.

Des études expérimentales ont montrées qu'un bon sable donnant les meilleurs résultats dans le béton, est celui dont le module de finesse se sit
u aux environs de la valeurs MF=2.5.

- **le fuseau granulaire :** L'allure d'une courbe est définie par un fuseau granulaire qui sert à situer notre sable, mais aussi à le corriger par un apport d'éléments fins.

Tableau III-3- Fuseau granulaire pour les sables

Tamis	0.14	0.315	0.63	1.25	2.5	5
Sable 1	90	65	35	15	00	00
Sable 2	100	90	70	45	20	00

Tableau III-4- Fuseau granulaire pour les graviers

Tamis	D _{min}	0.5 (D _{min} +D _{max})	D _{max}	1.25 D _{max}
Gravier 1	95	40	00	00
Gravier 2	100	70	05	00

Il existe d'autres essais pour les granulats, qui déterminent d'autres caractéristiques à savoir :

a) nature minéralogique et dureté : La nature minéralogique, consiste à la détermination du pourcentage de « calcaire », puisque avec certain calcaire dur la résistance du béton est améliorée. La dureté, est mesurée le plus souvent par l'essai « *Los Angeles ou Deval* ». L'essai consiste à faire subir à un échantillon de 5Kg, une abrasion par rotation d'un cylindre garni de boulets, après 500 tours, l'échantillon est tamisée au tamis 1.6mm.

Le coefficient Los Angeles est égale au rapport des éléments <1.6mm au poids total de l'échantillon. Il est recommandé d'avoir un coefficient inférieur à 35, 40, 45 pour les niveaux A, B, C.

b) propreté des granulats : L'échantillon est déshydraté complètement est pesé, lavé à grande eau jusqu'à propreté, il est séché puis pesé à nouveau.

Le pourcentage d'impuretés est $100 \times \frac{P_1 - P_2}{P_2}$

Avec : p_1 : Masse de granulats sec avant lavage.

p_2 : Masse de granulats sec après lavage.

III.5 Les Ciments

1. Définition: Le ciment est une poudre minérale qui forme avec l'eau une pâte faisant prise et durcissant progressivement même à l'abri de l'air et notamment sous l'eau. Cette poudre est constituée de sels minéraux anhydres instables en particulier des silicates et aluminates de chaux.

2. Composition :

La composition chimique : celle des ciments la plus communément admise se situe dans le domaine suivant :

Tableau III-5- La composition chimique de ciment

Elément	Pourcentage (%)
Oxyde de calcium (CaO)	62 - 67
Silice (SiO ₂)	19 - 25
Alumine (Al ₂ O ₃)	02 - 09
Oxyde de fer (Fe ₂ O ₃)	01 - 05
Oxyde de sodium + Oxyde de potassium : (Na ₂ O + K ₂ O)	00 - 1.5

La composition minéralogique : La composition chimique seule ne suffit pas à caractériser un ciment, il est en effet nécessaire de connaître les composés minéralogiques constitués lors de la cuisson à partir des éléments précédents. D'après Bogue, on admet que les principaux composés minéralogiques formés lors du refroidissement du clinker sont les suivants :

- Silicate tricalcique (3CaO SiO₂) ou C₃S.
- Silicate bi calcique (2CaO SiO₂) ou C₂S.
- Aluminate tricalcique (3CaO Al₂O) ou C₃A.
- Alumino-ferrite tétra calcique (4CaO Fe₂O₃ Al₂O₃) ou C₄AF.

Pour un ciment portland, les composés minéralogiques sont compris dans les limites suivantes :

Tableau III-6- Les composés minéralogiques d'un ciment portland

Constituants	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Pourcentages	50-75	7-30	0-16	0-20

Suivant les proportions de ces quatre composés minéralogique, les ciments auront des propriétés différentes c'est ainsi que :

- Le C_3S appelé également alite est le composé qui développera les résistances initiales du ciment.
- Le C_2S appelé le bélite est l'élément qui contribuera à développer les résistances à long terme.
- Le C_3A est le composé qui possède la prise la plus rapide, et la chaleur d'hydratation la plus élevée.
- Le C_4AF est l'élément minéralogique ne contribue pratiquement pas au développement des résistance.

3. Propriétés :

Finesse de mouture : Elle est caractérisée par sa surface spécifique qui correspond à la surface développée par la totalité des grains contenus dans une masse donnée. Cette surface spécifique mesurée généralement au moyen du perméabilimètre de « Blaine » est exprimée en cm^2/g , ainsi plus le ciment est fin, et plus il développera de meilleures résistances, et plus le risque du retrait est accru[55].

Hydratation, prise et durcissement: Au contact de l'eau, les sels minéraux amorphes anhydres et instables s'hydratent, il se produit ainsi la cristallisation qui conduit à la formation des cristaux en aiguilles qui conduisent à la prise. Le début de prise est le moment où est constater une augmentation brusque de viscosité de la pâte, ce début de prise est dans la plupart des cas entre 2 et 5 heures. La fin de prise correspond au moment où la pâte devient un bloc rigide (Tab III-7).

Tableau III-7- Hydratation du ciment : prise et durcissement.

Classe de ciment	35	45	45R	55	55R	HP
Début de prise	1h30	1h30	1h	1h	1h	1h
Expansion max	10mm pour toutes les classe					
compression (MPa)	mortier « prisme 4×4×16 »					
02j			15		22.5	30
	25 -45	35-55		45-65		
28j			35-55		45-65	55

Expansion: Mesuré au moyen de ce qu'on appelle les aiguilles de « Le Chatelier », elle permet de définir la tendance du ciment à l'expansion. L'expansion est un essai normaliser, elle se mesure à chaud et à froid et elle est exprimée en *mm* .

Résistances mécaniques: Il s'agit essentiellement de mesurer la résistance à la flexion et à la compression, les essais sont normalisés sur mortier 1/3, et les éprouvettes sont prismatiques de dimensions 4×4×16cm. Par ailleurs, c'est la résistance à la compression à 28j exprimée en MPa qui détermine la classe de résistance du ciment [55].

III.5.1 Expérimentation

III.5.1.1 Essai de prise du ciment

a) But et principe : L'essai a pour but de déterminer le temps de prise, c'est-à-dire la durée qui s'écoule entre l'instant où le liant a été mise en contact avec l'eau de gâchage et le « début de prise ». On détermine le « début de prise » à l'aide de l'aiguille de Vicat s'enfonçant dans un moule tronconique rempli de mortier ou de pâte pure.

b) Début de prise : Le début de prise est l'instant où l'aiguille cesse de s'enfoncer et s'arrête à une distance du fond du moule à 2.5mm, dimension du plus gros grains de sable. L'essai de prise est effectué normalement sur mortier ; il peut être effectué sur pâte normale.

Il est exécuté normalement avec éprouvette dans une armoire humide où l'air est maintenu à

20°C ± 1°C et dont le degré hydrométrique, aussi voisin que possible de la saturation, est d'au moins 90%.

c) Technique de l'essai :

- **Préparation et conservation des éprouvettes :** Avec le mortier ou la pâte préparés comme indiqué auparavant, remplir immédiatement de moule tronconique et araser la surface au moyen d'une truelle prenant appui sur le bord du moule perpendiculaire à la surface et déplacer d'un mouvement de scie de faible amplitude.
- **Détermination du début de prise :** L'aiguille de Vicat, descendue perpendiculairement à la surface du mortier ou de la pâte et immobilisée pendant un court arrêt quant elle entre en contact avec cette surface, est abandonnée à elle-même sans vitesse initiale. Observer l'enfoncement de l'aiguille, les observations sont renouvelées jusqu'à constatation du début de prise. A noter que la masse totale de la partie mobile de l'appareil doit être de :
 - 300g ± 1g si l'on opère sur pâte pure.
 - 1000g ± 2g si l'on opère sur mortier.

III.5.1.2 Essai de retrait et de gonflement

a) Principe de l'essai : Ces deux essais consistent à mesurer, en fonction du temps, la variation de la longueur des éprouvettes prismatiques de mortier ou de pâte pure conservées après démoulage :

-a l'air, pour l'essai de retrait.

-dans l'eau, pour l'essai de gonflement.

b) Epoque de mesure : Les mesures, effectuées sur 3 éprouvettes, ont lieu aux temps suivants :

-au démoulage, mesure d'origine des variations.

-les 3, 7, 28, jours après confection des éprouvettes.

c) Expression des résultats : Pour chaque éprouvette, sont calculés les rapports :

Pour le retrait : $\frac{\Delta L}{L} \times 10^6$, et éventuellement $\frac{\Delta M}{M} \times 100$ pour le gonflement

Avec : L : longueur de base, prise égale à 160mm.

M : masse de l'éprouvette au moment de démoulage.

ΔL : variation de longueur.

ΔM : variation de masse.

A noter que d'autres essais sont effectués sur les ciments tel que :

L'essai chimique ; qui a pour but la détermination du pourcentage des insolubles et la teneur en anhydride sulfurique par les relations suivantes en utilisant des filtres [55] fabriquer chimiquement :

-Teneur des insolubles : $(P \times 100)/2$ (%)

-Teneur en SO_3 : $(P \times 0.343 \times 100)/2$ (%)

III.5.2 Essai sur bétons frais et durci

Il existe deux types d'essais sur béton :

- les essais sur béton frais
- les essais sur béton durci

Certains essais se font au laboratoire et d'autres sur chantiers. La plupart des essais sur le béton frais et durci sont normalisés ou font l'objet de recommandation ou de directives.

Tous les essais qui vont être énumérés s'exécutent dans le cadre du béton frais qu'on appelle :

- **Les essais d'étude :** Ce sont des essais qui s'exécutent au laboratoire et qui ont pour but de définir la conformité des constituants du béton, de la justesse de la formulation et des performances obtenues sur le béton frais et durci.
- **Les essais de convenance :** Ce sont des essais qui consistent à vérifier qu'avec les moyens des chantiers (matériau, matériel et personnel de chantier normalement employés dans l'exécution des travaux) ; on peut réaliser avec le minimum d'aléas le béton défini par l'essai d'étude
- **Les essais de contrôles :** Ses ont des essais qui consistent à vérifier les qualités et les performances des bétons mis en œuvre et ce conformément à ce qui est prévu dans les cahiers de charge.

III.5.2.1 Essai sur béton frais

Tous ces essais mesurent la consistance et la maniabilité du béton, et les trois principaux sont:

a) l'essai d'affaissement du cône d'Abrams : Cet essai est normalisé, il consiste à mesurer le niveau d'affaissement du béton dans un cône aux dimensions normalisées, plus l'affaissement est important plus le béton est mou ou fluide.

Tableau III-8- Appréciation de la consistance du béton en fonction de l'affaissement au cône

Affaissement	Béton	Mis en œuvre
0 à 2 cm	Très ferme	Vibration puissante
3 à 5 cm	Ferme	Bonne vibration
6 à 9 cm	Plastique	Vibration courante
10 à 13 cm	Mou	Piquage
10 à 14 cm	Très mou ou liquide	Léger piquage

b) l'essai d'étalement à la table de secousse : Cet essai permet, sous l'effet de quinze secousses verticales, de mesurer l'étalement d'un cône de béton préalablement démoulé sur la table. Cette table est disposée sur une came qui permet son élévation suivie d'une chute de 12mm. Les mesures du cône sont : 25×12.5×17 cm. Les mesures s'expriment par le rapport d'augmentation du diamètre de base. La consistance du béton en fonction de l'étalement à la table de secousse s'apprécie de la façon suivante :

- très ferme : 10 à 30%
- ferme : 30 à 50%
- plastique : 50 à 70%
- mou : 70 à 100%

c) l'essai d'écoulement au maniabilimètre LCPC : L'essai consiste à mesurer la vitesse d'écoulement d'un béton préalablement disposé dans une cuve métallique parallélépipédique muni d'une paroi mobile de section rectangulaire.

L'essai s'exécute selon une procédure définie, et la maniabilité du béton s'apprécie selon les vitesses suivantes :

- $t < 10$ secondes : béton mou et très fluides
- $t = 15$ secondes : béton très plastique
- $20 < t < 30$ secondes : béton de bonne ouvrabilité
- $t > 40$ secondes : béton sec, peu maniable et d'ouvrabilité médiocre

III.5.2.2 Essai sur béton durci

Il existe deux types d'essais : - les essais destructifs.

- les essais non destructifs.

1) les essais destructifs : Ces essais consistent à exécuter des mesures destructives sur des échantillons préalablement préparés ou élevés sur des ouvrages existant en béton durci. Sur ces échantillons on mesure des résistances qu'elles soient en compression ou en traction.

a) Essai de compression : L'essai consiste à soumettre à l'écrasement par compression axiale une éprouvette cylindrique préparée au laboratoires ou sur chantier[55] , et à déterminer sa résistance à la compression suivant la formule :

$$RC = P / S \quad (\text{eq III.20})$$

Avec : **P** : charge de rupture à la compression.

S : section de l'éprouvette.

Les éprouvettes ont des dimensions normalisées et sont préparées et conservées selon des procédures normalisées [55].

Les éprouvettes subissent une préparation de surfaçage avant l'essai d'écrasement.

- **Les éprouvettes :** On utilise des éprouvettes cylindriques, dont la hauteur est égale à deux fois le diamètre celui-ci est fonction de la grosseur des plus gros granulats utilisés.

Tableau III-9- Dimension des cylindres en cm et du vibreur en mm en fonction de D

Dimension D du granulat	≤ 20	≤ 31.5	≤ 40
Cylindre de	11	16	25
Aiguille de	25	25	37
Nombre de couches	2	2	3

- **Fabrication des éprouvettes :** C'est une étape importante dans la chaîne de control de béton, car une part importante de la dispersion des essais de compression. Le remplissage des éprouvettes se fait en deux couches pour les cylindres de 16 et 11 cm de diamètre ; il se fait en trois couches pour les cylindres de 25 cm. Les éprouvettes

seront piquées à raison de 25 coups pour chaque couche selon la norme P18 423 par la même pique que celle utilisée pour le cône d'Abrams (Ø16). Selon le projet de norme (PR P 18 421), les éprouvettes sont vibrées sur « la table vibrante » pendant 30 secondes pour chasser les bulles d'airs et réparer les défauts d'hétérogénéité provoquer par l'aiguille. Après cela suit l'opération de d'arasement qui se fait à l'aide d'une règle plate pour la finition des éprouvettes.

- **Conservation :** Après arasement correct de la face supérieure des éprouvettes, une protection superficielle efficace consiste à la mise en place d'une feuille de polyane serrée par un bracelet. Suivant la destination de l'essai, les éprouvettes sont conservées soit dans l'eau à $20^{\circ}\text{C} \pm 2$, soit à proximité immédiate de la partie de l'ouvrage.

- **Rectification et surfaçage :** Si la finition des éprouvettes a été correct le surfaçage suffit, sinon il est très nécessaire de rectifier par sciage l'extrémité supérieur des éprouvettes. Dans l'état actuel de nos connaissances, le surfaçage au soufre, normalisé donne satisfaction il se compose de 65 parties de soufre et 35 parties de sable fin ≤ 0.5 . On ajoute parfois 2% de noir de fumée, et la norme ISO/DIS 4012 stipule que la dureté du produit de surfaçage devra être au moins égale à celle du béton testé. Le soufre étant un matériau à plusieurs points de fusion, il y a lieu de respecter la température de 130°C .

b) Essai de traction par fendage : L'essai consiste à écraser, entre deux plateaux d'une presse, un cylindre de béton suivant deux générateur opposé. La résistance à la traction par fendage est calculée selon la formule suivante :

$$R_t = \frac{2.P}{3,14.D.L} \quad (\text{eq III.21})$$

Avec P : charge de rupture à la traction.

D : diamètre du cylindre.

L : longueur du cylindre.

c). Essai de traction par flexion : Cet essai consiste à rompre en flexion une éprouvette prismatique du côté « a » et de longueur « 4a », la résistance à la traction par flexion sous moment constant est égale à :

$$R_t = \frac{3P}{a^3} \quad (\text{eq III.22})$$

avec :

P : charge de rupture ;

a : côté de l'éprouvette.

Sous moment centré, la résistance à la flexion devient :

$$R_t = \frac{9P}{2.a^2} \quad (\text{eq III.23})$$

2) Essais non destructifs :

Il existe deux essais principaux de mesures non destructives du béton, il s'agit de mesures par scléromètre et des mesures par auscultation dynamique.

a) Mesures par scléromètre : L'essai consiste à appliquer l'appareil sur la surface de béton à tester, et à mesurer un indice sclérométrique, cet indice est donné par un index mobile situé sur l'appareil, index qui mesure la hauteur de rebondissement d'une petite masselotte. Cet rebondissement est d'autant plus important que le béton est plus dur, et donc en principe plus résistant. Suivant la relation :

$$\sigma = \frac{I^2}{3} - 2I \quad (\text{eq III.24})$$

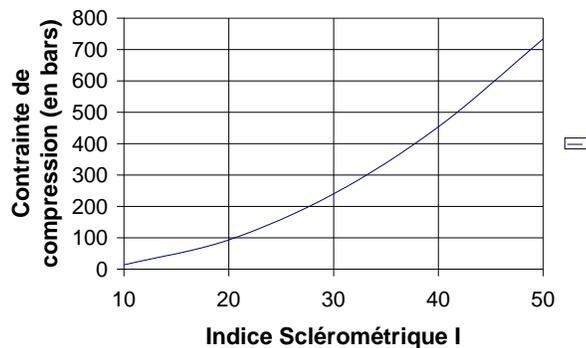


Figure III-3 - Relation entre l'indice sclérométrique et la résistance à la compression

A chaque indice correspond une résistance à la compression, pour que les *indices sclérométriques* soient plus ou moins fiables, il est nécessaire d'effectuer un étalonnage.

b) Mesure par auscultation dynamique : Cet essai consiste à mesurer la vitesse du son au travers de la partie du béton à ausculter, cette vitesse est d'autant plus élevée que le béton est plus dense et donc plus résistant. Cette mesure peut s'effectuer en surface ou en transparence. La vitesse de propagation du son à travers le béton est une mesure simple et rapide, elle permet non seulement d'apprécier la résistance du béton mais également son niveau d'homogénéité.

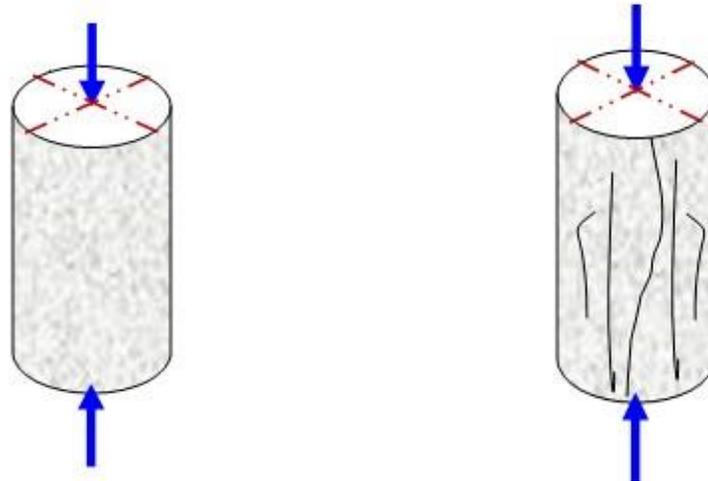
Nota : De la même façon que pour les résultats obtenus par le scléromètre, les résultats obtenus par l'auscultation dynamique ont besoin d'être étalonnés sur des éprouvettes de même béton.

III.6 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des matériaux de constructions sont caractérisées par la capacité de résister à toute sollicitation extérieure impliquant une force tel que compression, traction, chocs, flexion.... ainsi que la dureté, la plasticité et l'élasticité.

- a) **Résistance mécanique:** est le pouvoir d'un matériau de résister à la destruction sous l'action des contraintes dues à une charge. La résistance mécanique des matériaux de constructions se caractérise par la résistance limite, c'est la contrainte correspondant à la charge qui entraîne la destruction du matériau.
- **Traction ou compression :** soit F : force axial, S : surface

$$\sigma = R = \frac{F}{S} \quad (\text{eq III.25})$$



Avant sollicitation : béton sain

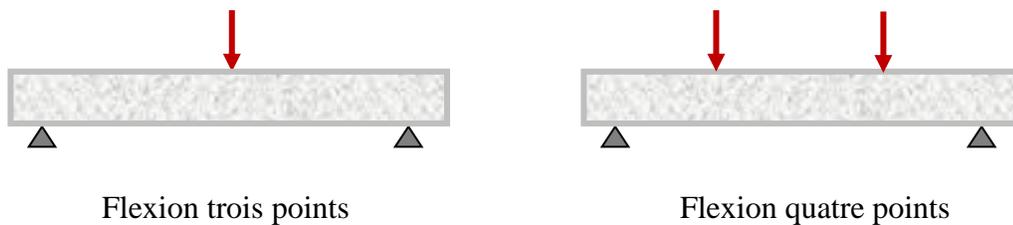
Après sollicitation : béton endommagé

Figure III-4 - Essai de compression simple

- **Déformation linéaire:** toute contrainte sur un objet est suivie d'une déformation.

La déformation qui résulte dans la direction de la force appliquée est appelée

déformation linéaire ε : [%] $\Rightarrow \varepsilon = \frac{L - L'}{L} = \frac{\Delta L}{L}$ (eq III.26)



Flexion trois points

Flexion quatre points

Figure III-5 - Essai de flexion simple

- **Flexion trois points:** $R_{flexion} = \frac{3.P.L}{2.b.h^2}$ (eq III.27)

- **Flexion quatre points:** $R_{flexion} = \frac{3.P.(L-a)}{b.h^2}$ (eq III.28)

- b) **Dureté** : est la capacité d'un matériau de résister à la pénétration d'un corps plus dur que lui.
- c) **Résistance au choc** : elle est caractériser par la quantité de travail dépensé pour la destruction d'un matériau à l'unité de volume.
- d) **Elasticité et plasticité** : les matériaux sollicités par une charge se déforment (changement de dimension et de configuration), si après l'enlèvement de la charge le matériau reprend sa forme et ses dimensions initiales la déformation est appelé élastique et si le matériau garde entièrement ou partiellement sa forme la déformation est plastique.

III.7 Eau de gâchage

III.7.1 Introduction

L'eau est au même titre que le ciment et les granulats, l'un des constituants du béton. Elle intervient, par ses propriétés mécaniques et physico-chimiques, à toutes les étapes de la vie du matériau. Elle confère au béton une plasticité qui permet son écoulement et son moulage. Elle assure ensuite l'hydratation du ciment et participe à la cohésion du matériau[55] .

L'eau exigée par la mise en œuvre du béton est en excès par rapport à celle nécessaire à la phase d'hydratation du ciment. Elle peut ainsi devenir un élément important, ultérieurement responsable du ressuage, du retrait de dessiccation et de gel. Elle peut enfin être un facteur de dégradation si elle contient des ions agressifs. Toute les eaux ne peuvent pas être utilisées pour gâcher du béton parce qu'elles contiennent, dans certains cas un excès d'impuretés qui détériorent les propriétés du béton, notamment les propriétés physiques et mécaniques (prise et résistance), les propriétés esthétiques et la durabilité (corrosion des armatures, stabilité du béton) , certes, l'eau potable est toujours utilisable mais, de plus en plus souvent, nous sommes placés devant la nécessité d'utiliser une eau non potable. La préparation en cours de la norme EN 1008 « eau de gâchage pour béton » a permis de préciser à quelles conditions une eau est utilisable. Ces conditions sont d'ordre sensoriel, chimique ou mécanique (dans ce dernier cas, l'eau est jugée d'après les résultats obtenus sur des éprouvettes de mortier normalisé). Ces impuretés éventuellement contenues dans l'eau de gâchage sont : soit des composés chimiques qui peuvent être actifs vis à vis du ciment, des granulats ou des

armatures et soit des particules en suspension qui du fait de leur quantité ou de leur qualité sont indésirables.

III.7.2 Caractéristiques

Les caractéristiques de l'eau de gâchage sont normalisées et les critères qui permettent d'évaluer l'aptitude à l'emploi d'une eau de gâchage ne doivent pas être confondus avec les critères qui permettent de juger de l'agressivité d'une eau vis à vis d'un béton durci:

Caractéristiques physiques: l'eau de gâchage doit être propre, elle ne doit pas contenir des matières en suspension au-delà de:

- 2 g/l pour les bétons des types A et B
- 5 g/l pour les bétons de type C

Béton **A** : béton de haute qualité à fortes résistances

Béton **B** : béton à grande imperméabilité

Béton **C** : béton courant peu ou non armé

Caractéristiques chimiques: l'eau de gâchage ne doit pas contenir de sels dissous au-delà de:

- 15 g/l pour les bétons des types A et B
- 30 g/l pour les bétons de type C

toutes eau douteuse doit être soumise à l'analyse chimique.

Critères sensoriels:

- L'odeur: cette variante doit être suspectée de contenir des matières organiques en décomposition.
- La vue: une eau qui après décantation garde une couleur foncée doit être considérée comme eau douteuse.

Différent états de l'eau dans la pâte de ciment durcissant: Dès que l'eau entre en contact avec le grain de ciment anhydre, elle réagit pour se combiner peu à peu avec ce grain et conduire, au cours de la réaction d'hydratation, au ciment hydraté.

- **Eau liée :** L'eau peut être liée chimiquement, elle entre dans la composition chimique de l'hydrate. C'est ainsi que le silicate tricalcique (C_3S) s'hydrate en présence d'eau pour donner un hydrate de composition $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 5H_2O$, mais l'eau peut aussi être liée physiquement à l'hydrate.
- **Eau libre :** L'eau n'ayant pas participé à la réaction d'hydratation est dite libre;
- **Eau adsorbée :** La migration de l'eau libre à l'intérieur de la pâte de ciment est gênée de fait que l'eau au contact au ciment est adsorbée à la surface de ce solide : les forces électromagnétiques, qui agissent à la surface du grain, solidarissent sur une faible épaisseur les molécules d'eau avec le solide, réduisant leur mobilité.
- **Eau totale, eau efficace et eau d'apport :** L'eau libre et l'eau liée sont au contact des grains de ciment et c'est pourquoi, dans cette situation l'eau susceptible de s'associer au ciment, soit physiquement, soit chimiquement.

On appelle quantité d'eau efficace, la totalité de l'eau contenue dans le mélange, au moment du malaxage, diminuée de la quantité d'eau retenue par la porosité des granulats et des additions.

Pour connaître la quantité d'eau total il faut ajouter à l'eau d'apport, l'eau apportée par les différents matériaux introduits dans le malaxeur (lorsqu'ils ne sont pas parfaitement secs) et l'eau dans laquelle les adjuvants peuvent être dissous.

Qualité d'eau requise pour la confection des pâtes de ciment :

L'eau potable convient pour la confection des pâtes de ciment, s'il n'est pas possible d'utiliser de l'eau potable, il faut vérifier que l'eau disponible remplit les prescriptions des normes (concentration en matières en suspension et sels dissous).

On note : pour les essais de laboratoire, la norme demande d'utiliser de l'eau distillée en ce qui concerne les essais de références (ceux qui permettent de vérifier la conformité des matériaux et des appareillages aux normes) et de l'eau potable pour les autres essais.

Tableau III-10- Les principaux modes d'action des impuretés des eaux de gâchage

composant	Types d'action à craindre
Sulfate	En faible proportion : peut modifier la prise et le durcissement du ciment (qui contient une proportion optimale de sulfate de calcium.)
	En forte proportion : il y a réaction avec le ciment accompagnée de gonflement (trisulfoaluminate de calcium ou ettringite) préjudiciable à la durabilité du béton.
	L'ion soufre est également un oxydant puissant qui peut corroder les armatures, notamment les câbles précontraints
Chlorure	En faible proportion : accélération de la prise et réaction avec le ciment (chloroaluminate de calcium.)
	En forte proportion : corrosion des armatures des câbles de précontraints et de toutes les pièces métalliques (inserts) incorporées au béton.
Sels de: Zinc	Retardateur de prise.
Cuivre, Plomb	Les chlorures de zinc et de cuivre sont très puissants.
Etain, manganèse	Le nitrate de plomb est, en outre, un puissant inhibiteur de durcissement.
Iodates, Phosphates Arséniates, Borates nitrates	On rencontre surtout les sels de sodium particulièrement solubles. Ce sont tous de puissants réducteurs de la résistance.
	Les oxydants comme les iodates ou les nitrates peuvent également faire craindre une corrosion des câbles de précontrainte
H ⁺	Le PH faible n'est dangereux qu'à cause d'emploi qu'il impose. La très forte basicité du ciment le neutralise sans conséquence.
OH ⁻	Les sels de sodium (NaOH) ou de potassium (KOH) sont de puissants accélérateurs, mais ils réduisent les résistances à 28jours
les sucres	Réagissent avec le ciment pour donner des sels de calcium (saccharate de calcium) : En faible quantité : ce sont de puissants retardateurs.
	En plus forte proportion : ce sont des inhibiteurs de durcissement
L'acide humique	Réagit avec le ciment : en quantité suffisante, il peut entraîner une inhibition du durcissement.
Les détergents	Sont par nature de puissants agents moussants. Même en faibles quantités, l'air qu'ils entraînent au malaxage réduit la compacité du béton et donc ses résistances.

Les algues en suspension	Sont des produits organiques ayant une puissante action d'entraînement d'air. Cet air entraîné réduit la compacité du béton et donc ses résistances.
Les argiles en suspension	En raison de leur structure minéralogique, les argiles augmentent la demande en eau des bétons et, en augmentant le rapport E/C, contribuent à réduire les résistances mécaniques. En enrobant les granulats, les argiles peuvent également réduire la qualité de la liaison pâte-granat et donc réduire les résistances mécaniques.
Na ⁺	Les sels de sodium et de potassium sont, en général, très solubles et donc très courants dans les eaux.
K ⁺	En forte proportion, ils peuvent être à l'origine de réactions alcalines avec les granulats ou d'efflorescences inesthétiques.
	Organiques ou minérales, leur effet peut varier d'un ciment à l'autre :
Les huiles	En très faible proportion, leur effet lubrifiant est plutôt favorable à la réduction de l'eau de gâchage et à l'augmentation des résistances. En plus forte proportion, elles réduisent la bonne liaison pâte- granulat et font chuter les résistances.

III.8 Les Adjuvants

III.8.1 Définition

Les adjuvants sont des produits chimiques qui incorporés dans le béton lors de leur malaxage ou avant leur mise en œuvre à des dosés inférieurs à 5% du poids de ciment, provoque des modifications des propriétés ou des comportement de ceux-ci. Pour des raisons de commodité d'utilisation, les plupart des adjuvants se trouvant dans le commerce sous forme de liquides. Certains adjuvants existant en poudre, afin de réduire leur coût de transport.

Un adjuvant n'est pas un palliatif. Il n'a ni pour mission ni pour effet de faire un bon béton à partir d'un mauvais dosage ou d'une mise en œuvre défectueuse. Ce n'est pas un produit capable de substituer aux règles de la bonne technique.

III.8.2 Principaux adjuvants et ajouts

on distingue trois catégories

- Les adjuvants à fonction principale normalisée.
- Les adjuvants à fonction principale non normalisée (en cours d'étude.)

-
- Les ajouts dans les coulis, mortier et béton.

Les adjuvants a fonction principale normalisée : D'après la norme française P-18-103 [AFNOR-1972], l'adjuvant est un produit qui, incorporé à faible dose dans les bétons, les mortiers ou les coulis au moment de leur malaxage ou étendu à la surface des bétons ou des matériaux lorsqu'ils sont encore frais, provoque les modifications recherchées de leurs propriétés habituelles ou de leur comportement, leur emploi ne doit pas détériorer les caractéristiques du béton ou du mortier ; Néanmoins, une faible diminution de certains de ces caractéristiques peut éventuellement être accepté sauf cas d'espèce, on entend par faible dose, un dosage inférieur à 5 % du poids du ciment.

Les adjuvants sont incorporés après mélange et homogénéisés avec tout ou une partie de l'eau de gâchage (au moins 25 %). Les fonctions normalisées en 1972 sont les suivantes :

- Accélérateur de prise.
- Accélérateur de durcissement.
- Accélérateur de prise et de durcissement.
- Retardateur de prise.
- Retardateur de prise et de durcissement.
- Hydrofuge.
- Les entraîneurs d'air.
- Les plastifiants réducteurs d'eau.
- Les adjuvants par injection.
- Les produits de curé.

Les adjuvants modifiants la prise du ciment : Sur chantier le bétonnage des ouvrages est tributaire des conditions climatiques, le plus souvent, pour satisfaire les délais fixés, il faut travailler par des températures inférieures à 0°C ou supérieures à 35°C, il sera donc nécessaire de moduler les temps de prise du ciment de façon à mettre en œuvre le béton dans les meilleurs conditions, On est donc amené soit a retardé la prise du ciment soit à l'accélérer par des retardataires de prise ou de durcissement.

Les accélérateurs de prise et de durcissement : Ce sont des adjuvants accélérant la prise ou le durcissement du béton ou les deux à la fois, ils présentent un avantage certain dans le cas

du bétonnage par temps froid l'accélérateur de durcissement concerne les résistances a cours terme [24h, 48h, 8h], sans que cela n'implique une modification du temps de prise du ciment. Une accélération vigoureuse de la prise entraîne un accroissement ultérieur plus faible des résistances mécaniques, celles-ci peuvent être inférieure à partir de 28 jours à celles du même béton sans adjuvant, il augmente généralement les retrait de prise et de durcissement et les risques de fissuration.

Les retardateurs de prise et de durcissements : Il peut être souhaitable de retarder la prise et le durcissement dans le cas du bétonnage en temps chaud, lorsque les délais de transports de la centrale au chantier dépassent les 20 ou 30Mn habituelles ou lorsqu'on effectue des travaux de reprise.

Les substances chimiques ayant une action retardatrice sont les sucres notamment le saccharose, la plupart des acides carboxyliques, les lignosulfonates ; Le retard de prise entraîne une diminution des résistances initiales (20% a 7 jours) mais au-delà on retrouve progressivement les résistances du témoin.

Les adjuvants modifient la perméabilité du béton « les hydrofuges » : ce sont des produits qui a la fois : l'absorption capillaire et le débit d'écoulement de l'eau sous pression a travers un béton saturé (permet l'abaissement du rapport E/C). Ils ont pour rôle essentiel d'obturer les capillaires et d'empêcher ou plus au moins de limiter la pénétration et la circulation d'eau dans le béton ils sont généralement à base de savon napoliténique (obtenu lors du raffinage d'huiles minérales ou à partir de lignosulfite) ou encore de silicone, le plus souvent il s'agit de sous-produits industriels dont la régularité de composition doit être contrôlée sérieusement.

Les adjuvants améliorant la résistance au gel du béton « les entraîneurs d'air » : les structures en béton soumises à des variations climatiques sévères ou situées dans des régions a hivers rigoureux subissent des dégradations importantes causées par les cycles gel-dégel, en effet l'eau présente dans les capillaires du béton crée des contraintes internes élevées qui finissent par faire éclater ou écailler le béton. Pour palier a ces inconvénients outre la mise en œuvre d'un béton où E/C est le plus faible que possible et grande compacité on utilise des entraîneurs d'air, ce sont des adjuvants conduisant à la formation de micro bulle d'air dont la répartition est homogène dans le béton , cette catégorie d'adjuvant est mise au point en 1932

aux Etats Unis, elle est constituée d'huile minérale sulfonée, d'huiles végétales et de résines naturelles ou synthétiques.

Les adjuvants entraînant une amélioration de la mise en œuvre du béton « plastifiant réducteur d'air » : pour des raisons de possibilité de mise en œuvre, il est indispensable que les mélanges des différents constituants soit suffisamment fluide, on diminue donc le frottement interne en introduisant en faible quantité des adjuvants du type plastifiant réducteur d'eau.

Les adjuvants pour injection des grains d'ouvrage en béton précontraint : ce sont des produits qui ajoutés aux coulis ou mortiers d'injection permettent d'augmenter la fluidité, de déduire les risques de décantation.

Les adjuvants protègent le béton contre la dessiccation au jeune âge « produits de cure » : Ils sont étendus par pulvérisation et créent sur la surface exposée aux agents atmosphériques, un film continu s'opposant à l'évaporation de l'eau contenue dans le béton, permettant aussi au durcissement de se poursuivre normalement. Les fileuse souvent colorant doivent disparaître après un certain temps, ce sont des résines diverses ou caoutchouc chloré en solution dans des produits dérivés du pétrole (White spirit) ou du xylene.

III.9 Formulation des bétons : méthode de Dreux-Gorisse

III.9.1 Objectif

Déterminer en fonction des critères de maniabilité et de résistance définis par le cahier des charges, la nature et les quantités de matériaux nécessaires à la composition d'un mètre cube de béton, en l'occurrence les composants déjà caractérisés ci-dessus en kg/m^3 ; à savoir : Eau, Ciment et Granulats.

III.9.2 Définition du cahier des charges

Il s'agit de définir, en fonction du type d'ouvrage à réaliser, les paramètres nécessaires à la mise en œuvre du béton et à la stabilité à court et long terme de l'ouvrage.

Les paramètres principaux devant être définis sont : la maniabilité et la résistance du béton, la nature du ciment et le type de granulats.

Critère de maniabilité : La maniabilité est caractérisée, entre autres, par la valeur de l'affaissement au cône d'Abrams (Aff.). Elle est choisie en fonction du type d'ouvrage à réaliser, du mode de réalisation et des moyens de vibration disponibles sur chantier (Tab III-11).

Tableau III-11- Affaissement au cône conseillé en fonction du type d'ouvrage à réaliser.

Affaissement en cm	Plasticité	Désignation	Vibration conseillée	Usages fréquents
0 à 4	Ferme	F	Puissante	Bétons extrudés Bétons de VRD
5 à 9	Plastique	P	Normale	Génie civil Ouvrages d'art Construction Hydraulique
10 à 15	Très plastique	TP	Faible	Ouvrages courants
≥ 16	Fluide	Fl	Léger piquage	Fondations profondes Dalles et voiles minces

Critère de résistance : Le béton doit être formulé pour qu'à 28 jours sa résistance moyenne en compression atteigne la valeur caractéristique σ'_{28} .

Cette valeur doit, par mesure de sécurité, être supérieure de 15 % à la résistance minimale en compression f_{c28} nécessaire à la stabilité de l'ouvrage.

$$\sigma'_{28} = 1.15 * f_{c28} \quad (\text{eq III.29})$$

$$\sigma'_{28} = 1.15 * 25 = 28.75 \text{ MPa}$$

Choix du ciment :

Tableau III-12- Correspondance entre classe vraie et dénomination normalisée des ciments.

Dénomination normalisée	32,5 MPa	42,5 MPa	52,5 MPa
Classe vraie σ'_c	35 à 45 MPa	45 à 55 MPa	> 55 MPa

Le choix du type de ciment est fonction de la valeur de sa classe vraie σ'_c et des critères de mise en œuvre (vitesse de prise et de durcissement, chaleur d'hydratation, etc...). La classe

vraie du ciment est la résistance moyenne en compression obtenue à 28 jours sur des éprouvettes de mortier normalisé. Le cimentier garantit une valeur minimale atteinte par au moins 95 % des échantillons (dénomination normalisée spécifiée sur le sac de ciment). La correspondance entre classe vraie du liant et valeur minimale garantie par le fabricant est donnée dans le (tab.III-12)

III.9.3 Formulation de Dreux- Gorisse

La méthode de formulation de Dreux-Gorisse permet de déterminer les quantités optimales de matériaux (eau E , ciment C , sable S , gravillon g et gravier G) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges. Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton :

- Détermination du rapport C/E
- Détermination de C et E
- Détermination du mélange optimal à minimum de vides
- Détermination de la compacité du béton
- Détermination des masses de granulats
- Les résultats intermédiaires relatifs à chaque étape de calcul seront consignés sur la fiche de résultats jointe en annexe.
- Détermination du rapport C/E

Le rapport C / E est calculé grâce à la formule de Bolomey :

$$\sigma'_{28} = G' \cdot \sigma'_c \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right) \quad (\text{eq III.30})$$

Tableau III-13- Coefficient granulaire G' en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats D_{\max} .

Qualité des granulats	Dimension D_{\max} des granulats		
	Fins $D_{\max} < 12,5$ mm	Moyens $20 < D_{\max} < 31,5$ mm	Gros $D_{\max} > 50$ mm
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Avec : σ'_{28} = Résistance moyenne en compression du béton à 28 jours en MPa

σ'_c = Classe vraie du ciment à 28 jours en MPa

C = Dosage en ciment en kg par m³ de béton

E = Dosage en eau total sur matériau sec en litre par m³ de béton

G' = Coefficient granulaire (Tab.III-13) fonction de la qualité et de la dimension maximale des granulats.

Ces valeurs supposent que le serrage du béton sera effectué dans de bonnes conditions (par vibration en principe).

- $G' = 0.5 \rightarrow$ Qualité des granulats bonne et $20 < D_{\max} < 31,5$
- $\sigma'_c = 55 \rightarrow$ Dénomination normalisée 42,5 MPa

$$28.75 = 55.0,5 \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right) \Rightarrow \frac{C}{E} = 1.545$$

Détermination de C :

La valeur de C est déterminée grâce à l'abaque de la figure III-6 en fonction des valeurs de C/E et de l'affaissement au cône d'Abrams. Pour cela il suffit de positionner sur l'abaque les valeurs de C/E et de l'affaissement au cône recherchées.

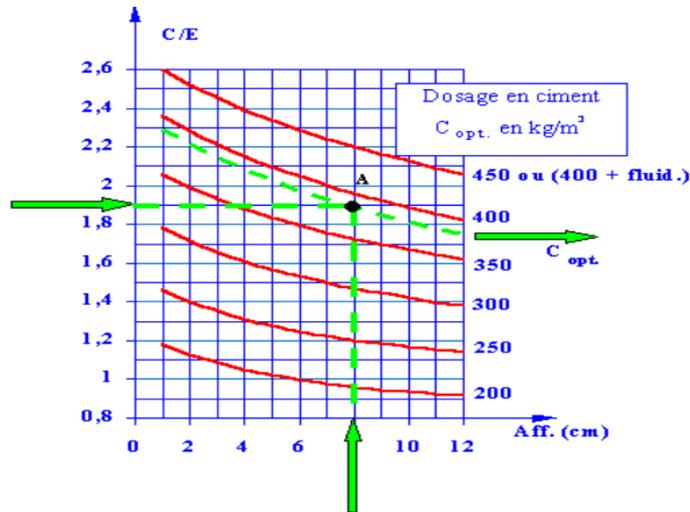


Figure III-6 - Abaque permettant la détermination de Copte

Le point ainsi obtenu doit être ramené parallèlement aux courbes de l'abaque pour déterminer la valeur optimale de Copte. Au-delà de 400 kg de ciment par m³ de béton, on préférera à un surdosage en ciment l'usage d'un fluidifiant (Fluide).

Pour notre cas : Calcul du dosage en ciment ; se fait de la façon suivante :

$$\frac{C}{E} = 1.545 \text{ et } \text{aff} = 8\text{cm} \Rightarrow C = 325 \text{ kg}/m^3$$

Détermination de E

La quantité d'eau E nécessaire à la confection du béton se calcule grâce aux valeurs de C/E et de C.

Pour la corrections sur le dosage en ciment C et le dosage en eau E, lorsque la dimension maximale des granulats D_{max} est différente de 20 mm, une correction sur la quantité de pâte est nécessaire à l'obtention de la maniabilité souhaitée. Les corrections (Tab.III-14) sont à apporter sur les quantités d'eau et de ciment (le rapport C/E reste inchangé).

$$E = \frac{325}{1.545} = 210.355 l/m^3$$

Tableau III-14- Correction sur le dosage de pâte en fonction de D_{max} .

Dimension maximale des granulats (D_{max} en mm)	5	8	12,5	20	31,5	50	80
Correction sur le dosage de pâte (en %)	+ 15	+ 9	+ 4	0	- 4	- 8	- 12

Détermination du mélange optimal à minimum de vides

Il s'agit de déterminer les pourcentages de sable, de gravillons et de cailloux qui vont permettre la réalisation d'un squelette granulaire à minimum de vides. Les quantités des matériaux de chaque classe granulaire doivent être judicieuses pour que les plus petits éléments viennent combler les vides laissés par les plus gros. La courbe granulométrique théorique d'un matériau à minimum de vides peut être schématisée par une droite brisée. La démarche proposée par Dreux pour déterminer le mélange optimum à minimum de vides est la suivante :

- Tracé de la droite brisée de référence
- Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux Tracé de la droite de référence de Dreux : La droite de référence de Dreux représente la courbe idéale d'un matériau à minimum de vides. C'est une droite brisée dont le point de brisure est défini par son abscisse X et son ordonnée Y .

$$\text{En abscisse : Si } D_{\max} \leq 20 \text{ mm} \quad \mathbf{X} = D_{\max} / 2 \quad (\text{eq III.31})$$

$$\text{Si } D_{\max} > 20 \text{ mm} \quad \mathbf{X} = \frac{D_{\max} + 38}{2} \quad (\text{eq III.32})$$

$$D_{\max} = 20 \text{ mm} \rightarrow \quad \mathbf{X} = \frac{20}{2} = 10$$

$$\text{En ordonnée : } Y = 50 - \sqrt{1.25 (D_{\max})} + K' \quad (\text{eq III.33})$$

$$K' = K + K_s + K_p \quad (\text{eq III.34})$$

Y est donné en pourcentage de passants cumulés

avec: K est un coefficient donné par le tableau III-15,

K_s et K_p étant des coefficients correctifs définis par :

K_s (correction supplémentaire fonction de la granularité du sable) :

$K_s = (6 M_{fs} - 15)$ avec M_{fs} le module de finesse du sable.

K_p (correction supplémentaire si le béton est pompable) :

$K_p = +5$ à $+10$ selon le degré de plasticité désiré.

Tableau III-15- K, fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment.

Vibration	Faible		Normale		Puissante		
	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	
Forme des granulats (du sable en particulier)							
400 + Fluide	- 2	0	- 4	- 2	- 6	- 4	
400	0	+ 2	- 2	0	- 4	- 2	
Dosage	350	+ 2	+ 4	0	+ 2	- 2	0
en	300	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4	0	+ 2
Ciment	250	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4
	200	+ 8	+ 10	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6

La droite de Dreux a pour origine le point 0 origine du graphe et pour extrémité le point D_{\max} caractéristique des plus gros granulats.

$$K = 2 \quad \Rightarrow \quad C=325 \text{ et vibration normale, granulats concassé}$$

$$K_s = -5.094 \Rightarrow K_s = 6 \times 1.651 - 15$$

$$M_{fs} = 1.651 \Rightarrow M_{fs} = \frac{0 + 0.1 + 1.6 + 3.4 + 67.9 + 92.1}{100}$$

$$K_p = 8$$

$$K' = 4.906 \quad K' = 2 + (-5.094) + 8$$

$$Y = 50 - \sqrt{1.25(20)} + 4.906 \Rightarrow Y = 49.906$$

Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux :

Pour déterminer les pourcentages en volumes absolus de granulats permettant la confection d'un mélange à minimum de vide il est nécessaire de tracer comme indiqué sur la figure III-7 des droites reliant deux à deux les courbes granulométriques des matériaux du mélange. Ces droites sont définies par 5 % de refus pour le matériau à faible granularité et par 5 % de passant pour le matériau à forte granularité. L'intersection des droites ainsi tracées avec la droite brisée de Dreux permet, par prolongement sur l'axe des ordonnées, de déterminer les pourcentages en volumes absolus de chaque matériau. Ces pourcentages doivent permettre l'obtention d'un mélange dont la courbe granulométrique est proche de la droite brisée de Dreux.

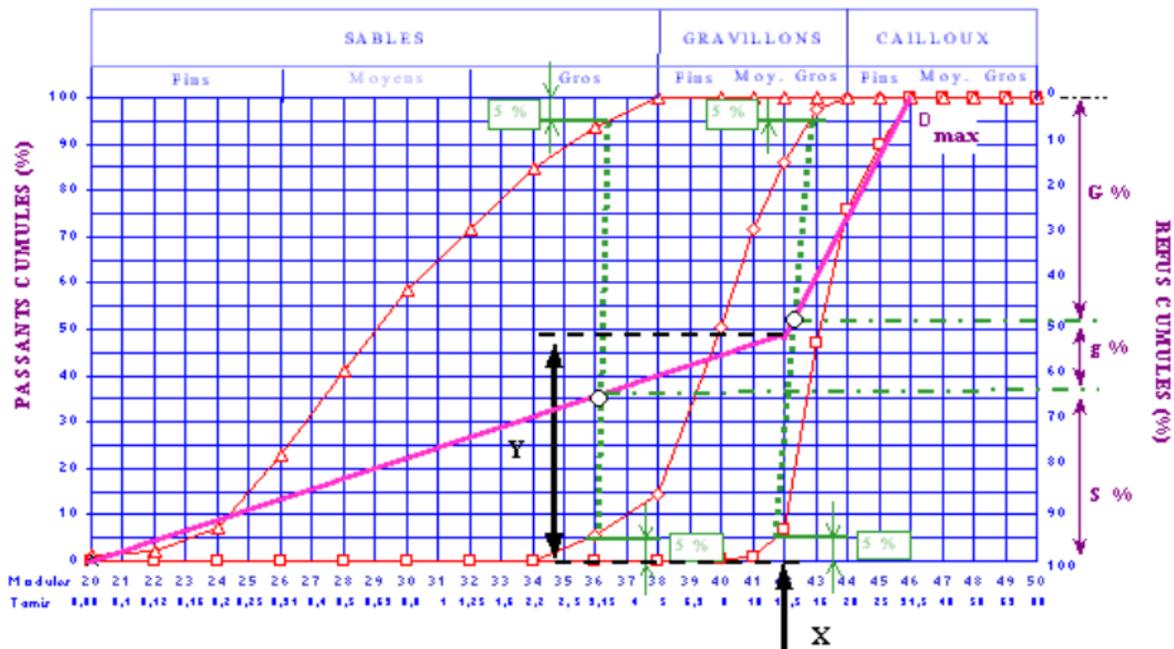


Figure III-7 - Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériau -références.

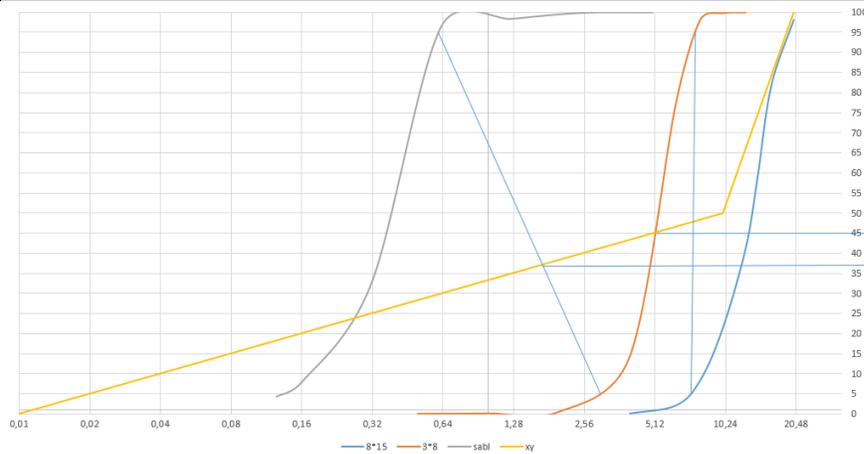


Figure III-8 – Résultats obtenus des pourcentages en volumes absolus de matériau

On déduit à partir des résultats ce qui suit :

- pourcentages de sable ----- 37%
- pourcentages de gravillons 3/8 ----- 8%
- pourcentages de gravier 8/15 ----- 55%

Détermination de la compacité du béton

Pour déterminer les masses de granulats entrant dans la composition de béton, il est nécessaire de déterminer la compacité du béton qui correspond au volume absolu en m³ de solide contenu dans un mètre cube de béton (volumes absolus de ciment, de sable, de gravette et de gravier). Sa valeur de base c_0 est fonction de la taille des granulats, de la consistance du mélange et des moyens de vibration mis en œuvre (TabIII-16). Des corrections (c_1 , c_2 et c_3) fonctions de la forme des granulats, de la masse volumique des granulats et du dosage en ciment, doivent être apportées (Tab.III-16) :

$$c = c_0 + c_1 + c_2 + c_3 \quad (\text{eq III.35})$$

La valeur de la compacité c du béton permet de déterminer le volume total absolu V de granulats intervenant dans la formulation du béton :

$$V = (c - V_c) \quad (\text{eq III.36})$$

V_c est le volume de ciment défini par

$$V_c = C / \rho_s(c) \quad (\text{eq III.37})$$

$\rho_s(c)$ est la masse volumique absolue du ciment utilisé.

Tableau III-16- Compacité du béton en fonction de D_{max} , de la consistance et du serrage .

Légende : VF : Vibration faible , VN : Vibration normale et VP : Vibration puissante

Consistance	Serrage	Compacité (c_0)						
		$D_{max}=5$	$D_{max}=8$	$D_{max}=12,5$	$D_{max}=20$	$D_{max}=31,5$	$D_{max}=50$	$D_{max}=80$
Molle (TP-FI)	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	VF	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	VN	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique (P)	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	VF	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	VN	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	VP	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme (F)	VF	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	VN	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	VP	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

Important à respecter:

- Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :

Sable roulé et gravier concassé ($c_1 = - 0,01$)

Sable et gravier concassé ($c_1 = - 0,03$)

- Pour les granulats légers on pourra diminuer de 0,03 les valeurs de c : ($c_2 = -0,03$)
- Pour un dosage en ciment $C \neq 350 \text{ kg/m}^3$ on apportera le terme correctif suivant : ($c_3 = (C - 350) / 5000$)

En fonction de la dimension maximale des granulats D_{max} , le dosage en ciment sera égal à :

$$C = 0.825 - 0.01 - 0.005 = 0.81$$

$$V_c = \frac{325}{3.1 \times 10^3} = 0.10483$$

$$V = (0.81 - 0.10483) \Rightarrow V = 0.70517 \text{ m}^3$$

Détermination des masses de granulats

Connaissant le volume total absolu des granulats (V) et les pourcentages en volume absolue de sable ($S \%$), de gravillon ($g \%$) et de gravier ($G \%$), il est alors possible de déterminer les volumes de sable (V_s) de gravillon (V_g) et de gravier (V_G) ainsi que leurs masses respectives (S , g et G) :

$$V_s = VxS \% \quad \text{et} \quad S = VxS \% x \rho_s(S) \quad (\text{eq III.38})$$

$$V_g = Vxg \% \quad \text{et} \quad g = Vxg \% x \rho_s(g) \quad (\text{eq III.39})$$

$$VG = VxG \% \quad \text{et} \quad G = VxG \% x \rho_s(G) \quad (\text{eq III.40})$$

A défaut de renseignements précis concernant les masses volumiques absolues des matériaux, on peut utiliser à titre simplificatrice une approximation les valeurs ci-dessus présentés :

Etant donné les masses volumiques que :

$$\rho_{s(c)} = 3,1 \text{ t/m}^3, \quad \rho_{s(S)} = 2,6 \text{ t/m}^3, \quad \rho_{s(g)} = 2,6 \text{ t/m}^3 \quad \text{et} \quad \rho_{s(G)} = 2,6 \text{ t/m}^3.$$

Nous avons obtenus les résultats suivantes pour les différents classe des granulats utilisés :

Sable 0/3	$V_s = 0.70517x37\%$	$S = 0.70517x37\%x2.5$	$S = 652.282 \text{ kg/m}^3$
Gravier g3/8	$V_g = 0.70517x8\%$	$g = 0.70517x8\%x2.64$	$g = 148,931 \text{ kg/m}^3$
Gravier G 8/15	$VG = 0.70517x55\%$	$G = 0.70517x55\%x2.64$	$G = 1023.906 \text{ kg/m}^3$

Obtention de la formulation théorique de béton

En se basant de la formulation théorique de béton recherchée et qui définit les quantités composants béton ordinaire à savoir les éléments suivants : d'eau E, de sable S, de gravillon g et de gravier G.

Sachant que la masse totale d'un mètre cube de béton ordinaire ($\Delta_0 = E + C + S + g + G$) est comprise entre $2,3 \text{ t/m}^3$ et $2,5 \text{ t/m}^3$, d'où la formulation retenue donne les dépenses pour les composants de notre béton léger à base de polyester, dans ce cadre nous présentons les résultats des quatre de béton à savoir le béton ordinaire, et les trois autres bétons en substituant chaque fois un pourcentage des granulats de classe 8/15 par des grains de polystyrène, les substitutions retenus sont 10% de polystyrène, le 20% de polystyrène et 30% de polystyrène. A partir des dosages obtenus ci-dessus représentés sur le (Tab.III-17) des essais expérimentaux seront présentés dans ce chapitre, qui seront suivies par une présentation des résultats et discussions en chapitre 4.

Tableau III-17-Présentations des dépenses composants les bétons.

Quantité	Béton ordinaire	Béton à base de 10% de polystyrène	Béton à base de 20% de polystyrène	Béton à base de 30% de polystyrène
Eau(E) (l/m ³)	210.355	210.355	210.355	210.355
ciment C (kg/m ³)	325	325	325	325
Sable(S) (kg/m ³)	652.282	652.282	652.282	652.282
gravillon(g) (kg/m ³)	148.931	148.931	148.931	148.931
Gravier(G) (kg/m ³)	1023.906	921.515	819.1248	761.7342
Polystyrène(P) (l/m ³)	0	80.465	160.930	241.396

III.10 confection des éprouvettes

III.10.1 Matériaux utilisé pour les essais expérimentaux

Dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux de la région de Tiaret, nous avons utilisé les matériaux composant du béton les plus disponible sur le marché local voir même sur le marché régional, dans ce contexte nous pouvons énumérer les matériaux utilisé ; comme :

- Les trois classe des granulats concassé provenant de la carrière de Kbouba (figure III-9) situé environ 15 km de la commune de Tiaret (figure III-10b 10c) plus précisément dans les montagnes des hauts plateaux ouest , à savoir le sable concassé 0/3, le gravier 3/8 et les gravier 8/15.



Figure III-9 – Lieu de carrière de kbouba

- Le sable de oued situé dans les frontières sud de la willaya de Tiaret (figure III-10a), plus exactement dans la commune de Guelta Sidi Said environ 95 km de la commune de Tiaret.

- Ciment ordinaire issu de la cimenterie ECDE de Chlef (figure III-10d).
- Eau de robinet,
- Polyester issu du marché local,
- Barre d'armature pour béton de diamètre en T10, T8, et $\phi 6$,
- Treillis soudé de maillage 5x5,
- Les huiles de décoffrage.



Sable de oued (a)

Gravier 3/8 (b)

Gravier 8/15 (c)

Ciment (d)

Polystyrène (e)

Figure III-10 – Matériaux composant le béton

Nous avons présenté la caractérisation des matériaux composant notre béton, citée dans la paragraphes du III-2 au III-9.

III.10.2 Matériels utilisé pour les essais expérimentaux

Plusieurs matériels disponible dans le laboratoire pédagogique du département de génie civil, ont été utilisé dans programme expérimental, nous pouvons cité le matériel le plus utilisé, en l'occurrence :

- Deux bétonnières, une de capacité 200 (figure III-12a) litres utilisé pour les mélange important (environ 70l) ; la plus petite bétonnière de capacité 100 litres (figure III-12b) utilisé pour les petite gâché de béton.
- Cône d'Abrams pour les tests de maniabilité,
- Table vibrante, pour la vibration des bétons, pour chasser les bulles d'air afin d'obtenir un béton compacte, en plus nous utiliser la vibration traditionnelle à l'aide d'une barre d'acier,
- Citerne d'eau de robinet,



Coffrage de Epreuve cylindrique 16/32 (a)

Coffrage de poutre 10x10x40 (b)

Coffrage de poutre 10x15x80(c)



Coffrage de Epreuve cylindrique PVC 11/33 (d)



Coffrage de poutre 10x20x120 (e)

Figure III-11 – Différentes types de coffrage utilisés

- Balance électronique, d'une part pour les mesures des dépenses des matériaux composant le béton , d'autre part pour s'assurer des chutes de poids lorsqu'on substitué les granulat 3/8 par des grains de polyester ; objectif de notre étude,



bétonnières de capacité 200 l (a)



bétonnières de capacité 100l (b)

Figure III-12 – Les bétonnières

- Pour les mesures des grains de polystyrène, nous avons utilisé des pot en plastique de l'unité de volume de 1 litre,
- Bassin de conservation des éléments en béton coulés,
- Différentes types de moules disponible au laboratoire cité précédemment ; à savoir :
 - Eprouvette cylindrique 16/32 (figure III-11a); soit un nombre 12 éprouvettes, utilisé en 4x3.
 - Poutre 10x10x40 (figure III-11b); soit un nombre 6 poutre, utilisé en 2x3.
 - Poutre 10x15x80 (figure III-11c); soit un nombre 6 poutre, utilisé en 2x3.
- En plus des moules disponibles que nous avons utilisé, vu nos besoins en coffrage, nous avons confectionné d'autres types coffrage ; en l'occurrence :
 - Pour les poutres 10x20x120 (figure III-11e), un coffrage en bois en nombre 6 poutre, utilisé en 2x3,
 - Tube en PVC ordinaire(figure III-11d) ; de forme cylindrique 11/33, en nombre 12 éprouvettes ; soit 4x3 .
- Appareil d'essai de compression (figure III-13),
- Appareil d'essai de flexion (figure III-14),



Figure III-13 –Appareil d’essai de compression



Figure III-14 – Appareil d’essai de flexion,

III.10.3 Procédure de coulage des bétons sur les moules

- Préparation du mélange :

- **Choix du bétonnière** : ce choix se fait en fonction du volume du mélange du béton,
- **Positionnement** : une la bétonnière choisi ; nous devons contrôlé la stabilité du bétonnière, à cause des vibration du malaxeur,
- **Nettoyage** : nous devons veiller de propreté de la bétonnière avant et après le mélange et exempte de tout résidu de mélange,



Figure III-15 - Préparation du béton : Mélangez le ciment, les granulats , polystyrène et

l'eau dans un bétonnière

- **Ajout des granulats** : nous ajoutons environ la moitié des granulats dans la bétonnière en fonctionnement ; d'abord il est souhaitable de commencer par les granulats de grand diamètres dans notre cas c'est les graviers 8/15 et suivi par les diamètres inférieurs tel-que le gravier 3/8 dans le présent mélange ensuite l'ajout de la dépense en sable (granulats fins); cette démarche s'applique pour les bétons ordinaire. Concernant les béton à base de polyester ; nous retenons la même démarche ci avant toute en ajoutant des grains de polystyrène humide où des grain sec suivi d'un arrosage d'une petite quantité d'eau à condition que cette quantité d'eau ajouté doivent être soustraire de la dépense en eau prévu pour du mélange (figure III-15),
 - **Ajout de l'eau** : nous ajoutons environ les deux tiers de l'eau nécessaire.
 - **Ajout du ciment** : nous ajoutons le ciment dans la bétonnière.
 - **Ajout du reste des granulats** : nous ajoutons le reste des granulats.
 - **Ajout de l'eau restante** : nous ajoutons progressivement le reste de l'eau pour ajuster la consistance du mélange.
- **Procédure de coulage** :
- Nous assurons que le coffrage est propre, bien aligné et correctement supporté et puis en appliquant un ajout de décoffrage (l'huile) sur le coffrage (figure III-16), pour faciliter le démoulage du béton après durcissement.



Figure III-16 – application des huiles sur les coffrages

- Vérification de la fluidité du mélange à l'aide du cône d'Abrams (figure III-17),



Remplissage de Cône d'Abrams (a)

Mesure de l'affaissement (b)

Résultat de l'affaissement (c)

Figure III-17 – Essai d'affaissement à l'aide du d'Abrams

- Nous commençons le coulage par les coins ou les extrémités du coffrage.
- Répartissant le béton de manière uniforme dans le coffrage pour éviter la ségrégation des granulats (figure III-18).



Remplissage éprouvette 16/32(a)



Remplissage poutres 10x15x80(b)

Figure III-18 – Remplissage des éprouvettes

- Pour la vibration des poutres 120x20x10, 80x15x10, nous utilisons la vibration traditionnelle à l'aide d'une barre d'acier, et pour les éprouvettes de 16/32, 11/33

et les prismes 10x10x40 ; nous avons utilisé la table vibrante sous contrôle surveillé du temps de vibration, comme nous visons un béton compacte.



vibration traditionnelle (a)



vibration sur la table vibrante (b)

Figure III-19 – vibration le bétonPoutre de dimension
10x20x120 (a)Poutre de dimension
10x15x80 (b)Poutre de dimension
10x10x40 (c)Eprouvette cylindrique de
dimension 16/32 (d)**Figure III-20** – Décoffrage des poutres pour béton (a, b et c) et éprouvette cylindrique (d)

Il est nécessaire de respecter le temps de vibration, connaissant bien qu'un béton trop vibré devient plastique voir même très plastique, ce qui est en contradiction avec nos objectifs, il est recommandé de fixé généralement un temps de vibration

de 5 à 15 secondes afin d'éliminer les bulles d'air et d'éviter la ségrégation du béton durci (figure III-19),

- Décoffrage des éléments de béton (figure III-20).

- **Mode de conservation :**

La conservation du béton autrement dit la cure des bétons, est essentielle pour assurer sa résistance et durabilité en maintenant des conditions optimales de température et d'humidité après le coulage. Pour cela nous avons utilisé deux méthodes de conservation la première concernant les poutres 10x20x120; où nous avons opté par couvrir les poutres en question avec des tapis de cure humide (couvertures en coton), il est important de maintenir cette humidité toute en l'arrosant régulièrement (figure III-21). La deuxième concernant les éprouvettes 16/32, 11/33, les poutres 80x15x10 et les prismes 10x10x40 ; en les plongeant dans un bassin de conservation des éléments en béton coulés jus quand le jour de l'écrasement.



Bassin de conservation des éléments de béton (a)

Cure traditionnelle (b)

Figure III-21 – cure des béton

III.10.4 Essai sur éprouvette et poutre en béton

- **Essai de compression sur éprouvette cylindrique 16/32:** l'essai de compression sur une éprouvette cylindrique de 16 cm de diamètre et 32 cm de hauteur est une procédure standardisée permettant de déterminer la résistance à la compression du béton en appliquant une charge jusqu'à la rupture et en calculant la résistance à partir

de la charge maximale supportée. Afin d'obtenir la charge ultime, il est nécessaire de respecter les démarche suivante (figure III-22) :

- **Préparation de l'éprouvette** : Avant l'essai, les extrémités de l'éprouvette doivent être planes et parallèles. Si nécessaire, elles peuvent être rectifiées.
- **Positionnement dans la machine d'essai** : L'éprouvette est placée verticalement entre les plateaux de compression de la machine d'essai.
- **Application de la charge** : Une charge est appliquée progressivement et uniformément à une vitesse contrôlée jusqu'à la rupture de l'éprouvette.
- **Enregistrement des données** : La charge maximale supportée par l'éprouvette avant rupture est enregistrée.



Figure III-22 – Essais d'écrasement sur éprouvette 16/32

- *Essai de flexion trois points sur poutres de dimensions 10x20x120 , 10x15x80 et les prismes 10x10x40:*

L'essai de flexion trois points sur des poutres de dimensions spécifiées permet de déterminer la résistance à la flexion du béton en appliquant une charge centrale jusqu'à la rupture et en calculant la résistance à partir de la charge maximale supportée et des dimensions de la poutre (figure III-23)

- **Disposition de la poutre** : La poutre est placée sur deux appuis, avec une portée (distance entre les appuis) généralement égale à 3 fois la hauteur de la poutre

- **Application de la charge** : Une charge est appliquée au centre de la poutre à un taux constant jusqu'à la rupture.
- **Enregistrement des données** : La charge maximale supportée par la poutre avant la rupture est enregistrée, ainsi que la déflexion correspondante.

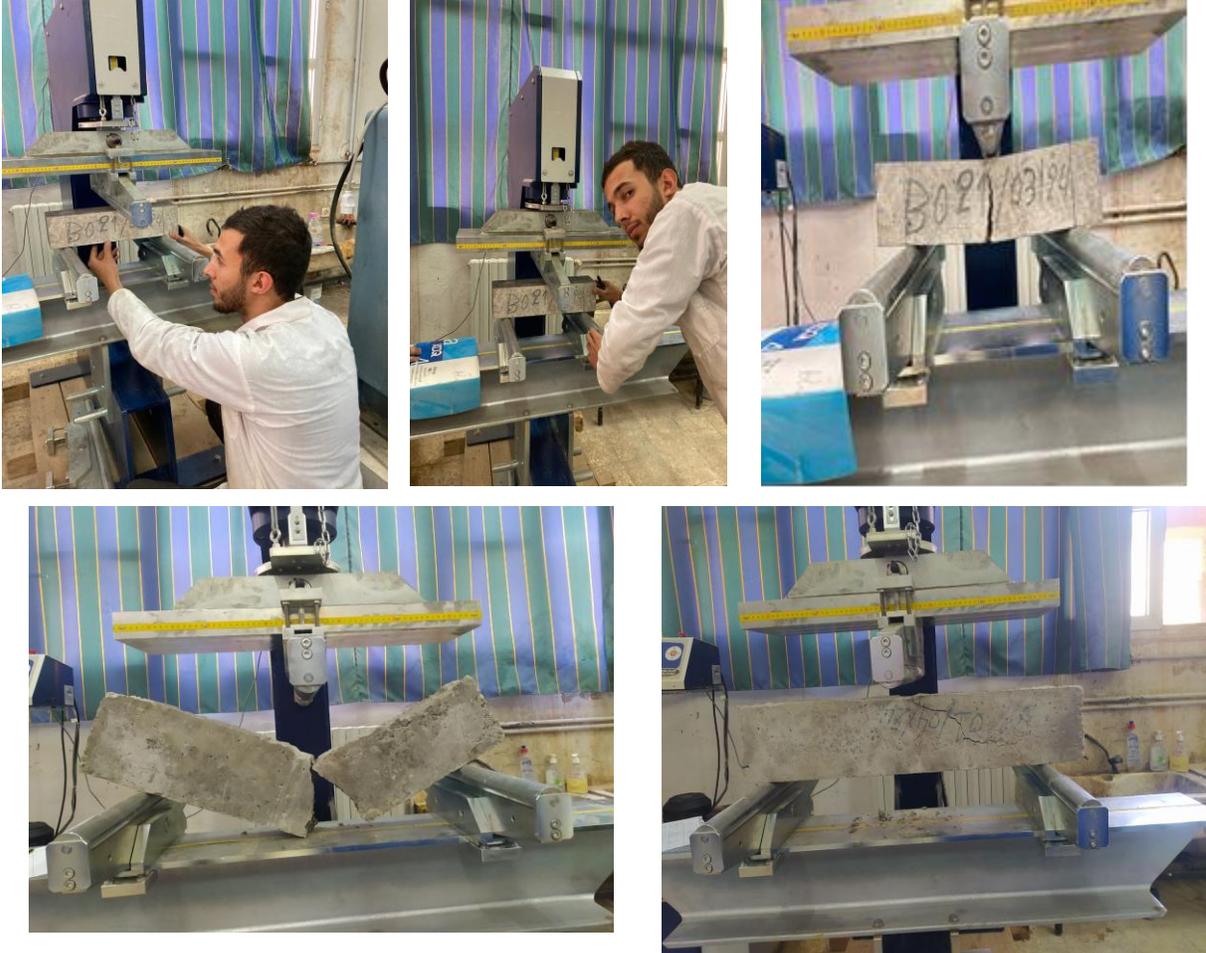


Figure III-23 – Essais de flexion trois point sur poutres en béton

- *Essai de flexion quatre points sur poutres de dimensions 10x20x120 , 10x15x80 et les prismes 10x10x40:*

L'essai de flexion quatre points sur des poutres de dimensions spécifiées permet de déterminer la résistance à la flexion du béton en appliquant une charge uniformément répartie sur deux points de charge et en calculant la résistance à partir de la charge maximale supportée et des dimensions de la poutre (Figure III-24).

- **Disposition de la poutre** : La poutre est placée sur deux appuis, avec une portée (distance entre les appuis) appropriée. Les deux points de charge sont appliqués symétriquement entre les appuis, généralement à une distance égale à un tiers de la portée de chaque appui.
- **Application de la charge** : Une charge est appliquée de manière uniforme aux deux points de charge jusqu'à la rupture de la poutre.
- **Enregistrement des données** : La charge maximale supportée par la poutre avant la rupture est enregistrée, ainsi que la déflexion correspondante.

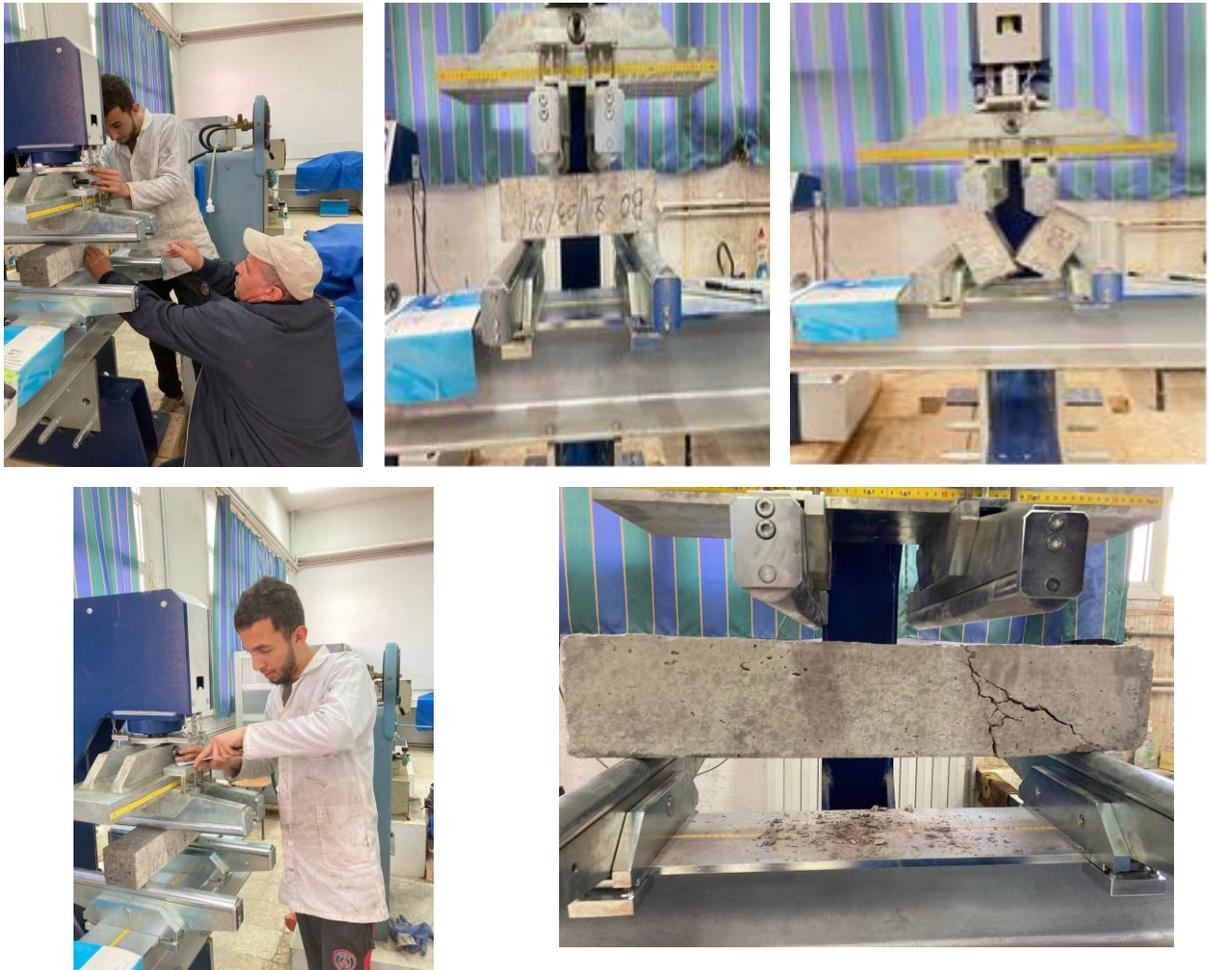


Figure III-24 – Essais d'écrasement sur poutres de dimension 10x10x40

- ***Essai de compression sur éprouvette cylindrique 11/33:***

L'essai de compression sur une éprouvette cylindrique de 11cm de diamètre et 33 cm de hauteur, la procédure est identique à celle des éprouvette 16/32, l'essai consiste à

déterminer la résistance à la compression du béton standard (sans ferrailage) en appliquant une charge jusqu'à la rupture et en calculant la résistance à partir de la charge maximale supportée (figure III-25). En plus éprouvette cylindrique 11/33 standard en béton seul, nous avons confectionné deux autres types d'éprouvettes; à savoir des éprouvettes cylindrique 11/33 en béton armé (armature longitudinale et transversale), le troisième type qui représente pour la nouveauté; où il s'agit d'éprouvettes cylindrique 11/33 en béton armé avec un confinement en fibre verre, voir même pour les bétons seul.



éprouvettes cylindrique 11/33 en béton avec un confinement en fibre verre,



éprouvettes cylindrique 11/33 en béton ordinaire



Fissuration sur éprouvette 11/33

Figure III-25 – Essais d'écrasement sur éprouvette cylindrique 11/33

Important : Les résultats et discussion des essais ci-dessus cités seront présentées dans suivant (chapitre IV).

III.11 Conclusion :

Ce chapitre présente les caractéristiques des matériaux de base employés dans la fabrication des divers types de béton. Nous avons détaillé les différents tests utilisés pour caractériser les matières premières, ainsi que la méthode de formulation ce que nous n'avions aucune connaissance, ce qui nous a motivé à l'apprendre et à acquérir plus d'expérience, et les proportions des divers composants du béton. Ensuite, nous avons analysé les comportements

des bétons frais et évalué les performances des bétons durcis. Cette partie de l'étude expérimentale se concentre sur la valorisation des agrégats légers. Les résultats des tests effectués sur le béton à l'état frais et durci sont présentés et discutés dans le chapitre suivant (chapitre IV).

Chapitre IV

Présentation des résultats expérimentaux: analyse et interprétation

IV.1 Introduction

Ce chapitre sera consacré à la présentation et analyse des résultats obtenus lors de notre programme expérimental, suite au protocole présenté en troisième chapitre et la lumière des résultats obtenus, vous pouvons discuter ces résultats en tenant compte de la nature des matériaux utilisés et la destination du béton pour les structures envisagées, et prendre des décisions au sujet de l'utilisation des bétons à base de polystyrène, dans ce même contexte des recommandations aux utilisateurs de ce matériau seront présentées. A titre de rappel du troisième chapitre; il s'agit bien de présenter les deux types de sollicitations ; à savoir l'essai de compression simple sur éprouvette 16/32 et l'essai de flexion simple en trois points et quatre points sur les différentes dimensions.

IV.2 Résultats expérimentaux

IV.2.1 Essai de compression sur éprouvette 16/32

Concernant l'essai de compression simple sur éprouvette 16/32 en béton ordinaire, béton léger à base de 10% de polystyrène ; de 20% de polystyrène et de 30% de polystyrène ; sous différents âges du béton selon la réglementation en vigueur au jeune âge jusqu'au durcissement du béton; à 7 jours ; 14 jours ; 21 jours et 28 jours, dont les résultats sont présentés sur les tableaux IV-1 au IV-4.

L'objectif fixé au début c'est de minimiser le maximum possible le poids du béton à condition que ce béton doit répondre aux exigences constructives normalisées à titre d'exemple la résistance, où l'idée de base est de substituer partiellement une classe en

l'occurrence le gravier 8/15 par des grain de matériaux léger. Dans ce cadre d'étude nous avons choisi comme granulats légers le polystyrène sous différents pourcentages. Comme résultats obtenus sur la comparaison des poids nous citons:

Le poids de l'éprouvette 28 jours de durcissement pour :

- un béton ordinaire est de 15,104 kg,
- un béton à base de 10% de polystyrène est de 14,947kg,
- un béton à base de 20% de polystyrène est de 14,702kg,
- un béton à base de 30% de polystyrène est de 13,905kg, soit 8% de réduction du poids,

Sur la base des résultats obtenus, nous pouvons dire que la légèreté est assurée sur le choix de ce matériau, chose qui répond favorablement aux objectifs fixés, d'autre test au laboratoire nous donne une chute importante lorsque en utilise une substitution de 50% soit une réduction de 30% du poids.

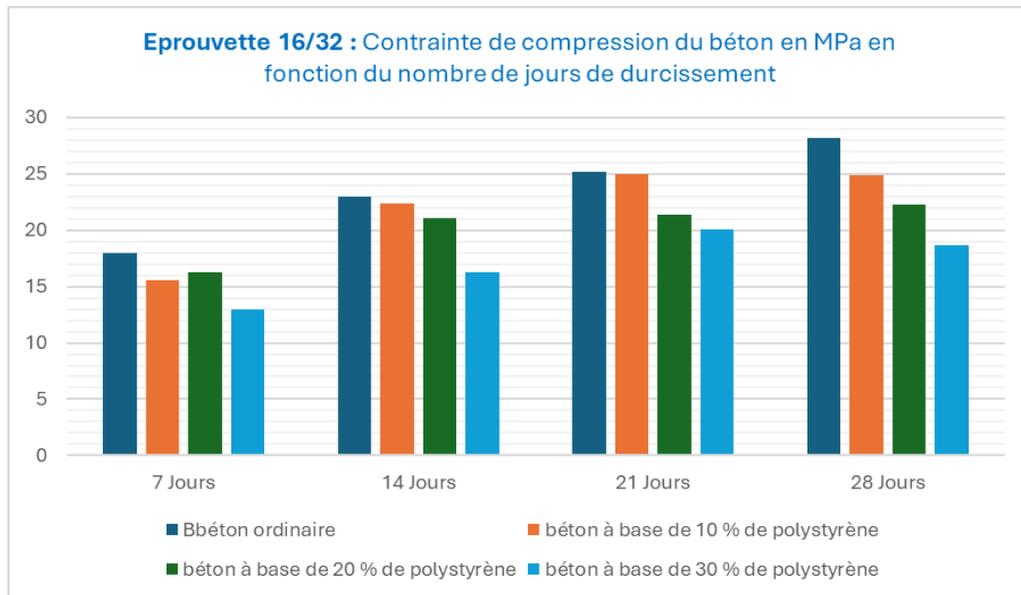


Figure IV-1 – Contrainte de compression du béton en MPa en fonction du nombre de jours de durcissement pour une éprouvette 16/32

Nous voulons montrer un problème important lié au choix du liant en l'occurrence le ciment, où nous avons testé deux types de ciment qui sont disponibles sur le marché local, à savoir le ciment Awted et le ciment Matine, sur le poids il n'y a pas de différence, mais sur le critère de résistance, il est souhaitable de signaler que la différence est importante ; soit 28.225 MPa

pour le ciment Awted et 20,901 MPa pour le ciment Matine, où il est déconseillé d'utiliser ce type de ciment comme béton de structure puisqu'il représente une faiblesse de résistance. Suite à comparaison des résultats de l'essai de compression de point de vue résistance, nous jugeons que la logique a été respectée, par exemple, la résistance de l'éprouvette 28 jours de durcissement pour :

- un béton ordinaire est de 28.225 MPa,
- un béton à base de 10% de polystyrène est de 24.92 MPa,
- un béton à base de 20% de polystyrène est de 22.283 MPa,
- un béton à base de 30% de polystyrène est de 18.648 MPa, soit 33% de réduction de la résistance, cette classe de substitution ne peut être utilisée comme béton de structure néanmoins-il est souhaitable voire même intéressant d'utiliser comme béton des éléments non structuraux ou même coffrage perdu pour les planchers cas des corps creux ; connu sous le nom de l'hourdis.

Il est clair que les granulats représentent le squelette du béton ; par conséquent plus le taux de granulats sera réduit et remplacé par du polystyrène plus nous avons enregistré une chute de résistance, ce qui confirme nos résultats expérimentaux (figure IV-1).

Tableau IV-1- Essais d'écrasement de béton ordinaire sur éprouvette 16/32

Essais d'écrasement de béton ordinaire sur éprouvette 16/32					
		Essai à 28 j	Essai à 21 j	Essai à 14 j	Essai à 7 j
	Date de coulage	21-mars-24	21-mars-24	21-mars-24	21-mars-24
	Date d'écrasement	18-avr-24	11-avr-24	04-avr-24	28-mars-24
1 ^{ère} éprouvette	Masse (kg)	15.086	15.019	15.176	15.076
	Résistance (MPa)	26.872	24.176	21.738	17.618
2 ^{ème} éprouvette	Masse (kg)	15.123	15.023	15.192	15.035
	Résistance (MPa)	29.579	26.177	24.244	18.233
Résultat moy Ret. «Ciment Awted	Masse (kg)	15.104	15.021	15,184	15,055
	Résistance (MPa)	28.225	25.1765	22,991	17,9255
Résultat moy Ret. « Ciment Matine	Masse (kg)	14 ,943	14 ,935	15.013	15.050
	Résistance (MPa)	20,901	19,318	16.530	15.446

Tableau IV-2- Essais d'écrasement de béton à base de 10 % de polystyrène sur éprouvette 16/32

Essais d'écrasement de béton à base de 10 % de polystyrène sur éprouvette 16/32					
		Essai à 28 j	Essai à 21 j	Essai à 14 j	Essai à 7 j
Date de coulage		25-mars-24	25-mars-24	25-mars-24	25-mars-24
Date d'écrasement		22-avr-2024	15-avr-24	08-avr-24	01-avr-24
1ère éprouvette	Masse (kg)	14.979	15.072	15.046	14.873
	Resistance (MPa)	25.04	23.973	24.752	14.928
2ème éprouvette	Masse (kg)	14.882	15.034	14.932	14.984
	Resistance (MPa)	23.401	25.242	20.018	17.419
3ème éprouvette	Masse (kg)	14.982	15.018	14.881	14.960
	Resistance (MPa)	26.33	25.569	22.267	15.536
Résultat moy Ret.	Masse (kg)	14.947	15.041	14.953	14.939
	Resistance (MPa)	24.92	24.928	22.346	15.961

Tableau IV-3- Essais d'écrasement de béton à base de 20 % de polystyrène sur éprouvette 16/32

Essais d'écrasement de béton à base de 20 % de polystyrène sur éprouvette 16/32					
		Essai à 28 j	Essai à 21 j	Essai à 14 j	Essai à 7 j
Date de coulage		28-mars-24	28-mars-24	28-mars-24	28-mars-24
Date d'écrasement		25-avr-24	18-avr-24	11-avr-24	04-avr-24
1ère éprouvette	Masse (kg)	14.828	14.761	14.796	14.490
	Resistance (MPa)	20.736	19.218	19.978	16.694
2ème éprouvette	Masse (kg)	14.856	14.764	14.558	14..518
	Resistance (MPa)	****	21.585	22.104	15.923
3ème éprouvette	Masse (kg)	14.576	14.429	14.739	14.559
	Resistance (MPa)	23.831	23.362	****	16.179
Résultat moy Ret.	Masse (kg)	14.702	14.651	14.677	14.522
	Resistance (MPa)	22.283	21.388	21.041	16.265

*un problème de mauvaise manipulation de la machine à signaler

Tableau IV-4- Essais d'écrasement de béton à base de 30 % de polystyrène sur éprouvette 16/32

Essais d'écrasement de béton à base de 30 % de polystyrène sur éprouvette 16/32					
		Essai à 28 j	Essai à 21 j	Essai à 14 j	Essai à 7 j
Date de coulage		01-avr-24	01-avr-24	01-avr-24	01-avr-24
Date d'écrasement		29-avr-24	22-avr-24	15-avr-24	08-avr-24
1ère éprouvette	Masse (kg)	13.773	14.12	13.572	13.683
	Resistance (MPa)	17.629	19.435	16.342	11.831
2ème éprouvette	Masse (kg)	14.15	14.068	13.71	13.721
	Resistance (MPa)	18.546	20.17	14.32	12.766
3ème éprouvette	Masse (kg)	13.791	14.022	13.943	13.851
	Resistance (MPa)	19.769	20.494	18.088	14.391
Résultat moy Ret.	Masse (kg)	13.905	14.070	13.741	13.751
	Resistance (MPa)	18.648	20.033	16.25	12.996

IV.2.2 poutres de dimension 10x10x40

Concernant l'essai de flexion simple sur poutre de dimension 10x10x40 en béton ordinaire, béton léger à base de 10% de polystyrène ; de 20% de polystyrène et de 30% de polystyrène ; sous différent âge du béton selon les normes technique au jeune âge jusqu'au durcissement du béton; à 7 jours ; 14 jours ; 21 jours et 28 jours. Le raisonnement de la question du poids est identique à l'essai de compression simple, où nous avons enregistré presque les mêmes chutes de poids pour les différents type de béton. Dans ce type de sollicitations il est intéressant de discuter le type de flexion trois et quatre points, pour contrôler la rupture en flexion ;il est souhaitable de procéder à la flexion quatre points, tout simplement parce que la flexion quatre possède un intervalle de contrôle et de suivi de le rupture du béton ; par contre la flexion trois points possède uniquement un point de contrôle dans ce cas le suivi devient difficile, dont les résultats sont présentées sur les tableaux IV-5 au IV-12. Nous pouvons argumenté cette vision par les résultats obtenus, à savoir :

- un béton ordinaire: la résistance en trois points est de 0,974 MPa, alors qu'en quatre points est de 1,359 MPa

- un béton à base de 10% de polystyrène: la résistance en trois points est de 1,019 MPa, alors qu'en quatre points est de 1,299 MPa,
- un béton à base de 20% de polystyrène: la résistance en trois points est de 0,94 MPa, alors qu'en quatre points est de 1,142 MPa,
- un béton à base de 30% de polystyrène: la résistance en trois points est de 1,013 MPa, alors qu'en quatre points est de 1,234 MPa,

Il est clair de noter que la résistance en flexion trois points est nettement inférieure à celle de la flexion quatre points, d'après les figures III-23 et III-24 qui représente ces essais sur la machine de flexion, la rupture en trois points est décalée du milieu de la poutre (à $L/2$), cela à peut être interprété suite à l'amorçage et la formation de la fissure qui été décalée du milieu en raison au maillot faible (faiblesse du béton), une fois la fissure formée nous avons enregistré une propagation de la fissure vers le milieu; les lèvres de la fissure se rétractent à cause de cette faiblesse, ce qui nous conduit à des résultats de flexion trois point inférieur à celle du quatre points.

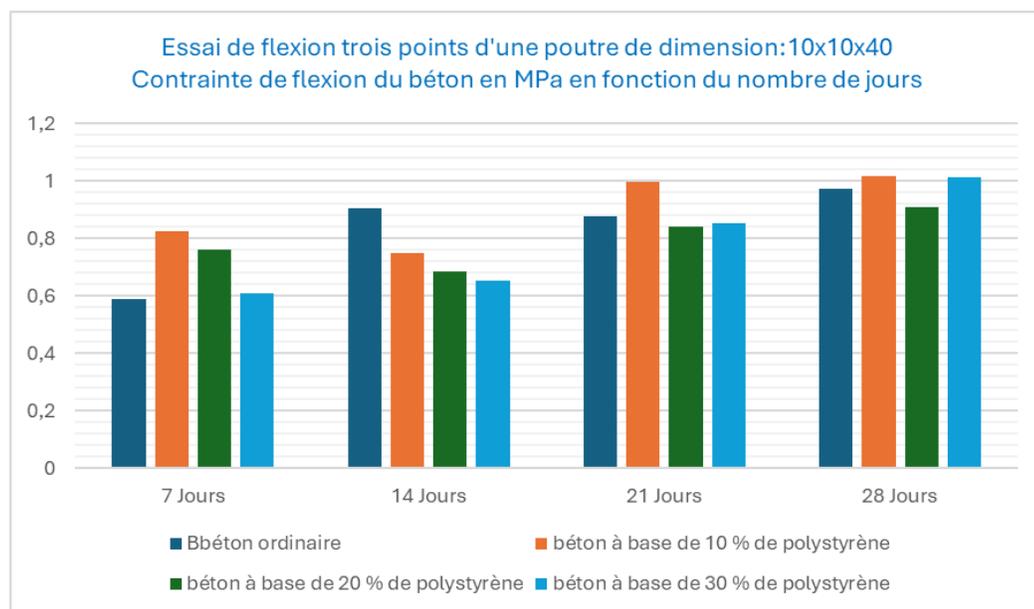


Figure IV-2 – Essai de flexion trois points d'une poutre de dimension: 10x10x40
Contrainte de flexion du béton en MPa en fonction du nombre de jours

Nous avons même contrasté sur l'histogramme en figures IV-2 et IV-3 où la logique est bonne pour la flexion quatre points allant de la résistance du béton à base de 30% de polystyrène en croissance jusqu'au béton ordinaire, par contre pour la flexion trois points une

perturbation sur l'évolution de la contrainte de flexion à cause de l'amorçage des fissures décalée du milieu de la poutre où une rétraction des lèvres de la fissure qui influe sur le résultats.

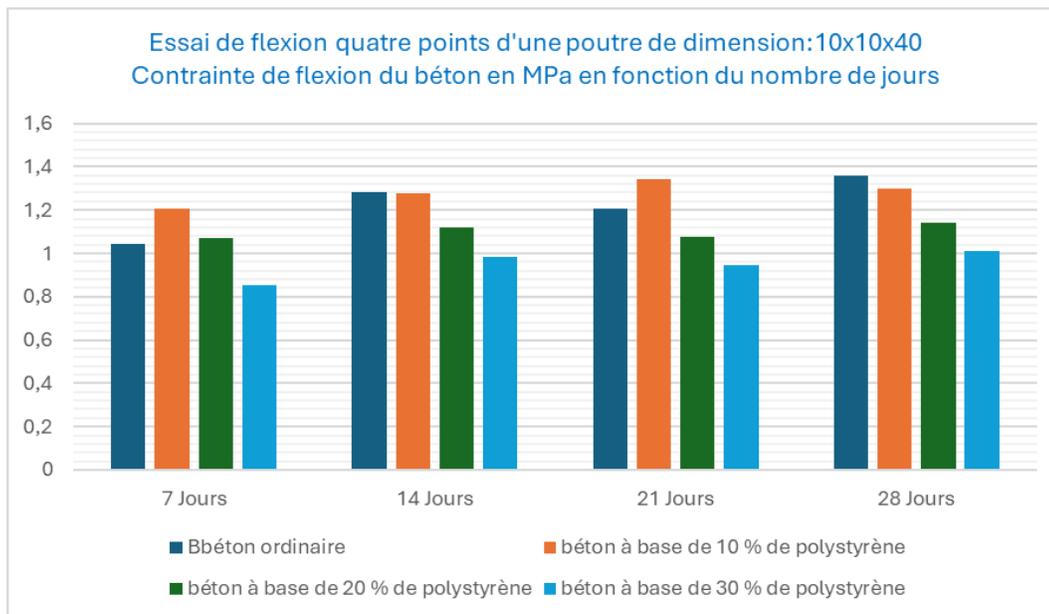


Figure IV-3 – Essai de flexion quatre points d'une poutre de dimension:10x10x40
Contrainte de flexion du béton en MPa en fonction du nombre de jours

Tableau IV-5- Essais de flexion trois points du béton ordinaire sur poutres de dimension 10x10x40

Essais de flexion trois points du béton ordinaire sur poutres de dimension 10x10x40					
		Essai à 28 j	Essai à 21 j	Essai à 14 j	Essai à 7 j
	Date de coulage	23-mars-24	23-mars-24	21-mars-24	21-mars-24
	Date d'écrasement	20-avr-24	13-avr-24	04-avr-24	28-mars-24
1ère poutre	Masse (kg)	9.562	9.475	9.679	9.541
	Resistance (MPa)	1.010	0.828	0.906	0.590
2ème poutre	Masse (kg)	9.837	9.658		
	Resistance (MPa)	0.939	0.942		
Résultat moy	Masse (kg)	9.699	9.566	9.679	9.541
	Ret. Resistance (MPa)	0.974	0.878	0.906	0.590

Tableau IV-6- Essais de flexion quatre points du béton ordinaire sur poutres de dimension 10x10x40

Essais de flexion quatre points du béton ordinaire sur poutres de dimension 10x10x40					
		Essai à 28 j	Essai à 21 j	Essai à 14 j	Essai à 7 j
Date de coulage		23-mars-24	23-mars-24	21-mars-24	21-mars-24
Date d'écrasement		20-avr-24	13-avr-24	04-avr-24	28-mars-24
1ère poutre	Masse (kg)	9.511	9.672	9.560	9.604
	Resistance (MPa)	1.305	1.259	1.283	1.043
2ème poutre	Masse (kg)	9.490	9.532		
	Resistance (MPa)	1.413	1.160		
Résultat moy Ret.	Masse (kg)	9.501	9.602	9.560	9.604
	Resistance (MPa)	1.359	1.209	1.283	1.043

Tableau IV-7- Essais de flexion trois points du béton à base de 10 % de polystyrène sur poutres de dimension 10x10x40

Essais de flexion trois points du béton à base de 10 % de polystyrène sur poutres de dimension 10x10x40					
		Essai à 28 j	Essai à 21 j	Essai à 14 j	Essai à 7 j
Date de coulage		26-mars-24	26-mars-24	25-mars-24	25-mars-24
Date d'écrasement		23-avr-24	16-avr-24	08-avr-24	01-avr-24
1ère poutre	Masse (kg)	9.422	9.475	9.444	9.527
	Resistance (MPa)	0.925	1.084	0.748	0.835
2ème poutre	Masse (kg)	9.615	9.493		
	Resistance (MPa)	1.114	0.915		
Résultat moy Ret.	Masse (kg)	9.518	9.484	9.444	9.527
	Resistance (MPa)	1.019	0.999	0.748	0.835

Tableau IV-8- Essais de flexion quatre points du béton à base de 10 % de polystyrène sur poutres de dimension 10x10x40

Essais de flexion quatre points du béton à base de 10 % de polystyrène sur poutres de dimension 10x10x40					
		Essai à 28 j	Essai à 21 j	Essai à 14 j	Essai à 7 j
Date de coulage		26-mars-24	26-mars-24	25-mars-24	25-mars-24
Date d'écrasement		23-avr-24	16-avr-24	08-avr-24	01-avr-24
1ère poutre	Masse (kg)	9.453	9.473	9.442	9.487
	Resistance (MPa)	1.376	1.204	1.278	1.208
2ème poutre	Masse (kg)	9.389	9.828		
	Resistance (MPa)	1.222	1.48		
Résultat moy Ret.	Masse (kg)	9.421	9.650	9.442	9.487
	Resistance (MPa)	1.299	1.342	1.278	1.208

Tableau IV-9- Essais de flexion trois points du béton à base de 20 % de polystyrène sur poutres de dimension 10x10x40

Essais de flexion trois points du béton à base de 20 % de polystyrène sur poutres de dimension 10x10x40					
		Essai à 28 j	Essai à 21 j	Essai à 14 j	Essai à 7 j
Date de coulage		30-mars-24	30-mars-24	28-mars-24	28-mars-24
Date d'écrasement		27-avr-24	20-avr-24	11-avr-24	04-avr-24
1ère poutre	Masse (kg)	9.260	9.034	9.036	9.434
	Resistance (MPa)	0.927	0.799	0.687	0.760
2ème poutre	Masse (kg)	9.178	9.495		
	Resistance (MPa)	0.894	0.884		
Résultat moy Ret.	Masse (kg)	9.219	9.265	9.036	9.434
	Resistance (MPa)	0.911	0.842	0.687	0.760

Tableau IV-10- Essais de flexion quatre points du béton à base de 20 % de polystyrène sur poutres de dimension 10x10x40

Essais de flexion quatre points du béton à base de 20 % de polystyrène sur poutres de dimension 10x10x40					
		Essai à 28 j	Essai à 21 j	Essai à 14 j	Essai à 7 j
Date de coulage		30-mars-24	30-mars-24	28-mars-24	28-mars-24
Date d'écrasement		27-avr-24	20-avr-24	11-avr-24	04-avr-24
1ère poutre	Masse (kg)	9.066	9.124	9.015	9.127
	Resistance (MPa)	1.12	1.054	1.121	1.070
2ème poutre	Masse (kg)	9.22	9.358		
	Resistance (MPa)	1.164	1.096		
Résultat moy Ret.	Masse (kg)	9.143	9.241	9.015	9.127
	Resistance (MPa)	1.142	1.075	1.121	1.070

Tableau IV-11- Essais de flexion trois points du béton à base de 30 % de polystyrène sur poutres de dimension 10x10x40

Essais de flexion trois points du béton à base de 30 % de polystyrène sur poutres de dimension 10x10x40					
		Essai à 28 j	Essai à 21 j	Essai à 14 j	Essai à 7 j
Date de coulage		02-avr-24	02-avr-24	02-avr-24	01-avr-24
Date d'écrasement		30-avr-24	30-avr-24	23-avr-24	15-avr-24
1ère poutre	Masse (kg)	9.116	9.109	8.613	8.516
	Resistance (MPa)	1.052	0.903	0.652	0.607
2ème poutre	Masse (kg)	8.908	9.175		
	Resistance (MPa)	0.974	0.806		
Résultat moy Ret.	Masse (kg)	9.048	9.142	8.613	8.516
	Resistance (MPa)	1.013	0.854	0.652	0.607

Tableau IV-12- Essais de flexion quatre points du béton à base de 30 % de polystyrène sur poutres de dimension 10x10x40

Essais de flexion quatre points du béton à base de 30 % de polystyrène sur poutres de dimension 10x10x40					
		Essai à 28 j	Essai à 21 j	Essai à 14 j	Essai à 7 j
	Date de coulage	02-avr-24	02-avr-24	01-avr-24	01-avr-24
	Date d'écrasement	30-avr-24	23-avr-24	15-avr-24	08-avr-24
1ère poutre	Masse (kg)	9.060	8.830	8.697	8.705
	Resistance (MPa)	1.258	0.988	0.983	0.855
2ème poutre	Masse (kg)	8.789	8.510		
	Resistance (MPa)	1.210	0.902		
Résultat moy	Masse (kg)	8.925	8.670	8.697	8.705
Ret.	Resistance (MPa)	1.234	0.945	0.983	0.855

IV.2.3 Poutres de dimension 10x15x80

Passant de l'essai de flexion simple sur poutre de dimension 10x10x40 au poutre de dimensions 10x15x80 en béton armé et non armé, ce qu'on appelle l'effet d'échelle, sur les quatre types de béton à savoir le béton ordinaire, béton léger à base de 10% de polystyrène ; de 20% de polystyrène et de 30% de polystyrène ; les résultats sont testées à 28 jours de durcissement, afin d'éviter la répétitions ; le raisonnement de l'analyse de poids et la résistance du type d'essai (trois et quatre points) reste identique aux analyse précédentes. A la différence ce qui précède nous analysons l'effet des armature pour les poutres considérées à 28 jours ; les résultats présentées sur les figures IV-4 et IV-5 et les tableaux de IV-13 et IV-16, montrent clairement l'effet des armatures; où nous avons enregistré que la résistance d'un béton armé est six fois plus qu'un béton non armé, la fissure apparait rapidement dans les béton armé que ce soit pour les bétons ordinaire ou les bétons légers à différentes substitution, cette apparition rapide des fissures est expliquée que le béton résiste mal à la traction conformément au règlement de calcul des bétons, la présence des armatures dans les bétons armé peut retarder ou arrêtee complètement cette fissuration. En conséquence, nous dire qu'un béton armé est plus rigide que celui sans armature.

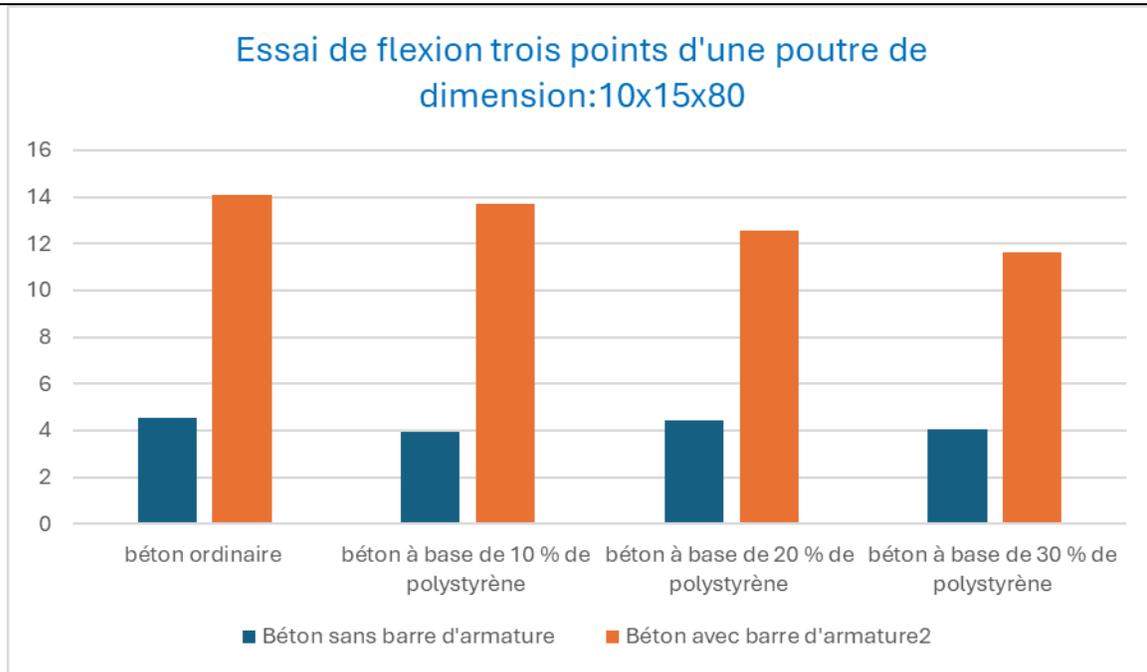


Figure IV-4 – Essai de flexion trois points d'une poutre de dimension:10x15x80
 Contrainte de flexion du béton en MPa

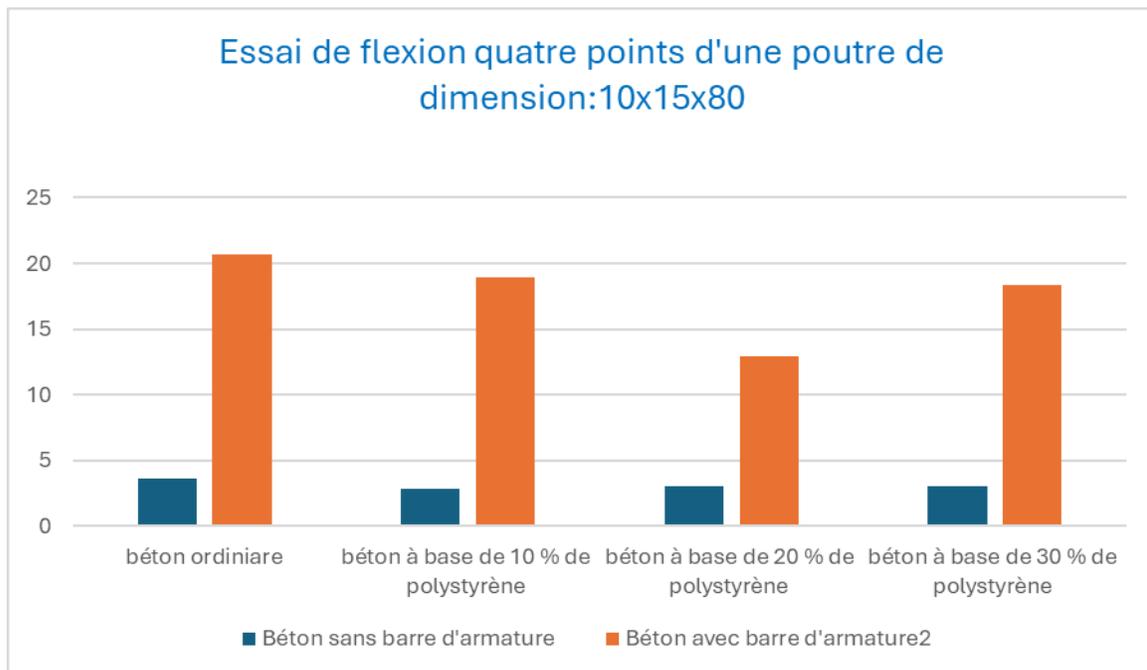


Figure IV-5 – Essai de flexion quatre points d'une poutre de dimension:10x15x80
 Contrainte de flexion du béton en MPa

Concernant les poutres renforcées par des fibres de verre placée avant coulage des bétons, nous avons constaté une faible amélioration de résistance, néanmoins le mode de rupture est différent des poutres non renforcées c'est-à-dire que nous avons enregistré une rupture en flexion pour ces dernières poutres par contre et vu que les fibres empêchent la rupture en flexion ; nous avons obtenus dans ce type de poutre renforcée une rupture en cisaillement.

Tableau IV-13- Essais de flexion du béton ordinaire sur poutres de dimension 10x15x80

Essais de flexion du béton ordinaire sur poutres de dimension 10x15x80 Essai à 28 jours			
		Béton sans barre d'armature	Béton avec barre d'armature
Date de coulage		23-mars-24	23-mars-24
Date d'écrasement		20-avr-24	20-avr-24
flexion trois points	Masse (kg)	26.118	26.096
	Resistance (MPa)	4.518	14.094
flexion quatre points	Masse (kg)	26.019	26.819
	Resistance (MPa)	3.62	20.675

Tableau IV-14- Essais de flexion du béton à base de 10 % de polystyrène sur poutres de dimension 10x15x80

Essais de flexion du béton à base de 10 % de polystyrène sur poutres de dimension 10x15x80 Essai à 28 jours			
		Béton sans barre d'armature	Béton avec barre d'armature
Date de coulage		26-mars-24	26-mars-24
Date d'écrasement		23-avr-24	23-avr-24
flexion trois points	Masse (kg)	25.360	25.921
	Resistance (MPa)	3.944	13.688
flexion quatre points	Masse (kg)	25.759	26.083
	Resistance (MPa)	2.835	18.903

Tableau IV-15- Essais de flexion du béton à base de 20 % de polystyrène sur poutres de dimension 10x15x80

Essais de flexion du béton à base de 20 % de polystyrène sur poutres de dimension 10x15x80 Essai à 28 jours			
		Béton sans barre d'armature	Béton avec barre d'armature
Date de coulage		28-mars-24	28-mars-24
Date d'écrasement		25-avr-24	25-avr-24
flexion trois points	Masse (kg)	24.985	25.616
	Resistance (MPa)	4.412	12.542
flexion quatre points	Masse (kg)	24.838	25.512
	Resistance (MPa)	3.035	18.318

Tableau IV-16- Essais de flexion du béton à base de 30 % de polystyrène sur poutres de dimension 10x15x80

Essais de flexion du béton à base de 30 % de polystyrène sur poutres de dimension 10x15x80 Essai à 28 jours			
		Béton sans barre d'armature	Béton avec barre d'armature
Date de coulage		01-avr-24	01-avr-24
Date d'écrasement		29-avr-24	29-avr-24
flexion trois points	Masse (kg)	24.392	25.088
	Resistance (MPa)	4.072	11.651
flexion quatre points	Masse (kg)	24.488	25.360
	Resistance (MPa)	3.057	12.929
flexion quatre points poutre renforcée par fibre de verre coulée avec le béton	Masse (kg)	-----	24.952
	Resistance (MPa)	-----	13.007

IV.2.4 poutres de dimension 10x20x120

Restant dans le même cadre l'effet d'échelle, où nous avons opter à une autre dimension supérieur de ce qui précède en l'occurrence l'essai de flexion simple sur poutre de dimension 10x20x120 en béton armé ordinaire et en béton léger à base de 30% de polystyrène, les résultats sont testées à 28 jours de durcissement, vu l'existence des armatures dans la partie tendue ; nous avons constaté que tous les modes de rupture se présente en cisaillement car

c'est les armatures en aciers qui empêchent la rupture en flexion, c'est logique que la résistance d'un béton témoin reste toujours supérieur à celui d'un béton léger à base de polystyrène, nous avons présentés ces résultats sur les tableaux IV-17 et 18. Pour le complément des résultats sur l'effet de l'utilisation des matériaux composites pour le renforcement des poutres en béton armé, il est clair que le béton ne résiste pas à la traction ; pour cela et vu que les composites ont une grande résistance à la traction, le collage externe des fibres de verre sur la partie tendue de la poutre augmente considérablement la résistance autrement la rigidité de la poutre renforcée, d'où le comportement mutuelle de l'assemblage des deux matériaux (béton et fibre de verre) offre l'avantage d'une poutre rigide et moins déformable, ce qui est présenté sur les résultats de ce type d'analyse, que ce soit pour les renforcement des poutres en flexion ou bien les renforcement des poutres en flexion et cisaillement simultanément.

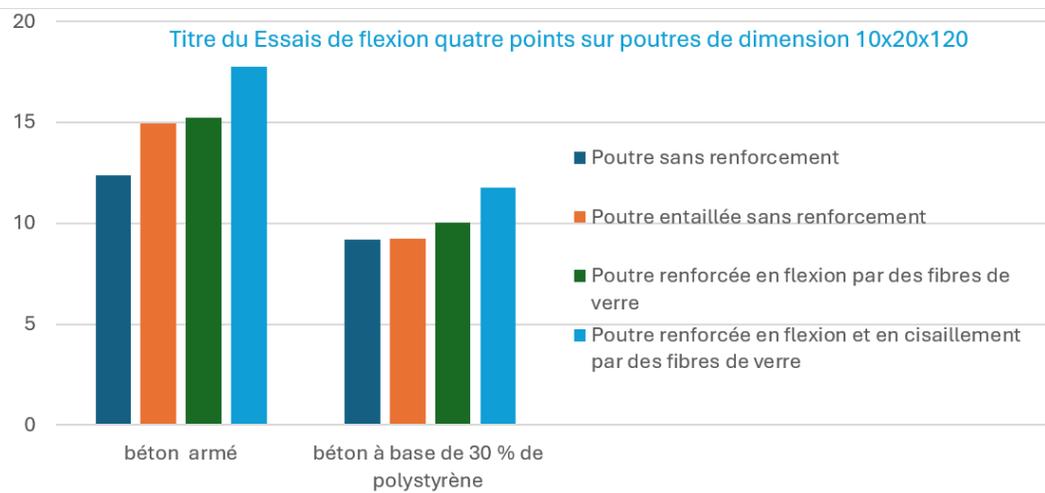


Figure IV-6 – Essai de flexion quatre points des poutres de dimension:10x20x120 Contrainte de flexion du béton en MPa à 28 jours

Un autre type d'essai présentée sur l'essai de flexion trois points sur poutre entaillée de dimension 10x20x120 en béton armé ordinaire et en béton léger à base de 30% de polystyrène, nous avons utilisé ces entailles pour donner une orientation des fissures sur les parties tendues, mais vu l'existence des armatures dans les parties tendues qui ont arrêtés ces fissures en flexion par absorption de l'énergie de fissurations, puisque nous encore augmenter

les charges de flexion alors dans cette situation nous avons enregistré une rupture par cisaillement.

Tableau IV-17- Essais de flexion quatre points du béton ordinaire sur poutres de dimension 10x20x120 :

Essais de flexion quatre points du béton armé sur poutres de dimension 10x20x120 :				
Essai à 28 jours				
	Poutre sans renforcement	Poutre entaillée sans renforcement	Poutre renforcée en flexion par des fibres de verre	Poutre renforcée en flexion et en cisaillement par des fibres de verre
Date de coulage	30-mars-24	30-mars-24	30-mars-24	30-mars-24
Date d'écrasement	27-avr-24	27-avr-24	27-avr-24	27-avr-24
Masse (kg)	52	57	56.5	55
Resistance (MPa)	12.763	14.969	15.24	17.754

Tableau IV-18- Essais de flexion quatre points du béton à base de 30 % de polystyrène sur poutres de dimension 10x20x120 :

Essais de flexion quatre points du béton à base de 30 % de polystyrène sur poutres de dimension 10x20x120				
Essai à 28 jours				
	Poutre sans renforcement	Poutre entaillée sans renforcement	Poutre renforcée en flexion par des fibres de verre	Poutre renforcée en flexion et en cisaillement par des fibres de verre
Date de coulage	01-avr-24	01-avr-24	01-avr-24	01-avr-24
Date d'écrasement	29-avr-24	29-avr-24	29-avr-24	29-avr-24
Masse (kg)	48.5	52.75	51.5	53.5
Resistance (MPa)	9.208	9.26	10.025	11.764

IV.2.5 éprouvette de dimension 11/33

Il s'agit d'un essai de compression simple sur éprouvette 11/33 en béton ordinaire, béton léger à base de 10% de polystyrène; de 20% de polystyrène et de 30% de polystyrène ; l'essai d'écrasement est effectué à 28 jours de durcissement, comme paramètres à prendre en considération ; nous avons testé les bétons avec et sans armature, aussi nous voulons testé l'effet du confinement par matériaux composite sur le type de béton le plus faible en l'occurrence le béton léger à base de 30% de polystyrène.

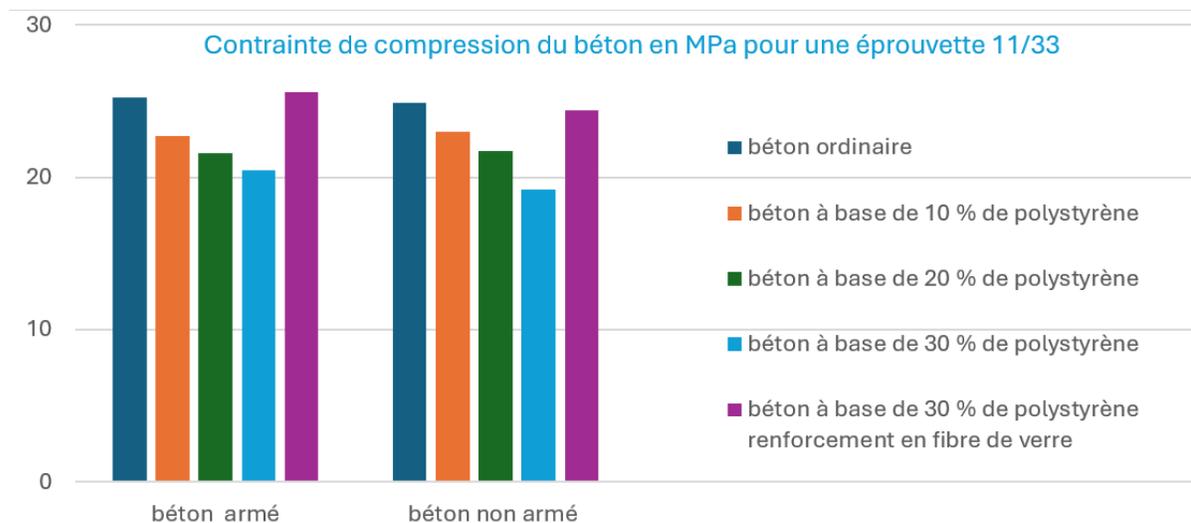


Figure IV-7 – Contrainte de compression du béton en MPa e pour des éprouvettes 11/33 à 28 jours

Tableau IV-19- Essais d'écrasement de béton non armé sur éprouvette 11/33

Essais d'écrasement de béton non armé sur éprouvette 11/33 : Essai à 28 jours

	béton ordinaire	béton à base de 10 % de polystyrène	béton à base de 20 % de polystyrène	béton à base de 30 % de polystyrène	béton à base de 30 % de polystyrène renforcement en fibre de verre
Date de coulage	21-mars-24	26-mars-24	30-mars-24	01-avr-24	01-avr-24
Date d'écrasement	28-avr-24	23-avr-24	27-avr-24	29-avr-24	29-avr-24
Masse (kg)	6.883	6.653	6.504	6.313	6.410
Resistance (MPa)	24.881	22.396	21.700	19.220	24.385

A la lumière des résultats obtenus (voir les tableaux IV-19 au IV-20), Allant du béton le moins rigide (30% de polystyrène) vers le béton le plus rigide (béton ordinaire) que ce soit avec ou sans armature, nous avons enregistré une suite logique, plus le béton devient rigide ; plus il supporte un effort de compression important, même si en comparant l'effet des armatures ; leur présence augmente considérablement la résistance à la compression. Concernant le confinement des éprouvette en béton à base de 30 % de polystyrène renforcement en fibre de verre, nous pouvons dire à partir des résultats que cette technique est efficace dans la mesure où l'augmentation est garantie de la charge ultime que peut

supporter l'éprouvette, en conséquence une résistance nettement supérieure à celle des bétons non confinés.

Tableau IV-20- Essais d'écrasement de béton armé sur éprouvette 11/33

Essais d'écrasement de béton armé sur éprouvette 11/33 : Essai à 28 jours					
	béton ordinaire	béton à base de 10 % de polystyrène	béton à base de 20 % de polystyrène	béton à base de 30 % de polystyrène	béton à base de 30 % de polystyrène renforcement en fibre de verre
Date de coulage	21-mars-24	26-mars-24	30-mars-24	01-avr-24	01-avr-24
Date d'écrasement	28-avr-24	23-avr-24	27-avr-24	29-avr-24	29-avr-24
Masse (kg)	7.429	7.330	7.163	6.980	7.106
Resistance (MPa)	25.242	22.685	21.557	20.441	25.616

IV.3 Conclusion

Ce chapitre a mis en lumière les performances comparatives entre le béton ordinaire et les bétons légers à base de polystyrène, en se concentrant sur leurs caractéristiques mécaniques et physiques. Les résultats expérimentaux ont démontré que le béton léger à base de polystyrène offre une résistance adéquate tout en présentant des avantages significatifs en termes de légèreté. En conclusion, le béton léger à base de polystyrène émerge comme une alternative intéressante et innovante, présentant un potentiel considérable pour transformer les pratiques de construction actuelles.

Chapitre V

Utilisation des bétons légers à base de polystyrène : Prototypes des éléments constructifs

V.1 Introduction

Les éléments non structuraux sont des éléments qui ne représentent pas une fonction porteuse et de résistance aux actions sismiques. Pour cette raison, ils sont considérés comme des éléments secondaires.

Ce sont distingués suivant la fonction qu'ils assurent :

- Les éléments d'ouvrages (cheminées, cloisons, éléments de façade, plafonds suspendus...) contribuent de façon négligeable à la reprise des efforts dans la structure,
- Les équipements techniques se caractérisent par des fonctions annexes au clos et couvert, par exemple en assurant des fonctions de confort ou d'exploitation du bâtiment (chauffage, éclairage, distribution d'eau, ascenseurs...).

Les éléments non structuraux du cadre sont d'après le guide « Dimensionnement parasismique des éléments non structuraux du cadre bâti » voir le tableau suivant :

Tableau V-1- familles d'éléments non structuraux du cadre bâti au sens du guide "Dimensionnement parasismique des éléments non structuraux du cadre bâti"

Typologies d'éléments non structuraux visés	Familles d'éléments non structuraux visés
Éléments assurant la fonction de clos et couvert	- Éléments de façade (a) - Menuiseries extérieures (b) - Éléments de couverture (c)
Éléments intérieurs surfaciques verticaux	- Cloisons

et horizontaux	- Doublages - Plafonds suspendus - Planchers surélevés
Autres	- Éléments rapportés n'ayant pas de fonction portante (d) - Souches de cheminées maçonnées (e) - Éléments maçonnés : acrotères, balustres, garde-corps

Notons par :

- (a) Cette famille regroupe tous les éléments de façade et donc les éléments non structuraux suivants : les éléments de murs non structurels, bardages rapportés industriels ou translucides, façades légères non porteuses, parois vitrées, isolation rapportée extérieure...Elle est étendue aux éléments de façade inclinés dont l'inclinaison par rapport à la verticale est inférieure à 15°. Les éléments tels que les coffres de volets roulants, les volets battants, grilles de fermeture, barreaudage, enseignes et éléments équivalents ne font pas l'objet de dispositions parasismiques.
- (b) Cette famille regroupe toutes les menuiseries extérieures (fenêtres et porte-fenêtre) qu'elles soient montées en applique intérieure, en applique extérieure ou en tunnel (fixation à la structure de la paroi verticale).
- (c) Cette famille regroupe les grands et petits éléments de couverture et les isolants supports de couverture. Elle ne comprend pas les éléments de couverture des éléments visés à l'alinéa suivant (d).
- (d) Sont notamment visés dans cette famille les auvents, les marquises et les couvertures de vérandas. A contrario, dans la mesure où ils assurent une fonction portante, les balcons, coursives et escaliers ne sont pas à considérer dans cette catégorie mais font partie des éléments structuraux.
- (e) Cette famille concerne uniquement les souches et non les conduits de fumée, qui ne font pas partie des éléments non structuraux du cadre bâti.

Les équipements techniques ne sont pas considérés comme des éléments non structuraux du cadre bâti.

Toutefois, les équipements techniques assurant une fonction de clos et de couvert sont, par destination, à considérer comme des éléments non structuraux du cadre bâti.

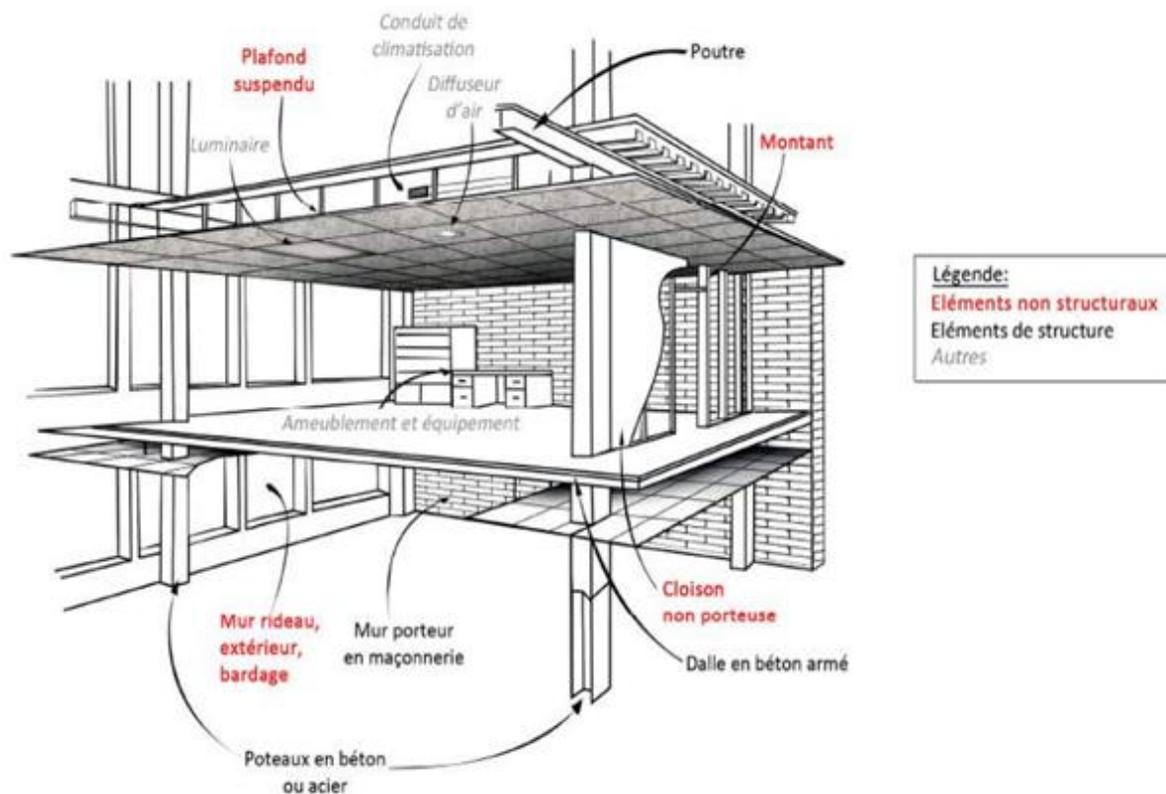


Figure V-1 - Exemple d'éléments structuraux et d'éléments non structuraux du cadre bâti

Dans le séisme de Boumerdes (21 mai 2003) les bâtiments avaient subi de graves dégâts. Les personnes qui ont été interrogé ; ont déclaré d'avoir remarqué un beaucoup de dommages à ses éléments structurels et non structurels; ils ont également confirmé que le les dommages ont eu un impact sur leurs tâches de travail. Les éléments structurels se sont totalement effondrés dans la majorité de l'établissement. Des éléments non structurels étaient tombés, se sont brisés et ont rendu la zone inaccessible de toutes les ailes [56].



Figure V-2 - Chute d'éléments non structuraux : séisme de Boumerdes (21 mai 2003)



Figure V-3 - Chute d'éléments non structuraux : séisme de Lorca 2011

le contenu des bâtiments– livres et rayons, meubles, classeurs, étagères de rangement, etc.

V.2 Les éléments non structuraux légers à base de polystyrène

V.2.1 Objectif de ces éléments

Dans le cadre de l'amélioration du domaine de la construction comme les autres domaines, afin d'être à jour aux récents changements climatique et environnemental, notamment les risques majeurs à savoir les séismes. Il est donc devenu nécessaire de trouver des solutions pour au moins atténuer et réduire leurs dégâts sismiques à titre d'exemple. Pour cela nous proposons un béton à base de polystyrène classé comme nouveau matériaux de construction,

en améliorant ces caractéristiques physiques à savoir la légèreté d'une part et les caractéristiques mécaniques en l'occurrence la résistance d'autre part. Ce nouveau béton à base de polystyrène amélioré répond bien aux défis économiques et qui présente plusieurs avantages et objectifs, citons à titre d'exemple :

- 1- La réduction des dommages et dégâts sismique à cause de leur légèreté, en plus, ils jouent un rôle des éléments de sauvetages dans les cas des inondations
- 2- L'isolation phonique et acoustique pour réduire les transmissions des bruits et la température de l'extérieure vers l'intérieure et vice versa et la protection contre l'humidité.
- 3- Idéal pour les surélévations : jusqu'à présent, nous pensions à la construction neuve, alors que le béton léger, grâce à sa légèreté, se prête également très bien aux surélévations. Le béton léger est un excellent choix. Non seulement il augmente la probabilité que vous puissiez ajouter plus d'un étage sans surcharger les fondations, mais c'est aussi une excellente occasion d'améliorer l'apparence d'un bâtiment grâce aux possibilités architecturales qu'il offre. Tout cela sans grand effort et en un temps relativement court.
- 4- Un dernier avantage lié à la légèreté et à sa rentabilité : le transport est plus efficace. Un camion ou deux sont souvent suffisants pour une seule maison. Contrairement au béton ou à la pierre, c'est le volume qui est le facteur limitant, et non le poids. Moins il y a de transport, moins il y a d'émissions et mieux c'est pour l'environnement. Il s'agit d'une bonne chose, et cela vient s'ajouter à tous les autres avantages qu'apporte une structure légère.

V.2.2 Présentations des éléments constructifs en béton léger bétons à base de polystyrène

Nous avons préparé trois modèles prototype en bétons à base de polystyrène, ce sont présentés ci-dessous pour bute montrer sa légèreté par la comparaison des poids; deux cas de chaque modèles ont été présenté dont le premier en béton ordinaire et le deuxième en bétons à base de polystyrène à des pourcentages variables en fonctions de la destination de l'élément considéré. Afin de réduire le poids de la construction civile et pour des exigences sismique, nous pouvons dire que plus le poids de la construction diminué plus nous aurons une réduction de l'effet sismique et par conséquent un dimensionnement économique ; objectif de

notre idée innovante. Nous proposons dans ce qui suit quelques éléments constructifs influent sur le poids de la structure, tel qu'à titre d'exemple, le corps creux pour les planchers, des éléments de maçonneries, des panneaux sandwich,

a) Corps creux pour les planchers :

Les corps creux en béton polystyrène, souvent appelés entrevous ou hourdis en polystyrène, sont des blocs légers insérés entre les poutrelles ou en acier dans les planchers.



corps creux en béton polystyrène

corps creux en béton traditionnel

Figure V-4 - Différents types de corps creux

L'utilisation de corps creux en béton polystyrène pour les planchers représente une solution efficace et moderne pour la construction, offrant des avantages significatifs en termes de poids, d'isolation et de cout.

Tableau V-2- Composition et poids des échantillons de corps creux

	Composition d'un m ³ de béton		Poids par m ² du plancher
Corps creux à base de béton ordinaire	Eau :	210.355 l	Poids de l'unité : 14,440 kg
	Ciment :	325 kg	
	Sable :	652.282 kg	
	Sable concassé :	148.931 kg	
	Gravillon :	1023.906 kg	
	Polystyrène :	0 l	
1 ^{er} Type de corps creux en béton léger à base de 75% polystyrène	Eau :	210.355 l	Poids de l'unité : 9,89 kg
	Ciment :	325 kg	Poids du m ² : 98,90 kg
	Sable :	652.282 kg	Soit un gain par m ² : 31,5%
	Sable concassé :	148.931 kg	
	Gravillon :	255.9765 kg	
	Polystyrène :	603.490 l	

2 ^{ème} Type de corps creux en béton léger à base de 100% polystyrène	Eau :	210.355 l	Poids de l'unité : 8,77 kg
	Ciment :	325 kg	Poids du m ² : 87,70 kg
	Sable :	652.282 kg	Soit un gain par m ² : 40,00%
	Sable concassé :	148.931 kg	
	Gravillon :	0 kg	
	Polystyrène :	804.653 l	

b) Élément de maçonnerie :

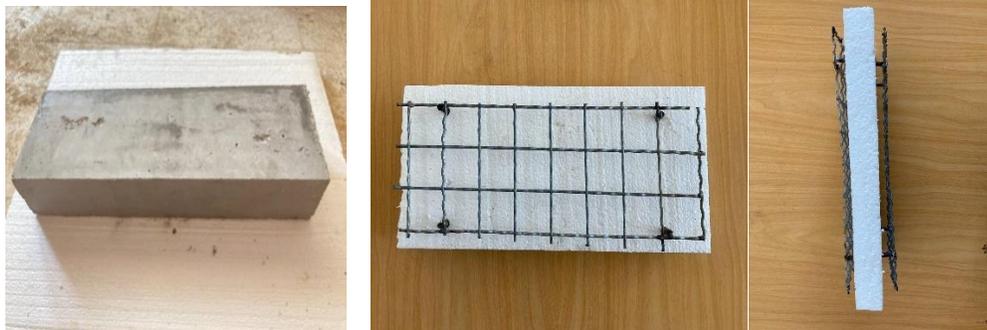
Un élément de maçonnerie en béton polystyrène fait référence à un matériau de construction composite qui combine les propriétés du béton et du polystyrène expansé. Ces éléments sont souvent utilisés pour leurs avantages en termes d'isolation thermique et phonique, ainsi que pour leur légèreté comparée aux éléments en béton traditionnel.

Et pour cela nous avons préparé un prototype de dimensions (10x20x60)

Tableau V-3- Composition et poids des échantillons de Élément de maçonnerie

	Composition d'un m ³ de béton	Poids par m ² du mur	
Elément de maçonnerie à base de béton ordinaire	Eau :	210.355 l	Poids de l'unité : 30 kg
	Ciment :	325 kg	
	Sable :	652.282 kg	
	Sable concassé :	148.931 kg	
	Gravillon :	1023.906 kg	
	Polystyrène :	0 l	
Elément de maçonnerie en béton léger à base de 30% polystyrène	Eau :	210.355 l	Poids de l'unité : 17 kg
	Ciment :	325 kg	Poids du m ² : 141.660 kg
	Sable :	652.282 kg	Soit un gain par m ² : 43,33%
	Sable concassé :	148.931 kg	
	Gravillon :	761.734 kg	
	Polystyrène :	241.396 l	
Elément de maçonnerie en béton léger à base de 75% polystyrène	Eau :	210.355 l	Poids de l'unité : 12 kg
	Ciment :	325 kg	Poids du m ² : 100 kg
	Sable :	652.282 kg	Soit un gain par m ² : 60,00%
	Sable concassé :	148.931 kg	
	Gravillon :	255.9765 kg	
	Polystyrène :	603.490 l	

Ces éléments sont souvent utilisés dans la construction de murs, cloisons, et même pour des applications de coffrage isolant. Ils offrent un bon compromis entre performance énergétique et simplicité de mise en œuvre.



L'élément après le collage

Noyau de l'élément de maçonnerie

Figure V-5 - Elément de maçonnerie

d) élément sandwich (panneaux publicitaire) :

Un panneau sandwich en béton polystyrène est un type de matériau de construction composite qui combine des couches de béton et de polystyrène expansé pour créer un élément de construction multifonctionnelle.

Et pour cela notre équipe elle a préparé un prototype de dimensions (40x60x6) au but d'utilisé comme un panneau publicitaire leur structure elle est comme suit :

- Couches extérieures : deux couches de béton polystyrène qui fournissent résistance et durabilité.

Tableau V-4- Composition et poids des échantillons de élément sandwich

	Composition d'un m ³ de béton		Poids par m ² du plancher
élément sandwich à base de 100% polystyrène	Eau :	210.355 l	Poids de l'unité : 17,50 kg
	Ciment :	325 kg	Poids du m ² : 72,916kg
	Sable :	652.282 kg	
	Sable concassé :	148.931 kg	
	Gravillon :	0 kg	
	Polystyrène :	804.653 l	

- Noyau intérieur : une plaque de polystyrène qui offre une isolation thermique et acoustique.

- L'utilisation d'un panneau sandwich en béton polystyrène comme panneau publicitaire est une idée innovante qui combine la robustesse et la durabilité du béton avec les avantages isolants du polystyrène .voici quelques applications pour ce dernier :
- Panneaux d'affichage en bord de route : idéale pour les zones où les panneaux doivent résister aux conditions météorologiques.
- Panneaux d'affichage urbains : utilisés dans les centres villes, où la résistance aux graffitis et aux actes de vandalisme est essentielle.



L'élément sandwich après le collage



Noyau de l'élément de sandwich

Figure V-6 - élément sandwich

V.3 Conclusion

L'utilisation des éléments de construction en béton polystyrène offre plusieurs avantages, notamment une meilleure isolation thermique et acoustique, une légèreté accrue facilitant le transport et l'installation, ainsi qu'une résistance aux intempéries et aux incendies. Ces matériaux permettent également une réduction des coûts énergétiques et une amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments. En conclusion, le béton polystyrène représente une solution innovante et durable pour les constructions modernes, alliant performance et économie.

Conclusion

Cette recherche a révélé des différences notables entre le béton ordinaire et le béton léger à base de polystyrène, en mettant en évidence les avantages et les inconvénients de chaque type de matériau. Les tests expérimentaux ont montré que le béton léger à base de polystyrène, malgré sa densité réduite, possède des propriétés mécaniques suffisamment robustes pour diverses applications structurelles. En outre, ce type de béton offre des bénéfices supplémentaires en termes d'isolation thermique et acoustique, ainsi que de résistance à l'humidité, le rendant particulièrement adapté pour les constructions nécessitant une performance énergétique accrue et une meilleure durabilité face aux conditions environnementales adverses.

L'analyse approfondie a permis de constater que le béton léger à base de polystyrène pourrait jouer un rôle crucial dans l'avenir de la construction durable, notamment en raison de sa capacité de réduire les impacts sismiques et à améliorer le confort des bâtiments. Concernant l'utilisation des bétons légers est une approche couramment adoptée dans le domaine de la construction pour la rénovation des anciennes structures. Ces matériaux permettent de bâtir sur des sols à faible capacité portante et de réduire la dimension des fondations en diminuant les charges permanentes, par conséquent le prix de la construction devient économique.

Les essais effectués au laboratoire ont révélé que le béton léger à base de polystyrène présente une densité significativement inférieure à celle du béton traditionnel, ce qui le rend particulièrement adapté pour les applications nécessitant une réduction de la charge structurelle. Bien que la résistance à la compression soit diminuée par les substituant des granulats, elle reste suffisante pour diverses applications structurelles. Des ajustements dans les proportions des composants, ainsi que l'ajout de fibres de verre ou d'autres matériaux de renforcement, peuvent compenser partiellement cette perte de résistance.

Les résultats de cette recherche suggèrent que le béton léger à base de polystyrène peut être utilisé dans plusieurs applications, notamment dans la construction des planchers, de panneaux de maçonnerie et/ou de remplissage, d'éléments de cloisons et d'isolation thermique des murs et même pour les panneaux sandwichs. Cependant, pour des applications structurelles majeures, des recherches supplémentaires et des développements technologiques sont nécessaires pour optimiser les formulations et garantir une résistance mécanique adéquate. Du point de vue environnemental, l'utilisation de polystyrène comme agrégat léger dans le béton permet de valoriser les matériaux locaux, réduisant ainsi la quantité de polystyrène finissant dans les décharges. Cette approche contribue à une économie circulaire en donnant une nouvelle vie à un matériau autrement considéré comme un déchet.

Parmi l'impact socio-économique direct du nouveau béton proposé, nous citons un gain économique, qui aura des conséquences sur l'économie national. Vu que le poids de la construction est allégé ce qui conduit à réduire les dimensions de la structure en particulier l'acier de constructions utilisé et réduisant également le prix des bâtiments en Algérie, en conséquence cette nouvelle technique peut servir comme solution à la crise de logement. Vu la réduction du poids du bâtiment conduit à réduire l'effet des forces sismiques sur les bâtiments, assurant ainsi la sécurité et atténuant les dommages en cas de tremblement de terre.

En conclusion, le béton léger à base de polystyrène représente une avancée prometteuse dans le domaine des matériaux de construction durable. Il offre une solution viable pour la réduction du poids des structures, amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments et valorisation des déchets. Toutefois, pour une adoption généralisée, il est impératif de poursuivre les recherches pour optimiser ses propriétés et assurer une intégration harmonieuse dans les pratiques de construction actuelles .

En perspectives, des études complémentaires seront proposées à étudier, tel que :

- Nous souhaitons une généralisation de la solution proposé à l'échelle national, afin de réduire le cout de la construction,

- pour améliorer les caractéristique mécaniques, il est souhaitable d'ajouter des superplastifiant afin de rendre le béton à base de polystyrène maniable et de résistance acceptable,
- Voir aussi intéressant de tenir à l'ajout d'autre matériaux plus intelligents que le béton ; à titre d'exemple les composites collé extérieurement sur les surfaces tendues des éléments de béton à base de polystyrène,
- Une autre approche à proposer concernant les bétons à haute performance à base de polystyrène.

Bibliographie

- [1] R. HAMMAR « Etude de la réponse des éléments bidimensionnels en béton armé sous l'action des charges monotones en tenant compte de l'effet d'engrènement et de la densité du maillage » mémoire de magister université mouloud mammeri, Tizi Ouzou 2010/2011.
- [2] Ir. P. BOERAEVE «Composition du béton» Cours de Béton armé 2010
- [3] M. SHINK «Compatibilité élastique, Comportement mécanique et optimisation Des bétons de granulats légers». Thèse Université Laval Québec Avril 2003.
- [4] M. BEDERINA, «Caractérisation Mécanique Et Physique Des Bétons De Sables A Base De Déchets De Bois», Thèse De Doctorat En Génie Civil, De L'université De Laghouat, 25 Avril 2007.5
- [5] A. NEVILLE : «Propriétés des bétons». Eyrolles. Paris, 2000.
- [6] 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 Édition. Montréal 14 Avril 2000.
- [7] O. HERIHIRI « Formulation et Caractérisation des Bétons Légers. » université Mohamed Khider – Biskra 2010
- [8] SFBC «Mémento du béton cellulaire » Eyrolles juin 2005 France.
- [9] M. SHINK «Compatibilité élastique, Comportement mécanique et optimisation Des bétons de granulats légers». Université Laval Québec Avril 2003.
- [10] A. NEVILLE «Propriétés des bétons». Eyrolles. Paris, 2000.
- [11] M. Aslam, P. Shafigh, et M. Z. Jumaat, « Structural Lightweight Aggregate Concrete by Incorporating Solid Wastes as Coarse Lightweight Aggregate », Appl. Mech. Mater., vol. 749, p. 337-342, avr. 2015,

-
- [12] B. KOUIDI, Z. SAFA « Formulation et comportement physico-mécanique des bétons de sable à base granulats de polystyrène recyclé » Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER 2019
- [13] S.E. AIFA , GHELIAOUI Mohamed « Etude du comportement des bétons légers à haute température » Projet de fin d'étude, Universitaire Yahia FARES de Médéa 2018
- [14] G. DREUX & J. FESTA «Nouveau guide du béton et de ses constituants». 8ème Édition. Eyrolles. Mai 1998
- [15] M. ARNOULD, M. VIRLOGEUX «Granulats et bétons légers» Presses de ENPC, 1986.
- [16] A.M NEVILLE «Propriétés des bétons » Eyrolles, 2000
- [17] T.A. HOLM, J.P. RIES « Specified density concrete -- a transition, Proceeding of 2nd International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete», Kristiansand, NORWAY, P18-22 June, 2000
- [18] EuroLightCon, « Mechanical properties of lightweight aggregate concrete », Document BE96-3942/R23, European Union – Brite EuRam III, June 2000.
- [19] F. LARRARD , «Une approche de la formulation des bétons légers de structure» bulletin de liaison LCPC, 195, janv. – fév., P39 -47, 1995.
- [20] K. MILED, K. SAB «Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength» Experimental investigation and modeling, Mechanics of Materials, 39, P222-240, 2007.
- [21] ACI 213R-03, « Guide for structural lightweight-aggregate concrete» Reported by ACI Committee 213, American Concrete Institute, 2003.
- [22] LO T. Y., CUI H. Z., LI Z. G. «Influence of aggregate pre-wetting and fly ash on mechanical properties of lightweight concrete», Waste management, 24, P333- 338, 2004.
- [23] LO T. Y., TANG W. C., CUI H. Z., «The effects of aggregate properties on lightweight concrete, Building and Environment» 42, P3025-3029, 2007.
- [24] K. GANESH, D SARADHI, «Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume» Cement and Concrete Research, 33, P755-762, 2003
- [25] D. MORIN «Sur les bétons légers et leur comportement mécanique sous des sollicitations biaxiales», Mémoire de thèse, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1976.

-
- [26] J.MCHI, R. HUANG, C.C YANG, J.J CHANG «Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete», *Cement and Concrete Composites*, 25, P4197-205, 2003
- [27] D. JOZWIAK-NIEDZWIEDZKA «Scaling resistance of high performance concretes containing a small portion of pre-wetted lightweight fine aggregate» *Cement and Concrete Composites*, 27, P709-715, 2005
- [28] R.SAHIN, R. DEMIRBOGA, H. UYSAL,R. GUL, «The effects of different cement dosages, slumps and pumice aggregate ratios on the compressive strength and densities of concrete» *Cement and Concrete Research*, 33, P1245-1249, 2003.
- [29] H.S WILSON, V.M MALHOTRA «Development of high strength lightweight concrete for structural applications» *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 10, P79-90, 1988
- [30]] D.P BENTZ, K.A SNYDER «Protected paste volume in concrete. Extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate» *Cement and Concrete Research*, 29, P1863-1867,1999.
- [31] S.M ZIANI-KERARTI , M.O BILLAMI « Etat de l'art sur la formulation et le comportement du béton léger à base de microbilles de polystyrène expansé » Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen 2020
- [32] M. Zeghidi « Etude des caractéristiques et durabilité des bétons légers à base de polystyrène», Thèse de master, Université de Biskra, 2018.
- [33] M. Chi, R. Huang, C. C. Yang, et J. J. Chang, « Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete », *Cem. Concr. Compos.*, vol. 25, no 2, p. 197-205, févr. 2003, doi: 10.1016/S0958-9465(02)00020-3.
- [34] Véronique, « Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique », p. 249
- [35] M. Gesoglu, E. Güneyisi, « Properties of lightweight aggregates produced with cold-bonding pelletization of fly ash and ground granulated blast furnace slag », *Mater. Struct.*, vol. 45, no 10, p. 1535-1546, oct. 2012, doi: 10.1617/s11527-012-9855-9.
- [36] Calais, « Propriétés mécaniques et durabilité d'un béton léger », p. 205.
-

-
- [37] O.Taleb, F. Ghomari, M. A. Boukli Hacene, E-H. Kadri, H.Soualhi, « Effet du dosage en superplastifiant sur les caractéristiques rhéologiques des bétons autoplaçants », Nature Technology Journal, Vol. A: Fundamental and Engineering Sciences, 18 (2018)
- [38] G. Dreux J Festa «Nouveau guide du béton et de ses constituants» Eyrolles Paris, (1998).
- [39] 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).
- [40] K. Yang « Caractérisation du comportement mécanique des bétons de granulats légers (expérience et modélisation) » Thèse de doctorat de l'université de cergy-pontoise, 2008.
- [41] M. Bentcliikou «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.
- [42] A. Laukaitis, R. Zurauskas, J. Keiene «The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties» Cement concrete composite, 41-47 pp, 2005.
- [43] J ANNOT «Métrologie thermique», Séminaire PER AUF, LEA Dakar, 18/11/08.
- [44] K.w.Meeks , N.J.Carino «Curing of High-performance Concrete Report of the state of the art», Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD 20899,181pages, Mars 1999.
- [45] Brevet FR 2 922 205 – A1, «Formulation, Utilisation et procédé d'obtention d'un béton léger structurel, Demandeur» Lafarge SA, Date de dépôt : 12 octobre 2007
- [46] 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.
- [47] B. SABAA, A.S RAVINDRARAJAH «Workability assessment for polystyrene Aggregate concrete» Centre University of Technology Sydney, Australia. 18-21pp, October 1999.
- [48] J.J Chauvin, G. Grimaldi «Les bétons de sable; Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées » (LCPC) N°157 pp.9-15, Sept. 1988.
- [49] 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.
- [50] GROUPE SPECIALIZE N°7 «produits et procédés pour chape et maçonnerie» Avis technique 7/2006-1 CNERIB.
-

- [51] A. GUEZOULI , A. BENAÏSSA «le polys beto un nouveau matériau de construction». Décembre 2005.
- [52] 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.
- [53] G. BRIGAUX «La maçonnerie » Eyrolles 1981.
- [54] SFBC «Mémento du béton cellulaire » Eyrolles juin 2005 France.
- [55] T. HASSAINE DAOUADJI «Propriétés physiques des matériaux de constructions». Travaux Pratiques du module Matériaux de Construction , 1995.
- [56] K.E Ramdane, M. Hamada , Y. Goto «BOUMERDES EARTHQUAKE The 21st May 2003 Japanese Reconnaissance Team» T echnical Report October 2004 DOI: 10.13140/RG.2.2.36186.34249, 2023.
- [57] N. Naumoski, S. Foo, M. Saatcioglu « Évaluation et atténuation des risques sismiques liés aux composants fonctionnels et opérationnels des bâtiments : une perspective canadienne » Document du Bureau de la protection des infrastructures essentielles et de la protection civile 2002.