

SOMMAIRE

REMERCIEMENT

SOMMAIRE

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES PHOTOS

LISTE DES FIGURES

LISTE DES

PARTIE I: ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE I- GENERALITES SUR LES BETONS

CHAPITRE II- GENERALITES SUR LES BETONS LEGERS

CHAPITRE III- GENERALITES SUR LES POLYSTYRENES

PARTIE II: ETUDES EXPERIMENTALE

CHAPITRE IV- METHODOLOGIE DES DIFFERENTS ESSAIS DE CARACTERISATIONS

CHAPITRE V- CARACTERISTIQUES DES CONSTITUANTS DU BETON A CONCEVOIR

CHAPITRE VI- FORMULATION DU BETON

CHAPITRE VII- CARACTERISATION DU BETON CONCU

CHAPITRE VIII- UTILISATION DU BETON LEGER A BASE DE POLYSTYRENE

CHAPITRE IX- ETUDE ENVIRONNEMENTALE ET ECONOMIQUE

BIBLIOGRAPHIE

WEBOGRAPHIE

ANNEXE

TABLE DES MATIERES

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

LISTE DES ABREVIATIONS

| | |
|-----------------------|---|
| A | Affaissement |
| AFNOR | Association Française de la NORmalisation |
| C | Dosage en ciment pour 1 m ³ de béton |
| CEM | CEMent |
| C _{corrigée} | Dosage en ciment corrigée |
| CFC | ChloroFluoroCarbone |
| CHF | Ciment de haut fourneau |
| CLK | Ciment de laitier au clinker |
| CPA | Ciment Portland artificiel |
| CPJ | Ciment Portland composé |
| d | Diamètre de l'éprouvette |
| D _{max} | Diamètre du plus gros grain |
| e | Epaisseur |
| ESPA | Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo |
| E | Dosage en eau pour 1 m ³ de béton |
| E _{corrigée} | Dosage en eau corrigée |
| ES | Equivalent de sable |
| F | Fréquence |
| F _{max} | Force maximale ou charge maximale |
| h | Hauteur de l'éprouvette |
| h ₁ | Hauteur du sédiment |
| h ₁ | Hauteur de dépôt de sable |
| JIRAMA | JIRO sy RAno MAlagasy |
| l | Longueur |
| M _f | Module de finesse |
| M _{fs} | Module de finesse du sable |
| M _{fp} | Module de finesse du polystyrène |
| M _i | Masse de refus au tamis i |

| | |
|-----------|---|
| M_{pi} | Masse de tamisât au tamis i |
| M_{si} | Masse de l'échantillon |
| p | Porosité |
| %P | Taux de polystyrène dans les mélanges |
| PS | Polystyrène |
| PSE | Polystyrène expansé |
| PSE-E | Polystyrènes expansés extrudés |
| PSE-M | Polystyrènes expansés moulés |
| R | Affaiblissement acoustique |
| R_e | Résistance thermique |
| R_{int} | Rayon intérieur |
| R_{ext} | Rayon extérieur |
| R_c | Résistance en compression |
| R_{b28} | Résistance à la compression prescrite à 28j |
| R_b | Résistance visée |
| R_t | Résistance en traction |
| SSB | Surface spécifique de Blaine |
| $S_{3,i}$ | Béton de consistance A = 12 cm à i jour d'âge |
| $S_{2,i}$ | Béton de consistance A = 9 cm à i jour d'âge |
| $S_{1,i}$ | Béton de consistance A = 3 cm à i jour d'âge |
| S | Sable |
| t | Temps |
| T_{int} | Température intérieure |
| T_{ext} | Température extérieure |
| V_{abs} | Volume absolu |
| V | Volume |
| v | Vide sec |
| v_m | Vide mouillée |
| V_c | Volume du ciment |
| V_s | Volume du sable |
| V_p | Volume du Polystyrène |

LISTE DES SYMBOLES

| | |
|------------|--------------------------------|
| Al_2O_3 | Alumine |
| CaO | Chaux |
| C_3S | Alite |
| C_2S | Belite |
| C_3A | Aluminate |
| C_4AF | Ferrite |
| C_8H_8 | Polystyrène monomère |
| F_{CE} | Classe vraie du ciment |
| Fe_2O_3 | Oxyde de fer |
| G | Coefficient granulaire |
| I | Gradient hydraulique |
| K | Perméabilité |
| K_2O | Oxyde de potassium |
| Na_2O | Oxyde de sodium |
| NO_3 : | Nitrate |
| MgO | Oxyde de magnésium |
| P_2O_3 | Oxyde de phosphore |
| Q | Débit |
| S | Surface |
| SiO_2 | Silice |
| SO_3 | Sulfate |
| Δ_0 | Masse totale du béton frais |
| ΔH | Perte de charge |
| ρ_b | Masse volumique du béton durci |
| γ | Masse spécifique |
| λ | Conductivité thermique |
| ϕ | Flux thermique |
| Γ | Compacité |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : conductivité thermique du PSE..... | 16 |
| Tableau 2 : Comportement à l'eau du PSE en fonction de la masse volumique..... | 17 |
| Tableau 3 : Résistance chimique du PSE à divers milieux. | 17 |
| Tableau 4 : Classe d'étalement Vébé | 31 |
| Tableau 5 : Comportement du béton en fonction de son échauffement..... | 39 |
| Tableau 6 : Caractéristiques physiques du ciment CEM IV 42,5N..... | 40 |
| Tableau 7 : Composition chimique du ciment CEM IV 42,5N..... | 41 |
| Tableau 8 : Composition minéralogique du ciment CEM I 42,5 | 41 |
| Tableau 9 : Caractéristiques de l'eau du JIRAMA | 41 |
| Tableau 10 : Caractéristiques du PSE | 43 |
| Tableau 11 : Propriétés physiques du sable | 43 |
| Tableau 12 : Classification et appellations des granulats..... | 44 |
| Tableau 13 : Résultats de l'analyse granulométrique du Sable S | 45 |
| Tableau 14 : Résultats de l'analyse granulométrique du Polystyrène P | 45 |
| Tableau 15 : Valeur de E..... | 49 |
| Tableau 16 : Valeur corrigée de C et de E | 50 |
| Tableau 17 : Calcul des coordonnées de A | 51 |
| Tableau 18 : Compacité du béton..... | 53 |
| Tableau 19 : Valeur de avec correction..... | 53 |
| Tableau 20 : Dosage en granulats | 54 |
| Tableau 21 : Vérification des consistances | 60 |
| Tableau 22 : Caractéristiques de béton léger de PSE à l'état frais..... | 60 |
| Tableau 23 : Masse volumique du béton frais..... | 61 |
| Tableau 24 : Résultat de la porosité et de la perméabilité du béton S3..... | 62 |
| Tableau 25 : Résultat de la porosité et de la perméabilité du béton S2..... | 63 |
| Tableau 26 : Résultat de la porosité et de la perméabilité du béton S1..... | 63 |
| Tableau 27 : Masse volumique du béton durci en fonction du taux de polystyrène et de l'âge | 65 |
| Tableau 28 : Résistance à la compression en fonction du taux de polystyrène du béton S3 (A= 12 cm) | 67 |

| | |
|---|-----|
| Tableau 29 : Résistance à la compression en fonction du taux du polystyrène du béton S2 (A= 8 cm)..... | 70 |
| Tableau 30 : Résistance mécanique du béton S1 (A= 3cm)..... | 72 |
| Tableau 31 : Résistance à la traction du béton S3..... | 75 |
| Tableau 32 : Résistance à la traction du béton S2..... | 77 |
| Tableau 33 : Résistance à la traction du béton S1..... | 78 |
| Tableau 34 : Conductivité thermique λ du béton S3 à 28j (A= 12cm)..... | 80 |
| Tableau 35 : Conductivité thermique λ du béton S2 (A= 8cm)..... | 80 |
| Tableau 36 : Conductivité thermique λ du béton S2 (A= 3cm)..... | 81 |
| Figure 31 : Conductivité thermique du béton S3, S2,S1 en fonction de taux de polystyrène.. | 81 |
| Figure 32 : Conductivité thermique du béton S1, S2 et S3 en fonction de la masse volumique..... | 82 |
| Tableau 37 : Affaiblissement acoustique du béton léger de PSE..... | 83 |
| Figure 33 : Affaiblissement acoustique en fonction du taux de polystyrène..... | 84 |
| Figure 34 : Affaiblissement acoustique en fonction de la masse volumique..... | 84 |
| Figure 35 : Affaiblissement acoustique en fonction du fréquence de son..... | 85 |
| Tableau 38 : Propriété au feu du béton léger de PS..... | 86 |
| Tableau 39 : Exemple de détermination de prix d'un mètre cube de béton..... | 89 |
| Tableau 40 : Comparaison de la brique de béton de polystyrène avec le parpaing et le brique de terre cuite..... | 96 |
| Photo 3 : Pollution de l'environnement par les PSE..... | 98 |
| Tableau 41 : Production de PSE en 2012..... | 101 |
| Tableau 42 : Correction sur le dosage de pate en fonction de D_{max} | a |
| Tableau 43 : Valeur de K..... | a |
| Tableau 44 : Compacité Γ ou c_0 du béton en fonction de D_{max} , de la consistance et du serrage. b | b |
| Tableau 45 : Coefficient granulaire G en fonction de la qualité et la taille maximale des granulats D_{max} | c |
| Tableau 46 : Types de ciment et composition..... | c |
| Tableau 47 : Prix d'un mètre cube de béton ordinaire..... | d |
| Tableau 48 : Affaiblissements acoustiques de quelques bétons légers poue une épaisseur e = 20 cm..... | e |

LISTE DES PHOTOS

| | |
|---|----|
| Photo 1 : L'essai d'étalement à table secousse | 30 |
| Photo 2 : Sonomètre | 37 |
| Photo 3 : Chape légère en béton léger de PSE | 93 |
| Photo 4 : Rénovation plancher | 93 |
| Photo 5 : Ravoirage | 94 |
| Photo 6 : Mur multicouche..... | 96 |
| Photo 7 : Pollution de l'environnement par les PSE..... | 98 |

Rapport-Gratuit.Com

LISTES DES FIGURES

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Schéma représentatif d'un béton de granulats légers | 10 |
| Figure 2 : Présentation schématique d'un béton cellulaire | 11 |
| Figure 3: Schéma représentatif d'un béton caverneux | 11 |
| Figure 4 : Porosité | 24 |
| Figure 5 : Perméabilimètre | 25 |
| Figure 6 : Essai au cône d'Abrams..... | 30 |
| Figure 7 : Essai Vébé | 31 |
| Figure 8 : Appareil de mesure de la résistance à la compression..... | 33 |
| Figure 9 : Appareil de mesure de la résistance à la traction..... | 33 |
| Figure 10 : Schéma de l'éprouvette..... | 35 |
| Figure 11 : Sollicitation par une résistance thermique | 35 |
| Figure 12 : Sollicitation par une masse d'eau | 35 |
| Figure 13 : Propagation des sons..... | 37 |
| Figure 14 : Courbe granulométrique du Sable S et du Polystyrène P | 46 |
| Figure 15 : Valeur du dosage en ciment pour chaque affaissement..... | 49 |
| Figure 16 : Détermination graphique des pourcentages en volume absolu des granulats..... | 52 |
| Figure 17 : Masse volumique $S\Delta_0$) à l'état frais du béton | 61 |
| Figure 18 : Courbe de la perméabilité en fonction du taux polystyrène | 64 |
| Figure 19 : Évolution de la masse volumique du béton durci en fonction du taux de polystyrène et de l'âge | 66 |
| Figure 20 : Résistance à la compression en fonction de du taux de polystyrène du béton S3 . | 68 |
| Figure 21 : Résistance à la compression en fonction de l'âge du béton S3 et du taux de polystyrène | 69 |
| Figure 22 : Résistance à la compression en fonction du taux de polystyrène | 71 |
| Figure 23 : Résistance à la compression en fonction de l'âge du béton S2 et du taux de polystyrène | 71 |
| Figure 24 : Résistance à la compression du béton S1 en fonction de l'âge et du taux de polystyrène | 73 |
| Figure 25 : Résistance à la compression en fonction de l'âge et du taux de polystyrène | 74 |
| Figure 26 : Résistance à la traction du béton S3 en fonction du taux de polystyrène..... | 76 |
| Figure 27 : Résistance à la traction du béton S2 en fonction du taux de polystyrène..... | 78 |

| | |
|---|----|
| Figure 28 : Résistance à la traction du béton S1 en fonction du taux de polystyrène..... | 79 |
| Figure 29 : Conductivité thermique du béton S3, S2,S1 en fonction de taux de polystyrène.. | 81 |
| Figure 30 : Conductivité thermique du béton S1, S2 et S3 en fonction de la masse volumique | 82 |
| Figure 31 : Affaiblissement acoustique en fonction du taux de polystyrène | 84 |
| Figure 32 : Affaiblissement acoustique en fonction de la masse volumique | 84 |
| Figure 33 : Affaiblissement acoustique en fonction du fréquence de son | 85 |
| Figure 34 : Dalle avec table de compression..... | 94 |
| Figure 35 : Mur de remplissage..... | 95 |

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION

L'homme maîtrisait déjà extraordinairement l'art de construire en béton. De nombreux ouvrages, tels que le pont, bâtiments,... en témoignent encore aujourd'hui et sont révélateurs des connaissances de cette époque.

Toutefois, ce n'est qu'au siècle passé, avec l'invention de structure en béton, que l'utilisation des granulats a pris un essor formidable dans la construction. L'invention de la structure en bétons légers a encore accru son domaine d'utilisation dès le milieu du XIXe siècle.

Ce dernier procédé a permis la réalisation des structures légères et moins coûteuses.

Malheureusement, la structure légère est, dans son calcul des sollicitations aussi bien que dans ses différents modes de composition, non seulement différent de structure en béton, mais aussi plus complexe. De plus, le technicien qui a appris la technique des bétons un peu comme sa « langue maternelle » éprouvera sans doute des difficultés pour atteindre la même perfection dans le domaine de l'utilisation des bétons légers.

Toutes ces difficultés ne pourront être vaincues que par une étude approfondie de la matière.

La tendance actuelle dans la construction individuelle, est donc de favoriser des produits légers capables de remplir plusieurs usages mais pas seulement de chercher la performance mécanique. Il tente également d'améliorer les qualités thermiques, acoustiques des matériaux conservant des niveaux de performances suffisants et aussi de minimiser le coût de la construction par l'utilisation de technique et des matériaux appropriés.

Pour atteindre toutes ces objectifs, et aussi de valoriser les polystyrènes afin de préserver notre environnement, nous avons décidé de travailler pour notre mémoire de fin d'étude, sur le thème « CONTRIBUTION A LA VALORISATION DE POLYSTYRENE EXPANSE-APPLICATIONS A LA FABRICATION DE BETONS LEGERS».

Ce travail est essentiellement structuré en trois parties :

-
- La première partie concerne l'étude bibliographique sur les généralités sur les bétons et les polystyrènes.
 - La deuxième partie expose l'étude expérimentale des nouveaux bétons légers conçus, l'analyse des résultats obtenus, l'aspect environnemental et économique.

PARTIE I: ETUDES
BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE I- GENERALITES SUR LES BETONS

I-1- Définitions

Le béton est un matériau de construction obtenu par la composition des granulats, du sable, du liant durcissant avec l'eau par cristallisation physico-chimique et éventuellement d'adjuvants (*Béton, BoutibaAdjia*).

De tous les matériaux fabriqués par l'homme, le béton est celui qui est le plus couramment utilisé en Génie Civil. La grande popularité du béton s'explique d'abord par le fait qu'il est assez économique à produire.

I-2- Types du béton

Les bétons se distinguent comme-suit :

- Les bétons courants : de densité de l'ordre de 2,2 à 2,5 comme le béton de sable, le béton de mignonnette, le béton de gravier ou gravillon, le béton de caillou, le béton cyclopéen (de moellon ou galet).
- Les bétons légers : de densité inférieure à 2, ils sont confectionnés avec l'utilisation de granulats légers entre autre le liège, le bois, la pouzzolane, le schiste expansé.

On peut aussi confectionner les bétons légers en créant des vides au sein même du béton, on obtient alors les bétons caverneux

- Les bétons lourds : de forte densité en général supérieure à 3, fabriqués avec l'utilisation de granulats lourds.
- Les bétons réfractaires : utilisation de granulats et ciment réfractaire.
- Les bétons de fibre : utilisation des tuiles fibrociments et les ferrociments par exemple.

I-3- Les composants du Béton

Un béton est constitué de granulats (gravillons + sable), de ciment, d'eau et éventuellement d'adjuvant (<http://www.editions-vm.com>). Le mélange ciment/eau forme une pâte ou colle qui durcit. La pâte de ciment et le sable constituent le mortier. Celui-ci se lie avec les gravillons pour former un conglomérat solide.

Les adjuvants et les additions servent à améliorer certaines caractéristiques du béton frais ou durci.

I-3-1 Le ciment

a- Généralités sur le ciment

Le ciment est un liant hydraulique (*CIMBETON 2000, Guide de prescriptions de ciment*) sous forme des poudres fines obtenues par la cuisson à haute température (vers 1450 °C) et le broyage d'un mélange minéral (calcaire + argile en général).

Ces poudres constituées de sels minéraux anhydres instables (en particulier silicates et aluminates de chaux) forment avec l'eau une pâte capable par « hydratation » de faire prise et de durcir progressivement (plus ou moins rapidement d'ailleurs) d'où le nom de liants hydrauliques par opposition avec « liants aériens » (à base de chaux grasse et maigre) qui ne peuvent durcir qu'au contact de l'air.

b- Types du ciment

Le ciment les plus usuels font l'objet de la norme NF P 15-301 concernant les liants hydrauliques : CEMENTS COURANTS (*Ouvrages en béton armé, H.Renaud*).

Ils sont subdivisés en cinq types selon la nature et la proportion des constituants (Annexes, tableau 45).

- Ciment Portland (noté CEM I);
- Ciment Portland composé (noté CEM II) ;
- Ciments de hauts fourneaux (noté CEM III) ;
- Ciments pouzzolaniques (noté CEM IV) ;
- Ciments au laitier et aux cendres ou ciment composé (noté CEM V).

La résistance de compression minimale à 28 jours des ciments permet de les répartir en trois classes: classe 32,5, classe 42,5, classe 52,5.

Mais suivant la performance au jeune âge, on distingue dans chaque classe la sous classe N (Normale) et la sous classe R (Rapide) pour laquelle la résistance au jeune âge est élevée.

Le ciment qui réagit chimiquement avec l'eau, se durcit et lie tous les ingrédients du béton.

c- Fabrication du ciment

Les matériaux naturels de carrière (calcaire, marne, argile...) doivent d'abord être concassés puis broyés pour obtenir un mélange intime, homogène et bien dosé (environ 75% de calcaire pour 25% d'argile).

Ce broyage peut se faire à sec (procédé sec) ou en présence d'eau (procédé humide). Le mélange homogène ainsi réalisé, passe dans un four rotatif où se produit vers 1450°C en général, la « clinkérisation », terme habituellement utilisé pour caractériser l'évolution à haute température d'un système renfermant simultanément des phases solides et liquides (en fusion) ; c'est alors qu'ont lieu des réactions entre la chaux CaO et les oxydes acides SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃ et que se forment les silicates, aluminates et aluminoferrites de calcium.

La cuisson terminée, le clinker qui se présente sous forme de granules plus ou moins arrondis de 0,5 à 3cm de diamètre environ est refroidi rapidement pour éviter des transformations cristallines nuisibles.

Le clinker, additionné d'un peu de gypse (3 à 5%) avec éventuellement certains produits d'addition tels que laitier, cendres volantes, pouzzolanes ou d'autres produits, est ensuite réduit en poudre fine dans un broyeur à boulets. La finesse de mouture est variable suivant les qualités recherchées ; elle peut varier de 2700 à 4500 cm²/g en Surface Spécifique Blaine ; sa valeur moyenne normale est de l'ordre de 3200 cm²/g

Le ciment issu du broyage est conservé en silo un certain temps, puis conditionné pour l'expédition en sacs, en containers ou en vrac (wagon, camion, péniche).

I-3-2 Eau

L'eau de ville convient forcément. Si l'eau de gâchage provient d'autres sources, il y a lieu de procéder à une analyse chimique. En effet, ni la couleur ni l'odeur, ni le goût ne peuvent attester de sa convenance (*RAKOTOMANANA Dina, M2, 2011*).

Lors du dosage de l'eau de gâchage, la totalité de l'eau intervenant dans le mélange doit être considérée, y compris celle introduite par les granulats, surtout les sables humides.

A consistance (ouvrabilité) égale, la quantité d'eau de gâchage peut être réduite de:

- 5 à 15 %, par l'utilisation d'un plastifiant/réducteur d'eau;
- 20 à 30 %, par l'utilisation d'un superplastifiant/hautement réducteur d'eau.

Les superplastifiants/hautement réducteurs d'eau augmentent l'ouvrabilité (la fluidité) du béton dans un laps de temps court et pendant une durée de temps déterminée. Il faut bien tenir compte de ces données lors de la conception du coffrage qui risque d'être sollicité par des forces latérales élevées.

Tout comme les autres composants du mélange, l'eau doit être propre.

Le dosage doit faire preuve d'une attention particulière : trop d'eau dans le béton entraîne la naissance de fissures et une perte de résistance au moment du séchage.

I-3-3 Sable

On utilise généralement du sable de rivière ou de carrière débarrassé des impuretés, jamais de sable marin ou de sable de remblai (*Melle Lechgueur, Science des matériaux de construction*).

Ces derniers contiennent des éléments néfastes pour la qualité du béton et du mortier.

Les dosages sont donnés la plupart du temps en volume de sable sec.

I-3-4 Gravier

Le gravier est composé de particules rocheuses lisses quand elles sont issues d'une rivière (c'est le gravier le plus recherché) ou concassées quand elles proviennent d'une carrière.

Il faut impérativement que le gravier soit débarrassé de la boue et des saletés qu'il pourrait contenir avant de fabriquer le béton.

Il existe différents calibres de gravier. Les plus gros calibres sont utilisés en général pour les fondations et le gros œuvre.

La résistance du béton sera d'autant plus grande que vous mélangerez différents calibres de graviers.

I-3-5 Adjuvants

Les adjuvants (additifs) sont incorporés au béton en faible quantité (moins de 10 kg/m³).

Les superplastifiants ou fluidifiants ont des propriétés similaires à celles de réducteurs d'eau, mais avec une efficacité beaucoup plus importante. Ils permettent des fluidités extrêmes, utiles pour produire des bétons autoplaçants, ou autonivelants. (Chape liquide...)

D'autres adjuvants permettent de modifier la prise et le durcissement comme les accélérateurs de prise qui permettent de décoffrer rapidement, ou au contraire des retardateurs, utilisés pour maintenir l'ouvrabilité du béton

Les hydrofuges de masse rendent les bétons imperméables aux liquides, les entraîneurs d'air vont quant à eux les rendre insensibles au gel et aux produits dégivrants.

L'association ciment-eau génère des réactions extrêmement complexes, silicates et aluminates se développent pendant la phase d'hydratation, ils forment alors un gel cristallin qui marque le début du phénomène de "prise".

Au cours de la phase de durcissement, qui peut durer plusieurs mois, la multiplication des micro-cristaux augmentent les résistances mécaniques : le béton se transforme alors en une véritable roche composite.

CHAPITRE II- GENERALITES SUR LES BETONS LEGERS

II-1- Définitions

Béton Leger :

C'est un béton dont la masse volumique après séchage est inférieure à 2 000 kg/m³ (béton de granulats légers, béton cellulaire, béton caverneux, etc.).

Par rapport à un béton de poids normal, il possède généralement une résistance mécanique moindre et une plus grande déformabilité mais une meilleure résistance thermique. Il est utilisé en remplissage, pour des éléments porteurs et isolants, en réhabilitation, etc...

II-2- Types de Béton légers

Il y a trois types de béton légers (<http://www.gramme.be>):

- Béton à base de granulats légers ;
- Béton cellulaire ;
- Béton caverneux.

II-2-1 Béton à base de granulats légers

Les bétons de granulats légers sont généralement classés suivant l'origine du granulats utilisé, ainsi on distingue 04 types (*TAMBA Seni, Bétons légers*) :

- **Les granulats légers naturels** : la ponce ou la pouzzolane, matériaux volcaniques naturels de structures très poreuse.
- **Les granulats légers ayant subi un traitement thermique** : granulats d'argile, de schiste, d'ardoise ou de perlite expansée.
- **Les granulats légers de matériaux artificiels** : le mâchefer, sous-produit de la combustion de charbon ou des ordures ménagères.
- **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 expansé.

Béton dont la masse spécifique des granulats est inférieure à celle des granulats couramment utilisés (soit entre 0,4 et 1,2 kg/m³). Parmi les plus utilisés : polystyrène, mousse, bois, vermiculite, ...

Il est particulièrement utilisé à des fins d'isolation ou d'allègement des structures lors de rénovations.

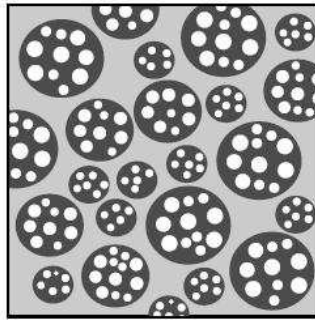


Figure 1 : Schéma représentatif d'un béton de granulats légers

II-2-2 Béton cellulaire :

C'est un béton dans lequel on ajoute, lors de sa fabrication, un produit d'expansion comme **silicate de calcium** hydraté qui crée un dégagement gazeux générant des cellules dans ce béton.

Les caractéristiques techniques d'un tel béton dépendent de la quantité d'agent d'expansion.

Ils sont utilisés en :

- blocs pour murs ;
- carreaux pour cloisons ;
- béton pour toiture de faible pente ;
- béton de remplissage,...

Le béton ainsi obtenu possède une masse volumique variant entre 450 et 600 Kg/m³. La résistance en compression se situe entre 3 et 6 MPa. C'est un type de béton qui résiste aux flammes.



Figure 2 : Présentation schématique d'un béton cellulaire

II-2-3 Bétons caverneux

On appelle béton caverneux tout béton à base de granulats normaux ou légers dans lequel on a supprimé, en totalité ou en partie, le sable et une partie du liant qui aurait été nécessaire à l'enrobage de ce sable ([www.pointp.fr/béton léger argile schiste](http://www.pointp.fr/béton_léger_argile_schiste)).

Un béton caverneux est constitué du ciment, de gros granulats et de l'eau. Il existe donc des gros vides au sein du béton. C'est la pâte du ciment qui assure l'assemblage des granulats.

La résistance à la compression du béton caverneux est comprise entre 1,5 et 14 MPa. Quant à la résistance en flexion, elle est pratiquement égale à 30% de celle en compression.

On emploie principalement les bétons caverneux dans la confection des murs porteurs des bâtiments domestiques et dans les panneaux de remplissage des cadres de structure. Cependant, leur forte absorption d'eau les rend inutilisables dans les fondations.

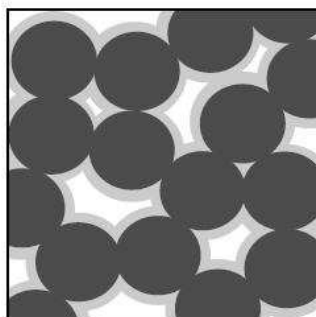


Figure 3: Schéma représentatif d'un béton caverneux

II-3- Avantages du Béton léger

Le béton léger, par sa légèreté, réduit le poids mort des bâtiments. Les pièces de bétons légers sont donc plus légères, ce qui réduit considérablement la dimension, donc le poids, des fondations (*www.gramme.be*). De plus, on note une augmentation de la productivité sur le chantier en raison du faible poids du matériau. Étant donné le plus faible volume de béton utilisé, il est aussi possible d'économiser sur les quantités de ciment par rapport au béton ordinaire.

On note les excellentes qualités de finition d'une pièce en béton léger, en raison, surtout de sa fabrication en usine. Les pièces de béton léger sont aussi plus faciles à manipuler et à déplacer, en raison de leur relative légèreté.

Le béton léger cellulaire, par la présence d'un réseau de bulles d'air dans sa formulation, a des propriétés d'isolation thermique et acoustique. Comme dans le cas des autres bétons légers, la conductivité thermique varie en fonction de la masse volumique. Il faut rappeler que la conductivité thermique augmente de façon linéaire avec la teneur en humidité.

II-3-1 Les inconvénients majeurs des bétons légers par rapport au béton ordinaire

Le béton léger a des résistances mécaniques inférieures à celles d'un béton ordinaire. Le module élastique est aussi plus faible, donc la résistance à la déformation, la flèche et le point de rupture du matériau sont plus faibles. Il est à noter que pour l'utilisation d'un béton à granulats légers (granulats légers avec traitement spéciaux) le prix des granulats est plus élevé, donc le prix par mètre cube de béton léger est plus élevé que celui des bétons ordinaires. Le béton léger est un matériau fragile.

CHAPITRE III- GENERALITES SUR LES POLYSTYRENES

III-1- Historiques sur les Polystyrènes

La découverte du polystyrène remonte à 1839, mais son exploitation industrielle date de 1933, en Allemagne et aux USA. Le premier procédé utilisé (suspension aqueuse) fonctionnait en discontinu (*fr.wikipedia.org/wiki/Polystyrène*).

Dès les années 1940, apparaissent des procédés de polymérisation dite « en masse » continu et en discontinu. Le procédé « masse en continu » triomphe dans les années 1960, grâce aux progrès technologiques permettant d'évacuer la chaleur produite par la polymérisation (~ 710 kJ/kg).

Le polystyrène expansé a été inventé en 1944 par Ray Mc Intire (1919-1996) alors qu'il travaillait pour la Dow Chemical. Découvert par hasard, ce polystyrène fut commercialisé sous le nom de « Styrofoam ». Matériau rigide, de faible densité, il a d'abord été utilisé comme isolant thermique dans le bâtiment.

III-2- Définition

Le polystyrène de formule chimique $(\text{CH}_2=\text{CH}-\Phi)_n$ est le polymère obtenu par polymérisation des monomères de styrène qui est un polymère aromatique. C'est un matériau alvéolaire rigide, peu dense, solide à 20°C et pâteux à 120°C, qui fond entre 150°C et 170°C, dont les principales utilisations sont l'isolation thermique des bâtiments et l'emballage des produits industriels ou alimentaires. Il est inflammable et combustible, avec une température d'auto-inflammation d'environ 490°C (*MILED Karim, Effet de taille dans le béton léger de polystyrène expansé*). Il est également soluble dans les hydrocarbures chlorés et aromatiques.

III-3- Fabrication

Le polystyrène expansé (PSE) est obtenu par mélange d'un gaz ou un agent d'expansion (le pentane : C_5H_{12}), et de PS cristal. Avant les préoccupations pour la couche d'ozone, on utilisait le fréon, un gaz CFC (chlorofluorocarboné), remplacé depuis les années 1990 par du butane ou du pentane. Des transformateurs introduisent les perles de PS cristal dans des pré-expanseurs. Sous l'action de la température et de la pression de vapeur d'eau, le

gaz d'expansion les fait gonfler jusqu'à 50 fois leur volume initial. Les perles sont composées de monomère styrène. Les perles, expansées et stabilisées, sont ensuite introduites dans des moules en forme de blocs pour une découpe ultérieure en panneaux ou directement à la forme de la pièce finie. Là, à nouveau sous l'effet de la température et de la pression de vapeur d'eau, les perles expansées s'agglomèrent en une pièce moulée (www.ecopse.fr).

Polymérisation

Le procédé de polymérisation en suspension dans l'eau est employé pour la polymérisation du PSE. Le styrène monomère (C_8H_8) est dispersé en fines gouttelettes dans l'eau.

Les initiateurs radicalaires de polymérisation sont essentiellement des peroxydes organiques (peroxyde de benzoyle) qui doivent être solubles dans le styrène monomère et insolubles dans l'eau. La taille des gouttelettes peut être ajustée par de nombreux paramètres comme l'addition d'un agent protecteur qui permet de stabiliser la suspension, comme les conditions de mélange, la forme du réacteur, etc. On peut éventuellement incorporer un système ignifugeant.

La réaction s'opère selon un procédé discontinu dans un réacteur muni d'un agitateur et équipé d'une double enveloppe permettant par chauffage ou par refroidissement, de réguler la température interne du réacteur.

III-4- Types de Polystyrènes

Il existe trois types de polystyrènes :

- le polystyrène "cristal", ainsi appelé en raison de son aspect transparent ;
- le polystyrène "choc" caractérisé par l'ajout de plastifiants ou de Caoutchouc (butadiène) ;
- le polystyrène expansé ou PSE.

Il existe deux types de polystyrène expansé :

- le polystyrène expansé moulé (PSE-M) ;
- le polystyrène expansé extrudé (PSE-E) ou XPS (Extruded polystyrene foam).

III-5- Caractéristiques des polystyrènes expansés

Les propriétés les plus remarquables du polystyrène expansé (Jean-Pierre MAGNAN, Propriétés mécaniques du PSE) sont :

- sa faible masse volumique ;
- son pouvoir isolant thermique ;
- ses excellentes propriétés mécaniques (résistance en compression, capacité d'amortissement des chocs) ;
- son insensibilité à l'eau ;
- sa facilité de mise en forme (moulage, découpage) ;
- sa recyclabilité.

III-5-1 Propriétés physiques

Les polystyrènes se présentent généralement en granulés transparents (<http://www.ecopse.fr>).

Ils sont très rigides mais peu résistant au choc.

A la température ambiante, le polystyrène est normalement un thermoplastique, mais peut-être fondu à température élevée.

La température d'ébullition (ou température de ramollissement) est de 80 à 170°C.

Un matériau léger : Il est composé de 98% d'air

La fraction volumique de solide dans la matière expansée dépend de la masse volumique apparente. A 30 kg/m³, elle est proche de 3 %, à 20 kg/m³ de 2 % et à 10 kg/m³ de 1 %. D'où la valeur généralement retenue : le PSE est composé à 98 % d'air (en volume, à 20 kg/m³)

La masse volumique apparente du PSE moulé se situe généralement, suivant les applications, entre 8 et 30 kg/m³ (des masses volumiques plus élevées sont parfois utilisées pour quelques applications spécifiques).

III-5-2 Propriétés chimiques

Les polystyrènes sont solubles dans des solvants tels que hydrocarbures chlorés et aromatiques, dans les cétones, esters mais pas soluble dans l'alcool (www.cobil.fr/styrobéton).

Leur degré de polymérisation n est de l'ordre de 800 000.

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.

Les polystyrènes sont généralement inflammables et combustibles, la dégradation commençant dès 350°C et l'autoinflammation vers 450°C.

III-5-3 Propriété thermique

L'air piégé dans les billes de PSE offre une protection thermique dite isotherme pour toutes ses utilisations. Ils sont ainsi protégés contre toute variation brutale de température car l'air n'est pas conducteur d'où sa caractéristique isolante.

C'est un matériau très bon isolant thermique, dont sa conductivité thermique λ varie de 0.038W/(m.K) à 0.030W/ (m.K),

La conductivité thermique λ est fonction de la masse volumique apparente et de la température.

Tableau 1 : conductivité thermique du PSE

| Masse volumique ρ (kg/m ³) | Conductivité thermique λ (W.m-1.K-1) |
|---|--|
| 10 | 2,00 x 10 ⁻⁴ |
| 15 | 1,40 x 10 ⁻⁴ |
| 20 | 1,15 x 10 ⁻⁴ |
| 25 | 1,05 x 10 ⁻⁴ |
| 30 | 1,00 x 10 ⁻⁴ |

III-5-4 Autres propriétés

a- Comportement à l'eau :

Le comportement à l'eau du PSE, est mesuré sur des éprouvettes de 25 mm d'épaisseur, à 38°C, pour des humidités relatives de 88,5 % et 0 % (imposées à l'une et l'autre face des éprouvettes), dépend de la masse volumique :

Tableau 2 : Comportement à l'eau du PSE en fonction de la masse volumique

| Pression P (mg.m-1.h-1.torr-1) | Masse volumique ρ (kg/m ³) |
|--------------------------------|---|
| 3.0 | 15 |
| 2.5 | 20 |
| 1.5 | 30 |

On rappelle que 1 torr = 1 mm Hg \approx 133 Pa.

L'absorption d'eau par immersion pendant 28 jours à 22°C \pm 2°C est limitée à 3,0 % maximum en volume pour le PSE.

b- Résistance chimique

La résistance chimique du PSE face à des agents de divers milieux seront détaillés comme-suit :

Tableau 3 : Résistance chimique du PSE à divers milieux.

| AGENTS | STABLE | STABILITE LIMITEE (1) | INSTABLE(2) |
|--|----------------------------|-----------------------|-------------|
| Ciment, chaux, plâtre | × | | |
| Bitume, mastics, bitumineux en émulsion aqueuse | × | | |
| Mastics bitumineux avec solvants, goudrons | | | × |
| Eau de mer, solutions salines | × | | |
| Gazole, huile de table, paraffine, vaseline | | × | |
| Carburants | | | × |
| Acétone, éther, benzène, styrène, xylène, trichloréthylène | | | × |
| Cyclohexane, white spirit, térébenthine | | | × |
| Silicones, savons, agents mouillants | × | | |
| Alcools, soude, potasse, ammoniacale | × | | |
| Engrais, salpêtre, terreau, purin | × | | |
| Acides dilués ou acides faibles | × | | |
| Attaque superficielle | (2) Attaque ou dissolution | | |

c- Propriétés biologiques et stabilité dans le temps

Le polystyrène expansé est biologiquement stable et imputrescible : il ne constitue en aucun cas un milieu nutritif pour les micro-organismes. Il peut, s'il est fortement sali, présenter des moisissures mais, dans ce cas, il sert uniquement de support inerte et ne participe pas au processus biologique.

En cas d'exposition prolongée au rayonnement ultraviolet, la surface de la mousse jaunit et se fragilise.

En dehors de cela, le PSE résiste très bien au vieillissement.

d- Comportement au feu

Le pouvoir calorifique du PSE est de 40 MJ/kg.

Classement au feu (cf. réglementation française bâtiment).

En cas d'incendie, tous les moyens classiques de lutte peuvent être utilisés. L'eau est habituellement efficace.

III-5-5 Utilisations du PSE:

L'application la plus connue du grand public est le polystyrène expansé (appelé « frigolite » en Belgique, « Sagex » en Suisse et « Styromousse » au Canada), mousse blanche compacte qui sert à emballer les appareils sensibles aux chocs.

Les propriétés de ces plastiques industriels sont utilisées dans de nombreux domaines :

- Résistance aux chocs :
 - Articles de décoration ou matériel de bureau en PS cristal injecté : double-décimètres, équerres et rapporteurs d'écolier.
 - Logistique - Calages en PSE : transport de produits fragiles (électroménager, lave-linge, ordinateur, sèche-linge, réfrigérateur, four, etc.)
 - Maquettisme (maquette) : pièces moulées de PSE à peindre, carte plastique en PS choc. Le côté cassant de ce type de polystyrène est souvent très atténué pour permettre un maximum de manipulation.

- Isolation thermique :
 - Bâtiment/constructions - Panneaux et blocs en PSE : cloisons isolantes - plancher (isolation sous dalle, isolation sous chape, entrevous) - toitures - coffrages (ils permettent d'ériger des murs en béton armé isolés en une seule opération).
 - Froid - Parois en PSE : camions frigorifiques, glaciers chambres frigorifiques.
- Résistance à la compression :
 - Emballage en PSE : barquettes alimentaires de produits frais, caisses marées et cales.
 - Travaux publics et génie civil - Blocs en PSE : remblayage de routes et autoroutes - Talus - Murs antibruit - Culées de ponts - Protection de conduits enterrés - Pontons.
- Imperméabilité / Nettoyabilité :
 - Alimentaire - Emballage (pots de yaourt, crème fraîche, etc.) et vaisselle à usage unique (gobelets, couverts) en PS choc blanc thermoformé - Vaisselle à usage unique en PS cristal injecté (gobelets, verrines, etc.).
 - Hématologie- Matériel en PS cristal (plaque de laboratoire, flacon)
- Densité - Très faible absorption d'eau :
 - Ouvrages flottants sur blocs en PSE : pontons - jardins - maisons (Pays-Bas)
 - Nautisme- Flotteurs en PSE (balises, ligne d'eau), planches de funboard.
 - Logistique - Réduire le poids des emballages (feuille allégée en XPS)
 - De 16 à 1 060 kg·m⁻³, écart dû à l'addition de divers matériaux comme le béton armé

- Propriété électrostatique :
 - Médecine- traitement des hyperkaliémies par résine échangeuse de cations en polystyrène de sodium ou Kayexalate.

- Utilisations militaires :
 - Le polystyrène est un des composants du napalm moderne (« napalm-B »), où il sert de gélifiant.
 - Il entre également dans la constitution de la bombe à hydrogène : il maintient en suspension les éléments de la bombe avant son utilisation, et se transforme en plasma au moment de la mise à feu.

PARTIE II: ETUDES EXPERIMENTALES

CHAPITRE IV- METHODOLOGIE DES DIFFERENTS ESSAIS DE CARACTERISATIONS

IV-1- Masse volumique

IV-1-1 Masse volumique apparente ρ

La masse volumique apparente (kg/m^3), est souvent appelée improprement densité apparente.

a- But :

Le but c'est de mesurer la masse du matériau contenue dans un **volume** donné, comprenant le volume d'air interstitiel.

b- Méthode :

Sa détermination consiste à :

- remplir un volume connu V , avec le matériau,
- peser le tout.

Elle est exprimée par la formule suivante :

$$\rho = \frac{\text{Masse}}{\text{Volume}}$$

IV-1-2 Masse volumique absolue γ

a- But

C'est de mesurer le poids d'une quantité de matériau tel que le volume réellement occupé par la matière solide (volume absolu V_{abs}) est égal à l'unité.

b- Méthode

Pour les matériaux finement broyés, sa détermination préconise l'utilisation d'un pycnomètre.

Pour les matériaux de granularité grossière, le volume absolu des grains solides est évalué par la méthode simple suivante :

- Prendre un volume d'eau V suffisant ;
- Verser dans ce volume une masse m de matériau sec ;

- Noter le volume de l'ensemble V' ;
- $V_{\text{abs}} = V' - V$

$$\gamma = m / V_{\text{abs}}$$

IV-1-3 Masse volumique humide ρ_{hum}

Cette grandeur concerne le béton frais qui vient d'être coulé. Sa détermination se fait par pesage de l'ensemble moule-taré rempli de béton frais. Soit m_f la masse du béton frais coulé et V son volume :

$$\rho_{\text{hum}} = m_f / V$$

IV-2- Vides

IV-2-1 Vide sec v

a- But

C'est de déterminer l'espace libre entre les grains du granulat à l'état sec.

b- Méthode

Déduire sa valeur de celles des masses volumiques apparente et absolue.

Pour un volume unité :

$$v = 1 - (\rho / \gamma)$$

IV-2-2 vide mouillé v_m

a- But

Détermination des vides entre les grains du granulat à l'état humide.

b- Méthode

La détermination de l'eau de mouillage se fait de la manière suivante :

- mouiller un volume V mL de granulat dans un volume V_1 mL d'eau ;
- laisser égoutter ;
- mesurer le volume d'eau recueilli V^2 mL ;
- rapporter au volume unité l'eau de mouillage e (1 L = 1000 mL) :

$$e = (V_1 - V_2) V / 1000$$

Pour un volume unité :

$$v_m = v - e$$

IV-2-1 Porosité p

a- But :

On a pour objectif de déterminer les pourcentages des vides.

En général la porosité est le rapport du volume des vides au volume du matériau :

$$p = \frac{\text{Volume des vides}}{\text{Volume total}} \times 100$$

b- Méthode :

L'essai consiste à saturer en eau la porosité ouverte des grains constituant le matériau granulaire. L'immersion du matériau dans une solution aqueuse, permet sa saturation.

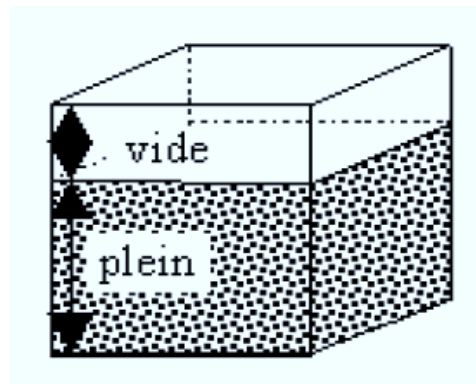


Figure 4 : Porosité

IV-2-2 Perméabilité k

Elle est proportionnelle à la porosité.

a- But :

C'est de déterminer la capacité du matériau à faire passer l'eau.

b- Méthode :

Verser une quantité d'eau mesurée soit V_0 sur un échantillon de matériau pendant un temps déterminé (24h minimum), puis mesurer l'eau retenue après, soit V_1 .

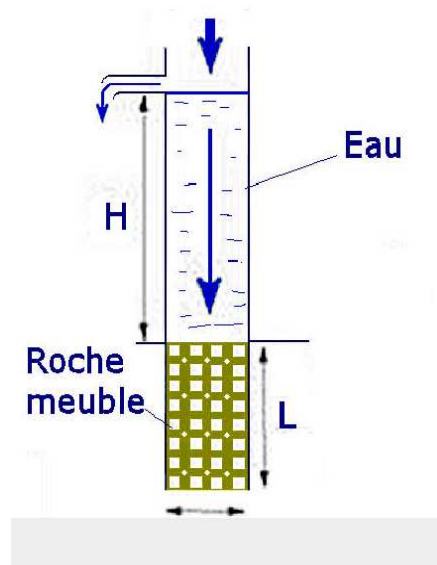


Figure 5 : Perméabilimètre

Lorsque le milieu est saturé en eau, on a :

Débit d'entrée Q_e = débit sortie Q_s = Q

L'équation de Darcy s'écrit :

$$Q = k.S.\Delta H/L$$

Donc le débit Q ($m^3.s^{-1}$) est proportionnel à S et ΔH et inversement proportionnel à L .

k correspond au coefficient de perméabilité de Darcy = perméabilité ($m.s^{-1}$)

S = surface (m^2)

ΔH = perte de charge (m)

La perméabilité (K), correspond à la conductivité hydraulique, ce paramètre hydraulique est le volume d'eau qui percole pendant l'unité de temps à travers l'unité de surface d'une section et ceci à la température de 20°C.

$$K \text{ (m/s)} = Q / S \times I$$

Q = débit (m^3/s), S = surface (m^2) et I le gradient hydraulique

Le gradient hydraulique $I = \Delta H / L$

De façon simple, on peut calculer $k = L \times V / (L + H) \times V$

ΔH = perte de charge (m)

$$I = \Delta H / L$$

Loi de Darcy $Q = k.S.\Delta H/L$

IV-3- Granulométrie

IV-3-1 Définition

La granulométrie est la détermination pourcentage des dimensions des grains.

La granularité est la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

Le tamisât est la quantité de l'échantillon du matériau passant à travers un tamis donné. Le refus est la quantité du matériau retenue par ce même tamis.

IV-3-2 But

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la granularité et les différentes proportions des particules solides de différentes tailles dans un échantillon de matériau.

IV-3-3 Méthode

La granulométrie par tamisage consiste à faire passer à travers une série de tamis à mailles carrées l'échantillon pour les grains de diamètre supérieur à 80 μ m.

a- Préparation de l'essai :

On a besoin d'une masse nécessaire M ou prise pour effectuer l'essai tel que : $300D \leq M \leq 500D$.

Avec D : le diamètre de plus gros grains dans l'échantillon.

Cette prise se fait par quartage afin d'obtenir deux prises M_1 et M_2 pour deux essais pour un même échantillon.

b- Exécution de l'essai

- Imbiber l'échantillon pendant 24h puis tamiser en lavant avec le tamis 80 μ m afin d'éliminer les éléments fins ou les fines (lavage jusqu'à ce que les grains devient plus purifiés) ;
- Passer dans l'étuve pour sécher les grains ;
- Faire passer les grains séchés dans une série de tamis en pesant le refus de chaque tamis ;
- En déduire la tamisât cumulé pour chaque tamis ;
- Tracer la courbe granulométrique des granulats.

IV-3-4 Expression de résultats

Le calcul de pourcentage des tamisât pour chaque tamis est nécessaire pour tracer la courbe, et se fait comme suit :

$$M_{pi} (\%) = \frac{M_{S1} - \sum_1^k M_i}{M_{S1}} \times 100$$

Avec M_{S1} : la masse de l'échantillon sec après lavage

M_{pi} : la masse de tamisât au tamis i

M_i : la masse du refus au tamis i

IV-4- Module de finesse M_F

IV-4-1 But

C'est une grandeur qui permet d'évaluer l'importance d'éléments fins et/ou grossiers dans un granulat : plus le module de finesse est petit, plus le granulat contient des éléments fins (et inversement).

IV-4-2 Méthode

Le module de finesse est déduit de l'analyse granulométrique : il est égale au centième de la somme des refus sur les tamis de la série suivante (en module) 23 - 26 -29 -32 -35 -38-41 -44 - 47 -50.

IV-5- Surface spécifique SSB

IV-5-1 But

La surface spécifique (finesse Blaine) permet de mesurer la finesse de mouture d'un ciment. Elle est caractérisée par la surface spécifique ou surface développée totale de tous les grains contenus dans un gramme de ciment (norme NF EN 196-6). Elle s'exprime en cm^2/g .

IV-5-2 Méthode

Le principe consiste à déterminer cette surface par la méthode de Blaine.

Sa détermination préconise l'utilisation du « perméabilimètre de BLAINE » ; on obtient ainsi la surface spécifique de Blaine, notée SSB.

$$SSB = k \frac{\sqrt{e^3 - \sqrt{t}}}{\rho(1-e)\sqrt{\eta}}$$

SSB : Surface spécifique (cm²/g)

k : Constante de l'appareil

e : Porosité de la couche tassée

t : Temps mesuré en secondes

ρ : Masse volumique (kg/m³)

η : Viscosité de l'air à la température d'essai (en poises)

IV-5-3 Equivalent de sable ES

L'équivalent de sable, noté ES, est une valeur numérique qui caractérise le degré de propreté d'un granulat. C'est une grandeur particulièrement importante pour le sable : elle indique l'importance de la présence d'éléments fins dans le sable.

a- But

Le but c'est de donner le pourcentage ou la quantité du sable contenue dans un échantillon de sol.

b- Méthode

La méthode pour obtenir la quantité du sable dans un échantillon de sol est de mesurer visuellement et à piston la hauteur du sable dans un éprouvette contenant de la solution lavante et de l'eau après agitation.

Soient h_1 la hauteur du dépôt de sable visible et h_2 celle de la hauteur totale y compris le floculat composé des fines argileuses, l'équivalent de sable est exprimé par la relation :

$$ES = 100 \cdot h_1 / h_2$$

IV-6- Caractérisation a l'état frais du béton

La norme béton NF EN 206-1 précise que tous les bétons doivent être soumis à contrôle de production sous la responsabilité du producteur. Ces contrôles ont pour but de vérifier la conformité par rapport aux spécifications en vigueur et/ou à un cahier des charges demandé. Parmi tous les contrôles nécessaires, il faut distinguer ceux qui sont effectués lorsque le béton est à l'état frais de ceux qui le sont lorsqu'il est à l'état durci.

Les contrôles réalisés sur le béton à l'état frais constituent les premières vérifications possibles de la conformité d'un béton et permettent à la livraison de ce dernier, de pouvoir détecter d'éventuelles variations susceptibles de nuire à la mise en œuvre. Et donc à la bonne tenue des ouvrages dans le temps.

IV-6-1 Essai sur la Consistance

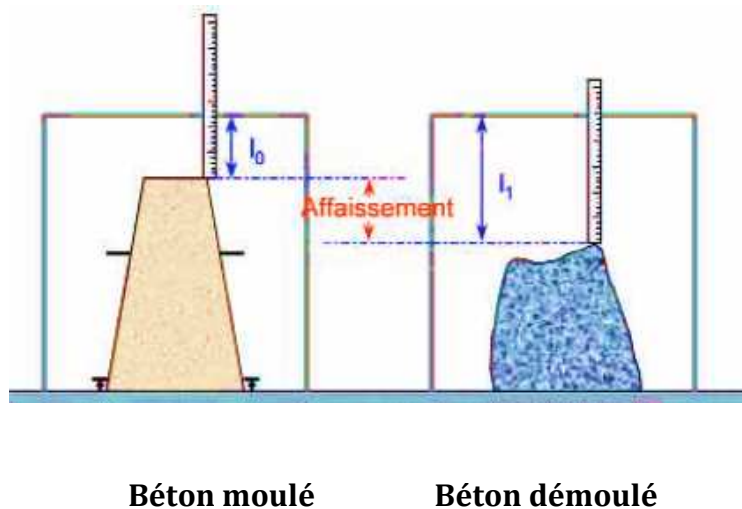
a- L'essai d'affaissement au cône d'Abram

a1- But

L'objectif de cet essai c'est de déterminer la bonne ouvrabilité du béton à l'état frais.

a2- Méthode

Le béton frais est compacté dans un moule en forme de tronc. Lorsque le cône est soulevé, l'affaissement du béton permet de mesurer sa consistance. Cet essai d'affaissement est valable pour un granulats de diamètre maximum 40 mm et dans la plage de 10 à 40 mm. En dehors de ces valeurs, d'autres essais mesurant la consistance du béton peuvent être réalisés (essai d'étalement, essai vébé...).



*Figure 6 : Essai au cône d'Abrams***b- L'essai d'étalement à table à secousses*****b1- But***

Cet essai vise à déterminer la consistance d'un volume de béton, non plus à partir d'une valeur d'affaissement, mais à partir de l'étalement sur un plateau plan soumis à des chocs.

b2- Méthode

La consistance est appréciée dans cet essai par l'étalement que subit un cône de béton soumis à son propre poids et une série de secousses. Cet essai est particulièrement adapté au béton plastique et fluide.

Le béton est placé dans un moule tronconique ($d \geq 17$ cm) placé sur un plateau puis enlever le moule et lui faire subir 15 chocs.

***Photo 1 : L'essai d'étalement à table secousse*****IV-6-1 L'essai Vébé**

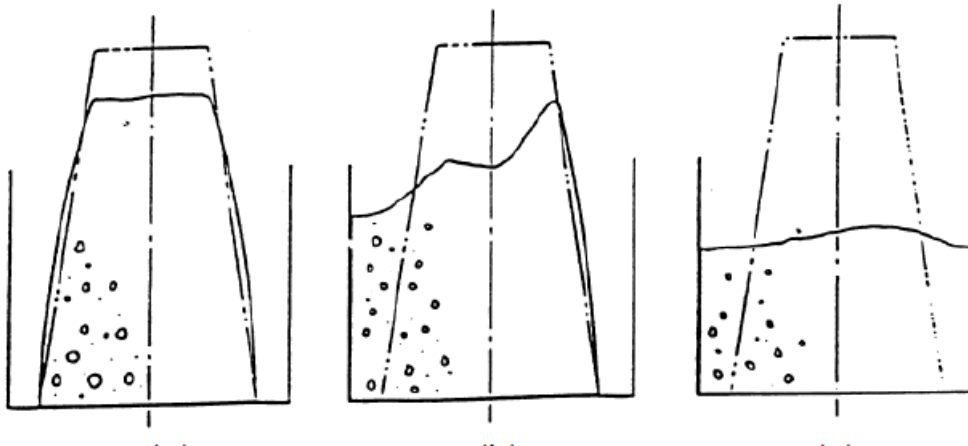
Selon la norme NF EN 12350-3

a1- But

La norme décrit l'une des méthodes de détermination de la consistance du béton frais au moyen du temps à l'essai Vébé. La méthode ne s'applique que si la dimension maximale des granulats est inférieure 63 mm. Si le temps à l'essai Vébé est < 5 s ou > 30 s, un autre essai de consistance doit être utilisé.

a2- Méthode

Cet essai consiste à mesurer le temps mis par un tronc de cône de béton pour remplir un moule cylindrique sous l'effet d'une vibration.



(a) Affaissement régulier

(b) cisaillement

(c) effondrement

Figure 7 : Essai Vébé

La norme européenne NBN EN 206-1 :2001 relative à la spécification des bétons a défini 5 classes d'étalement Vébé.

Tableau 4 : Classe d'étalement Vébé

| Classe | Vébé en seconde (s) |
|----------------|---------------------|
| V ₀ | ≥31 |
| V ₁ | 30-21 |
| V ₂ | 20-11 |
| V ₃ | 10-6 |
| V ₄ | 5-3 |

IV-6-2 L'essai de degré de compactibilité

Selon la norme NF EN 12350-4

Cet essai consiste à mesurer le volume de béton frais avant et après compactage sous vibration, dans un récipient de volume fixé. Le résultat exprimé est le rapport entre le volume apparent initial et le volume apparent final du béton.

IV-7- Caractérisation a l'état durci

Elle est déterminée par la norme NF EN 12390 (béton durci).

La construction d'un élément en béton armé se compose d'une succession d'étapes dont aucune ne doit être négligée. Après la conception de la forme et des détails et le dimensionnement de la section et des armatures, intervient le choix définitif des matériaux nécessaires (type de béton), les critères déterminant étant la résistance (état de ruine), la déformabilité (état de service), la durabilité (protection des armatures) et la mise en place (réseau d'armatures et ouvrabilité du béton). Suivant les spécifications, les composants du béton peuvent être choisis pour optimiser les performances selon l'un ou l'autre de ces critères parfois contradictoires. Le contrôle de la qualité lors du bétonnage et un traitement de cure approprié (protection du béton contre la dessiccation et les hautes ou basses températures pendant le durcissement) sont deux éléments primordiaux.

Finalement, une fois l'élément réalisé, l'ingénieur devra encore s'assurer à partir des essais sur le béton durci et de l'inspection sur place que les hypothèses du calcul statique (qualité des matériaux, détails constructifs) sont conformes à la réalité. Les essais de résistance mécanique et de déformabilité (compression, traction, flexion, module, fluage), destructifs ou non-destructifs, permettent de juger les performances du béton durci.

IV-7-1 Propriétés mécaniques

a- Résistance à la compression

a1- But

Contrôle de la qualité du béton durci. Il s'agit des essais les plus courants à effectuer.

a2- Méthode

Selon la norme SIA 162

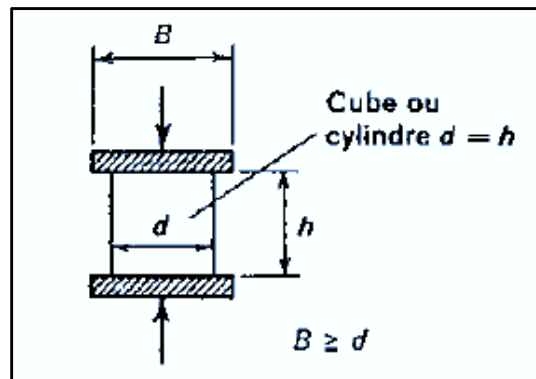


Figure 8 : Appareil de mesure de la résistance à la compression

L'essai consiste à écraser une éprouvette cylindrique de dimension 10×10 cm en le soumettant par une charge à l'aide d'une machine à presse à béton.

Elle est donnée par la relation :

$$R_c = F/S$$

b- Résistance à la traction

b1- But

L'essai de résistance à la traction transversale ou essai brésilien permet d'estimer la résistance à la traction directe du béton dit résistance à la traction par fendage, sans avoir recours au système de chargement compliqué que nécessite l'essai de traction directe.

b2- Méthode

L'essai consiste à appliquer une charge de compression centrée selon 2 génératrices d'une éprouvette cylindrique de dimension 10 x 10 cm. Les contraintes induites provoquent la rupture suivant un plan diamétral de l'éprouvette.

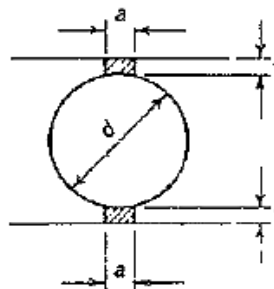


Figure 9 : Appareil de mesure de la résistance à la traction

La résistance à la traction transversale se calcule comme suit :

$$R_t = \frac{2P}{\pi dl}$$

Avec P la charge maximale, d le diamètre du cylindre (ou largeur), l la longueur de l'éprouvette selon la ligne de l'application de la charge.

IV-7-2 La Propriété thermique

La conductivité thermique ou conductibilité thermique est une grandeur physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert thermique, notée λ . Elle représente l'énergie (quantité de chaleur) transférée par unité de surface et de temps sous un gradient de température de 1 kelvin par mètre.

La mesure de notre conductivité thermique est obtenu par le type de transfert thermique appelé Conduction.

a1- But

L'essai a pour but de déterminer la conductivité thermique de notre béton léger.

a2- Méthode

Cette conductivité est déterminée par conduction en plaçant dans notre éprouvette cylindrique de rayon $R_{\text{ext}} = 5$ cm un thermocouple de rayon $r = 2$ cm, mesurant la température obtenue à l'intérieur.

- Eprouvette
 - Anneau de béton fabriqué à partir d'un moule 10 x 10 cm
 - Tube intérieur cartonné avec fond métallique étanche
 - Sonde de température entre carton et béton

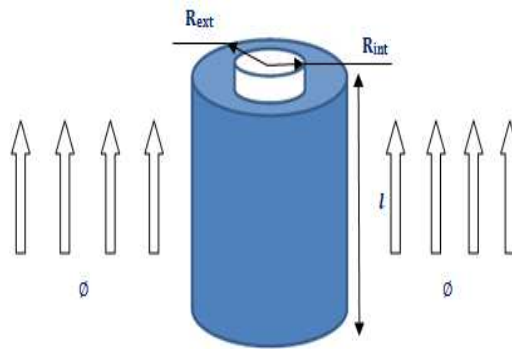


Figure 10 : Schéma de l'éprouvette

- La soumettre à une sollicitation thermique

Sollicitation par une résistance thermique Plongeante

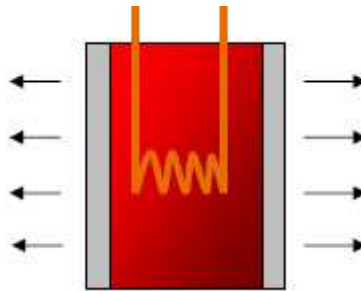


Figure 11 : Sollicitation par une résistance thermique

- Sollicitation par une masse d'eau à 70°C qui se refroidit

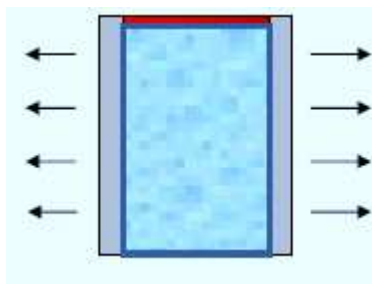


Figure 12 : Sollicitation par une masse d'eau

- Définir une procédure permettant d'obtenir :

❖ Conductivité thermique λ :

Eau chauffée par une résistance $R_e = 24W$;

Couvercle isolant en partie haute ;

Agitateur magnétique ;

Flux d'air forcé par ventilateur ;

Mesure des températures intérieure et extérieure.

- ❖ Capacité thermique : béton concassé passé à l'étuve plongée dans un calorimètre contenant une masse d'eau froide.
- ❖ Masse volumique : déterminer par pesée des éprouvettes.

La conductivité thermique est donnée par la formule suivante :

$$\lambda = \frac{\Phi \cdot l \cdot \frac{R_{ext}}{R_{int}}}{2\pi l (T_{int} - T_{ext})} \quad \text{Tel que le flux thermique est calculé comme-suit :}$$

$$\Phi = \frac{T_i - T_e}{R_e}$$

Avec λ : la conductivité thermique

Φ : le flux thermique de la conduction

l : la longueur de l'éprouvette

T_{int} et T_{ext} : respectivement la température à l'intérieur et à l'extérieur de l'éprouvette

R_{int} et R_{ext} : respectivement le rayon intérieur et extérieur de l'éprouvette

R_e : la résistance thermique

IV-7-3 Propriété phonique

a- But

Les caractéristiques d'affaiblissement acoustique d'un matériau de construction sont déterminées par la quantité de son absorbé et de son réfléchi.

La fréquence des sons est mesurée à l'aide d'un sonomètre.

Un sonomètre est un instrument destiné à mesurer le niveau de pression acoustique, une grandeur physique liée au volume sonore. Il s'utilise dans les études de pollution sonore et d'acoustique environnementale pour quantifier le bruit et les nuisances sonores, principalement les bruits industriels et de transports routier, ferroviaire et aérien.

En acoustique architecturale et en sonorisation, il sert à évaluer la répartition des niveaux sonores dans les locaux.



Photo 2 : Sonomètre

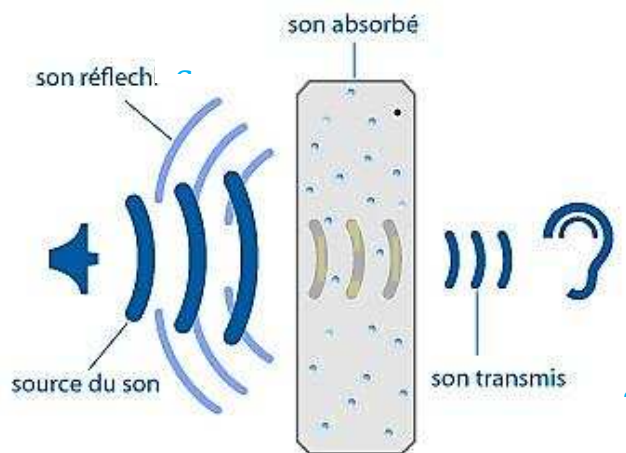


Figure 13 : Propagation des sons

b- Méthode

Le bruit est capté par un microphone placé à l'avant de l'appareil pour éviter les perturbations liées à la réflexion des ondes sonores sur le boîtier de l'appareil.

Pour la même raison l'appareil est tenu à bout de bras en direction de la source sonore ou posé sur un trépied permettant de s'éloigner pendant la mesure pour éviter l'effet d'écran du corps de l'opérateur.

Le microphone transforme les variations de pression acoustique en variations de courant électrique. Ce signal électrique est d'abord filtré en fréquence pour pondérer l'influence des graves et des aigües, puis doit être multiplié par lui-même pour obtenir sa puissance.

La puissance est ensuite convertie en décibels pour l'affichage. Le décibel correspond à 10 fois le logarithme décimal du rapport entre la puissance acoustique mesurée (intensité acoustique) et l'intensité acoustique de référence, égale à $1 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (**1 picowatt par mètre carré**). Pour une source définie, cette valeur est en général celle qu'on obtient avec une pression acoustique de $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ (20 micro pascals).

c- Affaiblissement acoustique R

Elle est caractérisée par la quantité du son absorbée par le matériau et est déterminée comme ci-après:

$$R = S_{\text{ext}} - S_{\text{int}}$$

IV-7-4 Tenue au feu

a- But

C'est de déterminer sa résistance au feu vis-à-vis d'une inflammabilité.

b- Méthode

Solliciter un échantillon d'éprouvette par une source de feu enflammée pendant un temps donné jusqu'à détérioration totale du béton, en mesurant la durée dans laquelle après il s'effondre totalement.

Le tableau ci-dessous indique que plusieurs phénomènes physico-chimiques se succèdent lorsque la température du béton évolue de 100 à 1000 °C et plus. Ils correspondent à des modifications sensibles de la pâte cimentaire et des granulats à partir de 500 °C, modifications qui se traduisent par un affaiblissement des qualités du béton (résistance mécanique, modules de déformation, etc.).

L'expérience montre pourtant que la résistance au feu des structures en béton est couramment assurée alors que le béton situé dans une ambiance à plus de 1000 °C devrait subir des transformations rédhibitoires.

Tableau 5 : Comportement du béton en fonction de son échauffement

| COMPORTEMENT DU BETON EN FONCTION DE SON ECHAUFFEMENT | |
|---|---|
| Jusqu'à 100 °C | Simple dilatation |
| De 100 à 150 °C | Evaporation de l'eau des pores |
| A partir de 150/180°C | L'eau d'hydratation de $(OH)_2 Ca$ est libérée |
| De 400 à 500 °C | L'hydroxyde de calcium se décompose en CaO et H ₂ O La vapeur d'eau peut engendrer un phénomène d'écaillage |
| De 570 à 700 °C | Le quartz a devient quartz (573°C) |
| De 700 à 800° C | Le CSH devient b CSH |
| A partir de 800 °C | Le calcaire se décompose (en granulats, par exemple) et |
| De 1150 à 1200°C | Le calcaire se décompose |
| A partir de 1300/1400°C | Le béton est masse fondue |

CHAPITRE V- CARACTERISTIQUES DES CONSTITUANTS DU BETON A CONCEVOIR

Avant d'utiliser ces constituants, il faut savoir leurs caractéristiques que nous allons présenter ci-après :

Afin de concevoir ce béton léger, nous avons utilisé les matériaux suivants :

- Ciment fabriqué par la société HOLCIM Madagascar : CEM IV 42,5 N (C) ;
- Eau venant de la JIRAMA (E);
- Billes de polystyrènes expansés (P) ;
- Sables de rivière de Vontovorona (S).

V-1- Ciment CEM IV 42,5N

V-1-1 Caractéristiques physiques du ciment

Le choix du type de ciment est fonction de la valeur de sa classe vraie F_{CE} et des critères de mise en œuvre (vitesse de prise et de durcissement, chaleur d'hydratation,...).

Alors, nous avons choisi d'utiliser le ciment ORIMBATO CEM IV 42,5N car il est un des types de ciment qui sont destinés à des travaux courants de béton, selon les prescriptions du fabricant.

Ses caractéristiques physiques sont données par le tableau suivant :

Tableau 6 : Caractéristiques physiques du ciment CEM IV 42,5N

| Désignations | Valeurs |
|---|-------------------------|
| Classe vraie de résistance (F_{CE}) | 55 MPa |
| Masse volumique apparente ($\rho_{s(c)}$) | 1030 kg/m ³ |
| Masse volumique absolue ($\gamma_{s(c)}$) | 3110 kg/m ³ |
| Surface Spécifique Blaine (SSB) | 3205 cm ² /g |

V-1-2 Composition chimique

Elle est donnée par le tableau ci-dessous :

Tableau 7 : Composition chimique du ciment CEM IV 42,5N

| Constituants | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | SO ₃ | K ₂ O | Na ₂ O | MgO | Perte au feu |
|-------------------|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|------------------|-------------------|------|--------------|
| Teneur (%) | 63,89 | 21,35 | 44,59 | 5,52 | 2,72 | 0,41 | 0,13 | 1,37 | 2,47 |

V-1-3 Composition minéralogique

La composition minéralogique potentielle du ciment est donnée dans le tableau suivant :

Tableau 8 : Composition minéralogique du ciment CEM IV 42,5N

| Constituants | C3S | C2S | C3A | C4AF |
|-------------------|-------|-------|------|-------|
| Teneur (%) | 47,15 | 25,69 | 2,84 | 16,78 |

V-2- EAU DE GACHAGE

L'eau du robinet de la société JIRO sy RANO MALAGASY (JIRAMA) est l'eau à utiliser. Ses principales caractéristiques sont indiquées dans le tableau ci-après :

Tableau 9 : Caractéristiques de l'eau du JIRAMA

| | |
|--|----------------|
| Acidité en PH | 7,2 à 8,5 |
| Carbonates + bicarbonates alcalins (%) | 0,0028 |
| Chlorure (mg/l) | 3,55 à 8,87 |
| Insoluble (%) | 0 |
| Ions soufre | 0 |
| Matières dissoutes (%) | 0,0034 à 0,005 |
| P2O5 (%) | 0 |
| NO3 (%) | 0 |
| Sucre (%) | 0 |
| Sulfates en SO ₃ (%) | 0 |
| Sulfites en S (%) | 0 |
| Zinc (%) | 0 |

V-3- Granulats

Les granulats dans la fabrication du béton doivent permettre la réalisation d'un squelette granulaire à minimum de vides. Il faut en conséquence utiliser des granulats de toutes tailles pour que les plus petits éléments viennent combler les vides laissés par les plus gros.

Deux types de granulats sont utilisés: un sable naturel S, des billes de polystyrène expansé et du polystyrène P.

V-3-1 Propriété physiques du PSE

Ses propriétés physiques seront détaillées sur le tableau suivant :

| Propriétés | $\rho_{s(p)}$ (t/m ³) | $\gamma_{s(p)}$ (t/m ³) | e | v | V _m | M _{fp} |
|------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------|-------|----------------|-----------------|
| P | 0,00838 | 0,009 | 0,0432 | 0,111 | 0,0678 | 5.23 |

Avec :

$\rho_{s(p)}$: Masse volumique apparente du PSE

$\gamma_{s(p)}$: Masse volumique absolue du PSE

e : Porosité

v : Vide dans les PSE

v_m : Vide mouillée

M_{fp} : Module de finesse du PSE

V-3-2 Autres propriétés du PSE

Les principales propriétés du PSE sont données dans le tableau suivant :

Tableau 10 : Caractéristiques du PSE

| Propriétés | Valeurs des propriétés | observation |
|--|--|--|
| Conductivité thermique | $1,5 \cdot 10^{-4} \text{W} \cdot \text{m} \cdot \text{K}^{-1}$ | - |
| Comportement à l'eau | $1.8 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h} \cdot \text{torr}^{-1}$ | - |
| Absorption d'eau par immersion pendant 28j | 3% | Valeur maximum en volume du PSE |
| Pouvoir calorifique | 40 MJ/kg | inflammables et combustibles, la dégradation commence dès 350°C et l'autoinflammation vers 450°C. |
| Résistance mécanique | 36 KPa | Pour une déformation de 10% |
| Résistance chimique | | solubles dans des solvants tels que hydrocarbures chlorés et aromatiques, dans les cétones, esters. pas soluble dans l'alcool |

V-3-3 Propriétés physiques du sable

Ces propriétés ont été déterminées selon les méthodes décrites dans le chapitre précédent. Les propriétés physiques du sable sont données dans le tableau suivant :

Tableau 11 : Propriétés physiques du sable

| Propriétés | $\rho_{s(s)}$ (t/m ³) | $\gamma_{s(s)}$ (t/m ³) | e | v | V _m | M _{fs} | ES |
|------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------|-------|----------------|-----------------|----|
| S | 1,4 | 2,55 | 0,420 | 0,451 | 0,031 | 2,0073 | 76 |

Avec :

$\rho_{s(s)}$: Masse volumique apparente du PSE

$\gamma_{s(s)}$: Masse volumique absolue du PSE

e : Porosité

v : Vide dans les PSE

v_m : Vide mouillée

M_{fs} : Module de finesse du sable

ES : Equivalent de sable

On a constaté une grande différence entre les masses volumiques des polystyrènes et du sable.

Les polystyrènes adsorbent très peu d'eau contrairement au sable s ; ce qui peut être expliqué par un certain caractère hydrophobe des polystyrènes et l'existence d'une quantité notable de fine argileuse dans le sable signalé par la valeur de l'équivalent de sable.

Au vu de son module de finesse, le sable utilisé est un sable assez fin.

V-3-4 Granulométrie

a- Classification des granulats

Les granulats sont triés par dimension au moyen des tamis (mailles carrés).

Un granulat est dit « granulat d/D_{max} » si d et D_{max} sont respectivement la plus petite et la plus grande des dimensions. Mais pour le cas où d est inférieure à 2 mm les granulats se désignent par $0/D$.

D'après la norme NFP18-101, les granulats peuvent être classés selon le tableau ci-après.

Tableau 12 : Classification et appellations des granulats

| Appellations | | Dimension de la maille des tamis (mm) |
|-----------------------------|--------|---------------------------------------|
| Pierres cassées et cailloux | Gros | 50 à 80 |
| | Moyens | 31.5 à 50 |
| | Petits | 20 à 31.5 |
| gravillons | Gros | 12.5 à 20 |
| | Moyens | 8 à 12.5 |
| | Petits | 5 à 8 |
| Sable | Gros | 1.25 à 5 |
| | Moyens | 0.31 à 1.25 |
| | Petits | 0.08 à 0.31 |
| Fillers | | Inférieur à 0.08 |

b- Analyse granulométrique du sable S

Les résultats de l'analyse granulométrique du sable sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 13 : Résultats de l'analyse granulométrique du Sable S

| Ouverture des tamis [mm] | Module AFNOR | Tamisât cumulé (%) |
|--------------------------|--------------|--------------------|
| 5 | 38 | 100 |
| 4 | 37 | 100 |
| 2.5 | 35 | 99.50 |
| 1.25 | 32 | 98.76 |
| 1 | 31 | 96.02 |
| 0.63 | 29 | 69.35 |
| 0.315 | 26 | 25.54 |
| 0.250 | 25 | 10.95 |
| 0.16 | 23 | 6.05 |
| 0.125 | 22 | 1.08 |
| 0.1 | 21 | 0 |

V-3-5 Analyse granulométrique du polystyrène

Les résultats de l'analyse granulométrique du polystyrène sont donnés dans le tableau 14.

Tableau 14 : Résultats de l'analyse granulométrique du Polystyrène P

| Ouverture des tamis [mm] | Module AFNOR | Tamisât cumulé (%) |
|--------------------------|--------------|--------------------|
| 6.3 | 39 | 100 |
| 5 | 38 | 93,92 |
| 4 | 37 | 46,74 |
| 2.5 | 35 | 0 |
| 1 | 31 | 0 |

V-3-6 Courbe granulométrique des granulats

Les résultats des analyses granulométriques figurent dans les tableaux 13,14 et donnent les courbes granulométriques correspondantes de la figure 3.

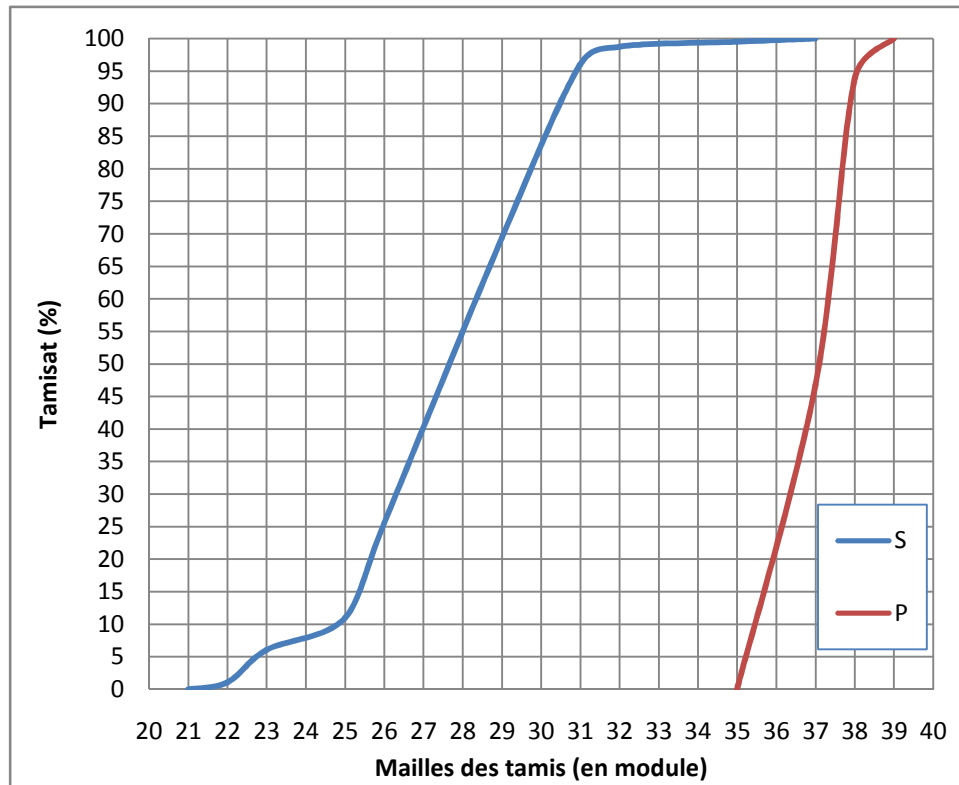


Figure 14 : Courbe granulométrique du Sable S et du Polystyrène P

CHAPITRE VI- FORMULATION DU BETON

Afin d'avoir déterminé les bonnes caractéristiques des constituants de notre béton, l'étude est basée sur les deux paramètres suivants :

- Variation de la consistance pour trouver la bonne ouvrabilité ;
- Variation des pourcentages des granulats.

Pour la formulation de notre béton, on a adopté celle de DREUX-GORISSE.

VI-1- Variation de la consistance pour trouver la bonne ouvrabilité

VI-1-1 Description de la méthode de DREUX-GORISSE

La méthode de DREUX-GORISSE permet de déterminer les quantités optimales des matériaux (eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier G) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges.

Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton :

- Détermination du rapport C/E ;
- Détermination de C et E ;
- Détermination du mélange optimale à minimum de vide ;
- Détermination de la compacité du béton ;
- Détermination des masses de granulats.

Les données nécessaires pour cette formulation sont :

- Le diamètre maximal D_{\max} du granulat : $D_{\max} = 5 \text{ mm}$;
- La résistance à la compression prescrite à 28j : $R_{b28} = 25 \text{ MPa}$;
- La résistance visée est la résistance prescrite majorée de 15% :

$$R_b = R_{b28} \times 1.15 = 28.75 \text{ MPa}$$

- La classe vraie du ciment : $F_{CE} = 55 \text{ MPa}$;
- Les masses volumique du : ciment et des granulats ;

- La consistance, caractérisée par l'affaissement A au cône d'Abrams.

VI-1-2 Détermination du rapport C/E :

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

$$R_b = G' F_{CE} (C/E - 0.5)$$

$$\text{D'où } C/E = \frac{R_b}{G' F_{CE}} + 0.5$$

$$\text{Alors } C/E = 1.662$$

Avec :

R_b : Résistance moyenne en compression du béton à 28j en MPa ;

F_{CE} : Classe vraie du ciment en MPa

C : dosage en ciment en kg/m^3 de béton ;

E : dosage en eau total sur matériau sec en l/m^3 de béton ;

G' : Coefficient granulaire (Annexe, Tableau 44) fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats D_{\max} , $G' = 0.45$ (qualité des granulats : bonne et courante)

VI-1-3 Détermination de C

La valeur de C est déterminée grâce à l'abaque de la figure ci-dessous, en fonction des valeurs de C/E et de l'affaissement au cône d'Abrams A.

La valeur de C est déterminée grâce à l'abaque de la figure 1 en fonction des valeurs de C/E et de l'affaissement au cône d'Abrams.

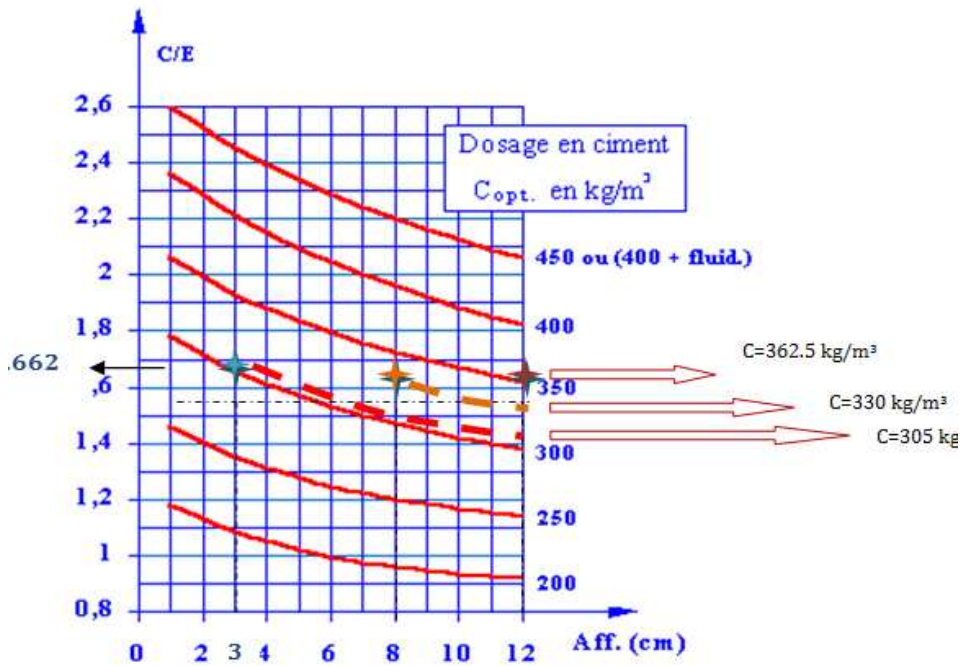


Figure 15 : Valeur du dosage en ciment pour chaque affaissement

VI-1-4 Détermination de E

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

Tableau 15 : Valeur de E

| Affaissement A (cm) | C/E | C (kg/m ³) | E (L) |
|---------------------|-------|------------------------|--------|
| 12 | 1.662 | 362.5 | 218.11 |
| 8 | 1.662 | 330 | 198.56 |
| 3 | 1.662 | 305 | 183.51 |

VI-1-5 Corrections sur le dosage en ciment et le dosage en eau

Une correction sur la quantité de pâte est nécessaire à l'obtention de la maniabilité souhaitée lorsque la dimension maximale D_{\max} des granulats est différente de 20 mm (Voir annexe, tableau 44).

Dans notre cas, on a $D_{\max} \neq 20$ mm et égale à 5 mm, alors on a adopté une correction de majoration de 15% pour C et E.

Tableau 16 : Valeur corrigée de C et de E

| Affaissement A (cm) | Corrigé (kg/m ³) | E _{corrigée} (L) |
|---------------------|------------------------------|---------------------------|
| 12 | 416.88 | 250.83 |
| 8 | 379.5 | 228.34 |
| 3 | 350.75 | 211.04 |

VI-1-6 Détermination du mélange optimal à minimum des vides

Il s'agit de déterminer les pourcentages de sable, de gravillons et de cailloux qui vont permettre la réalisation d'un squelette granulaire à minimum de vides.

La courbe granulométrique théorique d'un matériau à minimum des vides peut être schématisée par une droite brisée. La démarche proposée par DREUX-GORISSE pour déterminer le mélange optimum à minimum de vides est la suivante :

- Tracé de la droite brisée de référence ;
- Détermination des pourcentages en volumes absolues de matériaux en utilisant la notion des lignes de partage.

VI-1-7 Tracé de la droite brisée de référence

Cette droite représente la courbe idéale d'un matériau à minimum de vides. C'est une droite brisée dont le point de brisure A est défini par son abscisse X_A et son ordonnée Y_A :

En abscisse :

$$\text{Si } D_{\max} \leq 20 \text{ mm}, X_A = D_{\max}/2$$

$$\text{Si } D_{\max} > 20 \text{ mm}, \text{Module } (X) = (\text{Module } D_{\max} + 38)/2$$

En ordonnée :

$$Y_A = 50 - \sqrt{1.25 (D_{\max}) + K'} \text{ ou } K' = K + K_s + K_p$$

K est un coefficient donné par le **tableau** (Voir annexe)

K_s et K_p : coefficients correctifs définis par :

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

K_p : correction supplémentaire si le béton est pompable : $K_p = +5$ à $+10$ selon le degré de plasticité désiré.

Les valeurs ci-dessus seront affichées dans le tableau suivant :

Tableau 17 : Calcul des coordonnées de A

| K | K_p | M_{fs} | K_s | K' |
|-------------|-------------|----------|---------------|-------|
| 0 | 0 | 2.0073 | -2.96 | -4.96 |
| Coordonnées | $X_A = 2.5$ | | $Y_A = 42.54$ | |

La droite de Dreux ou la courbe de référence OAB (CR) a pour origine le point O du graphe et pour extrémité le point D_{max} caractéristiques des plus gros granulats.

$$\left\{ \begin{array}{l} O : (20 ; 0\%) = (20 ; 0) \\ A : (X_A ; Y_A) \\ B : (\text{Module}(D_{max}) ; 100\%) = (38 ; 100) \end{array} \right.$$

VI-1-8 Détermination des pourcentages en volume absolus des granulats

Pour déterminer les pourcentages en volumes absolus de granulats permettant la confection d'un mélange à minimum de vides, il est nécessaire de tracer comme indiqué sur la figure 16 des droites reliant deux à deux les courbes granulométriques des matériaux du mélange. Ces droites sont appelées « lignes de partages ».

Les lignes de partages sont définies par 95% de refus pour le matériau à faible granularité et par 5% de passant pour le matériau à forte granularité. L'intersection des droites ainsi tracées avec la droite brisée de DREUX permet, par prolongement sur l'axe des ordonnées, de déterminer les pourcentages en volume absolus de chaque granulat. Ces pourcentages doivent permettre l'obtention d'un mélange dont la courbe granulométrique est proche de la droite brisée de DREUX. Si la courbe du mélange obtenue est trop éloignée de la courbe de DREUX, un ajustement de ces pourcentages peut s'avérer nécessaire.

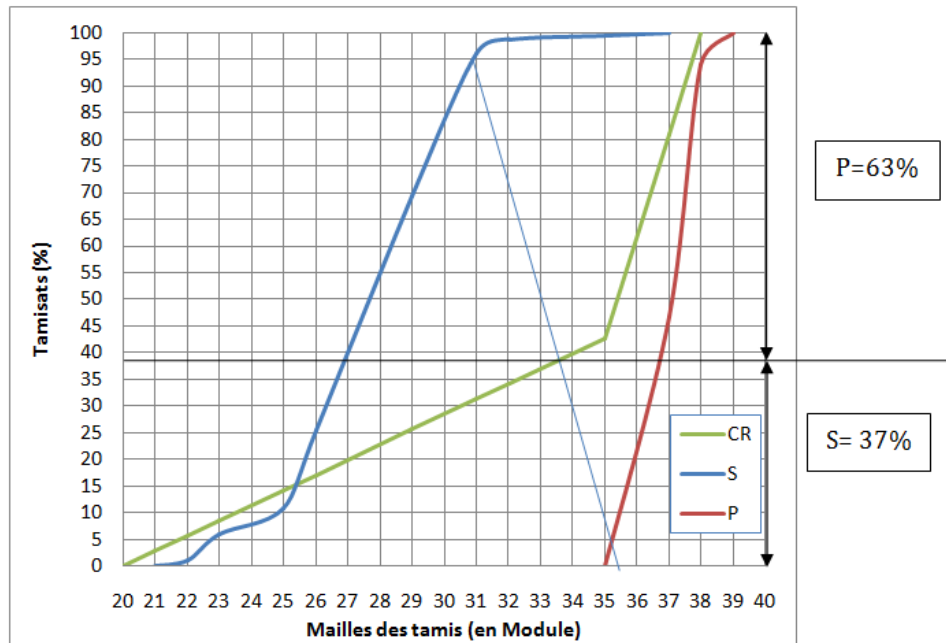


Figure 16 : Détermination graphique des pourcentages en volume absolu des granulats

VI-1-9 Détermination de la compacité du béton

La valeur de la compacité c du béton permet de déterminer le volume total absolu V de granulats intervenant dans la formulation du béton : $V = \Gamma - V_c$ ou V_c est le volume de ciment défini par $V_c = C/\gamma_{s(c)}$ ou $\gamma_{s(c)}$ est la masse spécifique du ciment.

Cette compacité est donnée par le tableau :

Tableau 18 : Compacité du béton

| Affaissement A (cm) | Compacité Γ (m ³) | Compacité Γ corrigée (m ³) |
|---------------------|--|---|
| 12 | 0.755 (Vibration faible, D _{max} = 5mm) | 0.725 |
| 8 | 0.765 (Vibration faible, D _{max} = 5mm) | 0.735 |
| 3 | 0.775 (Vibration faible, D _{max} = 5mm) | 0.745 |

VI-1-10 Détermination du V_c et V

Soit V_c le volume du ciment dans le béton et V le volume total de granulats dans le béton.

- $\gamma_{s(c)} = \frac{c}{V_c}$

D'où $V_c = \frac{c}{\gamma_{s(c)}}$

- $V = \Gamma - V_c$

Les valeurs de V et V_c avec correction seront données dans le tableau ci-après.

Tableau 19 : Valeur de avec correction

| Affaissement A (cm) | C_{corr} (L) | $\gamma_{s(c)}$ (t/m ³) | Γ (L) | V_c (L) | V (L) |
|---------------------|----------------|-------------------------------------|--------------|-----------|--------|
| 12 | 416.88 | 3.110 | 755 | 134.05 | 620.95 |
| 8 | 379.5 | 3.110 | 765 | 122.03 | 642.97 |
| 3 | 350.75 | 3.110 | 775 | 112.78 | 662.22 |

VI-1-11 Détermination des dosages en granulats

Connaissant le volume total V et les pourcentages en volume absolus de sable (S%), de gravillon (P%), il est alors possible de déterminer les volumes de sable V_s , et du polystyrène V_p ainsi que leurs masses respectives (S, P).

- $V_s = V_{corr} \cdot S\%$ d'où $S = V \cdot S\% \cdot \gamma_{s(s)}$
- $V_p = V_{corr} \cdot P\%$ d'où $P = V \cdot P\% \cdot \gamma_{s(p)}$
- $S = V_s \cdot \gamma_{s(s)}$
- $P = V_p \cdot \gamma_{s(p)}$

Tableau 20 : Dosage en granulats

| AFFAISSEMENT A (cm) | $\gamma_{s(s)}$ (t/m ³) | $\gamma_{s(P)}$ (t/m ³) | V (L) | S% | P% | V _s (L) | V _p (L) | S (kg) | P (kg) |
|------------------------|--|--|----------|----|----|-----------------------|-----------------------|-----------|-----------|
| 12 | 2.55 | 0.009 | 620.95 | 37 | 63 | 229.75 | 391.20 | 585.86 | 3.521 |
| 8 | 2.55 | 0.009 | 642.97 | 37 | 63 | 237.90 | 405.07 | 606.65 | 3.646 |
| 3 | 2.55 | 0.009 | 662.22 | 37 | 63 | 245.02 | 417.20 | 624.80 | 3.755 |

VI-1-12 Obtention de la formulation théorique de béton

La formulation théorique de béton recherchée est définie par les quantités d'eau E, de sable S, du polystyrène P. La masse totale d'un mètre cube de béton $\Delta_0 = E + C + P$ est pour un béton courant comprise entre 2.3 t/m³ et 2.5 t/m³. La formulation obtenue reste théorique et il convient de la tester et de la corriger par les essais de laboratoire avant d'être utilisée.

VI-2- Variation du deuxième paramètre (pourcentage de polystyrène)

La suite de notre travail consiste à diminuer chaque fois de 5% le pourcentage en volume du sable en le remplaçant par du polystyrène jusqu'à une diminution de 50% en masse du sable.

VI-2-1 Pour une consistance molle de A = 12 cm :

Composition pour 1m³ de béton:

- S% = 37%, P% = 63%

| C | E | S | P | Δ_0 |
|-----------|-----------|-----------|----------|---------------------------|
| 416.88 kg | 250.83 kg | 585.86 kg | 3.521 kg | 1257.09 kg/m ³ |

- S% = 32%, P% = 68%

| C | E | S | P | Δ_0 |
|-----------|----------|-----------|----------|--------------------------|
| 416.88 kg | 250.83kg | 506.69 kg | 3.800 kg | 1178.2 kg/m ³ |

- S% = 27%, P% = 73%

| C | E | S | P | Δ_0 |
|-----------|-----------|-----------|---------|---------------------------|
| 416.88 kg | 250.83 kg | 427.52 kg | 4.08 kg | 1099.31 kg/m ³ |

- S% = 22%, P% = 78%,

| C | E | S | P | Δ_0 |
|-----------|-----------|-----------|----------|---------------------------|
| 416.88 kg | 250.83 kg | 348.35 kg | 4.359 kg | 1020.42 kg/m ³ |

- S% = 17%, P% = 83%

| C | E | S | P | Δ_0 |
|-----------|-----------|-----------|----------|--------------------------|
| 416.88 kg | 250.83 kg | 269.18 kg | 4.639 kg | 941.53 kg/m ³ |

- S% = 0%, P% = 100%,

| C | E | S | P | Δ_0 |
|-----------|-----------|------|----------|--------------------------|
| 416.88 kg | 250.83 kg | 0 kg | 5.589 kg | 673.30 kg/m ³ |

VI-2-2 Pour une consistance molle de A = 8 cm

Composition pour 1m³ de béton en kg/m³

- S% = 37%, P% = 63%

| C | E | S | P | Δ_0 |
|----------|-----------|-----------|---------|--------------------------|
| 379.5 kg | 228.34 kg | 606.65 kg | 3.646kg | 1218.14kg/m ³ |

- S% = 32%, P% = 68%,

| C | E | S | P | Δ_0 |
|----------|-----------|-----------|----------|---------------------------|
| 379.5 kg | 228.34 kg | 524.67 kg | 3.940 kg | 1136.45 kg/m ³ |

- S% = 27%, P% = 73%

| C | E | S | P | Δ_0 |
|----------|-----------|----------|---------|---------------------------|
| 379.5 kg | 228.34 kg | 442.69kg | 4.22 kg | 1054.75 kg/m ³ |

- S% = 22%, P% = 78%

| C | E | S | P | Δ_0 |
|----------|-----------|-----------|---------|--------------------------|
| 379.5 kg | 228.34 kg | 360.71 kg | 4.51 kg | 973.06 kg/m ³ |

- S% = 17%, P% = 83%

| C | E | S | P | Δ_0 |
|----------|-----------|--------|---------|--------------------------|
| 379.5 kg | 228.34 kg | 278 kg | 4.80 kg | 890.64 kg/m ³ |

- S% = 0%, P% = 100%

| C | E | S | P | Δ_0 |
|----------|-----------|------|---------|--------------------------|
| 379.5 kg | 228.34 kg | 0 kg | 5.79 kg | 613.63 kg/m ³ |

VI-2-3 Pour une consistance molle de A = 3 cm :

Composition pour 1m³ de béton en kg/m³

- S% = 37%, P% = 63%

| C | E | S | P | Δ_0 |
|-----------|-----------|-----------|----------|---------------------------|
| 350.75 kg | 211.04 kg | 624.80 kg | 3.755 kg | 1190.35 kg/m ³ |

- S% = 32%, P% = 68%

| C | E | S | P | Δ_0 |
|--------|--------|-----------|---------|---------------------------|
| 350.75 | 211.04 | 540.26 kg | 4.05 kg | 1106.10 kg/m ³ |

- S% = 27%, P% = 73%

| C | E | S | P | Δ_0 |
|--------|--------|-----------|---------|---------------------------|
| 350.75 | 211.04 | 455.84 kg | 4.35 kg | 1021.98 kg/m ³ |

- S% = 22%, P% = 78%

| C | E | S | P | Δ_0 |
|--------|--------|-----------|---------|--------------------------|
| 350.75 | 211.04 | 371.43 kg | 4.64 kg | 937.86 kg/m ³ |

- S% = 17%, P% = 83%

| C | E | S | P | Δ_0 |
|--------|--------|-----------|---------|--------------------------|
| 350.75 | 211.04 | 287.01 kg | 4.95 kg | 853.75 kg/m ³ |

- S% = 0%, P% = 100%

| C | E | S | P | Δ_0 |
|--------|--------|------|---------|--------------------------|
| 350.75 | 211.04 | 0 kg | 5.96 kg | 567.75 kg/m ³ |

CHAPITRE VII- CARACTERISATION DU BETON CONCU

La construction d'un élément en béton armé se compose d'une succession d'étapes dont aucune ne doit être négligée. Après la conception de la forme et des détails et le dimensionnement de la section et des armatures, intervient le choix définitif des matériaux nécessaires (type de béton et d'aciers), les critères déterminant étant la résistance (état de ruine), la déformabilité (état de service), la durabilité (protection des armatures) et la mise en place (réseau d'armatures et ouvrabilité du béton). Suivant les spécifications, les composants du béton peuvent être choisis pour optimiser les performances selon l'un ou l'autre de ces critères parfois contradictoires. Le contrôle de la qualité lors du bétonnage et un traitement de cure approprié (protection du béton contre la dessiccation et les hautes ou basses températures pendant le durcissement) sont deux éléments primordiaux.

Finalement, une fois l'élément réalisé, l'ingénieur devra encore s'assurer à partir des essais sur le béton durci et de l'inspection sur place que les hypothèses du calcul statique (qualité des matériaux, détails constructifs) sont conformes à la réalité. Les essais de résistance mécanique et de déformabilité (compression, traction, flexion, module, fluage), destructifs ou non-destructifs, permettent de juger les performances du béton durci.

Après avoir caractérisé les matières premières, les études de composition de bétons légers sont nécessaires pour pouvoir faire des essais de fabrication.

Afin de pouvoir comparer les résultats obtenus avec ceux donnés par les autres types de bétons déjà étudiés, il faut suivre les normes.

En effet, pour les essais mécaniques de compression ou de traction des bétons, on a conçu les éprouvettes du béton avec un élancement 1.

$$h/d = 1$$

Tel que : h : la hauteur de l'éprouvette, h= 10 cm

d : le diamètre de l'éprouvette, d= 10 cm

VII-1- Caractérisation du béton frais

VII-1-1 Absence de ségrégation

Cet essai se fait avec le liant et les granulats utilisés, donc le ciment, le sable et les grains de polystyrène.

Ces différentes matières se mélangent très bien sans présenter des phénomènes de ségrégation. En effet, vu la très grande différence entre la densité des granulats de polystyrène et celles du sable et du ciment, un phénomène de ségrégation était à craindre lors du mélangeage des différents constituants. Il n'en était rien : les différents constituants se mélangent très bien et ceci quelque soit la consistance du mélange.

Pour éviter la ségrégation dans le mélange, il faut mélanger bien à sec le ciment avec le sable puis les deux avec les polystyrènes et enfin verser l'eau en les mélangeant ensemble.

VII-1-2 Adhérence

La nature, la forme ou l'aspect des granulats peuvent avoir des influences sur la compatibilité granulats et pâte de ciment, ou granulats et mortier. En effet, par exemple, les pâtes de ciment ou les mortiers adhèrent bien aux graviers de concassage qui présentent une surface rugueuse, par contre leur liaison avec les graviers de roches très durs ou « froides » est nettement moins bonne.

Lors de nos expérimentations, la pâte pure de ciment et les mortiers, et ceci quelque soit leur consistance, présentent une bonne adhérence vis-à-vis des grains de polystyrène qui sont utilisés comme granulats. De ce point de vue donc, les grains de polystyrènes et le ciment ou les mortiers sont bien compatibles.

D'une que pour avoir une bonne adhérence entre le polystyrène et le ciment, il faut mettre les polystyrènes dans un coulis de ciment pendant 24h, c'est « **la minéralisation** ».

D'autre part, pour une consistance ferme, il est recommandé de compacter ou si possible de presser le béton pendant le moulage afin d'éviter la mauvaise adhérence.

VII-1-3 Maniabilité

A même teneur en eau de gâchage et pour une même consistance au cône d'Abrams, le mélange polystyrène - pâte pure est plus difficile à mettre en œuvre que le mélange polystyrène -mortier.

Nous avons donc adopté l'utilisation systématique d'un sable fin pour la fabrication de nos bétons ultra légers, et ceci au détriment de la légèreté du produit obtenu.

Alors on a constaté lors de la fabrication du béton frais que pour notre type de béton les consistances prises ont été plus ou moins vérifiées lors de l'essai au cône d'Abrams au cours de la conception du béton.

Tableau 21 : Vérification des consistances

| Consistance prise A (cm) ou en classe | Consistance vérifiée A' (cm) |
|---|------------------------------|
| Consistance très plastique A = 12 cm Classe S3 | A' = 12.1 cm |
| Consistance molle A = 8 cm Classe S2 | A' = 8.09 cm |
| Consistance ferme A = 3 cm Classe S1 | A' = 2.95 cm |

Tableau 22 : Caractéristiques de béton léger de PSE à l'état frais

| Consistance vérifiée A' (cm) | Étalement | Degré de compactibilité |
|------------------------------|-----------|-------------------------|
| A' = 12.1 cm Classe S3 | 450 mm | 1.07 |
| A' = 8.09 cm Classe S2 | 380 mm | 1.18 |
| A' = 2.95 cm Classe S1 | 300 mm | 1.30 |

Interprétation :

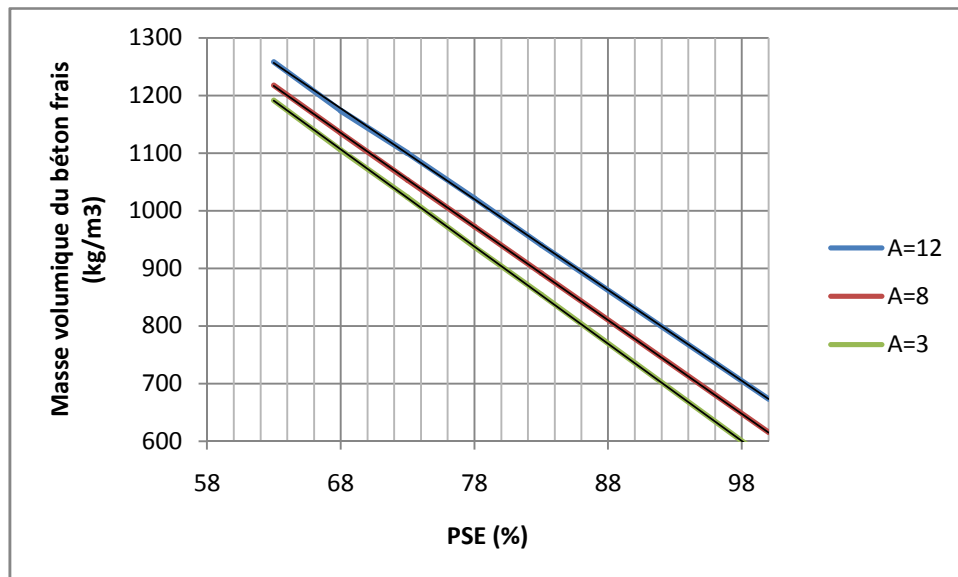
D'après nos résultats, on en déduit que si l'affaissement augmente le degré de compactibilité diminue et l'étalement augmente.

VII-1-4 Masse volumique du béton à l'état frais

Le tableau ci-dessous montre la masse volumique du béton à l'état frais.

Tableau 23 : Masse volumique du béton frais

| Δ_0 (kg/m ³) | | | |
|---------------------------------|-----------|----------|----------|
| PSE (%) | A = 12 cm | A = 8 cm | A = 3 cm |
| 63 | 1258,05 | 1217,34 | 1191,25 |
| 68 | 1173,6 | 1134,65 | 1105,3 |
| 73 | 1099,8 | 1052,81 | 1023,02 |
| 78 | 1021,23 | 972,6 | 937,25 |
| 83 | 940,16 | 891,69 | 854,45 |
| 100 | 672,94 | 615,21 | 566,34 |

Figure 17 : Masse volumique (Δ_0) à l'état frais du béton

Interprétation :

La masse volumique du béton frais est aussi fonction de la masse spécifique des granulats utilisés, c'est à dire dans notre cas, elle diminue progressivement si on augmente le taux des grains de PSE.

Mais par rapport au béton ordinaire qui est de masse volumique de l'ordre de 2200-2500 kg/m³, il présente une grande légèreté et permet un gain de masse jusqu'à 80%.

De plus, plus la consistance est ferme, plus le béton est léger.

VII-2- Caractéristiques du béton à l'état durci**VII-2-1 Propriétés physiques et mécaniques****a- Porosité et perméabilité :**

Les résultats de ces essais sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau 24 : Résultat de la porosité et de la perméabilité du béton S3

| A = 12 cm | | |
|--------------------------------|--------------------------------------|--|
| Pourcentage du polystyrène (%) | Porosité P (%) du béton léger de PSE | Perméabilité K (m/s) du béton léger de PSE |
| 63 | 5.21 | 0.002009 |
| 68 | 5.38 | 0.002075 |
| 73 | 5.57 | 0.002148 |
| 78 | 5.72 | 0.002206 |
| 83 | 5.84 | 0.002252 |
| 100 | 6 | 0.002314 |

Tableau 25 : Résultat de la porosité et de la perméabilité du béton S2

| A = 8 cm | | |
|--------------------------------|--------------------------------------|--|
| Pourcentage du polystyrène (%) | Porosité P (%) du béton léger de PSE | Perméabilité K (m/s) du béton léger de PSE |
| 63 | 4.18 | 0.00161 |
| 68 | 4.36 | 0.00168 |
| 73 | 4.55 | 0.00175 |
| 78 | 4.78 | 0.00184 |
| 83 | 4.86 | 0.00187 |
| 100 | 5 | 0.00193 |

Tableau 26 : Résultat de la porosité et de la perméabilité du béton S1

| A= 3 cm | | |
|--------------------------------|--------------------------------------|--|
| Pourcentage du polystyrène (%) | Porosité P (%) du béton léger de PSE | Perméabilité K (m/s) du béton léger de PSE |
| 63 | 4.57 | 0.001762 |
| 68 | 4.62 | 0.001782 |
| 73 | 4.70 | 0.001813 |
| 78 | 4.81 | 0.001855 |
| 83 | 4.88 | 0.001882 |
| 100 | 5 | 0.001928 |

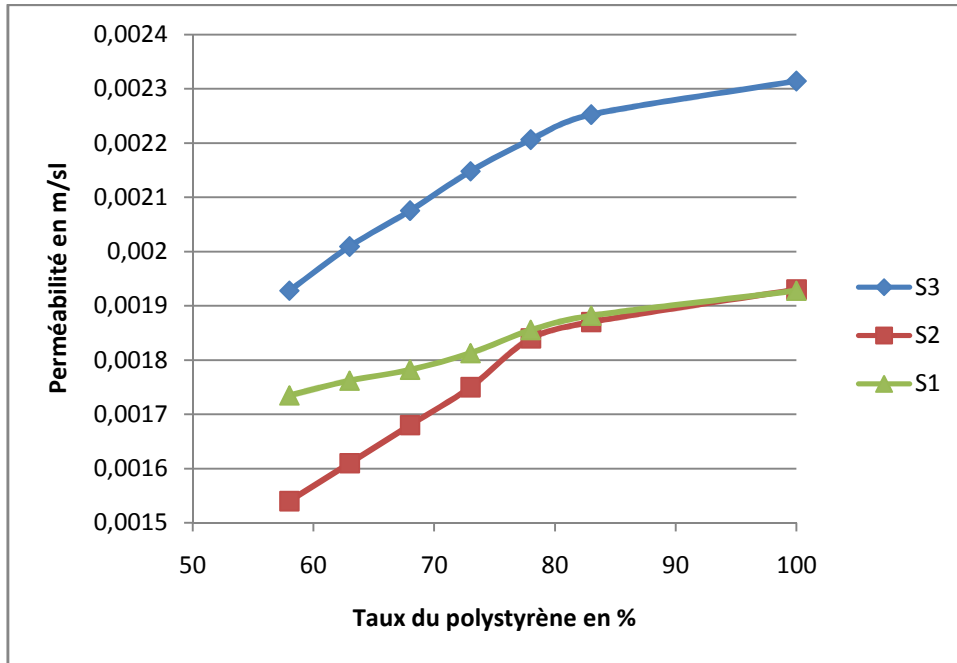


Figure 18 : Courbe de la perméabilité en fonction du taux polystyrène

Interprétation :

On a constaté que si le taux des polystyrènes augmente, la porosité et la perméabilité ne varie que très peu. Ceci peut être expliqué par la faible perméabilité du polystyrène.

Par contre la porosité et la perméabilité varie lorsque la consistance varie aussi. Ceci est expliqué par l'évaporation d'eau dans le béton en fonction de leur âge ; c'est-à-dire que dans le béton, plus la consistance est fluide, plus le béton sera poreux.

VII-2-2 Masse volumique du béton durci γ_b (kg/m³)

Le type d'essai à effectuer pour chaque variante se réalise sur douze éprouvettes. Le résultat retenu est la moyenne des mesures obtenues.

Les résultats des mesures sont donnés par le tableau ci-après.

Tableau 27 : Masse volumique du béton durci en fonction du taux de polystyrène et de l'âge

| Consistance A | Pourcentage | Masse | Masse | Masse volumique |
|---------------|-------------|---------|---------|-----------------|
| A=12 cm | 63 | 1229.54 | 1158.54 | 850.5 |
| | 68 | 1146.84 | 1079.95 | 799.5 |
| | 73 | 1074.5 | 1011.27 | 746 |
| | 78 | 997.95 | 939.74 | 694 |
| | 83 | 919.01 | 865.79 | 644 |
| | 100 | 662.37 | 635.73 | 525 |
| A = 8 cm | 63 | 1201.64 | 1150.25 | 816.5 |
| | 68 | 1128.75 | 1063.47 | 754.5 |
| | 73 | 1015.83 | 1008.05 | 690.5 |
| | 78 | 958.59 | 928.19 | 627.5 |
| | 83 | 891.69 | 881.05 | 561.5 |
| | 100 | 609.29 | 593.08 | 501.2 |
| A = 3 cm | 63 | 1189.88 | 1127.79 | 783.67 |
| | 68 | 1091.59 | 1018.32 | 711.10 |
| | 73 | 986.72 | 963.61 | 674.65 |
| | 78 | 914.36 | 889.18 | 598.08 |
| | 83 | 833.27 | 818.17 | 542.56 |
| | 100 | 548.54 | 504.84 | 476.29 |

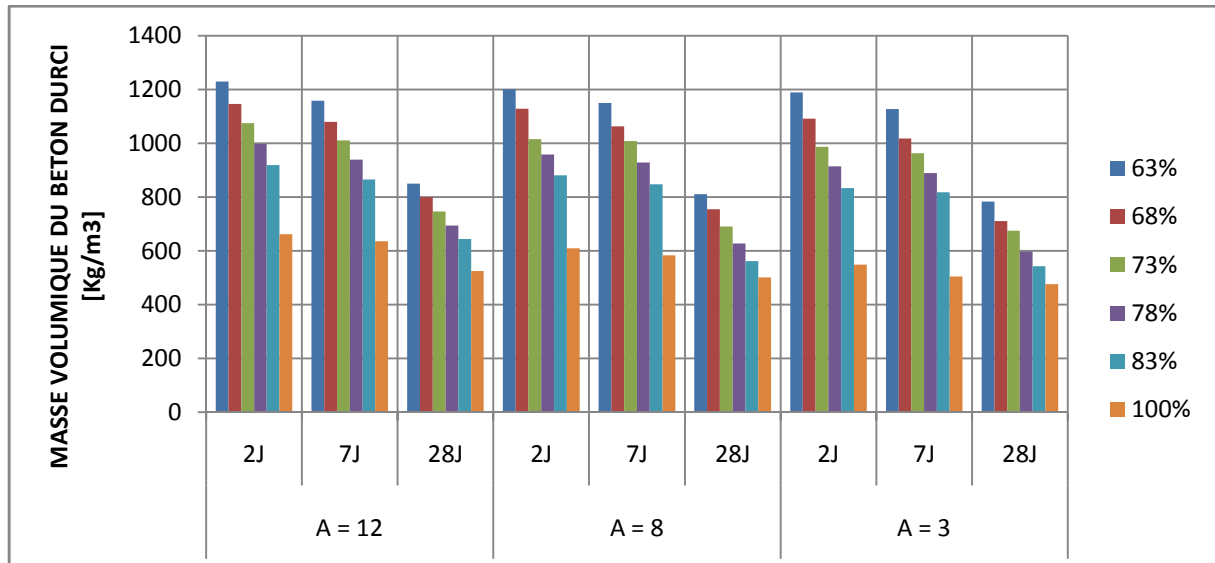


Figure 19 : Évolution de la masse volumique du béton durci en fonction du taux de polystyrène et de l'âge

Interprétation des résultats

Cette figure indique également que :

- La valeur de la masse volumique varie d'environ 30% de l'état humide à l'état sec.
- La masse volumique diminue si on augmente la quantité de PSE dans le béton.
- Les masses volumiques sont inférieures à 0.9 t/m^3 , qui sont caractéristiques des bétons ultralégers
- Elle présente une grande légèreté et permet un gain de masse jusqu'à 80 % par rapport au béton ordinaire.

VII-2-3 Résistance mécanique

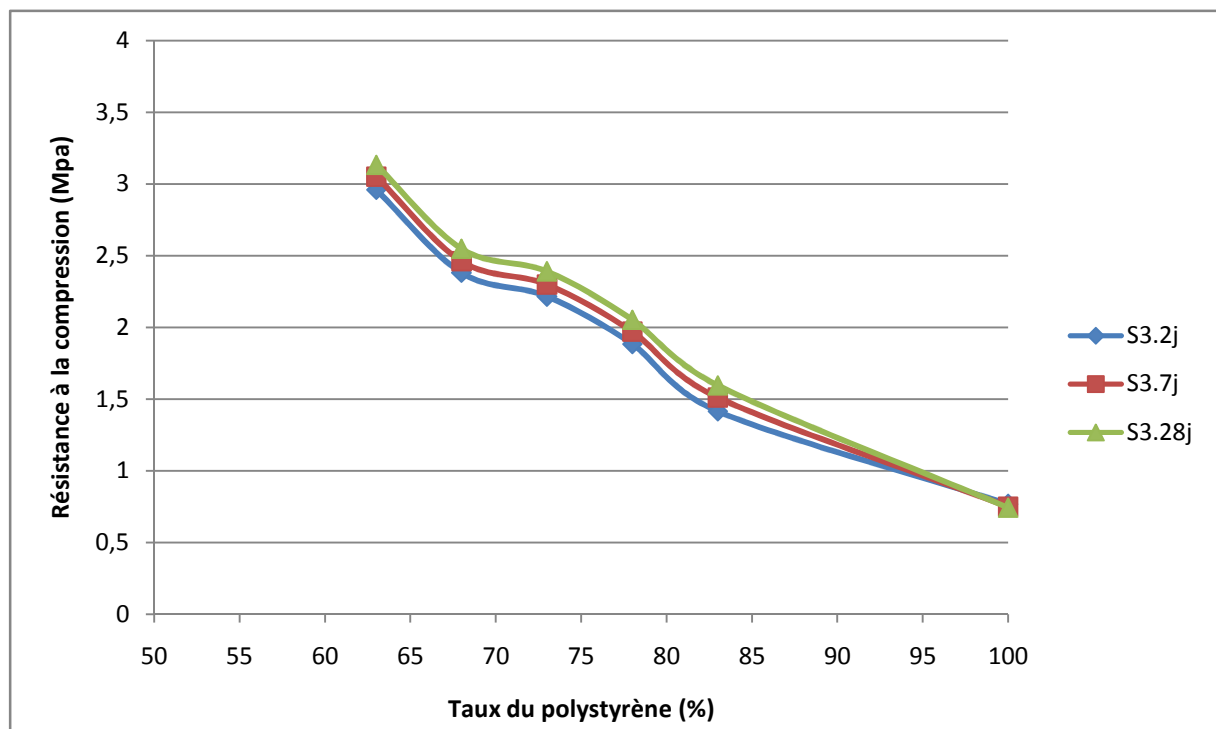
a- Résistance à la compression

La résistance à la compression R_c est une des principales caractéristiques mécaniques des bétons. Il est alors primordial de connaître les valeurs de cette caractéristique pour les différentes compositions que nous avons.

a1- Les résistances à la compression du béton S3 seront affichées dans le tableau 28.

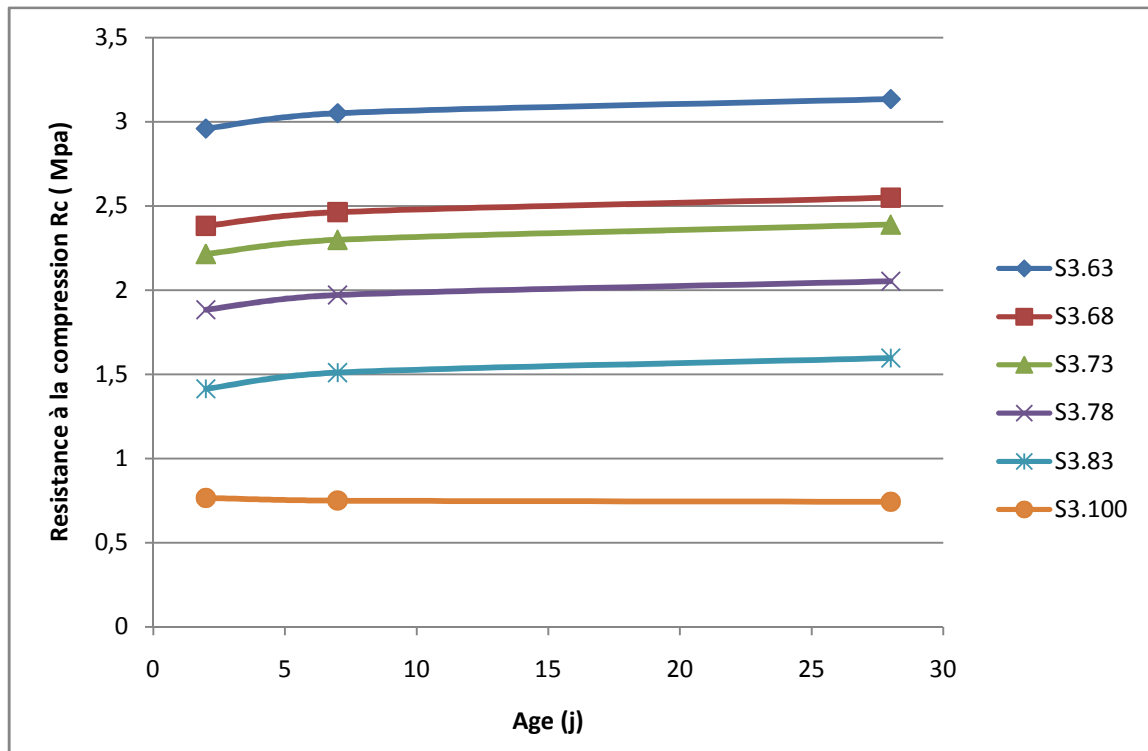
Tableau 28 : Résistance à la compression en fonction du taux de polystyrène du béton S3 (A= 12 cm)

| Age (j) | Pourcentage du | F _{max} (daN) | R _c (MPa) de | R _c (MPa) D'un |
|---------|----------------|------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 2 | 63 | 2323 | 2.959 | 10.56 |
| | 68 | 1869 | 2.381 | |
| | 73 | 1739 | 2.215 | |
| | 78 | 1479 | 1.884 | |
| | 83 | 1110 | 1.414 | |
| | 100 | 601 | 0.766 | |
| 7 | 63 | 2394 | 3.050 | 16.45 |
| | 68 | 1933 | 2.462 | |
| | 73 | 1805 | 2.299 | |
| | 78 | 1547 | 1.971 | |
| | 83 | 1185 | 1.510 | |
| | 100 | 589 | 0.750 | |
| 28 | 63 | 2460 | 3.134 | 21.56 |
| | 68 | 2000 | 2.548 | |
| | 73 | 1875 | 2.389 | |
| | 78 | 1612 | 2.053 | |
| | 83 | 1253 | 1.596 | |
| | 100 | 583 | 0.743 | |



S3.2j, S3.7j, S3.28j sont respectivement les courbes indiquant les résistances à la compression du béton S3 à 2 jours, 7 jours et 28 jours, en fonction du taux de polystyrène.

Figure 20 : Résistance à la compression en fonction de du taux de polystyrène du béton S3



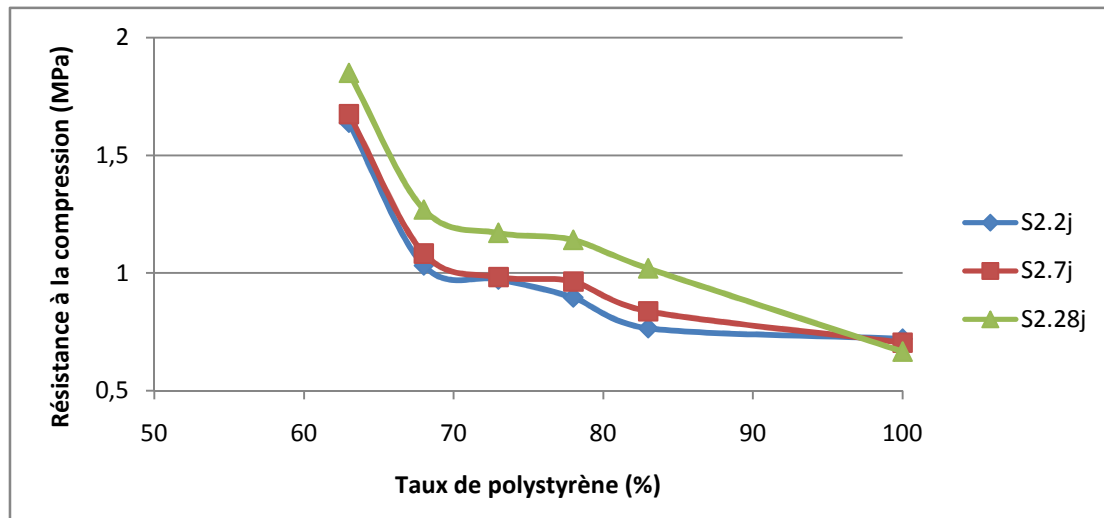
S3.63, S3.68, S3.73, S3.78, S3.83, S3.100 sont les courbes montrant les résistances à la compression en fonction de l'âge du béton S3 pour chaque variation du taux de polystyrène.

Figure 21 : Résistance à la compression en fonction de l'âge du béton S3 et du taux de polystyrène

a2- Le tableau 29 nous montre les résistances à la compression du béton S2.

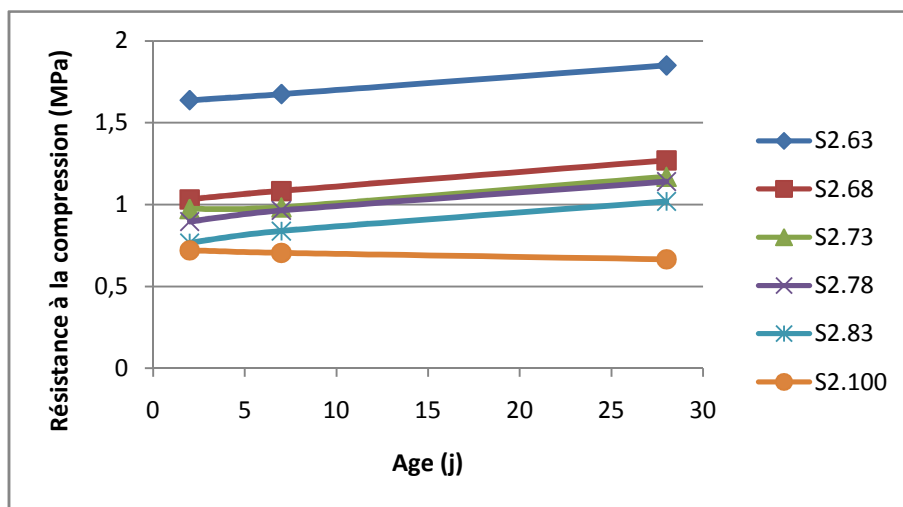
Tableau 29 : Résistance à la compression en fonction du taux du polystyrène du béton S2 (A= 8 cm)

| Age (j) | Pourcentage du polystyrène (%) | Charge maximale F_{max} (daN) | R_c (MPa) du béton léger de PSE | R_c (MPa) du béton ordinaire |
|---------|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| 2 | 63 | 1286 | 1.638 | 10.63 |
| | 68 | 810 | 1.032 | |
| | 73 | 764 | 0.973 | |
| | 78 | 703 | 0.896 | |
| | 83 | 601 | 0.766 | |
| | 100 | 565 | 0.720 | |
| 7 | 63 | 1315 | 1.675 | 16.75 |
| | 68 | 850 | 1.083 | |
| | 73 | 772 | 0.983 | |
| | 78 | 757 | 0.964 | |
| | 83 | 658 | 0.838 | |
| | 100 | 553 | 0.705 | |
| 28 | 63 | 1450 | 1.85 | 21.87 |
| | 68 | 1000 | 1.27 | |
| | 73 | 920 | 1.17 | |
| | 78 | 900 | 1.14 | |
| | 83 | 800 | 1.019 | |
| | 100 | 523 | 0.666 | |



S2.2j, S2.7j, S2.28j sont respectivement les courbes indiquant les résistances à la compression du béton S2 à 2 jours, 7 jours et 28 jours, en fonction du taux de polystyrène.

Figure 22 : Résistance à la compression en fonction du taux de polystyrène



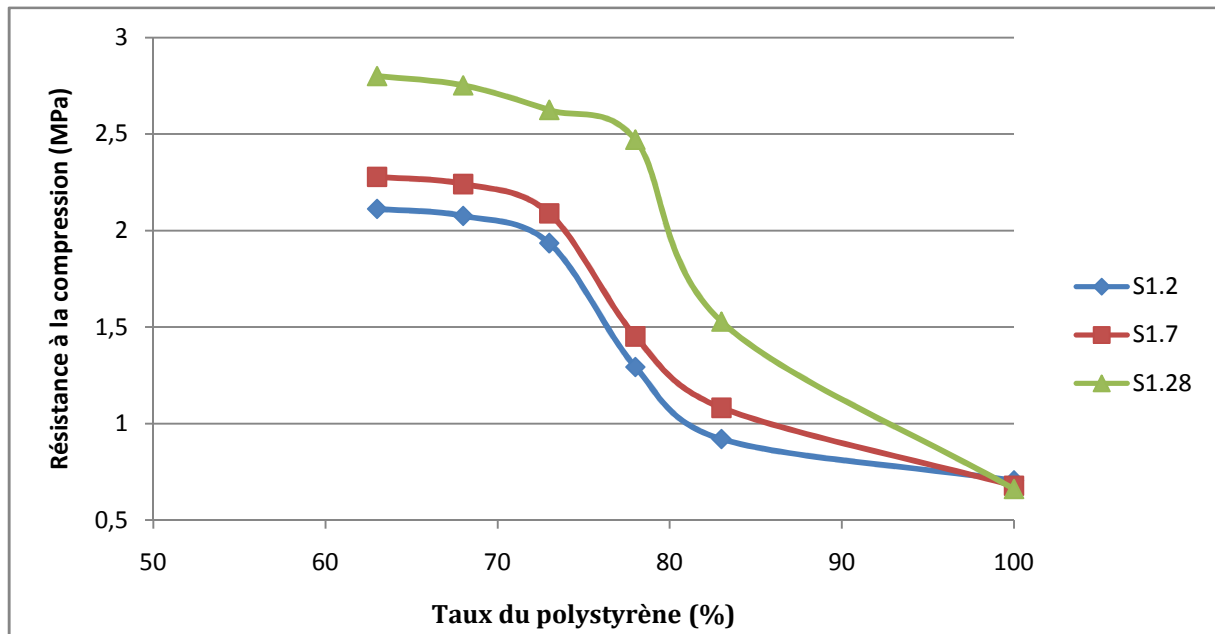
S2.63, S2.68, S2.73, S2.78, S2.83, S2.100 sont les courbes montrant les résistances à la compression en fonction de l'âge du béton S2 pour chaque variation du taux de polystyrène.

Figure 23 : Résistance à la compression en fonction de l'âge du béton S2 et du taux de polystyrène

a3- Le tableau 30 affiche les résistances à la compression du Béton S1.

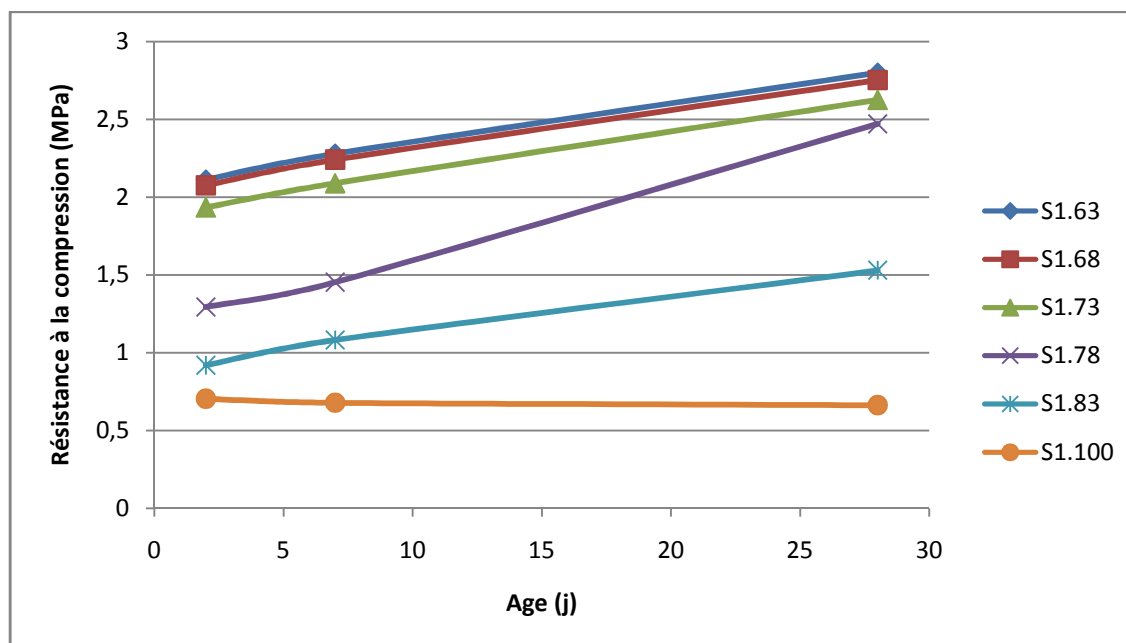
Tableau 30 : Résistance mécanique du béton S1 (A= 3cm)

| Age (j) | Pourcentage du polystyrène (%) | Charge maximale F_{max} (daN) | R_c (MPa) du béton léger de PSE | R_c (MPa) du béton ordinaire |
|---------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| 2 | 63 | 1658 | 2.112 | 10.75 |
| | 68 | 1630 | 2.076 | |
| | 73 | 1518 | 1.934 | |
| | 78 | 1015 | 1.293 | |
| | 83 | 723 | 0.92 | |
| | 100 | 553 | 0.704 | |
| 7 | 63 | 1788 | 2.278 | 16.83 |
| | 68 | 1759 | 2.241 | |
| | 73 | 1640 | 2.089 | |
| | 78 | 1140 | 1.452 | |
| | 83 | 850 | 1.082 | |
| | 100 | 532 | 0.678 | |
| 28 | 63 | 2198 | 2.800 | 21.93 |
| | 68 | 2160 | 2.752 | |
| | 73 | 2060 | 2.624 | |
| | 78 | 1940 | 2.470 | |
| | 83 | 1200 | 1.529 | |
| | 100 | 520 | 0.662 | |



S1.2j, S1.7j, S1.28j sont respectivement les courbes indiquant les résistances à la compression du béton S1 à 2 jours, 7 jours et 28 jours, en fonction du taux de polystyrène .

Figure 24 : Résistance à la compression du béton S1 en fonction de l'âge et du taux de polystyrène



S1.63, S1.68, S1.73, S1.78, S1.83, S1.100 sont les courbes montrant les résistances à la compression en fonction de l'âge du béton S1 pour chaque variation du taux de polystyrène.

Figure 25 : Résistance à la compression en fonction de l'âge et du taux de polystyrène

Interprétation :

La figure ci-dessus nous explique que :

- ❖ Les résistances à la compression des BETONS S3, S2 et S1 diminuent lorsqu'on augmente la quantité du PSE. Ces faibles résistances sont compréhensibles du fait de la très faible résistance intrinsèque des granulats de PSE.

En effet, à l'âge de 28 jours, la valeur de R_c chute de :

- 3.13 à 0.743 MPa pour $A = 12$ cm
 - 1.85 à 0.66 MPa pour $A = 8$ cm
 - 2.8 à 0.662 MPa pour $A = 3$ cm
- ❖ A même dosage, même âge, mais de consistance A différente, la résistance à la traction diminue, de la consistance molle vers une consistance ferme. La quantité du ciment C joue aussi un rôle dans la résistance du béton, or pour une consistance molle, C est plus grande que celle de consistance Plastique et ferme.

Par exemple :

Pour $A = 12$ cm, $C = 416.88$ kg/m³, %P = 63%, alors $R_c = 3.130$ MPa à 28 j

Pour $A = 8$ cm, $C = 379.5$ kg/m³, %P = 63%, alors $R_c = 1.97$ MPa à 28 j

On diminue la résistance pour une consistance $A = 8$ cm

- ❖ A même dosage, même consistance mais d'âges différents, la résistance R_c augmente du fait que le ciment commence sa prise à jeune âge et se durcit progressivement.
- ❖ Sauf, dans notre cas, pour la consistance $A = 3$ cm, on a bien compacté le béton lors de sa mise en œuvre afin d'éviter la ségrégation des éléments car on a une faible teneur en eau de gâchage.

b- Résistance à la traction R_t :

Les résultats obtenus sont donnés par les tableaux et les courbes suivantes :

b1- Résistance à la traction du Béton S3 (A = 12 cm)

Tableau 31 : Résistance à la traction du béton S3

| Age (j) | Pourcentage du polystyrène (%) | Charge maximale F_{max} (daN) | R_t (MPa) de béton léger de PSE | R_t (MPa) D'un béton ordinaire |
|---------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| 2 | 63 | 1220.74 | 0.77754 | 1.2336 |
| | 68 | 1166.29 | 0.74286 | |
| | 73 | 1150.65 | 0.7329 | |
| | 78 | 1119.47 | 0.7130 | |
| | 83 | 1075.20 | 0.6848 | |
| | 100 | 1014.22 | 0.6460 | |
| 7 | 63 | 1229.30 | 0.783 | 2.0736 |
| | 68 | 1172.79 | 0.747 | |
| | 73 | 1158.50 | 0.738 | |
| | 78 | 1127.73 | 0.7183 | |
| | 83 | 1084.24 | 0.6906 | |
| | 100 | 1012.65 | 0.645 | |

| Age (j) | Pourcentage du polystyrène (%) | Charge maximale F_{max} (daN) | R_t (MPa) de béton léger de PSE | R_t (MPa) D'un béton ordinaire |
|---------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| 28 | 63 | 1237.16 | 0.7880 | 1.9122 |
| | 68 | 1182.05 | 0.7529 | |
| | 73 | 1167.04 | 0.7433 | |
| | 78 | 1135.39 | 0.7232 | |
| | 83 | 1092.34 | 0.6958 | |
| | 100 | 995 | 0.3713 | |

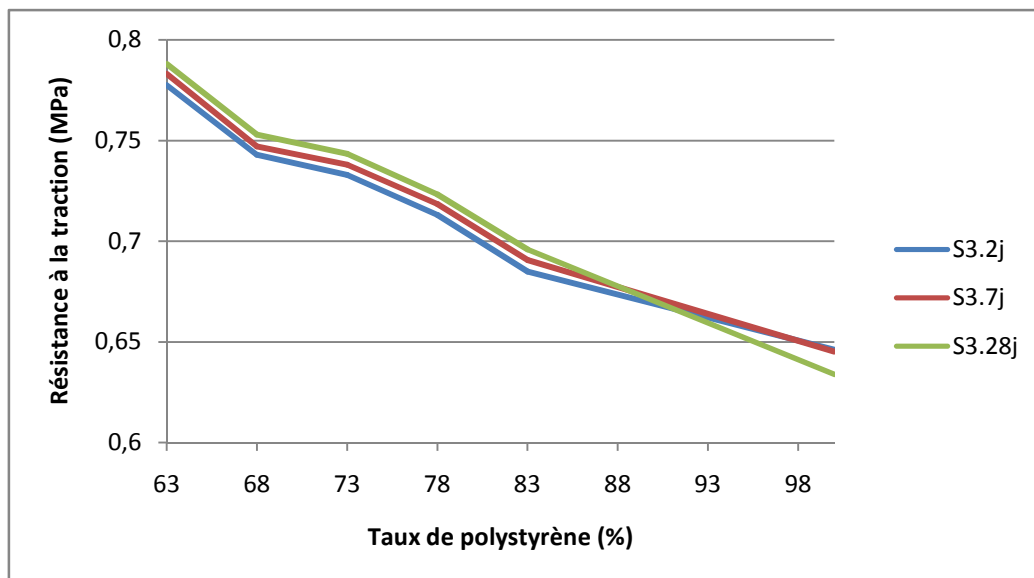


Figure 26 : Résistance à la traction du béton S3 en fonction du taux de polystyrène

b2- Résistance à la traction du béton S2 (A = 8 cm)

Tableau 32 : Résistance à la traction du béton S2

| Age (j) | Pourcentage du polystyrène (%) | Charge maximale F_{max} (daN) | R_t (MPa) du béton léger de PSE | R_t (MPa) du béton ordinaire |
|---------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| 2 | 63 | 1096.30 | 0.6983 | 1.2378 |
| | 68 | 1039.21 | 0.6619 | |
| | 73 | 1033.66 | 0.6584 | |
| | 78 | 1026.40 | 0.6538 | |
| | 83 | 1014.15 | 0.6460 | |
| | 100 | 1009.82 | 0.6432 | |
| 7 | 63 | 1099.79 | 0.7005 | 1.605 |
| | 68 | 1044.02 | 0.6650 | |
| | 73 | 1034.60 | 0.6590 | |
| | 78 | 1032.80 | 0.6578 | |
| | 83 | 1020.93 | 0.6503 | |
| | 100 | 987.23 | 0.6288 | |
| 28 | 63 | 1116.27 | 0.711 | 1.9122 |
| | 68 | 1061.63 | 0.6762 | |
| | 73 | 1052.21 | 0.6702 | |
| | 78 | 1049.39 | 0.6684 | |
| | 83 | 1037.99 | 0.6611 | |
| | 100 | 963.80 | 0.6139 | |

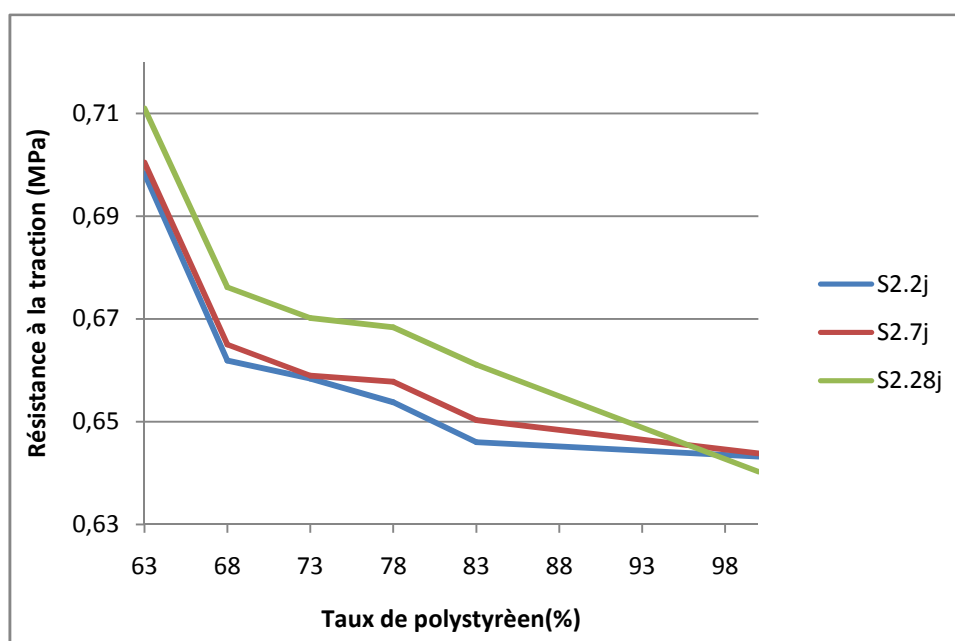


Figure 27 : Résistance à la traction du béton S2 en fonction du taux de polystyrène

b3- Résistance à la traction du béton S1 ($A = 3 \text{ cm}$)

Tableau 33 : Résistance à la traction du béton S1

| Age (j) | Pourcentage du polystyrène (%) | Charge maximale F_{\max} (daN) | R_t (MPa) du béton léger de PSE | R_t (MPa) du béton ordinaire |
|---------|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| 2 | 63 | 1140.95 | 0.7267 | 1.145 |
| | 68 | 1137.76 | 0.7246 | |
| | 73 | 1124.18 | 0.7160 | |
| | 78 | 1063.80 | 0.6776 | |
| | 83 | 1028.66 | 0.6552 | |
| | 100 | 1008.32 | 0.6422 | |
| 7 | 63 | 1157 | 0.7367 | 1.6098 |
| | 68 | 1153.10 | 0.7345 | |
| | 73 | 1139 | 0.7253 | |
| | 78 | 1078.78 | 0.6871 | |
| | 83 | 1043.92 | 0.6649 | |
| | 100 | 1005.86 | 0.6407 | |

| Age (j) | Pourcentage du polystyrène (%) | Charge maximale F_{max} (daN) | R_t (MPa) du béton léger de PSE | R_t (MPa) du béton ordinaire |
|---------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| 28 | 63 | 1205.76 | 0.768 | 1.9158 |
| | 68 | 1201.23 | 0.7651 | |
| | 73 | 1189.18 | 0.7574 | |
| | 78 | 1174.674 | 0.7482 | |
| | 83 | 1086.03 | 0.6917 | |
| | 100 | 1004.36 | 0.6397 | |

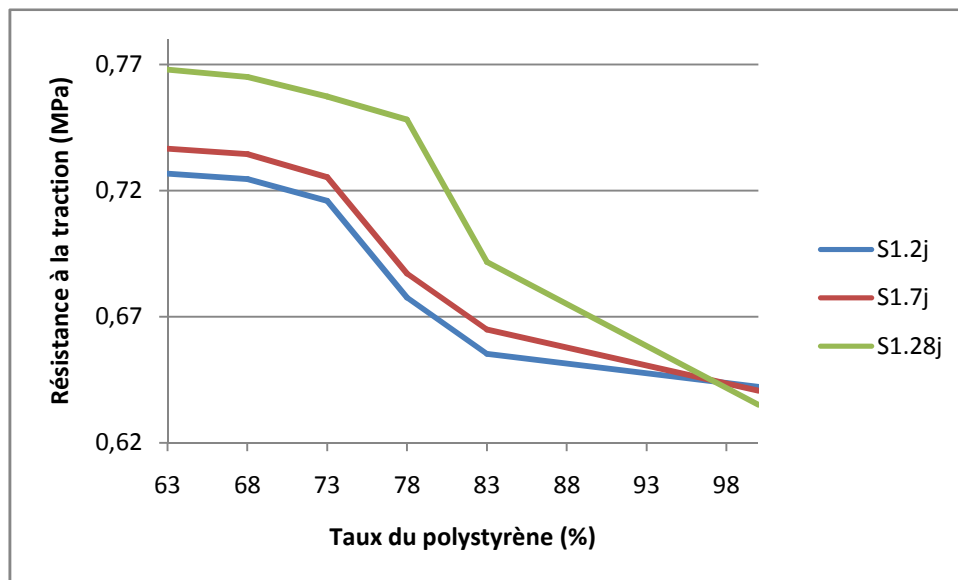


Figure 28 : Résistance à la traction du béton S1 en fonction du taux de polystyrène

Interprétation :

La valeur de la résistance à la traction augmente avec l'âge mais diminue avec le taux de polystyrène.

On constate que les valeurs de la résistance à la traction sont très faibles par rapport à celles de la résistance à la compression. Ce qui montre bien que les bétons légers que nous avons conçus résistent beaucoup mieux à la compression qu'à la traction.

VII-3- Propriété thermique

Les propriétés thermiques de notre béton seront détaillées dans le tableau ci-dessous.

VII-3-1 Conductivité thermique du béton S3**Tableau 34 : Conductivité thermique λ du béton S3 à 28j (A= 12cm)**

| Age (j) | Pourcentage du polystyrène (%) | Masse volumique du béton ρ_h (kg/m ³) | λ (w/m.K) du béton léger de PSE | λ (w/m.K) du béton ordinaire |
|---------|--------------------------------|--|---|--------------------------------------|
| 28 | 63 | 850.5 | 0.115 | 1.70 |
| | 68 | 799.5 | 0.109 | |
| | 73 | 746 | 0.092 | |
| | 78 | 694 | 0.077 | |
| | 83 | 644 | 0.056 | |
| | 100 | 525 | 0.053 | |

VII-3-2 Conductivité thermique du béton S2 (A = 8 cm)**Tableau 35 : Conductivité thermique λ du béton S2 (A= 8cm)**

| Age (j) | Pourcentage du polystyrène (%) | Masse volumique du béton ρ_h (kg/m ³) | λ (w/m.K) du béton léger de PSE | λ (w/m.K) du béton ordinaire |
|---------|--------------------------------|--|---|--------------------------------------|
| 28 | 63 | 816.5 | 0.112 | 1.27 |
| | 68 | 754.5 | 0.108 | |
| | 73 | 690.5 | 0.089 | |
| | 78 | 627.5 | 0.072 | |
| | 83 | 561.5 | 0.048 | |
| | 100 | 501.2 | 0.042 | |

VII-3-3 Conductivité thermique du béton S1 (A = 3 cm)

Tableau 36 : Conductivité thermique λ du béton S2 (A= 3cm)

| Age (j) | Pourcentage du polystyrène (%) | Masse volumique du béton ρ_h (kg/m ³) | λ (w/m.K) du béton léger de PSE | λ (w/m.K) du béton ordinaire |
|---------|--------------------------------|--|---|--------------------------------------|
| 28 | 63 | 783.67 | 0.11 | 1.27 |
| | 68 | 711.10 | 0.092 | |
| | 73 | 674.65 | 0.084 | |
| | 78 | 598.08 | 0.068 | |
| | 83 | 542.56 | 0.045 | |
| | 100 | 476.29 | 0.039 | |

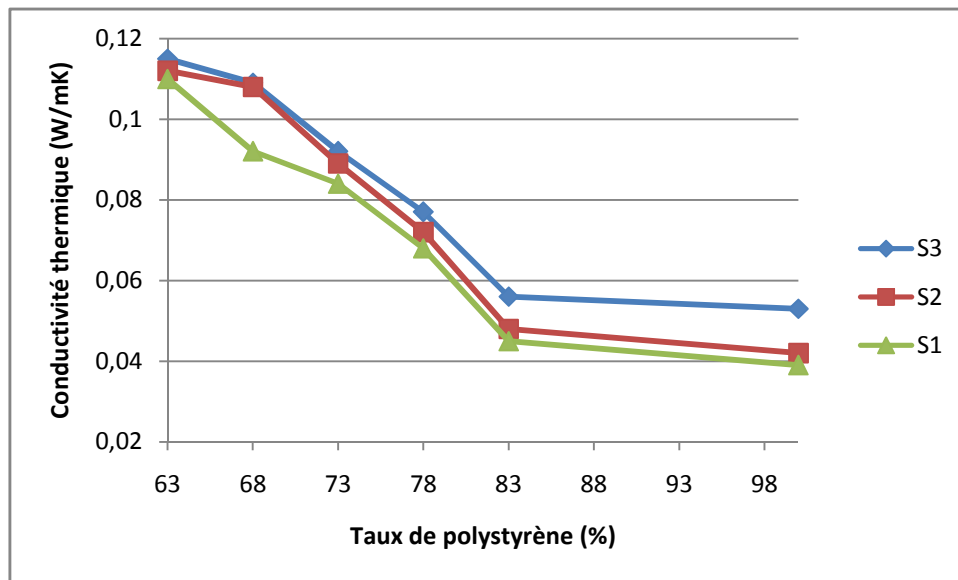


Figure 29 : Conductivité thermique du béton S3, S2,S1 en fonction de taux de polystyrène

Nous allons illustrer par la figure 27 les conductivités thermiques en fonction de leurs masses volumiques.

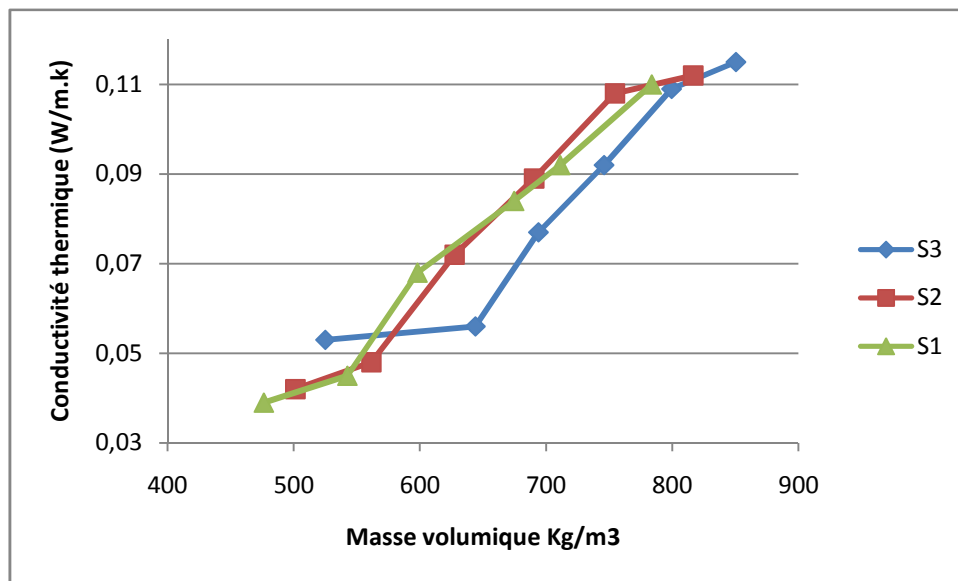


Figure 30 : Conductivité thermique du béton S1, S2 et S3 en fonction de la masse volumique

Interprétation

La figure ci-dessus nous montre que :

- ❖ Plus le pourcentage en polystyrène augmente ainsi que la masse volumique, la conductivité thermique augmente aussi.
- ❖ A consistance faible, la conductivité thermique baisse.

Alors, Plus la conductivité thermique est élevée, plus le matériau est conducteur de chaleur. Plus elle est faible, plus le produit est isolant.

Les bétons légers de polystyrène sont des meilleurs isolants thermiques que les bétons ordinaires.

VII-3-4 Propriété acoustique

L'isolation acoustique (ou phonique) : c'est l'ensemble des dispositions prises pour réduire la transmission des bruits depuis leur source jusqu'aux lieux qui doivent être protégés ou isolés. L'isolation s'oppose à la transmission du bruit d'un local à un autre. L'isolation est un affaiblissement du bruit (un gain donc) exprimé par un indice (R) indiqué en (dB) aux normes européennes en 2000.

Tableau 37 : Affaiblissement acoustique du béton léger de PSE

| Consistance A (cm) | Pourcentage du polystyrène (%) | Masse volumique ρ_b du béton kg/m ³ | Indice d'affaiblissement acoustique R (dB) | Fréquence du son (Hz) |
|-----------------------|-----------------------------------|--|--|-----------------------------|
| A= 12 cm | 63 | 850.5 | 50 | 560 |
| | 68 | 799.5 | 55 | 1000 |
| | 73 | 746 | 60 | 1540 |
| | 78 | 694 | 65 | 2150 |
| | 83 | 644 | 70 | 3240 |
| | 100 | 525 | 75 | 4550 |
| A = 8 cm | 63 | 816.5 | 54 | 1420 |
| | 68 | 754.5 | 59 | 1660 |
| | 73 | 690.5 | 63 | 2010 |
| | 78 | 627.5 | 69 | 2876 |
| | 83 | 561.5 | 73 | 3520 |
| | 100 | 501.2 | 77 | 4860 |
| A = 3 cm | 63 | 783.67 | 58 | 1483 |
| | 68 | 711.10 | 62 | 1760 |
| | 73 | 674.65 | 66 | 2310 |
| | 78 | 598.08 | 70 | 2950 |
| | 83 | 542.56 | 76 | 3845 |
| | 100 | 476.29 | 79 | 5003 |

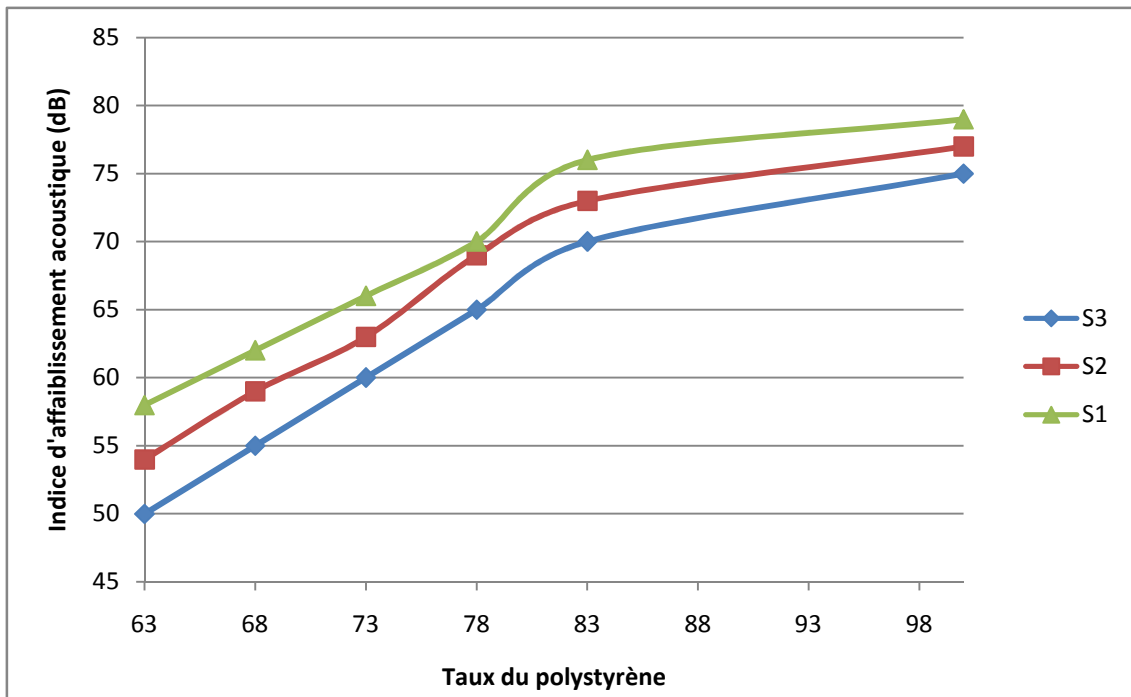


Figure 31 : Affaiblissement acoustique en fonction du taux de polystyrène

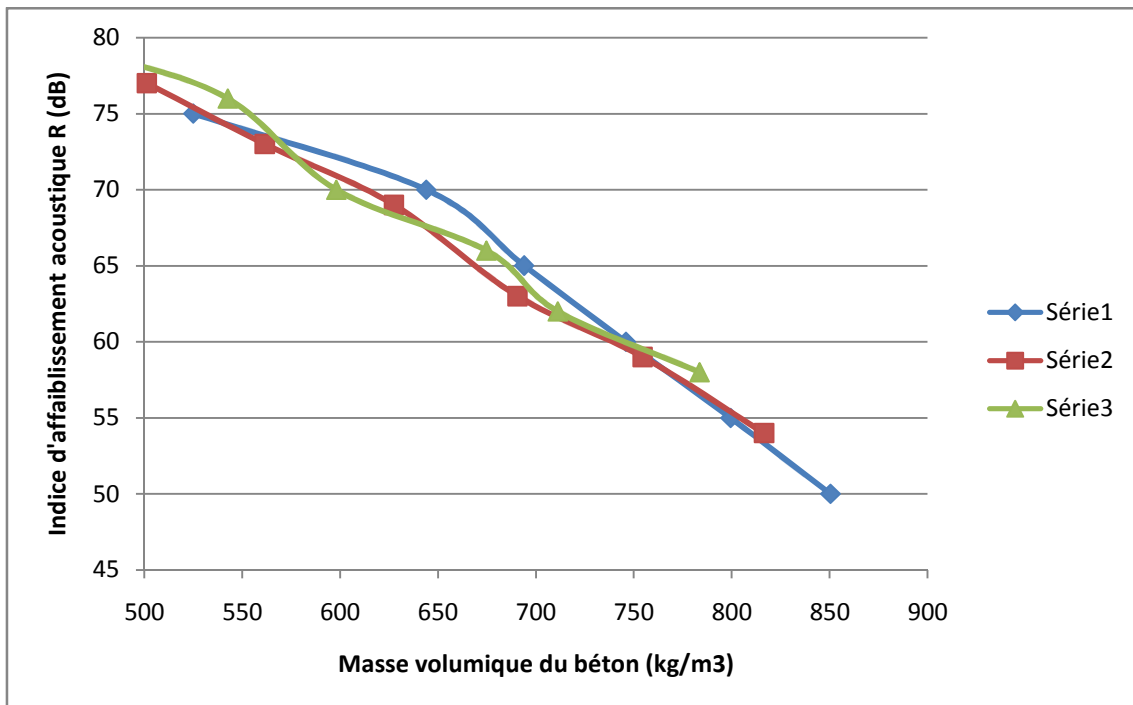


Figure 32 : Affaiblissement acoustique en fonction de la masse volumique

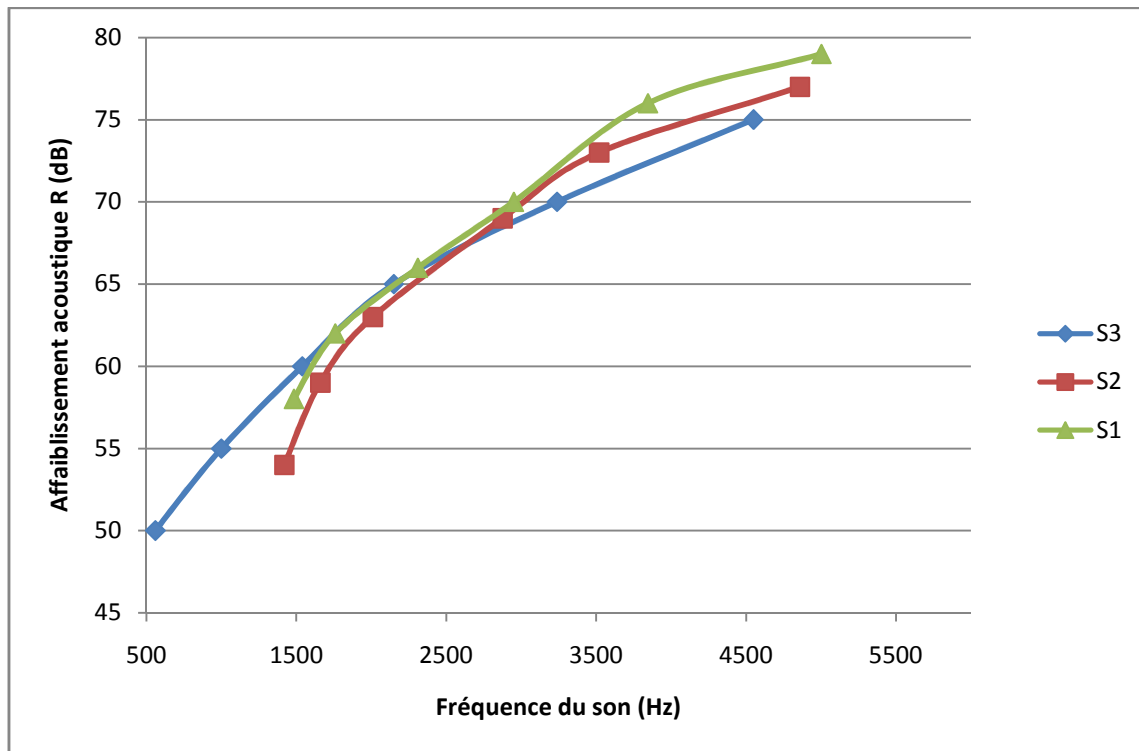


Figure 33 : Affaiblissement acoustique en fonction de la fréquence de son

Interprétation :

On remarque que l'affaiblissement acoustique :

- Augmente avec le taux de polystyrène : si le pourcentage de polystyrène augmente, elle augmente aussi ;
- Augmente avec la fréquence ;
- Augmente si la masse volumique diminue

Ces analyses sont obtenues l'absorption du son par les polystyrènes.

Si l'indice d'affaiblissement acoustique est élevé, le matériau est un bon isolant phonique.

VII-3-5 Autres propriétés

a- Tenue au feu

Pour certains éléments de structure (poteaux, poutres), on considère généralement le classement de stabilité au feu.

Pour les murs et les planchers, on considère le plus souvent le classement coupe-feu.

Tableau 38 : Propriété au feu du béton léger de PS

| Classement | Critères à satisfaire | | |
|--|-----------------------|-----------------------------------|---|
| | Stabilité mécanique | Etanchéité aux flammes et aux gaz | Isolation thermique A partir de 200 °C |
| Stable au feu (SF) | ✓ | | |
| Pare- Flammes (PF) | ✓ | ✓ | |
| Coupe-feu (CP) | ✓ | ✓ | ✓ |
| Degré de résistance au feu du béton Leger de PSE | 1h-2h | 3 h | 3h |
| Degré de résistance au feu du béton ordinaire | 3h | 5h | 5h |

Interprétation :

Le béton léger de polystyrène présente à ce titre une bonne résistance au feu.

CHAPITRE VIII- UTILISATION DU BETON LEGER A BASE DE POLYSTYRENE

Le béton léger de polystyrène est utilisable pour les applications non structurelles et aussi pour des applications spécifiques.

VIII-1- Avantage

Le béton léger de Polystyrène présente plusieurs avantages, d'après tous les résultats obtenus dans le chapitre précédent.

VIII-1-1 Ouvrable

Avec un choix de bonne consistance ($A = 8$ cm et $A = 12$ cm), il est facile et rapide à mettre en œuvre si on envisage de l'utiliser en travaux de bétonnage comme dalle, plancher, ravaillage. Mais pour une consistance ferme, il est recommandé d'ajouter un compactage, et/ou éventuellement d'utiliser un adjuvant ayant un pouvoir collant pour bien fixer les grains de PSE avec les autres composants si on envisage de l'utiliser comme brique ou parpaing de remplissage .

VIII-1-2 Légère

Plus léger qu'un mortier classique, ce béton léger de polystyrène a une masse volumique de 400 à 900 kg/m³ en comparaison à 2 500 kg/m³ pour un béton ordinaire.

Notre béton léger de polystyrène, par sa légèreté, réduit le poids mort de la construction. Les pièces de bétons légers sont donc plus légères, ce qui réduit considérablement la dimension, donc le poids, des fondations. De plus, on note une augmentation de la productivité sur le chantier en raison du faible poids du matériau. Étant donné le plus faible volume de béton utilisé, il est aussi possible d'économiser sur les quantités de ciment par rapport au béton ordinaire.

Et aussi grâce à sa légèreté, elle est pompable sur une longue distance et grandes hauteurs pour un travaux en étages ou un chantier difficile à accéder.

Les pièces de béton léger sont aussi plus faciles à manipuler et à déplacer, en raison de leur relative légèreté

VIII-1-3 Un isolant thermique

L'isolation thermique est devenue synonyme de confort et d'économie d'énergie. Beaucoup de personnes ignorent que l'isolation thermique répond à une réglementation bien précise. La réglementation thermique définit les résistances thermiques minimales pour chaque paroi de la construction et les performances requises pour les équipements (**chauffage**, ventilation...).

En termes de bâtiment, selon la norme française **RT2012**, un matériau est considéré comme isolant si sa conductivité thermique est inférieure à 0,065 watts par mètre-kelvin, Béton isolant idéal pour élaborer autant de formules de mortier léger thermo-acoustique.

Ce béton léger polystyrène a un pouvoir isolant thermique plus important qu'un mortier classique.

Sa conductivité thermique qui varie de 0.11 à 0. 3 W/m.k : selon sa consistance et la variation du taux du polystyrène.

Elle est important, pour une variation de polystyrène de 83% à 100%,car il répond au norme des exigences d'un isolation thermique (le matériau doit avoir une conductivité thermique ≤ 0.065 W/m.k)).

VIII-1-4 Un isolant phonique

Le béton léger de polystyrène a un pouvoir isolant phonique plus important qu'un mortier classique.

En résumé, les exigences, ont principalement défini :

- Isolement minimum aux bruits extérieurs : $R \geq 30$ dB ;
- Isolement aux bruits aériens intérieurs : $R \geq 58$ dB ;
- Niveau de bruit de chocs : $R \geq 58$ dB ;

En conclusion notre béton appartient à la famille des isolants phoniques car son affaiblissement acoustique R est largement supérieure à ces exigences quelque soit le taux du polystyrène.

VIII-1-5 Incombustible

Vis-à-vis de sa tenue en feu, il est incombustible.

Il possède un large degré de résistance au feu de 1h à 3h, alors il est stable mécaniquement, étanche aux flammes, et isolant thermique à une température très élevée. Alors il est assuré pendant une durée largement suffisante à une intervention et à l'évacuation des occupants.

VIII-1-6 Faible prix

Sa légèreté conduit à un faible coût des constituants de notre béton.

a- Prix d'un mètre cube de béton de polystyrène

Tableau 39 : Exemple de détermination de prix d'un mètre cube de béton

- S% = 37%, P% = 63%, Pour A = 12 cm

| Constituants | C (kg) | E (L) | S (m ³) | P (m ³) |
|--|---------|--------|---------------------|---------------------|
| Quantité | 416.88 | 250.83 | 0.230 | 0.391 |
| Prix unitaire (Ar) | 500 | 10 | 20 000 | 0 |
| Prix total des chaque constituants(Ar) | 208 440 | 2 508 | 4 600 | 0 |
| Main d'œuvre (Ar) | 15 000 | | | |
| Transport (Ar) | 15000 | | | |
| Prix de 1 m ³ du béton (Ar) | 245 500 | | | |

- S% = 32%, P% = 68%

| A (cm) | C (kg) | E (L) | S (m ³) | P (m ³) | Prix (Ar) |
|--------|--------|--------|---------------------|---------------------|-----------|
| 12 | 416.88 | 250.83 | 0.199 | 0.422 | 244 900 |

- $S\% = 27\%$, $P\% = 73\%$

| A (cm) | C (kg) | E (L) | S (m ³) | P (m ³) | Prix (Ar) |
|--------|--------|--------|---------------------|---------------------|-----------|
| 12 | 416.88 | 250.83 | 0.168 | 0.453 | 244 300 |

- $S\% = 22\%$, $P\% = 78\%$,

| A (cm) | C (kg) | E (L) | S (m ³) | P (m ³) | Prix (Ar) |
|--------|--------|--------|---------------------|---------------------|-----------|
| 12 | 416.88 | 250.83 | 0.137 | 0.484 | 243 600 |

- $S\% = 17\%$, $P\% = 83\%$

| A (cm) | C (kg) | E (L) | S (m ³) | P (m ³) | Prix (Ar) |
|--------|----------|--------|---------------------|---------------------|-----------|
| 12 | 416.88 k | 250.83 | 0.106 | 0.515 | 243 000 |

- $S\% = 0\%$, $P\% = 100\%$,

| A (cm) | C (kg) | E (L) | S (m ³) | P (m ³) | Prix (Ar) |
|--------|--------|--------|---------------------|---------------------|-----------|
| 12 | 416.88 | 250.83 | 0 | 0.621 | 240 900 |

- $S\% = 37\%$, $P\% = 63\%$

| A (cm) | C (kg) | E (L) | S (m ³) | P (m ³) | Prix (Ar) |
|--------|--------|--------|---------------------|---------------------|-----------|
| 8 | 379.5 | 228.34 | 0.238 | 0.405 | 226 700 |

- $S\% = 32\%$, $P\% = 68\%$,

| A (cm) | C (kg) | E (L) | S (m ³) | P (m ²) | Prix (Ar) |
|--------|--------|--------|---------------------|---------------------|-----------|
| 8 | 379.5 | 228.34 | 0.206 | 0.438 | 226 100 |

- S% = 27%, P% = 73%

| A (cm) | C (kg) | E (L) | S (m ³) | P (m ³) | Prix (Ar) |
|--------|--------|--------|---------------------|---------------------|-----------|
| 8 | 379.5 | 228.34 | 0.174 | 0.469 | 225 500 |

- S% = 22%, P% = 78%

| A (cm) | C (kg) | E (L) | S (m ³) | P (m ³) | Prix (Ar) |
|--------|--------|--------|---------------------|---------------------|-----------|
| 8 | 379.5 | 228.34 | 0.141 | 0.501 | 224 400 |

- S% = 17%, P% = 83%

| A (cm) | C (kg) | E(L) | S (m ³) | P (m ³) | Prix (Ar) |
|--------|--------|--------|---------------------|---------------------|-----------|
| 8 | 379.5 | 228.34 | 0.109 | 0.533 | 224 200 |

- S% = 0%, P% = 100%

| A (cm) | C (kg) | E(L) | S (m ³) | P (m ³) | Prix (Ar) |
|--------|--------|--------|---------------------|---------------------|-----------|
| 8 | 379.5 | 228.34 | 0 | 0.643 | 222 000 |

- S% = 37%, P% = 63%

| A (cm) | C (kg) | E (L) | S (m ³) | P (m ³) | Prix (Ar) |
|--------|--------|--------|---------------------|---------------------|-----------|
| 3 | 350.75 | 211.04 | 0.245 | 0.417 | 212 300 |

- S% = 32%, P% = 68%

| A (cm) | C (kg) | E (L) | S (m ³) | P (m ³) | Prix (Ar) |
|--------|--------|--------|---------------------|---------------------|-----------|
| 3 | 350.75 | 211.04 | 0.212 | 0.450 | 211 700 |

- S% = 27%, P% = 73%

| A (cm) | C (kg) | E(L) | S (m ³) | P (m ³) | Prix (Ar) |
|--------|--------|--------|---------------------|---------------------|-----------|
| 3 | 350.75 | 211.04 | 0.179 | 0.483 | 211 000 |

- S% = 22%, P% = 78%

| A (cm) | C (kg) | E (L) | S (m ³) | P (m ³) | Prix (Ar) |
|--------|--------|--------|---------------------|---------------------|-----------|
| 3 | 350.75 | 211.04 | 0.146 | 0.516 | 210 400 |

- S% = 17%, P% = 83%

| A (cm) | C (kg) | E (L) | S (m ³) | P (m ³) | Prix (Ar) |
|--------|--------|--------|---------------------|---------------------|-----------|
| 3 | 350.75 | 211.04 | 0.113 | 0.550 | 209 700 |

- S% = 0%, P% = 100%

| A (cm) | C (kg) | E (L) | S (m ³) | P (m ³) | Prix (Ar) |
|--------|--------|--------|---------------------|---------------------|-----------|
| 3 | 350.75 | 211.04 | 0 | 0.662 | 207 400 |

VIII-2- Les inconvénients majeurs de bétons léger de PSE par rapport au béton ordinaire

Le béton léger a des résistances mécaniques inférieures à celles d'un béton ordinaire ($R_c = 21$ MPa et $R_t = 2$ MPa). Le module élastique est aussi plus faible, donc la résistance à la déformation, la flèche et le point de rupture du matériau sont plus faibles. Le béton léger est un matériau fragile.

VIII-3- Utilisations

VIII-3-1 Travaux de bétonnage pour l'allègement de construction

Il est utile pour plusieurs types d'ouvrages.

- ❖ Pour une plage de masse volumique de 600- 900 kg/m³ avec un pourcentage de PSE inférieur à 83 %, il est assez résistant.

Alors il peut être utilisé comme :

- Chape légère :



Photo 3 : Chape légère en béton léger de PSE

- Rénovation plancher

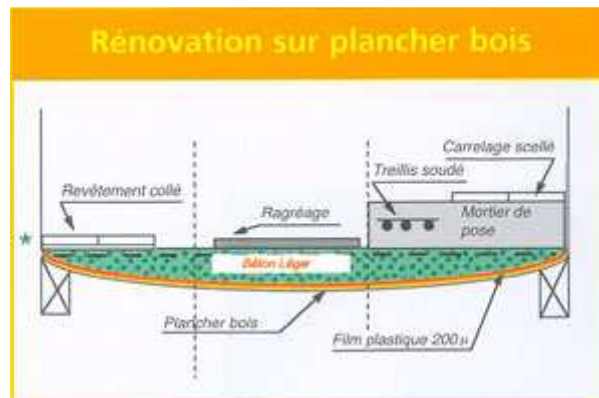


Photo 4 : Rénovation plancher

- Ravaillage

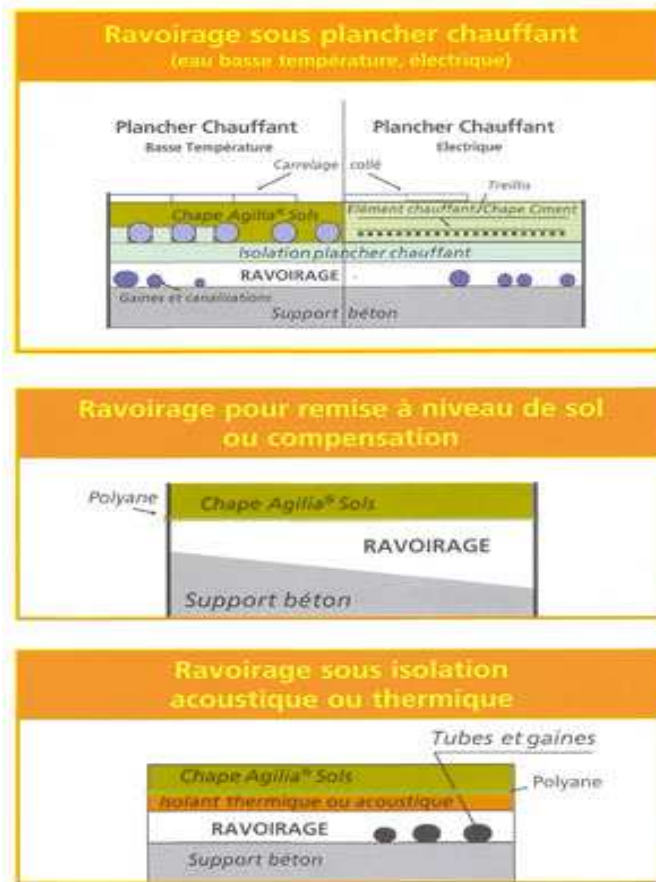


Photo 5 : Ravaillage

- Dalle avec table de compression

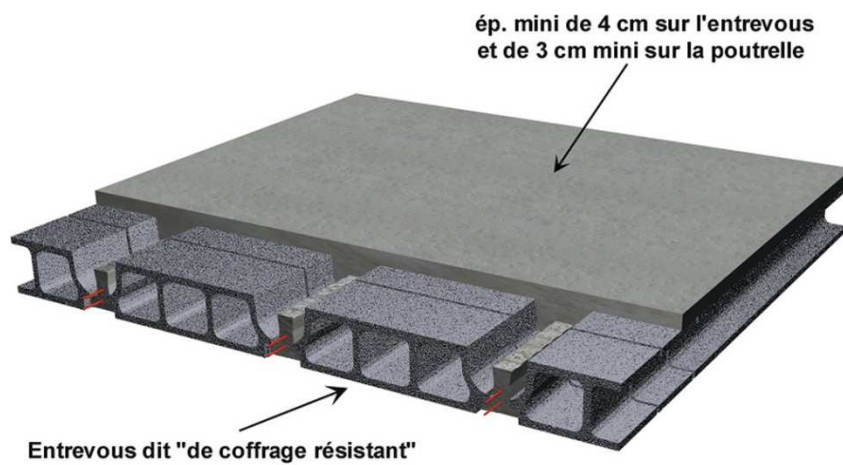


Figure 34 : Dalle avec table de compression

VIII-3-2 Isolation thermique et acoustiquea- Mur de remplissage

Cela correspond à un taux de polystyrène de 83 %, de conductivité répondant à la norme mais de résistance mécanique assez mieux que celle de taux de PSE à 100%.

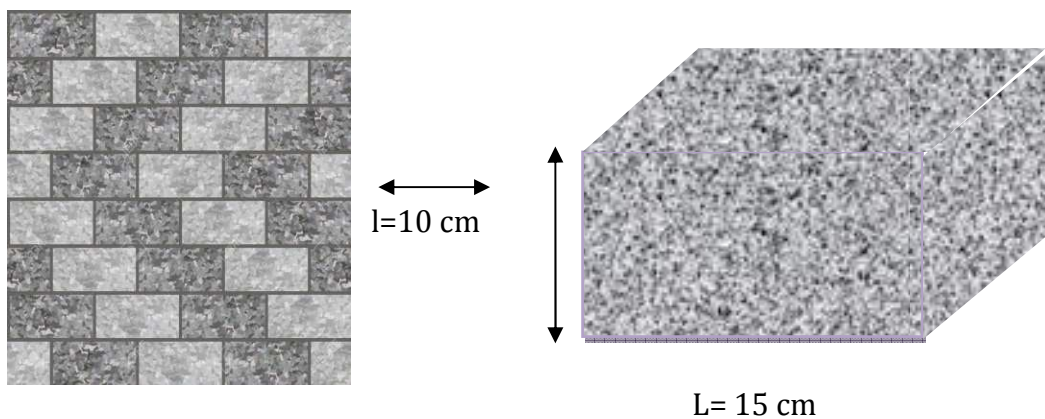


Figure 35 : Mur de remplissage

b- Mur multicouche pour cloison :

Il correspond à un taux de polystyrène de 100% et de conductivité très faible, ce qui nous permet de l'utiliser à un pur isolant thermique mai faiblement résistant.



*Photo 6 : Mur multicouche*VIII-3-3 Isolation thermique et acoustique

Il peut être utile sous-couche de système de plancher chauffant, isolation de canalisations et en mur multicouche pour l'isolation thermique et phonique.

a- Remplissage

Pour les résistances très faibles du béton léger de polystyrène à pourcentage maximum du polystyrène, il est nécessaire pour un remplissage de cloisons et pour un mur multicouche.

VIII-4- Comparaison des caractéristiques du briques léger de polystyrène avec des autres briques légers

Tableau 40 : Comparaison de la brique de béton de polystyrène avec le parpaing et le brique de terre cuite

| Matériaux | Brique léger de PSE | Parpaing de mortier de sable | Brique de terre cuite plein |
|---|------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Caractéristiques | | | |
| Dimension | 15 x 10 x 10 cm | 40 x 20 x 20 cm | 22 x 11 x 11 cm |
| Volume m³ | 1.5 x 10 ⁻³ | 3.69 x 10 ⁻³ | 2.66 x 10 ⁻³ |
| Résistance à la compression à 28j (MPa) | 2.8 | 4 | 10 |
| Résistance à la traction à 28j (MPa) | 0.6397 | 0.43 | 1.3 |
| Masse volumique γ (kg/m³) | 476.29 | 880 | 1600 |
| Conductivité thermique λ (W/m.k) | 0.039 | 0.23 | 0.84 |
| Affaiblissement | 46 | 35 | 26 |

| | | | |
|--|---|---|---|
| acoustique R (dB) | | | |
| Prix unitaire d'une brique (Ar) | 150 | 1200 | 70 |
| Matériaux | Brique léger de PSE | Parpaing de mortier de sable | Brique de terre cuite plein |
| Caractéristiques | | | |
| Observations | <p>Pour une même utilisation, il est avantageux du point de vue thermique et acoustique, permet un allègement de l'ouvrage donc une économie de béton des éléments porteurs. Mais il est moins résistant par rapport à ces deux autres.</p> | <p>Il gagne sur la résistance mécanique mais a une mauvaise propriété thermique et acoustique. Et aussi il est couteux.</p> | <p>Il gagne sur la résistance mécanique et sur le prix mais de très mauvaise propriété thermique et acoustique.</p> |

CHAPITRE IX- ETUDE ENVIRONNEMENTALE ET ECONOMIQUE

IX-1- Aspect environnemental

IX-1-1 But de l'étude

Pour réduire la pollution due à ces matériaux afin de préserver la nature, il faut limiter autant que possible la production des produits de PSE et prévoir des méthodes de recyclage appropriées.

L'une des méthodes de recyclage de ces matériaux en particulier que nous avons proposée est leur réutilisation pour la fabrication des bétons légers afin de réduire la pollution de l'environnement.



Photo 7 : Pollution de l'environnement par les PSE

IX-1-2 L'écotoxicité du polystyrène

Le polystyrène est un produit relativement stable dans le temps. Sa durée de vie est d'environ 1000 ans.

Si le polystyrène ne présente pas de toxicité directe, son impact sur l'environnement est très fort.

Concrètement, avaler du polystyrène ne représente pas de danger chimique car il ne peut être assimilé par l'organisme, mais il obstrue les voies intestinales et affecte ainsi la faune aquatique.

D'autre part, le polystyrène se dépolymérise au cours du temps en se retransformant en styrène, et celui-ci est une substance cancérigène potentielle et est mutagène.

IX-1-3 Les risques liés à l'ingestion de polystyrène

Les plastiques, dont le polystyrène, sont ingérés par les oiseaux marins et d'autres animaux qui les prennent pour des proies. De nombreux oiseaux et leurs poussins ont été retrouvés morts, l'estomac rempli d'objets en plastique de taille moyenne comme des bouchons de bouteille, des briquets, des ballons et des billes de polystyrène. La faune aquatique confond les billes de polystyrène avec des œufs de poissons.

On a estimé à plus d'un million les oiseaux marins et à un millier les mammifères marins et les tortues de mer tués chaque année par l'ingestion de plastiques ou captifs des déchets.

IX-1-4 La toxicité du styrène

Le styrène est le produit de dégradation du polystyrène. C'est un composé chimique incolore, huileux, toxique et inflammable.

Le profil de risques du styrène a été évalué par groupe d'expert sur les aspects scientifiques de la pollution marine (GESAMP) dont les évaluations servent de base à la classification MARPOL (Programme des Nations Unis pour la Pollution Marine).

Toxicité°

Sur l'échelle du MARPOL, le styrène a une toxicité B (dans une échelle décroissante de A à D), c'est à dire qu'il est toxique mais peu persistant dans l'environnement. Il persiste dans un milieu marin pendant quelques jours, et est peu bioaccumulable. Les doses létales sont faibles.

Vis-à-vis des poissons, elles sont comprises entre 10 et 100 mg/L. Pour des petits crustacés, elles se situent entre 5 et 10 mg/L. Pour les algues, des effets toxiques réversibles sont perceptibles à 1 mg/L.

a- Effet à court terme°:

Des études sur des animaux ont révélé que la respiration de vapeurs de styrène pendant de courtes durées entraîne un endommagement des cloisons nasales. De plus, l'inhalation de concentrations élevées de styrène peut occasionner des troubles du système nerveux, tels que de la faiblesse musculaire, des nausées ainsi qu'une irritation des yeux, du nez et de la gorge.

Le contact direct sur la peau de lapins entraîne une irritation. L'ingestion du liquide peut entraîner une aspiration au niveau des poumons avec un risque de pneumopathie.

Les études sur des animaux ont montré un effet négatif de l'exposition à de très hauts taux de styrène pendant de courtes périodes sur la reproduction et le développement du fœtus.

b- Effet à long terme°:

Il est capable d'induire une modification de la couleur ("tainting") et du goût des aliments marins : des organismes en contact avec du styrène peuvent donc, temporairement (moins d'un mois), avoir un goût de styrène (un goût dans la chair des poissons a été observé pour une teneur de 0,25 mg/L dans l'eau).

Les études sur des animaux ont montré que l'ingestion de concentrations élevées de styrène sur plusieurs semaines occasionne des dommages au foie, aux reins, au cerveau et aux poumons.

Un contact répété ou prolongé peut causer une sensibilisation cutanée, et engendrer une dermatite, ou encore causer de l'asthme. La substance peut avoir des effets sur le système nerveux central. (Extrait de la Fiche Internationale de Sécurité Chimique)

D'après l'Agence internationale de recherche sur le cancer, des études sur des animaux ont montré que le styrène est un cancérogène possible par inhalation ou ingestion. De plus, le styrène est considéré comme mutagène, c'est-à-dire qu'il peut provoquer sur le long terme des mutations génétiques (qui n'auraient pas été engendrées sans perturbation des équilibres biologiques).

Quantifications des déchets de PSE annuels :

PRODUCTION en 2012, en milliers de tonne :

Tableau 41 : Production de PSE en 2012

| | Polystyrène | Polystyrène expansé |
|------------------|-------------|---------------------|
| Monde | 10 000 | 6300 |
| Union européenne | 1979 | 1596 |
| Etats-Unis | 2076 | 399 |
| Japon | 589 | 112 |
| Allemagne | 368 | 534 |
| France | 441 | 139 |
| Madagascar | 15 | 8 |

IX-2- Volet économiques

Le béton léger de polystyrène est économique par rapport aux autres bétons usuels.

Un élément essentiel dans ce béton est le PSE -granulés (environ 80 %). Ce pourcentage élevé donne une légèreté et permet au produit d'être transportés par camion, par rapport au béton ordinaire, ce qui nous procure une économie de consommation de carburant, qui contribue à un produit plus écologique.

Il est aussi de faible coût, de bonne qualité.

Ce béton possède plusieurs qualités matérielles positives à l'égard de l'isolation, de résistance au feu, propriétés structurales et entretien.

Nous venons de découvrir deux types de bétons légers dont le Polystyrène expansé est un des constituants qui se différencie par leur taux de polystyrène et leur utilisations..

Après avoir tenu compte des prix actuels des éléments constitutifs de ces matériaux nous avons estimé le prix de revient de chaque type de béton précédent.

Selon la quantité de PSE, le prix de revient de béton léger de polystyrène varie de 20 000 à 240 000 Ar /m³ alors que pour le béton ordinaire, il varie de 350 000 Ar à 500 000 Ar et par exemple un béton léger de Polyéthylène Téréphtalate son prix varie de 250 000 Ar à

450 000 Ar. Ces prix ne tiennent pas compte des prix des PSE qui sont considérées comme des déchets publics.

L'étude bibliographique permet de dire que par rapport aux prix actuels des bétons légers, les bétons que nous avons étudiés ont des prix abordables.

Du point de vue économique, la production d'une grande quantité de ces types de bétons légers que nous avons conçus sera possible si toutes les infrastructures sont mises en place. Et on pourra même envisager l'exportation des produits finis de ces nouveaux matériaux.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Cette étude concerne le composite ciment- polystyrène. Ces matériaux constituent en fait des bétons légers et ultra légers. L'étude a été donc faite en adoptant la formulation de DREUX-GORISSE.

Une partie bibliographique nous a permis de nous familiariser avec les matériaux qui font l'objet de l'étude ainsi qu'avec les matières premières qui les constituent.

L'étude expérimentale a montré que le ciment et le polystyrène sont bien compatibles ; les constituants se mélangent bien, sans présenter des phénomènes de ségrégation, malgré la grande différence entre leurs masses volumiques, et ceci quelque soit les proportions utilisées.

Les résultats obtenus de cette étude ont montré que :

- Les Béton S1, S2 et S3 sont des bétons légers ($\rho < 2000 \text{ kg/m}^3$).
- la légèreté de ces bétons augmente avec la quantité de PSE qu'ils contiennent.
- la présence de PSE dans ces matériaux entraîne une baisse importante des résistances mécaniques.
- les bétons S3 sont plus lourds que les bétons S2 et S1 mais il résiste mieux à la compression.

Les compositions qui ont données des résistances faibles mais avec des masses volumiques faibles peuvent être retenues pour la fabrication d'éléments de remplissage et d'isolation. Celles qui correspondent à des résistances élevées, pourront donner des bétons de structure et des produits moulés légers.

Nous venons de créer des bétons qui peuvent entrer maintenant dans la famille des bétons légers. Les résultats obtenus concernent la masse volumique, la résistance à la compression, la porosité, la perméabilité, la résistance à la traction, la conductivité thermique, l'indice d'affaiblissement acoustique et la tenue en feu.

Pour mieux connaître ces types de bétons, d'autres essais seront nécessaires pour avoir les autres propriétés et savoir leurs comportements face à d'autres sollicitations.

Les bétons que nous avons conçus sont des matériaux qui peuvent jouer deux rôles importants à savoir le rôle des bétons légers dans la construction des bâtiments et dans le domaine des

travaux publics d'une part , et d'autre part celui des matériaux qui réduisent la dégradation de l'environnement causée par les déchets de PSE jetés partout.

Nous espérons, par cette étude, avoir apporté notre contribution à la recherche de matériaux nouveau et indirectement à la valorisation du secteur bâtiment

BIBLIOGRAPHIE

- [1] : ASQUAPRO (Association pour la qualité de projection de mortiers et bétons),
Fascicule « Contrôles – Partie A », Version juillet 2007
- [2] : BERNIER Gérard, *Formulation des bétons*, 2004
- [3] : BLACKBURN Dany, *Le développement d'un système constructif de plancher pour l'habitat urbain de Hanoi : la dalle en béton léger*, Maîtrise en Sciences de l'architecture – Projet Vietnam, Université LAVAL (2004)
- [4] : BLACKBURN Dany, *Technologie des bétons*, Université LAVAL (2006)
- [5] : Bricoleur Du Dimanche, *Le monomur : l'isolation au coeur du Bâti* (2008)
- [6] : DALLEMAGNE Roland, GOURGAND Joël, CIMbéton, *Les bétons dans la construction*, Les Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau (2005)
- [7] : DGINSTAT/D S E/SSES/COMEXT/Octobre 2010
- [8] : Encyclopédie Microsoft Encarta 2008
- [9] : Encyclopédia Universalis, *Le béton 2009*
- [10] : MILED Karim, *Effet de taille dans le béton léger de polystyrène expansé*, 2005
- [11] : Musée des arts et métiers, « *Bétons : bétonnez-vous !* », dossier de presse bétons
24/05/06
- [12] : Melle Lechgueur, *Matériaux de construction*, 2001
- [13] : Jean-Pierre MAGNAN, *Propriétés mécaniques du polystyrène expansé*, 2006
- [14] : TAMBA Seni, *Bétons légers à base de déchets celluloseux*, Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, 2001

[15] : Techniques de l'Ingénieur (Bases documentaires techniques et scientifiques)

[16] : WALTHER René et MIEHLBRADT Manfred, *Dimensionnement des structures en béton*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 1990

[17] :BOUTIBA Adjia, « Accélération du durcissement d'un béton, Mémoire d'ingénieur en Matériaux, Ecole Polytechnique de Lausanne, 2003

WEBOGRAPHIE

[1] : Wikipédia, *Béton* (2009)

[2] : www.agrestatechnologies.com (2009)

[3] : www.cobil.fr/styrobéton (Novembre 2008)

[4] : <http://www.techniques-ingenieur.fr>

[5] : (<http://www.editions-vm.com>).

[6] : [www.google.fr/polyéthylène téréphtalate Goodfellow](http://www.google.fr/polyéthylène%20téréphtalate%20Goodfellow) (Août 2010)

[7] : [www.marnebeton.fr/béton léger](http://www.marnebeton.fr/béton%20léger) (2008)

[8] : www.packplast.org (2009)

[9] : www.ecopse.fr

[10] : [www.pointp.fr/béton léger argile schiste](http://www.pointp.fr/béton%20léger%20argile%20schiste) (2008)

[11] : www.sigma-beton.fr/accueil.php (Novembre 2008)

[12] : www.gramme.be

[13] : fr.wikipedia.org/wiki/Polystyrène

ANNEXES

Tableau 42 : Correction sur le dosage de pate en fonction de D_{max}

| | | | | | | | |
|--|-----|----|------|----|------|----|-----|
| Dimension maximale D_{max} des granulats en mm | 5 | 8 | 12.5 | 20 | 31.5 | 50 | 80 |
| Correction sur le dosage de pate en % | +15 | +9 | +4 | 0 | -4 | -8 | -12 |

Tableau 43 : Valeur de K

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

Tableau 44 : Compacité c_0 du béton en fonction de D_{max} , de la consistance et du serrage

| Consistance | Serrage | compacité (c_0) | | | | | | |
|------------------|---------------------|---------------------|-------------|----------------|--------------|----------------|--------------|--------------|
| | | $D_{max}=5$ | $D_{max}=8$ | $D_{max}=12,5$ | $D_{max}=20$ | $D_{max}=31,5$ | $D_{max}=50$ | $D_{max}=80$ |
| Molle (TP-FI) | Piquage | 0,750 | 0,780 | 0,795 | 0,805 | 0,810 | 0,815 | 0,820 |
| | 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 (P) | 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 (F) | 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 |

Nota :

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

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

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

* Pour les granulats légers on pourra diminuer de 0,03 les valeurs de c : ($c_2 = -0.03$)

* Pour un dosage en ciment $C \neq 350 \text{ kg/m}^3$ on apportera le terme correctif suivant :
($c_3 = (C - 350) / 5000$)

Tableau 45 : Coefficient granulaire G en fonction de la qualité et la taille maximale des granulats D_{max}

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

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

Tableau 46 : Types de ciment et composition

| Désignation | Notation | Clinker (1) K | Laitier de haut Fourneau S | Fumée de silice D ³ | Pouzzolanes naturelles Z | Cendres volantes | | Schistes calcinés T | Calcaires L | Constituants secondaires (2) |
|---|---------------|---------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|------------------|-------------|---------------------------|----------------|------------------------------------|
| | | | | | | Siliceuse V | Calciq W | | | |
| Ciment Portland | CPA-CEM I | 95-100 | - | - | - | - | - | - | - | 0-5 |
| Ciment portland composé | CPJ-CEM II/A | 80-94 | ← 6-20 ⁽⁴⁾⁽⁵⁾ → | | | | | | | |
| | CPJ-CEM II/B | 65-79 | ← 21-35 ⁽⁴⁾⁽⁵⁾ → | | | | | | | |
| Ciment de haut fourneau | CHF-CEM III/A | 35-64 | 36-65 ⁽³⁾ | - | - | - | - | - | - | 0-5 |
| | CHF-CEM III/B | 20-34 | 66-80 ⁽³⁾ | - | - | - | - | - | - | 0-5 |
| | CLK-CEM III/C | 5-19 | 81-95 ⁽³⁾ | - | - | - | - | - | - | 0-5 |
| Ciment pouzzolani ques | CPZ-CEM IV/A | 65-90 | ← 10-35 ⁽³⁾ → | | | - | - | - | - | 0-5 |
| | CPZ-CEM IV/B | 45-64 | ← 36-55 ⁽³⁾ → | | | - | - | - | - | 0-5 |
| Ciment de laitier et aux cendres | CLC-CEM V/A | 40-64 | 18-30 ⁽³⁾ | - | ← 18-30 ⁽³⁾ → | | - | - | - | 0-5 |
| | CLC-CEM V/B | 20-39 | 31-50 ⁽³⁾ | - | ← 31-50 ⁽³⁾ → | | - | - | - | 0-5 |

(1) : Les valeurs indiquées se réfèrent au noyau du ciment, à l'exception des sulfates de calcium et des additifs.

(2) : les constituants secondaires peuvent être du filler ou bien un ou plus des constituants principaux, sauf lorsque ceux-ci sont incorporés en tant que constituants principaux du ciment.

(3) : la proportion de fumées de silice est limitée à 10% dans tous les ciments.

(4) : la proportion de filler est limitée à 5%.

(5) : le fabricant est tenu à une déclaration de composition stipulant les constituants utilisés et la proportion de chacun d'eux ; il s'engage à ne pas faire varier ces proportions au-delà d'une fourchette de plus ou moins 5 points, le clinker étant aussi un constituant.

Le tableau suivant indique les valeurs approximatives des masses des constituants nécessaires à la fabrication d'un mètre cube de béton ordinaire. Il donne également le prix de revient estimatif de ce matériau en tenant compte du prix actuel de chaque constituant.

Tableau 47 : Prix d'un mètre cube de béton ordinaire

| C (Kg) | S (Kg) | Gravier 5/15 ou 15/25 (Kg) | E (Kg) | Prix de revient (Ar) |
|--------|--------|-------------------------------|--------|--------------------------------|
| 350 | 590 | 1180 | 210 | 500.000 |

Tableau 48 : Affaiblissements acoustiques de quelques bétons légers poue une épaisseur $e = 20\text{ cm}$

| | ρ [kg/m ³] | Fréquence | | | | | |
|--|-----------------------------|-----------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | | 125Hz | 250Hz | 500Hz | 1000Hz | 2000Hz | 4000Hz |
| Béton caverneux de schiste expansé | 720 | 42,08 | 48,11 | 54,13 | 60,15 | 66,17 | 72,19 |
| Béton plein d'argile expansée avec sable léger | 1265 | 46,98 | 53,00 | 59,02 | 65,04 | 71,06 | 77,08 |
| Béton plein de schiste expansé avec sable léger | 1377 | 47,24 | 53,26 | 59,28 | 65,30 | 71,32 | 77,34 |
| Béton plein de polystyrène expansé | 1536 | 48,67 | 54,69 | 60,71 | 66,73 | 72,75 | 78,77 |
| Béton plein d'argile expansée avec sable naturel | 1640 | 49,23 | 55,26 | 61,20 | 67,30 | 73,32 | 79,34 |
| béton plein de schiste expansé avec sable naturel | 1760 | 49,85 | 55,87 | 61,89 | 67,91 | 73,93 | 79,95 |

TABLE DES MATIERES

| | |
|---|-----------|
| CHAPITRE I- GENERALITES SUR LES BETONS..... | 4 |
| I-1- Définitions | 4 |
| I-2- Types du béton..... | 4 |
| I-3- Les composants du Béton | 4 |
| I-3-1 Le ciment..... | 5 |
| I-3-2 Eau..... | 6 |
| I-3-3 Sable..... | 7 |
| I-3-4 Gravier..... | 7 |
| I-3-5 Adjuvants | 7 |
| CHAPITRE II- GENERALITES SUR LES BETONS LEGERES..... | 9 |
| II-1- Définitions | 9 |
| II-2- Types de Béton légers | 9 |
| II-2-1 Béton à base de granulats légers..... | 9 |
| II-2-2 Béton cellulaire : | 10 |
| II-2-3 Bétons caverneux..... | 11 |
| II-3- Avantages du Béton léger | 12 |
| II-3-1 Les inconvénients majeurs des bétons légers par rapport au béton ordinaire | 12 |
| CHAPITRE III-.....GENERALITES SUR LES POLYSTYRENES | 13 |
| III-1- Historiques sur les Polystyrènes..... | 13 |
| III-2- Définition | 13 |
| III-3- Fabrication | 13 |
| III-4- Types de Polystyrènes | 14 |
| III-5- Caractéristiques des polystyrènes expansés..... | 15 |
| III-5-1 Propriétés physiques..... | 15 |

| | | |
|---|--|-----------|
| III-5-2 | Propriétés chimiques | 16 |
| III-5-3 | Propriété thermique | 16 |
| III-5-4 | Autres propriétés | 16 |
| III-5-5 | Utilisations du PSE: | 18 |
| CHAPITRE IV-METHODOLOGIE DES DIFFERENTS ESSAIS DE CARACTERISATIONS | | 22 |
| IV-1- | Masse volumique..... | 22 |
| IV-1-1 | Masse volumique apparente ρ | 22 |
| IV-1-2 | Masse volumique absolue γ | 22 |
| IV-1-3 | Masse volumique humide ρ_{hum} | 23 |
| IV-2- | Vides | 23 |
| IV-2-1 | Vide sec v | 23 |
| IV-2-2 | vide mouillé v_m | 23 |
| IV-2-1 | Porosité p | 24 |
| IV-2-2 | Perméabilité k | 24 |
| IV-3- | Granulométrie | 26 |
| IV-3-1 | Définition..... | 26 |
| IV-3-2 | But | 26 |
| IV-3-3 | Méthode..... | 26 |
| IV-3-4 | Expression de résultats | 27 |
| IV-4- | Module de finesse M_F | 27 |
| IV-4-1 | But | 27 |
| IV-4-2 | Méthode..... | 27 |
| IV-5- | Surface spécifique SSB..... | 27 |
| IV-5-1 | But | 27 |
| IV-5-2 | Méthode..... | 27 |
| IV-5-3 | Equivalent de sable ES | 28 |
| IV-6- | Caractérisation a l'état frais du béton..... | 28 |
| IV-6-1 | Essai sur la Consistance..... | 29 |
| IV-6-1 | L'essai Vébé..... | 30 |

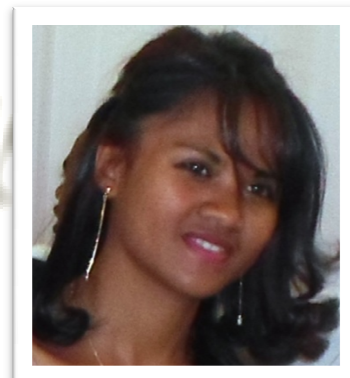
| | | |
|---|--|-----------|
| IV-6-2 | L'essai de degré de compactibilité..... | 31 |
| IV-7- | Caractérisation a l'état durci | 32 |
| IV-7-1 | Propriétés mécaniques | 32 |
| IV-7-2 | La Propriété thermique..... | 34 |
| IV-7-3 | Propriété phonique..... | 36 |
| IV-7-4 | Tenue au feu | 38 |
| CHAPITRE V- CARACTERISTIQUES DES CONSTITUANTS DU BETON A CONCEVOIR | | 40 |
| V-1- | Ciment CEM IV 42,5N | 40 |
| V-1-1 | Caractéristiques physiques du ciment..... | 40 |
| V-1-2 | Composition chimique | 41 |
| V-1-3 | Composition minéralogique..... | 41 |
| V-2- | EAU DE GACHAGE..... | 41 |
| V-3- | Granulats | 42 |
| V-3-1 | Propriété physiques du PSE | 42 |
| V-3-2 | Autres propriétés du PSE | 43 |
| V-3-3 | Propriétés physiques du sable | 43 |
| V-3-4 | Granulométrie..... | 44 |
| V-3-5 | Analyse granulométrique du polystyrène | 45 |
| V-3-6 | Courbe granulométrique des granulats..... | 46 |
| CHAPITRE VI-FORMULATION DU BETON | | 47 |
| VI-1- | Variation de la consistance pour trouver la bonne ouvrabilité..... | 47 |
| VI-1-1 | Description de la méthode de DREUX-GORISSE | 47 |
| VI-1-2 | Détermination du rapport C/E :..... | 48 |
| VI-1-3 | Détermination de C..... | 48 |
| VI-1-4 | Détermination de E | 49 |
| VI-1-5 | Corrections sur le dosage en ciment et le dosage en eau | 49 |
| VI-1-6 | Détermination du mélange optimal à minimum des vides | 50 |
| VI-1-7 | Tracé de la droite brisée de référence..... | 50 |
| VI-1-8 | Détermination des pourcentages en volume absolus des granulats | 51 |

| | | |
|--|---|-----------|
| VI-1-9 | Détermination de la compacité du béton..... | 52 |
| VI-1-10 | Détermination du V_c et V | 53 |
| VI-1-11 | Détermination des dosages en granulats | 53 |
| VI-1-12 | Obtention de la formulation théorique de béton | 54 |
| VI-2- | Variation du deuxième paramètre (pourcentage de polystyrène) | 54 |
| VI-2-1 | Pour une consistance molle de $A = 12$ cm : | 54 |
| VI-2-2 | Pour une consistance molle de $A = 8$ cm | 55 |
| VI-2-3 | Pour une consistance molle de $A = 3$ cm : | 56 |
| CHAPITRE VII- CARACTERISATION DU BETON CONCU | | 58 |
| VII-1- | Caractérisation du béton frais | 59 |
| VII-1-1 | Absence de ségrégation | 59 |
| VII-1-2 | Adhérence | 59 |
| VII-1-3 | Maniabilité | 59 |
| VII-1-4 | Masse volumique du béton à l'état frais | 60 |
| VII-2- | Caractéristiques du béton à l'état durci | 62 |
| VII-2-1 | Propriétés physiques et mécaniques | 62 |
| VII-2-2 | Masse volumique du béton durci γ_b (kg/m^3)..... | 64 |
| VII-2-3 | Résistance mécanique | 66 |
| VII-3- | Propriété thermique | 80 |
| VII-3-1 | Conductivité thermique du béton S3..... | 80 |
| VII-3-2 | Conductivité thermique du béton S2 ($A = 8$ cm) | 80 |
| VII-3-3 | Conductivité thermique du béton S1 ($A = 3$ cm) | 81 |
| VII-3-4 | Propriété acoustique..... | 82 |
| VII-3-5 | Autres propriétés | 85 |
| CHAPITRE VIII- UTILISATION DU BETON LEGER A BASE DE POLYSTYRENE | | 87 |
| VIII-1- | Avantage | 87 |
| VIII-1-1 | Ouvrable..... | 87 |
| VIII-1-2 | Légère..... | 87 |
| VIII-1-3 | Un isolant thermique | 88 |

| | |
|--|-----------|
| VIII-1-4 Un isolant phonique..... | 88 |
| VIII-1-5 Incombustible | 88 |
| VIII-1-6 Faible prix..... | 89 |
| VIII-2- Les inconvénients majeurs de bétons léger de PSE par rapport au béton ordinaire 92 | |
| VIII-3- Utilisations | 92 |
| VIII-3-1 Travaux de bétonnage pour l'allègement de construction | 92 |
| VIII-3-2 Isolation thermique et acoustique..... | 95 |
| VIII-3-3 Isolation thermique et acoustique..... | 96 |
| VIII-4- Comparaison des caractéristiques du briques léger de polystyrène avec des autres briques légers | 96 |
| CHAPITRE IX-ETUDE ENVIRONNEMENTALE ET ECONOMIQUE..... | 98 |
| IX-1- Aspect environnemental | 98 |
| IX-1-1 But de l'étude..... | 98 |
| IX-1-2 L'écotoxicité du polystyrène | 98 |
| IX-1-3 Les risques liés à l'ingestion de polystyrène..... | 99 |
| IX-1-4 La toxicité du styrène | 99 |
| IX-2- Volet économiques..... | 101 |

Nom : RAKOTOARISON Santatsoa Sedera

Titre : « CONTRIBUTION A LA VALORISATION DES DECHETS DE POLYSTYRENE
EXPANSE-APPLICATION A LA FABRICATION DE BETONS LEGERS »



Nombre de pages : 108

Nombre de figures : 35

Nombre de photos : 7

Nombre de tableaux : 48

RESUME

Ce mémoire consiste l'étude de formulation de béton léger de polystyrène expansé. Ces matériaux composites constituent en fait des bétons légers et ultra légers. L'étude est donc faite en adoptant la méthode de formulation de DREUX-GORISSE et celles des bétons légers en particulier.

Une caractérisation des matières premières a été nécessaire, avant d'entreprendre la fabrication des bétons légers, leurs caractéristiques étant très différentes. Du point de vue mise en œuvre, le polystyrène est bien compatible au ciment et aux mortiers.

Différentes types de composition ont été établis et les caractéristiques des produits obtenus seront ensuite déterminées. Pour les forts dosages en ciment, ce qui correspond en général à des masses volumiques assez élevées, les matériaux obtenus peuvent servir de béton de structure, tandis que les produits plus légers à faible dosage et moins résistants sont d'excellents éléments de remplissage et de panneaux d'isolation.

ABSTRACT

This report consists the study of formulation of light concrete of expanded polystyrene. These composite materials establish (constitute) in fact light concretes and ultra light. The study is thus made by adopting the method of formulation of DREUX-GORISSE and those of the light concretes in particular.

A characterization of raw materials was necessary, before beginning (undertaking) the manufacturing of light concretes, their characteristics being very different. From the point of implemented view, the polystyrene is very compatible with the cement and with the mortars.

Different typical of composition were established and the characteristics of the obtained products will then be determined. For the strong dosages in cement, what corresponds generally to densities rather high (high enough), the obtained materials can serve as concrete of structure, where as the lighter products with low (weak) dosage and less resistant are excellent elements of filling and panels (signs) of insulation.

Mots clés: béton léger, polystyrene, DREUX GORISSE

Rapporteur : RANAIVONARIVO Velomanantsoa Gabriely

Coordonnés de l'auteur :

Téléphone : 033 82 285 45

Email : rsantatrahillarie@gmail.com