

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 08 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : STRUCTURES

Présenté par : SENE Licka Khadidiatou

DIEYE Khadijatou

Thème : Les bétons à granulats légers

-Etudes des bétons à base d'argile expansée et à base
de coquillages réalisées au Sénégal-

Sous la direction de : Pr. Benmalek Med Larbi

Juillet 2019

Remerciements

Nous remercions le bon Dieu qui nous a donné le courage, la volonté et la force d'accomplir ce travail.

*Nous tenons à remercier notre encadreur **Mr Benmalek Med Larbi** qui nous a témoigné son soutien et sa confiance et qui nous a prodigué un enseignement rigoureux durant toutes les phases du mémoire.*

Ainsi que tous les enseignants qui nous ont assuré notre formation durant nos années d'étude.

Et tous ceux qui ont contribué à ce travail de près ou de loin.

SENE Licka Khadidiatou

DIEÛE Khadijatou

Dédicace

Je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir aidé à réaliser ce modeste travail.

Je dédie ce travail :

- ❖ A mes chers parents qui n'ont jamais cessé de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs,
- ❖ A ma grande sœur Sokhna et mes petites sœurs, pour leurs encouragements permanents, leur appui et leur soutien moral,
- ❖ A toute ma famille pour leurs conseils tout au long de mon parcours universitaire,
- ❖ A mon cher binôme, DIEYE Khadijatou, pour sa rigueur et sa sympathie,
- ❖ A tous mes amis de près ou de loin qui m'ont aidé et supporté dans les moments difficiles particulièrement à Saadatou, Hadiza, Aicha, Malika, Leila Gafou et Anna
- ❖ A ceux qui se sont sacrifiés et qui se sont donnés pour mes études.

Merci d'être toujours là pour moi.

Licka

Dédicace

Je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir aidé à réaliser ce modeste travail.

Je dédie ce travail :

- ❖ A mes chers parents maman Binetou et papa Ndiawar pour leur confiance, leur soutien financier et moral et surtout pour toutes les prières formulées à mon égard, afin que je puisse atteindre mes objectifs,
- ❖ A toute ma famille particulièrement mes grandes sœurs Sassy, Awa et Bineta et à ma petite sœur Foota, pour leurs encouragements permanents, leurs conseils, leur soutien moral et leurs prières,
- ❖ A mon cher binôme, SENE Licka Khadidiatou, pour sa rigueur et sa sympathie,
- ❖ A ma famille algérienne, la famille BENMOUSSA, particulièrement ma maman Souad, pour leurs appuis et leurs prières,
- ❖ A Cheikh Ahmed Tidiane Camara et à toute sa famille, particulièrement à maman Kiné pour leurs conseils et leurs prières,
- ❖ A tous mes amis de près ou de loin qui m'ont aidé et supporté dans les moments difficiles particulièrement à Wodia et Suzanne,
- ❖ A tous ceux qui se sont sacrifiés et qui se sont donnés pour mes études.

Merci d'être toujours là pour moi.

Khadijatou

RESUME

L'étude présentée dans ce mémoire concerne les bétons à granulats légers. Après présentation des granulats légers d'une manière générale, une étude bibliographique a été menée sur les différents types de bétons légers, leurs caractéristiques et leurs utilisations ainsi qu'une étude spécifique sur les bétons à granulats légers.

Une deuxième partie a été consacrée à une tentative d'élaboration pratique d'un mortier à base de polystyrène expansé non traité.

La formulation a été étudiée et présentée dans le mémoire, les matériaux de base ont été préparés mais la tentative n'a pu être concrétisée en raison de l'insuffisance de la quantité de polystyrène.

Une troisième partie a été consacrée à deux études pratiques réalisées au Sénégal avec deux types de granulats légers : l'argile expansée et le coquillage Arcas. Ces études ont été détaillées dans la présentation du mémoire.

ABSTRACT

The study presented in this thesis concerns light aggregate concretes. After the presentation of light aggregates in a general way, a bibliographical study was carried out on the different types of light concretes, their characteristics and their uses as well as a specific study on light aggregates concretes.

A second part was dedicated to an attempt to develop an untreated expanded polystyrene mortar.

The formulation was studied and presented in the memory, the basic materials were prepared but the attempt could not be realized because of the insufficiency of the amount of polystyrene.

A third part was devoted to two practical studies carried out in Senegal with two types of light aggregates: expanded clay and the Arcas shell. These studies were detailed in the presentation of the dissertation.

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre I : Les granulats légers | |
| I.1 Introduction | 3 |
| I.2 Différents types de granulats légers | 5 |
| I.2.1 Les granulats légers naturels | 6 |
| I.2.2 Les granulats légers artificiels | 6 |
| I.3 Caractéristiques des granulats | 7 |
| I.3.1 Caractéristiques géométriques | 7 |
| I.3.2 Caractéristiques physiques | 8 |
| I.3.2.1 Porosité..... | 8 |
| I.3.2.2 Absorption d'eau..... | 8 |
| I.3.2.3 Masse volumique apparente des granulats légers..... | 9 |
| I.3.2.3.1 Masse volumique en vrac..... | 9 |
| I.3.2.3.2 Masse volumique réelle..... | 9 |
| I.3.3 Caractéristiques mécaniques | 10 |
| I.3.3.1 Résistance à l'écrasement des granulats légers..... | 10 |
| I.3.3.1.1 Essai d'écrasement au pot..... | 10 |
| I.3.3.1.2 Essai à la presse hydrostatique..... | 10 |
| I.3.3.1.3 Essai de résistance au fil..... | 11 |
| I.3.3.2 Module d'élasticité des granulats légers..... | 12 |
| I.4 Composition chimique des granulats légers | 12 |
| I.5 Etudes de quelques formes commerciales | 13 |
| I.5.1 Pouzzolane | 13 |
| I.5.2 Diatomite | 14 |
| I.5.3 Perlite | 14 |
| I.5.4 Pierre ponce | 15 |
| I.5.5 Vermiculite | 16 |
| I.5.6 Cendre volante frittée | 16 |
| I.5.7 Argile expansée | 17 |
| I.5.8 Schiste expansé | 18 |
| I.5.9 Mâchefer | 19 |
| I.5.10 Laitiers bouletés expansés | 19 |
| I.5.11 Billes de polystyrène | 20 |

Chapitre II : Les bétons types de légers

| | |
|---|-----------|
| II.1 Introduction..... | 22 |
| II.2 Les constituants du béton..... | 23 |
| II.2.1 L'eau..... | 23 |
| II.2.2 Le ciment..... | 23 |
| II.2.3 Les adjuvants..... | 23 |
| II.2.4 Les granulats..... | 24 |
| II.2.5 Le sable..... | 24 |
| II.3 Les différents types de bétons légers..... | 24 |
| II.3.1 Béton cellulaire..... | 25 |
| II.3.2 Béton caverneux..... | 26 |
| II.4 Propriétés des bétons légers..... | 28 |
| II.4.1 Malaxage..... | 28 |
| II.4.2 Transport..... | 28 |
| II.4.3 Mise en place..... | 28 |
| II.4.4 Compactage..... | 29 |
| II.4.5 Cure..... | 29 |
| II.4.6 Durabilité..... | 29 |
| II.4.7 Conductivité thermique..... | 30 |
| II.4.8 Caractéristiques physiques et mécaniques des bétons légers..... | 30 |
| II.4.8.1 Comportement structural..... | 30 |
| II.4.8.2 Résistance à la compression..... | 31 |
| II.4.8.3 Résistance à la traction..... | 32 |
| II.4.8.4 Module d'élasticité..... | 32 |
| II.4.8.5 Retrait et fluage..... | 33 |
| II.4.8.6 La masse volumique..... | 33 |
| II.5 Domaines d'utilisation des bétons légers..... | 34 |

Chapitre III : Les bétons à granulats légers

| | |
|--|-----------|
| III.1 Introduction..... | 36 |
| III.2 Les bétons de granulats légers naturels..... | 36 |
| III.3 Les bétons de granulats légers de matériaux ayant subi un traitement thermique.. | 36 |
| III.4 Les bétons de granulats légers de matériaux artificiels ne subissant pas de traitement spécial..... | 37 |
| III.5 Les bétons de granulats de matériaux artificiels subissant divers traitements spéciaux..... | 37 |

| | |
|---|-----------|
| III.6 Propriétés physiques des bétons à base de granulats légers..... | 38 |
| III.6.1 Interaction des granulats légers avec la matrice cimentaire..... | 38 |
| III.6.2 Maniabilité et murissement des bétons à granulats légers..... | 38 |
| III.6.3 La porosité..... | 39 |
| III.6.4 Absorption d'eau..... | 40 |
| III.6.5 La masse volumique des bétons de granulats légers..... | 41 |
| III.7 Propriétés mécaniques des bétons de granulats légers..... | 41 |
| III.7.1 Résistance à la compression..... | 41 |
| III.7.2 Résistance à la traction..... | 42 |
| III.7.3 Module élastique..... | 42 |
| III.8 Domaines d'utilisation des bétons de granulats légers..... | 42 |
| Chapitre IV: Etude de cas : Amorce d'une étude pratique d'un mortier à base de polystyrène expansé | |
| IV.1 Introduction..... | 45 |
| IV.2 La fabrication du polystyrène expansé..... | 45 |
| IV.2.1 La polymérisation du styrène additionnée d'agent porogène..... | 45 |
| IV.2.2 La pré expansion des perles à l'aide de la vapeur | 46 |
| IV.2.3 Le moulage..... | 46 |
| IV.3 Polystyrène non traité et polystyrène traité..... | 46 |
| IV.3.1 Polystyrène non traité..... | 46 |
| IV.3.2 Polystyrène traité : exemple du POLYS BETO..... | 48 |
| IV.4 Propriétés physiques et mécanique du polystyrène..... | 49 |
| IV.4.1 Densité..... | 49 |
| IV.4.2 Résistance à la chaleur..... | 49 |
| IV.4.3 Absorption..... | 49 |
| IV.4.4 Conductivité thermique..... | 49 |
| IV.4.5 Résistance à la compression..... | 50 |
| IV.5 Composition du béton de polystyrène expansé..... | 50 |
| IV.5.1 Le liant..... | 50 |
| IV.5.2 Le sable..... | 51 |
| IV.5.3 Le polystyrène..... | 51 |
| IV.6 Les propriétés des bétons légers de polystyrène..... | 51 |
| IV.6.1 La masse volumique..... | 51 |
| IV.6.2 La durabilité..... | 51 |

| | |
|--|-----------|
| IV.6.3 Résistance à la compression | 52 |
| IV.6.4 Conductivité thermique | 52 |
| IV.6.5 Comportement à l'état frais | 53 |
| IV.7 Avantages d'utilisation du béton léger de polystyrène | 53 |
| IV.8 Tentative d'étude pratique | 54 |
| IV.8.1 Mortier envisagé | 54 |
| IV.8.1.1 Ciment | 54 |
| IV.8.1.2 Sable | 55 |
| IV.8.2 Polystyrène expansé utilisé | 55 |
| IV.8.3 Stabilisateur | 55 |
| IV.8.4 Choix des éprouvettes | 56 |
| IV.8.5 Calcul des proportions des mélanges | 56 |
| | |
| Chapitre V : Etudes des bétons à base d'argile expansée et à base de coquillages réalisées au Sénégal | |
| V.1 Introduction | 59 |
| V.2 Les différents types de granulats les plus utilisés au Sénégal | 59 |
| V.2.1 Le basalte | 59 |
| V.2.2 Les calcaires | 60 |
| V.2.3 Les grès | 61 |
| V.2.4 La latérite | 61 |
| V.3 Domaines d'utilisation de ces granulats | 62 |
| V.4 Bétons à granulats légers existants au Sénégal | 62 |
| V.4.1 Cas 1 : béton à base d'argile expansée | 62 |
| V.4.1.1 Caractérisation des granulats étudiés | 63 |
| V.4.1.1.1 Caractérisation des granulats naturels | 64 |
| V.4.1.1.2 Caractérisation des granulats artificiels | 64 |
| V.4.1.2 Formulation des bétons | 68 |
| V.4.1.3 Caractérisation du béton | 72 |
| V.4.1.4 Résultats et analyses des essais réalisés | 75 |
| V.4.1.4.1 Résultats obtenus de la caractérisation des graviers | 75 |
| V.4.1.4.2 Résultats obtenus des essais d'affaissement | 76 |
| V.4.1.4.3 Résultats obtenus des masses volumiques | 77 |
| V.4.1.4.4 Résultats obtenus des essais écrasement | 77 |
| V.4.1.4.5 Résultats des essais thermiques | 80 |

| | |
|--|------------|
| V.4.1.5 Enjeux économiques..... | 81 |
| V.4.1.6 Avantages et inconvénients de l'étude..... | 82 |
| V.4.2 Cas 2 : béton de coquillage..... | 82 |
| V.4.2.1 Les coquillages rencontrés au Sénégal et leurs domaines d'utilisation..... | 82 |
| V.4.2.2 Caractéristiques des matériaux utilisés..... | 84 |
| V.4.2.2.1 Le ciment..... | 84 |
| V.4.2.2.2 L'eau de gâchage..... | 84 |
| V.4.2.2.3 Les sables..... | 84 |
| V.4.2.2.4 Les granulats de coquillages..... | 85 |
| V.4.2.3 Composition et dosage des mélanges..... | 90 |
| V.4.2.3.1 Application de la méthode de Dreux..... | 90 |
| V.4.2.3.2 Proportion d'une méthode empirique..... | 99 |
| V.4.2.4 Etude économique et domaines d'utilisation..... | 104 |
| V.4.2.4.1 Etude économique..... | 104 |
| V.4.2.4.2 Domaine d'utilisation..... | 106 |
| Conclusion générale..... | 107 |
| Références bibliographiques | |

Liste des photos

Chapitre I : Les granulats légers

| | |
|--|----|
| Photo I.1 : Différents types de granulats | 3 |
| Photo I.2 : Granulats roulés | 4 |
| Photo I.3 : Granulats concassés | 4 |
| Photo I.4 : Granulats artificiels | 4 |
| Photo I.5 : Granulats recyclés | 4 |
| Photo I.6 : Granulats légers | 4 |
| Photo I.7 : Colisée de Rome | 5 |
| Photo I.8 : Panthéon de Rome | 5 |
| Photo I.9 : Pouzzolane | 14 |
| Photo I.10 : Diatomite | 14 |
| Photo I.11 : Perlite | 15 |
| Photo I.12 : Pierre ponce | 15 |
| Photo I.13 : Vermiculite | 16 |
| Photo I.14 : Cendre volante | 17 |
| Photo I.15 : Argile expansée | 18 |
| Photo I.16 : Schiste expansé | 19 |
| Photo I.17 : Mâchefer | 19 |
| Photo I.18 : Laitiers | 20 |
| Photo I.19 : Billes de polystyrène | 21 |

Chapitre II : Les bétons légers

| | |
|--|----|
| Photo II.1 : Représentation schématique des différents types de béton léger | 25 |
| Photo II.2 : Béton cellulaire | 25 |
| Photo II.3 : Béton léger caverneux | 27 |

Chapitre III : Les bétons à granulats légers

| | |
|---|----|
| Photo III.1 : Béton de granulats légers | 36 |
| Photo III.2 : Béton de perlite | 37 |
| Photo III.3 : Béton de polystyrène expansé | 37 |
| Photo III.4 : Béton d'argile expansée | 37 |
| Photo III.5 : Mécanisme d'interaction pâte /granulat léger | 38 |
| Photo III.6 : Porosité du béton | 40 |

Chapitre IV: Etude de cas : Amorce d'une étude pratique d'un mortier à base de polystyrène expansé

| | |
|--|-----------|
| Photo IV.1 : Polystyrène non traité | 47 |
| Photo IV.2 : Polystyrène traité | 49 |
| Chapitre V : Etudes des bétons à base d'argile expansée et à base de coquillages réalisées au Sénégal | |
| Photo V.1 : Graviers de basalte | 59 |
| Photo V.2 : Graviers de calcaire | 60 |
| Photo V.3 : Graviers de grès | 61 |
| Photo V.4 : Latérite | 61 |
| Photo V.5 : Pycnomètre rempli d'eau | 63 |
| Photo V.6 : Pycnomètre avec de l'eau et du basalte | 63 |
| Photo V.7 : Pycnomètre avec de l'eau et du calcaire | 63 |
| Photo V.8 : Pycnomètre avec de l'eau et les granulés d'argile | 63 |
| Photo V.9 : Basalte 8/16 | 64 |
| Photo V.10 : Calcaire 8/16 | 64 |
| Photo V.11 : Sable de dune | 64 |
| Photo V.12 : Carrière d'argile de l'usine de SOFAMAC | 65 |
| Photo V.13 : Appareil de Los Angeles | 65 |
| Photo V.14 : Les billes en acier | 66 |
| Photo V.15 : Le tamis 1.25 mm | 66 |
| Photo V.16 : Résultats obtenus après passage à l'appareil de Los Angeles | 66 |
| Photo V.17 : Bétonnière avec granulés d'argile | 67 |
| Photo V.18 : Granulés d'argile | 67 |
| Photo V.19 : Argile crue à différents diamètres dans le four | 67 |
| Photo V.20 : Argile cuite 8/16 à 1100 °C | 67 |
| Photo V.21 : Argile cuite 8/16 à 860 °C | 67 |
| Photo V.22 : Moule thermique | 72 |
| Photo V.23 : Dispositif de la méthode à plan chaud et asymétrique | 73 |
| Photo V.24 : Dispositif complet de la méthode à plan chaud asymétrique | 74 |
| Photo V.25 : Coquille d'Arche ou Arcas « pagnes » | 83 |
| Photo V.26 : Coquille de cymbium « yët » | 83 |
| Photo V.27 : Coquille d'huître « yoxos » | 83 |
| Photo V.28 : Aperçu des lignes de rupture après écrasement de l'éprouvette à la presse | 98 |

Liste des figures

Chapitre II : Les bétons légers

Figure II.1: Corrélation entre la résistance à la compression sur cube et la masse volumique après séchage à l'étuve d'un béton léger à argile expansée **31**

Figure II.2 : Représentation schématique du flux de contraintes dans le béton courant et dans le béton léger de construction **31**

Figure II.3 : Corrélation entre la masse volumique après séchage à l'étuve et le module d'élasticité de différents bétons légers **32**

Figure II.4 : Domaines de masse volumique de quelques granulats légers et courants **33**

Chapitre III : Les bétons à granulats légers

Figure III.1 : Relation entre la résistance en compression à 28 jours et la densité du béton frais d'un mélange avec des granulats légers **41**

Figure III.2 : Résultats de modules élastiques **42**

Chapitre IV : Etude de cas : Amorce d'une étude pratique d'un mortier à base de polystyrène expansé

Figure IV.1 : Conductivité thermique en fonction de la masse volumique **53**

Chapitre V : Etudes des bétons à base d'argile expansée et à base de coquillages réalisées au Sénégal

Figure V.1 : Courbe granulométrique du basalte **69**

Figure V.2 : Courbe granulométrique du calcaire **69**

Figure V.3 : Courbe granulométrique de l'argile **70**

Figure V.4 : Courbe des masses volumiques et des coefficients d'absorption des matériaux **75**

Figure V.5 : Courbe des affaissements **76**

Figure V.6 : Courbe des masses volumiques des bétons **77**

Figure V.7 : Courbe de résistance en compression des bétons en fonction de l'âge **78**

Figure V.8 : Courbe de résistance à la traction par fendage des bétons en fonction de l'âge **79**

Figure V.9 : Courbe de conductivité thermique des bétons **80**

Figure V.10 : Courbe de la masse volumique apparente des bétons **80**

Figure V.11 : Courbe de capacité thermique massique des bétons **81**

Figure V.12 : Courbe granulométrique du sable de Kaolack **85**

Figure V.13 : Courbe granulométrique du sable de Ziguinchor **85**

Figure V.14 : Courbe granulométrique classe 3-8 **87**

Figure V.15 : Courbe granulométrique classe 8-16 **87**

| | |
|--|-----------|
| Figure V.16 : Courbe granulométrique classe 16-25 | 87 |
| Figure V.17 : Détermination du dosage en ciment en fonction de l'affaissement et du rapport C/E | 92 |
| Figure V.18 : Abaque expérimental C.E.S donnant une valeur moyenne normale du rapport G/S en fonction de D et du dosage en ciment | 93 |

Liste des tableaux

Chapitre I : Les granulats légers

| | |
|--|----|
| Tableau I.1: Composition chimique de quelques granulats légers | 13 |
|--|----|

Chapitre II : Les bétons légers

| | |
|--|----|
| Tableau II.1 : Les propriétés comparées des bétons cellulaires | 26 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| Tableau II.2 : Caractéristiques de béton léger caverneux | 27 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| Tableau II. 3 : Conductibilité thermique en fonction de la masse volumique après séchage à l'étuve pour les bétons légers à base d'argile expansée et un béton courant (valeurs de dimensionnement selon la norme SIA 381/1) | 30 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| Tableau II.4 : Exemples de formulations d'un béton léger de différentes classes de masse volumique ainsi que quelques propriétés sélectionnées | 34 |
|--|----|

Chapitre III : Les bétons à granulats légers

| | |
|---|----|
| Tableau III.1 : Porosité ouverte des granulats et proportions capillaires de diamètre $> 2 \mu m$ | 40 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| Tableau III.2 : Caractéristiques des bétons de granulats légers | 43 |
|---|----|

Chapitre IV: Etude de cas : Amorce d'une étude pratique d'un mortier à base de polystyrène expansé

| | |
|---|----|
| Tableau IV.1 : Valeurs de la résistance en compression du PSE en fonction de sa densité | 50 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| Tableau IV.2 : Conductivité thermique des bétons de polystyrène | 52 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| Tableau IV.3 : Composition chimique et minéralogique de ciment de Portland | 55 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| Tableau IV.4 : Tableau proportions des mélanges | 57 |
|---|----|

Chapitre V : Etudes des bétons à base d'argile expansée et à base de coquillages réalisées au Sénégal

| | |
|--|----|
| Tableau V.1 : Détermination des masses volumiques et des coefficients d'absorption | 64 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| Tableau V.2 : Détermination des masses volumiques et des coefficients d'absorption des granulés d'argiles | 68 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| Tableau V.3 : Coordonnés de la courbe de référence et de la ligne de partage du basalte | 68 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| Tableau V.4 : Coordonnés de la courbe de référence et de la ligne de partage du calcaire | 69 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| Tableau V.5 : Coordonnés de la courbe de référence et de la ligne de partage de l'argile | 70 |
|--|----|

| | |
|--|------------|
| Tableau V.6 : Volume de chaque matériau | 70 |
| Tableau V.7 : Quantité des matériaux par m ³ de mélange | 71 |
| Tableau V.8 : Quantité des matériaux présent dans chaque mélange | 72 |
| Tableau V.9 : Résultats des caractérisations | 75 |
| Tableau V.10 : Résultats des essais d'affaissement | 76 |
| Tableau V.11 : Masses volumiques des bétons | 77 |
| Tableau V.12 : Ecrasement à 3 jours | 77 |
| Tableau V.13 : Ecrasement à 7 jours | 78 |
| Tableau V.14 : Ecrasement à 28 jours | 78 |
| Tableau V.15 : Essais thermiques | 80 |
| Tableau V.16 : Composition chimique des coquillages (% massique) | 86 |
| Tableau V.17 : Résultats essai poids spécifique coquillage de Kaolack | 89 |
| Tableau V.18 : Résultats essai poids spécifique coquillage de Ziguinchor | 89 |
| Tableau V.19 : Désignation des classes d'affaissement au cône d'Abrams | 91 |
| Tableau V.20 : Valeurs estimées du coefficient granulaire G | 92 |
| Tableau V.21 : Correction en % sur le dosage en eau | 93 |
| Tableau V.22: Valeurs de coefficient de compacité en fonction de certains paramètres | 94 |
| Tableau V.23 : Composition d'une m ³ des bétons de coquillage pour chaque classe | 96 |
| Tableau V.24 : Dimension des moules en fonction du D des granulats | 96 |
| Tableau V.25 : Résistances moyennes en compression avec Dreux | 98 |
| Tableau V.26 : Valeurs de G/S variant de 1.1 à 0.8 | 101 |
| Tableau V.27 : Valeurs de G/S variant de 1.3 à 0.9 | 101 |
| Tableau V.28 : Composition d'un m ³ de béton de coquillage | 102 |
| Tableau V.29 : Récapitulatif des résultats des essais sur les bétons avec méthode proposée | 102 |
| Tableau V.30 : Résistance moyenne en compression des bétons composés | 103 |

Introduction générale

Le béton est un matériau essentiel dans la construction. Il est constitué de ciment, d'eau, de gravier et parfois d'adjuvant. On peut adapter son dosage et ses constituants en fonction des performances et des usages recherchés. On note différents types de bétons parmi lesquels on a les bétons légers plus particulièrement les bétons à granulats légers qui constituent l'objet de notre étude.

Le béton léger est un béton dont la masse volumique est située entre 800 et 2000 Kg/m³.

Les bétons légers ont une faible masse volumique, une faible conductivité thermique et une bonne isolation acoustique par rapport aux bétons ordinaires. Par conséquent, ils peuvent apporter une solution technique très intéressante au problème d'isolation thermique et acoustique dans les bâtiments. Ces bétons sont réalisés en employant des granulats légers, l'aération ou le gaz, ou en faisant une réduction de la partie fine du granulat. Dans chacun de ces cas, l'augmentation des vides d'air dans le béton conduit à une réduction de la densité du béton.

Le béton à granulat léger est un des types de bétons légers. Il est utilisé pour alléger les éléments non porteurs d'une construction et en particuliers les différents murs.

Il est peu étudié dans la pratique raison pour laquelle cette étude a été effectuée.

Ce thème a été donc choisi dans le but de valoriser les bétons à granulats légers plus particulièrement ceux réalisés au Sénégal tels que le béton à base d'argile expansée et le béton à base de coquillages.

Par faute de temps et de quantités suffisantes de polystyrène, seule une amorce d'étude pratique sur un mortier à base de polystyrène expansé a été entamée.

Chapitre I

Les granulats légers

I.1 Introduction

Les granulats sont des matériaux inertes qui entrent dans la composition des bétons, des mortiers, de couches de fondation de base et de roulement des chaussées, des assises et des ballasts de voies ferrées. Utilisés en construction, ils composent l'ensemble des grains qui ont des diamètres compris entre 0 et 80 mm. Selon leurs dimensions nous distinguons cinq classes granulaires (définies par la norme NFP 18 101) :

- ❖ Fines (fillers) : ≤ 0.08 mm
- ❖ Sable : $d < 1$ mm et $0.08 < D < 6.3$ mm
- ❖ Gravillons : $d \geq 1$ mm et $D < 31.5$ mm
- ❖ Cailloux : $d \geq 20$ mm et $D < 80$ mm
- ❖ Graves : 6.3 mm $< D < 80$ mm

Selon leur provenance, les granulats sont soit naturels, artificiels ou recyclés.

Les premiers sont issus de roches meubles (alluvions fluviales ou marines) ou massives (roches éruptives, calcaires, métamorphiques) et n'ont subi aucun traitement mis à part celui mécanique. D'où ils peuvent être obtenus par concassage, criblage, broyage et lavage.

Les seconds, de transformation thermique de roche, de minerais, de sous-produits industriels (laitiers, scories, etc.).

Et enfin les derniers, de traitement de matériaux inorganiques précédemment utilisés dans la construction (béton de démolition d'ouvrages ou de bâtiments divers ou encore des structures de chaussées).



Photo I.1 : Différents types de granulats



Photo I.2 : Granulats roulés



Photo I.3 : Granulats concassés



Photo I.4 : Granulats artificiels



Photo I.5 : Granulats recyclés

Les granulats représentent à peu près 70% du volume total d'un béton [1]. Leurs caractéristiques ont alors une influence significative sur celles des bétons: soit ils influent directement sur une propriété particulière du béton, soit sur le rapport E/C nécessaire pour obtenir la maniabilité voulue. Et donc, leur granulométrie, forme, texture, densité, absorption, résistance mécanique, résistance à l'abrasion, réactivité, propriété thermique et leur résistance au gel sont autant de caractéristiques qui influent directement sur la formulation du béton [1].

Dans le domaine de la construction, les granulats sont classés en trois catégories[2] :

- Les granulats légers : masse volumique réelle inférieure ou égale à 2000 Kg/m^3
- Les granulats courants : masse volumique réelle comprise entre 2000 et 3000 Kg/m^3
- Les granulats lourds : masse volumique réelle supérieure ou égale à 3000 Kg/m^3 .

Dans le cadre de notre étude, il s'agit de béton à granulats légers, d'où nous allons nous limiter à ce type de granulats.



Photo I.6 : Granulats légers

L'utilisation des granulats légers date de l'époque romaine qui se situe entre 27 avant Jésus Christ et 476 après Jésus Christ. Plusieurs édifices pour ne citer que le Panthéon et le Colisée de Rome sont réalisés en partie en béton léger. Par exemple, le dôme du panthéon d'une portée d'environ 43 mètres a été réalisé avec des matériaux de densités variables dont un contenant de la pierre ponce [2].

Historiquement, l'ingénieur HAYDE Stephen est le premier à fabriquer des granulats légers par l'application d'un traitement thermique sur un matériau expansible. Il déposa un brevet en 1918 pour la technique d'expansion de l'argile, de l'ardoise et du schiste à partir d'un four rotatif. C'est le début de la production et de la commercialisation des granulats légers artificiels. Les granulats légers artificiels sont désormais utilisés aussi bien dans la construction civile que dans la construction navale. En France, l'intérêt pour les granulats légers artificiels s'est développé au début des années 1970 avec l'implantation de la première usine en 1964 à Watten dans le nord. Selon Chen et al. 2012, les granulats légers sont aujourd'hui présents dans différents domaines tels que le bâtiment (béton préfabriqué et béton prêt à l'emploi), les travaux publics (remblai), l'horticulture (grainage de jardin), du traitement des eaux (filtre ou lit bactérien). Certains sont peu résistants voire fiables tandis que d'autres sont résistants et durs [2].



Photo I.7 : colisée de Rome



Photo I.8 : Panthéon de Rome

I.2 Différents types de granulats légers

Les granulats légers sont les moins utilisés des granulats et ce, partout dans les différents pays du monde. Ils se présentent sous la forme d'une structure poreuse (structure alvéolée) d'où leur légèreté (masse volumique réelle inférieure à 2000 Kg/m^3). Ils permettent une économie d'énergie par la réduction de la conductivité thermique mais aussi l'allègement de certains éléments de construction. Ce gain en poids conduit à une diminution des sections des éléments structurels assurant la transmission des charges et conduit à des économies de transport des éléments manufacturés et à des gains de productivité à la mise en œuvre [3]. Les granulats légers sont issus de matières premières qui sont soit naturelles, soit artificielles, tenant compte des traitements qu'elles ont subis. C'est ainsi en considérant principalement des caractéristiques des produits finis, on distingue quatre types de granulats légers :

Chapitre I

- Granulats légers naturels : ponce ou pouzzolane, matériaux volcaniques naturels de structures très poreuses ;
- Granulats légers ayant subi un traitement thermique : granulat d'argile, de schiste, d'ardoise, de perlite expansée ou de vermiculites exfoliées ;
- Les granulats légers de matériaux artificiels : le mâchefer, sous-produit de la combustion de charbon ou des ordures ménagères. Ce matériau est en très nette régression et on l'utilise que pour la fabrication de parpaings ;
- Les granulats légers de matériaux artificiels ayant subi des traitements spéciaux : granulats de nombreux déchets industriels comme le laitier de haut fourneau que l'on peut élargir, Les cendres volantes que l'on peut fritter, le verre que l'on peut également élargir.

En somme nous pouvons les regrouper en deux grandes familles à savoir les granulats légers naturels et les granulats légers artificiels.

I.2.1 Les granulats légers naturels

Il s'agit là, de granulats naturels par définition, mais légers ; c'est-à-dire présentant une structure alvéolée.

Les granulats légers naturels sont issus en général de roches d'origine volcanique ou sédimentaire subissant diverses transformations mécaniques.

Au terme de ces transformations (concassage et criblage) des gros blocs de roche (issus du dynamitage de la roche), on obtient des grains de différentes tailles.

I.2.2 Les granulats légers artificiels

Ce sont des granulats légers d'origine minérale subissant des traitements thermiques pour donner la structure alvéolée (critère de légèreté). On parlera ainsi d'expansion.

➤ **Théorie de l'expansion**

C'est une méthode utilisée pour la fabrication de ces granulats. Elle est faite sous haute température (entre 1100 à 1500°C) [2].

L'expansion consiste à augmenter le volume d'un matériau préalablement défini expansible. Elle repose sur le phénomène d'alvéolage qui a lieu si les conditions suivantes sont réunies :

- Déformabilité du matériau (caractère pyroplastique)

Chapitre I

- Dégagement gazeux à la température de grésage qui déforme le matériau

Le traitement thermique peut se faire sous différents procédés qui diffèrent soit en fonction :

- De la matière première utilisée
- Du mode de préparation
- Du système de cuisson

Nous notons ainsi le procédé par

- Four rotatif
- Four rotatif mais accompagné par un séchage et refroidissement à bandes
- L'intermédiaire d'une grille de cuisson

Ces procédés reposent sur les mêmes principes à savoir :

- La formation des grains avant la cuisson
- L'élimination de l'eau de façonnage d'une manière suffisamment lente pour éviter l'éclatement des granulats pendant la cuisson
- L'échauffement rapide en fin de cuisson afin que la surface des grains puisse devenir étanche.

La phase essentielle de l'expansion dépend de la synchronisation parfaite entre la phase du grésage prononcé et les dégagements de gaz.

Des gaz provoquant l'expansion, nous notons la présence de CO, CO₂, SO₂, SO₃ mais aussi de O₂, N₂, et H₂O [4].

Toutefois, les composés dont les rôles sont les mieux connus et les plus importants sont le carbone, le soufre et l'oxyde ferrique. Les deux premiers ont une action de combustible et le troisième apporte l'oxygène nécessaire à la combustion [4].

I.3 Caractéristiques des granulats

I.3.1 Caractéristiques géométriques

Concernant la forme de ses grains, il peut y avoir certains qui sont régulières et d'autres irrégulières avec des formes sphériques.

Du point de vue granulométrique, ceux régulières donnent généralement les meilleurs résultats. En effet leur variation modifie l'uniformité du béton.

La forme et la texture d'un granulat influencent davantage la rhéologie à l'état frais d'un béton fraîchement malaxé que celle d'un béton durci. Un béton fabriqué avec des granulats dont les particules sont rugueuses, anguleuses et allongées demande plus d'eau qu'un béton fabriqué avec des granulats lisses, arrondis et compacts. Du point de vue de la rhéologie à l'état frais, les particules

anguleuses nécessitent donc plus de ciment pour maintenir le même rapport eau/liant. De même, les bétons fabriqués avec des granulats anguleux ou à granulométrie très discontinue peuvent être difficiles à pomper. Par contre, l'adhérence pâte/granat est souvent meilleure dans le cas des particules rugueuses et anguleuses comparativement aux particules lisses et arrondies. Il importe donc de tenir compte de ces aspects lors de la sélection des granulats pour un béton [1].

I.3.2 Caractéristiques physiques

I.3.2.1 Porosité

Les granulats légers étant définis comme des matériaux qui se présentent sous une structure poreuse, se caractérisent ainsi par une très forte porosité.

En effet, cette dernière est l'ensemble des vides ou pores d'un matériau solide qui sont remplis par des fluides.

La porosité d'un granulat léger varie de 25 à 75% du volume apparent [5].

Elle est proportionnelle à la taille des grains : plus la taille des grains augmente, plus ils sont poreux et la densité apparente diminue.

La porosité est aussi à l'origine du phénomène de transfert d'eau de la pâte vers les granulats légers et vice versa.

La relation suivante permet de déterminer la porosité d'un granulat léger :

$$n = \frac{v}{V}$$

Avec : v : volume des pores

V : volume total du corps des granulats

I.3.2.2 Absorption d'eau

C'est une caractéristique très importante des granulats légers puisqu'elle influe directement sur la formulation du béton.

L'absorption est déterminée numériquement par un coefficient (coefficient d'absorption) qui permet de déterminer la capacité d'absorption d'un granulat.

Le degré d'absorption d'un granulat varie généralement de 0,2 à 2% [1].

Les méthodes d'estimation du coefficient d'absorption se font en présence d'eau.

Nous notons trois de ces méthodes dont celle :

- Du pycnomètre ;
- Basée sur la saturation sous vide ;
- Basée sur le déplacement gravitationnel de l'eau libre.

Tout comme la porosité qui est proportionnelle à la taille, les propriétés de l'absorption sont déterminées par celle-ci aussi, ainsi que par la distribution des pores.

L'absorption d'eau de ces granulats pose problème dans la formulation du béton car ils absorbent une quantité importante de l'eau de gâchage. C'est pour cela, pour calculer la quantité nette d'eau de gâchage, on doit tenir compte de l'absorption du granulat.

Les propriétés du béton telle que la maniabilité varie d'une gâchée à l'autre et encore plus dans le cas des granulats légers.

Par ailleurs, certains moyens tels que le pré mouillage ou l'utilisation d'un traitement de surface visant à réduire l'absorption d'eau des granulats s'avèrent très efficaces pour diminuer la perte de maniabilité des bétons légers. [3]

I.3.2.3 Masse volumique apparente des granulats légers

Les granulats légers sont caractérisés par deux masses volumiques apparentes à savoir :

- ❖ La masse volumique en vrac qui est le rapport de la masse volumique de granulats légers secs (granulats qui remplissent aléatoirement et sans compactage un contenant spécifié) sur le volume du contenant ;
- ❖ La masse volumique réelle qui est le rapport de la masse d'un échantillon de granulats légers secs sur le volume qu'il occupe dans l'eau.

I.3.2.3.1 Masse volumique en vrac

Elle peut être déterminée par la procédure NF EN 1097-3 [2].

Selon le type de béton léger, le choix du granulat léger dépendrait de la masse volumique en vrac de celui-ci.

Pour un béton de structure, de préférence on utilise un granulat léger de masse volumique en vrac élevée, et, pour le béton isolant celui avec une masse volumique en vrac plus faible.μ

I.3.2.3.2 Masse volumique réelle

Cette masse est déterminée selon la norme NF EN 1097-6 [2].

Tout comme la masse volumique en vrac qui intervient dans le choix du granulat léger, la masse volumique réelle intervient dans la détermination des proportions des constituants granulaires entrant dans la composition du béton.

La masse volumique en vrac et la masse volumique réelle sont liées par la relation suivante [2]:

$$MV_{réelle} = 7/4 MV_{vrac}$$

Il est à noter que cette relation permet en bonne approximation, d'estimer la masse volumique réelle des granulats légers utilisés dans les bétons légers de structure dont le coefficient d'absorption d'eau n'excède pas 15 % [2].

I.3.3 Caractéristiques mécaniques

Afin d'étudier le comportement mécanique du béton, il est plus judicieux de commencer par celui des grains qui sont plutôt difficile à définir.

Les formes géométriques irrégulières des granulats légers posent problème à la détermination de leurs résistances. D'autres paramètres aussi y influent comme la porosité, la densité, etc. ainsi que les essais tels que la compression, la traction, micro-Deval, Los Angeles, etc. Cependant il existe des essais qui leurs sont spécifiques et qui aident à la compréhension des différents paramètres de leurs résistances.

I.3.3.1 Résistance à l'écrasement des granulats légers

On note trois types d'essais. Il s'agit de l'essai d'écrasement au pot, l'essai de compression isostatique et de l'essai de résistance au fil.

I.3.3.1.1 Essai d'écrasement au pot

Il s'agit de l'essai le plus courant mis au point par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Paris (LCPC) et repris par la norme européenne EN 13055-1 pour mesurer la résistance à l'écrasement en vrac [2].

Son principe consiste à déterminer la résistance à l'écrasement en vrac ou en d'autres termes donner une évaluation de la « compressibilité » d'un volume déterminé de granulats légers, en mesurant la pression nécessaire à enfoncer de 20 mm un piston dans un récipient rempli de granules [4].

Les résultats sont appelés résistance conventionnelle au pot.

Mode opératoire

Les granulats sont mis en place dans un cylindre de 175 à 200 cm² de section sur une hauteur de 100 mm. Cette mise en place est effectuée par vibration sur micro table [4].

Par l'intermédiaire d'un piston, on comprime les granulats avec une vitesse de déformation de l'ordre de 2 mm par minute [4].

La résistance conventionnelle à la compression des grains est calculée à partir de la force F nécessaire pour obtenir un enfoncement de 20 mm par la formule [4]:

$$f_{gpot}(MPa) = \frac{F(N)}{Section\ du\ cylindre(mm^2)}$$

I.3.3.1.2 Essai à la presse hydrostatique

Il a été mis au point par le Centre Technique des Tuiles et Briques (CTTB) [4]. L'essai nous donne la pression de rupture du grain (granulat léger isolé) par écrasement triaxial rupture du grain.

Mode opératoire

Cet essai se réalise à l'aide d'une presse isostatique associée à une table traçante. Le procédé est comme suit [4] :

- Le granulat à tester est enfermé dans un tube en plastique souple bouché à ses deux extrémités par des bouchons de caoutchouc;
- L'ensemble est introduit dans la cellule de la presse isostatique.
- La montée en pression est enregistrée par une table traçante. Lorsque le granulat casse, le volume libre augmente et la pression décroît de même ;
- La résistance f_{eg} du grain est donc lue directement sur le graphique et correspond à la pression de rupture.

I.3.3.1.3 Essai de résistance au fil

C'est un essai rapide et facile à mettre en œuvre, de plus réalisable sur chantier. Il a été mis au point par le Laboratoire de l'Ecole des Mines de Paris (ARMINES). Il consiste à mesurer la résistance à la traction par fendage d'un granulat léger isolé [4].

Mode opératoire

L'essai se réalise de la manière suivante [4] :

- Positionner le granulat dans la boucle du fil et de le maintenir entre les doigts ;
- Mettre le fil en tension en manœuvrant la manivelle du treuil à vitesse constante jusqu'à rupture de l'échantillon ;
- Lire la force F indiquée par l'aiguille du dynamomètre (en N) ;
- Lire la distance m_1 entre les deux extrémités du fil (en mm) au moment de la rupture ;
- Lire la distance m_2 entre les deux extrémités du fil (en mm) en plaçant dans la boucle un cylindre métallique de périmètre connu P_2 et montant la tension à la force F précédemment mesurée à la rupture du granule ;
- Calculer le périmètre P_1 du granule (en mm) par la formule : $P_1 = P_2 + m_2 - m_1$;
- Calculer la surface S de la section de rupture par la formule : $S = \frac{P_1^2}{4\pi}$ en mm^2 ;
- Calculer la résistance : $f_{tg}(MPa) = \frac{F(N)}{S(mm^2)}$.

Tout comme l'essai au pot qui nous fournit la résistance moyenne des granules utilisés, les essais à la presse hydrostatique et de rupture au fil présentent aussi cet avantage du fait qu'il est possible de caractériser les granules un à un, et donc de fournir pour un lot une résistance moyenne. Cependant les

deux derniers essais donnent des résultats plus cohérents que le premier, car, pour cet essai, les caractères géométriques des grains perturbent les mesures.

Par ailleurs il y a l'essai d'écrasement à la « plaque » mis au point par Kockal et Ozturan (2011) destiné au grain sphérique [2].

La résistance est obtenue par la formule suivante [2] :

$$\sigma = (2.8 \times P)/(\pi \times X^2)$$

σ : résistance à l'écrasement

p : charge à la rupture du grain

X : diamètre du grain

I.3.3.2 Module d'élasticité des granulats légers

Le module élastique équivalent des granulats légers usuels varie entre 2 et 17 GPa tandis que pour les granulats alluvionnaires, elle est plus importante (de 30 à 100 GPa) [2].

MULLER-ROCHHOLZ a développé une méthode dynamique qui permet d'évaluer le module élastique des granulats légers par des mesures de vitesse de propagation d'ondes à ultrasons [5].

Bremner et Holm (1986) ont proposé un modèle pour décrire le module d'élasticité dynamique des granulats légers [2].

La FIP (Fédération Internationale de la Précontrainte) et le CEB (Comité Européen de Béton) a établi une relation entre la déformation dynamique des granulats, notée E_g , et la masse volumique des grains [5].

On a [5]: $Eg = 8000. \rho g$ (Eg en MPa ; ρg en t/m³)

I.4 Composition chimique des granulats légers

Les granulats légers sont issus de matières premières et donc leur composition chimique dépend de ces dernières. Dans leur nature chimique, on note la présence de silice, d'alumine, de chaux, d'oxydes métalliques et d'alcalins.

Le tableau suivant donne la composition chimique de quelques granulats légers:

| Producteurs | Type de granulats | Proportions de Composés chimiques (%) | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-------------------|---------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|-----|--------------------------------|-----------------|-----|-------|------------------|-------------------|------------------|---------|
| | | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | Mn ₂ O ₃ | SO ₃ | FeO | MnO | K ₂ O | Na ₂ O | TiO ₂ | S |
| Argex | Argile expansée | 55-65 | 15-19 | 12-16 | 1-3 | 1-2 | 0,15-0,25 | - | - | - | 1,5-3,5 | 0,3-0,7 | 0,8-1 | 0,7-1,3 |
| Liapor | Argile expansée | 55 | 24 | 14 | 5 | - | - | - | - | - | 2 | 2 | - | - |
| Granulex-GEM | Ardoise expansée | 63 | 21 | 8,5 | 0,5 | 1 | - | - | - | - | 3,6 | 1,5 | - | - |
| Liaver | Verre expansé | 72,5 | 1,5 | 0,3 | 8,8 | 2,1 | - | 0,1 | - | 0,044 | 0,7 | 13,7 | 0,06 | - |
| Euro Ponce | Pierre ponce | 62,5 | 17,5 | 2,6 | 2,5 | 0,4 | - | - | - | - | 9,5 | 2,2 | 0,5 | - |

Tableau I.1 : Composition chimique de quelques granulats légers [2]

I.5 Etudes de quelques formes commerciales

I.5.1 Pouzzolane

Ce nom est donné à l'origine à des cendres volcaniques claires et friables, disponibles à Pouzzoles à 25 km de Vésuve (Italie), et dont le mélange avec la chaux présente des propriétés hydrauliques (pouzzolanicité) connues depuis l'antiquité.

La pouzzolane est un granulat léger naturel minéral d'origine volcanique (cristallisation de magma volcanique refroidi assez lentement) qui se présente sous forme de roche constitué par des scories volcaniques (type strombolien). La roche est lavée, concassée et criblée. Elle est silico-alumineuse (par exemple : SiO₂=50%, Al₂O₃=20%, Fe₂O₃=10%)[1]. La pouzzolane est généralement de couleur rouge brun ou noir ou exceptionnellement grise[4].

En matière première il peut y avoir une différence de couleur des pouzzolanes d'une même carrière du fait de l'état d'oxydation du fer du matériau. En effet les réactions d'oxydation à chaud sont plus ou moins avancées selon la position des scories dans le cône (édifié par le volcan), et ainsi on distingue les faciès « cœur-de-cône » de teinte dominante rouge et « bas-de-cône » de teinte plus sombre.

Du point de vue chimique, elles correspondent à des magmas basiques basaltiques. La présence de sulfures en grande quantité peut être la cause de graves dégâts dans les ouvrages utilisant la pouzzolane d'où ces zones doivent être repérées et éliminées.

Sa densité est un peu plus élevée que celle de la ponce, de l'ordre de 700 à 900 kg/m³. Les bétons confectionnés sont peu plus denses et plus résistants que les bétons de ponce. [5].



Photo I.9 : Pouzzolane

I.5.2 Diatomite

La diatomite constitue l'ensemble de roche (légère) sédimentaire siliceuse formée de résidus fossiles, de frustules, de spicules d'éponge plus ou moins grasseuse ou argileuse, de squelettes de diatomées.

Le traitement de la matière première est constitué principalement du broyage, du séchage, de la sélection granulométrique, de la calcination (avec ajout d'un agent fanant) et de l'activation.

En tant que granulats les diatomites sont généralement inutilisables, car, elles ont une très forte absorption d'eau.

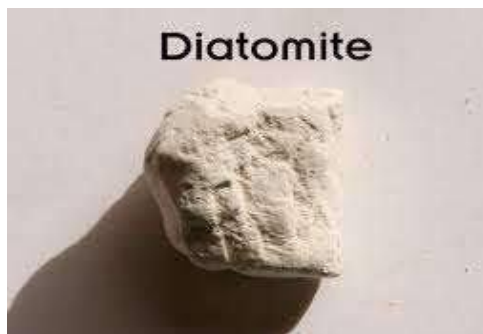


Photo I.10: Diatomite

I.5.3 Perlite

C'est un granulat ultra léger d'origine volcanique avec une masse volumique comprise entre 30 et 180 kg/m³ [4].

La perlite est obtenue par chauffage rapide à 100°C puis refroidissement brusque d'une roche volcanique riche en silice. On obtient des micro-billes blanchâtres de 0,5 à 4 mm de diamètre. La perlite peut être expansée (peut augmenter son volume de 20 fois) puis concassée et donne ainsi des

perlites siliconées. L'opération se fait par chauffage de verre volcanique acide à des températures allant de 900 à 1100°C Une fois expansée et concassée, on obtient un granulat dont la masse volumique est aussi faible que 120 à 190 kg/m³[1].

La perlite est riche en silice (70%), mais, elle est aussi constituée d'alumine (15%) [1].

Sa densité est de l'ordre de 2.23 à 2.41 et elle est de couleur sombre (gris à noir) [4].

Les mélanges de béton contenant seulement de la perlite ont des masses volumiques comprises entre 330 et 560 kg/m³ et avec des résistances à la compression qui varient de 0,7 à 3,1 MPa. En y ajoutant du sable, on peut obtenir des masses volumiques qui peuvent aller au-delà de 1000 kg/m³ et accroître ainsi les résistances à la compression de 6,2 à 17,3 MPa [1].



Photo I.11 : Perlite

I.5.4 Pierre ponce

La ponce est un matériau naturel d'origine volcanique qui se présente sous forme d'accumulation de fragments de toutes dimensions de roche volcanique acide. Elle est obtenue par refroidissement rapide de roche en fusion. Ses éléments sont arrondis (grains avec diamètre maximale de 10 à 20 mm). La ponce est constituée de silice, d'alumine et d'alcalin. Elle est de couleur grisâtre, d'une grande porosité et d'une faible densité (peut flotter sur l'eau) [1].

La ponce est utilisée dans les bétons de structure et d'isolation. Cependant sa faible masse volumique conduit à une faible résistance à la compression du béton.



Photo I.12 : Pierre ponce

I.5.5 Vermiculite

Les vermiculites sont des granulats très légers (50 à 125 kg/m^3) [4]. obtenus par cuisson à l'air chaud pendant 2 min [1] à une température 900 et 1100°C [4] environ de certains minéraux (après être concassés puis séchés) puis refroidissement brusque de paillettes de mica. Ce qui donne ainsi l'exfoliation (les molécules d'eau séparant les lamelles se transforment en vapeur d'eau et provoquent l'expansion. Ainsi ils peuvent augmenter leur volume de 30 fois [1].

Issus des micas par hydratation et pertes d'alcalis ; les vermiculites appartiennent à la famille des aluminosilicates de fer et de magnésium. Ils sont de couleur jaunâtre et ont une faible densité qui est de l'ordre de $2,5$ [4].

Les bétons contenant les granulats de vermiculite ont une faible résistance à la compression allant de $0,5$ à $1,5 \text{ MPa}$ avec des masses volumiques de 350 à 600 kg/m^3 [1].



Photo I.13 : Vermiculite

I.5.6 Cendre volante frittée

Les cendres volantes se présentent sous forme de poudre fine gris noirâtre constituée de particules vitreuses sous formes sphériques. Elles peuvent être utilisées pour la fabrication de granulats légers de bonne performance. Ces cendres sont obtenues par combustion de charbon pulvérisé à environ 1500°C , utilisé dans les centrales thermiques. Elles sont récupérées au moyen de séparateur pneumatique et électrostatique. Les cendres volantes sont composées de 50% de silice et 32% d'alumine [1].

Les cendres volantes, humidifiées avec de l'eau puis malaxées, peuvent par la suite être bouletées. Ces boulettes sont ensuite envoyées dans le four pour le frittage (four à grille horizontale) à des températures allant de 1200 à 1300°C . Ce frittage permet de souder les particules de cendre et crée de petits espaces d'air entre elles. Ainsi, nous obtenons les granulats appelés cendres volantes frittées

avec une masse volumique apparente d'environ 800 kg/m^3 . En composition chimique, on note 48% de SiO_2 , 32% d' Al_2O_3 et 8% de Fe_2O_3 [1].

Les bétons contenant les cendres volantes frittées ont une bonne résistance à la compression et une masse volumique acceptable.



Photo I.14 : Cendre volante

I.5.7 Argile expansée

La première fabrication d'argile expansée est due à Stephen HAYDE qui déposa un brevet le 12 février 1918 [4]. Il est probablement le matériau le plus fabriqué au monde.

La cause de l'expansion des granulats et la réduction des oxydes de fer par les matières organiques. En effet, les argiles utilisées dans les industries contiennent à la fois des matières organiques et du fer en proportion non négligeable. En l'absence de l'un de ces composants, il n'y a pratiquement pas d'expansion.

Cependant, toutes les argiles ne gonflent pas. Il y en a seulement celles qui contiennent de la pyrite, de l'hématite ou de la dolomie.

L'argile traitée ($1150\text{-}1200^\circ\text{C}$) gonfle à la suite de dégagement de gaz et parallèlement une peau extérieure se forme par vitrification de la surface du matériau. Au refroidissement on a un granulat léger dur, soit des particules de forme arrondie avec peau brune rougeâtre enveloppant une texture alvéolaire noirâtre. Par concassage, on obtient des granulats de tailles variées et dont la masse volumique apparente varie entre 300 et 1000 kg/m^3 [1].

Les bétons confectionnés à partir d'argile expansée ont une bonne résistance à la compression de l'ordre de 30 à 35 MPa avec des masses volumiques se situant autour de 1650 kg/m³ et 1200 kg/m³ pour les bétons légers de structure et les bétons légers isolants respectivement [1].



Photo I.15 : Argile expansée

I.5.8 Schiste expansé

La composition chimique des schistes est à peu près la même que celle des argiles mis à part que les premiers sont riches en carbone et que leurs températures d'expansion sont plus élevées.

Les schistes expansés sont issus de l'expansion de différents type de schiste, soit des schistes carbonifères et houillers, des schistes bitumineux, des schistes classiques ou même des ardoises.

La fabrication des granulats légers à partir de schistes se fait comme suit [1] :

- D'abord, on procède au broyage des matières premières pour réduire la taille des particules de schiste à un diamètre maximal de 800 µm.
- Ensuite, on mélange cette poudre à 10 % d'eau pour obtenir une pâte que l'on va extruder aux environs de 80°C sous forme de coudes.
- Les nodules extrudés de 5 à 15 mm sont ensuite séchés et expansés au four à une température de 1300 à 1450 °C.

Plus l'expansion est importante, plus la température est élevée. Par exemple, la masse volumique en vrac est d'environ 1000 kg/m³ à 1300°C comparativement à 380 kg/m³ pour une température de 1450°C [1].

Les bétons à base de schiste expansé ont les meilleures résistances à la compression d'où ils sont les plus utilisés dans les bétons de structures.



Photo I.16 : Schiste expansé

I.5.9 Mâchefer

Le mâchefer est un matériau de couleur foncé issu de résidu de charbon utilisé dans les foyers domestiques ou industriels. Il présente un aspect fritté et scoriacé et est dur.

Du point de vue chimique on note la présence de chaux et magnésie surcuits, de sulfures et sulfates.

On utilise différentes classes granulométriques obtenues par un concassage des éléments les plus gros suivi d'un criblage. Il faut s'assurer que les mâchefers fournis sont homogènes, stables et ne donneront pas lieu avec le ciment à des phénomènes d'expansion ou à des efflorescences [1].



Photo I.17 : Mâchefer

I.5.10 Laitiers bouletés expansés

Le laitier est un sous-produit de la fabrication de la fonte. Il est composé de silice, d'alumine et de chaux. Plusieurs procédés permettent d'en obtenir des granulats légers. L'expansion la plus courante est celui qui consiste à verser le liquide dans une fosse en béton dont le fond comporte de nombreuses arrivées d'eau (canalisation constituée de piquage pour une bonne distribution d'eau sur toute la

Chapitre I

surface). Et alors, la vaporisation d'eau provoque l'expansion. La roche que l'on obtient est ensuite concassée puis criblée[4]. Ainsi nous avons un laitier expansé, granulat alvéolaire et de couleur gris plus ou moins foncé avec une masse volumique allant de 600 à 900 kg/m³[1].

Afin d'obtenir un laitier bouleté expansé, on combine l'expansion avec la division de la masse liquide par dispersion mécanique brutale au moyen d'un tambour rotatif. Les boulettes ont des dimensions comprises entre 1 et 20 mm et sont de structure vitreuse[1].

Le laitier bouleté expansé est doté d'une faible absorption d'eau contrairement au laitier expansé en plus d'être stable au feu mais est un mauvais conducteur de chaleur. Cependant il ne nécessite pratiquement pas de consommation d'énergie pour sa fabrication. Il est un granulat intéressant et donc peut être utilisé dans différents types de béton : béton légers, isolant, isolant porteurs, structures.



Photo I.18 : Laitiers

I.5.11 Billes de polystyrène

Le polystyrène est plus utilisé pour l'isolation thermique de bâtiment et l'emballage des produits industriels ou alimentaires. Les billes de polystyrènes sont issues de matière première renfermant un pyrogène. Ce dernier sous l'action de la chaleur passe à l'état gazeux et provoque ainsi une expansion. Ce matériau alvéolaire rigide est d'une masse volumique très faible (10 à 40 kg/m³) [1] et donc ses bétons (béton léger et isolant thermique) ont des masses volumiques aussi faibles (300 à 800 kg/m³) [5].

Les performances mécaniques des bétons restent aussi à désirer (résistance à la compression de l'ordre de 2,0 à 4,0 MPa en fonction du pourcentage de sable utilisé)[1].



Photo I.19 : Billes de polystyrène

A côté de ces granulats légers étudiés, on note aussi d'autres types comme les granulats végétaux tels que les copeaux de bois et les granulats de liège mais aussi il y a les matériaux légers recyclés tel que les plastiques et les caoutchoucs.

Chapitre II
Les bétons légers

II.1 Introduction

Le béton constitue actuellement le matériau de construction le plus utilisé au monde. En effet, grâce à ses nombreuses qualités tels que ses caractéristiques de résistance, son isolation phonique, sa résistance au feu, sa durabilité, ses propriétés thermiques, etc. ; il est présent dans tous les domaines de bâtiments et génie civil.

Le béton est un matériau composite constitué d'eau, de granulats de différentes dimensions, d'un liant dont le ciment et le plus souvent d'adjuvant qui permet d'améliorer certaines caractéristiques du béton (à l'état frais ou à l'état durci).

En outre nous pouvons avoir d'autres types de liants. Parmi eux l'argile où le béton est appelé béton de terre ou encore le bitume qui est un liant hydrocarboné qui donne le béton bitumineux.

En fonction des exigences de chaque réalisation, nous notons différents types de béton qui s'y adapte et qui varie selon la nature des granulats, des adjuvants etc.

Nous avons ainsi :

- Les bétons courants, qui sont les plus utilisés d'ailleurs, avec une masse volumique d'environ 2500 kg/m³[11];
- Les bétons lourds qui ont des masses volumiques qui peuvent atteindre les 6000 kg/m³ [11]. Ce sont des bétons dans lesquels sont incorporés des fibres de natures, de dimensions et de géométries diverses (fibres synthétiques ou métalliques) permettant d'améliorer le béton. Il offre une meilleure résistance à la traction, une bonne maîtrise de la fissuration, mais aussi une amélioration en matière de plasticité, et en matière de résistances mécaniques (chocs, cisaillement, usure, abrasion...etc.) [12] ;
- Les Bétons à Haute Performance (BHP) qui ont des résistances de plus de 100 MPa [11] du fait de l'emploi d'ultra fines (fumées de silice) et de superplastifiants, les Bétons Fibrés à Ultra hautes Performances (BFUP) qui se caractérisent par leur extrême résistance à la compression et leur ductilité, les Bétons Autoplaçants (BAP) qui se distinguent par leur hyperfluidité qui permet une mise en place sans vibration ;
Cette nouvelle génération de béton, plus compacts, se caractérisent par une durabilité accrue résultant de leur forte compacité et de leur très faible porosité ce qui diminue la quantité d'agents agressifs pénétrant dans le béton et donc protège les armatures de la corrosion [12] ;
- Les bétons légers qui ont des masses volumiques qui vont de 800 à 2000 kg/m³.

Dans ce chapitre nous allons d'abord parler des différents constituants du béton (béton courant), et ensuite des différents types de bétons.

II.2 Les constituants du béton

Le béton est constitué d'eau, de ciment, de granulats et d'adjuvants.

II.2.1 L'eau

Elle est présente dans toutes les propriétés du béton. L'eau a deux fonctions à savoir physique autrement dit permet l'écoulement et le moulage du béton et chimique car constituant un liant pour le ciment et sert à mouiller les granulats.

L'eau doit être potable et ne doit contenir aucunes impuretés. En outre, même si c'est à éviter, il est possible d'utiliser l'eau de mer, mais, dans le cas d'un béton non armé pour éviter les agressions des armatures par le sel.

Le dosage de l'eau est à limiter pour éviter d'affecter la résistance du béton ou sa durabilité. Elle dépend de la quantité de ciment, des granulats ou de la consistance que l'on veut avoir.

II.2.2 Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique c'est-à-dire au contact avec l'eau nous donne une pâte. Son temps de durcissement tourne autour de 28 jours.

Le choix du type de ciment dépend des performances recherchées et de la nature des autres composants.

Nous avons 5 types de ciment, chacun adapté à certaines utilisations.

- Ciment Portland (CEM I) : est obtenu par dosage précis de chaux, de silice, d'alumine et de fer. Il est utilisé pour le mortier et pour les bétons courants ;
- Ciment Portland composé (CEM II) : il s'agit d'ajouts de cendres pouzzolaniques ou autres dans la composition. Il est employé pour le mortier devant être étanche à l'eau (murs de caves, murs de fondations, quais...) ;
- Ciment de haut fourneau (CEM III) : ajout de laitier de haut fourneau (oxydes métalliques). C'est un ciment qui résiste encore mieux aux corrosions chimiques. Il est utilisé pour des ouvrages en contact avec des acides ou de l'eau de mer ;
- Ciment pouzzolanique et composé (CEM IV et CEM V) : Utilisé aussi pour les bétons courants.

Les ciments sont classés suivant leurs résistances mécaniques à 28 jours (en N/mm²). IL existe 3 classes : 32.5, 42.5 et 52.5.

II.2.3 Les adjuvants

Ce sont des additifs dont leurs incorporations à faible dose dans le béton lors du malaxage ou de la mise en œuvre permet de modifier ses propriétés à l'état frais ou à l'état durcit [12].

Les adjuvants permettent d'améliorer physiquement et chimiquement les propriétés du béton. Il existe différents types d'adjuvants qui se distinguent par leur rôle. Nous avons les plastifiants-réducteurs d'eau et les superplastifiants qui facilitent la mise en place du béton dans les pièces minces fortement armées ainsi que la réalisation des Bétons à Hautes Performances, les accélérateurs de prise qui facilitent le bétonnage en temps froids et les retardateurs de prise pour les temps de chaleur.

II.2.4 Les granulats

Pour la confection d'un béton, les granulats y sont importants. De ce fait ils doivent être de bonnes qualités et satisfaire à deux exigences à savoir la propreté et la granulométrie.

Les granulats doivent permettre d'une part à remplir correctement et en totalité le moule ou le coffrage et d'autres part d'assurer un enrobage correct des armatures.

(Plus de détails voir chapitre 1).

II.2.5 Le sable

Le sable est l'un des granulats utilisés pour le béton et provient généralement de la mer ou des dunes. Pour une meilleure utilisation dans le béton, le sable doit respecter certaines caractéristiques permettant d'obtenir une meilleure adhérence entre lui et les autres composants. Les dosages sont alors en kilogrammes et parfois même en volume de sable [12].

II.3 Les différents types de bétons légers

Selon les exigences des utilisateurs il existe différents types de béton qui s'y adapte. Tel est le cas du béton léger utilisé afin d'alléger un ouvrage.

Les bétons légers ont des masses volumiques qui vont de 800 à 2000 kg/m³ contre 2000 à 2500 kg/m³ pour un béton classique[11], ce qui constitue ainsi un gain important sur le poids propre de l'ouvrage.

Cependant différentes sources ont révélées des masses volumiques différentes pour les bétons légers.

La commission R.I.L.E.M (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux) des bétons légers définit les bétons légers comme étant des bétons dont la masse volumique apparente sèche est inférieure à 1800 Kg/m³ alors que l'American Concrete Institute la limite à cette valeur [1].

Par contre SHORT et KINNIBURG considèrent que la masse volumique apparente sèche d'un béton léger doit être inférieure à 1775 Kg/m³. Ainsi en Allemagne fédérale la norme DIN1042 parue en 1972, limite la masse volumique apparente d'un béton léger à 2000 Kg/m³ [1].

Pour la confection d'un béton léger, on doit prendre en compte deux aspects à savoir les particularités en matière de formulation des bétons légers et la source des constituants spécifiques à la confection de bétons légers dont les matériaux légers naturels, artificiels et recyclés.

Les bétons légers sont obtenus en jouant sur la composition (béton caverneux), sur l'emploi de matériaux allégés (type argile expansé, polystyrène expansé, liège) ou en créant des vides par une

réaction provoquant un dégagement gazeux (béton cellulaire).

Les bétons légers se répartissent selon leur composition en différents groupes:

- Le béton cellulaire
- Le béton caverneux
- Le béton à granulats légers

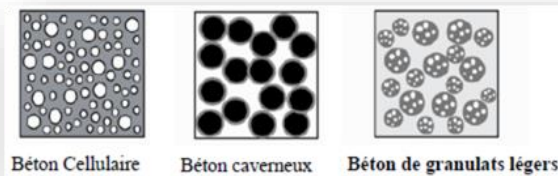


Photo II.1 : Représentation schématique des différents types de béton léger [1]

II.3.1 Béton cellulaire

Le béton cellulaire est un matériau de construction destiné aux gros œuvres. Il est composé de matières naturelles : eau, sable, ciment, chaux et d'un agent d'expansion (la poudre d'aluminium) pour lui donner ses propriétés aérées. Sa première caractéristique est d'être un matériau écologique, mais attention, son processus de fabrication n'est pas vraiment neutre sur le plan environnemental d'autant plus qu'il contient du ciment et de l'aluminium. Ensuite, sa composition en fait un béton solide, résistant et très léger.

Le béton cellulaire se présente sous forme de blocs, de carreaux ou de panneaux, qui vont de 5 à 30mm d'épaisseur, très faciles à mettre en œuvre. Ces différents éléments sont scellés entre eux grâce à un mortier colle spécial. Certains peuvent même se clipser les uns aux autres [8].

Le béton cellulaire est utilisé en construction pour des travaux de type mur (porteur ou non), cloison ou plafond, en intérieur comme à l'extérieur. On l'emploie également pour des travaux divers d'aménagement ou de finitions, comme les plans de travail de cuisine par exemple.

Une fois recouverts d'un enduit, les supports en béton cellulaire acceptent différents revêtements (peinture, carrelage, etc.) [8].

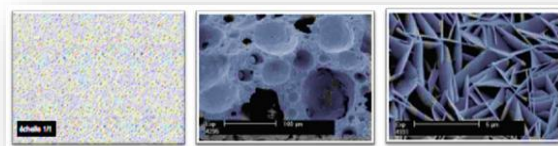


Photo II.2 : béton cellulaire [3]

| Masse volumique sèche | Résistance en compression | Résistance en flexion | Module d'élasticité | Conductivité thermique |
|-----------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------|------------------------|
| kg/m ³ | MPa | MPa | GPa | Jm/m ² s°C |
| 450 | 3.2 | 0.65 | 1.6 | 0.12 |
| 525 | 4.0 | 0.75 | 2.0 | 0.14 |
| 600 | 4.5 | 0.85 | 2.4 | 0.16 |
| 675 | 6.3 | 1.00 | 2.5 | 0.18 |
| 750 | 7.5 | 1.25 | 2.7 | 0.20 |

Tableau II.1 : Les propriétés comparées des bétons cellulaires [3]

Le béton cellulaire a l'énorme avantage d'être un excellent isolant thermique, mais aussi phonique dans une moindre mesure. Il minimise l'impact des grosses variations de températures notamment lors de sa fabrication. La poudre d'aluminium utilisée dans sa composition agit comme une levure et permet au béton de prendre du volume. L'air est alors emprisonné dans le béton cellulaire sous forme de petites bulles et lui confère ses propriétés isolantes. Ce matériau ne nécessite donc pas une couche d'isolant supplémentaire. Le béton cellulaire est aussi non combustible, donc 100 % inflammable. En raison de sa composition, il n'est pas nécessaire d'avoir des outils spécifiques pour utiliser le béton cellulaire. Une simple scie manuelle convient très bien pour sa découpe à condition de se protéger car la poussière émise peut s'avérer nocive.

Le béton cellulaire est un matériau léger et simple à utiliser, il est assez fragile et surtout friable, ce qui rend sa pose délicate, une caractéristique à bien connaître notamment lorsque l'on veut sceller ou fixer des objets dans du béton cellulaire. L'utilisation de chevilles de fixation et de scellements spécifiques est obligatoire pour ce type de matériau, sous peine de le dégrader.

D'autre part, le béton cellulaire est susceptible de se fissurer plus facilement que d'autres matériaux utilisés en construction, comme les briques ou les parpaings par exemple.

Malgré son côté écologique mis en avant, le béton cellulaire est suspecté par certaines études de causer des problèmes de santé graves tels que certains cancers ou la maladie d'Alzheimer. D'autres études viennent cependant contredire ces résultats.

Par ailleurs, aujourd'hui, le béton cellulaire n'est pas renouvelable [8].

II.3.2 Béton caverneux

Béton léger et très poreux en raison de la présence dans sa masse de vides dus à l'absence de sable ou d'éléments fins. Il est obtenu à partir de gros granulats (courants ou légers) humidifiés et enrobés dans

une pâte de ciment ou un mortier, et se met en place par couches épaisses (au moins 50 cm) et par piquage. Il est utilisé comme béton de remplissage ou pour s'opposer aux remontées capillaires [7].

| <i>Types de bétons spéciaux</i> | <i>Propriétés, caractéristiques particulières</i> | <i>Utilisation, domaine d'application privilégié</i> |
|---|---|--|
| <i>Bétons légers caverneux</i> - béton caverneux de granulats légers - béton de bois - béton de liège | - masse volumique réduite - perméabilité à l'eau et à l'air - absorption acoustique | - allègement et drainage - absorption des bruits, réduction des bruits d'impact (écrans acoustiques, chapes flottantes, |

Tableau II.2 : Caractéristiques de béton léger caverneux [7]



Photo II 3 : Béton léger caverneux [7]

Le béton caverneux se caractérise par sa très grande porosité, soit créée par des vides entre les granulats, soit au sein du ciment grâce à un fort dosage en eau. Il possède de nombreuses propriétés qui en font un matériau aux multiples usages potentiels [6] :

- il possède de bonnes propriétés mécaniques. Elles ne sont pas suffisantes pour assurer des descentes de charge importantes, mais le béton caverneux pourrait servir de remplissage d'une structure poteau-poutre.

- il est drainant, c'est-à-dire que l'eau n'est pas stoppée par cette paroi : elle y circule librement.
- les nombreuses cavités qui le composent en fait un matériau dont l'absorption acoustique est non négligeable.
- sa surface irrégulière en fait un matériau possédant une grande surface à l'air : il se prête donc bien à la végétalisation de plantes de surface : mousses, lichens...
- son aspect extérieur est inhabituel et peut mener à de nombreuses applications esthétiques.

Le béton à granulats légers appartient aussi à la famille des bétons légers. Il sera présenté dans le chapitre suivant et sera traité de manière spécifique.

II.4 Propriétés des bétons légers

II.4.1 Malaxage

Le granulat léger est normalement dosé de manière gravimétrique. Pour cela, la teneur en eau et la masse volumique en vrac doivent être surveillées régulièrement et prises en considération lors du dosage.

L'ordre d'introduction dans le malaxeur peut être optimisé en pré-mélangeant le granulat léger avec 2/3 de l'eau de gâchage et en ajoutant ensuite le ciment et le reste de l'eau. A ce moment, seuls les adjuvants liquides sont dosés afin qu'ils ne puissent pas être absorbés par le granulat et perdre leur effet. La durée de malaxage minimale recommandée pour un béton léger compact est de 90 secondes après l'adjonction de tous les composants [9].

II.4.2 Transport

Le transport dans le camion-malaxeur ne doit pas dépasser 30 minutes pour les bétons légers d'une masse volumique inférieure à 1500 kg/m³. En cas de durées de transport plus longues, des essais préliminaires sont nécessaires [4].

II.4.3 Mise en place

En règle générale, les bétons légers d'une masse volumique sèche supérieure à 1600 kg/m³ sont aptes au pompage. Par rapport à la hauteur des couches de remplissage du béton courant (50-70 cm), celle des bétons légers d'une masse volumique inférieure à 1500 kg/m³ doit être réduite d'environ 50%[9].

II.4.4 Compactage

Lors de la vibration du béton léger, il faut faire très attention à ce que les granulats légers ne remontent pas à la surface. Le béton léger exige un plus grand effort de compactage, cause de la masse volumique plus faible et des granulats légers qui amortissent l'énergie de vibration. Le rayon d'action de l'aiguille vibrante étant réduite d'environ 30 à 40 %, il est nécessaire de rapprocher les points d'introduction de l'aiguille vibrante. La durée de vibration doit être adaptée à la consistance afin d'éviter que les granulats légers ne remontent à la surface[9].

II.4.5.Cure

Il faut prévoir des délais de décoffrage plus longs (entre 24 h et 5 jours) et des mesures d'isolation thermique comme le recouvrement avec des nattes isolantes après le décoffrage en fonction de la composition du béton et de l'épaisseur de l'élément de construction. Ceci permet de réduire le risque de fissuration lié au gradient de température entre le cœur et la surface du béton. Le cas échéant des mesures sont à prendre pour diminuer le développement de la chaleur d'hydratation[9].

II.4.6 Durabilité

La surface d'un béton léger compact peut présenter de nombreux pores et cavités d'une taille de plusieurs centimètres. Ils sont, en règle générale, sans influence négative sur la durabilité du béton. Il est recommandé d'employer un coffrage absorbant pour réduire la taille et le nombre des pores.

En outre, une protection par traitement hydrofuge des surfaces des éléments de construction exposés aux intempéries est recommandée lorsque la classe de masse volumique est inférieure à l'intervalle [1000 – 1200] Kg/m³ (au plus tôt à l'âge de 28 jours). Ceci permet d'augmenter la résistance au gel du béton léger et simplifie en plus le nettoyage de la surface des salissures et graffitis [9].

Les conditions d'exposition conditionnent souvent la conception du béton. En effet, les cycles de gel-dégel en présence ou non des sels fondants représentent un aspect critique de la durabilité des bétons légers exposés aux intempéries. Il est important de faire la distinction entre les deux types d'attaque par le gel, avec ou sans sels fondants, puisque les mécanismes de détériorations sont différents [3].

En cas d'utilisation d'agents moussants la durée de malaxage augmente jusqu'à 180-200 secondes[9].

II.4.7 Conductivité thermique

La norme SIA 381/1 (norme suisse) donne pour les bétons légers à base d'argile expansée des valeurs de dimensionnement du coefficient de conductibilité thermique en fonction de la masse volumique après séchage à l'étuve.

| Masse volumique sèche ρ du béton léger [kg/m³] | Conductivité thermique λ [W/mK] |
|--|---|
| 1000 | 0.30 |
| 1250 | 0.50 |
| 1500 | 0.70 |
| 1700 | 1.00 |
| 2400 (béton armé) | 1.80 |

Tableau II. 3 : Conductivité thermique en fonction de la masse volumique après séchage à l'étuve pour les bétons légers à base d'argile expansée et un béton courant (valeurs de dimensionnement selon la norme SIA 381/1) [9]

Le béton léger se caractérise par sa faible conductibilité thermique en comparaison avec un béton de masse volumique usuelle. Les bétons légers, dits isolants, avec des masses volumiques après séchage à l'étuve entre 800 et 1000 kg/m³ sont non seulement compacts et de bonne capacité portante, mais présentent aussi des propriétés d'isolation thermique. Ils permettent de réaliser des murs monolithiques en béton de parement, sans doublage ni isolation périphérique additionnelle. Néanmoins, de tels murs sans isolation thermique supplémentaire nécessiteraient des épaisseurs importantes (environ 1.50 m) pour satisfaire les exigences d'isolation thermique ($u \approx 0.15$). La masse volumique sèche du béton isolant ne peut être atteinte qu'avec des entraîneurs d'air spéciaux ou des agents moussants employés pour les bétons moussants [9].

II.4.8 Caractéristiques physiques et mécaniques des bétons légers

II.4.8.1 Comportement structural

Le comportement structural du béton léger de construction est comparé à celui du béton de masse volumique courante dans la figure II.2. Alors que dans le béton de masse volumique courante le flux de contraintes passe dans le granulat, il est dévié dans la pâte de ciment durcie dont la rigidité et la résistance sont plus élevées que celles du granulat léger [9].

II.4.8.2 Résistance à la compression

La porosité du granulat liée à sa masse volumique a une influence prédominante sur la masse volumique du béton : plus la masse volumique du granulat est faible, plus la masse volumique du béton léger sera faible. La résistance à la compression du béton léger dépend directement de la masse volumique du béton : plus celle-ci est basse, plus sa résistance à la compression sera faible (figure II.2) [9].

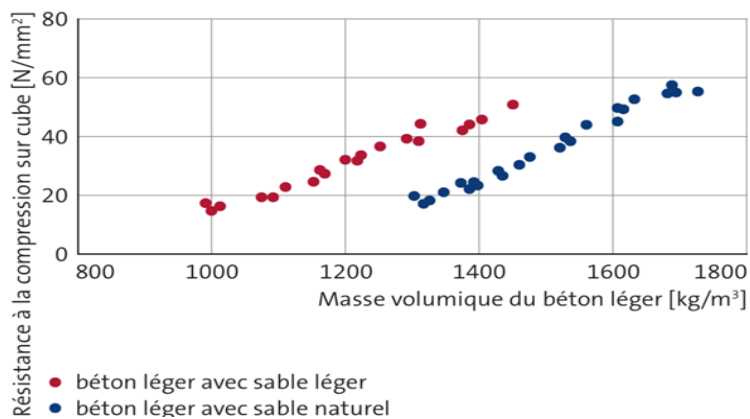


Figure II.1 : Corrélation entre la résistance à la compression sur cube et la masse volumique après séchage à l'étuve d'un béton léger à argile expansée. [9]

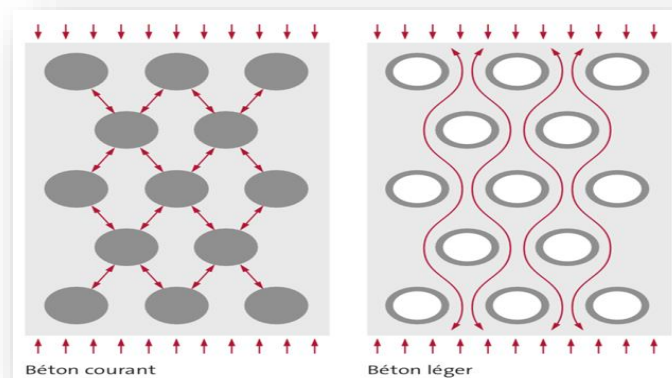


Figure II.2 : Représentation schématique du flux de contraintes dans le béton courant (à gauche) et dans le béton léger de construction (à droite) [9]

II.4.8.3 Résistance à la traction

La résistance à la traction du béton peut être évaluée sur la base de la résistance à la compression. Dans le cas du béton léger, la résistance à la traction doit être corrigée par un facteur de correction dépendant de la masse volumique selon l'équation suivante [9] :

$$\eta_t = 0.4 + 0.6 \left(\frac{\rho}{2200} \right)$$

η_t = facteur de correction pour la résistance à la traction

ρ = masse volumique après séchage à l'étuve du béton [kg/m^3]

II.4.8.4. Module d'élasticité

Le module d'élasticité du béton léger dépend principalement du module d'élasticité des granulats et de celui de la pâte de ciment. Les valeurs usuelles du module d'élasticité du granulat léger varient entre 3000 et 18000 N/mm² et n'atteignent qu'une fraction du module d'élasticité du granulat normal. En général, il est même inférieur à celui de la pâte de ciment. Selon le type de granulat léger, la résistance à la compression et la masse volumique du béton léger, le module d'élasticité du béton léger de construction varie entre 5000 et 24000 N/mm². A résistances à la compression identiques, le béton léger présente un module d'élasticité 30 à 70 % inférieur à celui du béton normal [9].

Le module d'élasticité du béton léger diminue avec sa masse volumique. Cette dépendance est illustrée à la figure II.3 pour différents types de bétons légers.

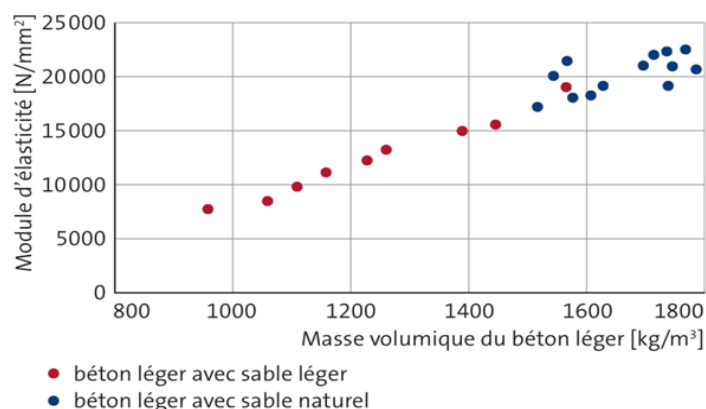


Figure II.3 : Corrélation entre la masse volumique après séchage à l'étuve et le module d'élasticité de différents bétons légers [9]

Le module d'élasticité du béton peut être évalué sur la base de la résistance à la compression.

Dans le cas du béton léger, il doit être corrigé par un facteur de correction dépendant de la masse volumique selon l'équation suivante[9] :

$$\eta_{IE} = \left(\frac{\rho}{2200} \right)^2$$

η_{IE} = facteur de correction du module d'élasticité

ρ = masse volumique après séchage à l'étuve du béton [kg/m³]

II.4.8.5 Retrait et fluage

Le retrait du béton léger est augmenté de 20 à 50 % par rapport à celui d'un béton de masse volumique courante selon la norme suisse SIA 262 [9].

Pour le béton léger, les déformations de fluage peuvent être estimées selon la norme SIA 262. On appliquera un coefficient de fluage $\varphi(t, t_0)$ multiplié par le facteur de correction η_{ie} [9].

Le retrait du béton léger est plus important que celui du béton normal. Il est de l'ordre de 0.5 fois le facteur d'un béton normal pour les classes inférieures à du LC 16/18 et de 1.2 pour les classes supérieures à du LC 20/22. LC signifie light concrete qui veut dire béton léger, le premier chiffre qui suit désigne la résistance à la compression à 28 jours sur une éprouvette cylindrique et le second chiffre désigne la résistance à la compression à 28 jours sur une éprouvette cubique [9].

II.4.8.6 La masse volumique

La masse volumique du béton représente l'une des caractéristiques les plus importantes dans le cadre de la présente recherche. La réduction de la masse volumique est rendue possible en changeant le type de granulat et en faisant varier les proportions des différents constituants [7].

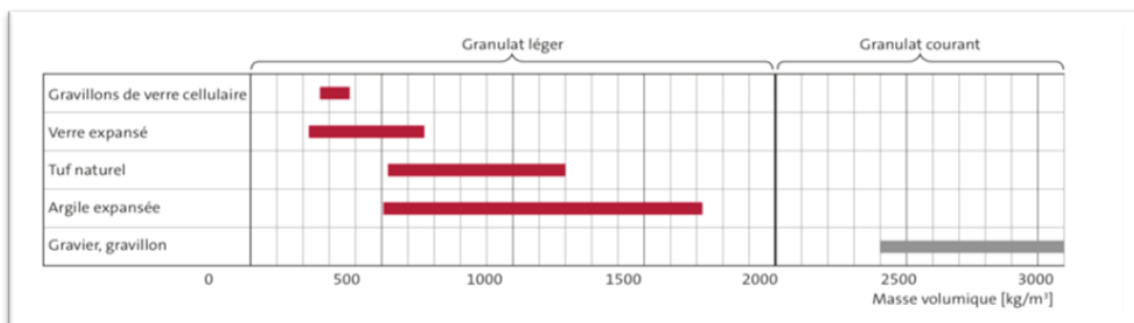


Figure II.4 : Domaines de masse volumique de quelques granulats légers et courants [9]

| | | | Béton léger classe de masse volumique D1.0 | | Béton léger classe de masse volumique D1.2 | | Béton léger classe de masse volumique D1.8 | |
|---|---|---------------------------------------|--|----------------------------|--|----------------------------|--|----------------------------|
| Composant | | Masse volumique [kg/dm ³] | Teneur [kg/m ³] | Volume [l/m ³] | Teneur [kg/m ³] | Volume [l/m ³] | Teneur [kg/m ³] | Volume [l/m ³] |
| Ciment | CEM II/B-M(T-LL) (Optimo 4) | 3.03 | 400 | | 350 | | 350 | |
| Addition | cendre volante | 2.24 | 200 | | | | | |
| Granulat courant | sable 0/4 | 2.68 | | | 840 | | 840 | |
| Granulat léger | argile expansée | | 350 | | 240 | | 481 | |
| Eau | | 1.00 | 210 | | 185 | | 175 | |
| Teneur en air | | | | 200 | | 70 | | 50 |
| Adjuvant | fluidifiant, entraîneur d'air, agent moussant | | selon besoin | | | | | |
| Masse volumique et volume du béton frais | | | 1160 | 1000 | 1616 | 1000 | 1846 | 1000 |
| Propriétés de béton durci sélectionnées: résistance à la compression [N/mm ²] | | | 10 | | 24 | | 45 | |
| Module d'élasticité [N/mm ²] | | | 6000 | | 15 000 | | 20 000 | |

Tableau II.4 : Exemples de formulations d'un béton léger de différentes classes de masse volumique ainsi que quelques propriétés sélectionnées [9]

II.5 Domaines d'utilisation des bétons légers

Les bétons légers peuvent être utilisés dans les structures selon leurs masses volumiques apparentes comme suit[5]:

- Des bétons de remplissage, leur masse volumique apparente est comprise entre 300 et 1000 kg/m³, leurs résistances en compression sont souvent faibles et leurs caractéristiques thermiques sont bonnes ;
- Des bétons porteurs isolants, leur masse volumique apparente est comprise entre 1000 et 1400 kg/m³, 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/m³. 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. Il peut être utilisé aussi pour la rénovation de plancher en bois ou en béton et le ragréage de sols et remblai.

Chapitre III

Les bétons à granulats légers

III.1 Introduction

Le béton de granulats légers n'est pas une nouvelle invention en technologie de béton. On l'a connu depuis des périodes antiques, ainsi il est possible de trouver un bon nombre de références en liaison avec leur utilisation. Il a été fait en utilisant les agrégats normaux d'origine volcanique tels que la ponce, le scoria, etc. Les Sumériens ont employé ceci dans le bâtiment Babylone dans le 3ème millénaire. Les Grecs et les Romains ont employé la ponce dans la construction des bâtiments [1].

Les bétons de granulats légers sont fabriqués comme les bétons courants, mais avec des granulats légers. Il existe en effet de nombreuses variétés de bétons de granulats légers que l'on peut classer de différentes façons. Cormon propose une classification basée sur l'origine des granulats et on peut ainsi distinguer quatre grands groupes [1].



Photo III.1 : béton de granulats légers

III.2 Les bétons de granulats légers naturels

Il s'agit des bétons fabriqués avec de la ponce ou de la pouzzolane (matériaux volcaniques naturels de structures très poreuses obtenus par concassage). Ces matériaux sont relativement peu connus en Algérie, leur emploi reste donc sans domaine d'application, mais il n'est pas exclu, que dans l'avenir, certaines de leurs propriétés les rendent plus avantageux pour certaines réalisations [1].

III.3 Les bétons de granulats légers de matériaux ayant subi un traitement thermique

Ce sont les bétons fabriqués avec des granulats d'argile, de schiste, d'ardoise, de perlite expansée, de polystyrène expansé ou de vermiculite exfoliée.

Chapitre III

Le béton de perlite est utilisé comme enduit isolant, chape de planche, pente de terrasse...etc. Il présente une excellente résistance aux agents chimiques et un bon comportement au feu.

Le béton de polystyrène est utilisé pour les murs extérieurs et les hourdis de planchers.

Le béton d'argile expansé est l'un des matériaux de construction les plus prometteurs. L'argile expansée apporte ses qualités exceptionnelles d'isolant thermique et acoustique, d'allègement des structures et de solutions pratiques de mise en œuvre pour tous les travaux, de construction neuve comme de rénovation, ce qui en fait un matériau à forte valeur ajoutée; une réponse aux défis d'aujourd'hui: construire mieux et respectueusement pour l'environnement[7].



Photo III. 2 : béton de perlite



Photo III.3 : béton de polystyrène expansé



Photo III. 4 : béton d'argile expansée

III.4 Les bétons de granulats légers de matériaux artificiels ne subissant pas de traitement spécial

Il s'agit des bétons réalisés avec du mâchefer, sous-produit de la combustion du charbon ou des ordures ménagères. Ce matériau est en très nette régression et on l'utilise que pour la fabrication de parpaings.

III.5 Les bétons de granulats de matériaux artificiels subissant divers traitements spéciaux

Ce sont des bétons confectionnés à partir des granulats légers issus de très nombreux déchets industriels comme le laitier de haut fourneau du complexe sidérurgique d'EL-HADJAR que l'on expande sur les lieux de production, les cendres volantes que l'on peut fritter ou le verre que l'on peut également expandre.

III.6 Propriétés physiques des bétons à base de granulats légers

III.6.1 Interaction des granulats légers avec la matrice cimentaire

Plusieurs auteurs ont montré que l'interface autour des granulats légers est plus dense que celle autour des granulats de masse volumique normale du fait de leur plus grande absorption. L'absorption d'eau favorise donc une bonne adhérence pâte/granulat. Selon Zhang and Gjrv, l'interface pâte/granulats légers est le siège de mécanismes physiques, chimiques et mécaniques qui expliquent cette affinité. La figure suivante décrit les trois ordres d'interaction identifiés par les auteurs[2].

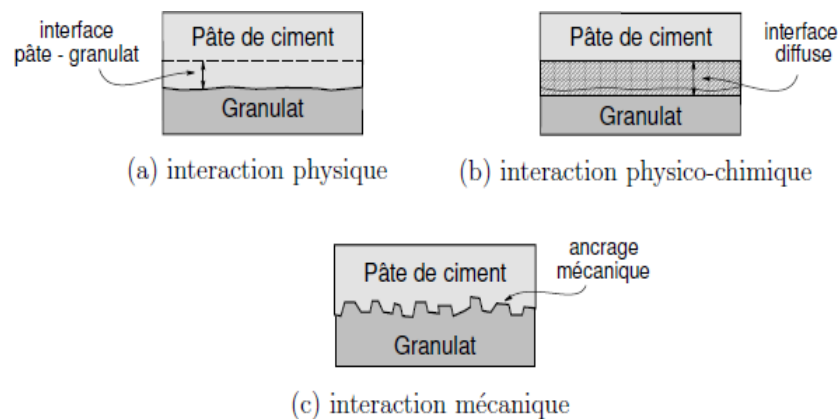


Photo III.5 : Mécanismes d'interaction pâte/granulat léger [2]

- L'interaction physique est liée à l'absorption d'eau par les granulats légers poreux dans la matrice cimentaire. À l'échelle microstructurale, ce phénomène physique va se traduire par une réduction du rapport eau/ciment dans la sphère d'influence de la succion par rapport au cœur de la pâte. Les résultats de Elsharief et al. indiquent que cette réduction du rapport eau/ciment explique la faible porosité de l'auréole de transition autour des granulats légers ;
- L'interaction chimique met en avant la pouzzolanicité des granulats légers traités thermiquement. Selon Arnould et Virlogeux le traitement thermique utilisé pour l'expansion de certains granulats légers (les granulats légers artificiels notamment), peut leur conférer une réactivité pouzzolanique proportionnelle à la quantité de chaleur appliquée ;
- L'interaction mécanique est une conséquence des deux premières. La rugosité de la croûte des granulats légers va favoriser la pénétration de la pâte de ciment dans les interstices à la surface et améliorer de fait l'adhérence pâte/granulat[2].

III.6.2 Maniabilité et murissement des bétons à granulats légers

Les granulats légers sont connus par leur forte absorption d'eau qui constitue un impact sur la maniabilité, la résistance et le murissement des bétons. Cependant ces derniers dépendent aussi de l'état des granulats utilisés saturés en surface ou bien secs.

Pour les granulats saturés séchés en surface, ils n'affectent pratiquement pas sur la maniabilité. Alors l'eau absorbée n'est pas à prendre en compte dans le rapport eau/ciment du béton. Par ailleurs, lorsque l'hydratation du ciment fait chuter l'humidité relative dans les pores capillaires de la pâte de ciment durci, l'eau présente dans les granulats migre vers ces capillaires, rendant possible une hydratation supplémentaire. Ce que fait que les bétons de granulats léger sont moins sensibles à un mûrissement humide incorrect qu'un béton ordinaire[5].

Par contre dans le cas de granulats utilisés secs, l'absorption d'eau des granulats diminue la maniabilité. De plus, si le béton est vibré avant que l'absorption par les granulats légers secs ne soit terminée, des vides dus à la dessiccation se développent et, à moins que le béton ne soit revibré, sa résistance sera moins élevée[5].

III.6.3 La porosité

Le béton est constitué de plusieurs éléments solides (granulat, liant) et de plusieurs familles de vides dont la taille varie de quelques dizaines d'Angstrom (A) à quelques millimètres selon l'origine de ces porosités[5].

Les granulats possèdent une porosité intrinsèque appelée $\emptyset g$, due à la présence de l'air intra-particule. Compte tenu de la taille caractéristique des capillaires (de l'ordre de la dizaine de μm), la porosité des granulats sera qualifiée de porosité microscopique[5].

La matrice de liant contient également des vides d'air qui apparaissent au moment de la prise des hydrates et du séchage du matériau. On parle d'air intra-liant qui permet de définir la porosité intrinsèque du liant \emptyset_1 , la taille caractéristique des pores présents entre les hydrates de Ca (OH) 2 ou de C-S-H, varie entre 0.01 μm et 5 μm et la taille des pores générés par un entraîneur d'air varient entre 5 μm et 1 mm. L'air intra-liant sera également considéré comme de l'air microscopique[5].

$$\emptyset_l = \frac{v_{vides}}{v_{liant}} \quad [5]$$

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

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

Enfin, l'arrangement plus ou moins compact des différents constituants entre eux (empilement de granulats et du liant) crée des vides supplémentaires, à l'origine de la porosité mésoscopique du matériau[5].

$$\emptyset_{meso} = \frac{v_{vides}}{v_t} \quad [5]$$

Avec : V_{vides} : Volume des vides contenus dans le matériau autres que l'air intra – liant et intra – particule (m^3)

V_t : Volume total occupé par le matériau (m^3)

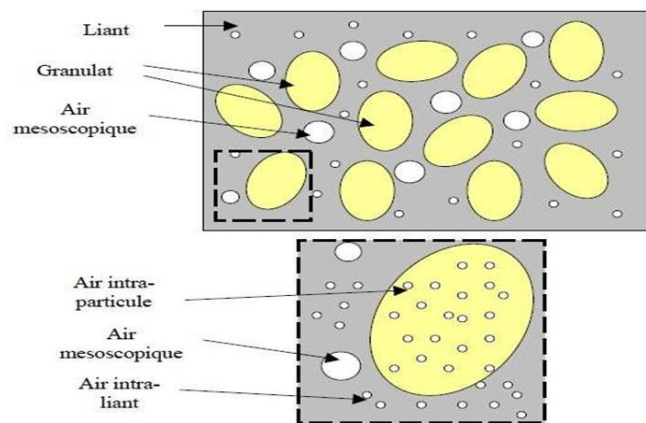


Photo III.6 : Porosité du béton

III.6.4 Absorption d'eau

L'absorption est un phénomène physique par lequel un liquide migre de l'extérieur vers l'intérieur d'un milieu poreux grâce à un phénomène de remontées capillaires. L'absorption entraîne un gain de masse du matériau. Cependant, l'absorption n'est possible que si les capillaires du réseau poreux communiquent pour permettre le transfert de l'eau : on parle alors de porosité ouverte ou connectée. Lorsque le matériau contient des pores emprisonnés comme dans le cas du béton cellulaire, on parle de pores occlus. Ces pores ne participent pas au phénomène d'absorption. Une étude expérimentale menée par VAQUIER a mis en évidence le rôle de la microstructure dans l'absorption en comparant le type et la distribution par taille des pores de quatre granulats légers et en analysant les conséquences sur l'absorption, voir tableau suivant[5].

| | Porosité ouverte (%) | % pores diamètre >2 µm |
|-----------------|----------------------|------------------------|
| Ponce | 55,0 | 68,0 |
| Argile expansée | 53,9 | 11,7 |
| Schiste expansé | 37,0 | 34,7 |
| Cendre frittée | 37,0 | 17,6 |

Tableau III.1 Porosité ouverte des granulats et proportion capillaire de diamètre >2 µm

Il constate que la plus grande partie de l'eau est absorbée en quelques minutes et que la quantité d'eau absorbée n'est pas corrélée à la porosité ouverte mais à la porosité ouverte de diamètre supérieur à 2 microns. Ceci est confirmé par la comparaison entre le volume de liquide maximal absorbé par les granulats et le volume total des capillaires de diamètre supérieur à 2 microns qui sont quasiment identiques[5].

III.6.5 La masse volumique de bétons de granulats légers

Avec une masse volumique après séchage inférieure à $2\,000\text{ kg/m}^3$, le béton à granulats légers permet un gain de poids selon l'ouvrage. Cependant il est moins résistant que les bétons «classiques». Il est utilisé en remplissage pour des éléments porteurs et isolants, en réhabilitation...

D'après ARNOULD et VIRLOGEUX la prise de poids d'un béton léger immergé ne dépasse pas 40 kg/m^3 et est de 30 kg/m^3 pour un béton traditionnel. Les auteurs expliquent essentiellement ce gain de poids par le remplissage des vides du mortier, et non par la migration d'eau vers les granulats légers, les pores de surface étant au moins en grande partie bouchés par le mortier, au moment du malaxage et en début de prise, du fait des échanges d'eau entre le mortier et les granulats légers [5].

III.7 Propriétés mécaniques des bétons de granulats légers

III.7.1 Résistance à la compression

Avec des granulats légers et une formulation de béton appropriée, il est possible d'obtenir des résistances à la compression comparables à celles obtenues avec du béton traditionnel. L'évolution des connaissances et des technologies du béton ont permis au fil des ans d'améliorer les propriétés des bétons, dont celles des bétons légers. Par exemple, l'utilisation d'ajouts minéraux (fumée de silice, cendres volantes, laitiers) et d'adjuvants (agents entraîneurs d'air (AEA) superplastifiants (SP), agents réducteurs d'eau (WR) et accélérateurs de prise) ont donné la possibilité notamment de diminuer le rapport E/L tout en conservant une bonne maniabilité. Des résistances en compression de 100 MPa ont même été obtenues et sont présentées (voir figure suivante)[19].

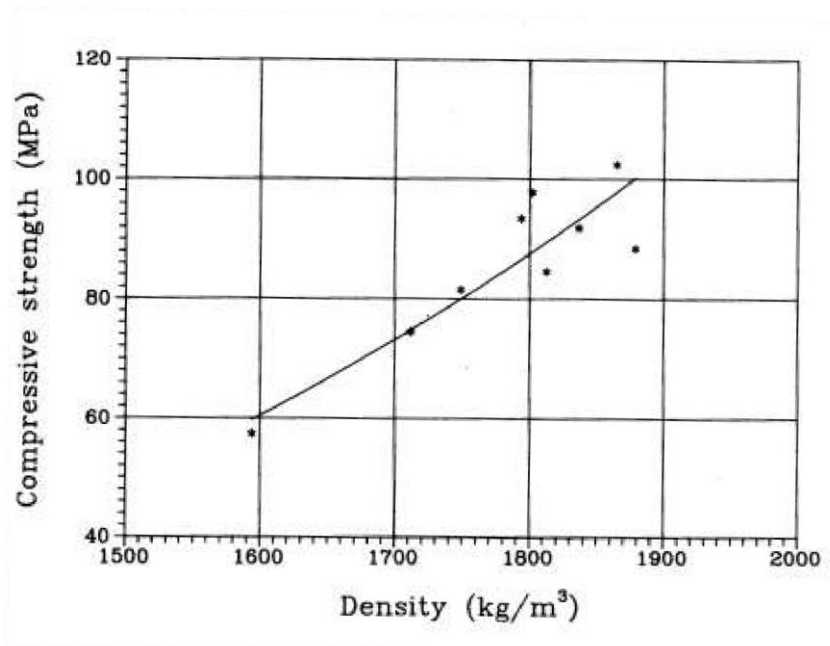


Figure III.1 : Relation entre la résistance en compression à 28 jours et la densité du béton frais d'un mélange avec des granulats légers

III.7.2 Résistance à la traction

Tout comme les bétons «classiques», les bétons à granulats légers présentent une faible résistance à la traction, puisque la propagation des fissures peut s'effectuer au travers des 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/m³, ou de 3,5 à 5,6 MPa pour des bétons, dont la masse volumique variait de 1620 à 1885 kg/m³, ont par exemple été rapportées[19].

III.7.3 Module élastique

Pour un rapport E/L équivalent, le module élastique d'un béton à granulats légers est inférieur à celui d'un béton normal. La cause principale réside dans le module élastique des granulats légers (10 à 20 GPa) qui est très inférieur à celui des granulats de masse volumique usuelle (granite, 10 à 70 GPa, calcaire, 10 à 55 GPa). La figure suivante présente quelques résultats de précédentes études sur des bétons légers. On constate notamment que le module élastique semble proportionnel à la masse volumique[19].

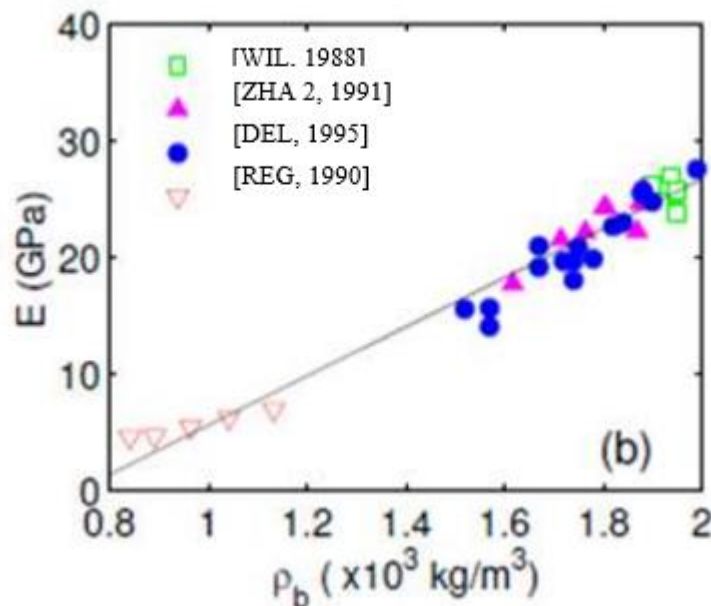


Figure III.2: Résultats de modules élastiques de bétons légers à 28 jours d'après plusieurs auteurs [19].

III.8 Domaines d'utilisation des bétons de granulats légers

Les bétons de granulats légers sont utilisés dans le domaine du bâtiment et des ouvrages d'art. Ils sont utilisés notamment pour alléger les éléments tels que les poutres, les poteaux, les planchers, les tabliers de ponts etc. Les bétons de granulats légers sont également connus pour améliorer l'isolation thermique de l'enveloppe des bâtiments ou l'absorption acoustique des écrans acoustiques protégeant

Chapitre III

les riverains des nuisances sonores. Ils sont utilisés dans les structures préfabriquées ou réalisées sur chantier. Les bétons légers pour les produits de structure présentent des masses volumiques réelles sèches comprises entre 1200 et 2000 kg/m³ et des résistances à la compression comprises entre 25 et 80 Mpa [3].

| <i>Types de bétons spéciaux</i> | <i>Propriétés, caractéristiques particulières</i> | <i>Utilisation, domaines d'application privilégiés</i> |
|-----------------------------------|--|---|
| <i>Bétons de granulats légers</i> | <ul style="list-style-type: none">- masse volumique réduite (entre 1 000 et 1 800 kg/m³)- bonne résistance mécanique | <ul style="list-style-type: none">- allègement des produits et des ouvrages- isolation thermique et phonique |

Tableau III.2 : Caractéristiques des bétons de granulats légers [7]

Chapitre IV

Etude de cas : Amorce d'une étude pratique d'un mortier à base de polystyrène expansé

IV.1 Introduction

La découverte du polystyrène remonte depuis 1839, mais son exploitation à grande échelle, en Allemagne et aux États-Unis, date des années 30, la première fabrication industrielle ayant eu lieu en 1933 [15].

Le béton de polystyrène est un béton à granulats légers. Il est généralement constitué de billes de polystyrène mélangées à une matrice à base de pâte de ciment, ou à base de mortier. Parfois, pour un critère d'allègement, le polystyrène est utilisé dans les bétons traditionnels en remplaçant une partie des granulats ordinaires par des billes de polystyrène.

On distingue trois types de polystyrènes : le polystyrène « cristal » (PS, non cristallin mais portant ce nom à cause de son aspect transparent), le polystyrène « choc » et le polystyrène expansé (PSE). Sans aucun ajout, le polystyrène est solide à 20°C et pâteux à 120°C, la fusion s'opérant entre 150°C et 170°C. Le polystyrène est généralement inflammable et combustible, la dégradation commençant dès 350°C et l'auto-inflammation vers 490°C. D'une densité réelle de 1,03 à 1,05, le polystyrène est soluble dans les hydrocarbures chlorés et aromatiques [15].

Dans le cas de notre tentative d'étude, il s'agit d'un polystyrène expansé utilisé en remplacement d'une partie de sable de dunes dans un mortier de ciment.

Mais tout d'abord nous allons donner quelques détails sur le polystyrène avant d'aborder la problématique du calcul des proportions (formulation).

IV.2 La fabrication du polystyrène expansé

Le polystyrène brute est un matériau plus ou moins lourd qui se présente sous forme de perles. L'expansion de ces perles est réalisée en trois phases : la polymérisation, le pré expansion et le moulage.

IV.2.1 La polymérisation du styrène additionnée d'agent porogène

La polymérisation est une réaction chimique qui permet d'associer plusieurs molécules identiques pour former une molécule plus importante.

Le styrène est une molécule associant uniquement carbone et hydrogène. Il est issu du pétrole et est produit industriellement. Mais on le trouve aussi à l'état naturel dans certains aliments (fraises, haricots, noix, bière, vin...).

Les granules de polystyrène expansibles sont obtenus par polymérisation du styrène. Ils sont imprégnés d'un gaz, le pentane, qui servira ensuite à l'expansion[14].

IV.2.2 La pré expansion des perles à l'aide de la vapeur

Les granules de polystyrène sont introduits dans une cuve en inox. On injecte ensuite de la vapeur d'eau qui, en dilatant le pentane, va provoquer une première expansion (jusqu'à 30 fois leur volume initial). Une fois pré expansées, les billes reposent dans des silos pendant plusieurs heures pour permettre leur séchage : c'est la maturation [14].

IV.2.3 Le moulage

Les billes pré expansées sont introduites dans un moule fermé et sont soumises à une nouvelle injection de vapeur d'eau sous pression. Elles reprennent leur expansion, occupent tout l'espace du moule et se soudent entre elles pour constituer l'emballage.

La quantité de billes introduites dans le moule détermine la densité finale du produit.

Le polystyrène comporte trois niveaux de structure[13] :

- Un agglomérat de billes soudées entre elles ;
- Des billes composées de cellules ;
- Des cellules contenant un gaz (air et résidus de porogène).

IV.3 Polystyrène non traité et polystyrène traité

Les polystyrènes sont des alvéoles plastiques de la famille de polymères, de styrène. Il y a différents types et qualités de polystyrène.

IV.3.1 Le polystyrène 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[1] :

- 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

Chapitre IV

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".

Mais malgré cela, l'utilisation de ce type de béton aura des inconvénients [1] :

- Il y aura des difficultés d'obtention d'une homogénéité du matériau, en employant l'équipement traditionnel pour faire le béton ;
- Difficulté de pomper ou de vibrer le béton ;
- Constatation d'aucune résistance au feu.

D'où les conséquences négatives suivantes [1] :

- Le béton contiendra une grande quantité d'eau ;
- Résistance à la compression faible ;
- Pas économique car il y aura une grande consommation de polystyrène pour alléger le béton à cause des 5 à 30 % des alvéoles du polystyrène qui seront remplis d'eau et de ciment ;
- L'eau contenue dans le béton produira des germes et donnera de mauvaises odeurs dans le polystyrène ainsi que dans le béton particulièrement dans des climats chauds et humides ou dans des pièces humides comme la salle de bains ou la cuisine ;
- Délai trop grand de séchage pour le béton ;
- Retrait important du béton dû à la grande quantité d'eau évacuée ;
- Possibilité d'employer des renforts d'acier écartée parce qu'ils seraient attaqués par la corrosion (à cause de l'eau contenue dans les alvéoles du polystyrène).

En conclusion l'emploi du polystyrène normal dans le béton a une pauvre image de fragilité, pour minimiser ces problèmes, les billes de polystyrène doivent être traitées de façons à 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 BETO** [1].

Le granulat de POLYS BETO est une bille de polystyrène vierge expansée à granulométrie contrôlée, enrobée d'un adjuvant, il remplace totalement ou partiellement le sable et le gravier traditionnellement utilisés dans la confection des mortiers et bétons.



Photo IV.1 : Polystyrène non traité

IV.3.2 Polystyrène traité : exemple du POLYS BETO

Le POLYS BETO est un granulats artificiel conçu et réalisé pour alléger, isoler et améliorer certaines caractéristiques des bétons.

C'est un granulats léger qui s'emploie comme un granulats 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 BETO 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.

Le POLYS BETO 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 décharger de leurs charges électriques, puis avec d'autres additifs, pour les charger 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 leur 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[1].

Les avantages du POLYS BETO sont qu'il est utilisable avec tous les types de ciment, et avec tous les types de granulats naturels.

Le béton est homogène et est réalisé avec les mêmes règles que celles du béton traditionnel et on peut le mixer avec des équipements classiques.

Le béton transporté par camion est facile à pomper.

Peu de perles de Polys Béto seront séparées par des micros bulles aériennes [1] :

- Aucun alvéole ne sera rempli d'eau pour réduire la différence de densité entre le mélange Eau / Ciment et le polystyrène d'où une résistance au feu MO et à la fumée FO ; au contact du feu les perles produiront moins de fumée que les perles normales non traitées ;
- Moins d'eau contenue dans le béton ;
- Polys béto peut alléger tout type de béton de 3 à 80 % selon son taux d'incorporation ;
- Résistance à la compression plus élevée ;
- Polys Béto est économique parce que les petites quantités de Polys Béto sont suffisantes pour alléger le béton : les alvéoles du Polys Béto ne seront remplis ni d'eau ni de ciment ;
- Aucun microbe ni germe n'est détecté, ainsi qu'aucune odeur ;
- Durée courte de séchage pour le béton ;

- Aucune corrosion des renforts d'acier
- Retrait très faible.



Photo IV.2 : Polystyrène traité

IV.4 Propriétés physiques et mécaniques du polystyrène

IV.4.1 Densité

La densité du polystyrène à l'état brut avoisine les 1000 kg/m^3 (Rapport du Laboratoire de Contrôle Technique et d'Expertise, Alger, 1998). Cette densité chute considérablement lorsque le polystyrène est expansé, elle est comprise entre 8 et 80 kg/m^3 [13].

Il faut noter que cette différence remarquable est due à la présence de l'air dans le polystyrène expansé. Le volume de polymère reste toujours très faible devant le volume d'air. Par exemple pour une densité de 32 kg/m^3 , le polystyrène occupe 2.5% du volume total, mais représente 92% de la masse totale du polystyrène expansé [13].

IV.4.2 Résistance à la chaleur

Le polystyrène expansé se ramollit à une température de 90°C .

IV.4.3 Absorption

Le polystyrène est un matériau de faible absorption, elle est de 0.2 à 1g par 100 cm^3 (Rapport du Laboratoire de Contrôle Technique et d'Expertise, 1998) [13].

IV.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 5 cm d'épaisseur entreposés entre deux cloisons. La conductivité thermique du polystyrène dépend de sa porosité, elle-même dépendante

du procédé d'expansion. En générale elle varie entre 0.027 à 0.037 W.m⁻¹.K⁻¹. Ces valeurs sont considérées parmi les valeurs les plus faibles de la conductivité thermique des matériaux [13].

IV.4.5 Résistance à la compression

| Référence | Classe Q ₁ | Classe Q ₂ | Classe Q ₃ | Classe Q ₅ | Classe Q ₆ |
|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Masse volumique (Kg/m ³) | 9 | 13 | 16 | 20 | 25 |
| Contrainte (MPa) | 0.03 | 0.6 | 0.9 | 0.12 | 0.15 |

Tableau IV.1 : Valeurs de la résistance en compression du PSE en fonction de sa densité [13].

IV.5 Composition du béton de polystyrène expansé

Le béton de polystyrène est obtenu par un remplacement total ou partiel du granulat traditionnel par des perles de polystyrène expansé jusqu'à ce qu'on arrive à un mélange de classes granulaires adéquates, cela conduit à une gamme étendue de bétons légers de construction dotés de masses volumiques et de résistances variées.

Les constituants utilisés dans la confection des bétons légers de polystyrène sont les mêmes que ceux utilisés pour les bétons conventionnels. En définitive, la principale caractéristique recherchée est davantage axée sur sa masse volumique que sur ses résistances mécaniques. Puisque le granulat occupe une partie importante du volume dans le béton, il faut donc tenter de substituer une partie de la masse granulaire par des granulats légers et même ultra- légers.

IV.5.1 Le liant

Dans tous les cas, le liant choisi est à base de ciment Portland type CEM I ou II distribué par les cimentiers et conforme à la norme EN 197.

IV.5.2 Le sable

Tout type de sable est 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.

IV.5.3 Le polystyrène

Le polystyrène expansé est constitué de 98% d'air.

Il existe deux types de PSE : les polystyrènes expansés moulés (PSE-M) et les polystyrènes expansés extrudés (PSE-E).

- 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, le pentane (C_5H_{12}), dont la température d'ébullition, à la pression atmosphérique, est de 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 expande et on les moule à la vapeur ;
- Le PSE-E est quant à lui obtenu lors de l'extrusion par injection sous pression d'un gaz (les hydrochlorofluorocarbones ont été remplacés par le pentane) dans le polymère cristal fondu [10].

De par ses caractéristiques que lui confèrent ses 98% d'air, le PSE s'est imposé dans la formulation des bétons légers comme granulats extra léger par sa masse volumique[10].

IV.6 Les propriétés des bétons légers de polystyrène

IV.6.1 La masse volumique

Le béton léger réalisé à l'aide du polystyrène expansé (PSE) donne l'avantage d'avoir toute une panoplie de densités allant de 500 kg/ m³ à 2200 kg/m³[1].

Les proportions de polystyrène expansé (PSE) utilisées conduisent à un vaste intervalle de béton léger et par suite à une solution technique intéressante pour les domaines du bâtiment, des ouvrages d'art et d'offshore [1].

IV.6.2 La 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. 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 [1].

IV.6.3 Résistance à la compression

La résistance à la compression des bétons de polystyrène est en 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 [13].

IV.6.4 Conductivité thermique

Les bétons de polystyrène sont caractérisés par leur pouvoir isolant, leur faible conductivité thermique comprise entre 0.05 et 0.12 $W.m^{-1}.K^{-1}$ pour les bétons de construction témoignent de cette propriété. Elle varie en fonction de la densité du béton. Le tableau suivant donne quelques valeurs de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique sèche [13].

| | | | | | | |
|--|-------|------|------|------|------|------|
| Masse volumique sèche (kg/m^3) | 300 | 500 | 700 | 900 | 1200 | 1500 |
| Conductivité thermique ($W.m^{-1}.k^{-1}$) | 0.065 | 0.14 | 0.15 | 0.33 | 0.39 | 0.07 |

Tableau IV.2 : Conductivité thermique des bétons de polystyrène

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 constituent de bons isolants thermiques.

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.

On peut remplacer la méthode d'isolation thermique à l'aide de plaque de polystyrène, à celle du béton de polystyrène non seulement isolant thermiquement mais aussi léger et résistant.

Les recherches réalisées par A. GUEZOULI et A. BENAÏSSA ont montré que l'évolution de la conductivité thermique du béton de polystyrène décroît avec l'augmentation des perles de polystyrène dans le béton comme l'indique la figure suivante [1]:

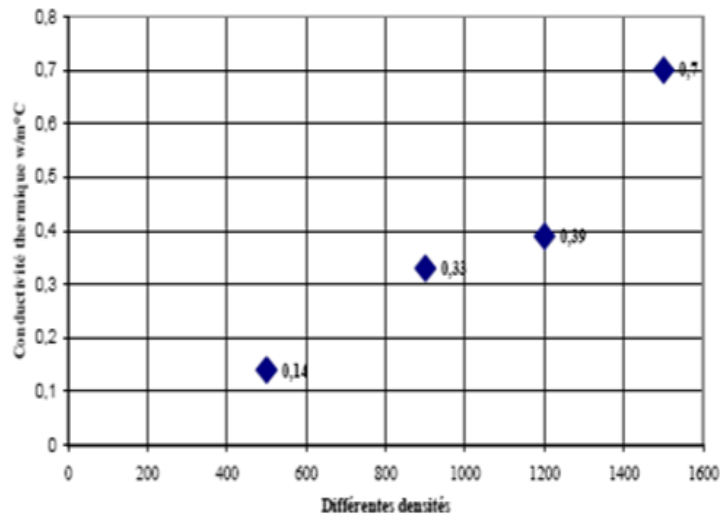


Figure IV.1 : Conductivité thermique en fonction de la masse volumique

IV.6.5 Le comportement 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 de l'ouvrabilité du béton est exigée pour réaliser le béton de bonne qualité. Les caractéristiques fondamentales pour définir l'ouvrabilité incluent la viscosité, la cohésion, la mobilité, la stabilité, la compactibilité et la pompabilité.

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 [13].

Grâce à l'emploi des matrices cimentaires à ultra haute résistance, les bétons de polystyrène peuvent avoir des résistances de bétons de structure [13].

IV.7 Avantages d'utilisation du béton légers de polystyrène

Récemment, le béton de polystyrène est très utilisé, il présente beaucoup d'avantages sur le plan technique et économique. Il est ultra léger, sans doute parmi les bétons les plus légers, avec sa faible absorption d'eau, il est très économique.

Considéré parmi les matériaux qui possèdent les meilleures performances thermiques et phoniques, le béton de polystyrène est durable [13].

Le polystyrène est disponible en plaque d'isolation acoustique et thermique. C'est un matériau innovant qui peut être introduit à la formulation du béton pour former des << placo-styrènes >>, dix fois plus légers et trente fois plus isolants et tout aussi résistants que le béton traditionnel.

Le polystyrène permet une économie d'énergie dans l'habitat domestique, les pertitions d'énergie sont évaluées à 43% de la consommation énergétique totale. Les économies d'énergie sont réalisées en supprimant la plupart des ponts thermiques, en particulier ceux qui sont situés à la jonction entre les cloisons internes et les façades. La consommation en énergie (chauffage et ventilation) coûte plus cher pour les ménages[13].

En été, dans les pays chauds, les constructions ont besoin de matériaux d'isolation thermique. Le polystyrène expansé est un matériau climatiseur, qui absorbe le surplus de chaleur pendant la journée. Il offre un espace sec et confortable : il élimine l'humidité qui peut se condenser sur les murs.

IV.8 Tentative d'étude pratique

IV.8.1 Mortier envisagé

Comme nous le savons, le mortier normalisé est confectionné à base de sable normalisé, de ciment et d'eau dans des proportions bien définies. Dans notre cas, le mortier envisagé sera basé sur le mortier normalisé mais par l'utilisation d'un sable de dune.

Les quantités sont :

- S=1350 kg/m³ correspondant à 6 parts dans un volume
- C= 450 kg/m³ correspondant à 2 parts dans un volume
- E= 225 kg/m³ correspondant à 1 part dans un volume

Au total nous avons 2025 kg/m³, soit 2025 g/dm³.

IV.8.1.1 Ciment

Un ciment Portland local (PC) de type CEM I de classe de résistance 42.5 conforme à la norme algérienne NA 433-2002 a été utilisé pour tous les mélanges de mortier. La densité absolue et la surface spécifique du ciment étaient respectivement de 3.15 et 3200 g/cm². Sa composition chimique et minéralogique du clinker, déterminée par calcul bogue sont données dans le tableau suivant [16]:

| Composition Chimique (%) | | Composition minéralogique du clinker (%) | |
|--------------------------------|-------|--|-------|
| SiO ₂ | 21.62 | C ₃ S | 52.48 |
| Al ₂ O ₃ | 4.49 | C ₂ S | 22.69 |
| Fe ₂ O ₃ | 5.37 | C ₃ A | 2.82 |
| CaO | 63.91 | C ₄ AF | 16.32 |
| MgO | 1.66 | | |
| SO ₃ | 1.92 | | |
| Na ₂ O | 0.08 | | |
| K ₂ O | 0.25 | | |
| LOI ^a | 0.81 | | |

Tableau IV.3 : Composition chimique et minéralogique de ciment de portland [16]

IV.8.1.2 Sable

Du sable siliceux recueilli dans la sablière d'Oum Ali (Wilaya de Tébessa dans le nord de l'Algérie) avec une taille de grains maximale de 4 mm a été utilisé pour la fabrication du mortier de référence ; son module de finesse et sa densité absolue étaient respectivement de 2.36 et 2.56 [16].

IV.8.2 Polystyrène expansé utilisé

Pour cette expérience nous avons utilisé un PE de masse volumique 12.8 kg/m³ (rapport d'essais réalisé par le laboratoire instrumentation et mesures)[18].

Afin d'éviter la ségrégation un stabilisateur a été utilisé.

IV.8.3 Stabilisateur

En raison de la différence importante entre les densités du sable naturel (2.56) et des billes de polystyrène (0.0128), ainsi que de la nature hydrophobe des particules de polystyrène, une ségrégation est prévisible lors du mélange. Pour assurer une bonne dispersion, un stabilisant sous forme de poudre, dénommé commercialement Medacol BSE et fabriqué par Granitex Algérie, doit être utilisé à 0.1% en poids de ciment. Il est composé d'agents colloïdaux et de silices ultra fines. Sa couleur est grise et sa densité et d'environ 0.1 [16].

IV.8.4 Choix des éprouvettes

Pour effectuer les essais de compression et de flexion nous aurons besoin de 6 éprouvettes au total pour chaque type de mélange : 6 éprouvettes de mortier témoin et 6 autres de mortier avec le polystyrène expansé. Nous utiliserons les 3 éprouvettes pour l'essai de flexion et les 3 autres pour celui de la compression.

Nous effectuerons 3 phases de substitutions ; ce qui veut dire au total nous allons nous retrouver avec 24 éprouvettes pour l'expérience.

Les éprouvettes pour le mortier sont de volume $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. Soit $V = 256 \text{ cm}^3$

IV.8.5 Calcul des proportions des mélanges

Dans 1 m^3 de mortier nous avons 2025 kg en masse répartie entre le sable, le ciment et l'eau. Pour un volume $V = 256 \text{ m}^3$ d'une éprouvette nous aurons besoin de 518.4 g de mortier.

En effet on a $2025 \text{ g} \rightarrow 1 \text{ dm}^3 = 1000 \text{ cm}^3$

$$518.4 \text{ g} \leftarrow 256 \text{ cm}^3$$

Pour les 6 éprouvettes : $518.4 \text{ g} \times 6 = 3110.4 \text{ g}$

En considérant une marge de sécurité de 10 % on se retrouverait avec 3421.44 g

$$3110.4 \text{ g} + 3110.4 \times 10\% = 3421.44 \text{ g} \rightarrow 3500 \text{ g}$$

On considère 3500 g .

En répartissant les 3500 g en sable, ciment et eau, nous aurons les quantités suivantes :

- $S = 2333.28 \text{ g}$
- $C = 777.76 \text{ g}$
- $E = 388.88 \text{ g}$

On a une masse volumique du sable $m_{vs} = 1600 \text{ kg/m}^3$ et celle du polystyrène expansé $m_{vPE} = 12.8 \text{ kg/m}^3$.

Du fait de la légèreté du PE, les substitutions se feront en termes de volume et à partir du sable.

De manière générale, avec une quantité de matériaux suffisants, on a les pourcentages de substitution suivants : 25 %, 50 %, 75 %.

$$1600 \text{ kg} \rightarrow 1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ l}$$

$$2333.28 \text{ g} = 2.33328 \text{ kg} \rightarrow 1.4583 \text{ l}$$

Chapitre IV

D'où on a 2.33328 kg de sable correspondant à 1.4583 l de sable.

Pour une substitution de 25 % :

$$\frac{1.4583 \times 25}{100} = 0.3646 \text{ l}$$

D'où nous aurons besoin de 0.3646 l de PE

Volume du sable restant : $1.4583 - 0.3646 = 1.0937 \text{ l}$

Correspondance en masse :

- Poids PE

On a $12.8 \text{ kg} \rightarrow 1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ l}$

$$0.005 \text{ kg} \leftarrow 0.3646 \text{ l}$$

D'où 0.005 kg soit 5g de PE

- Poids sable

On a $1600 \text{ kg} \rightarrow 1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ l}$

$$1.7499 \text{ kg} \leftarrow 1.0937 \text{ l}$$

D'où 1.7499 kg de sable

Poids stabilisateur : 0.1 % poids en ciment $\rightarrow 777.76 \times 0.1 \% = 0.78 \text{ g}$.

Le tableau suivant donne les proportions des autres mélanges. Nous rappelons que pour chaque type de mélange, les dosages sont pour une quantité de 6 éprouvettes $4 \times 4 \times 16$ (en cm).

| | DOSAGE (g) | | | | |
|---------|------------|--------|--------|-------------|---------------|
| | SABLE | CIMENT | EAU | POLYSTYRENE | STABILISATEUR |
| TEMOIN | 2333.33 | 777.76 | 388.88 | 0 | 0 |
| 25 % PE | 1749.9 | 777.76 | 388.88 | 5 | 0.78 |
| 50 % PE | 1166.7 | 777.76 | 388.88 | 9 | 0.78 |
| 75 % PE | 583.4 | 777.76 | 388.88 | 14 | 0.78 |

Tableau IV.4: Tableau proportions des mélanges

Chapitre V

Etudes des bétons à base d'argile expansée et à base de coquillages réalisées au Sénégal

V.1 Introduction

Les ressources minérales disponibles au Sénégal et utilisables dans l'industrie du bâtiment et des travaux publics sont essentiellement issues du concassage des roches de basalte, de calcaire, de grès et des graveleux latéritiques exploités dans les régions de Dakar et de Thiès.

L'exploitation est assurée par plus de 40 structures attributaires de titres miniers. Les installations de production de granulats concassés varient en fonction de la roche exploitée et de la demande. La granularité des matériaux produits couvre une large gamme: 3/8, 8/16, 16/25 et 25/40 [17].

Les différences de moyens d'équipement entre les différents exploitants de carrières permettent de les classer en deux catégories [12]:

- Les carrières artisanales qui interviennent au niveau de l'exploitation et revendent les moellons aux exploitants mieux équipés. Cette production est assurée par une main d'œuvre constituée d'agriculteurs locaux. Leur travail consiste à réduire les blocs abattus en moellons, grâce à des explosifs, pouvant ainsi entrer dans les concasseurs primaires ;
- La deuxième catégorie dispose d'un équipement complet et intervient depuis l'extraction du matériau brut jusqu'à la livraison du produit fini.

V.2 Les différents types de granulats les plus utilisés au Sénégal

V.2.1 Le basalte

Environ 50% de la production des granulats de basalte sont absorbées par le secteur routier pour la réalisation des enrobés. L'essentiel des gisements exploités se localise à Diack et dans le bassin sédimentaire [17].

- Le basalte de Diack

Il est localisé à 30 Km de Thiès (dans le département de Khombole). Pratiquement toute l'exploitation de matériaux basaltiques au Sénégal est concentrée sur ce site de Diack dont les réserves sont aujourd'hui entamées [17].



Photo V.1 : Gravier de basalte

- **Dans le bassin sédimentaire**

Le gisement de Sène Sérère se situe à 3 Km au nord de Pout et l'indice de basalte de Keur Mamour, Thiéo, Khazabe localisé à 8 Km au Sud-Ouest de Thiès, est peu étudié et se situe en pleine forêt classée [17].

- **Au Sénégal oriental**

Dans le socle au Sénégal oriental on note également les dolérites des monts basse arides localisées à l'Ouest de Kédougou [17].

Les caractéristiques de fabrication des gravillons (angularité, aplatissement) issus des deux carrières de basaltes sont bonnes, mais des contrôles permanents sont nécessaires pour assurer une production homogène (granulométrie, propreté) notamment sur le sable [15].

V.2.2 Les calcaires

Une part de la production des granulats calcaires est destinée à l'industrie du bâtiment, le reste étant consacré aux pierres ornementales ou exploité pour la fabrication de ciment. Les calcaires se répartissent ainsi [17]:

- Les marno-calcaires de Bargny de l'Eocène moyen qui sont compacts, durs à grains fins. Ils sont situés sous un recouvrement sablo-argileux brun noirâtre de 0 à 50 cm d'épaisseur ;
- Les calcaires de crayeux du Paléocène dans la région de Bandia (gisement constitué d'un horizon supérieur de calcaires coquilliers et d'un horizon inférieur à niveaux siliceux riches en éléments détritiques), à Popenguine-Déyane (gros blocs massifs, très fossilifères et très durs), à Mbour (calcaire massif, coquillé) et à Panthior (gros blocs durs et très karstifiés). Ces calcaires ont eux aussi été exploités pour les usages de ciment, chaux et granulats ;
- Les calcaires de la vallée du Ferlo: affleurent à Keur Momar Sarr, à 1 Km au sud de M'Beuleukhé et à Yang-Yang ;
- Les calcaires de la vallée du Sénégal qui affleurent à Ouroussogui, Ogo, Kanel et à l'ouest de Thilogne.

-
-



Photo V.2 : Graviers de calcaire

V.2.3 Les grès

Ils sont destinés exclusivement à la confection de bétons hydrauliques; on distingue [17] :

- Le grès du Maestrichtien qui est subaffleurant dans le massif de Ndiass où il est recouvert par des formations latéritiques ;
- Le gisement de Paki-Toglou qui se trouve à 50 Km de Dakar, à l'ouest de Paki village, sur la route de Diamniadio Mbour. C'est un grès rosâtre, à ciment siliceux et à grains fins ;
- Les grès de Ndoyane, se situent à 1 Km de Ndoyane, vers Toubab-Dialao, mais l'accès y est difficile. Ils sont durs à ciment siliceux, recouverts par des calcaires marneux daniens ;
- Le grès quartzique de Balé, à 170 Km de Tambacounda, sur la route Tambacouda-Kidira, fut exploité par la Régie des Chemins de Fer. Actuellement le gisement est attribué à un carrier privé ;
- Le grès de Ségou Madina Kouta au Sénégal Oriental.



Photo V.3 : Graviers de grès

V.2.4 La latérite

La quasi-totalité des graveleux latéritiques extraits est utilisée dans le domaine routier, seule une faible partie est utilisée dans le secteur du bâtiment. La latérite est surtout utilisée dans la région de Thiès [17].



Photo V.4 : Latérite

V.3 Domaines d'utilisation de ces granulats

Faute de statistiques fiables, il n'est pas possible de donner des indications précises sur la consommation des granulats par secteur d'activités. Néanmoins, les enquêtes effectuées au niveau des principaux exploitants de carrières laissent penser que c'est la région de Dakar qui consomme plus de la moitié des granulats de basaltes, de calcaires, de grés produits. Les consommations des autres régions sont fluctuantes et dépendent pour l'essentiel des projets de génie civil en cours de réalisation [12].

En 1993, les données suivantes ont été recueillies [12] :

- Les grés sont destinés à la confection des bétons hydrauliques ;
- Les $\frac{3}{4}$ de la production des granulats calcaires sont également destinés à l'industrie des bâtiments ;
Le reste de la production étant consacré à la réalisation de dalles de trottoirs, de pierres ornementales, fabrication de chaux et de ciment structure « hérisson » des chaussées et aux ballasts de voies ferrées. Le calcaire crayeux de Bandia à forte teneur en chaux ($\text{CaO} > 90\%$) est utilisé comme intrant par la compagnie sucrière sénégalaise (CSS) à raison de 20 tonnes par jour ;
- Les granulats de basalte sont utilisés en construction routière pour la réalisation d'enrobés bitumineux. Ce secteur absorbe 50% de la production et le reste est réparti entre l'industrie du bâtiment et les travaux de génie civil.

V.4 Bétons à granulats légers existants au Sénégal

Le Sénégal dispose de plusieurs ressources minières. Cependant les granulats légers ne sont pas aussi développés dans le pays. Il semble cependant que les plus répandus (obtenus après traitement) sont : le polystyrène, le schiste et l'argile. Ce dernier est plus utilisable dans la production de poterie, de fabrication de brique (les BTC : briques de terre cuite), de tuile ou encore de carreaux.

Dans cette partie on va prendre l'exemple de l'argile et du coquillage, avec lesquels des expériences ont été déjà réalisées.

La première a été réalisée à l'ESP (Ecole Supérieure Polytechnique de Dakar) et concerne le béton d'argile expansée et la seconde à l'ESP de Thiès et concerne un béton de coquillage.

V.4.1 Cas 1 : béton à base d'argile expansée

Dans les minéraux argileux classés en plusieurs groupes, deux seulement contiennent les principaux constituants des argiles utilisées dans l'industrie céramique. Ce sont le groupe de la Kaolinite et le

groupe des illites (ou des micas). Ces argiles sont localisées principalement dans la région de Dakar, de Thiès, la région du Fleuve, de Ziguinchor, de Kaolack et du Sénégal Oriental. Sur l'ensemble de ces sites d'argile, il a été effectué des activités artisanales de poterie ou des projets de briqueteries [12].

IV.4.1.1 Caractérisation des granulats étudiés

Dans cette partie deux types de granulats ont été utilisés à savoir les granulats naturels et les granulats artificiels. Pour leur caractérisation, la masse volumique et le coefficient d'absorption ont été étudiés.

- **La masse volumique**

Pour la masse volumique, un pycnomètre a été utilisé.



Photo V.5 : Pycnomètre rempli d'eau [12]



Photo V.6 : Pycnomètre avec de l'eau et du basalte [12]



Photo V.7 : Pycnomètre avec de l'eau et du calcaire [12]



Photo V.8 : Pycnomètre avec de l'eau et des granulés d'argile [12]

$$\rho_{\text{gravier}} = \frac{m}{m_2 + m - m_1} \times \rho_{\text{eau}}$$

ρ_{eau} est la masse volumique de l'eau qui est égale à 1Kg/m^3

m : masse de l'échantillon en Kg

m_1 : masse de l'échantillon et du pycnomètre rempli d'eau

m_2 : masse du pycnomètre rempli d'eau sans le matériau

• **Le coefficient d'absorption**

Le coefficient d'absorption (A_s) se calcule comme suit [12] :

$$A_s = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100$$

M_a : masse de l'échantillon après immersion dans l'eau

M_s : masse de l'échantillon après passage à l'étuve à 105°C

V.4.1.1.1 Caractérisation des granulats naturels

Les granulats utilisés dans cette étude sont le basalte, le calcaire et le sable. Le basalte utilisé a une classe granulaire comprise entre 8 mm et 16 mm de même que le calcaire et provient de GOUNDIANE (Thiès) tandis que le sable de dune provient de KAYAR(Thiès)[12].



Photo V.9 : basalte 8/16 [12]



Photo V.10 : Calcaire 8/16 [12]



Photo V.11 : Sable de dune [12]

Leurs caractéristiques sont résumées dans le tableau suivant [12]:

| Matériau | Masse volumique | | | | | Coefficient d'absorption | | |
|----------|-----------------|------------|------------|--|------------------------------------|--------------------------|------------|-----------|
| | m(Kg) | m_1 (Kg) | m_2 (Kg) | $\rho_{eau} \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$ | $\rho \left(\frac{Kg}{m^3}\right)$ | M_a (Kg) | M_s (Kg) | A_b (%) |
| Basalte | 0.3 | 1.81 | 1.6115 | 1 | 2.95 | 1.084 | 1.076 | 0.74 |
| Calcaire | 0.3 | 1.792 | 1.6115 | 1 | 2.51 | 0.77 | 0.742 | 3.77 |
| Sable | 0.3 | 1.794 | 1.6115 | 1 | 2.55 | 0.2125 | 0.21 | 1.19 |

Tableau V.1 : détermination des masses volumiques et des coefficients d'absorption

V.4.1.1.2 Caractérisation des granulats artificiels

Les granulats artificiels utilisés sont les argiles. Ils proviennent de Thicky, plus particulièrement dans les carrières de l'usine de SOFAMAC (Société de fabrication des matériaux de construction) sous le label de MATEC (Matériels et équipements industriels). Cette localité se trouve dans la zone de DIASS(Thiès). Cette argile est extraite en profondeur dans le sol qui est composé sur la première couche supérieure de latérite, suivie d'une argile jaune puis enfin de l'argile grise. C'est cette argile grise qui sera utilisée dans cette étude [12].



Photo V.12 : Carrière d'argile de l'usine de SOFAMAC [12]

Différentes étapes sont observées pour obtenir des graviers argileux indispensables pour l'étude. Ces procédés passent par l'extraction, le broyage, l'enroulage et enfin la cuisson. Pour l'extraction, pas besoin de matériels, quelques sacs ont été remplis sur le site. Les étapes suivantes décrivent les transformations effectuées sur l'argile [12]:

- **Broyage**

Il s'agit dans cette étape d'utiliser l'appareil de Los Angeles pour avoir de la poudre d'argile.



Photo V.13 : Appareil de Los Angeles [12]

Pour le broyage, le réglage a été fixé par défaut c'est-à-dire 500 tours. Lorsque l'appareil se met en marche avec le matériau à l'intérieur, le choc entre les particules du matériau et les billes favorisent la fragmentation de ces derniers, et au fur et à mesure que le tambour tourne sur lui-même nous obtenons

des particules de plus en plus fines. Après que l'appareil se soit stabilisé à la fin des 500 tours, le matériau est versé sur un grand bac en acier qui accompagne l'appareil. Différentes tailles ont été remarquées. Pour prendre la poudre un tamis de 1,25 mm a été utilisé. Les photos ci-dessous montrent les étapes énumérées.



Photo V.14 : Les billes en acier [12]



Photo V.15 : Le tamis 1.25 mm [12]



Photo V.16 : Résultats obtenues après passage à l'appareil de Los Angeles [12]

- **Enroulage**

Cette étape consiste à créer des granulés d'argile à partir de la poudre obtenue après tamisage de l'argile. Une certaine masse de poudre d'argile est introduite dans la bétonnière, puis on la fait tourner et au fur et à mesure en ajoutant de l'eau de façon interrompue. Le malaxage dure 10 à 15 mn avec

des temps d'arrêts réguliers allant jusqu'à 1 mn pour permettre de racler la bétonnière évitant ainsi que des particules se fixent sur les parois de la bétonnière.

Au final, le produit obtenu est liquide. Les photos V.17 et V.18 présentent la bétonnière avec les granulés d'argiles.



Photo V.17 : Bétonnière avec granulés d'argile [12]



Photo V.18 : Granulés d'argile [12]

- **Cuisson**

L'argile crue obtenue après l'enroulage sur la bétonnière est amenée dans un four. Pour la cuisson, différentes températures peuvent être utilisées pour apprécier celle idéale pour un meilleur granulat léger. Deux types de températures ont été choisis : une température de 860°C et une de 1100°C. L'argile cuite devient alors rouge sous l'effet de la température, autrement dit plus la température est élevée plus la couleur de l'argile vire au rouge brique. Les photos V.19, V.20 et V.21 montrent les échantillons obtenus.



Photo V.19 : Argile crue à différents diamètres dans le four [12]



Photo V.20 : Argile cuite 8/16 à 1100°C [12]



Photo V.21 : Argile cuite 8/16 à 860°C [12]

- **Caractérisation**

Ce sont les mêmes caractéristiques vues sur les granulats naturels qui sont mis en évidence pour les granulés d'argiles cuits à différentes températures. Ces caractéristiques sont résumées dans le tableau suivant :

| Matériau | Masse volumique | | | | | Coefficient d'absorption | | |
|----------------------------------|-----------------|---------|---------|---------------------------------------|---------------------------------|--------------------------|---------|--------|
| | m (Kg) | m1 (Kg) | m2 (Kg) | ρ_{eau} (Kg/dm ³) | ρ (Kg/dm ³) | Ma (Kg) | Ms (Kg) | Ab (%) |
| Granulés d'argile cuits à 1100°C | 0,3 | 1,78 | 1,6115 | 1 | 2,28 | 0,383 | 0,347 | 10,4 |
| Granulés d'argile cuits à 860°C | 0,3 | 1,786 | 1,6115 | 1 | 2,39 | | | |

Tableau V.2 : détermination des masses volumiques et des coefficients d'absorption des granulés d'argile [12]

Cependant pour l'argile cuite à 860°C, Les résultats n'ont pas pu être obtenus pour le coefficient d'absorption du fait que certains enroulés avaient fondu lors de l'imbibition à l'eau du matériau sous 24 heures.

IV.4.1.2 Formulation des bétons

La formulation par la méthode de Dreux Gorisse a été utilisée pour connaître les différentes proportions des éléments composants les différents bétons.

Les résultats de l'essai granulométrique du sable nous permettent de déterminer son module de finesse [12] :

$$M_f = \frac{\sum \text{refus cumulés des tamisats de module } \{23 - 38\}}{100}$$

En application numérique :

$$M_f = \frac{0.5 + 27.7 + 96.8}{100} = 1.25$$

Les courbes granulométriques sont tracés et l'intersection entre la courbe de référence composée des points C $\left(\begin{smallmatrix} 0.08 \\ 0 \end{smallmatrix}\right)$, V $\left(\begin{smallmatrix} D_{max} \\ 2 \\ V_y \end{smallmatrix}\right)$, Q $\left(\begin{smallmatrix} D_{max} \\ 100 \end{smallmatrix}\right)$ et la ligne de partage qui relie la première intersection de la droite y = 95% et de la courbe du gravier avec la deuxième intersection, de la droite y = 5% et la courbe du sable, permet de déterminer les pourcentages des matériaux à utiliser. Les calculs sont détaillés dans les tableaux V.3, V.4 et V.5 [12].

| Courbe de référence du basalte | | |
|--------------------------------|------|-----|
| | X | Y |
| C | 0,08 | 0 |
| V | 8 | 42 |
| Q | 16 | 100 |
| Ligne de partage du basalte | | |
| Intersection | X | Y |
| Premier point | 0,56 | 95 |
| Second point | 8,08 | 5 |

Tableau V.3 : Coordonnées de la courbe de référence et de la ligne de partage du basalte [12]

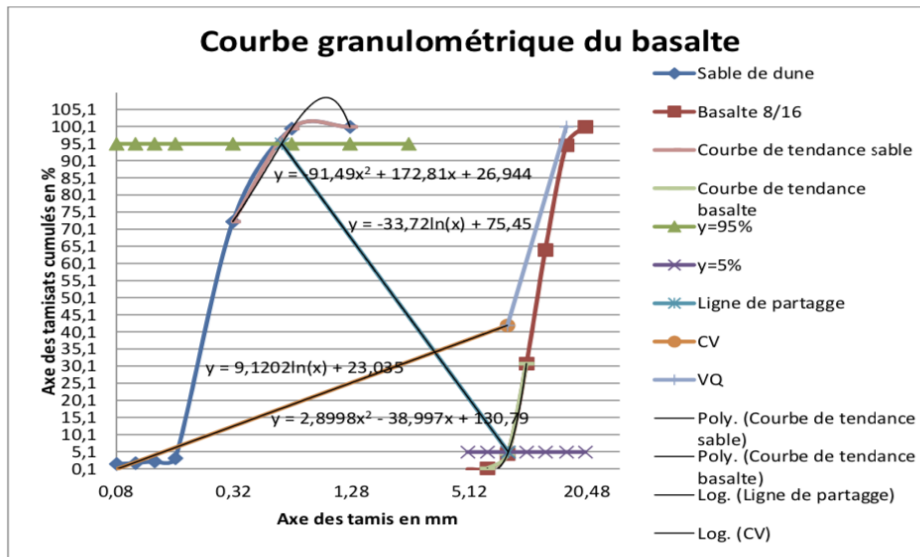


Figure V.1 : Courbe granulométrique du basalte [12]

| Courbe de référence du calcaire | | |
|---------------------------------|-------|-----|
| | X | Y |
| C | 0,08 | 0 |
| V | 8 | 42 |
| Q | 16 | 100 |
| Ligne de partage du calcaire | | |
| Intersection | X | Y |
| Premier point | 0,56 | 95 |
| Second point | 9,604 | 5 |

Tableau V.4 : Coordonnées de la courbe de référence et de la ligne de partage du calcaire [12]

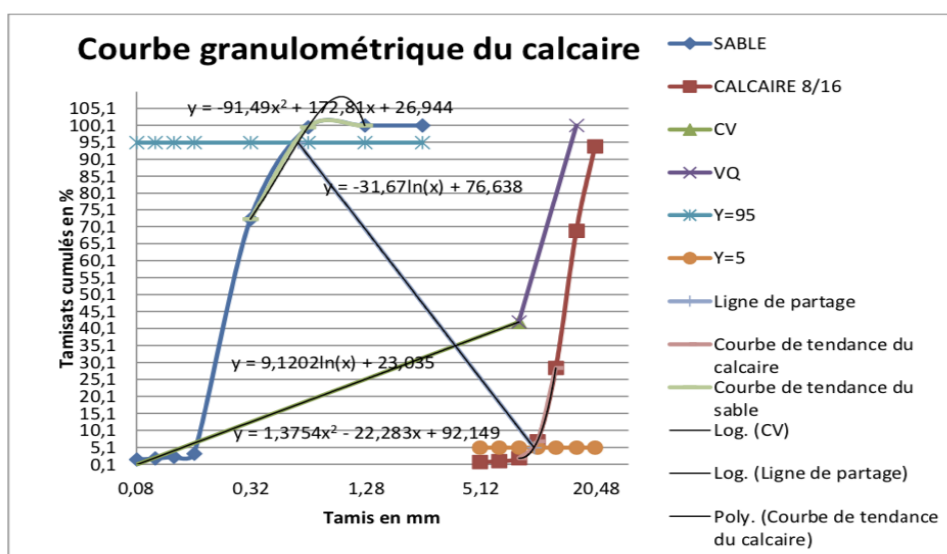


Figure V.2 : Courbe granulométrique du calcaire [12]

Les deux types d'argiles auront la même courbe granulométrique.

| Courbe de référence de l'argile | | |
|---------------------------------|------|-----|
| | X | Y |
| C | 0,08 | 0 |
| V | 8 | 42 |
| Q | 16 | 100 |
| Ligne de partage de l'argile | | |
| Intersection | X | Y |
| Premier point | 0,56 | 95 |
| Second point | 6,29 | 5 |

Tableau V.5: Coordonnées de la courbe de référence et de la ligne de partage de l'argile [12]

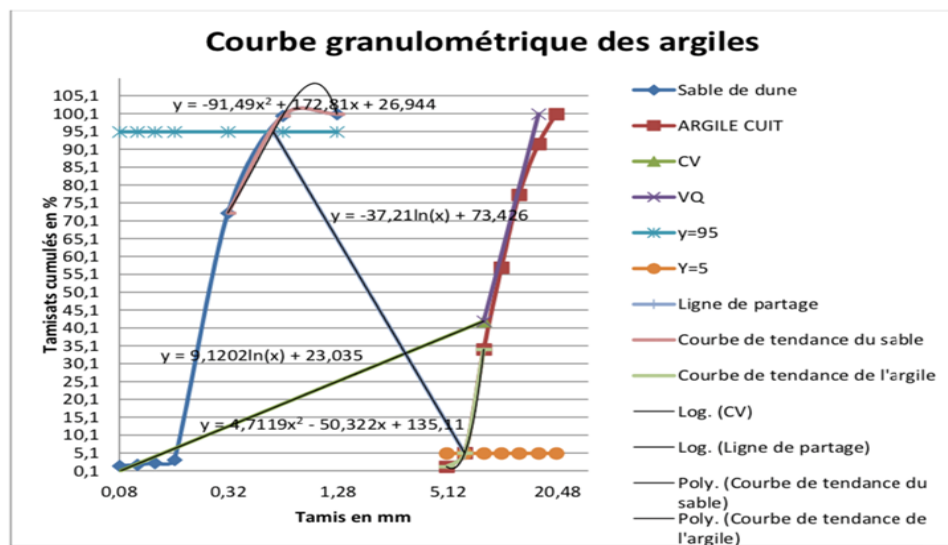


Figure V.3 : Courbe granulométrique de l'argile [12]

D'après ces courbes granulométriques, les pourcentages des matériaux obtenus pour chaque béton sont les suivants : 35% de SABLE et 65% de GRAVIER 8/16 [12].

Le gravier 8/16 est soit du basalte, soit du calcaire, ou de l'argile.

Les volumes obtenus sont résumés dans le tableau suivant [12].

| Matériau | Notation | Volume en Litre |
|-----------------------------|----------|-----------------|
| Ciment | Vc | Vc = 100 L |
| Granulats = sable + gravier | Vsg | Vsg = 710 L |
| Sable | Vs | Vs = 248,5 L |
| Gravier | Vg | Vg = 461,5 L |

Tableau V.6 : Volume de chaque matériau [12]

Pour trouver les masses finales pour chaque matériau à utiliser, nous allons d'abord calculer le volume des éprouvettes avec la formule suivante [12] :

$$V = \left(\frac{\pi d^2}{4} \times h \right) \times n_E$$

d : diamètre de l'éprouvette

h : hauteur de l'éprouvette

n_E : nombre d'éprouvettes

Le volume est à majorer de 25 %.

L'utilisation de 5 éprouvettes de 16/32 et 4 éprouvettes de 11/22 donne un volume total avec majoration de :

$$V = \left[\left(\frac{\pi(0.16)^2}{4} \times 0.32 \right) \times 5 + \left(\frac{\pi(0.11)^2}{4} \times 0.22 \right) (4)(1.25) \right] = 0.051 \text{ m}^3 [12].$$

Les quantités par m³ de ciment, de sable, d'eau et de granulat pour chaque béton en tenant compte des coefficients d'absorption de ces matériaux sont résumées dans le tableau suivant [12] :

| Béton | C/E | Ciment (Kg/m ³) | Eau (L/m ³) | Granulat utilisé (Kg/m ³) | Sable (Kg/m ³) |
|--|------|-----------------------------|-------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| Béton à base de granulats basaltique | 1,52 | 312,5 | 223,22 | 1361,425 | 633,675 |
| Béton à base de granulats calcique | 1,52 | 312,5 | 256,81 | 1158,365 | 633,675 |
| Béton à base de granulats argileux cuit à 1100°C | 1,52 | 312,5 | 322,57 | 1052,22 | 633,675 |
| Béton à base de granulats argileux cuit à 860°C | 1,52 | 312,5 | 360,57 | 1102,985 | 633,675 |

Tableau V.7 : Quantité des matériaux par m³ de mélange

Connaissant la masse volumique de chaque matériau ainsi que le volume des éprouvettes à utiliser, les quantités finales de ciment, de sable, d'eau et de granulat pour chaque béton sont résumées dans le tableau V.8. Le coefficient d'absorption des différents granulats est pris en compte dans le calcul de la quantité d'eau[12].

| Béton | C/E | Ciment (Kg) | Eau (L) | Granulat utilisé (Kg) | Sable (Kg) |
|--|------|-------------|---------|-----------------------|------------|
| Béton à base de granulats basaltique | 1,52 | 15,94 | 11,4 | 69,43 | 32,32 |
| Béton à base de granulats calcaïque | 1,52 | 15,94 | 13,11 | 59,08 | 32,32 |
| Béton à base de granulats argileux cuit à 1100°C | 1,52 | 15,94 | 16,46 | 53,66 | 32,32 |
| Béton à base de granulats argileux cuit à 880°C | 1,52 | 15,94 | 18,38 | 56,25 | 32,32 |

Tableau V.8 : Quantité des matériaux présents dans chaque mélange [12]

V.4.1.3 Caractérisation du béton élaboré

- **A L'état frais**

- **Affaissement**

L'affaissement a été déterminé au moyen du cône d'Abrams.

- **Masse volumique**

Il s'agit de déterminer la masse volumique humide du béton. Pour ce faire, des moules thermiques seront utilisées (photo V.22), pesées avec le béton frais puis sans le béton. La formule suivante permet de calculer la masse volumique des bétons à utiliser [12].

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Où ρ représente la masse volumique du béton en $Kg.m^{-3}$

m est la masse du béton humide exprimée en Kg

Et V est le volume du moule ou du béton en m^3



Photo V.22 : Moule thermique [12]

- **A L'état durci**

- **Essais mécaniques**

Les essais mécaniques réalisés sur les bétons sont les essais de compression, et les essais de traction par fendage.

L'essai de compression sur l'éprouvette se fait grâce à une machine appelée presse de force. L'éprouvette étudiée (11 cm x 22 cm ou 16 cm x 32 cm) est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.

Quant à l'essai de traction par fendage c'est grâce à la presse de force appropriée à l'éprouvette. Dans cet essai, on applique à l'éprouvette un effort de compression le long de deux génératrices opposées. Cet effort de compression induit des contraintes de traction dans le plan passant par ces deux génératrices. La rupture, due à ces contraintes de traction, se produit dans ce plan. Le calcul permet de définir la contrainte de traction correspondant à cette rupture.

Cet essai est appelé communément essai brésilien.

- **Essai thermique**

L'essai consiste à déterminer la conductivité thermique, ainsi que la capacité thermique massique des bétons. Pour ce faire, la méthode du plan chaud asymétrique finie avec face arrière isolée a été utilisée. Le dispositif est le suivant [12] :

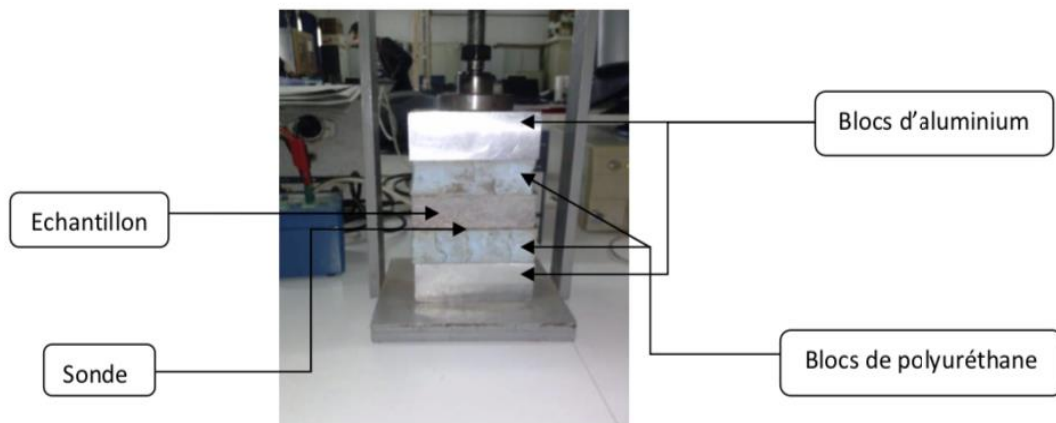


Photo V.23 : Dispositif de la méthode à plan chaud asymétrique

Un élément chauffant plan appelé sonde de faible épaisseur et de même surface que l'échantillon (10 x 10 cm²) est placé entre celui-ci et un échantillon de mousse de polyuréthane. Un thermocouple constitué de deux fils de diamètres inférieur ou égal à 0,05 mm est collé sur la face de l'élément en contact avec le polyuréthane. Le dispositif est

complété par un bloc de polyuréthane placé au-dessus de l'échantillon et le tout est placé entre deux blocs d'aluminium d'épaisseur 4 cm. Un échelon de flux est appliqué à la sonde et on enregistre l'évolution de la température $T(t)$ du thermocouple. Les données obtenues sont enregistrées sur l'ordinateur comme le montre la photo V.24, puis exporter dans le logiciel de programmation MATLAB pour le calcul de la conductivité thermique, ainsi que de l'effusivité. Connaissant ces deux grandeurs et la masse volumique apparente, on peut calculer la capacité thermique massique des bétons[12].



Photo V.24 : Dispositif complet de la méthode à plan chaud asymétrique [12]

La conductivité thermique est la capacité d'un matériau à transmettre de la chaleur, plus elle est élevée, plus le matériau est conducteur et plus elle est petite, plus le matériau est isolant.

L'effusivité thermique détermine la capacité d'un matériau à absorber de l'énergie thermique, plus l'effusivité est élevée, plus le matériau absorbe de l'énergie sans se réchauffer notablement, et au contraire plus elle est faible, plus vite le matériau se réchauffe.

La capacité thermique massique d'un corps est égale à la quantité de chaleur qu'il faut fournir pour élever de 1 Kelvin la température de l'unité de masse de ce corps, plus elle est élevée, moins le corps se réchauffe[12].

$$E = \sqrt{\lambda \rho c}$$

$$c = \frac{E^2}{\lambda \rho}$$

E: effusivité thermique en $J.K^{-1}.m^{-2}.s^{-1/2}$

λ : Conductivité thermique en $W.m^{-1}.K^{-1}$

ρ : Masse volumique du matériau en $Kg.m^{-3}$

c: Capacité thermique massique du matériau en $J.Kg^{-1}.K^{-1}$

V.4.1.4 Résultats et Analyse des essais réalisés

V.4.1.4.1 Résultats obtenus de la caractérisation des graviers

| Matériau | Masse volumique | Coefficient d'absorption |
|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| | ρ (Kg/m ³) | Ab (%) |
| Basalte | 2,95 | 0,74 |
| Calcaire | 2,51 | 3,77 |
| Granulés d'argile de 1100°C | 2,28 | 10,4 |
| Granulés d'argile de 860°C | 2,39 | |

Tableau V.9 : Résultats des caractérisations[12]

➤ Les analyses

Les résultats obtenus sur les granulats permettent de les classer selon différentes catégories et de tracer leur courbe pour une meilleure appréciation.

Le basalte appartient à la catégorie A qui est plus résistant suivi par le calcaire qui appartient à la catégorie B et les deux argiles à la catégorie D du fait de leur coefficient d'absorption élevé [12].

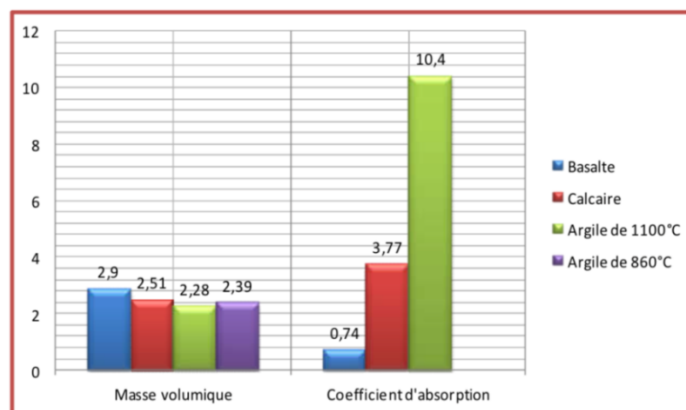


Figure V.4 : Courbe des masses volumiques et des coefficients d'absorption des matériaux [12]

La figure V.4 montre que le basalte possède une masse volumique plus élevée que les autres matériaux, il est suivi de l'argile cuite à 860°C puis du calcaire et enfin de l'argile cuite à 1100°C. Ce qui signifie que le basalte est le matériau le plus lourd et l'argile cuite à 1100°C le matériau le plus léger[12].

Par contre le coefficient d'absorption du basalte est très faible, il est suivi de celui du calcaire, puis de l'argile cuite à 1100°C. L'argile cuite à 860°C n'a pas de coefficient d'absorption car lors de l'imbibition 24 heures après des particules avaient fondu donc l'exploitation était délicate pouvant même causer des erreurs de calcul. De par cela, nous pouvons en conclure que la température de cuisson n'est pas idéale pour avoir un matériau stable. Mais les autres essais réalisés pourront confirmer cette affirmation[12].

IV.4.1.4.2 Résultats obtenus des essais d'affaissement

| Matériau | Basalte | Calcaire | Argile cuite à 1100°C | Argile cuite à 860°C |
|--------------------|---------|----------|-----------------------|----------------------|
| Affaissement en cm | 10 | 12 | 17 | 9 |

Tableau V.10 : Résultats des essais d'affaissement [12]

➤ Les analyses

Le tableau V.10 permet de tracer l'historgramme de la figure suivante :

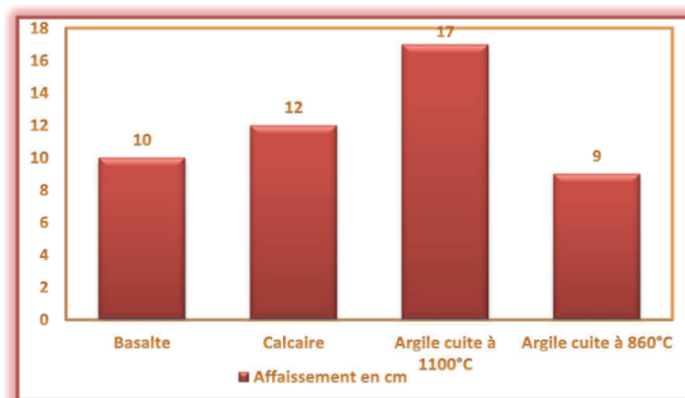


Figure V.5 : Courbe des affaissements[12]

La figure V.5 renseigne sur les classes de consistance de chaque béton réalisé. Ainsi les bétons basaltique et calcique sont très plastiques et appartiennent à la classe S3. Le béton à base de granulés d'argile cuite à 1100°C est un béton fluide à cause de la quantité d'eau importante et appartient à la classe S4. Par contre le béton à base de granulés d'argile cuite à 860°C devait être aussi fluide à cause de l'importante quantité d'eau mais lors de sa mise en œuvre, il était apparent que les granulés se brisaient à l'intérieur de la bétonnière augmentant ainsi la pâte d'où cette plasticité du béton[12].

IV.4.1.4.3 Résultats obtenus des masses volumiques

| Béton | Béton Basaltique | Béton Calcique | Béton d'Argile cuite à 1100°C |
|--------------------------------------|------------------|----------------|-------------------------------|
| Masse volumique en Kg/m ³ | 2713,3 | 2433,3 | 2313,3 |

Tableau V.11 : masses volumique des bétons [12]

➤ Les analyses

Le béton d'argile cuite à 860°C n'est pas pris en compte pour le calcul de la masse volumique [12].

Les résultats sont résumés sur la courbe suivante :

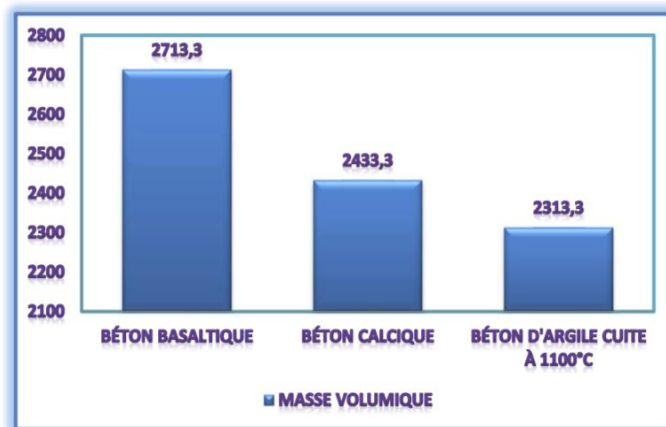


Figure V.6 : Courbe des masses volumiques des bétons [12]

La Figure V.6 montre que la masse volumique du béton basaltique est plus élevée que celle du béton calcique argileux. Celle du béton argileux est plus légère à cause des granulés d'argile expansée [12].

IV.4.1.4.4 Résultats obtenus des essais d'écrasement

| Matériau | Eprouvette (d/D) | Masse (Kg) | Essai de compression | | | | Essai de traction par fendage | |
|-----------------------|------------------|------------|----------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| | | | Force maximum (KN) | Force moyenne (KN) | Contrainte maximum (MPa) | Contrainte moyenne (MPa) | Force maximum (KN) | Contrainte maximum (MPa) |
| | | | Ecrasement à 3 jours | | | | | |
| Basalte | 16/32 | 16,208 | 286,122 | | 14,231 | | | |
| | 11/22 | 5,5535 | 66,874 | 176,498 | 7,037 | 10,634 | | |
| | 11/22 | 5,57 | | | | | 50,983 | 1,341 |
| Calcaire | 16/32 | 14,194 | 133,766 | | 6,653 | | | |
| | 11/22 | 4,85 | 42,641 | 88,2035 | 4,487 | 5,57 | | |
| | 11/22 | 4,868 | | | | | 36,601 | 0,963 |
| Argile cuite à 1100°C | 16/32 | 13,686 | 226,798 | | 11,28 | | | |
| | 11/22 | 4,678 | 116,635 | 171,7165 | 12,273 | 11,7765 | | |
| | 11/22 | 4,708 | | | | | 68,097 | 1,791 |
| Argile cuite à 860°C | 16/32 | 13,306 | 78,883 | | 3,923 | | | |
| | 11/22 | 4,582 | 38,902 | 58,8925 | 4,094 | 4,0085 | | |
| | 11/22 | 4,568 | | | | | 24,305 | 0,639 |

Tableau V.12 : Ecrasement à 3 jours [12]

| Ecrasement à 7 jours | | | | | | | | |
|----------------------|------------------|------------|----------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Matériau | Eprouvette (d/D) | Masse (Kg) | Essai de compression | | | | Essai de traction par fendage | |
| | | | Force maximum (KN) | Force moyenne (KN) | Contrainte maximum (Mpa) | Contrainte moyenne (Mpa) | Force maximum (KN) | Contrainte maximum (Mpa) |
| Basalte | 16/32 | 16,196 | 398,11 | 369,7605 | 19,8 | 18,39 | 92,114 | 2,423 |
| | 16/32 | 16,088 | 341,411 | | 16,98 | | | |
| | 11/22 | 5,567 | | | | | | |
| Calcaire | 16/32 | 14,188 | 181,783 | 166,359 | 9,041 | 8,274 | 49,904 | 1,313 |
| | 16/32 | 14,09 | 150,935 | | 7,507 | | | |
| | 11/22 | 4,89 | | | | | | |
| Argile cuit à 1100°C | 16/32 | 13,562 | 266,347 | 269,547 | 13,247 | 13,406 | 61,122 | 1,608 |
| | 16/32 | 13,68 | 272,747 | | 13,565 | | | |
| | 11/22 | 4,7 | | | | | | |
| Argile cuit à 860°C | 16/32 | 13,414 | 113,111 | 115,376 | 5,626 | 5,7385 | 25,24 | 0,664 |
| | 16/32 | 13,322 | 117,641 | | 5,851 | | | |
| | 11/22 | 4,54 | | | | | | |

Tableau V.13 : écrasement à 7 jours [12]

| Ecrasement à 28 jours | | | | | | | | |
|-----------------------|------------------|------------|----------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| Matériau | Eprouvette (d/D) | Masse (Kg) | Essai de compression | | | | Essai de traction par fendage | |
| | | | Force maximum (KN) | Force moyenne (KN) | Contrainte maximum (Mpa) | Contrainte moyenne (Mpa) | Force maximum (KN) | Contrainte maximum (Mpa) |
| Basalte | 16/32 | 16,108 | 453,158 | 510,897 | 22,538 | 25,41 | 116,85 | 3,074 |
| | 16/32 | 16,354 | 568,636 | | 28,282 | | | |
| | 11/22 | 5,6 | | | | | | |
| Calcaire | 16/32 | 14,122 | 303,445 | 289,9655 | 15,092 | 14,4215 | 66,587 | 1,752 |
| | 16/32 | 14,166 | 276,486 | | 13,751 | | | |
| | 11/22 | 4,854 | | | | | | |
| Argile cuit à 1100°C | 16/32 | 13,678 | 301,364 | 307,859 | 14,989 | 15,312 | 75,719 | 1,992 |
| | 16/32 | 13,682 | 314,354 | | 15,635 | | | |
| | 11/22 | 4,704 | | | | | | |
| Argile cuit à 860°C | 16/32 | 13,258 | 125,911 | 147,052 | 6,262 | 7,3135 | 43,936 | 1,156 |
| | 16/32 | 13,314 | 168,193 | | 8,365 | | | |
| | 11/22 | 4,54 | | | | | | |

Tableau V.14 : Ecrasement à 28 jours [12]

➤ **Les analyses**

Les résultats des essais de compression et de traction par fendage ont permis de tracer les courbes suivantes [12]:

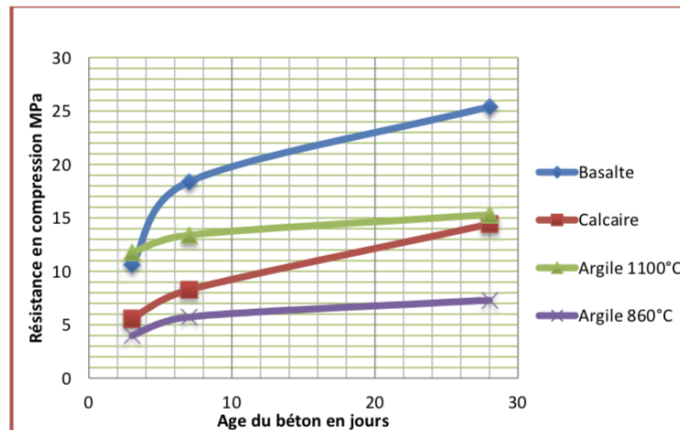


Figure V.7 : Courbe de résistance en compression des bétons en fonction de l'âge

La figure montre que la résistance à la compression des bétons augmente en fonction de l'âge. A 3 jours, on peut remarquer que la résistance en compression du béton à base de granulés d'argile cuit à 1100°C est très supérieure aux résistances en compression du béton calcaire et du béton d'argile cuite à 860°C[12].

Cependant elle est légèrement supérieure à celle du béton basaltique. Ce qui signifie que le béton basaltique a observé un retard de prise par rapport au béton d'argile cuite à 1100°C.

A partir du 7ème jour jusqu'au 28ème jour la résistance du béton basaltique est plus élevée et elle est suivie du béton d'argile cuite à 1100°C, puis du béton calcaire. Le béton d'argile cuite à 860°C a une plus faible résistance[12].

En somme, le béton basaltique a une meilleure résistance que le béton d'argile cuite à 1100°C. Le béton d'argile cuite à 860°C, a une mauvaise résistance par rapport aux autres bétons donc n'est pas bon pour la construction[12].

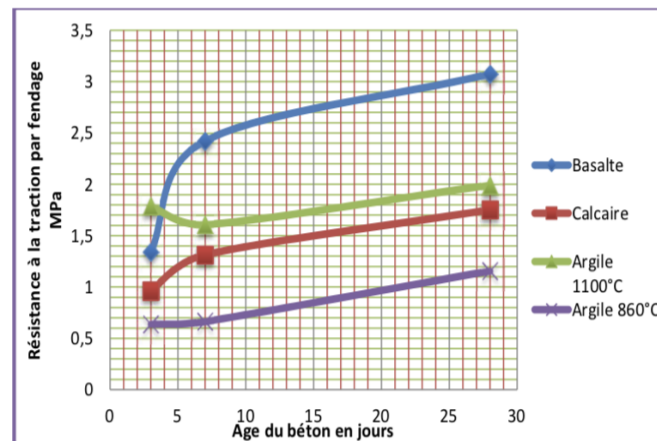


Figure V.8 : Courbe de résistance à la traction par fendage des bétons en fonction de l'âge

La figure V.8 présente quasiment les mêmes caractéristiques que la figure V.7, à la seule différence il s'agit ici de résistance à la traction des bétons en fonction de l'âge.

A 3 jours, la résistance à la traction du béton à base de granulés d'argile cuit à 1100°C est très supérieure à celles du béton basaltique, du béton calcaire et du béton d'argile cuite à 860°C[12].

A partir du 7ème jour jusqu'au 28ème jour la résistance à la traction du béton basaltique est plus élevée et elle est suivie du béton d'argile cuite à 1100°C, puis du béton calcaire. Le béton d'argile cuite à 860°C a aussi une plus faible résistance en compression comme à la traction. Cependant à 7 jours, on peut observer une chute de la résistance à la traction du béton d'argile cuite à 1100°C[12].

Le béton basaltique possède une meilleure résistance à la compression comme à la traction que tous les autres bétons[12].

IV.4.1.4.5 Résultats des essais thermiques

| Béton | Conductivité thermique (W/mK) | Masse volumique apparente en Kg/m ³ | Capacité thermique massique en J/Kg.K |
|-----------------------|-------------------------------|--|---------------------------------------|
| Argile cuite à 1100°C | 0,65 | 2007 | 1147,37 |
| Calcaire | 1,23 | 2211 | 1028,78 |
| Basalte | 1,32 | 2503 | 995,83 |

Tableau V.15: Essais thermiques [12]

➤ Les analyses

Les essais thermiques ne sont pas effectués sur l'argile cuite à 860°C car les résultats sur les autres essais démontrent qu'elle ne possède pas des qualités satisfaisantes pour le béton[12].

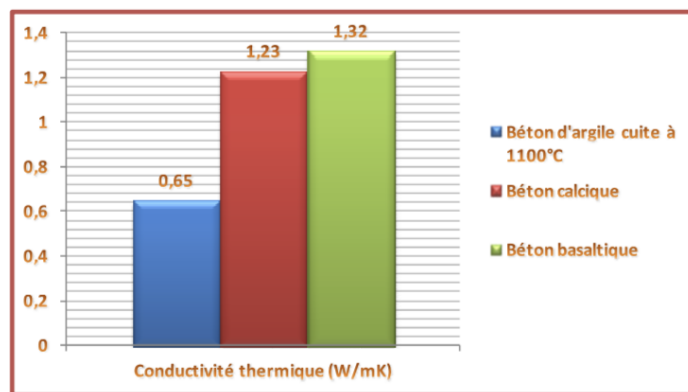


Figure V.9 : Courbe de conductivité thermique des bétons [12]

La figure V.9 montre que la conductivité thermique du béton d'argile est plus faible, elle est suivie du béton calcaire. Le béton basaltique a une conductivité plus élevée. Ce qui signifie que le béton d'argile est isolant, et que les autres bétons sont moins isolants donc conducteurs[12].

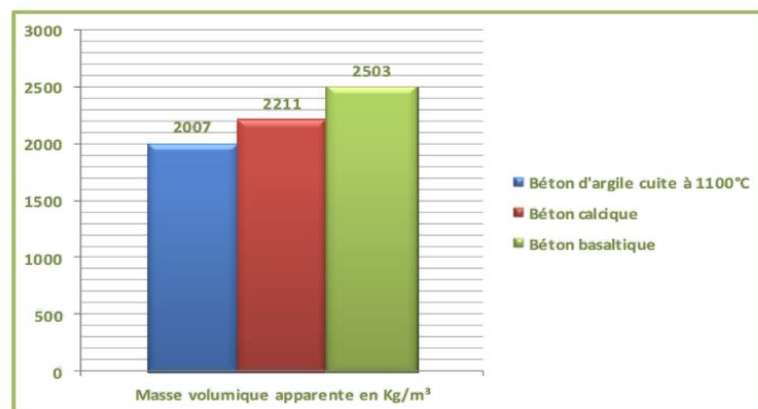


Figure V.10 : Courbe de la masse volumique apparente des bétons [12]

Dans cette figure, on peut constater que la masse volumique apparente du béton d'argile cuite à 1100°C est plus faible que les autres bétons, elle est suivie de la masse volumique du béton calcique et enfin le béton basaltique a une plus grande masse volumique apparente. Cependant on a eu les mêmes résultats que pour ceux obtenus pour la masse volumique humide, à la seule différence ici il y a eu évaporation de l'eau et que cette masse volumique apparente est utile pour le calcul de la capacité thermique des bétons. Mais toujours en est-il que le béton d'argile cuite à 1100°C est plus léger que les autres bétons[12].

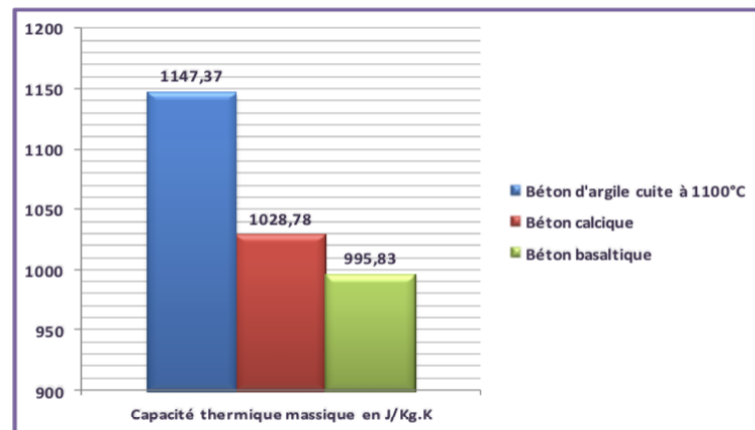


Figure V.11 : Courbe de capacité thermique massique des bétons [12]

La figure montre par contre que la capacité thermique du béton d'argile cuite à 1100°C est plus élevée que les autres bétons, elle est suivie de celle du béton calcique et enfin le béton basaltique a une plus faible capacité thermique. Ce qui signifie qu'il faut apporter une importante quantité de chaleur pour élever la température du béton, donc le béton d'argile cuite à 1100°C résiste mieux à la chaleur donc aux températures élevées que les autres bétons[12].

V.4.1.5 Enjeux économiques

Le principal enjeu de cette étude est la production des argiles expansées malgré la disponibilité et l'abondance de différents types d'argile. Au Sénégal il n'existe aucune structure travaillant sur le béton léger, la seule usine qui existe est celle de SOFAMAC et elle utilise l'argile pour la fabrication de brique, de tuile, et de carreaux en terre cuite. De plus, pour fabriquer des argiles expansées il faut impérativement des machines de qualités pour une production en masse car il faut des appareils pour broyer l'argile et les transformer en billes de différents diamètres car les granulés doivent avoir une forme arrondie et lisse. A cela s'ajoute une importante quantité d'énergie allant de 1100°C à 1300°C si possible selon le type d'argile à utiliser pour cuire les billes d'argile. Enfin les calibrer selon les utilisations futures[12].

Le marché aussi pose problème car il faudra sensibiliser la population sur l'utilisation de ces granulats.

V.4.1.6 Avantages et inconvénients de l'étude

➤ Les avantages

Les avantages que possède un béton à base de granulés d'argiles expansées par rapport aux bétons usuels sont les suivants [12]:

- La possibilité de produire du béton étanche léger lorsque la texture est fermée ;
- Le béton résiste au sel ;
- Il résiste aussi aux produits chimiques grâce aux granulés d'argiles expansées ;
- Il y a une faible conductivité thermique donc une meilleure isolation et un antibruit ;
- Une assez bonne résistance en compression ;
- Une meilleure résistance au feu seulement pour le béton léger à texture fermée ;
- Une masse volumique plus faible que les bétons usuels donc le béton est plus léger ;
- Une diminution du poids de la structure ainsi que des armatures à utiliser.

Cependant tous ces avantages ne sont pas vérifiés dans notre étude mais le sont dans d'autres études effectuées d'après les recherches faites[12].

➤ Les inconvénients

Malgré l'aspect positif que nous offre le béton à base de granulés d'argile expansée, nous observons aussi des aspects négatifs que sont [12] :

- Les fournisseurs sont très restreints dans notre pays voire inexistants ;
- Le prix est plus élevé à cause du dosage en ciment plus important et de l'utilisation de granulés d'argiles expansées ;
- Le malaxage du béton est plus long et sa mise en place est délicate car le béton est plus sensible ;
- La consommation d'eau est plus importante car les granulats ont une porosité importante.

V.4.2 Cas 2 : béton de coquillage

V.4.2.1 Les coquillages rencontrés au Sénégal et leurs domaines d'utilisations

Généralement, les coquillages rencontrés au Sénégal sont des coquilles d'arches ou Arcas (« pagnes »), d'huitres (« yoxos ») ou de cymbium (« yët ») [17].

Les différents types de coquilles sont montrés dans les photos suivantes [17]:

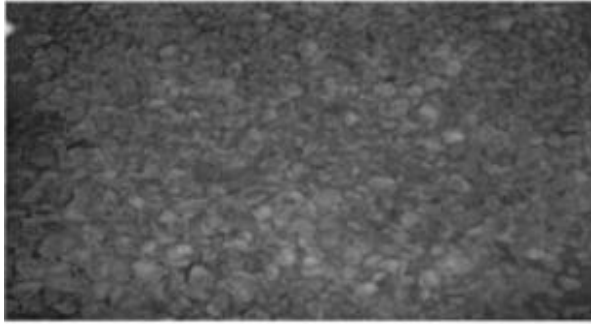


Photo V.25 : Coquilles d'Arche ou Arcas « pagnes »

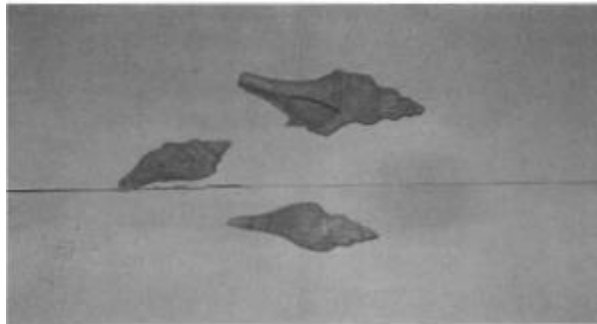


Photo V.26 : Coquilles de cymbium « yët »

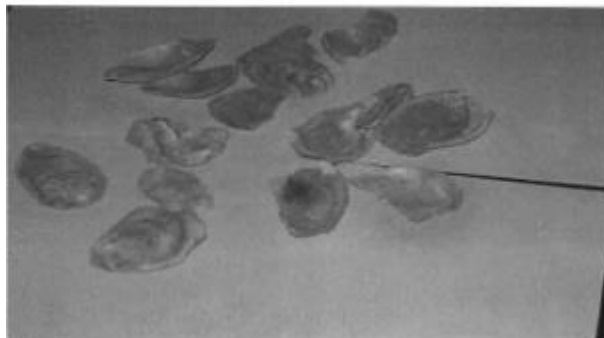


Photo V.27 : Coquilles d'huîtres « yoxos »

Les coquilles d'arches sont utilisées comme granulats pour béton ou pour la production de la chaux. Elles sont les plus courantes et les plus populaires et sont même utilisées dans la sous-région (en Mauritanie surtout) en tant que matériau routier pour les couches de fondation et de base. Leur utilisation, dans le domaine du génie civil, est ancienne et remonte d'avant les indépendances [17].

Les coquilles de cymbium sont, elles aussi utilisées comme éléments décoratifs ou comme cendriers dans certains cas[17].

Quant aux coquilles des huîtres, elles sont surtout utilisées comme produit d'alimentation pour la volaille et ne peuvent être utilisés comme granulats en raison de leur friabilité. Elles sont également utilisées pour la production de la chaux[17].

V.4.2.2 Caractéristiques des matériaux utilisés

Ce sont le ciment, le sable, l'eau et les graviers de coquillages.

V.4.2.2.1 Le ciment

Le ciment utilisé est un ciment ordinaire, normal de type CEM II/A-32.5 R.

V.4.2.2.2 L'eau de gâchage

L'eau utilisée pour cette étude est celle de la Sénégalaise Des Eaux (SDE). C'est une eau potable, exempte de toutes impuretés pouvant altérer la qualité du béton[17].

V.4.2.2.3 Les sables

Dans cette étude, chaque coquillage est associé au sable disponible dans la région d'origine. Ainsi, deux sables de dunes provenant respectivement des régions de Ziguinchor et de Kaolack ont été utilisés[17].

Le premier a servi à la confection des bétons avec les coquillages de classe 16/25. C'est un sable trop fin avec un module de finesse de 1.02, ce qui donnerait une bonne maniabilité du béton mais au détriment de la résistance. Il a un équivalent de sable de 25.5 au piston et de 28.5 à vue, ce qui correspond à un sable argileux (d'après le tableau général montrant les liens existant entre les caractéristiques des granulats et les propriétés des bétons) proscrit pour un béton de qualité car pouvant entraîner des risques de retrait ou de gonflement[17].

Ce sable, quoique, de mauvaise qualité reste le plus utilisé dans cette région car y étant le plus disponible[17].

Le sable de Kaolack quant à lui est utilisé pour la confection des bétons avec les coquillages de classes 3/8 et 8/16. C'est un sable de dunes avec un module de finesse de 1.63 qui reste inférieur à la valeur minimale assurant un bon compromis entre la résistance et la maniabilité[17].

Son équivalent de sable est de 67 au piston et de 75 à vue, ce qui correspond, à un sable légèrement argileux de propreté admissible pour bétons de qualité courante dont le retrait n'est pas particulièrement craint[17].

Ainsi le sable de Kaolack présente de meilleures caractéristiques que celui de Ziguinchor[17].

Les poids spécifiques de ces sables de Ziguinchor et de Kaolack sont de 2.62 et 2.61 respectivement ; ce qui est sensiblement le même, car étant tous deux d'origine sédimentaire[17].

Les courbes granulométriques sont présentées ci-dessous.

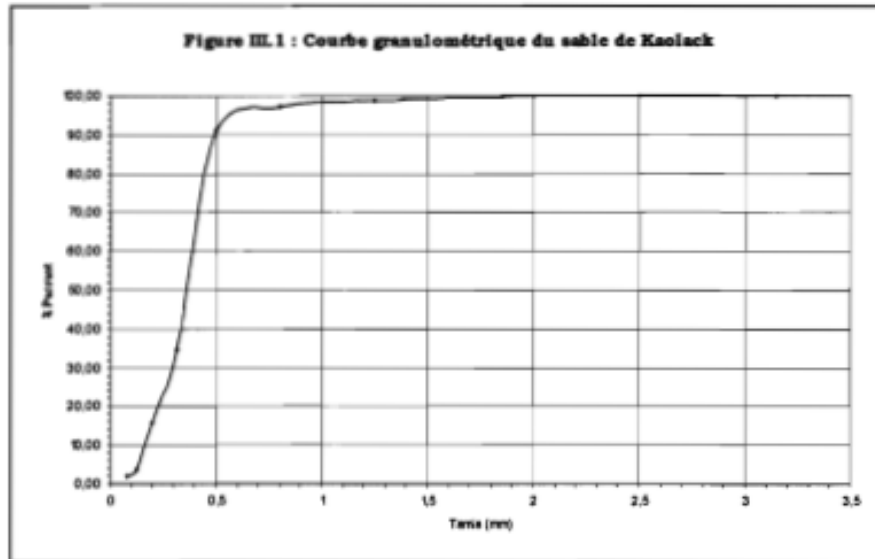


Figure V.12 : Courbe granulométrique du sable de Kaolack[17]

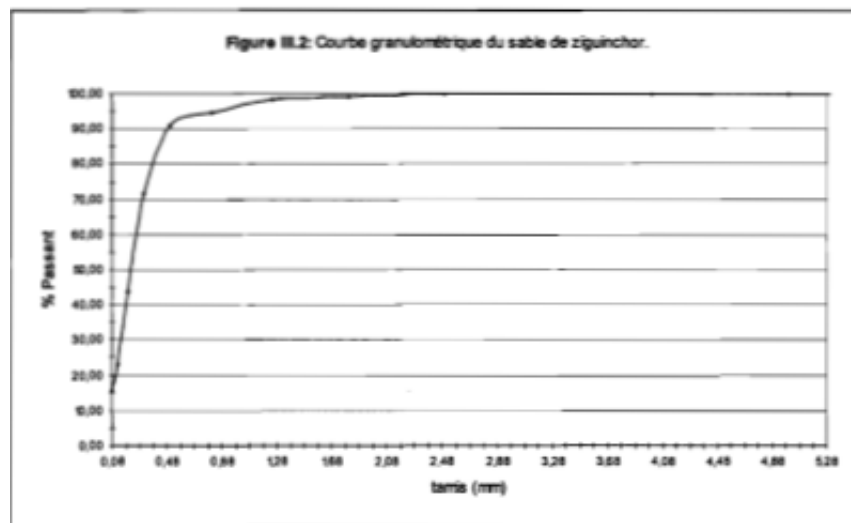


Figure V.13 : Courbe granulométrique du sable Ziguinchor [17]

V.4.2.2.4 Les granulats de coquillages

Pour ce projet, des coquilles d'arches ont été utilisé, dont une partie provient des côtes marines de la région de Ziguinchor (classe 16/25) et l'autre partie de Nanghane dans la région de Kaolack (classes 3/8 et 8/16)[17].

➤ **Caractéristiques chimiques**

Chimiquement, les coquillages ne présentent pas de risque d'incompatibilité avec le ciment, car ils sont composés essentiellement de calcaire. L'un des problèmes majeurs avancé souvent par les entrepreneurs et qui fait que les coquillages restent encore très impopulaires dans le domaine du bâtiment est le risque d'une teneur élevée en chlorures en raison de ses origines marines[17].

Le tableau ci-dessous, donne la composition chimique des coquillages. Il montre bien que la teneur en chlorures de ceux-ci est relativement faible pour altérer le béton ou corroder les armatures, mais peuvent néanmoins accélérer la prise dans certains cas [17].

| Compositions | Coquillages de Ziguinchor | Coquillages de Kaolack |
|--------------------|---------------------------|------------------------|
| Chaux | 55.95 | 56.09 |
| Chlorures | 0.23 | 0.108 |
| Fer | 0.07 | 0.06 |
| Oxydes de titanes | 0.02 | 0.02 |
| Aluminium | 0.1 | 0.06 |
| Sodium | 0.14 | 0.14 |
| Oxyde de soufre | 0.05 | 0.05 |
| Manganèse | 0 | 0 |
| Oxyde de potassium | Traces | Traces |
| Oxyde de magnésium | Traces | Traces |
| Silice | Traces | Traces |

Tableau V.16 : Composition chimique des coquillages (% massique) [17]

➤ **Caractérisation géométriques**

✓ **Formes et textures des granulats**

Les granulats de coquillage étudiés proviennent des côtes marines ou fluviales. Ils ne sont ni concassés ni roulés et ont une forme recroquevillée ce qui fait toute leur particularité comparés aux granulats classiques (courants) [17].

✓ **Granulométrie**

Les trois classes granulaires étudiées dans ce projet sont les classes 3/8, 8/16 et 16/25 [17].

La granulométrie des coquillages a été étudiée conformément à la norme NF P 18-560. Les Courbes granulométriques sont présentées ci-après[17].

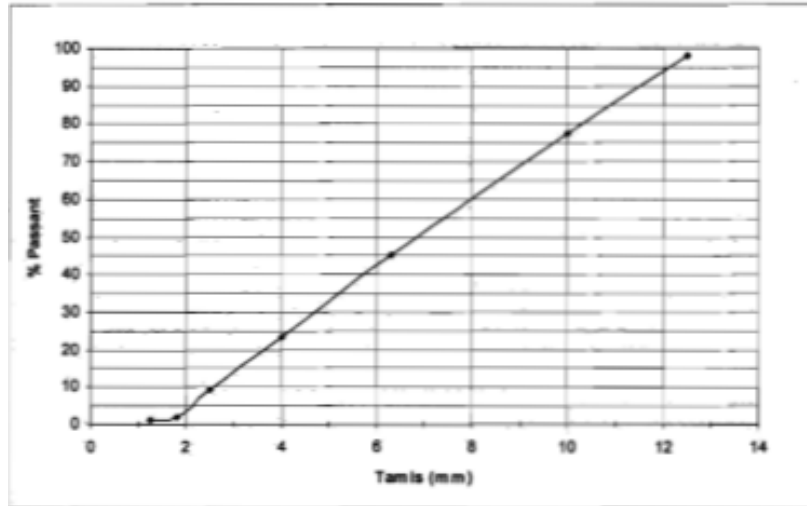


Figure V.14 : Courbe granulométrique classe 3-8 [17]

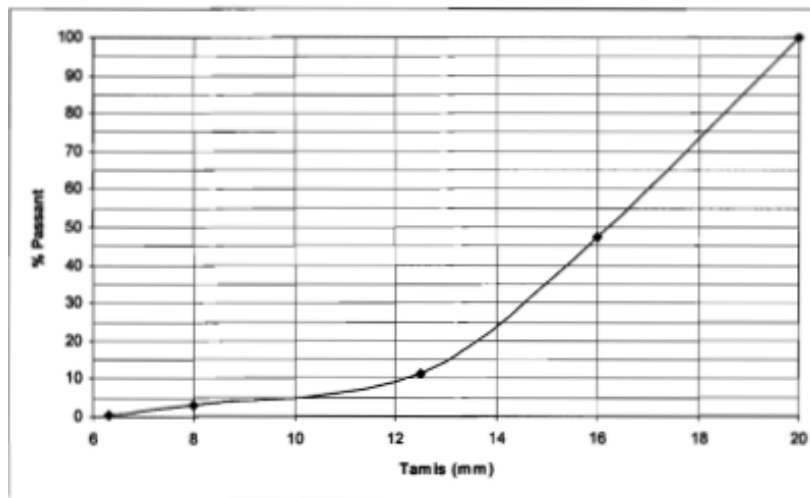


Figure V.15 : Courbe granulométrique classe 8-16 [17]

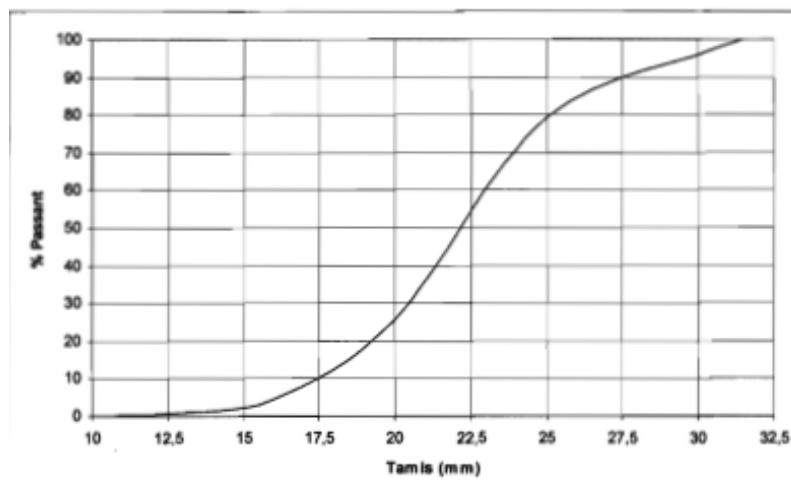


Figure V.16 : Courbe granulométrique classe 16-25 [17]

➤ **Caractéristiques pondérales**

Ces caractéristiques se regroupent en deux sous-ensembles que constituent la masse volumique et la densité.

✓ **Masse volumique en vrac**

La masse volumique apparente est calculée par la formule suivante [17]:

$$\rho_v = \frac{M_t - M}{V}$$

Où : M_t = *masse totale (moule + matériau)* ;

V = *volume du moule.*

M = *masse du moule = tare*

Ainsi nous avons :

$\rho_v = 1094 \text{ kg/m}^3$ Pour classe 3/18

$\rho_v = 801 \text{ kg/m}^3$ Pour classe 8/16

$\rho_v = 815 \text{ kg/m}^3$ Pour classe 16/25

Il convient de noter que la densité apparente des grains décroît quand le calibre augmente (pour le même échantillon), ce qui est normal car le volume des vides inter-granulaires augmente avec la taille des grains. Mais les coquillages de Kaolack diffèrent de ceux de Ziguinchor qui ont, une masse volumique plus élevée pour une même classe. Ces valeurs montrent que les vides inter-granulaires au niveau des coquillages sont très importants [17].

✓ **Poids spécifique**

Le poids spécifique est obtenu par la formule suivante [17] :

$$\gamma_s = \frac{(P_3 - P_1)d}{P_3 + P_2 - P_1 - P_4}$$

Avec P_1 = *poids pycnomètre seul + bouchon*

P_2 = *poids pycnomètre rempli d'eau + bouchon*

P_3 = *poids pycnomètre rempli de matériau + bouchon*

P_4 = *poids pycnomètre rempli de matériau + eau + bouchon*

d = *densité en eau fonction de la température*

Les résultats des essais sont présentés ci-dessous :

| ESSAI | 1 | 2 | 3 |
|---------------------|-------------|----------|----------|
| Pycnomètre seul | 734 | 724 | 721 |
| Pycno + liquide | 1598 | 1580 | 1610 |
| Pycno + matériau | 1725 | 1721 | 1713 |
| Pycno +mat +liquide | 2212 | 2200 | 2228 |
| température (°C) | 28 | 28 | 28 |
| Volume spécifique | 0,996252 | 0,996252 | 0,996252 |
| Poids spécifique | 2,62 | 2,63 | 2,64 |
| | 2,63 | | |

Tableau V.17 : Résultats essai poids spécifique coquillage de Kaolack [17]

| ESSAI | 1 | 2 | 3 |
|-----------------------|-------------|----------|----------|
| Pycnomètre seul | 738 | 724 | 721 |
| Pycno + liquide | 1596 | 1590 | 1583 |
| Pycno + matériau | 1725 | 1721 | 1713 |
| Pycno + mat + liquide | 2210 | 2213 | 2202 |
| température (°C) | 28 | 28 | 28 |
| Volume spécifique | 0,996252 | 0,996252 | 0,996252 |
| Poids spécifique | 2,64 | 2,66 | 2,65 |
| | 2,65 | | |

Tableau IV.18 : Résultats essai poids spécifique coquillage de Ziguinchor [17]

➤ Caractéristiques physiques

✓ Porosité

Les vides au niveau des coquillages sont constitués des trous de la coquille en plus des vides inter-granulaires, mais si ces trous sont bien remplis avec du mortier (dans le cas des bétons) les coquillages se comporteraient alors comme les granulats classiques (courants). La résistance du béton dépend essentiellement du remplissage de ces coquilles car un mauvais remplissage aura pour conséquence la présence de vides et le béton sera alors poreux. Ici, cette porosité ne caractérise pas une absorptivité du matériau, comme c'est le cas avec les granulats légers, mais renseigne plutôt sur les vides inters granulaires et sur la forme des coquilles[17].

Elle est calculée par la formule suivante [17]:

$$n = \frac{V_v}{V_t} = 1 - \frac{\gamma_h}{\gamma_s} = 1 - c$$

Où c : est la compacité

Avec V_v = volume des vides

V_t = volume total

γ_h = Densité apparente

$$\gamma_s = \text{Densité absolue}$$

Ainsi nous obtenons

$$n = 1 - \frac{1094}{2680} = 59.2 \% \text{ pour classe } 3/8$$

$$n = 1 - \frac{801}{2680} = 70 \% \text{ pour classe } 8/16$$

$$n = 1 - \frac{815}{2650} = 69.2 \% \text{ pour classe } 16/25$$

Nous remarquons que les granulats de coquillage sont alors, très poreux, mais cette porosité n'est pas intrinsèque mais plutôt externe.

✓ **Dureté**

Le seul essai de mesure de résistance mécanique exécuté est celui de Los Angeles (L.A). L'essai est exécuté conformément à la norme NF P 18-573. Les valeurs de L.A trouvées pour les granulats de coquillage de Kaolack et de Ziguinchor sont égales à 48% et 44% respectivement. Ce qui place ces coquillages, du point de vue dureté selon L.A, après le basalte (14%), le calcaire (29%), le grès (35%) mais avant la latérite (62%)[17].

✓ **Propreté des granulats**

Les granulats de coquillages ont été utilisés à l'état naturel donc, sans lavage préalable afin qu'ils restent compétitifs dans le cas où le béton confectionné présenterait des propriétés intéressantes. D'autant plus qu'ils présentent à l'état naturel, sous leur aspect physique, une propreté satisfaisante. Il convient de noter que les coquillages provenant de Ziguinchor contiennent parfois des coquilles d'huîtres, ce qui peut affecter la résistance du béton en raison de la friabilité de ces derniers. Quant à la propreté chimique, ce qu'il faudrait craindre c'est la présence de sel due au voisinage du milieu marin mais il est déjà montré au niveau des caractéristiques chimiques que le taux de chlorures est relativement faible alors qu'il est toléré jusqu'à 15 ou 30 g/l suivant la classe du béton[17].

V.4.2.3 Composition et dosage des mélanges

V.4.2.3.1 Application de la méthode de DREUX

➤ **Définition des données retenues**

Le béton à confectionner aurait [17] :

- Une résistance moyenne désirée à 28 jours, dans les conditions habituelles, fixée à 20 MPa. En effet, les bâtiments courants sont, en général, dimensionnés sur la base d'une résistance tournant autour de 20 à 25 MPa. Cette dernière étant en général choisie dans le cas des granulats courants

(calcaires, basalte, latérites, etc.) qui sont plus résistantes avec des formes plus favorables, dues au concassage, que les granulats de coquillages. C'est pourquoi cette valeur de 20 MPa a été choisie. Elle est assez satisfaisante dans certains cas de dimensionnement ;

- Une ouvrabilité que l'on caractérise par un affaissement au cône d'Abrams fixé dans un intervalle de 5 à 10 cm, ce qui correspond à un béton plastique d'après le tableau de désignation des classes d'affaissement au cône d'Abrams. Le béton sera mis en place à l'aide d'une vibration normale.

Pour ce béton nous disposons [17]:

- d'un ciment CEM II/A-32.5R de «classe vraie» égale à 38.5 MPa et de masse volumique $\gamma_c = 3.1 \text{ kg/l}$;
- d'un sable de dunes en provenance de Ziguinchor de masse volumique $\gamma_c = 2.62 \text{ kg/l}$
- d'un sable de dunes provenant de la région de Kaolack de masse volumique égale à 2.62 kg/l .

La formulation est faite sur les coquillages de classe 3/8, 8/16 et 16/25 dont les origines et les caractéristiques sont précisées plus haut.

| Affaissement (cm) | Désignation de la consistance |
|-------------------|-------------------------------|
| 0 à 4 | Ferme |
| 5 à 9 | Plastique |
| 10 à 15 | Très plastique |
| ≥ 16 | Fluide |

Tableau V.19 : désignation des classes d'affaissement au cône d'Abrams [17]

➤ Notes de calculs

✓ Dosage en ciment C

Le dosage en ciment doit être supérieur à la valeur minimale imposée qui est donnée par la formule suivante[17] :

$$C_{min} = \frac{250+10f_{ck}}{\sqrt[5]{D}} \text{ kg/m}^3$$

Avec f_{ck} = classe de résistance du béton (en MPa) et D en mm

Ce qui donne un dosage en ciment minimal égal à 297, 258 et 236 kg/m³ pour D égale à 8, 16 et 25 mm respectivement [17].

Dans le cadre de cette étude, puisque qu'il s'agit d'un béton de structure, le dosage en ciment le plus couramment utilisé est de 350 kg/m³, c'est la valeur qui sera alors retenue comme première approximation [17].

✓ **Détermination du rapport C/E**

Ce rapport peut être déterminé en utilisant la formule de BOLOMEY qui demande, cependant, la connaissance du coefficient granulaire G du granulat.

Formule de Bolomey :

$$f_{c28} = \sigma' G \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right) \text{ Avec: } \sigma' \text{ la résistance du ciment à } 28j = 38.5 \text{ MPa}$$

Le choix de G pour les coquillages ne peut donc être qu'arbitraire car le tableau qui donne la valeur de G concerne des granulats roulés et siliceux [17].

| Nature pétrographique des granulats | D (mm) | | |
|-------------------------------------|---------|---------|---------|
| | 10 à 16 | 20 à 25 | 30 à 40 |
| Siliceux, légèrement altérés | 0.45 | 0.50 | 0.55 |
| Siliceux, roulés | 0.50 | 0.55 | 0.60 |
| Calcaires, durs | 0.55 | 0.60 | 0.65 |

Tableau V.20 : Valeurs estimées du coefficient granulaire G[17]

Face à cette situation, la figure suivante a été utilisée. Elle permet d'évaluer approximativement le rapport C/E connaissant le dosage en ciment C et l'affaissement A [17].

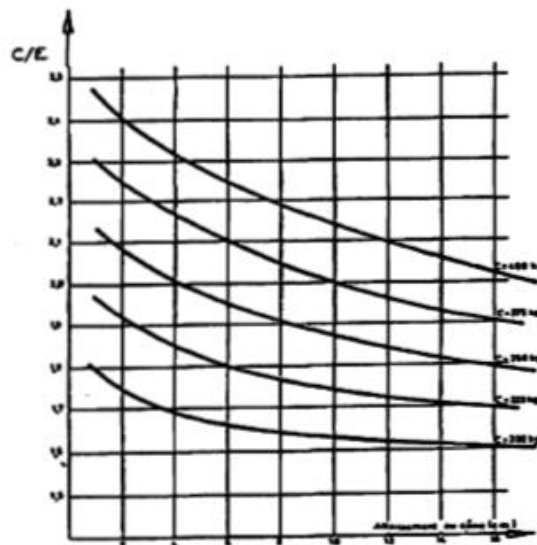


Figure V.17 : détermination du dosage en ciment en fonction de l'affaissement et du rapport C/E[17]

Ainsi pour A = 6 cm avec C = 350 kg/m³ → C /E = 1.8

✓ **Dosage en eau E**

Connaissant les valeurs de C et du rapport C/E, nous pouvons donc déduire le dosage en eau E.

$$E = \frac{350}{1.8} = 195 \text{ litres} \quad [17]$$

| | | | | | | | |
|----------------------|-----|----|----|----|----|----|-----|
| D (mm) | 5 | 10 | 16 | 25 | 40 | 63 | 100 |
| Correction sur E (%) | +15 | +9 | +4 | 0 | -4 | -8 | -12 |

Tableau V.21 : correction en % sur le dosage en eau [17]

Les corrections sur E pour $D \neq 25$ indiquées au tableau donnent [17]:

$$E = 195(1 + 12\%) \approx 230 \text{ litres pour } D = 8 \text{ mm}$$

$$E = 195(1 + 4\%) \approx 205 \text{ litres pour } D = 16 \text{ mm}$$

Aussi le dosage en ciment doit être modifié afin de conserver le même rapport C/E. on a ainsi[17] :

$$C = 230 \times 1.8 \approx 400 \text{ kg/m}^3 \text{ pour } D = 8 \text{ mm}$$

$$C = 205 \times 1.8 \approx 375 \text{ kg/m}^3 \text{ pour } D = 16 \text{ mm}$$

Après correction, les nouveaux dosages seront alors[17] :

$$\text{Pour la classe 3 - 8} \rightarrow C = 400 \text{ kg/m}^3 \text{ et } E = 230 \text{ litres}$$

$$\text{Pour la classe 8 - 16} \rightarrow C = 375 \text{ kg/m}^3 \text{ et } E = 205 \text{ litres}$$

$$\text{Pour la classe 16 - 25} \rightarrow C = 350 \text{ kg/m}^3 \text{ et } E = 195 \text{ litres}$$

✓ **Détermination du rapport G/S**

L'abaque expérimental C.E.S., donne une valeur moyenne normale du rapport G/S en fonction de D et du dosage en ciment; cet abaque est représenté sur la figure suivante [17]:

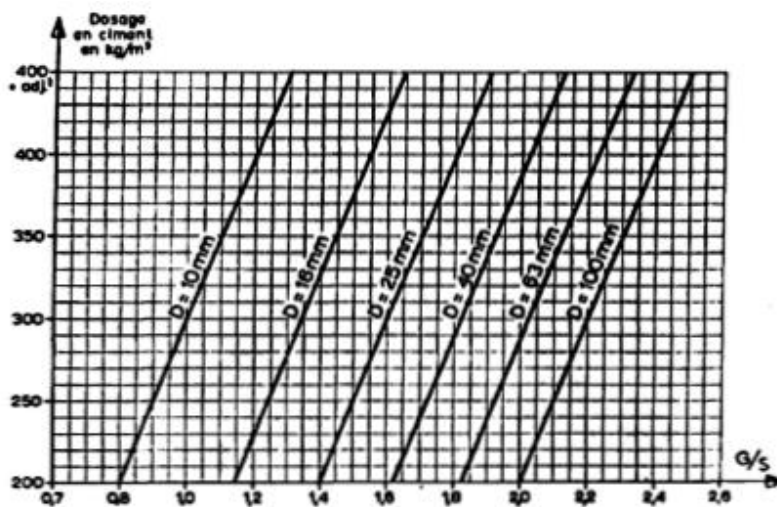


Figure V.18 : Abaque expérimental C.E.S donnant une valeur moyenne normale du rapport G/S en fonction de D et du dosage en ciment

Considérant les valeurs de C trouvé plus haut, nous obtenons[17] :

$$G/S = 1.7 \text{ pour } D = 25 \text{ mm} ;$$

$$G/S = 1.5 \text{ pour } D = 16 \text{ mm} ;$$

$G/S = 1.2$ pour $D = 8 \text{ mm}$ (cette valeur a été approximée car l'abaque concerne les D compris entre 10 et 100 mm).

✓ Détermination de la compacité

Il est adopté pour ce béton plastique ($A= 6 \text{ cm}$) une mise en place à l'aide d'une vibration normale. Le tableau suivant donne les compacités [17]:

| Consistance | Serrage | Coefficient de compacité γ | | | | | | |
|-------------|---------------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | D=5 | D=10 | D=16 | D=25 | D=40 | D=63 | D=100 |
| Molle | Piquage | 0.750 | 0.780 | 0.795 | 0.805 | 0.810 | 0.815 | 0.820 |
| | Vibration faible | 0.755 | 0.785 | 0.800 | 0.810 | 0.815 | 0.820 | 0.825 |
| | Vibration normale | 0.760 | 0.790 | 0.805 | 0.815 | 0.820 | 0.825 | 0.830 |
| Plastique | Piquage | 0.760 | 0.790 | 0.805 | 0.815 | 0.820 | 0.825 | 0.830 |
| | Vibration faible | 0.765 | 0.795 | 0.810 | 0.820 | 0.825 | 0.830 | 0.835 |
| | Vibration normale | 0.770 | 0.800 | 0.815 | 0.825 | 0.830 | 0.835 | 0.840 |
| | Vibration puissante | 0.775 | 0.805 | 0.820 | 0.830 | 0.835 | 0.840 | 0.845 |
| Ferme | Vibration faible | 0.775 | 0.805 | 0.820 | 0.830 | 0.835 | 0.840 | 0.845 |
| | Vibration normale | 0.780 | 0.810 | 0.825 | 0.835 | 0.840 | 0.845 | 0.850 |
| | Vibration puissante | 0.785 | 0.815 | 0.830 | 0.840 | 0.845 | 0.850 | 0.855 |

Tableau V.22 : Valeurs de coefficient de compacité en fonction de certains paramètres

Le tableau donne alors les compacités suivantes [17]:

$$D = 8 \text{ mm} \rightarrow \gamma = 0.800$$

$$D = 16 \text{ mm} \rightarrow \gamma = 0.815$$

$$D = 25 \text{ mm} \rightarrow \gamma = 0.825$$

Les corrections à apporter sur γ pour $C \approx 350 \text{ kg/m}^3$ et les types de granulats (roulés ou concassés) seront négligées car influent de manière insignifiante sur la compacité.

✓ Dosage en coquillage et en sable

▪ Classe 3-8

Les volumes des constituants solides, pour 1 m^3 de béton [17] :

$$\text{Volume total absolu} = 1000 \times \gamma = 800 \text{ litres}$$

$$\text{Volume total de ciment} = \frac{400}{3.1} = 129 \text{ litres}$$

$$\text{Volume absolu des granulats} = 800 - 129 = 671 \text{ litres}$$

$$\text{Volume absolu du sable} = \frac{671}{2.2} = 305 \text{ litres}$$

$$\text{Volume absolu des coquillages} = 671 - 305 = 366 \text{ litres}$$

Ainsi en dosage pondéral on aura [17]:

$$P_{\text{sable}} = 305 \times 2.61 = 796 \text{ kg}$$

$$P_{\text{gravier}} = 366 \times 2.63 = 966 \text{ kg.}$$

Les quantités des constituants pour 1 m³ de béton sont alors les suivantes[17] :

$$\text{Ciment} = 400 \text{ kg}$$

$$\text{Eau} = 230 \text{ litres}$$

$$\text{Sable} = 796 \text{ kg}$$

$$\text{Coquillages} = 966 \text{ kg}$$

Ce qui donne un béton avec une masse volumique théorique de 2392 kg/m³.

▪ **Classe 8-16**

De la même manière nous obtenons, pour 1 m³ de béton, les dosages des composants suivants [17]:

$$\text{Ciment} = 375 \text{ kg}$$

$$\text{Eau} = 205 \text{ litres}$$

$$\text{Sable} = 715 \text{ kg}$$

$$\text{Coquillages} = 1088. \text{kg}$$

Ce qui donne un béton avec une masse volumique théorique de 2383 kg/m³.

▪ **Classe 16-25**

Les dosages pour 1 m³ de béton sont les suivants [17] :

$$\text{Ciment} = 350 \text{ kg}$$

$$\text{Eau} = 195 \text{ litres}$$

$$\text{Sable} = 692 \text{ kg}$$

$$\text{Coquillages} = 1187 \text{ kg}$$

Ce qui donne un béton avec une masse volumique théorique de 2424 kg/m³.

Nous remarquons à travers ces calculs que les bétons de coquillages ont des masses volumiques théoriques qui rentrent dans la gamme des bétons normaux [17].

| Classe granulaire | Ciment (kg) | Eau (L) | Sable (kg) | Gravier (kg) | Masse totale (kg) |
|-------------------|-------------|---------|------------|--------------|-------------------|
| 3/8 | 400 | 230 | 796 | 966 | 2392 |
| 8/16 | 375 | 205 | 715 | 1088 | 2400 |
| 16/25 | 350 | 195 | 692 | 1187 | 2424 |

Tableau V.23 : composition d'un m³ des bétons de coquillages pour chaque classe [17]

➤ Caractéristiques mécaniques des bétons confectionnés

✓ Confection et mûrissement des éprouvettes

Les résistances sont mesurées sur des éprouvettes cylindriques dont les moules, qui sont les plus fréquemment utilisées, ont des caractéristiques définies par la norme NF P 18-400. Leurs dimensions sont indiquées dans le tableau ci-dessous; elles doivent être choisies en fonction du diamètre maximal des granulats (D) entrant dans la composition du béton. Ainsi, pour les classes 3/8 et 8/16 ce sont les moules de 11 x 22 qui ont été utilisées et les moules de 16 x 32 pour la classe 16/25. La mise en place a lieu par piquage à 25 coups sur 3 couches [17].

| Format | Dimensions (mm) | | Section (cm ²) par un plan | | D (mm) des granulats |
|------------------|-----------------|-----------|--|-----------|----------------------|
| | Diamètre d | Hauteur h | orthogonal | diamétral | |
| Cylindre 11 x 22 | 112.8 | 220 | 100 | 248 | ≤ 16 |
| Cylindre 16 x 32 | 159.6 | 320 | 320 | 200 | ≤ 40 |
| Cylindre 25 x 50 | 252.5 | 500 | 500 | 500 | ≤ 80 |

Tableau V.24 : Dimensions des moules en fonction du D des granulats [17]

Les éprouvettes sont démoulées après 24 heures et sont conservées dans l'eau pour un mûrissement pendant 7 et 28 jours [17].

✓ Présentation et interprétation des résultats

▪ Consistance

Les affaissements mesurés au cône d'Abrams, conformément à la norme NF P 18-451, sur les classes 3/8, 8/16 et 16/25 ont donné respectivement 7 cm, 4 cm et 4 cm. Hormis celle de la première classe, ces valeurs ne s'inscrivent pas dans l'intervalle établi par Dreux pour les bétons plastiques et sont différentes de la valeur visée qui est de 6 cm. Ceci s'explique par le fait que la quantité de mortier pour ces deux mélanges (8/16 et 16/25) ne permettait pas de remplir les

trous des coquilles et de jouer le rôle de liant devant assurer un bon enrobage des coquillages. Ainsi l'absence de mortier, qui devrait assurer un bon écoulement de ces derniers, constitue le défaut de plasticité de ces bétons confectionnés. La méthode de Dreux, conçue pour des granulats roulés, siliceux avec des formes pleines, ne prend en compte que le volume de liant nécessaire pour un enrobage des granulats. Ce qui n'est pas le cas des coquillages. Pour la classe 3/8 l'affaissement (7 cm) reste bien conforme aux hypothèses et s'inscrit dans l'intervalle de Dreux pour les bétons plastiques. En effet, les granulats de cette classe n'ont pas cette forme recroquevillée très marquée et se composent essentiellement de fragments de coquillages[17].

- **Masse volumique**

Elle est obtenue par le rapport de la masse de l'éprouvette sortie de l'eau et séchée, sur son volume. Les masses volumiques moyennes sont de 2015, 1955 et 2052 kg/m³ pour les classes 3/8, 8/16 et 16/25 respectivement. Ces valeurs diffèrent de celles théoriques qui s'inscrivaient entièrement dans la gamme des bétons normaux (2150 et 2500 kg/m³). Ces faibles valeurs s'expliquent par le fait que les bétons confectionnés sont très poreux car les rôles de remplissage et d'enrobage ne sont pas bien assurés par le mortier. Il peut sembler paradoxal que le plus petit granulats donne une masse volumique plus grande mais cela est dû au fait que dans sa composition, le mortier servait juste à enrober les granulats, qui sont en grande partie constitués de fragments de coquillages, ce qui procure à ce béton une meilleure compacité contrairement aux deux autres cas. Ces masses volumiques restent néanmoins faibles, ce qui montre encore toute la particularité des granulats étudiés[17].

- **Résistances en compression**

Les résistances sont mesurées sur des éprouvettes cylindriques, 11 x 22 pour les classes 3/8 et 8/16 et 16 x 32 pour la classe 16/25, mûries à 7 et à 28 jours conformément aux normes CAN3-A23-2 M₇₇ [17].

L'appareil d'essai est, en effet, une presse hydraulique conforme aux exigences de la norme ASTM E4 [17].

Un surfacage au soufre mélangé avec 40% de sable est effectué sur une couche de 1 à 2 mm afin de réduire l'excentricité des éprouvettes[17].

L'éprouvette est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette [17].

$$\sigma_c = \frac{4 \times F_c}{\pi \times D^2} \quad [17]$$

Où F_c = charge de rupture et D = diamètre de l'éprouvette

Le tableau suivant présente les valeurs moyennes de contrainte obtenues en compression à 7 et à 28 jours [17].

| Classe granul. | 3/8 | | 8/16 | | 16/25 | |
|----------------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| | 7 | 28 | 7 | 28 | 7 | 28 |
| σ_c en MPa | 11.22 | 24.20 | 5.52 | 10.17 | 6.71 | 10.75 |

Tableau V.25 : résistances moyennes en compression avec Dreux [17]

Les résistances obtenues à 28 jours, pour les classes 8/16 et 16/25, sont très faibles et restent très inférieures à la valeur moyenne de 20 MPa visée à 28 jours. Par contre, la classe 3/8 présente une bonne résistance à 7 et à 28 jours. Ce qui montre une fois de plus le rôle essentiel de la compacité pour une bonne résistance. En effet, il est déjà expliqué que les bétons confectionnés avec les classes 8/16 et 16/25 présentaient beaucoup de vides dus à un défaut d'enrobage et de remplissage des coquillages par le mortier contrairement à celui de la classe 3/8 [17].

L'observation des lignes de rupture a révélé que ces dernières passaient, de manière préférentielle, par la liaison liant-coquillages, comme c'est montré dans la figure suivante [17].

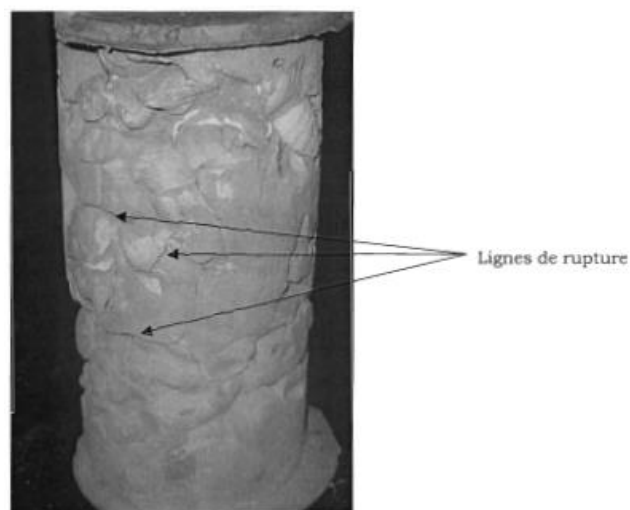


Photo V.28 : Aperçu des lignes de rupture après écrasement de l'éprouvette à la presse

L'adhérence liant-granat est, en effet, fortement liée à la texture des granulats mais également au bon enrobage de ces derniers car sans enrobage on ne peut parler d'adhérence. Or la méthode de Dreux, conçue pour des granulats roulés et siliceux, ne peut donc assurer ce rôle d'enrobage des granulats de coquillage. Car pour cette méthode, le mortier obtenu devait seulement servir à enrober les granulats (de forme pleine), alors que les coquillages sont en général de forme recroquevillée. C'est pourquoi, après le mélange des différents constituants, Il est constaté que le liant ne remplissait même pas tous les trous des coquilles et ne pouvait ainsi jouer ce rôle d'enrobage. Le béton était donc très poreux, alors qu'on sait que la formulation d'un béton repose essentiellement sur le principe de la porosité minimale et de la compacité maximale car plus un béton est compact et plus il est résistant[17].

Pour la classe 3/8 par contre, ces zones de rupture s'expliquent par la forme un peu aplatie de ces coquillages car constitués de fragments, cependant les résistances obtenues restent très satisfaisantes comparées à la valeur visée[17].

V.4.2.3.2 Proportion d'une méthode empirique

Contrairement aux granulats courants que nous connaissons, les coquillages sont particuliers, en ce sens qu'ils ne sont ni roulés ni concassés et qu'ils ont, en outre, une forme recroquevillée, c'est pourquoi l'utilisation des méthodes existantes pour leur formulation pose un certain nombre de problèmes. Le constat a été, qu'à travers les compositions réalisées avec la méthode de Dreux, le problème majeur résidait sur le rapport G/S car il ne permettait pas d'avoir le mortier nécessaire pour assurer un remplissage et un enrobage des granulats de coquillages. Il faudrait alors une méthode qui, en plus du volume de mortier nécessaire pour bien enrober les coquillages, tiendrait aussi compte des trous des coquilles à remplir afin d'avoir une bonne compacité[17].

L'objectif est de proposer une solution à la méthode de Dreux appliquée plus haut. Il s'agit donc de déterminer le rapport G/S optimal pour un dosage en ciment et un rapport E/C fixés[17].

Il faut signaler que cette méthode n'est expérimentée que sur les classes 8/16 et 16/25 car les résistances obtenues sur la classe 3/8 avec la méthode de Dreux étaient assez satisfaisantes comparées aux objectifs visés. L'inapplicabilité de cette méthode, était donc notée sur les deux autres classes où les résistances obtenues étaient très faibles[17].

➤ Définition des données retenues

✓ Données de base

- Dimension des granulats : les granulats étant choisis à l'avance donc leurs dimensions sont déjà fixées. Il s'agit toujours des mêmes classes 8/16 et 16/25 ;
- Consistance désirée : on la caractérisera par l'affaissement moyen au cône d'Abrams [17] .

Comme nous cherchons un béton plastique, donc elle doit être comprise entre 5 et 10 cm pour une mise en place avec vibration normale[17] .

- Résistance désirée: elle est définie par la résistance en compression sur cylindre à 28 jours qui déterminera suivant les résultats obtenus les domaines d'utilisation de chacune des classes [17] .

✓ Dosage en ciment

Pour la détermination du dosage en ciment les calculs sont basés, en partie, sur la formule de Caquot qui donne le volume optimal de fines, V, dans un béton conduisant à la porosité minimale [17].

V (l/m^3 béton) = $220/D^{0.2}$ où D (mm) est le diamètre du plus gros granulats. Ce qui donne de manière approximative, pour $1 m^3$ de béton, les dosages suivants[17] :

$$C = \frac{220}{25^{0.2}} \times 3.1 = 350kg \text{ pour la classe } 16/25$$

$$C = \frac{220}{16^{0.2}} \times 3.1 = 400kg \text{ pour la classe } 8/16$$

✓ Dosage en eau

Un rapport de E/C est fixé à 0.6 (équivalent à C/E= 1.67) car étant en général la valeur recommandée dans les zones sahéliennes. Ainsi pour $1 m^3$ de béton le dosage en eau on a [17]:

$$E = 210 l \text{ pour la classe } 16/25 ;$$

$$E = 240 l \text{ pour la classe } \frac{8}{16} .$$

✓ Dosage des granulats

L'objectif de cette étude étant de déterminer les proportions optimales des granulats (sable et coquillages) à mélanger, différentes valeurs de G/S ont été prises pour composer les mélanges. Les dosages en ciment et en eau étant connus (fixés), il est possible maintenant, de déterminer, le volume absolu des granulats pour $1 m^3$ de béton [17].

▪ Pour la classe 16/25

$$C = 350/3.1 = 113 l$$

$$E = 210 l$$

$$S + G = 1000 - 113 - 210 = 677 l \quad [17]$$

Pour $G/S = 1.1$, on a alors [17] :

$$S = \frac{677}{2.1} = 323 \text{ l} = 323 \times 2.62 = 846.26 \text{ kg}$$

$$G = 677 - 323 = 356 \text{ l} = 356 \times 2.65 = 943.40 \text{ kg}$$

Ainsi, pour des valeurs de G/S variant de 1.1 à 0.8 nous avons les proportions suivantes en poids[17] :

| G/S | 1.1 | 1 | 0.9 | 0.8 |
|---------------|--------|--------|--------|--------|
| Sable (kg) | 846.26 | 889.49 | 936.39 | 987.74 |
| Graviers (kg) | 943.40 | 899.68 | 852.24 | 800.30 |

Tableau V.26 : valeurs de G/S variant de 1.1 à 0.8

▪ **Pour la classe 8/16**

$$C = 400/3.1 = 129 \text{ l}$$

$$E = 240 \text{ l}$$

$$S + G = 1000 - 129 - 240 = 631 \text{ l} \quad [17]$$

Pour $G/S = 1.3$, on a alors[17] :

$$S = \frac{631}{2.3} = 275 = 275 \times 2.61 = 717.75 \text{ kg}$$

$$G = 633 - 275 = 358 \text{ l} = 358 \times 2.64 = 945.12 \text{ kg}$$

Ainsi, pour des valeurs de G/S variant de 1.3 à 0.9 nous avons les proportions suivantes en poids[17] :

| G/S | 1.3 | 1.2 | 1.1 | 1 | 0.9 |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Sable (kg) | 717.75 | 751.68 | 786.92 | 826.07 | 869.13 |
| Graviers (kg) | 945.12 | 908.16 | 875.16 | 835.56 | 792.00 |

Tableau V.27 : valeurs de G/S variant de 1.3 à 0.9

Ces rapports de G/S sont retenus suite à plusieurs mélanges et en dehors de ces rapports les affaissements étaient soit trop faibles (inférieurs à 5) soit un peu élevés (supérieur à 7). Les masses volumiques théoriques sont, en moyenne, 2300 et 2350 kg/m³ pour les classes 8/16 et 16/25 respectivement, valeurs qui sont proches de celles obtenues avec Dreux. Les compositions des bétons sont présentées dans le tableau ci- après[17].

| CLASSE | G/S | Ciment kg | Eau L | Sable kg | Coquillages kg | Masse vol théo Kg/m ³ |
|--------|-----|-----------|-------|----------|----------------|----------------------------------|
| 8/16 | 09 | 400 | 240 | 869.13 | 792.00 | 2301 |
| | 1 | | | 826.07 | 835.56 | 2302 |
| | 1.1 | | | 786.92 | 875.16 | 2302 |
| | 1.2 | | | 751.68 | 908.16 | 2300 |
| | 1.3 | | | 717.75 | 945.12 | 2303 |
| 16/25 | 0.8 | 350 | 210 | 846.26 | 943.40 | 2350 |
| | 0.9 | | | 889.49 | 899.68 | 2349 |
| | 1 | | | 839.39 | 852.24 | 2252 |
| | 1.1 | | | 987.74 | 800.30 | 2348 |

Tableau V.28 : Composition d'un m³ de béton de coquillage

➤ **Présentation et interprétation des résultats d'essais**

✓ **Consistance**

Les affaissements mesurés au cône d'Abrams comme précédemment se situent entre 5 et 7 cm pour la classe 8/16 et entre 5 et 6 cm pour la classe 16/25. Ces valeurs s'inscrivent entièrement dans le domaine de variation établi pour les bétons plastiques[17].

Avec les rapports G/S retenus pour la composition des bétons, le rôle de remplissage et d'enrobage des coquillages a été bien assuré par le mortier. Les résultats obtenus montrent bien que l'affaissement est fonction de G/S et qu'ils évoluent en sens inverse. Ainsi les bétons obtenus ne présentent aucune difficulté de mise en œuvre pour les structures courantes du bâtiment (poteau, poutre, dalle...)[17].

✓ **Masse volumique**

Elle a été obtenue de la même manière que précédemment. La mesure a été effectuée sur trois éprouvettes pour chaque composition ce qui a permis de dégager une valeur moyenne. Les résultats sont consignés dans le tableau ci-dessous. [17]

| CLASSE GRANULAIRE | Rapport G/S | Affaissement au cône (cm) | Masse volumique (kg/m ³) | Résistances en compression (MPa) | |
|-------------------|-------------|---------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|----------|
| | | | | 7 jours | 28 jours |
| 8/16 | 0.9 | 7 | 2017 | 10.87 | 21.19 |
| | 1 | 6 | 2098 | 15.50 | 23.50 |
| | 1.1 | 5 | 2099 | 14.94 | 20.62 |
| | 1.2 | 5 | 2079 | 14.66 | 21.71 |
| | 1.3 | 5 | 2055 | 11.05 | 19.92 |
| 16/25 | 0.8 | 6 | 2259 | 10.35 | 12.90 |
| | 0.9 | 6 | 2303 | 8.85 | 14.42 |
| | 1 | 5 | 2271 | 6.28 | 11.32 |
| | 1.1 | 5 | 2322 | 9.52 | 13.05 |

Tableau V.29 : récapitulatif des résultats des essais sur les bétons avec méthode proposée

Contrairement à la méthode précédente, la masse volumique évolue dans le même sens que la taille des grains, cependant les valeurs trouvées restent inférieures à celles théoriques surtout pour la classe 8/16. Les valeurs optimales de 2100 et 2322 kg/m³ pour les classes 8/16 et 16/25 respectivement, ont été obtenues pour un rapport de G/S = 1.1 dans les deux cas. Les bétons obtenus avec D = 16 mm sont alors des bétons légers contrairement à ceux avec D= 25 mm dont la masse volumique (2300 kg/m³ en moyenne) s'inscrit parfaitement dans la gamme des bétons courants. Ce qui montre que les coquillages de Ziguinchor et de Kaolack sont différents car l'un donne des bétons légers alors que l'autre quant à lui donne des bétons courants [17].

✓ **Résistances en compression**

Les essais sont effectués sur les éprouvettes 11 x 22 et 16 x 32 mûries à 7 et à 28 jours conformément à la norme CAN3-A23-2 Mn comme précédemment et les résultats sont présentés dans le tableau suivant [17]:

| CLASSE GRANULAIRE | Rapport G/S | Résistances en compression (MPa) | |
|-------------------|-------------|----------------------------------|----------|
| | | 7 jours | 28 jours |
| 8/16 | 0.9 | 10.87 | 21.19 |
| | 1 | 15.50 | 23.50 |
| | 1.1 | 14.94 | 20.62 |
| | 1.2 | 14.66 | 21.71 |
| | 1.3 | 11.05 | 19.92 |
| 16/25 | 0.8 | 10.35 | 12.90 |
| | 0.9 | 8.85 | 14.42 |
| | 1 | 6.28 | 11.32 |
| | 1.1 | 9.52 | 13.05 |

Tableau V.30 : résistances moyennes en compression des bétons composés

Ces valeurs restent nettement supérieures à celles obtenues avec Dreux, mais varient très sensiblement dans la gamme de rapports G/S choisis. En outre, suivant le rapport G/S la résistance augmente sensiblement entre 7 et 28 jours car 50 à 70 % de la résistance du béton est atteinte dès le septième jour. Compte tenu des objectifs visés (20 MPa à 28 jours), on peut dire que les résistances obtenues avec la classe 8/16 sont assez satisfaisantes avec une valeur optimale de 23.5 MPa. Cette dernière est obtenue pour G/S = 1 avec une masse volumique de 2098 kg/m³ qui est sensiblement égale à la valeur optimale (2100 kg/m³) et un affaissement au cône de 6 cm. La classe 16/25 quant à elle, offre des résistances faibles même si elles restent supérieures aux valeurs obtenues avec Dreux. La résistance optimale de 14.42 MPa, pour cette classe, est obtenue pour G/S= 0.9 avec une masse volumique de 2303 kg/m³ et un affaissement au cône de 6 cm. Cette faible valeur s'explique par le fait que le sable utilisé est argileux

entraînant ainsi une demande en eau plus importante avec comme conséquence une chute de la résistance. Les hypothèses (C et C/E) ne sont donc pas appropriées pour ce cas [17].

L'observation des lignes de rupture a révélé, comme précédemment, qu'elles passaient de manière préférentielle par la liaison liant-granulat de coquillages. En effet la texture lisse des coquillages ne favorise pas une très bonne adhérence avec le liant mais la liaison reste néanmoins satisfaisante compte tenu des résultats obtenus (classe 8/16) [17].

L'étude expérimentale a montré que la méthode de formulation de Dreux ne peut s'appliquer au béton de coquillages à cause de la forme particulière de ces derniers. Les bétons confectionnés étaient alors très poreux et se caractérisaient par un défaut de plasticité et des résistances très faibles. Ce qui montre que la forme des granulats est un critère important pour les méthodes classiques en général et celle de Dreux en particulier[17] .

Quant à la méthode proposée, les rapports G/S optimaux sont de 1 pour la classe 8/16 et 0.9 pour le 16/25, alors que Dreux, lui recommande de ne pas dépasser 2. En outre, les résistances obtenues surtout avec le sable de Ziguinchor montrent toute l'importance des caractéristiques des granulats sur les propriétés du béton[17].

Les masses volumiques obtenues montrent que les coquillages peuvent varier suivant leur provenance et que certains peuvent donner des bétons légers et d'autres des bétons courants[17] .

V.4.2.4 Etude économique et domaine d'utilisation

Il s'agit, dans cette partie, de donner une estimation du coût des bétons confectionnés mais aussi de proposer des domaines d'utilisation dans le secteur du bâtiment au vu des résultats expérimentaux obtenus précédemment.

V.4.2.4.1 Etude économique

Les coquillages ne font pas l'objet d'une exploitation industrielle au Sénégal et sont ainsi vendus de manière informelle par des exploitants artisanaux. Nous nous limiterons donc à une estimation quantitative qui nous permettra de voir les rapports avec les bétons existants[17].

Comparés aux bétons courants, la différence des constituants réside dans les granulats. Ainsi c'est donc la comparaison des coûts des granulats qui sera déterminante[17].

Les granulats concassés utilisés dans ces zones proviennent en général des carrières exploitées de Sindia, Bandia, etc. qui sont les plus proches. Dans la région de Ziguinchor, il arrive que la latérite soit

utilisée comme granulats à béton en raison du prix très onéreux des autres graviers dû au coût de transport. Comme nous l'avons vu au paragraphe traitant de sa disponibilité, les gisements de coquillages sont très abondants dans l'aire sénégalaise particulièrement le long du littoral atlantique, au niveau des embouchures et des estuaires des cours d'eau. Le problème de disponibilité ne se pose donc pas. Compte tenu du prix des granulats qui évoluent en fonction des distances de transport, nous allons donc faire une étude comparative pour chacune des régions[17] :

➤ **Région de Kaolack**

Dans cette région, les granulats concassés des carrières de la région de Thiès sont les plus utilisés. En s'intéressant au prix on a les coquillages qui coûtent 2000 Fr cfa/m³ soit environ 3 euros (1 euro correspond à 655 Fr cfa), tandis que les concassés de calcaire coûtent 10500 Fr cfa/m³ soit environ 16 euros. En rapportant ces prix au camion de 8 m³, nous obtenons alors 16000 Fr cfa soit environ 24 euros et 84000 Fr cfa soit environ 128 euros pour les granulats de coquillages et de calcaires respectivement. Ainsi sur chaque camion de 8 m³, on réalise théoriquement une économie de 68000 Fr cfa soit environ 64 euros en utilisant les granulats de coquillages à la place des concassés de calcaire. D'autant plus que le problème d'approvisionnement ne se poserait pas car l'exploitation est locale et est assurée par des piroguiers.

➤ **Région de Ziguinchor**

La tendance actuelle dans cette région, est l'utilisation de la latérite comme granulat à béton, car elle est exploitée localement ce qui fait qu'elle coûte moins chère que les autres granulats concassés provenant en général des carrières exploitées de Thiès. Ainsi, les granulats de coquillages seront comparés aux graves latéritiques en termes de prix afin de voir celui qui est le plus compétitif économiquement. Le prix du camion de 8 m³ tourne autour de 32000 Fr cfa soit environ 48 euros pour les premiers et 55000 Fr cfa soit environ 83 euros pour les derniers. L'économie réalisée sur un camion est donc de 23000 Fr cfa soit environ 35 euros, cette valeur serait beaucoup plus grande si on comparait les coquillages aux autres granulats concassés (calcaire, basalte, grès...), en raison des coûts induits par leur transport.

L'utilisation des granulats des coquillages permet ainsi de réaliser des économies très intéressantes, surtout en Kaolack avec comme avantage la réduction des coûts de constructions, surtout dans le cas des logements sociaux. Cependant il est à prévoir les coûts qu'induirait le criblage car les coquillages sont en général vendus en vrac, contrairement aux graviers courants, en raison de l'exploitation artisanale dont ils font l'objet.

V.4.2.4.2 Domaines d'utilisation

Les caractéristiques mécaniques obtenues à travers cette étude expérimentale avec les classes 3/8 (24.20 MPa) et 8/16 (23.50 MPa) placent ces bétons de coquillages dans la gamme des bétons de structure. Ils peuvent ainsi, être utilisés à tous les niveaux du bâtiment allant du béton de propreté au plancher, en passant par les semelles, les poteaux et les poutres. Les bétons avec la classe 3/8 peuvent également être utilisés pour fabriquer des agglos, surtout dans le cas des structures avec murs porteurs. De plus leur masse volumique faible (2015 kg/m^3 avec le 3/8 et 2098 kg/m^3 avec le 8/16) comparée aux bétons courants (2500 kg/m^3 en général), constitue un avantage certain car elle permettrait de réduire les charges permanentes de structure et par conséquent les efforts dans les armatures ce qui se traduira par une diminution des sections d'aciers[17].

Quant aux bétons composés avec la classe 16/25, les résistances obtenues sont faibles (14.42 MPa) ce qui n'exclut cependant pas leur utilisation dans le bâtiment. En effet, ils peuvent être utilisés comme béton de propreté, ou pour les linteaux, auvents, acrotères, ou encore pour toute autre partie ne participant pas à la structure porteuse du bâtiment[17].

Ainsi, Compte tenu de son coût peu onéreux et de ses domaines d'utilisation, le béton de coquillages présente un avantage certain et 'mérite d'être exploité afin de réduire les coûts de constructions[17] .

Conclusion générale

Cette étude avait pour objectif de valoriser le matériau béton à base de granulats légers.

Les caractéristiques des granulats légers influent directement sur ceux des bétons légers. La masse volumique de ces bétons varie entre 800 et 2000 kg/m³.

Grace à leur caractère de légèreté, ces bétons à granulats sont plus faciles à manipuler et à déplacer, et sont aussi plus économiques par rapport aux bétons ordinaires.

Pour le cas du Sénégal, l'utilisation des granulats légers est peu répandue ; seuls les graviers de basalte, de calcaire et de grès sont les plus utilisés.

Néanmoins on note l'argile expansée qui est le plus connu parmi ces granulats.

Pour les granulés d'argile étudiés, la meilleure température de cuisson est celle de 1100°C.

Avec cette température est obtenue une résistance mécanique acceptable des bétons d'argile mais aussi des résultats satisfaisants pour les essais thermiques réalisés.

Pour ce qui est du béton de coquillage, l'étude a permis de montrer que les granulats de coquillage peuvent donner aussi bien un béton léger qu'un béton courant. En effet les coquilles de Kaolack de classe 8/16 ont donné le béton léger (masse volumique 2100 kg/m³) et ceux de Ziguinchor de classe 16/25, le béton courant (masse volumique 2322 kg/m³).

Enfin, pour l'amorce d'étude pratique, nous recommandons d'utiliser les valeurs et pourcentages de substitution calculés durant ce travail afin de formuler un béton à base de polystyrène expansé.

Références

- [1] : Mémoire de Génie Civil Biskra : « Formulation et caractérisation des bétons légers », 2010, réalisé par HERIHIRI Ouided.
- [2] : Rapport d'études et recherches : Méthodologie de formulation des bétons auto plaçants légers, Septembre 2015, réalisé par Latifou BELLO.
- [3] : Thèse de Doctorat Génie Civil Tizi-Ouzou : Caractérisation et modélisation des paramètres physico-hydro-mécaniques d'un béton léger à base granulats composites, 2014, réalisée par Mme. MOHELLEBI Samira née BOUAZIZ.
- [4] : Livre : «Granulats et béton légers», 1986, Ecrit par M.Arnauld et M.Virlogeux, Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées.
- [5]: Mémoire de Génie Civil Ain-Temouchent : Etude de l'influence des granulats pouzzolaniques sur les caractéristiques mécaniques des bétons légers, 2017-2018, réalisé par BENZINA Ahlem et HACHEM Nafissa.
- [6] : Livre: «Propriétés des bétons», Eyrolles, Paris, 2000, A. NEVILLE.
- [7] : Mémoire de Génie Civil Boumerdes : Formulation et caractérisation d'un béton léger à base de granulats obtenus par recyclage des boues de barrage, réalisé par AGOUMIMELCHA Ahmed et OUANNOUGHY Billal.
- [8] : Les dossiers de binettes et Jardin, consulté le 25 MARS 2019 en ligne, disponible sur <<<https://jardinage.lemonde.fr/dossier-2286-beton-cellulaire.html>>>.
- [9] : Guide pratique du béton : Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables. 6^{em} Edition (français, édition suisse), janvier 2015, Dr. Peter Lunk, Cathleen Ho"mann, Erich Ritschard, Dr. Jean-Gabriel Hammerschlag, Kerstin Wassmann, Dr. Thomas Schmidt.
- [10]:Site «L'ELEMENTARIUM»,Consulté le 30 Avril 2019, disponible sur <<<https://www.lelementarium.fr/product/polystyrene/>>>.
- [11] : Livre : Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre, Tome 2, réédition janvier 2013, Collection Technique Cimbéton.
- [12] : Mémoire de Génie Civil Sénégal : Etude thermomécanique de béton à base de granulats argileux, janvier 2017, GAYE Aida.

- [13] : Mémoire de Génie Civil Laghouat : Effet du type de liant sur les propriétés physico-mécaniques et thermiques d'un béton allégé par les billes de polystyrène (Polys-béto), Mai 2017, réalisé par Belkacem ZIREGUE et ABAH Khaled.
- [14]: Site : « Chahine Products », Comment fabrique-t-on le polystyrène expansé, consulté en ligne le 30 Avril 2019, « <https://www.chahineproducts.com/Le+polystyrene>»
- [15] : Catalogue de structures de chaussées neuves et guide de dimensionnement des chaussées au Sénégal, juin 2015, Ministère des infrastructures, des transports terrestres et du désenclavement.
- [16] : Article: Construction and building materials: Performance evaluation of a resinous cement mortar modified with crushed clay brick and tire rubber aggregate, septembre 2016, S. Bouhour, M.L. Benmalek.
- [17] : Mémoire de Génie Civil Sénégal : Contribution à l'élaboration d'une méthode de formulation des bétons de coquillages, 2004-2005, réalisé par M.GUEYE Ndongo.
- [18] : Rapport d'essais du Laboratoire Instrumentation et mesures, 2014, Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment.
- [19] : Mémoire de Génie Civil Quebec : Propriétés mécaniques et Durabilité d'un béton léger - Applications en régions froides, 2013, Thomas Calais.

