

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Khider– Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie civil et hydraulique
Réf :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم : الهندسة المدنية و الري
المرجع :

Thèse présentée en vue de l'obtention
du diplôme de
Doctorat en sciences
Spécialité : Génie Civil
Option : Matériaux de Construction

Analyse expérimentale du comportement des bétons à hautes performances légers (BHPL).

Présenté par :
BEN MESSAOUD SABAH

Soutenu publiquement le : 11/10/2018

Devant le jury composé de :

Pr. Mekki Mellas	Professeur	Président	Université de Biskra.
Dr. Mezghiche Bouzidi	Maître de Conférences 'A'	Rapporteur	Université de Biskra.
Pr. Rachid Chebili	Professeur	Co-encadrant	Université de Biskra.
Pr. Hocine Chabil	Professeur	Examineur	Université de Constantine.
Pr. Abdelouahed Kriker	Professeur	Examineur	Université d'Ouargla.
Pr. Abdelaziz Boudchicha	Professeur	Examineur	Université d'Oum El Bouaghi.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé à l'Université de Biskra (Laboratoire des Matériaux de constructions).

Je désire donc en tout premier lieu adresser toute ma reconnaissance à mon directeur de mémoire, Mr Mezghiche Bouzidi pour m'avoir fait confiance et m'avoir dirigé pendant ce travail, je tiens tout particulièrement à le remercier pour sa patience tout au long de son encadrement, ainsi que pour la richesse de ses idées, étayées par ses vastes connaissances en matériaux de constructions. Ma gratitude va également à Mr Mekki Mellas, qui fut président du jury, bienveillant et passionné. Mrs Rachid Chebili, Hocine Chabil, Abdelouahed Kriker et Abdelaziz Boudchicha ont eu la patience, malgré leurs occupations, d'examiner ce manuscrit en tant que examinateurs : qu'ils soient tous remerciés pour leurs commentaires et pour l'indulgence dont ils ont bien voulu faire part.

Enfin, merci bien entendu aux amis que j'ai rencontré au cours de cette recherche et qui m'ont soutenu pendant ces années.

Enfin je voudrais adresser toute ma gratitude à mes parents pour leur soutien et pour m'avoir supporté et encouragé pendant ces années.

RÉSUMÉ

L'utilisation de béton à haute performance (BHP) a permis d'élargir le domaine d'emploi des bétons. Grâce à la porosité limitée, la grande durabilité, les qualités rhéologiques et ses propriétés mécaniques remarquables, son emploi se développe fortement, de nombreuses années de recherche ont été nécessaires pour produire ce type de béton spécial.

Ce travail a pour objectif de réaliser un BHP léger avec des matériaux disponibles sur le marché Algérien

L'étude expérimentale a porté sur la compatibilité ciment/superplastifiant, l'effet du rapport E/C (0.25, 0.30, 0.35, 0.5), l'effet du remplacement d'une partie du ciment par la fumée de silice (8%), l'effet du remplacement combiné d'une partie du ciment par la fumée de silice (8%) et la pouzzolane naturelle (10%, 15%, 25%) ainsi que l'effet de types des granulats sur les propriétés du béton frais et durci en utilisant la méthode de formulation de l'université de Sherbrooke qui est facile à réaliser et donne de bons résultats.

Les résultats obtenus permettent de conclure qu'il est possible de fabriquer un BHP léger dans notre pays en utilisant les matériaux existants sur le marché Algériens, ce BHP léger a des bonnes propriétés physiques et mécaniques.

Most clefs

Ciment, granulat léger, superplastifiant, fumée de silice, pouzzolane naturelle, formulation, béton à haute performance léger, résistance à la compression, module d'élasticité, perméabilité, durabilité.

ملخص

إن استعمال الخرسانة عالية الفعالية الخفيفة سمح بتوسيع مجال استخدام الخرسانة. بفضل المسامية المحدودة، الديمومة الكبيرة، خاصية السيولة و خصائصها الميكانيكية المعتبرة، استخدامها يتطور بقوة، إن إنتاج هذا النوع الخاص من الخرسانة تطلب سنوات عديدة من البحث.

هذا العمل يهدف إلى تحقيق الخرسانة عالية الفعالية الخفيفة باستعمال مواد متوفرة في السوق المحلية الجزائرية . الدراسة التجريبية ركزت على التوافق إسمنت /إضافة، أثر النسبة ماء/إسمنت (0.25، 0.3، 0.35، 0.50) وتأثير استبدال جزء من الإسمنت بنسبة من غبار السيليكا (8%)، تأثير الاستبدال الثنائي لجزء من الإسمنت بنسبة من غبار السيليكا (8%) و البوزولان الطبيعية (10%، 15%، 25%) وتأثير نوعية الحصى على خصائص الخرسانة السائلة و الصلبة باستعمال طريقة تركيبية الخرسانة لجامعة شربروك السهلة التحقيق و التي تعطي نتائج جيدة. إن النتائج المتحصل عليها تسمح باستنتاج أن من الممكن صنع الخرسانة عالية الفعالية الخفيفة في بلدنا باستعمال مواد متوفرة في السوق المحلية الجزائرية، هذه الخرسانة ذات خصائص فيزيائية و ميكانيكية جيدة.

كلمات المفاتيح

إسمنت، حصى خفيف ، إضافة، غبار السيليكا، بوزولان طبيعية، تركيبية الخرسانة، خرسانة عالية الفعالية الخفيفة ، مقاومة الضغط، معامل المرونة، النفاذية، الديمومة.

ABSTRACT

The use of light weight high performance concrete (LWHPC) has broadened the field of employment of concrete, due to the limited porosity, the high durability, excellent rheological and mechanical properties, his employment is growing strongly, many years of research were needed to produce this special type of concrete.

This work aims to realize a LWHPC with available materials on the market of Algeria.

The experimental study focused on the compatibility of cement/superplasticizer, the effect of water/cement ratio (0.25, 0.30, 0.35, 0.5), the effect of replacing a part of cement by silica fume (8%), the effect of combined replacement of a part of cement by silica fume (8%) and natural pozzolan (10%, 15%, 25%) and the effect of kind of aggregate on properties of fresh and hardened concrete using the mix design method of the Sherbrooke's University Which is easy to realize and gives a good results.

The results obtained allow to conclude that it is possible to manufacture a LWHPC in our town with available materials on the Algerian market, this LWHPC is with good mechanical and physical properties.

Key words

Cement, light weight aggregate, superplasticizer, silica fume, natural pozzolan, mix design, light weight high performance concrete, compressive strength, modulus of elasticity, permeability, durability.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	PAGE
Table des matières.....	1
Liste des figures.....	6
Liste des tableaux.....	8
Liste des photos.....	9
Liste des abréviations.....	10
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	11
1 /- Problématique.....	11
2 /- Objectifs visés par le sujet.....	13
3/- Méthodologie de travail.....	14
CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	
CONSTITUANTS DES BHPL	
I.1. Introduction.....	16
I.2. I.2. L’histoire de l’utilisation du béton léger	17
I.2.1. I.3.1. Recherche générale sur Béton à haute performance léger	18
I.3.1.1 Martinez Morales (1982)	18
I.3.1.2. Shideler (1957)	20
I.3.1.3. Zhang et Gjørv (1993)	20
I.3.1.4 Burg, Cichanski et Hoff (1998)	20
I.3.1.5. Nilsen et Aïtcen (1992)	21
I.3.1.6. Zhang et Gjørv (1991)	21
I.3.1.7. Mircea, Ioani, Filip et Pepenar (1994)	21
I.3.1.8. Reichard (1967)	22
I.3.2. Performance du béton léger dans les membres prestés	22
I.3.2.1. Construction légère et construction de ponts agrégés en Europe.....	22
I.3.2.1.1. Mays et Barnes (1991)	23
I.3.2.1.2. Laamanen (1993)	23
I.3.2.1.3. Melby, Jordet et Hansvold (1993)	23

I.3.2.1.4. Sandvik (1993)	24
I.3.3. Performance légère des ponts en béton aux États-Unis.....	24
I.3.3.1. Hanson	24
I.3.3.2. Jennings et Brewer, Département des Transports de la Floride (FDOT, 1964).....	25
I.3.3.3. Murillo, Thomas et Smith (1994).....	25
I.3.3.4. Vaysburd (1996)	26
I.4. Béton à haute performance léger.....	26
I.5. Constituants des Béton à haute performance léger.....	27
I.5.1. Granulats fins.....	27
I.5.2. Liants	27
I.5.3. Ajouts cimentaires.....	28
I.5.4. Granulat léger.....	28
I.5.4.1. Structure interne des granulats légers.....	29
I.5.4.2. Granulats légers pour bétons de structure.....	30
I.5.4.3. Procédés de fabrication des granulats légers.....	30
I.5.4.3.1. Granulats légers naturels.....	30
I.5.4.3.2. Granulats légers artificiels.....	32
I.5.4.3.2.1. Expansion des granulats légers.....	33
a) Description du phénomène.....	33
I.5.4.4. Composition chimique et minéralogique.....	35
I.5.4.5. Porosité et absorption des grains.....	36
I.5.4.6. Propriétés mécaniques.....	38
I.5.4.7. Morphologie et texture de la surface.....	39
I.5.4.8. Agrégats légers des déchets.....	40
I.5.4.9. L'influence de l'utilisation des granulats légers sur l'environnement.....	43
I.6. Conclusion.....	44

CHAPITRE II : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

PROPRIETES DES BETONS A HAUTES PERFORMANCES LEGERS

II.1. Introduction.....	45
II.2. Propriétés des bétons à hautes performances légers.....	46
II.2.1. Zone de transition interfaciale (ITZ).....	46
II.2.2. Microstructure de la matrice de ciment.....	47
II.2.3. Influence de la taille des granulats.....	48
II.2.4. Influence de la proportion volumique des granulats.....	49

II.2.5. Maniabilité et murissement des bétons légers.....	49
II.2.6. Masse volumique des bétons légers.....	50
II.2.7. Cure interne.....	51
II.2.8. Résistance à la compression.....	53
II.2.9. Module de rupture.....	56
II.2.10. Module élastique.....	56
II.2.11. Adhérence.....	57
II.2.12. Retrait et fluage.....	57
II.2.13. Courbe contrainte /déformation.....	58
II.2.14. Résistance à la fatigue.....	58
II.2.12. Caractéristiques thermiques	58
II.2.15. Durabilité.....	59
II.3. Utilisation des BHP légers.....	61
II.4. Constructions en bétons à hautes performances légers.....	62
II.4.1. La Banque d'Amérique, Charlotte, N.-C.....	62
II.4.2. Plateforme pétrolière Hibernia, 1998.....	62
II.4.3. Pont flottant Pountons.....	63
II.4. Conclusion.....	63

**CHAPITRE III : CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉS ET
COMPATIBILITÉ CIMENT/SUPERPLASTIFIANT**

III.1. Introduction	
III.2. Caractéristiques des matériaux utilisés.....	65
III.2.1. Sélection des matériaux	65
III.2.1.1. Ciment.....	65
A/- Analyse chimique et minéralogique.....	65
B /- Propriétés physiques.....	66
III.2.1.2. Sable.....	66
A/- Analyse granulométrique.....	66
B /- Propriétés physiques.....	67
III.2.1.3. Laitier cristallisée.....	67
A/- Analyse chimique.....	68
B/- Analyse granulométrique.....	68
C /- Propriétés physiques.....	69
III.2.1.4. Pouzzolane naturelle.....	69

A/- Analyse chimique.....	70
B/- Analyse granulométrique.....	70
C /- Propriétés physiques.....	70
III.2.1.5. Eau de gâchage.....	71
III.2.1.6. Superplastifiant.....	71
III.2.1.7. Fumée de silice	72
III.2.1.8. Pouzzolane naturelle	72
III.2.1.8.1. Propriétés physiques.....	73
III.3. Compatibilité ciment/superplastifiant	73
III.3.1. Méthode du cône Marsh.....	73
III.3.2. Compatibilité ciment/superplastifiant	74
III.3.3. Présentation de l'essai.....	75
III.3.4. Résultats obtenus	76
III.3.5. Commentaire.....	77
III.3.6. Besoin de prévisibilité et de robustesse.....	77
III.3.7. Influence de la séquence d'introduction du superplastifiant.....	77
III.4. Conclusion	78

CHAPITRE IV : FORMULATION ET CARACTÉRISATION PHYSICO-MECANIQUE DES BHPL

IV.1. Introduction.....	80
IV.2. La formulation du béton.....	81
IV.3. Préparation des granulats légers.....	82
IV.4. Masse volumique du béton léger.....	84
IV.5. Confection et cure des éprouvettes	84
IV.6. Caractérisation du béton frais et durci.....	85
IV.6.1. Caractérisation du béton frais	85
IV.6.1.1. La maniabilité.....	85
IV.6.1.1.1. Résultats obtenus	86
IV.6.1.1.2. Commentaire	87
IV.6.1.2. Étude de la maniabilité du béton en fonction du temps.....	87
IV.6.1.2.1. Commentaire	88
IV.6.2. Caractérisation du béton durci	89
IV.6.2.1. Étude des propriétés mécaniques du béton	89

IV.6.2.1.1. Résistance à la compression.....	89
IV.6.2.1.1.1. Commentaire	95
IV.6.2.1.2. Résistance à la flexion.....	102
IV.6.2.1.2.1. Commentaire	104
IV.7. Conclusion	105
A/- Pour le béton frais.....	105
B/- Pour le béton durci.....	105

**CHAPITRE V : DURABILITÉ, DEFORMABILITÉ ET MODULE DE YOUNG DES
BHPL**

V.1. Introduction.....	107
V.6.2.2. Absorption d'eau massique par immersion.....	107
V.6.2.2.1. Commentaire.....	109
V.6.2.3. Le coefficient de ramollissement.....	110
V.6.2.3.1. Commentaire	111
V.6.2.4. Déformabilité et module d'élasticité.....	111
V.6.2.4.1. Commentaire	118
V.7. Conclusion	119
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	121
RECOMMANDATIONS.....	123
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	125
ANNEXES.....	135

LISTE DES FIGURES

FIGURE	PAGE
Figure (I.1) : Schéma de la structure poreuse des granulats légers.....	29
Figure (I.2) : Granulats légers naturels.....	32
Figure (I.3) : Processus de fabrication de granulat léger à partir de boue issue de réservoir de décantation.....	33
Figure (I.4) : Granulats légers artificiels.....	35
Figure (I.5) : Argile expansé bouleté, étendue granulaire 3/8 mm.....	36
Figure (I.6) : Schiste pulvérisé expansé, étendue granulaire 4/8 mm.....	36
Figure (I.7) : Taux d'absorption en fonction du temps Granulats Argile expansé bouleté et de cendres volante frittés : granulats 4/8 mm, densité apparente ρ_g d'après Zhang & GjØrv.....	37
Figure (I.8) : Taux d'absorption en fonction du temps Granulats Argile expansé bouleté et de cendres volante frittés : granulats 4/8 mm, densité apparente ρ_g d'après Zhang & GjØrv.....	38
Figure (II.1) : Porosité des bétons légers.....	47
Figure (II.2) : Relation estimative du rapport E/C et degré d'hydratation à la continuité capillaire.	48
Figure (II.3) : Zone d'influence d'un vide ($E_g=0$) dans la direction $\theta = 0^\circ$ et 90° pour un champ de contraintes uniaxial et unitaire.....	49
Figure (II.4) : La Banque d'Amérique.....	62
Figure (II.5) : Plateforme pétrolière Hibernia.....	63
Figure (II.6) : Pont flottant Pountons.....	63
Figure (III.1) : Courbe granulométrique du sable 0/5.....	67
Figure (III.2) : Courbe granulométrique du laitier cristallisé pour la fraction 3/8 et la fraction 8/16.....	69
Figure (III.3) : Courbe granulométrique de la pouzzolane naturelle pour la fraction 3/8 et la fraction 8/16.....	71
Figure (III.4): Différents types de comportement rhéologique.....	75
Figure (III.5): Temps d'écoulement en fonction du dosage de superplastifiant.....	77
Figure (III.6): Effet de superplastifiant sur la pâte de ciment.....	78
Figure (IV.1):Variation d'affaissement du béton en fonction du temps.....	88
Figure (IV.2) : Evolution de la résistance à la compression de béton à base de laitier cristallisé en fonction du temps et du rapport E/C.....	90

Figure (IV.3) : Evolution de la résistance à la compression de béton à base de laitier cristallisé en fonction du temps et de l'ajout de la fumée de silice.....90

Figure (IV.4) : Evolution de la résistance à la compression de béton à base de pouzzolane naturelle en fonction du temps et du rapport E/C.....91

Figure (IV.5) : Evolution de la résistance à la compression de béton à base de pouzzolane naturelle en fonction du temps et de l'ajout de la fumée de silice.....91

Figure (IV.6) : Evolution de la résistance à la compression du béton à base de laitier cristallisé en fonction du temps et de l'ajout de la fumée de silice et de la pouzzolane naturelle pour E/L = 0,25.....92

Figure (IV.7) : Evolution de la résistance à la compression du béton à base de laitier cristallisé en fonction du temps et de l'ajout de la fumée de silice et de la pouzzolane naturelle pour E/L = 0,30.....92

Figure (IV.8) : Evolution de la résistance à la compression du béton à base de pouzzolane naturelle en fonction du temps et de l'ajout de la fumée de silice et de la pouzzolane naturelle pour E/L = 0,25.....93

Figure (IV.9) : Evolution de la résistance à la compression du béton à base de pouzzolane naturelle en fonction du temps et de l'ajout de la fumée de silice et de la pouzzolane naturelle pour E/L = 0,30.....93

Figure (IV.10) : Evolution de la résistance à la compression à 28 jours de béton en fonction de l'ajout de 8% de la fumée de silice et (10% , 15% , 25%) de la pouzzolane naturelle et du rapport E/L des bétons à base de laitier cristallisée de fraction 3/8 et la fraction 8/16.....94

Figure (IV.11) : Evolution de la résistance à la compression à 28 jours de béton en fonction de l'ajout de 8% de la fumée de silice et (10% , 15% , 25%) de la pouzzolane naturelle et du rapport E/L des bétons à base de pouzzolane naturelle de fraction 3/8 et la fraction 8/16....94

Figure (IV.12) : Béton à hautes performances : les granulats son également fissurés.....100

Figure (IV.13) : Dispositif de chargement pour l'essai de flexion.....103

Figure (IV.14) : Evolution de la résistance à la flexion de béton en fonction du temps et de type de granulats utilisées.....104

Figure (V.1) : Schéma des canaux capillaires et des vides dans le béton durci.....107

Figure (V.2) : Variation de coefficient d'adsorption en fonction de type de granulats utilisées (E/L=0,25 avec 8 % FS+25 % PN).....109

Figure (V.3) : Variation de coefficient de ramollissement en fonction de type de granulats utilisés (E/L=0,25 avec 8 % FS et 25 % PN).....111

Figure (V.4) : Déformation élasto-instantanées longitudinales du béton ϵ_{1el} en fonction des contraintes relatives η pour les séries de prismes BHPL et BHPP.....115

Figure (V.5) : Déformation élasto-instantanées totales longitudinales du béton ε_{1Tel} en fonction des contraintes relatives η pour les séries de prismes BHPL et BHPP.....115

Figure (V.6) : Déformation élasto-instantanées transversales du béton ε_{2el} en fonction des contraintes relatives η pour les séries de prismes BHPL et BHPP.....116

Figure (V.7) : Déformation élasto-instantanées totales transversales du béton ε_{2Tel} en fonction des contraintes relatives η pour les séries de prismes BHPL et BHPP.....117

Figure (V.8) : Module de déformabilité (E) du béton en fonction des contraintes relatives η pour les séries de prismes BHPL et BHPP.....117

Figure (V.9) : Module d'élasticité des prismes BHPL et BHPP.....118

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU	PAGE
Tableau (I.1) : Tableau des synthèses des applications.....	29
Tableau (I.2) : Propriétés élastiques des granulats d'argile expansées.....	39
Tableau (I.3) : Granulats de débris de construction et / ou de démolition.....	42
Tableau (II.1) : Quelques ponts Norvégiens construits avec des BHP légers.....	62
Tableau (III.1) : Composition chimique et minéralogique du ciment utilisé.....	66
Tableau (III.2) : Analyse granulométrique du sable.....	66
Tableau (III.3) : La composition chimique du granulat de laitier cristallisée.....	68
Tableau (III.4) : Analyse granulométrique de laitier cristallisée pour la fraction 8/16.....	68
Tableau (III.5) : Analyse granulométrique de laitier cristallisée pour la fraction 3/8.....	68
Tableau (III.6) : La composition chimique du granulat de pouzzolane naturelle.....	70
Tableau (III.7) : Analyse granulométrique de la pouzzolane naturelle pour la fraction 8/16...70	70
Tableau (III.8) : Analyse granulométrique de la pouzzolane naturelle pour la fraction 3/8....70	70
Tableau (IV.1) : Séquence de malaxage des bétons.....	82
Tableau (IV.2) : Composition des mélanges de béton à base de laitier cristallisé de fraction 3/8 et 8/16 à proportion (50 %,50 %)......	83
Tableau (IV.3) : Composition des mélanges de béton à base de pouzzolane naturelle de fraction 3/8 et 8/16 à proportion (50 %,50 %)......	83
Tableau (IV.4) : Affaissements des bétons avec laitier cristallisée pour la fraction 3/8 et la fraction 8/16 à proportion (50%,50%).....	86
Tableau (IV.5) : Affaissements des bétons avec de la pouzzolane naturelle pour la fraction 3/8 et la fraction 8/16 à proportion (100%).....	86

LISTE DES PHOTOS

PHOTO	PAGE
Photo (III.1) : Laitier cristallisée de fraction 3/8 et la fraction 8/16.....	69
Photo (III.2) : Pouzzolane naturelle de fraction 3/8 et la fraction 8/16.....	71
Photo (III.3) : Superplastifiant MEDAFLOW 145 mélangé avec l'eau.....	72
Photo (III.4) : Fumée de silice.....	72
Photo (III.5) : Pouzzolane naturelle	73
Photo (III.6) : Equipement utilisé.....	76
Photo (III.7) : Mesure du temps d'écoulement du coulis.....	76
Photo (IV.1) : Cure des éprouvettes.....	84
Photo (IV.2) : Essai d'affaissement.....	86
Photo (IV.3) : Epreuves (10x10x10) cm ³	89
Photo (IV.4) Résultats d'essais de compression sur éprouvettes (10x10x10) cm ³ pour le béton avec E/C=0.30 à 14 jours.	89
Photo (IV.5) : Macrostructure du béton bétons à base de pouzzolane naturelle de fraction 3/8 et la fraction 8/16.....	100
Photo (IV.6) : Macrostructure du béton à base de laitier cristallisée de fraction 3/8 et la fraction 8/16.....	100
Photo (IV.7) : Macrostructure des granulats légers de laitier cristallisé.....	101
Photo (IV.8) : Macrostructure du granulat léger de la pouzzolane naturelle.....	101
Photo (IV.9) : Eclatement du béton à base de laitier cristallisée de fraction 3/8 et la fraction 8/16.....	102
Photo (IV.10) : Dispositif de chargement pour l'essai de flexion	103
Photo (IV.11) : Epreuves (10x10x40) cm ³	104
Photo (IV.12) : Rupture des éprouvettes du béton à base de laitier cristallisée de fraction 3/8 et la fraction 8/16.....	104
Photo (V.1) : Epreuves (10x10x10) cm ³ après 28 jours de cure.....	109
Photo (V.2) : Epreuves (10x10x10) cm ³ après un séchage à 40 °C pendant 24 h.....	109
Photo (V.3) : Epreuves (10x10x10) cm ³ après 28 jours de cure.....	111
Photo (V.4) : Essai de déformabilité sur éprouvette prismatique (10x10x40) cm ³	114

LISTE DES ABRÉVIATIONS

BHPL : Béton à hautes performances léger.

BPN : Béton de poids normal

BN : Béton Normal

BAL : Béton d'agregat léger

BL : Béton léger

BLS : Béton léger structurel

AL : Agrégats légers

AN : Agrégats normaux

ZI : Zone interfaciale.

E/C : Eau/Ciment.

C/SP : Ciment/Superplastifiant.

E/L : Eau/Liant.

FS : Fumée de silice.

PN : Pouzzolane naturelle.

SA : Sans ajouts.

BHPLLC : Béton à hautes performances léger à base de laitier cristallisé.

BHPLPN : Béton à hautes performances léger à base de pouzzolane naturelle.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1 /- Problématique

L'utilisation de béton léger dans les applications de ponts a gagné une popularité depuis 1955, en particulier en Californie et en Norvège. Les applications de ponts et poutres de ponts, ainsi que les dalles dans les bâtiments, sont des utilisations courantes. Le béton léger est particulièrement utile dans des conditions où le poids mort est la composante majeure du chargement.

Aux États-Unis, plus de 100 navires de la Seconde Guerre mondiale ont été construits en BAL, d'une capacité de 3000 à 140000 tonnes et leur réussite a conduit, à l'époque, à une utilisation prolongée du BAL structurel dans les bâtiments et les ponts.

Environ 25% des 590 000 ponts des États-Unis sont structurellement déficients ou fonctionnellement obsolètes. Le coût estimatif de la réparation ou du remplacement de ces ponts est de l'ordre de 140 milliards de dollars en 2006 évalué récemment. L'incertitude et la volatilité des prix du pétrole compliquent encore les choses. Ce qui peut avoir un effet sur les coûts de construction en raison du transport de matériaux de construction et déchets. Des recherches sur les matériaux de structure qui peuvent offrir un environnement sûr, économique et durable alternative à ceux déjà en usage est une façon d'aider à freiner ces coûts dans les années à venir. Béton à haute performance léger (BHPL) est un tel matériau. Ces dernières années, le béton léger est considéré comme l'un des matériaux les plus importants dans les bétons spéciaux. Il a des applications étendues dans les travaux d'architecte et d'isolation. Les agrégats légers et les adjuvants chimiques jouent un rôle important dans la production de béton léger. De nouveaux agrégats artificiels ont été récemment mis au point et portent l'attention des chercheurs qui seront utilisés dans la fabrication de béton léger. BL est un matériau très polyvalent pour la construction. Il offre une gamme de services techniques, économiques et environnementaux qui améliore et préserve les avantages. La résistance et la durabilité se sont révélées bonnes dans le BL. Par rapport à son homologue BPN ou BN en poids normal, l'agrégat léger a un taux d'absorption d'eau plus élevé et une densité relative plus faible. En plus d'être léger, il a la bonne résistance, la résistance au feu et l'isolation thermique.

La fraction volumique et les propriétés des agrégats ont un effet important sur les propriétés mécanique du béton de granulés légers. Une teneur en volume plus élevée d'AL a entraîné une défaillance plus fragile. Béton haute performance (BHP) : Le Comité 116 de l'ACI a défini le

BHP comme « Le béton répondant à des combinaisons spéciales d'exigences de performance et d'uniformité qui ne peuvent pas toujours être réalisées régulièrement en utilisant des matériaux constitutifs classiques et de malaxage, de mise en place et de traitement ». Comité ACI 213 définit béton léger à haute résistance BHPL avec une résistance à la compression de 28 jours de 41,4 MPa (6000 psi) ou plus. Béton à haute performance léger (BHPL) : est en fait incluse dans la définition BHP étant donné que "léger" est une performance spéciale ; encore agrégat léger n'est pas un constituant conventionnel. BHPL est une combinaison BHP et BLS avec une résistance à la compression de 55,2 MPa (8000 psi) ou plus.

Une application, en particulier, où BHPL peut avoir un impact économique important sur le pont est celui des poutres préfabriquées précontraintes.

L'utilisation de fortes résistances à la compression dans les poutres précontraintes peut réduire les coûts dans les applications de conception de ponts en permettant des portées plus longues, L'espacement accru des poutres et des sections transversales plus petites. Si BHPL est utilisé, ces avantages sont encore améliorés en raison de la réduction correspondante du poids propre. Des avantages supplémentaires peuvent être plus de voies de circulation, une capacité de charge accrue, des sous-structures plus petites.

Les besoins en capacité de la grue et/ou les coûts de transport. Malheureusement, la production de béton léger a actuellement tendance à coûter plus cher par m³ que la production de béton de poids normal (Comité ACI 213 2003).

Toutefois, dans de nombreuses économies de coûts en raison des avantages susmentionnés peuvent l'emporter sur l'augmentation des coûts des matériaux. Malgré les dispositions économiques possibles, le BHPL a été rarement utilisé dans les ponts à travers le monde. Des recherches récentes ont été menées pour l'applicabilité des spécifications de conception des ponts actuels aux BHPL, plus loin la recherche est nécessaire si le matériel doit devenir plus compétitif avec son poids normal homologué. Le béton léger est utilisé pour réduire la charge, et aide donc à obtenir des éléments structuraux plus petits. Les forces sismiques sont proportionnelles à la masse de la structure, dans les zones sujettes tremblement de terre du béton léger peuvent contribuer à une conception plus sûre et plus économique.

Le béton fabriqué à l'aide d'agrégats légers a probablement été utilisé dans des applications plus diverses et « le béton à haute résistance » utilisé avec succès depuis les trois dernières décennies. Les deux matériaux ont été étudiés et beaucoup de leurs caractéristiques spéciales sont déjà comprises. Le béton léger à haute performance (BHPL) possède non seulement des avantages de chaque prédécesseur mais aussi de nouvelles dérivées de la synergie entre matrice de performance et agrégat léger. BHPL est un nouveau matériau qui présente

nouvelles questions et inconnues à la technologie de béton et à la conception de béton qui doivent être avant qu'elle ne puisse être utilisée plus largement. BHPL n'a pas fait l'objet d'études approfondies. En particulier, les propriétés à long terme telles que les pertes par fluage, retrait et précontraint, n'ont pas été systématiquement étudiées.

Cette recherche a été menée afin de déterminer la faisabilité des types d'agrégat léger disponible dans l'industrie du béton.

La recherche de l'emploi des granulats légers dans le domaine du Génie civil n'est pas un problème nouveau, la recherche actuelle dans le domaine des matériaux de construction est orientée vers les granulats légers naturels ou artificiels pour assurer d'une part, la pérennité des granulats naturels conventionnels et l'allègement de certains éléments de construction et d'autre part, une économie d'énergie par la réduction de la conductivité thermique. En effet, le gain de poids, qui peut être plus ou moins important selon le type de béton, entraîne une diminution des sections des éléments structurels assurant la transmission des charges et conduit à des économies de transport des éléments manufacturés et à des gains de productivité à la mise en œuvre.

Une des voies d'allègement et d'amélioration du pouvoir d'isolation envisageables pour le béton est le remplacement d'une fraction des granulats habituels, qui constituent environ les 3/4 de la masse du béton, par des granulats plus légers, naturels ou artificiels.

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux, et permet d'obtenir une nouvelle variété des bétons à hautes performances. De la sorte d'établir la possibilité de formulation et de fabrication de ces bétons et il faut qu'elle n'est plus du domaine expérimental.

2 /- Objectifs visés par le sujet

L'objet de notre travail est de réaliser, caractériser un BHP léger performant et économique à base de plusieurs granulats légers artificiels et naturels à partir des matériaux existants sur le marché Algériens. Un béton ayant des propriétés (mécaniques, physiques, chimiques, physico-chimiques, rhéologiques, de module d'élasticité et de déformabilité, de la durabilité et mise en œuvre) très élevés. La mise en œuvre de quelques principes scientifiques fondamentaux sur lesquels s'appuie la technologie des BHP léger.

3/- Méthodologie de travail

Pour bien cerner le sujet et arriver aux objectifs fixés précédemment, nous avons présenté les chapitres suivants dans ce document :

- Une introduction générale qui fait définir la problématique du sujet ainsi que les objectifs visés.

- Le premier chapitre est une synthèse bibliographique réalisé sur l'histoire de l'utilisation du béton léger, les constituants des bétons à hautes performance légers, ainsi que les différents travaux expérimentaux consacrés aux propriétés physiques et mécaniques des granulats légers pour déterminer leur influence sur les propriétés mécaniques des bétons.
- Le second chapitre est une analyse des études existantes portant sur les propriétés mécaniques des bétons de granulats légers clôturées par les utilisations des BHP légers.
- Le troisième chapitre est consacré à la procédure d'essai qui consiste à présenter les caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques des constituants utilisées (ciment, sable, gros granulats, superplastifiant, la fumée de silice et la pouzzolane naturelle), l'analyse granulométrique, la masse volumique apparente, Densité à l'état saturé superficiellement sec et surface spécifique et d'étudier ensuite la compatibilité ciment/superplastifiant pour déterminer le point de saturation indispensable pour la formulation de ce type des bétons.

Les essais physiques et mécaniques réalisés au laboratoire de matériaux de construction de l'université de Biskra, deux types de granulats légers de laitier cristallisé et de pouzzolane naturelle sont utilisés dans différents formulation de bétons caractérisés selon leur masse volumique, leur capacité d'absorption d'eau et par l'analyse granulométrique.

Le quatrième chapitre est une étude expérimentale qui a porté sur deux variables privilégiés sont la nature des gros granulats et le rapport E/C (E/L), nous considérons deux types de granulats pour chaque type 13 formulations, on a étudié l'effet du rapport E/C (0.25, 0.30, 0.35, 0.5), l'effet du remplacement d'une partie du ciment par la fumée de silice (8%), l'effet du remplacement combiné d'une partie du ciment par la fumée de silice (8%) et la pouzzolane naturelle (10%, 15%, 25%) ainsi que l'effet de types des granulats sur les propriétés du béton frais et durci à travers un programme d'essais qui tient compte des propriétés physiques et mécaniques des bétons, en utilisant la méthode de formulation de l'université de Sherbrooke, au total 26 formulations différentes font l'objet de mesure physique (rhéologie) et mécaniques (résistance à la compression, à la flexion), on a aussi choisi la meilleurs composition selon les résultats des essais de la résistance à la compression pour étudier le comportement rhéologique de cette composition en fonction du temps.

- Le cinquième chapitre est une étude de la durabilité, déformabilité et module de Young des BHPL de la meilleure formulation trouvé au chapitre IV selon les résultats des essais de la résistance à la compression.

La thèse s'achève par les conclusions tirées de ce travail et propose des recommandations qui portent sur les particularités des BHP léger ainsi que les mesures à prendre en compte lors de leurs fabrications et différents perspectives de recherche.

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE :

CCONSTITUANTS DES BHPL

CHAPITRE I

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE : CONSTITUANTS DES BHPL

I.1. Introduction

Lorsque l'on connaît l'importance de la résistance des gros granulats dans un BHP, il peut être surprenant de songer à utiliser des granulats légers pour fabriquer un BHP. Les granulats légers sont poreux, ils ne sont pas résistants et peuvent s'écraser facilement.

Le béton léger à haute performance, pourrait être considéré comme une combinaison entre béton HP et béton structurel léger.

Cependant, la diminution de la masse volumique pour des BHP de 50 à 60 MPa peut représenter un avantage économique dans certains cas particuliers malgré le coût élevé des granulats légers.

Cependant, tous les auteurs sont très prudents et mentionnent que ces résistances ont été obtenues en utilisant des granulats légers très performants. Tous les granulats légers ne peuvent pas être utilisés avec succès pour fabriquer des BHP puisque certains granulats légers sont plus résistants que d'autres et leur rupture durant un essai de résistance à la compression se produit pour une charge plus élevée.

L'absorption des granulats légers est en générale très importante. Dans certains cas, l'utilisation des granulats légers très absorbants peut causer des problèmes rhéologiques, car l'absorption des granulats légers a un effet direct sur le contrôle de l'affaissement et sur la maniabilité des BHP. Par ailleurs, l'absorption des granulats légers n'est pas constante d'une livraison à l'autre et il faut que cette variation demeure dans des limites tolérables. Il est encore plus difficile de produire industriellement un BHP léger qui présente des propriétés constantes qu'un BHP ordinaire.

Une des difficultés qu'il faut résoudre lorsque l'on fabrique un BHP léger est de bien définir l'état de saturation dans lequel on va utiliser ces granulats : secs, saturés ou dans un état intermédiaire. Certains chercheurs recommandent d'utiliser des granulats totalement secs et de tenir compte de la quantité d'eau qu'ils absorberont durant le transport et le malaxage. Cependant, dans un tel cas, Novokschchenov et Whitcomb (1990) considèrent qu'il est possible d'utiliser des granulats légers pour diminuer le retrait endogène. D'autres chercheurs préfèrent utiliser des granulats saturés de telles sortes qu'ils n'absorberont aucune eau durant le malaxage ; l'eau contenu dans les granulats légers peut d'ailleurs être considérée comme une source d'eau qui, dans un premier temps diminue de façon significative le retrait

endogène et peut même, dans un deuxième temps, mieux hydrater le ciment de ces bétons à très faible rapport eau/ciment. Du point de vue pratique, pour obtenir des granulats saturés, il suffit d'arroser en permanence les piles de granulats légers. D'autres chercheurs suggèrent de n'utiliser que des granulats légers secs et de les premouiller pendant en moins 10 minutes en les mélangeant avec une quantité appropriée d'eau correspondant à l'absorption spécifique de ce granulats, mais cette technique est difficile à mettre en œuvre en centrale à béton parce qu'elle diminue de façon considérable la productivité et ne permet pas de minimiser le retrait endogène.

I.2. L'histoire de l'utilisation du béton léger

L'histoire de l'utilisation du béton léger remonte au début du I^{er} siècle après JC. Les Romains ont peut-être été les premiers à inventer et à utiliser le béton léger. Les structures dans le port de Cosa, le Pantheon, et le grand stade du Colisée, sont des exemples de l'utilisation du béton léger. Des agrégats légers tels que la pierre ponce et les scories ont été utilisés dans les structures mentionnés [1]. Dans la fabrication de Pantheon, le mortier de chaux et la pierre ponce ont été utilisés pour le toit avec des travées d'environ 45 mètres. En outre, le mortier de chaux, la pouzzolane et l'agrégat naturel ont été utilisés dans la base et les murs, le béton léger a été utilisé dans la construction originale de l'église Hagia Sophia à Istanbul au sixième siècle. En 1917 environ, Heidi dans le Kanas situé dans le Midwest des États Unis a inventé la méthode de production industrielle pour l'argile expansé en utilisant les fours cylindriques rotatifs. Les produits ont été appelés Hidit. Les agrégats légers artificiels ont été utilisés pendant la première Guerre mondiale en raison de l'accès limité aux plaques d'acier pour la construction naval. Au cours du siècle dernier, beaucoup de bâtiments et de ponts ont été construits par le béton léger dans le monde. Entre temps, plus de 150 ponts et bâtiments aux États Unis et au Canada ont été utilisés par ce type de béton. Le bâtiment de l'hôtel Park Plaza à Saint Louis et le bâtiment de 14 étages de Southwestern Bell Telephone Company à Kanas City à 1929 sont des bâtiments des années de 20 et 30 du siècle dernier. Bâtiment de 42 étages à Chicago, TWA Terminal à l'aéroport de New York 1960, aéroport Dull à Washington en 1962, église de Norvège 1965, pont de Wiesbaden en Allemagne 1966 sont des structures construits en béton d'agrégats légers [2]. Depuis, un grand nombre de ponts ont été fabriqués dans le monde entier. Dans le toit, la résistance n'est pas un facteur majeur, par conséquent une grande quantité d'agrégats est utilisée pour réduire le poids mort de béton sur le toit des structures de grande hauteur. Un exemple de ce type d'utilisation est la tour Lake Point à Chicago, en Illinois, construite avec 71 étages en 1938, les dalles de dixième au dix-septième étage et la dalle du plancher du garage ont été construit par une densité de 1730 kg/m³ de béton in situ et de résistance à la compression à 7 jours de 20 à 22 MPa, une tour circulaire

avec une hauteur de 184 m et un diamètre de 42.5 m a été construit à Sydney, 17% du cout de construction a été économisé en utilisant 31.000 mètres cube de béton léger dans les poutres, les colonnes et le plafond du septième étage vers le haut, la moyenne de résistance à la compression du béton était de 34,3 MPa et la moyenne de la densité était de 1792 kg/m³ à 28 jours. Un bâtiment commercial de 52 étages a été construit de béton léger de structure à Houston, Texas 1969, le bâtiment inclus des fondations de dimensions de 70×70× 2.5 m dans la balance de 18 mètre dans le sol, la densité du béton était 1840 kg/m³, la résistance à la compression des voiles, des colonnes et des fondations étendues était 41.2 MPa. En outre, il était de 31.3 MPa pour les planchers de structures. Si le béton normal était utilisé, il serait possible de concevoir un bâtiment sur de 35 étages car la capacité du support de sol était limité [2]. L'histoire de la production et la consommation de béton léger en Iran remonte à plusieurs décennies. Des pierres ponce naturelles telle que la perlite et le tuf ont été utilisées dans la fabrication de béton léger. La fabrication et l'utilisation de blocs par le ciment avec des agrégats artificiels d'argiles expansées remontent à l'année 1982 la construction de blocs par le béton cellulaire autoclave a commencé avec la création de la manufacture de Porc de silice en Iran. La nécessité de ce type de béton est ressentie en raison de bonnes propriétés de la lumière et d'isolation thermique, et même l'utilisation structurelle du béton et les zones sismiques actives en Iran. Heureusement, ces dernières années, un développement important et la fabrication de béton léger peuvent être utilisés dans un avenir pas trop lointain à travers le monde [2].

I.3.1 Recherche générale sur le béton à haute performance léger

Le béton léger a été utilisé pour diverses applications dans de nombreux États. Cependant, de nombreuses recherches récentes ont porté sur le béton à haute performance, qui comprend du béton à haute résistance. Cette recherche de béton léger a été menée pour faire progresser parallèlement les normes de résistance et de maniabilité du béton de poids normal. De plus, de nouveaux développements dans la construction des plateformes pétrolières ont encore façonné le développement et la compréhension de ces mélanges de béton. La discussion qui suit se concentre sur les nouveaux développements des propriétés mécaniques et des aspects d'ouvrabilité du béton léger à haute résistance utilisant des argiles expansées comme agrégats grossiers [3].

I.3.1.1 Martinez Morales (1982)

Cette étude de Cornell University a étudié les propriétés mécaniques du béton léger en profondeur. Ils ont testé trois différents types de béton léger, de faible résistance avec $f'_c < 28$ MPa, de force modérée avec $28 \text{ MPa} < f'_c < 41$ MPa, et de haute résistance avec $f'_c > 41$ MPa. Seuls les résultats des mélanges de béton à haute résistance seront présentés.

Le béton mis au point dans leur étude a utilisé du ciment de type I et a également utilisé des fines légères et des agrégats grossiers, ce qui diffère de l'étude actuelle qui a utilisé des fines normales. La quantité de ciment était de 10 sacs par m³, semblable à la matière cimentaire totale finale pour le béton de 51 MPa développé plus tard dans le projet actuel.

Pour la résistance à la compression, leur béton est en moyenne d'environ 55 MPa. Le béton léger à haute résistance a également affiché un gain de force plus rapide que les autres variétés de béton. 24 MPa a été atteint à un jour d'âge. Le module d'élasticité variait entre 25 et 30 GPa pour tous les cylindres testés.

Les valeurs du module de rupture ont été en moyenne de 5 MPa pour des conditions de durcissement humides et de 3 MPa pour des conditions de durcissement à sec. Cela a montré l'importance de garder les spécimens mouillés avant le test, ainsi que l'importance du durcissement humide sur la résistance à la traction. Les résultats de rupture de traction ont été établis en moyenne de 4 MPa pour le durcissement par voie humide et de 3 MPa pour les spécimens séchés à sec [4].

En outre, les auteurs ont proposé des expressions basées sur leurs résultats pour le module d'élasticité statique, le module de rupture et la résistance à la rupture. Ils différaient des équations AASHTO [1].

Pour le module d'élasticité,

$$\text{Martinez } E_c = (40000 \sqrt{f'_c} + 1000000) (w_c / 145)^{1.5} \quad \text{Equation 1}$$

$$\text{AASHTO } E_c = 33 w_c^{1.5} \sqrt{f'_c} \quad \text{Équation 2}$$

(L'équation AASHTO est l'équation AASHTO 8.7.1 [5].)

Pour le module de rupture,

Martinez

$$F_p = 6.5 \sqrt{f'_c} \quad \text{Équation 3}$$

AASHTO

$$F_p = 6.3 \sqrt{f'_c} \quad \text{Equation 4}$$

(L'équation AASHTO est de AASHTO 8.15.2.1.1 [5].)

Pour la résistance à la traction,

Martinez

$$F'_{sp} = 5 \sqrt{f'_c} \quad \text{Équation 5}$$

AASHTO

$$F'_{sp} = 5 \sqrt{f'_c} \quad \text{Équation 6}$$

(L'équation AASHTO est obtenue indirectement de AASHTO 8.15.5.2.4 [5].)

I.3.1.2 Shideler (1957)

Shideler a présenté une des premières études approfondies sur le béton léger. Il a testé le béton normal et le béton à haute résistance. Le béton à haute résistance léger avait une résistance de 50 MPa.

Il a testé la résistance à la compression, le module d'élasticité, le fluage, le retrait de séchage, la liaison et la résistance à la flexion. Huit agrégats légers ont été utilisés dans le test.

Shideler a trouvé qu'il pourrait produire du béton avec $f'_c > 55$ MPa en utilisant une argile expansée. Il a été capable de dépasser 24 MPa à 2 jours en utilisant cet agrégat. En outre, il a trouvé que le module d'élasticité était entre 20 GPa et 30 GPa pour le béton à haute résistance en utilisant de l'argile expansée selon que les échantillons d'essai étaient humides ou secs.

Le module de rupture était de 4 MPa à 28 jours pour l'agrégat argile expansé. Il a également constaté que le fluage des différents bétons légers était plus grand que le fluage pour le béton de poids normal comparable. Globalement, Shideler a constaté que la performance du béton léger était bonne et que le béton de qualité structurelle pouvait être produit avec chacun des granulats qu'il avait testés [6]

I.3.1.3 Zhang et Gjrv (1993)

Des agrégats légers ont souvent été utilisés en Norvège dans des plates-formes pétrolières offshore. Zhang et Gjrv ont étudié une partie de ce béton léger.

Ils ont développé neuf mélanges de béton léger en utilisant de la fumée de silice comme adjuvant pouzzolanique. Le béton le moins performant a atteint une résistance à la compression de 57 MPa à 28 jours. Tous les mélanges ont été de 41 MPa à 3 jours.

Zhang et Gjrv ont émis l'hypothèse que la force d'agrégat léger contrôlerait la force maximum du mélange. La teneur en ciment, la fumée de silice et le sable ont des effets moindres [7]

I.3.1.4 Burg, Cichanski et Hoff (1998)

Puisque le béton léger a souvent été utilisé dans des plateformes pétrolières offshore, des mélanges légers de haute résistance ont été développés. Burg, et al ont été en mesure de développer un à l'aide seulement de ciment et de ciment à cendres.

Le mélange contenait 317 kg de ciment et 90 kg de cendres volantes par un mètre cube de béton. L'agrégat fin était du sable naturel. Le mélange a atteint une résistance de 59 MPa à 90 jours. A trois jours, le béton avait une résistance approximative de 47 MPa. Bien qu'il ne soit pas mentionné explicitement, le béton a apparemment atteint une force au-dessus de 24 MPa à une journée [8].

Le béton avait un module d'élasticité de 40-45 GPa à 90 jours. Les auteurs ont évalué les équations 1 et 2 avec leurs données et ont vérifié que l'équation 2 était un meilleur ajustement pour les données de module d'élasticité.

La résistance au fendage était de 2 à 4 MPa pour le durcissement à sec et de 4 à 5 MPa pour le durcissement à l'état humide, ce qui dépassait les valeurs prédites par l'équation 4.

La perméabilité du béton a été jugée modérée. Quand les auteurs ont comparé leurs résultats à une valeur typique du béton de poids normal, la perméabilité était presque la même. Les auteurs ont conclu que ce mélange particulier convenait à l'environnement arctique.

I.3.1.5 Nilsen et Aitcen (1992)

Nilsen et Aitcen ont étudié les propriétés du béton à haute résistance contenant divers types d'agrégats. Ce rapport se concentrera sur les résultats pour le béton avec agrégat léger.

Le béton léger a été réalisé avec agrégats grossiers de schiste expansé et granulats fins de sable naturel. La fumée de silice a été utilisée comme un ajout. De plus, du ciment Portland de type III a été utilisé. Les deux mélanges ont produit du béton avec des résistances à la compression de 91 et 74 MPa, respectivement à l'âge de 28 jours. De plus, les bétons ont atteint 59 MPa et 49 MPa à l'âge d'un jour, bien au-dessus des 24 MPa nécessaires pour le projet en cours.

Ils ont trouvé que le code AASHTO de l'équation 8.7.1 [1] (équation 2) pour le module d'élasticité en béton léger sous-estimé le module d'élasticité, une conclusion qui est en accord avec les recherches précédentes par Slate, Nilson et Martinez.

Le retrait de séchage du béton léger était similaire à celui du béton de poids normal [9].

I.3.1.6 Zhang et Gjorv (1991)

Zhang et Gjorv ont produit un article ultérieur traitant des propriétés du béton léger à haute résistance.

Les conclusions d'intérêt étaient les suivantes :

- A) Le rapport entre la résistance à la traction et la résistance à la compression dans le béton léger est inférieur au même rapport dans le béton de poids normal.
- B) La résistance de l'agrégat léger est le principal facteur de contrôle de la résistance du béton léger de haute résistance [10].

I.3.1.7 Mircea, Ioani, Filip et Pепенar (1994)

Les auteurs ont testé 260 poutres renforcées et précontraintes dans différents environnements agressifs pour leur durabilité. Les poutres ont été faites de béton léger et de béton de poids normal et ont été fissurées.

Les poutres ont ensuite été placées dans divers environnements et laissées reposer pendant dix ans. Après dix ans, les poutres ont été analysées et chargées à la rupture pour voir s'ils maintenaient leur force.

Les conclusions ont été que le béton léger réalisé est performant que le béton de poids normal. La densité des poutres en béton léger a diminué de 2,2% tandis que les poutres témoins de poids normal ont diminué de 2,0%. En outre, les deux types de béton ont augmenté en module d'élasticité avec le poids léger gagnant 12% tandis que le poids normal a gagné 25%. La résistance à la compression du béton léger a augmenté de 17 à 25%, tandis que le poids normal a gagné de 7 à 15%. Dans l'ensemble, les résultats étaient similaires sans que l'un ni l'autre n'ait un rendement médiocre.

En outre, des teneurs plus élevées en ciment ont généralement permis de réduire la taille de la fissuration à l'intérieur des poutres. Du fait que des teneurs élevées en ciment présentent généralement un béton de plus grande résistance, cela signifie que les poutres de plus forte résistance sont mieux à même de résister à la croissance des fissures [11].

I.3.1.8 Reichard (1967)

Reichard a publié une des premières études sur le fluage et le retrait du béton bitumineux léger [12]. Son travail est encore la base de la recommandation de fluage et de retrait du béton léger par le Comité ACI 213 [13].

Reichard a constaté que le retrait du béton d'agrégats légers allait de 0,02% à 0,08% de la longueur totale à 90 jours. La moyenne était d'environ 0,05%. À 2 ans, le retrait variait de 0,04% à 0,09% avec une moyenne d'environ 0,07%. Béton léger généralement autour de 150 jours d'âge. Très peu de retrait de séchage se produiraient après cette période de temps.

Reichard a également testé le fluage. Il variait de 0,06% à 0,14% de la longueur totale à 90 journées. À 2 ans, le fluage variait de 0,09% à 0,22%. La moyenne à 2 ans était d'environ 0,16% de la longueur totale.

Reichard a également montré que le fluage et le retrait augmentaient à mesure que la teneur en ciment augmentait. Il était approximativement linéaire, avec le fluage plus le retrait égalant 0,28% de la longueur totale à 1 an pour le contenu de ciment de 317 kg /m³, un montant semblable à celui prévu dans le projet actuel [12].

I.3.2 Performance du béton léger dans les éléments prestés

Le béton léger a été utilisé dans les ponts à travers le monde. Différentes parties de la structure du pont ont été fabriquées avec du béton léger. Les résultats ont été mélangés.

I.3.2.1 Construction de ponts d'agrégats légers et performance en Europe

Les pays européens et surtout la Norvège ont construit de nombreux ponts avec du béton léger. Ils ont eu du succès avec le matériel. Voici quelques exemples.

I.3.2.1.1 Mays et Barnes (1991)

Mays et Barnes ont examiné les performances de nombreuses structures de béton léger au Royaume-Uni. Le plus intéressant est leur discussion sur les structures de ponts en béton léger en place.

Dans l'ensemble, les structures étaient toutes en bonne forme. Ils ont montré un peu d'usure, mais par rapport aux structures en béton de poids normal adjacent construit à peu près au même moment, les structures en béton léger réellement surpassé les structures en béton de poids normal. En outre, les niveaux de chlorure mesurés dans le béton léger étaient plus bas que dans les structures de béton de poids normal. La performance était satisfaisante pour toutes les structures de ponts [14].

I.3.2.1.2 Laamanen (1993)

Laamanen discute du pont de Sundbru à Eidsvoll, en Norvège, qui a utilisé du béton léger de haute résistance. Le pont, construit en 1991-1992, a utilisé du sable naturel et l'agrégat léger Leca, une argile expansée.

La performance globale du béton dans le pont a été excellente. La résistance à la compression du béton était en moyenne de 66 MPa à 28 jours, obtenue avec l'utilisation de fumée de silice en tant qu'ajout. Le module d'élasticité était de 30 GPa à 28 jours. Le poids unitaire d'équilibre du béton est en moyenne de 181 KN et 186 KN.

La mesure du chlorure et de la résistance au gel-dégel indiquait que le béton léger était aussi performant que le béton ordinaire comparable. Dans l'ensemble, la performance de ce pont a été un succès [15].

I.3.2.1.3 Melby, Jordet et Hansvold (1993)

En 1988, la Norvège a introduit une nouvelle norme pour la conception de structures en béton avec des limites plus élevées pour la résistance du béton. Cette nouvelle norme a encouragé les concepteurs à utiliser un béton à haute résistance dans leurs structures.

Puisque le béton léger à haute résistance est devenu une option viable en raison de l'introduction de réducteur d'eau et de fumées de silice, les concepteurs l'ont choisi pour deux ponts en Norvège, Sandhornøya et Støvset.

Les deux ponts étaient des ponts cantilevers de longue portée. Sandhornøya avait une travée de 152 m et était le premier pont en Norvège où le béton léger a été employé dans la superstructure.

Le béton s'est bien comporté. La force était suffisante (pas de valeurs exactes) Alors que le module d'élasticité était de 32 GPa à 28 jours, plus grand que d'habitude pour le béton léger. Après cinq ans, le béton a été inspecté pour ses performances. L'état structurel du pont était bon avec un peu de fissuration. Il a été théorisé par les auteurs que les fissures étaient causé

par les conditions de durcissement inférieures rencontrées par le pont. Plus précisément, le pont a été guéri à basse température au milieu de l'hiver. De plus, le béton s'est avéré très résistant à la pénétration du chlorure.

Dans l'ensemble, le béton léger s'est avéré économique pour une utilisation dans des ponts à longue portée. L'auteur a conclu que tant que des mesures sont prises pour surveiller le pont, puisque la durabilité du béton léger n'est pas entièrement comprise, alors le béton léger fait un bon choix pour un matériau de pont [16].

I.3.2.1.4 Sandvik (1993)

Sandvik a fourni un aperçu des ponts construits en Norvège avec du béton léger depuis 1987. Huit ponts ont été construits en utilisant du béton d'agrégats légers de haute résistance. Tous se trouvent dans les environnements marins. Certains des ponts inclus dans son étude sont également trouvés dans les études précédentes citées.

Dans l'ensemble, Sandvik a trouvé l'utilisation de béton léger de haute résistance pour être minime en raison de la méconnaissance des concepteurs avec le matériau. Cependant, dans les ponts où il a été utilisé, la performance a été comparable à celle du béton de poids normal sans problèmes majeurs signalés avec aucun des ponts [17].

I.3.3 Performance légère des ponts en béton aux États-Unis

Le béton léger a été largement utilisé dans les ponts aux États-Unis depuis les années 1960. La plupart des expériences ont été bonnes car le béton léger s'est comporté de façon similaire au béton de poids normal.

I.3.3.1 Hanson

Hanson a écrit un premier article sur l'utilisation du béton léger pour la construction en béton précontraint. Il s'est penché sur l'agrégat de schiste expansé disponible dans la région des montagnes rocheuses.

Les principaux avantages du béton léger, Hanson a conclu, étaient la capacité de produire des sections plus petites en raison de la diminution du poids du béton. En outre, un autre avantage était la diminution du coût de transport, car un poids plus faible permettra à plus d'unités d'être placées sur un camion pour le transfert.

Cependant, une attention considérable a été portée à la résistance du béton. En raison du désir des fabricants de produits préfabriqués de réaliser leurs formes en un jour, un mélange de béton doit être développé qui a une résistance de réalisation d'une journée suffisante. En outre, Hanson suggère qu'un mélange de béton léger doit également avoir un module d'élasticité adéquat, car cela aidera à réduire les fissures de l'unité, un problème important avec éléments précontraints en béton léger [18].

I.3.3.2 Jennings et Brewer, Département des Transports de la Floride (FDOT, 1964)

Une des premières expériences documentées avec le béton léger aux États-Unis est de FDOT. FDOT a fait face à un problème en ce qu'elle voulait remplacer un pont en acier de treillis qui a parcouru 37 m. Ils voulaient continuer à utiliser la même longueur de travée, mais remplacer la structure par du béton précontraint. À cette époque, la portée de 37 m était considérée comme trop longue pour la construction typique de poutres précontraintes en béton de poids normal. Par conséquent, il a été décidé d'essayer du béton léger pour la sous-structure, la superstructure et le pont.

Pour le pont, les poutres choisies étaient des poutres de type IV de l'Association américaine des officiels de transport routier de l'état (AASHTO). Six poutres supportent chaque travée d'un pont de 28 pieds de large.

L'agrégat léger utilisé était Solite, une argile expansée. La spécification pour le béton léger était qu'il devait avoir un poids unitaire d'équilibre inférieur à 189 KN. Le béton est bien au-dessus des normes minimales. Le béton de poutre précontrainte testé à 45 MPa à 28 jours. Bien que les résistances de libération ne soient pas mentionnées, il est noté que le béton a vérifié bien au-dessus des résistances minimales de conception. Le béton de pont testé à 28 MPa à 7 jours et 34 MPa à 28 jours.

Le principal problème rencontré lors de la construction de ce pont a été la variation de l'état d'humidité de l'agrégat grossier. Les fonctionnaires de la Floride ont choisi de traiter ce problème en arrosant l'agrégat stocké pendant 24 heures avant la production du béton [19].

I.3.3.3 Murillo, Thomas et Smith (1994)

Un autre avantage du béton léger pour les ponts segmentaires est dans la zone sismique. Le béton léger peut atténuer deux problèmes rencontrés par les ponts en béton segmentaire normal; Les forces latérales induites par les mouvements du sol qui secouent les fondations de superstructures élevées et les oscillations déphasées de la superstructure.

Ils ont discuté du choix du béton léger pour un pont de 1,2 mile de long situé en Californie entre les villes de Benicia et Martinez. Le pont a été conçu pour résister à un tremblement de terre de magnitude 7,3 sur l'échelle de Richter.

Le pont à poutres en béton léger s'est avéré être le pont le plus économique des quatre sondés, coûtant entre 8 et 42 millions de dollars de moins que les autres. Le béton choisi avait le sable naturel comme agrégat fin et un schiste expansé comme agrégat grossier. Les travées étaient 160 m dans le centre et 102 m sur les extrémités.

L'augmentation de la précontrainte placée dans les poutres, augmentant ainsi les fissures, a combattu le module réduit d'élasticité du béton léger. De plus, les poutres à caissons sont

précontraintes longitudinalement, transversalement et verticalement. Cette précontrainte tridimensionnelle prévoyait une structure relativement fissurée [20].

La performance globale du pont devrait être plus que suffisante, offrant une résistance sismique accrue pour un coût moindre.

I.3.3.4 Vaysburd (1996)

Dans son article dans *Concrete International*, Vaysburd a rapporté une étude sur la durabilité des structures en béton léger. En comparant les propriétés mécaniques du béton léger au béton de poids normal, il a constaté que le béton léger devrait effectivement fonctionner mieux que le béton de poids normal dans la résistance à la formation de fissures.

Vaysburd a constaté que le module d'élasticité inférieur, le retrait de séchage plus élevé et les valeurs de fluage plus élevées du béton léger par rapport au béton de poids normal donnaient au béton léger la capacité de maintenir de plus grandes tensions. Pour cette raison, le béton léger devrait effectivement avoir plus de résistance aux fissures. De plus, des essais ont montré que le béton léger présente des valeurs de perméabilité inférieures à celles d'un béton de poids normal comparable.

En outre, le béton léger a généralement plus de ciment par mètre cubique que le béton de poids normal.

Par conséquent, cela retarde la carbonatation et la dépassivation de l'acier (le début de la corrosion) en ayant plus d'hydroxyde de calcium disponible.

Pour soutenir ces résultats, Vaysburd a examiné deux ponts qui ont utilisé le béton léger dans leurs ponts aux États-Unis. Le premier exemple, le William Preston Lane, Jr. Memorial Bridge dans le Maryland a été construit en 1952 avec un pont de schiste expansé. Une inspection en 1975 a montré que le béton léger avait surpassé le béton de poids normal dans le pont. En outre, le pont de San Francisco-Oakland Bay a été construit en 1936 avec une plate-forme de schiste expansé tandis que la partie inférieure du pont a été reconstruit avec une plate-forme schiste expansé au début des années 1960. Les ponts légers ont montré une certaine contamination de chlorure dans le pouce supérieur des surfaces exposées. Cependant, les niveaux de chlorure à la couche d'acier n'avaient pas atteint un niveau inquiétant. D'autre part, les parties du pont utilisant du béton de poids normal ont besoin de remplacement en raison de l'écaillage [21].

I.4. Béton à haute performance léger

A une densité en place de l'ordre de 1800 à 2000 kg / m³ par rapport au béton de poids normal avec la densité dans la gamme de 2240 à 2400 kg / m³. Pour des applications structurelles spéciales la résistance à la compression de béton devrait être supérieure à 50 MPa. Le

mélange de béton est faite avec des agrégats grossiers légers, dans certains cas une partie ou tout l'agrégat fin peut être léger [22].

I.5. Constituants des bétons à haute performances légers

I.5.1 Granulats fins

Les BHP légers peuvent être fabriqués en utilisant un sable naturel, un sable léger ou un mélange de sable léger et de sable naturel. Évidemment, la nature de sable a une influence directe sur la masse volumique et la résistance à la compression du béton de même que sur sa maniabilité ; l'utilisation d'un sable léger rend les bétons moins maniables que ceux que l'on obtient lorsqu'une certaine quantité de sable léger est partiellement remplacé par un sable naturel, il est assez difficile de diminuer la masse volumique du béton au-dessous de 2000 kg/m³ tandis qu'avec un sable léger la masse unitaire du béton frais peut être de l'ordre de 1850 kg/m³ ou même moins [23].

I.5.2 Liants

Différents liants ont été utilisés pour fabriquer des BHP légers, mais la plupart du temps ils contiennent de la fumée de silice à des dosages variant entre 7 et 10% de la masse totale du liant. L'utilisation de la masse de fumée de silice permet d'augmenter la résistance à la compression finale et éviter les risques de ségrégations en rendant la pâte du mortier un peu plus cohésive. Pour des raisons essentiellement économiques, on a pu remplacer dans certains BHP léger 20 à 30% du ciment par une cendre volante. Il est intéressant d'utiliser simultanément de la fumée de silice et des cendres volantes dans un BHP léger, car on combine alors une pouzzolane à action rapide telle que la fumée de silice et une pouzzolane à action plus lente telle que la cendre volante. Des ciments de type I ou de type III ont été utilisés pour augmenter la résistance à court terme tout en obtenant des résistances à long terme plus élevées. Berre et Ferrara (1990) [24] ont aussi utilisé un ciment au laitier à durcissement rapide le dosage en ciment des BHP légers peut varier entre 400 kg/M³ et 600 kg/m³. En règle générale, on admet qu'il ne faut pas dépasser une certaine quantité de liant pour augmenter la résistance à la compression d'un BHP léger, car au-delà d'une certaine limite, l'augmentation de la résistance de la pâte de ciment hydratée a relativement peu d'effet sur la résistance à la compression. Dans les BHP léger, la résistance du granulat gouverne la résistance du béton. Cette limite maximale de la quantité de liant dépend du type de granulat utilisé et elle doit être trouvée par des gâchées d'essai.

Le développement d'une réaction pouzzolanique entre les granulats légers à base d'argile calcinée et la chaux libérée par l'hydratation du ciment est souvent mentionné comme un avantage des granulats légers. Les Romains exploitaient déjà cet avantage lorsqu'ils ont construit le Panthéon il y a 1850 ans : ils ont utilisé sept bétons différents ayant des masses

volumiques décroissantes pour construire le dôme du Panthéon et la partie supérieure a été construite avec un béton léger pouzzolanique dans lequel le gros granulats était une pierre ponce volcanique [23].

I.5.3 Ajouts cimentaires

Béton léger de haute performance (LWHPC) avec pouzzolane (cendres volantes ou fumée silice) ou le ciment de laitier devrait fournir une résistance élevée et une durabilité élevée avec des poids morts réduits [25]. Un poids mort réduit peut permettre d'économiser les éléments de la sous-structure et permet une réduction des nombres de poutres par portée, une réduction de la section transversale des poutres et / ou des travées plus longues, Conduisant à des économies [26, 27]. Au-delà des économies, des avantages supplémentaires peuvent être obtenus en réduisant le poids morts des structures. Par exemple, de nombreuses structures de ponts ont été fabriquées avec des charges réduites les rendre fonctionnellement obsolètes. Cependant, le béton léger (LWC) peut être utilisé sur les superstructures tout en conservant la sous-structure existante en raison de poids mort réduit [28].

I.5.4 Granulats légers

Les agrégats légers (LWA) peuvent être des matériaux en vrac naturels ou artificiels ayant des densités particules sèches inférieure à 2000 kg / m^3 . Par le développement de l'économie et la production croissante de produits de consommation, la quantité de déchets augmente. Le recyclage des déchets a une importance économique et écologique. Le rôle de l'industrie de la construction dans le recyclage est également important [29].

Se différencient des autres granulats par leurs faibles masses volumiques. Celle-ci est inférieure que celle de la pierre naturelle. L'écart de masse volumique s'explique par la porosité élevée du granulats ϕ_g , c'est-à-dire une importante proportion volumique de vide d'air contenu dans le granulats [30].

$$\Phi_g = \frac{V_{\text{capillaire}}}{V_{\text{granulats}}}$$

$V_{\text{capillaire}}$: volume des vides contenu dans le granulats.

$V_{\text{granulats}}$: volume total occupé par le granulats.

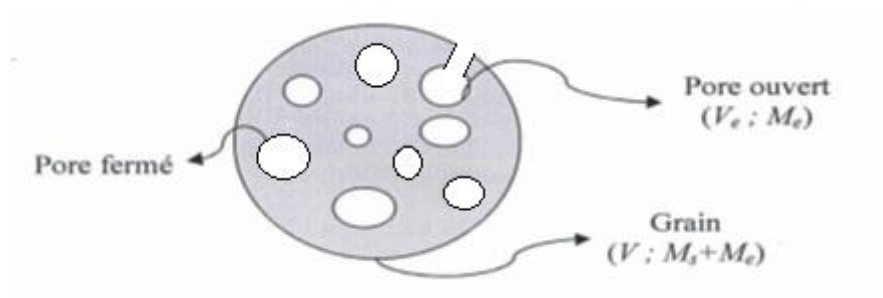


Figure (I.1) : Schéma de la structure poreuse des granulats légers [31].

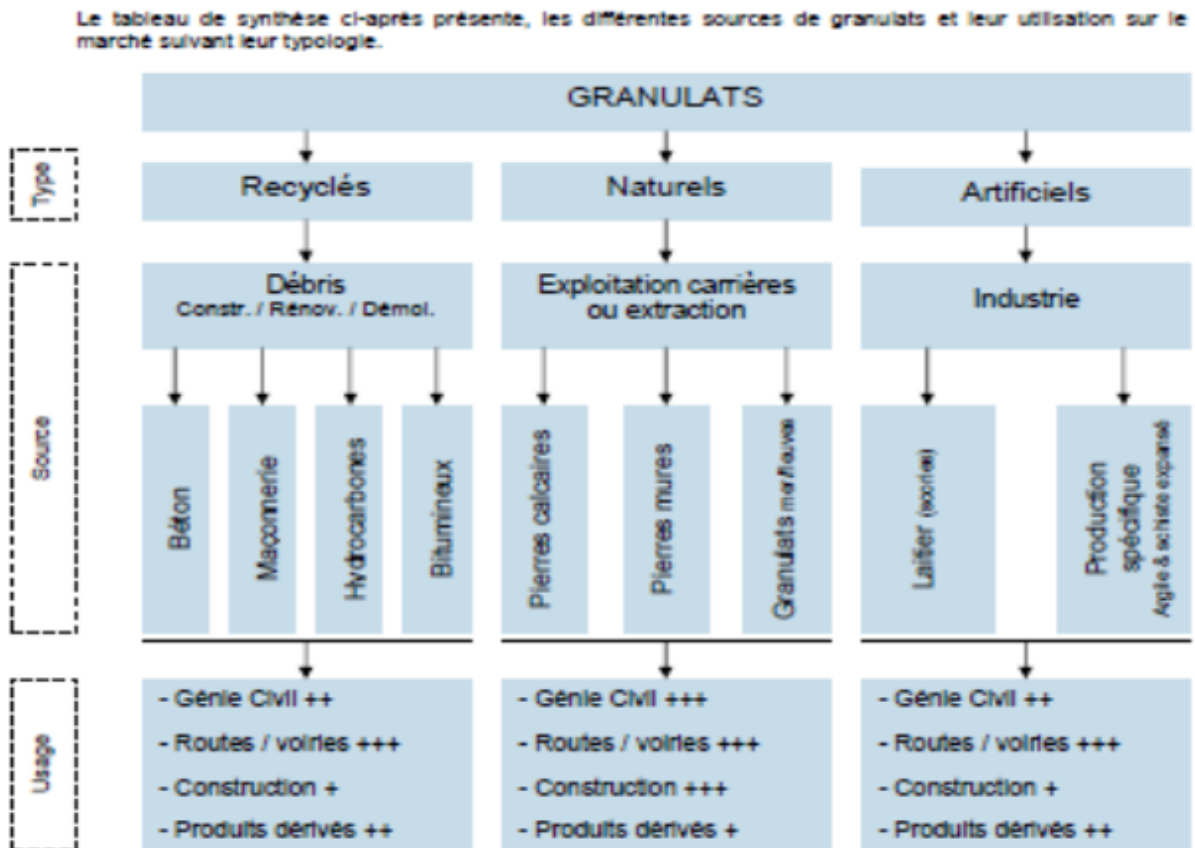


Tableau (I.1) : Tableau des synthèses des applications [32].

I.5.4.1 Structure interne des granulats légers

Les granulats légers ont une faible densité en raison de leur structure cellulaire. Cette structure cellulaire est obtenue en chauffant certains matériaux bruts. Les gaz à l'intérieur du granulat se dilatent et permettent l'expansion de celui-ci. Une fois refroidi, le granulat maintient sa structure. Le système de pores à l'intérieur du granulat n'est pas ou très peu interconnecté.

Les meilleurs granulats légers sont ceux résistants, durables, contenant un système de pores uniformément réparti (ouverture des pores de 5 à 300 nm) dans une matrice vitreuse résistante et sans fissures. Les pores exposés en surface sont très perméables et se remplissent dans les premières heures de contact avec l'eau [33]. Les pores intérieurs se remplissent extrêmement

lentement nécessitant plusieurs mois d'immersion pour obtenir une saturation totale. Une partie de ces pores intérieurs n'étant pas interconnectée, ils peuvent rester non saturés pendant des années [34]. (Sable naturel, gravier et pierre concassée), parfois est désigné sous le nom d'agrégat de faible densité [35]. La plupart des agrégats légers sont produits à partir de matériaux tels que l'argile, le schiste ou l'ardoise. Le laitier, la pierre ponce naturelle, la vermiculite et la perlite peuvent être utilisés comme substituts. Pour produire l'agrégat léger, la matière première (à l'exception de la ponce) est expansée à environ deux fois de volume de l'agrégat de la matière première. Le matériau expansé a des propriétés similaires à celles des agrégats naturels, moins dense et donc un produit de béton plus léger [36].

I.5.4.2 Granulats légers pour bétons de structure

Les granulats légers sont des matériaux poreux. Avant de présenter ces matériaux, nous allons définir deux grandeurs qui caractérisent leur légèreté : la masse volumique en vrac et la masse volumique réelle. La masse volumique en vrac désigne le rapport de la masse de granulat léger sec pour remplir de façon aléatoire un récipient sur le volume du récipient. La masse volumique réelle exprime le rapport d'une masse donnée de granulat léger sec sur le volume qu'elle occupe dans l'eau [37].

Il existe deux familles de granulats légers :

- Le granulat léger naturel qui ne subit aucune transformation autre que mécanique. C'est par exemple le granulat de pierre ponce, de diatomite de tufs volcaniques etc ;
- Le granulat léger artificiel résultant d'un procédé industriel comprenant des modifications thermiques ou autre. C'est par exemple le granulat d'argile expansée, de schiste expansé, de cendre volante frittée etc.

Selon la norme NF EN 206-1/CN, les granulats légers utilisés dans le domaine de la construction peuvent être : granulat d'origine minérale ayant après séchage à l'étuve, une masse volumique réelle inférieure ou égale à $2\,000\text{ kg/m}^3$ [38].

Le béton à haute performance d'agrégat léger est généralement produit en utilisant l'agrégat artificiel spécial avec des adjuvants minéraux et chimiques. Utiliser l'agrégat léger naturel au lieu de l'agrégat artificiel traité peut considérablement réduire le coût de tel béton [39].

I.5.4.3 Procédés de fabrication des granulats légers

I.5.4.3.1 Granulats légers naturels

Les granulats légers naturels sont des granulats d'origine minérale issus de la transformation mécanique de roches naturellement alvéolées. Ils proviennent pour la plupart de roche d'origine volcanique ou sédimentaire présentant une structure interne alvéolée. Ils sont obtenus à l'issue de diverses transformations mécaniques. Le dynamitage de la roche va

donner de gros blocs. Ces gros blocs sont ensuite concassés et criblés pour donner différentes tailles de grains.

La pierre ponce est notamment l'une des plus communes et les plus anciennes des agrégats naturels légers grossiers utilisés pour la production de béton pour l'industrie de la construction. Le terme de ponce est un terme générique utilisé pour décrire les solides poreux produits lors du refroidissement du magma à la suite de l'activation volcanique, les vides sont comme résultat de l'écoulement des gaz du magma produit. En raison des gaz, de petits vides creux rendent les solides résultants à une structure très poreuse, et c'est pourquoi la pierre ponce a une porosité et une absorption élevées [40]. Divers études ont été menées sur des bétons d'agrégats légers de ponce dans le monde entier avec la plupart des chercheurs en se concentrant sur les matières disponibles localement dans leurs zones ou pays.

La plupart des chercheurs ont conclu que la pierre ponce peut être utilisée pour produire du béton léger de qualité semi-structurale [41]. La résistance à la compression (28 jours) jusqu'à 55 MPa a été obtenue en incorporant agrégats de ponces turques [42]. En outre, l'efficacité des agrégats légers en pierre ponce a été montré pour les panneaux de paroi structurels [41].

La pierre ponce est une matière première léger très populaire, en raison d'avoir des propriétés souhaitées pour fabriquer les différents produits en fonction de ces caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques. Pour Cette raison, il a une grande zone d'utilisation dans l'industrie civile comme matériau de construction et il a été utilisé pour des siècles dans le monde. L'agrégat de pierre ponce peut être dans de nombreux endroits du monde où les volcans ont été présents.

Granulats de pierre ponce combinés à ciment Portland et l'eau produit une chaleur et isolant acoustique, béton léger résistant au feu pour les toits des ponts, les remplissages de plancher légers, des planchers structurel isolants, système de mur-rideau, soit préfabriqués ou in situ, agrégats de ponce des blocs de maçonnerie et une variété d'autres isolants. Toutes les études menées pour analyser les performances de la ponce légère des conditions de stabilité et de durabilité, ont montré que ces types de béton pouvaient être atteints avec des agrégats de pierre ponce [42].

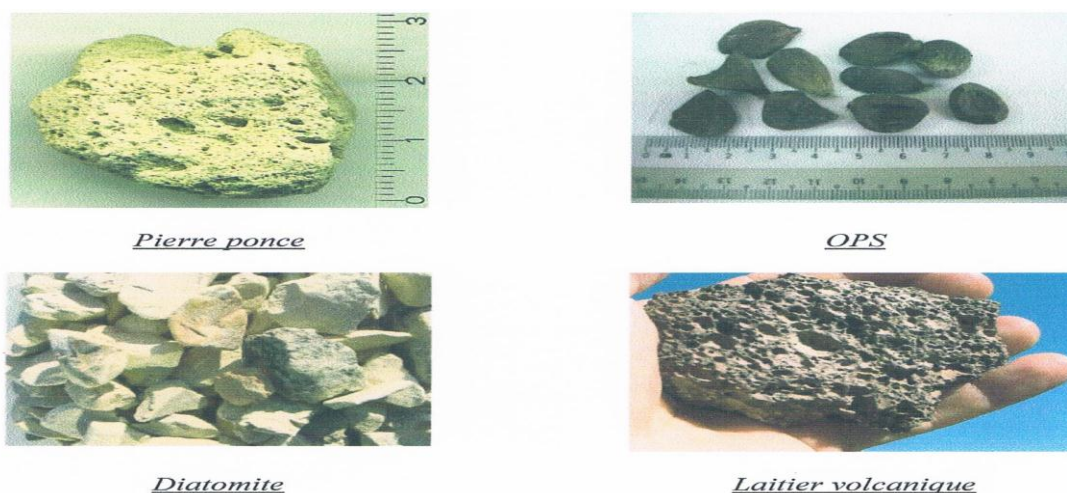


Figure (I.2) : Granulats légers naturels [31].

I.5.4.3.2 Granulats légers artificiels

Ces dernières années, le béton léger est considéré comme l'un des matériaux les plus importants dans les groupes spéciaux en béton. Il a des applications étendues dans les travaux d'architecte et d'insolation. Les agrégats légers et les adjuvants chimiques jouent un rôle important dans la production de béton léger. De nouveaux agrégats de cours artificiels ont été récemment mis au point et portent l'attention des chercheurs qui seront utilisés dans la fabrication de béton léger.

Pendant plus de 80 ans, les schistes, les argiles et les ardoises ont été expansées dans des fours rotatifs pour produire du LWA de qualité structurale pour l'utilisation dans les unités de béton et de maçonnerie. Des millions de tonnes de LWA de qualité structurale produites annuellement sont utilisées dans les applications de béton structurel. Sa disponibilité est actuellement répandue dans la plupart des pays industrialisés. La gradation à texture ouverte contrôlée disponible à partir d'un agrégat fabriqué qui assure une perméabilité élevée et la résistance thermique élevée développée en raison de la porosité élevée des particules [43].

Les granulats légers artificiels sont des granulats d'origine minérale dont l'expansion nécessite un traitement thermique préalable pour donner la structure alvéolée qui caractérise les granulats légers. En général, les méthodes d'expansion utilisées pour la fabrication des granulats sont à haute température (entre 1 100 et 1 500 °C). Il existe différents procédés qui dépendent de la matière première utilisée, du mode de préparation et du système de cuisson. Il s'agit entre autre du procédé par :

- four rotatif ;
- four à grille pour le frittage ;
- lit fluidisé ;

- autoclave.

Un procédé utilisant une ligne de micro-ondes est apparu récemment (www.idco-france.com/).

Les fours équipés de brûleur sont remplacés par des fours alimentés aux micro-ondes (magnétons) pour l'expansion et la cuisson des granulats légers.

Les différents procédés sont fondés sur les mêmes principes et visent la formation de grains avant la cuisson et l'élimination lente de l'eau de façonnage pour éviter l'éclatement des grains.

La valorisation des sédiments, des co-produits et des déchets industriels ouvre la voie à la production des granulats légers à partir des résidus tels que les boues de décantation et de dragage. La Figure (I.3) illustre les différentes phases du processus de fabrication d'un granulats léger à partir de boue issue d'un bassin de décantation.

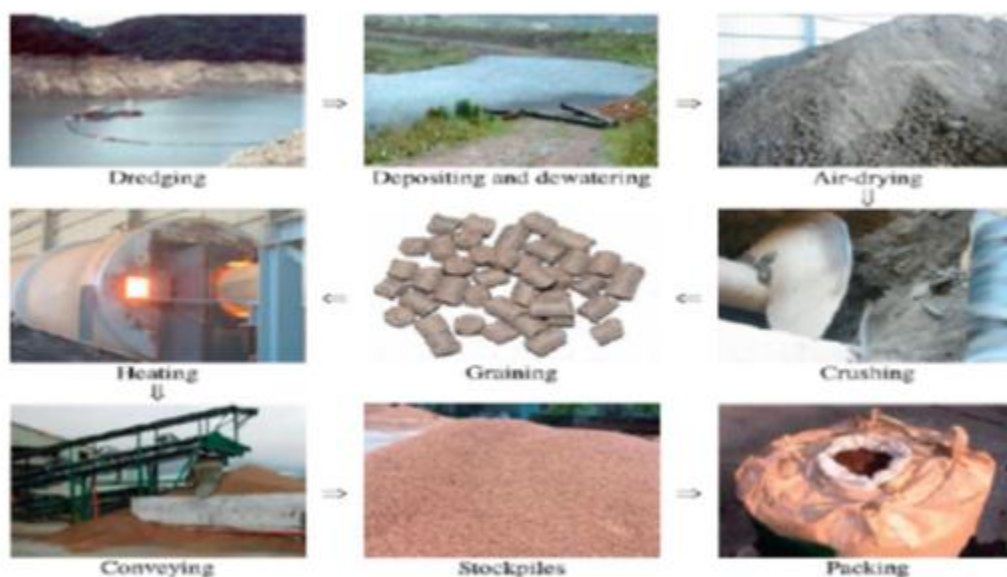


Figure (I.3) : Processus de fabrication de granulats légers à partir de boue issue de réservoir de décantation [37].

I.5.4.3.2.1 Expansion des granulats légers

a) Description du phénomène

L'expansion caractérise l'augmentation de volume d'un matériau expansible sous l'effet d'un traitement thermique. D'après (EIPPCB 2005) [44]. L'expansion est influencée par plusieurs facteurs tels que la composition chimique de la matière première, la température de cuisson et la taille des granules.

Elle repose sur le phénomène d'alvéolage (qui consiste à créer un réseau d'alvéoles au sein du matériau) et nécessite la concomitance de deux actions :

- le développement du caractère pyroplastique qui rend le matériau déformable ;
- les dégagements gazeux à la température de grésage qui déforment le matériau.

La phase essentielle de l'expansion réside dans la synchronisation parfaite, dans une plage de température donnée, du développement du grésage et des dégagements gazeux.

Les travaux concernant la nature des gaz provoquant l'expansion font état de la présence non seulement de CO, CO₂, SO₂, SO₃ mais aussi de O₂, N₂ et de H₂O [45]. Toutefois, les composés dont les rôles sont les mieux connus et les plus importants sont le carbone, le soufre et l'oxyde ferrique. Les deux premiers ont une action de combustible et le troisième joue le rôle de comburant en apportant l'oxygène nécessaire à la combustion.

Dans le cas de l'argile expansée, la matière première est constituée de composés organiques et minéraux.

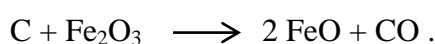
Au cours de la phase de préchauffage, le craquage thermique des matières organiques (telles que l'amidon, la cellulose, les glucides ou encore les acides gras) conduit à la libération du carbone. Le carbone ainsi libéré va se fixer sur les particules argileuses.

La décarbonatation des composés minéraux notamment des carbonates, produit des oxydes fondants dans une plage température comprise entre 300 et 900 °C. Ces oxydes contribuent pour la plupart à élargir le palier de fusion. Les différentes réactions sont explicitées par les équations ci-après :

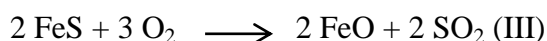
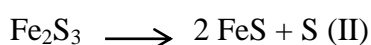


A partir de 900 °C, les oxydes métalliques notamment les oxydes ferriques (de couleur rouge) présents dans les argiles ferrugineuses sont réduits par oxydoréduction en présence du carbone.

Cette réaction produit des oxydes ferreux (de couleur noir) suivi d'un dégagement de monoxyde de carbone comme l'indique la réaction ci-après :



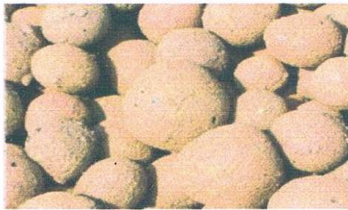
Par ailleurs, la présence de sulfure de fer plutôt instable va se dissocier en soufre et en sulfure de fer (II). L'oxydation du sulfure de fer (III) produit de l'oxyde ferreux avec un dégagement de dioxyde de soufre comme l'indiquent les équations ci-dessous :



D'autres gaz tels que le diazote jouent un rôle « source » dans le processus d'expansion.

Concomitamment, à la température d'expansion entre 1 100 et 1 300 °C, les silicates et les oxydes de fer formés sont portés à fusion et donnent un bain silicaté de viscosité finie qui encapsule les différents gaz produits.

Le refroidissement brutal fige la matière dans son état et donne en fin des grains parcourus par un réseau d'alvéoles qui confère aux grains leur légèreté.



Argile expansée



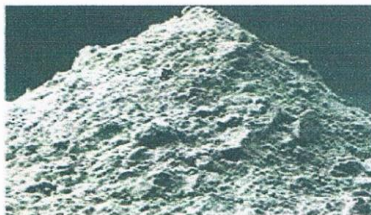
Schiste expansé



Laitier refroidi à l'air



Laitier expansé



Cendre volante



EPS

Figure (I.4) : Granulats légers artificiels [31].

I.5.4.4 Composition chimique et minéralogique

Malgré l'utilisation de matières premières différentes et des nombreux procédés de fabrication et températures d'expansion, les granulats à base d'argile, de schistes et de cendres volantes ont une composition chimique similaire [46]. Ils sont composés à plus de 85 % de silice, d'alumine et d'oxyde de fer et le quartz est le minéral le plus abondant [47, 48, 49]. Les laitiers expansés sont composés à parts égales d'environ 80 % de silice et de chaux [50].

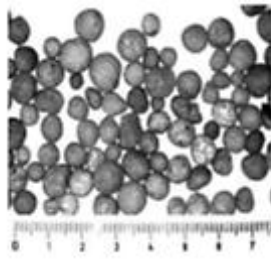


Figure (I.5) : Argile expansé bouleté, étendue granulaire 3/8 mm [50].

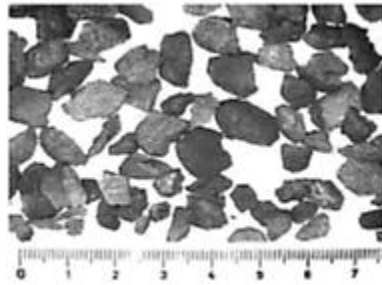


Figure (I.6) : Schiste pulvérisé expansé, étendue granulaire 4/8 mm [50].

I.5.4.5 Porosité et absorption des grains

En raison de leur structure poreuse, les granulats légers absorbent plus d'eau que les granulats normaux. Selon un test d'absorption de 24h, effectué conformément aux procédures des normes ASTM C127 pour les gros granulats et C128 pour les granulats fins, les granulats légers absorbent en moyenne de 5 à plus de 25% de leur poids sec alors que les granulats normaux n'absorbent que 2% environ de leur poids sec [51]. Cette grande différence vient du fait qu'avec des granulats légers, l'eau est largement absorbée à l'intérieur des particules alors qu'avec les granulats normaux, l'eau est plutôt adsorbée à la surface des particules [52].

Le taux d'absorption des granulats légers dépend de la taille des pores, de leur interconnectivité et de leur distribution, particulièrement pour ceux exposés en surface. L'eau interne absorbée dans la particule n'est pas immédiatement disponible pour la réaction chimique avec le ciment et n'est pas prise en compte dans le calcul du ratio E/C.

Les granulats légers sont caractérisés par une très grande porosité (entre 25 et 75% du volume apparent). La taille et la distribution des pores influencent la résistance des granulats, mais détermine surtout leurs propriétés d'absorption (taux d'absorption et absorption totale). Les données de la littérature montrent que l'absorption d'eau des granulats légers manufacturés initialement secs varie généralement entre 10 et 20% après 24 heures d'immersion.

Cependant, le taux d'absorption initial est très élevé :

plus de 50% de l'absorption est souvent complétée dès les toutes premières minutes [53, 54].

Par ailleurs, la porosité des granulats manufacturés varie proportionnellement à la taille des

grains. Par conséquent, plus la taille des granulats diminue, moins ils sont poreux et plus leur densité apparente augmente. La porosité peut également dépendre du préformage avant l'expansion. Les figures (I.7) et (I.8) présentent l'absorption d'eau et le taux d'absorption de quelques granulats légers tels que mesurés par Zhang & GjØrv. Les cendres volantes frittées, qui sont des agglomérations de microsphères, sont les plus absorbantes étant donné l'interconnexion plus élevée entre les pores.

Lorsqu'on fabrique un béton avec des granulats légers, une quantité importante d'eau de gâchage peut être absorbée par les granulats. Cette absorption d'eau dépend toutefois de l'interconnexion des pores dans les granulats, du degré de saturation initial des granulats et du rapport eau/ciment de la matrice cimentaire. L'effet sur l'ensemble du matériau peut se traduire par une perte rapide de maniabilité, mais peut aussi contribuer à améliorer la microstructure de la matrice cimentaire aux interfaces pâte granulats par un effet de filtration [55, 56, 57]. D'ailleurs, l'eau absorbée par les granulats constitue une réserve pour l'hydratation subséquente de la matrice cimentaire [58, 59, 60].

Certains moyens tels que le prémouillage ou l'utilisation d'un traitement de surface visant à réduire l'absorption des granulats s'avèrent très efficaces pour diminuer la perte de maniabilité des bétons légers. La paraffine et la pâte de ciment ont entre autres été utilisés [61, 62].

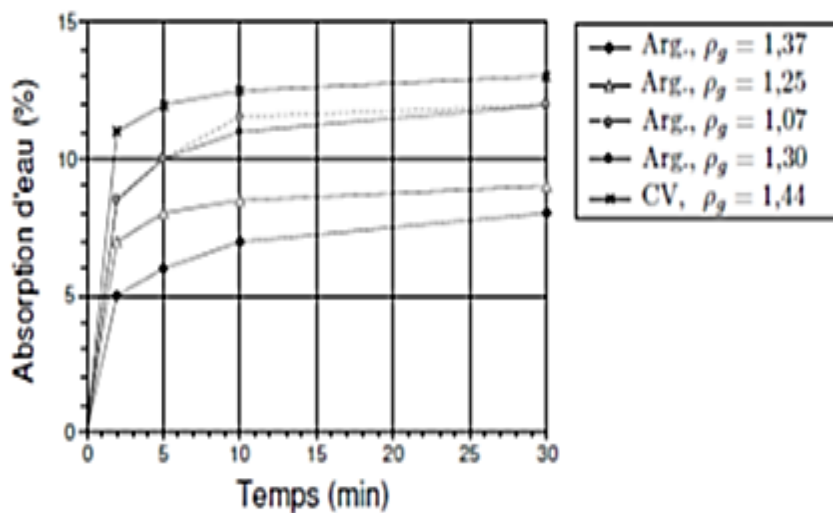


Figure (I.7) : Taux d'absorption en fonction du temps des granulats d'argile expansé bouleté et de cendres volante frittés : granulats 4/8 mm, densité apparente ρ_g d'après Zhang & GjØrv [62].

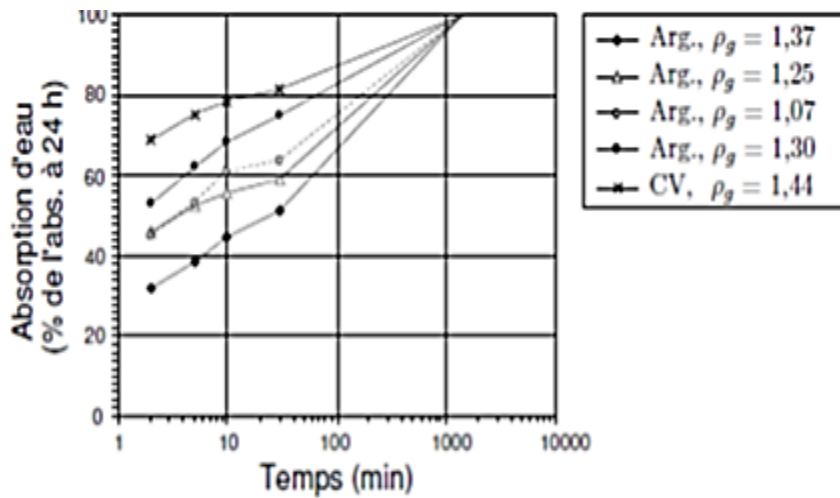


Figure (I.8) : Taux d'absorption en fonction du temps des granulats d'argile expansé bouleté et de cendres volante frittés : granulats 4/8 mm, densité apparente ρ_g d'après Zhang & GjØrv [62].

Lorsque l'on utilise des granulats légers, une certaine confusion règne sur la valeur de leur absorption en règle générale, les granulats légers ont une absorption nettement supérieure à celle des granulats de densité normale et le problème se situe alors dans la façon de mesurer cette absorption.

Dans les calculs de la composition des BHP légers, on suggère parfois de mesurer l'absorption à 40 minutes et l'on admet, et cela a été confirmé par l'expérience, que les granulats légers sec ne se saturent jamais d'eau quand ils sont utilisés dans un béton. Si, pour quelque raison que ce soit, il faut mesurer une autre valeur de l'absorption pour l'utiliser dans les calculs, il faut clairement la définir ainsi que la façon de la mesurer. Par exemple, LaFraugh et Wiss (1987) ont été trouvé que les granulats légers de leur BHP devaient être mélangés avec 4% d'eau additionnelle pour tenir compte de l'absorption durant le malaxage et la livraison [23].

I.5.4.6 Propriétés mécaniques

Il est difficile d'évaluer avec précision les propriétés mécaniques des granulats légers compte tenu de la variabilité qui existe entre chaque grain (porosité, densité, forme, dimensions, irrégularités, etc.). A ce jour, on ne trouve que peu de données fiables quant à la résistance des granulats légers. L'essai d'écrasement au pot, qui constitue l'essai le plus facile à réaliser, est

le plus utilisé [63]. Les résultats ne sont toutefois pas représentatifs de la résistance des granulats confinés au sein du béton.

Une méthode dynamique développée par Müller-Rochholz [64] permet d'évaluer le module élastique des granulats légers par des mesures de vitesse de propagation d'ondes à ultrasons. Cette méthode nécessite toutefois des équipements particuliers qui sont peu disponibles. La relation (1.1), proposée dans les manuels du CEB-FIP [65, 66], est également fondée sur des mesures dynamiques. Elle exprime le module élastique, E_g , en fonction de la densité apparente des granulats légers, ρ_g : $E_g = 8 \rho_g^2$ (1.1)

Le tableau (I.2) présente le module de cisaillement, G_g , le coefficient de Poisson, ν_g , et le module élastique, E_g , en fonction du diamètre, D , et de la densité apparente des granulats, ρ_g , pour quelques granulats d'argile expansés. On remarque que le module élastique des granulats est nettement inférieur à celui des granulats rigides, qui peut varier de 60 à 100 GPa. Un module élastique effectif pour les granulats peut aussi être déterminé à l'aide d'un modèle d'homogénéisation [67].

Granulats	D(mm)	ρ_g	G_g (GPa)	ν_g	E_g
Liapor F3	4-8	0,7	2,1	0,21	5,2
	8-12,5	0,6	1,9	0,18	4,4
Liapor F6	4-8	-	4,5	0,22	10,9
	8-12,5	1,1	5,7	0,19	13,5
Liapor F8	4-8	-	7,4	0,16	17,1
	8-12,5	1,5	7,5	0,16	17,3

Tableau (I.2) : Propriétés élastiques des granulats d'argile expansées [67].

I.5.4.7 Morphologie et texture de la surface

Les granulats légers présentent de considérables différences dans la morphologie de la particule et de la texture de sa surface. Cela dépend de la source naturelle et du procédé de fabrication. Les formes peuvent être cubiques, sphéroïdales, angulaires ou bien encore irrégulières. La texture de la surface peut aller d'un granulat à pores fins exposés en surface et

avec une surface douce à un granulat dont la surface est très irrégulière et avec des pores larges exposés en surface. Cela a une influence directe sur l'ouvrabilité, le ratio granulats grossiers/granulat fins, la demande en eau, la teneur en ciment et d'autres propriétés physiques comme l'adhérence pâte/granulats [68].

I.5.4.8 Agrégats légers des déchets

Avec une demande croissante d'agrégats légers et leur disponibilité limitée en tant que matériaux naturels, Il fallait développer des techniques pour leur fabrication [69]. Production industrielle à grande échelle d'agrégats légers a commencé après WW1 [70]. Aujourd'hui, elles sont produites dans une gamme de densités apparentes en vrac de 100 à 1200 kg / m³ et représentent une proportion importante des agrégats utilisés dans le secteur de la construction. Les agrégats synthétiques légers sont fabriqués par traitement des matières premières, grâce à quoi le processus provient soit de la composition chimique des matières premières ou doit être initiée par l'adjonction de agents d'expansion.

Les matériaux naturels, tels que les argiles, schiste, perlite et ardoise, ainsi que les déchets industriels tels que les cendres volantes ou les laitiers de haut fourneau sont typiques matières premières. Récemment, l'utilisation d'autres matériaux, tels des déchets de verre ou des boues d'épuration a été examiné [71, 74]. Leur utilisation semble possible dans l'industrie du bâtiment et dans la réduction du volume général des déchets et constitue recyclage durable des matériaux.

Les agrégats représentent généralement 70 à 80% du volume de béton et jouent un rôle important dans les différentes propriétés du béton telles que l'ouvrabilité, la résistance, la stabilité dimensionnelle et la durabilité. Le béton conventionnel est constitué de sable fin et de gravier, de calcaire ou de granit de différentes tailles et formes qu'agrégat grossier. Il existe un intérêt croissant à utiliser les déchets comme des matériaux d'agrégats et des recherches importantes sur l'utilisation comme des cendres de charbon, des laitiers de haut fourneau, des fibres de verre les déchets de matières plastiques, les déchets de caoutchouc, les boulettes de boues frittées et autres. La consommation de déchets peut être augmentée si ces derniers sont utilisés comme agrégat en mortier de ciment et en béton. Ce type d'utilisation d'un déchet peut résoudre des problèmes de manque d'agrégats dans divers chantiers et de réduire les problèmes environnementaux liés à l'extraction des agrégats et aux déchets.

L'utilisation des agrégats de déchets peut également réduire le coût de la production de béton. Comme l'agrégat peut contrôler de façon significative les propriétés du béton, les agrégats ont une grande importance. Une évaluation approfondie est donc nécessaire avant d'utiliser des déchets comme agrégats dans le béton. Un travail important d'utilisation de plusieurs types de déchets en tant qu'agrégats pour la préparation du mortier de ciment et du béton [75].

Il existe, jusqu'à un certain point, une quantité déterminée de ressources mondiales. Il n'y a sûrement qu'une quantité limitée de granulats pour la construction dans la croûte terrestre, de même qu'il y a une limite aux territoires pouvant servir de dépotoir pour les déchets. Dans cet esprit, à l'heure actuelle de nouvelles technologies se développent pour améliorer ces matériaux et en faire bénéficier l'industrie de la construction [76].

Tableau (I.3) : Granulats de débris de construction et / ou de démolition [31].

		Granulats de débris de béton	Granulats de débris Mixtes	Granulats de débris de Maçonnerie	Granulats de débris Hydrocarbonés	Granulats de débris Bitumineux
1(A)	Concassés de béton et matériaux pierreux naturels (débris de béton, granulats avec gangue de mortier, pierres naturelles, graviers,...) (%)	> 90	> 40	< 40	<30	<5
2(B)	Matériaux de types Maçonnerie (%) (briques, mortier, tuiles en terre cuite,...)	<10	<10	>60	-	-
3(C)	Autres matériaux pierreux artificiels(%) (carrelage, ardoises, plinthe carrelage, scories, béton, cellulaire, argile expansée)	<5	<5	<5		
4(D)	Matériaux Hydrocarbonés (%) (enrobés Hydrocarbonés, bitume, goudron, roofing)	<5	<5	<5	>70	>95(1)
5(E)	Matériaux non pierreux(%) (gypse, caoutchouc, plastique, isolation, verre, métaux, chaux, plâtre,.....)	<0,5	<1	<1	<1	<1
6(F)	Matériaux organiques (%) (Bois, déchets de plantes, papiers agglomérés)	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
	Masse volumique sèche (kg/m ³)	>2200	>1900	>1600	>2200	>2200
	Absorption d'eau après 24 heures (%)	<10	<15	<20	<10	<5

(1) ne peuvent contenir du goudron.

I.5.4.9 L'influence de l'utilisation des granulats légers sur l'environnement

La fabrication de béton léger a été l'utilisation dominante d'agrégats légers dans le passé. Il a été démontré que l'énergie supplémentaire consacrée à l'expansion du schiste, de l'argile ou de l'ardoise dans un four rotatif peut facilement être récupérée dans les économies associées à la diminution de la densité du béton fabriqué à partir de celles-ci. Les économies résultent non seulement de la réduction des semelles, des colonnes et des tailles de poutres, mais aussi des propriétés thermiques améliorées du béton. La fabrication d'agrégats légers se traduit par la libération de CO₂, mais les économies d'émissions de CO₂ associées au besoin de moins d'autres matériaux compensent largement cette libération [78].

Plus récemment, les agrégats légers ont trouvé de nouveaux usages tels que pour les applications horticoles, comme un milieu de croissance pour créer une ligne d'horizon avec des toits verts. Non seulement les agrégats de faible densité fournissent jusqu'à 30% de milieu de culture plus léger, mais les vésicules dans les agrégats deviennent un réservoir pour l'irrigation de l'eau et des engrais, réduisant ainsi le coût d'entretien d'un toit vert. Divers autres usages pour les agrégats légers sont discutés qui contribuent à un monde respectueux de l'environnement.

Les agrégats légers peuvent remplir de nombreux rôles qui rendront l'activité humaine plus respectueuse de l'environnement. L'émission de gaz à effet de serre associée à la fois à la transformation de la matière première et du combustible brûlé pour l'expansion de la matière première pâlit par rapport aux avantages environnementaux dérivés de son utilisation. La matière première ayant généralement une teneur élevée en silice libre de faibles quantités de gaz à effet de serre après chauffage au contraire des ingrédients utilisés pour fabriquer le ciment. Les émissions du ciment de fabrication sont d'environ une tonne de CO₂ par tonne de ciment et pour l'expansion des schistes, argiles et ardoises ne dépasse jamais environ 0,3 tonne de CO₂ par tonne d'agrégats produits. Avec le four rotatif utilisé pour fabriquer à la fois du ciment et des agrégats légers, la consommation de carburant est significative: environ 5,5 gigajoules par tonne pour le ciment et 3,0 gigajoules par tonne pour le schiste, l'argile ou l'ardoise.

Il a été montré il y a environ trois décennies que la dépense d'énergie pour fabriquer des agrégats légers pourrait facilement être récupéré à partir des économies associées à la réduction de la quantité de matériaux nécessaires. Des études ont montré que les économies réalisées au niveau de temps de réalisation de la construction découlent de la réduction de la hauteur des fondations, des colonnes et des poutres, ainsi que des quantités réduites de renforts en acier [79]. Les avantages à long terme dans certains cas, comme dans le cas des

murs extérieurs et des toits, peuvent être encore plus importants que les économies initiales, en raison de la réduction des coûts annuels de chauffage et de refroidissement. Les charges de chauffage et de refroidissement réduites proviennent du béton léger fabriqué avec un agrégat vésiculaire [80].

Les émissions de gaz à effet de serre qui résultent de la combustion du combustible pour l'exploitation d'un four qui fabrique des schistes, argiles ou ardoises expansées ont préoccupé l'industrie et elle a cherché des sources de déchets combustibles liquides tels que les huiles moteur normalement consommées dans un incinérateur. D'autres méthodes de production d'agrégats légers existent. Le frittage de particules de cendre volante préformées pour produire un agrégat léger réduit légèrement les émissions mais ce n'est qu'une utilisation alternative et moins écologique que l'utilisation de cendres volantes comme pouzzolane dans des mélanges de béton. Il en va de même pour les agrégats légers fabriqués à partir de laitier de haut fourneau. De même, les granulats légers peuvent être fabriqués sans avoir recours à des températures élevées ; cependant ce procédé nécessite des agents liants, qui présentent des problèmes environnementaux supplémentaires dans la fabrication de ces agents.

Les propriétés structurales et isolantes du béton léger sont bien connues et bien appréciées en pratique. On connaît moins l'impact potentiellement plus important sur l'environnement des nombreuses autres façons dont les agrégats expansés peuvent être utilisés. Ces utilisations émanent de la nature intrinsèque des agrégats légers eux-mêmes [79].

I.6. Conclusion

Le béton est composé de plusieurs composants, y compris le ciment, l'eau, les ajouts cimentaires, les agrégats fins et les agrégats grossiers. L'utilisation d'agrégats grossiers légers peut entraîner des réductions significatives de la densité du béton. Les matériaux utilisés comme agrégats légers comprennent les laitiers, les scories, les cendres volantes, les argiles et les schistes expansés. Les argiles et les schistes sont extraits du sol puis placés dans un four. Comme ils sont chauffés, les gaz sont introduits et les matériaux se développent en un matériau dur, mais poreux. La porosité (vides dans le matériau) est la cause de son poids plus léger par rapport à son volume, par rapport au béton fabriqué avec des agrégats grossiers normaux constitués de gravier ou de pierre concassée. L'agrégat léger peut peser 40 à 50% de moins que l'agrégat grossier normal, et le béton durci à base d'un agrégat grossier léger peut peser 20% de moins que le béton coulé en utilisant un agrégat grossier de poids normal. Le poids unitaire typique du béton normal est d'environ 2240 à 2400 kg / m³. Le béton léger est généralement d'environ 1800 à 2000 kg/m³, et peut atteindre 1700 kg/m³. De nombreuses propriétés matérielles du béton léger se comparent favorablement avec celles du béton de poids normal.

CHAPITRE II : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE :
PROPRIETES DES BETONS A HAUTES PERFORMANCES
LEGERS

CHAPITRE II

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE : PROPRIETES DES BETONS A HAUTES PERFORMANCES LEGERS

II.1. Introduction

L'utilisation de béton léger dans une structure est habituellement basée sur des coûts globaux plus faibles de la structure. Bien que le béton léger puisse coûter plus cher par mètre cube que le poids normal du béton, la structure d'un poids réduit peut moins coûter, la raison de base pour l'utilisation de béton léger structurel, une autre raison est que plus la structure est léger des forces moins destructrices sera une expérience de construction. L'économie dépend d'un équilibre adéquat entre le coût du béton par volume, poids unitaire et propriétés structurelles. Poids normal de béton peut être plus bas en coûts par mètre cube! Mais le poids plus lourd augmentera la charge morte et donc augmentera les tailles des éléments. Par conséquent, plus de renforcement de béton est nécessaire. Le béton léger est habituellement plus coûteux en raison des coûts les plus élevés de béton léger et des constituants! Mais la charge morte totale inférieure permettra aux plus petites taille des éléments et moins de renforcement. De plus, la gestion des coûts de formation est réduite.

Le béton haute performance léger (BHPL) est un matériau qui combine les propriétés du béton de haute performance (BHP) et du béton léger structurel (BLS). Il présente non seulement des avantages de ses deux prédécesseurs, mais aussi de nouvelles caractéristiques dérivées de la synergie entre une matrice haute performance et un poreux agrégat léger saturé. Le BHPL présente un énorme potentiel d'utilisation dans des poutres de pont préfabriqué précontraint. Tout d'abord, les structures de ponts doivent maintenir une maintenance de 75 à 100 ans exige une grande durabilité. Deuxièmement, les poutres précontraintes nécessitent un béton avec une haute résistance à la compression pour résister à de grandes forces de précontrainte et pour fournir des ponts à longue portée.

Enfin, les poutres préfabriquées précontraintes doivent être légères afin qu'elles puissent être transportées et érigé efficacement et à un coût raisonnable. Le BHPL présente une grande durabilité, une compression des forces de 69,0 MPa (10 000 psi) ou plus, et des densités de 1920 kg / m³ (120 lb / ft³) ou moins.

Néanmoins, comme le BHPL n'a pas fait l'objet d'une étude approfondie, il y a un manque de compréhension de ses propriétés qui possèdent comme barrière pour les applications futures.

II.2. Propriétés des bétons à hautes performances légers

II.2.1. Zone de transition interfaciale (ZTI)

La recherche en zone interfaciale (ZI) de béton léger est importante pour le béton léger à haute résistance (BHPL).

Une zone interfaciale faible aura un effet sérieux sur la durabilité. Les influences de ZI sur la résistance du béton et la perméabilité sont si grandes que ZI est considérée comme une phase du béton en plus de l'agrégat et de la pâte de ciment [81]. Parce que la résistance de l'agrégat léger de BHPL est inférieure à celle de l'agrégat normal, une ZI compacte aide à réaliser une plus grande résistance du béton léger.

Le béton est un matériau composite à agrégats fins et agrégats grossiers incorporés dans une matrice de pâte de ciment. Comme dans tout autre matériau composite, les propriétés physiques et chimiques des constituants et l'interaction entre eux déterminent le comportement du matériau. Le comportement mécanique et la durabilité du béton est affectée par l'agrégat et la pâte de ciment, ainsi que la zone interraciale entre eux [82]. Pour que le béton ait une bonne performance, il est essentiel que la zone interfaciale soit conçue pour être aussi dense que possible, ce qui se traduira par une bonne liaison entre agrégat et la matrice. De nombreux chercheurs ont étudié la zone interfaciale du béton de poids normal et conclut que « Effet de paroi » ou « Effet de surface » se produit à la surface de l'agrégat de poids normal [83]. La ZI entre l'agrégat et la pâte de ciment dans le béton de poids normal durci est poreuse [84-86]. La largeur de la ZI pour le béton de poids normal est environ 50-100 μm [84]. Cependant, la différence de morphologie des structures des interfaces au sein de la BL composite varie d'un endroit à l'autre et n'a pas de forme définie. La porosité plus élevée à la ZI est attribuée à la formation de grands produits cristallins, tels que des plaques, comme des cristaux d'hydroxyde de calcium au voisinage du l'agrégat ou mauvais conditionnement des grains de ciment. Breton et al trouvé que la zone de transition riche en CH en contact avec la roche n'est pas continue et peut être parallèle, perpendiculaire ou aléatoire il est donc probable que l'effet de surface ne se produit à la surface de l'agrégat léger [88]. De plus, comme les agrégats légers sont des matériaux poreux, avec un taux d'absorption élevé, le ZI du béton de poids léger diffère de celui du béton de poids normal. L'interface entre les pâtes de ciment/ agrégats légers [82,89], caractérisé par un verrouillage mécanique dans combinaison avec une interaction chimique sous forme pouzzolanique. Mehta a conclu que la nature de la microstructure de la ZI varie en fonction de type de l'agrégat, structure de surface de l'agrégat, structure des pores de l'agrégat, la porosité de la pâte de ciment et l'absorption d'eau de l'agrégat [85].

La structure poreuse des granulats légers semble améliorer la ZI en créant des sites dans lesquels la pâte de ciment peut se loger, constituant ainsi une zone dense et uniforme. L'effet de paroi qui est généralement décrit pour les bétons ordinaires ne semble pas se produire dans le cas des bétons légers. Ainsi, la largeur de la ZI est réduite (inférieure à $10\ \mu\text{m}$) par rapport à celle observée dans les bétons ordinaires. De plus, il semble que l'humidification des granulats ne semble pas modifier significativement la microstructure de la ZI [90].

II.2.2. Microstructure de la matrice de ciment

La microstructure de la matrice cimentaire possède une faible perméabilité, une faible porosité, une forte résistance à l'abrasion et une forte résistance à la compression et module d'élasticité. Il a été conclu que les pores capillaires deviennent discontinus à l'intérieur de la microstructure de la pâte de ciment une fois qu'un certain degré d'hydratation a été atteint. Cette limite dépend du rapport E/C, la distance moyenne entre les particules solides dans la pâte de ciment et le degré d'hydratation nécessaire créent une porosité discontinuité [91].

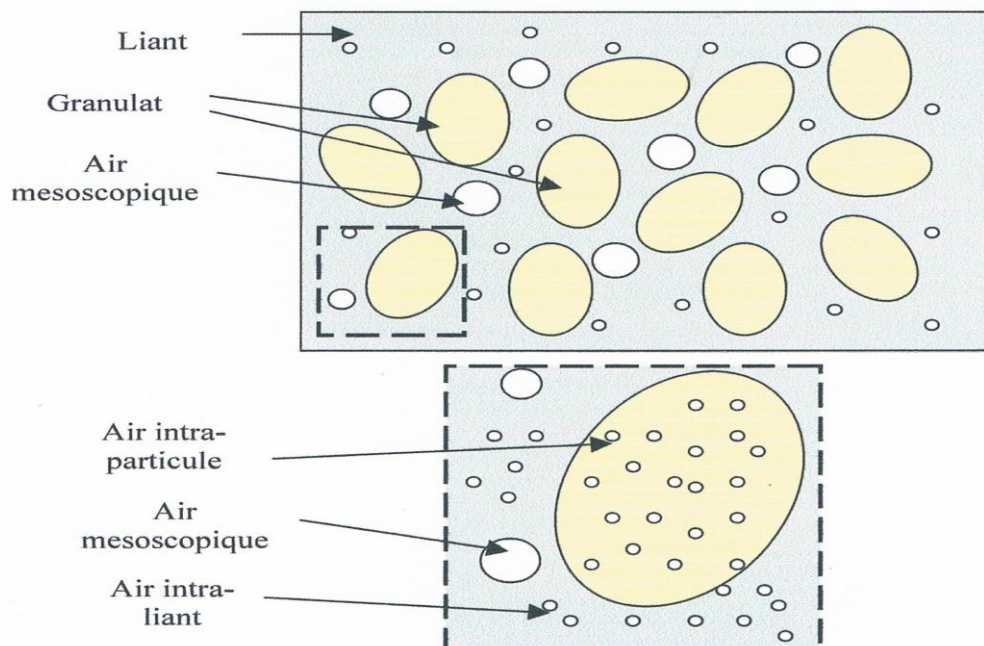


Figure (II.1) : Porosité des bétons légers [30].

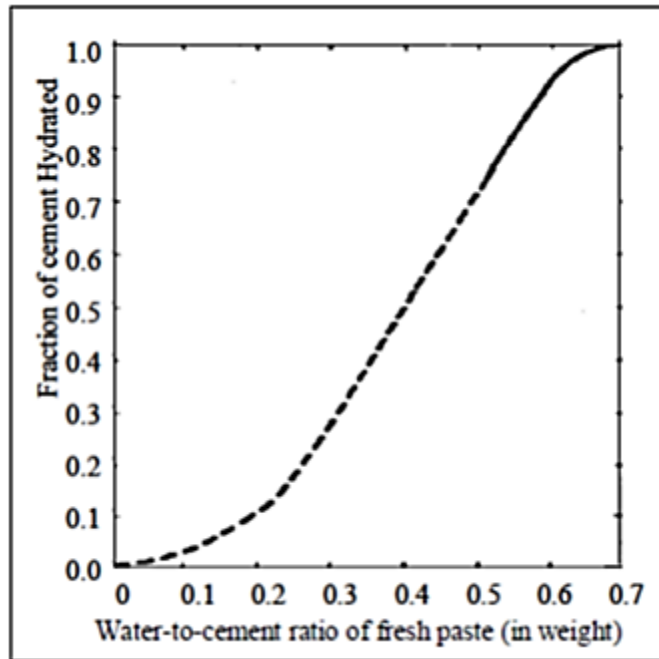


Figure (II.2) : Relation estimative du rapport E/C et degré d'hydratation à la continuité capillaire [91].

II.2.3. Influence de la taille des granulats

Dans le modèle à inclusion unique de Goodier, les concentrations de contraintes dues à la présence du granulat sont maximales au niveau de l'interface et s'étendent à l'intérieur d'une sphère dont le rayon ne dépasse pas quatre fois celui du granulat. Ainsi, plus le diamètre du granulat est grand et plus la zone perturbée est étendue. La dimension des microfissures, formées lorsque les concentrations de contraintes sont supérieures à la résistance à la traction ou au cisaillement de l'interface, est aussi fonction de la taille des granulats (longueur et ouverture des microfissures). La figure (II.3) présente la zone d'influence d'un vide pour les directions les plus critiques, c'est-à-dire $\theta = 0^\circ$ et 90° par rapport à la direction d'un champ de contraintes uniaxial et unitaire [46].

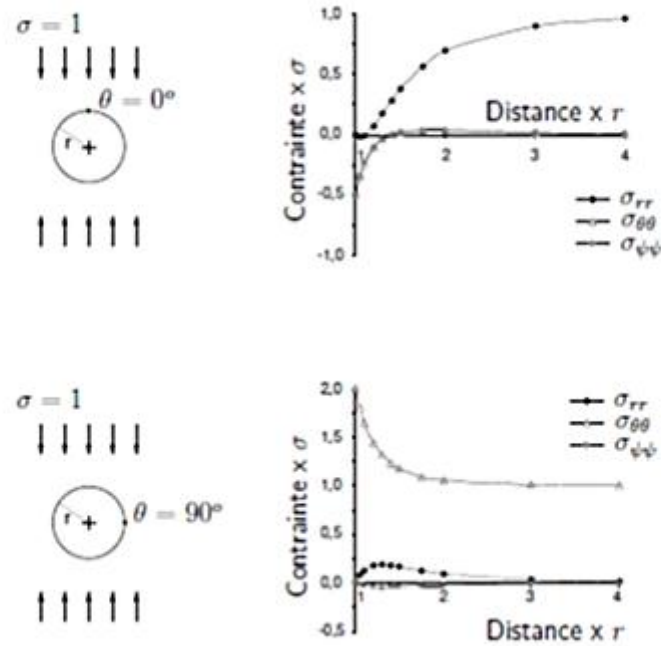


Figure (II.3) : Zone d'influence d'un vide ($E_g=0$) dans la direction $\theta = 0^\circ$ et 90° pour un champ de contraintes uniaxial et unitaire [46].

II.2.4. Influence de la proportion volumique des granulats

L'utilisation du modèle de Goodier est limitée car ce dernier n'implique qu'un seul granulat. Dans un matériau comme le béton, la proximité des granulats induit des interactions qui influencent le cheminement des contraintes et par conséquent le comportement mécanique du matériau.

Tel que posé initialement par Bremner, on devrait considérer qu'un granulat isolé est noyé dans une matrice dont le module élastique est non pas celui du mortier mais celui du béton. Ainsi, plus la proportion volumique des granulats légers est importante, plus le module élastique du béton s'équilibre avec celui des granulats et moins les concentrations de contraintes sont importantes, conformément aux observations expérimentales (comportement linéaire des bétons légers à haute performance) [46].

II.2.5. Maniabilité et murissement des bétons légers

La grande capacité d'absorption des granulats légers a une influence importante sur la maniabilité, la résistance et le murissement du béton. Cette influence dépend de l'état de granulat utilisé saturé et séché en surface ou bien sec.

Pour les granulats légers saturés sèches en surface, on n'observe pratiquement aucune influence sur la maniabilité. En conséquent l'eau absorbé n'est pas à prendre en compte dans le rapport eau /ciment du béton. Par ailleurs, lorsque l'hydratation du ciment fait chuter l'humidité relative dans les pores capillaires de la pâte de ciment durci, l'eau présente dans les

granulats migre vers ces capillaires, rendant possible une hydratation supplémentaire. Cette situation pourrait être désignée par l'expression murissement humide interne, ce qui fait que les bétons de granulats légers sont moins sensibles à un murissement humide incorrect qu'un béton ordinaire.

En revanche en cas de granulats utilisés secs, l'absorption d'eau de granulats diminue la maniabilité. De plus, si le béton est vibré avant que l'absorption par les granulats légers secs ne soit terminée, des vides dus à la dessiccation se développent et à moins que le béton ne soit revibré, sa résistance sera moins élevée [31].

II.2.6. Masse volumique des bétons légers

L'expression masse volumique nécessite une définition particulière lorsqu'elle est employée pour un béton de granulats légers. En effet, trois masses volumiques différentes peuvent être définies : la masse volumique à l'état frais, la masse volumique à l'état sèche au four et la masse volumique à l'état sèche à l'air.

La masse volumique du béton fraîchement malaxé peut facilement être déterminée comme la masse volumique à l'état frais. Cependant au cours de séchage à l'air ambiant, l'humidité est perdue jusqu'à un quasi-équilibre : le béton a alors une masse volumique à l'état sèche à l'air. Si le béton est séché à 105 °C, il a atteint la masse volumique à l'état sèche au four. Des différences semblables se retrouvent également dans le cas de béton ordinaires, mais les différences entre les trois masses volumiques sont plus grandes dans le cas d'un béton léger, du fait de l'importance de la quantité d'eau contenue dans le béton léger frais et de ces variations lors de durcissement et de la vie de l'ouvrage.

Ainsi la masse volumique sèche : $\rho_{bs} = \rho_0 - E_{V0}$

Où ρ_0 désigne la masse volumique réelle du béton frais et E_{V0} la quantité d'eau évaporable du béton.

Cette dernière quantité peut être caractérisée par la relation suivante :

$$E_{V0} = E + E_a - 0,25C$$

Où E désigne la quantité d'eau de gâchage, E_a la quantité d'eau absorbée par les granulats légers, et C la quantité de ciment. Neville note que l'écart entre la masse volumique sèche ρ_{bs} et la masse volumique du béton frais ρ_0 varie entre 150-250 kg/m³

La masse volumique à l'état sèche à l'étuve peut être prise égale en première approximation à la masse volumique sèche. Des recherches Nord-Américaines montrent en effet que quel que soit l'humidité initiale dans les granulats, la masse volumique à l'état sèche à l'air est de 50 kg/m³ de supérieure à la masse volumique à l'état sèche à l'étuve.

D'après Arnould et Virlogeux la prise de poids d'un béton léger immergé ne dépasse pas 40 kg/m³ et est de 30 kg/m³ pour un béton traditionnel. Les auteurs expliquent essentiellement ce

gain de poids par le remplissage des vides du mortier, et non pas la migration d'eau vers les granulats légers, les pores de surface étant au moins en grande partie bouchés par le mortier, au moment du malaxage et en début de prise, du fait des échanges d'eau entre le mortier et les granulats légers [31].

La plupart du temps, la spécification de la valeur de la masse volumique d'un BHP léger crée une grande confusion parce que les gens ne pensent pas à la même masse volumique. Selon la norme ASTM, il y a actuellement deux façons de mesurer la masse volumique d'un béton léger : la norme ASTM C138 et la norme ASTM C567 indiquent comment calculer la masse volumique du béton frais, la masse volumique du béton sèche à l'air et une masse volumique approximative.

La mesure de la masse volumique du béton frais est très facile, mais ce n'est pas la valeur qui intéresse le concepteur parce que le béton léger séchera plus ou moins après sa mise en place. La masse volumique sèche du béton léger est toujours une valeur bien définie qui peut être facilement mesurée, mais il est évident que le béton léger dans la structure sera un peu plus dense, car il n'y sera jamais à l'état sec comme à sa sortie de l'étuve.

De façon à éviter toute confusion durant la construction d'une structure où l'on utilise un BHP léger, il est très important de définir quelle est la méthode qui sera utilisée pour contrôler sa masse volumique. Si, pour quelque raison que ce soit, on décide que la masse volumique du BHP léger sera mesurée différemment, il est très important de définir de façon précise la procédure qui devra être utilisée pour mesurer cette masse volumique. Dans tous les cas, il sera très utile d'établir une corrélation entre cette valeur et les valeurs obtenues en utilisant les deux méthodes ASTM précédentes qui sont particulièrement utiles lorsque l'on veut exercer un contrôle de la qualité sur la production du BHP léger.

Dans un cas particulier, la masse volumique de carottes, prélevées dans une structure 28 jours après la mise en place du béton, a été sélectionnée comme valeur de contrôle de la masse volumique du béton léger. Afin d'établir une corrélation entre la masse volumique du béton frais telle que mesurée selon la norme ASTM C138 et les différentes valeurs calculées quand on utilise la norme ASTM C 567 et la masse volumique des carottes qui intéressait le concepteur, il a donc fallu couler de gros blocs de BHP léger et les carotter à 28 jours avant que ne débute le projet [23].

II.2.7. Cure interne

Les mécanismes de la cure interne qui sont détaillés ci-après sont basés sur un article de Henkiesiefken. Pour comprendre le fonctionnement de la cure interne, il convient de revenir sur le mécanisme du retrait chimique. Le retrait chimique a lieu quand des produits d'une réaction occupent un volume plus petit que les réactifs. Le retrait chimique décrit la réduction

du volume qui intervient pendant l'hydratation à cause de la réaction chimique. Avant la prise, ce retrait n'est pas un problème puisque le béton est toujours fluide et s'affaisse sur lui-même. Cependant, après la prise, la nature rigide du béton ne permet plus le réarrangement des particules, ce qui a pour conséquence la création de vides gazeux. Sans apport d'eau externe (externe à la pâte de ciment), le retrait chimique résulte en une diminution de l'humidité relative dans le réseau poreux et se traduit globalement par une autodessiccation de la pâte.

Comme lors du départ de l'eau vers le milieu ambiant, un processus de réorganisation de l'eau se produit alors, engendrant une contraction que l'on désigne cette fois par le terme retrait endogène et qui peut provoquer la fissuration de la pâte. La cure interne consiste à un rapport d'eau des granulats légers qui vient remplir les vides créés par le retrait chimique. En laboratoire il a été montré que la cure interne est assez efficace pour atténuer l'autodessiccation et le retrait endogène. De plus récents travaux ont montré que la cure interne pouvait également réduire la fissuration liée aux retraits chimiques et plastiques, ainsi que l'absorption d'eau [90].

Pour le béton de poids normal, nous avons des facteurs de conversion, quand le test n'est pas à l'âge de 28 jours ou le durcissement des spécimens n'est pas conforme à la norme.

Le béton d'agrégat léger peut être très différent du béton de poids normal du ce point de vue. Les propriétés dépendent principalement des propriétés de l'agrégat de poids léger comme la densité des particules, la capacité d'absorption d'eau. L'objectif est d'étudier l'impact du temps de stockage sous l'eau sur la résistance à la compression et les résultats des essais de rupture [92].

Selon la norme actuelle du béton (EN 206-1) [93], la résistance pour classification est à l'âge de 28 jours, après un durcissement à l'état humide (conservé dans une humidité relative de 100%). Les normes changent aussi avec le temps et peuvent être différentes d'un pays à l'autre. Le durcissement mixte appliqué plus tôt (jusqu'à 7 jours dans l'eau et puis jusqu'à 28 jours dans l'air de laboratoire), dans la norme hongroise est encore autorisée et commun dans la pratique de l'ingénierie. Le vrai durcissement d'un renfort nouvellement construit d'une structure en béton (qui est assez proche du durcissement mixte) est également très différent que la méthode européenne normalisée.

Dans le cas des bases de données sur le béton à poids normal (BN), les résultats recueillies au cours des années. Les facteurs de conversion peuvent être trouvés dans plusieurs normes, mais le béton d'agrégat léger (BAL) est différent. Densité, élasticité, taux de durcissement et les propriétés d'absorption d'eau de BAL peuvent être très différentes de BN. Ils dépendent

principalement des propriétés de l'agrégat léger (AL) comme: la densité des particules, capacité d'absorption d'eau, revêtement de surface, résistance à l'écrasement, etc.

La répartition de l'AL dans la matrice en béton est également importante. Dans le signe du béton. La valeur de résistance, obtenue à partir d'un échantillon cylindrique ou cubique, est plus proche l'une de l'autre.

La rigidité du BAL est inférieure à celle de BN. Le module d'élasticité de BAL est défini non seulement par la résistance à la compression, mais aussi par la densité. Cet effet de densité est plus faible dans le cas de spécimens plus minces, les AL sont poreux, ont donc une meilleure capacité d'isolation thermique, et donc le taux de durcissement de béton est plus rapide [94]. Le durcissement rapide contribue à l'effet de durcissement interne dû typiquement à une structure de pores ouverte d'AL. Ces effets sont généralement favorables dans la pratique, leurs négligence ainsi influe positivement sur la sécurité. La porosité élevée du BAL en raison d'AL ayant des pores ouverts (et c'est généralement le cas) signifie une augmentation d'eau par rapport à l'AN. L'effet de ceci est cependant que la méthode de durcissement influencera davantage le résultat de résistance à la compression mesurable, mais dans une direction négative. Bien qu'une bonne hydratation provoque une plus grande résistance, mais moins de résistance peut être mesuré dans des conditions humides. Par conséquent, le rapport standard E/C ne donne pas de résultat réaliste pour BAL. Une situation encore plus spécifique est, si le test de compression est effectué pas exactement à l'âge de 28 jours.

II.2.8. Résistance à la compression

Les données précédentes dans ce chapitre ne peuvent être généralisées puisque les propriétés mécaniques des BHP légers dépendent beaucoup du type de granulats utilisé et de la masse volumique visée. Comme on l'a mentionné, dans certains cas, il est difficile de produire un BHP léger ayant une masse volumique inférieure à 2000 kg/m^3 et une résistance à la compression de l'ordre de 50 MPa alors que, dans un autre cas, avec un granulats léger performant, on peut produire un BHP ayant une résistance à la compression de 100 MPa et une masse volumique à l'état frais de 1865 kg/m^3 . Evidemment, pour un granulats léger donné, plus la masse volumique du béton est élevée, plus sa résistance à la compression est élevée [23].

Dans un béton de poids normal typique d'une résistance autour de 4 ksi, les agrégats grossiers ont a habituellement une rigidité beaucoup plus grande que le mortier environnant. Par conséquent, le comportement en compression est régi par la formation de micro-fissures. MacGregor et Wight (2005) présentent quatre étapes dans lesquelles un élément en béton de poids normal typique échoue en compression :

1- Avant l'addition de charge, les micro-fissures connues sous le nom de fissures de liaison sans charge se forment en raison de la retenue du retrait et des effets thermiques par les agrégats plus rigides.

Ces fissures jouent peu de rôle dans le comportement du béton en compression et les déformations sont linéaires jusqu'à environ 30% de la contrainte de compression finale.

2- Une fois que la contrainte a dépassé 30% de la charge ultime, il se produit une microfissuration supplémentaire et entraîne une redistribution de la charge dans toute la matrice de béton dans les zones de liaison interfaciale non endommagées et le mortier. Ces fissures sont stables et ne se propagent qu'avec une charge accrue. Une fissuration importante des liaisons autour de l'agrégat grossier entraîne une action de calage de l'agrégat et amplifie les contraintes transversales de traction dans le mortier.

3- Au fur et à mesure que la charge augmente au-delà d'environ 50 ou 60% de la charge ultime, les contraintes transversales de traction et les contraintes conduisent à un micro-fissures du mortier parallèle à la charge appliquée. De nouveau, ces fissures sont stables et ne se propagent que sous une charge accrue, conduisant à une nouvelle répartition des contraintes au fur et à mesure que la fissuration augmente.

4- Une fois que la charge a atteint approximativement 75 à 80% de la contrainte maximale, parfois appelée la contrainte critique, les fissures de mortier commencent à se connecter aux fissures de liaison et micro-fissuration devient instable, conduisant éventuellement à l'échec si la charge est autorisée à rester pour une période prolongée. Le taux de micro-fissuration augmente à mesure que la charge augmente. L'échec se produit lorsque le béton ne peut plus supporter la contrainte appliquée par redistribution.

A partir de cette séquence, on voit que le micro-fissures est accéléré en présence d'une mauvaise qualité d'adhérence interfaciale et d'incompatibilités de contrainte entre le mortier et l'agrégat grossier, qui résulte d'une différence de rigidité. Par conséquent, la micro-fissuration régit le comportement d'un béton de poids normal typique en compression. Dans le béton de haute résistance à poids normal, la densité accrue de la pâte de ciment conduit à une rigidité de mortier plus élevée et peut-être une zone de liaison interfaciale plus forte. Il en résulte une meilleure compatibilité de déformation entre le mortier et l'agrégat grossier et donc un comportement plus monolithique entre les matériaux constitutifs (Neville1997). En augmentant la rigidité et la densité du mortier en béton de poids normal, des résistances supérieures peuvent être obtenues [95].

Les agrégats légers ont une rigidité inférieure qui est plus proche de la valeur de la raideur d'une pâte de ciment typique que les agrégats de poids normal. De plus, la zone de liaison interfaciale tend à être de qualité supérieure avec un agrégat léger dû à divers facteurs, un

facteur étant la surface rugueuse de l'agrégat qui se traduit par un verrouillage mécanique entre le mortier et l'agrégat. Par conséquent, il existe une absence de micro-fissuration précoce des liaisons dans les bétons légers et un comportement monolithique accru sous charge de compression. Ce comportement monolithique accru permet à certains bétons légers d'obtenir des forces supérieures à 15 ksi malgré une force d'agrégat plus faible que les bétons de poids normal comparables. D'autre part, la résistance des agrégats est généralement le facteur limitant dans la résistance à la compression maximale qui peut être obtenue pour un béton léger particulier, et la défaillance à la compression des agrégats légers se produira à des contraintes plus faibles que pour les agrégats de poids normal.

A titre d'exemple, Zhou et al. (1998) ont constaté que pour le béton ayant des matériaux et des proportions de mélange identiques contenant un agrégat de poids normal ou un agrégat léger (cendres volantes frittées), le béton léger avait une résistance à la compression 22% inférieure à celle du béton de poids normal.

Alors que l'augmentation de la résistance et de la rigidité du mortier tend à donner une meilleure compatibilité de contrainte entre l'agrégat de poids normal et le mortier, faire de même avec l'agrégat léger peut avoir l'effet inverse. Cela conduit finalement à une défaillance résultant du fractionnement transversal des agrégats légers. Slate et al. (1986) ont suggéré que le fractionnement transversal de l'agrégat grossier est responsable dans une certaine mesure de la défaillance de tous les bétons légers indépendamment de leur résistance. Selon Holm et Bremner (2000), ce comportement est également responsable des bétons légers présentant un plafond de résistance définitif. Plus précisément, le béton léger a atteint son plafond de résistance lorsque l'amélioration de la résistance et de la qualité du mortier utilisé avec un agrégat spécifique entraîne une augmentation négligeable de la résistance à la compression.

Alors que le béton de poids normal présente généralement une faible pente positive à l'atteinte du plafond de résistance, le béton léger tend à présenter des pentes approchant le zéro. Le plafond de résistance d'un béton léger augmentera à mesure que la taille maximale des agrégats sera réduite. En outre, la résistance à la compression maximale pouvant être atteinte peut varier considérablement selon le choix des agrégats.

Par exemple, Meyer (2002) a réalisé des études expérimentales utilisant des bétons légers contenant une ardoise expansée avec des résistances de béton aussi élevées que 11,6 ksi à 56 jours. En attendant, dans le développement de mélanges BHPL dans les études à l'Université du Texas, Heffington (2000) a éprouvé des difficultés à obtenir des forces qui correspondrait à une résistance à la compression de conception de 8 ksi utilisant une argile expansée connue sous le nom de Clodine.

Le développement de bétons à haute résistance a permis l'utilisation de béton préfabriqué, des poutres en béton précontraint à travers les États-Unis. En Géorgie, des longueurs plus longues entraînent des poutres souvent trop lourdes pour les transporter à travers les ponts existants et exigent un permis de supercharges pour être transportés [95].

L'utilisation de béton léger à haute performance (BHPL) et de haute performance peut donner des longueurs plus longues et des poutres plus légères. Des recherches antérieures à la Géorgie Institute of Technology (Georgia Tech) a montré que les poutrelles de pont BHPL construit avec du béton de compression de 69 MPa avec une très faible perméabilité, tout en réalisant jusqu'à une diminution de 20% du poids d'expédition [96].

II.2.9. Module de rupture

Berra et Ferrara ont mesuré la résistance à la traction directe de différents bétons légers et ont trouvé des valeurs comprises entre 1,9 et 2,4 MPa. Malhotra (1990) a mesuré une résistance à la flexion sur des cubes légers variant de 6,0 à 8,7 MPa et une résistance au fendage comprise entre 3,5 et 5,2 MPa. De leur cote, Novokshchenov et Whitcomb (1990) ont obtenu 7,6 et 6,7 MPa pour les mêmes essais sur leurs BHP légers.

II.2.10. Module élastique

Le module élastique des BHP légers est évidemment plus faible que celui des BHP de densité normale pour une même résistance à la compression à cause de la plus faible rigidité des granulats légers. Les valeurs rapportées dans la documentation varient entre 17 GPa pour des éprouvettes muries à 20 °C et à 95% d'humidité relative jusqu'à 30 GPa. Cependant, pour des éprouvettes muries à 20 °C et 50% d'humidité relative, Novokshchenov et Whitcomb (1990) mesurent un module élastique compris entre 13 et 18 GPa [23].

Le module d'élasticité du béton est fonction de la rigidité de ses constituants. À cause de la rigidité inférieure des agrégats légers par rapport aux agrégats de poids normal typique, les bétons légers présentent un module d'élasticité inférieur à une résistance comparable de béton. AASHTO tient compte de cette rigidité inférieure en incluant un facteur de poids unitaire dans l'équation de module élastique. En particulier, l'équation AASHTO 5.4.2.4-1 spécifie que le module élastique de bétons d'un poids unitaire compris entre 90 et 155 pcf est :

$$E_c = K_1 33000 w_c^{1.5} \sqrt{f'_c} \quad (1)$$

Où:

E_c = module d'élasticité du béton (ksi)

K_1 = facteur de correction pour la source agrégat, pris comme 1,0 sauf si les données expérimentales sont disponible

w_c = poids unitaire du béton (kcf)

f'_c = Résistance à la compression du béton spécifiée (ksi)

Selon le rapport du Comité ACI 213 (2003), l'équation 1 tend à surestimer le module d'élasticité du béton léger. Il est recommandé que la formule soit modifiée en conséquence. En utilisant des unités de pcf et psi, la formule 211 du Comité ACI est donnée comme suit:

$$E_c = w_c^{1.5} C \sqrt{f'_c} \quad (2)$$

Où:

E_c = module d'élasticité du béton (psi)

W_c = poids unitaire du béton (pcf)

C = coefficient de résistance égal à 31 pour le béton de 5000 psi et 29 pour le béton de 6000 psi

f'_c = Résistance à la compression du béton spécifiée (psi)

Plus récemment, Rizkalla et al. (2007) a recommandé que pour les bétons dont la résistance est supérieure à 10 ksi, l'équation 2.1 doit être remplacée par l'équation

$$E_c = 310000 K_1 w_c^{1.5} \sqrt[3]{f'_c} \quad (3)$$

Où toutes les variables sont telles que définies dans l'équation 1. Russell (2007) a montré que l'équation 3 a l'effet de la réduction des valeurs prédites du module élastique plus pour le béton léger que pour le béton de poids normal. Les équations 1 à 3 ne sont que quelques-unes de plusieurs équations qui ont été proposés par les chercheurs pour le calcul du module élastique des bétons léger [95].

II.2.11. Adhérence

L'adhérence entre un BHP léger et une armature d'acier lisse de 20 mm enfoncée verticalement dans un bloc de 200×200×200 mm a varié de 1,9 à 2,3 MPa. Ces valeurs ont été obtenues autant sur des éprouvettes muries à 20 °C et à 95% d'humidité relative que sur des éprouvettes muries à la même température, mais sous une humidité relative de 50% seulement.

II.2.12. Retrait et fluage

Selon Berra et Ferrara (1990), les BHP fabriqués avec des granulats légers peuvent avoir un retrait à court terme plus faible étant donnée la présence d'eau dans les granulats légers, mais la valeur du retrait à un temps infini peut être supérieure à celle des bétons usuels. Ces auteurs ont trouvé aussi que le fluage spécifique de leur béton était deux fois plus élevé que celui de béton de densité normale. De son côté, Malhotra (1990) a trouvé que le retrait à 1 an d'un béton léger qui contenait des ajouts cimentaires était beaucoup plus faible (400×10^{-6} à 517×10^{-6}) que celui des bétons légers ne contenant que de ciment Portland (580×10^{-6} à 630×10^{-6}). Il a aussi noté la même tendance pour les valeurs de fluage spécifiques : 640 et 685×10^{-6} pour des bétons léger fabriqués avec des ciments Portland et 460 et 510×10^{-6} pour des bétons léger contenant des cendres volantes. Malhotra (1990) explique cette différence par la

quantité de cendres volantes qui n'a pas encore réagit et qui se comporte comme un granulat qui offre une résistance accrue au retrait et au fluage Nilsen et Aitcin (1992) ont aussi trouvé une valeur de retrait plus faible pour deux BHP légers qu'ils ont comparé au retrait d'un béton de référence ayant le même rapport eau /ciment, mais fait avec un granulat de densité normale. Le granulat fin de ces deux bétons légers était un sable naturel. Le granulat léger qui a offert les meilleures performances en termes de résistance a présenté le plus faible retrait c'est-à-dire 70×10^{-6} après 28 jours de durcissement, tandis que le retrait de l'autre BHP léger était de 260×10^{-6} , à cette époque le retrait endogène développé durant les 24 premières heures n'était pas pris en compte [23].

II.2.13. Courbe contrainte/déformation

Selon les études de Wang et coll (1978) et de Berra et Ferrara (1990) les courbes contrainte/déformation des BHP léger étaient linéaires jusqu'au pic, mais leurs branches descendantes étaient très abruptes et la ductilité décroissait au fur et à mesure que la résistance augmentait. Cependant, ces auteurs ont trouvé que les BHP légers étaient moins ductile que des bétons de densité normale de même résistance [23].

II.2.14. Résistance à la fatigue

Selon Hoff (1990), plusieurs chercheurs ont trouvé que les bétons légers ont une bien meilleure résistance à la fatigue que les bétons de densité normale. Les bétons légers ayant un module d'élasticité beaucoup plus proche de celui du mortier, les répartitions et les concentrations de contrainte à l'interface mortier/granulat sont réduites, ce qui entraîne une distribution plus uniforme des contraintes. Une étude récente sur la résistance à la fatigue de BHP légers de 45 à 65 MPa a montré que la limite d'endurance définie comme la contrainte à la fatigue en flexion à laquelle une poutre peut résister à 2 millions de cycles de chargement est de 10 à 16% supérieure à celle d'un béton de densité normale de résistance équivalente.

Quelques essais de fatigue faits en Norvège sur des carottes dans des structures construites avec des BHP légers ont permis de trouver qu'il n'y a avait pas de déviation significatives entre le résistance à la fatigue de ces BHP légers et celles des BHP de résistance semblable [23].

II.2.12. Caractéristiques thermiques

Berra et Ferrara (1990) ont trouvé que les propriétés thermiques (coefficient d'expansion thermique, conductivité thermique et diffusivité) des bétons légers qu'ils ont mesurées étaient égales à la moitié de celles des bétons de densité normale de composition semblable. Ces auteurs ont conclu que ces meilleures propriétés thermiques couplées à un module d'élasticité plus faible rendent les BHP légers plus résistants aux contraintes thermiques que les bétons

usuels. Pour leur part, Novokshchenov et Whitcomb (1990) ont trouvé que le coefficient de conductivité thermique augmentait de façon significative avec la résistance des BHP légers [23].

II.2.15. Durabilité

L'utilisation des granulats légers n'affecte pas la durabilité à long terme du béton. En effet, la porosité des granulats est généralement discontinue et n'influence pas la perméabilité du béton. Cette propriété est plutôt contrôlée par la pâte de ciment durcie et par la qualité des interfaces pâte-granulats. Dans les bétons légers à haute performance, l'utilisation d'un faible rapport eau/ciment ainsi que la densification et la diminution de la microfissuration des interfaces, liée à la meilleure compatibilité élastique entre les granulats et la matrice, ne favorise pas le transfert de matières à l'intérieur du matériau.

Les grands volumes de vides occasionnés par les granulats légers pourraient augmenter la perméabilité aux gaz des bétons légers. La résistance à la corrosion des bétons légers à haute performance est cependant similaire à celle des bétons de granulats rigides. Des études menées sur plusieurs ponts et structures marines ont montré que l'intégrité microstructurale et la très faible microfissuration de ces bétons permettent de limiter significativement la diffusion des agents agressifs comme le chlore et le dioxyde de carbone à l'intérieur du matériau.

La résistance au gel et à l'écaillage du béton est obtenue en combinant des granulats et une matrice de qualité. Bien que les granulats légers soient très absorbants, ils sont néanmoins très durables au gel. Lorsque les granulats légers sont saturés avant la fabrication du béton, on augmente toutefois les risques d'endommagement du matériau si ce dernier est rapidement soumis à des cycles répétés de gel-dégel. Comme dans les bétons de granulats rigides, l'air entrainé permet de protéger efficacement le matériau contre le gel et l'écaillage.

Le retrait de séchage, lorsqu'il est empêché, induit des contraintes de traction qui peuvent rapidement dépasser la résistance à la traction du béton. Dans les bétons légers, l'intensité du retrait de séchage, influencée par la proportion volumique et la perméabilité de la matrice cimentaire, est également liée au degré de saturation des granulats. Dans les bétons légers à haute performance, la grande proportion volumique de matrice et le faible module élastique des granulats augmentent le potentiel de retrait par rapport à un béton de granulats rigides de même résistance. L'homogénéité et la grande capacité de déformation des bétons légers rendent néanmoins le matériau moins susceptible à la fissuration.

La composition minéralogique des granulats légers manufacturés, obtenue par des procédés de fabrication à très haute température, donne aux granulats une bonne stabilité face aux attaques chimiques et par rapport à la réactivité alcali-silice. Le bon choix du type de ciment

et du rapport eau/ciment est cependant essentiel pour assurer la durabilité des bétons légers face aux agressions chimiques [46].

Un facteur clé pour assurer la durabilité du béton est de limiter la perméabilité. Les propriétés de transport du béton sont régies par les trois phases principales du matrice de ciment, agrégats et la ZI. Il a été souligné que la ZI et le mortier peuvent avoir une perméabilité plus élevée que la pâte de ciment. Les mêmes auteurs ont montré des résultats de perméabilité dans des roches de poids normal comparables à ceux d'une population pauvre pâte (0,71 rapport eau / ciment).

Perméabilité à l'eau, pénétration de chlorure, résistivité électrique et chlorure la perméabilité a été mesurée sur BHPL produite avec cinq agrégats légers. Il a été conclu que la perméabilité du béton était régie par la porosité de matrice plutôt que l'agrégat léger parce que l'agrégat léger le plus poreux n'a pas augmenté la perméabilité de BHPL par rapport à une perméabilité moins poreuse que l'agrégat de poids normal. Les auteurs ont attribué cela à une ZI améliorée comme cela se produit avec résistance normale de béton léger. La perméabilité a diminué teneur en ciment a augmenté, mais aucune amélioration supplémentaire n'a été observée teneur supérieure à 500 kg / m³ (845 lb / yd³), probablement due aux fissurations thermique origine de grands gradients thermiques. Cela pourrait être pertinent en raison des matériaux de ciment dans le BHPL.

Une étude a mesuré les coefficients de perméabilité à l'eau d'un ordre plus faible d'un rapport eau/ciment de 0,55 d'un béton d'agrégat léger comparé à son homologue de poids normal. Toutefois, pour le rapport eau/ciment de 0,35, il n'y a aucune différence significative entre les mélanges avec poids léger et poids normal d'agrégat. Cela était également vrai pour les mélanges de 0,35 eau/ciment en utilisant 10% de fumée de silice. On peut conclure que dans des mélanges à faible rapport eau/ciment où la ZI pourrait ne pas être présent, l'effets bénéfiques de l'agrégat léger n'étaient pas perceptibles. Les mélanges considéraient partiellement l'argile expansée saturé au moment du mélange, le durcissement interne est donc très faible ou nul.

Aucune différence significative due à l'utilisation des granulats de poids léger ou normal ont été trouvés dans la pénétration des ions chlorure et la perméabilité au même rapport eau-ciment des mélanges.

Une étude de la diffusion des chlorures a montré que 0,3 et 0,4 rapport eau/ciment le BHPL d'ardoise expansée avait une perméabilité aux ions chlorure après un an, mesurée selon à la norme ASTM C1202, de 162 et 202 coulombs, respectivement classés comme très faible perméabilité. Ces mélanges avaient 350 et 450 kg/m³ (590 et 760 lb/yd³) de (90% de ciment et 10% de fumée de silice). Lorsque 25, 40 et 56% en poids de ciment a été remplacé par des

endres volantes de classe F dans le rapport 0,3 eau/ciment, la perméabilité à un an de chlorure a ensuite diminué à 63, 44 et 28 coulombs, respectivement. Ce dernier étant une synergie entre le durcissement interne et des quantités élevées de cendres volantes. Selon ACI-213, bien qu'il existe une réaction potentielle alcali-silice entre le ciment et la silice amorphe dans l'agrégat léger, le laboratoire et les expériences de terrain n'ont pas enregistré d'expansion délétère réactive. Une étude n'a des différences appréciables d'expansion du fait de la réaction alcalino-siliceuse entre les sables légers produits avec un sable de poids normal inerte ou réactif. Les deux ont montré une expansion dessous de 200 $\mu\epsilon$ après un an, ce qui est inférieur à 400 $\mu\epsilon$ généralement accepté comme maximum dans la norme ASTM C 1293. Cela peut être dû à la faible capacité adapter de changement de volume.

Les recherches effectuées pour des essais accélérés de congélation-décongélation et de détérioration avec la présence de sels de dégivrage, ont trouvé des performances similaires entre béton léger de sable légers et béton léger normale [91].

II.3. Utilisation des BHP légers

Les BHP légers ont surtout été utilisés pour construire des plates-formes pétrolières pour deux raisons : pour améliorer la flottaison de la base de la plates-formes en cale sèche durant les opérations de remorquage pour leur résistance spécifique élevée (rapport entre la résistance et la masse volumique). Ce deuxième avantage rend intéressante l'utilisation des BHP légers pour construire des ponts et, dans de tels cas, Zhang et Gjorv(1991c) et Kefenc et coll.(1994) ont étudié la perméabilité et la diffusion des ions chlore des BHP légers. Quelques structures majeures ont été construites en utilisant des BHP légers. Une des premières a été la plate-forme Glomar Beaufort Sea I, construite en cale sèche au Japon puis remorquée à travers le pacifique et le Detroit de Bering pour être installée dans la mer de Beaufort. Cette plate-forme pétrolière devait être remorquée dans la mer de Braufort (nord de l'Alaska), où le tirant d'eau est limité et il aurait donc été impossible de la remorquer si elle avait été construite avec un BHP ordinaire.

Plus récemment, la plate-forme Hibernia a été construite en utilisant un BHP semi-léger dans lequel la moitié du volume de gros granulats avait été remplacée par un granulats léger.

En Norvège, en 1991, six ponts ont été construits avec des BHP légers (Tableau (I.3)) même si ce pays ne produit pas de granulats légers et qu'ils devaient être importés du Danemark ou d'Allemagne. En effet, même en utilisant des BHP léger qui coutaient beaucoup plus cher au m^3 qu'un BHP ordinaire, on a pu construire des ponts plus économiques, car la réduction du poids mort de ces ponts à très grande portée a largement compensé les couts supplémentaires reliés à l'importation des granulats légers [23].

Tableau (II.1) : Quelques ponts Norvégiens construits avec des BHP légers.

Pont	Portées en m	Résistance à la compression en MPa
SundhornØya(poutre caisson)	110+120+110	55
Boknasundet	9705+190+97.5	60
Eidsvold(pont haubanné)	8 x40	55
Bergsoysundet(pont flottant)		55
Salhus		55
Stovseth (poutre caisson)	100+220+100	55

II.4. Constructions en bétons à hautes performances légers

II.4.1. La Banque d'Amérique, Charlotte, N.-C

La structure en béton est la plus haute du sud-est des États-Unis avec un système de plancher en béton de plaques d'une épaisseur de 4 à 5/8 po (117 mm) supportées sur 460 mm (18 pouces)

Poutres en béton profondes et postérieures, centrées sur 10 pi (3,0 m). Le système de plancher en béton léger a été choisi pour le poids mort et pour atteindre le niveau de résistance au feu requis de 3 h [97].

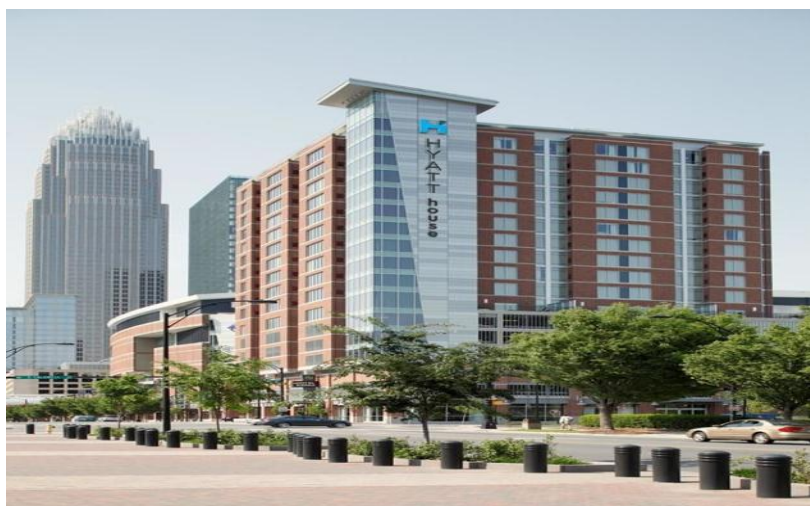


Figure (II.4) : La Banque d'Amérique [97].

II.4.2. Plateforme pétrolière Hibernia, 1998

La structure basée sur la gravité offshore d'Hibernia est une application importante de béton à densité spécifiée. Améliorer la flottabilité des plus grande structure flottante construite en Amérique du Nord, l'agrégat léger a remplacé environ 50% du poids normal dans le béton à haute résistance utilisé. La masse volumique résultante était de 135 lb / ft³ (2160 kg / m³).

Hibernia a été construit dans une cale sèche à Terre-Neuve, au Canada, puis Flotte vers une zone portuaire en eau profonde où la construction a continué. Une fois terminée, la structure de plus de 1 million de tonnes a été remorquée vers le site pétrolier de la mer du Nord d'Hibernia et mis en place sur le plancher océanique. Un programme complet de tests a été rapporté par Hoff et al. (1995) [97].



Figure (II.5) : Plateforme pétrolière Hibernia [97].

II.4.3. Pont flottant Pountons

Le béton à haute performance léger a été utilisé de manière très efficace dans les deux ponts et le pont flottant séparé mais adjacent Pontons en béton supportant une poutrelle en acier de faible hauteur près de la ville de Bergen, Norvège. Les pontons ont une longueur de 138 pi (42 m) et une largeur de 67 pi (20,5 m) ont été moulés dans des compartiments séparés par des cloisons étanches. La conception des compartiments a été déterminée par le concept que le pont flottant serait utile malgré la perte de deux compartiments adjacents en raison d'un accident [97].



Figure (II.6) : Pont flottant Pountons [97].

II.5. Conclusion

Un certain nombre de structures seront construites avec des BHP légers parce que les diminutions de poids de certains d'entre elles peuvent être critique et représentent quelques avantages économiques qui compenseront les couts dus à l'utilisation de granulats légers. En outre, la réduction du retrait endogène due à l'utilisation de granulats légers constitue un autre

avantage technologique certain. Il faut cependant avoir à l'espoir que le cout de production de ce type de béton est plus élevés, qu'il est plus difficile à produire et qu'il ne sera jamais aussi résistant et aussi rigide qu'un BHP à densité normale ayant le même rapport E/C.

Le béton d'agrégat léger a montré par le test et par la performance qu'il se comporter structurellement dans la même manière que le béton de poids normal. Pour les propriétés qui diffèrent, les différences sont en grande partie liées aux types d'agrégats et à la composition des bétons. Le concepteur doit tenir compte des avantages d'un poids plus léger et d'une meilleure isolation par rapport au coût supplémentaire du mélange léger. Le constructeur doit reconnaître les rares exigences relatives au transport, au placement et à la finition. De nombreux renseignements utiles sont disponibles auprès des producteurs d'agrégats légers grâce à leur contrôle sur le terrain et à leur service technique.

En utilisant du béton léger :

- Construction rapide et relativement simple.
- Economique en termes de transport et de réduction des effectifs.
- Une réduction significative du poids global permet d'économiser les poutres, les poteaux ou les fondations
- La plupart des bétons légers ont de meilleures propriétés de clouage et de sciage et plus résistant que le béton conventionnel plus lourd.

Les différentes propriétés des granulats légers et des bétons légers ont été largement étudiées. La principale distinction des bétons de granulats légers par rapport aux bétons de granulats rigides est la plus faible masse volumique qui diminue à la fois le module élastique et la résistance du béton. Bien que l'on observe un certain plafond de résistance, des bétons légers à haute performance d'une résistance en compression supérieure à 60 MPa pour une masse volumique inférieure à 1900 kg/m³ ont été réalisés.

Les mécanismes qui permettent d'expliquer un tel niveau de performance ne sont pas encore bien expliqués.

Nous proposons dans la suite du document d'étudier le comportement physique et mécanique des bétons à hautes performances légers à base de granulats légers naturelle et artificielles (pouzzolanes naturelles et laitiers cristallisées). Pour compléter cette étude, des essais de durabilité et de déformabilité et de module de Young seront réalisés pour caractériser le comportement de ces bétons spéciaux.

CHAPITRE III : CARACTÉRISTIQUES DES
MATÉRIAUX UTILISÉS ET COMPATIBILITÉ
CIMENT/SUPERPLASTIFIANT

CHAPITRE III

CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉS ET COMPATIBILITÉ CIMENT/SUPERPLASTIFIANT

III.1. INTRODUCTION

Les BHPL sont préparés en sélectionnant de façon très soignée chacun des ingrédients qui les constituent. Il n'est pas toujours facile de gagner les derniers MPa d'un BHPL, de diminuer son rapport E/C ou de maintenir sa maniabilité une heure après sa fabrication de façon à pouvoir le placer aussi facilement qu'un béton usuel, mais il est facile de perdre les caractéristiques essentielles des BHPL une fois qu'on les a obtenues. La performance et la qualité de chacun des ingrédients que l'on utilise pour fabriquer un BHPL deviennent critiques à un moment donné au fur et à mesure qu'augmente la résistance visée. Certains de ces caractéristiques sont toutefois plus critiques que d'autres ; certains ont un impact plus important sur les aspects économiques des BHPL et pourront déterminer si l'emploi d'un BHPL est compétitif face à l'acier, mais aussi face au béton usuel.

III.2. Caractéristiques des matériaux utilisés

III.2.1. Sélection des matériaux

Les matériaux sélectionnés sont :

III.2.1.1. Ciment

"CIMENT PORTLAND COMPOSÉ CPJ-CEM II/A 42.5 ".

Le ciment portland composé utilisé est produit en broyant le clinker avec adjonction de 3 à 5% de gypse et divers constituants : laitier, calcaire, pouzzolane naturelle. Le ciment utilisé pour tous les bétons à hautes performances légers est le ciment provenant de la cimenterie de Aïn Touta (wilaya de Batna) à savoir le CPJ-CEM II/A 42.5.

A/- Analyse chimique et minéralogique

L'analyse chimique du ciment a été effectuée au niveau du laboratoire de la cimenterie de Aïn-touta (Batna) selon la norme NF EN 196-2 (août 1995) [98].

Les résultats sont illustrés sur le tableau (III.1).

Tableau (III.1) : Composition chimique et minéralogique du ciment utilisé.

Composition chimique (%)		Composition minéralogique	
SiO ₂	20.34	C ₃ S	58.3
Al ₂ O ₃	5.37	C ₂ S	14.6
Fe ₂ O ₃	3.00	C ₃ A	8.7
CaO	61.69	C ₄ AF	11.26
MgO	1.80		
SO ₃	2.20		
Cl-	0.027		
K ₂ O	0.76		
Na ₂ O	0.14		
Chaux libre	0.97		
Perte au feu	5.03		
Résidus insolubles	11.26		

L'analyse chimique du ciment montre qu'il est conforme à la norme NFP 15-301 à savoir : % [MgO + CaO (libre)] < 5% et faible taux de Cl⁻ < 3.5%.

B/- Propriétés physiques

- Masse volumique apparente = 1080 kg/m³

- Masse volumique absolue = 3150 kg/m³

- Surface spécifique = 4500 cm²/g

III.2.1.2. Sable

Le sable utilisé dans notre travail provient de la région de Biskra (Lioua).

A/- Analyse granulométrique : [NFP 18-560], Figure (III.1).

Tableau (III.2) : Analyse granulométrique du sable.

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
5	0.5	0.5	0.05	99.95
2.5	134	134.5	13.45	86.55
1.25	100.5	235	23.5	76.5
0.63	202.5	437.5	43.75	56.25
0.315	356	793.5	79.35	20.65
0.160	123	916.5	91.65	8.35
0.080	68	984.5	98.45	1.55
fillers	15.5	1000	100	0

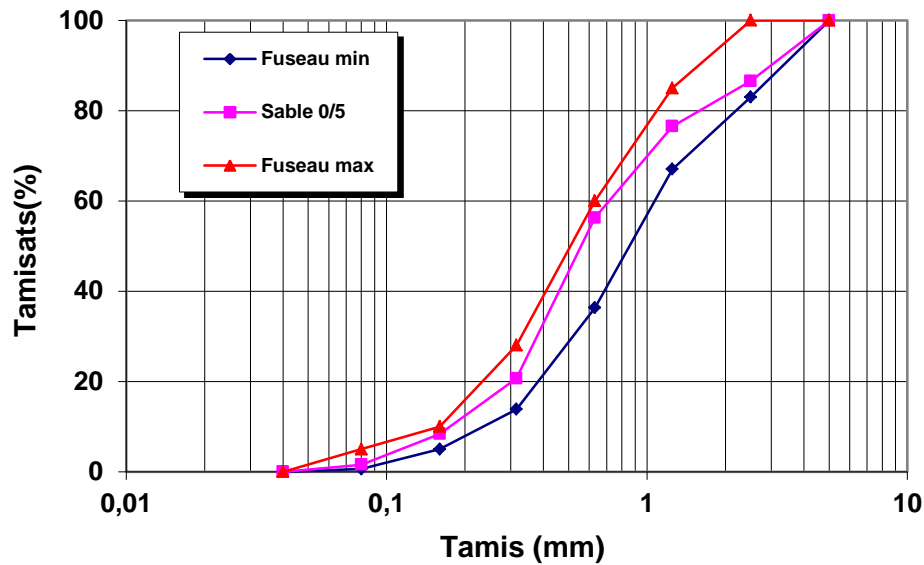


Figure (III.1) : Courbe granulométrique du sable 0/5.

B/- Propriétés physiques

- Masse volumique apparente = 1577 kg/m^3
- Densité à l'état saturé superficiellement sec = 2.50
- Module de finesse = 2.52
- Equivalent de sable = 68%, ESV = 75% : Sable légèrement argileux, de propriétés admissibles pour des bétons de qualité courante.
- Absorption = 2.5%

Il est à noter que la courbe granulométrique de notre sable s'inscrit dans le fuseau recommandé pour le béton courant.

III.2.1.3. Laitier cristallisé

Le laitier cristallisé peut-être laisser se refroidir tranquillement à l'air de façon qu'il cristallise plus ou moins bien, sous forme de melilite en générale, un mélange d'akermanite et de gehlinite, quand le laitier est refroidi de cette façon, on dit qu'il est cristallisé et il peut être utilisé comme granulat dans le béton (Alexandre and Sebileau, 1988) [99] .

Laitier cristallisé, de la manufacture de El Hadjar (Wilay de Annaba) Algérie, utilisée dans notre travail est de fractions suivantes :

- La fraction 3/8.
- La fraction 8/16.

A/- Analyse chimique

L'analyse chimique du laitier cristallisé a été effectuée au niveau du laboratoire de l'usine El Hadjar (Wilaya de Annaba).

Les résultats sont illustrés sur le tableau (III.3).

Tableau(III.3)

La composition chimique du granulat de laitier cristallisé.

Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	SiO ₂	S O ₃	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O
2.98%	1.3%	40.89%	40.26%	0.59%	3.40%	8.98%	0.01%	0.60%

B/- Analyse granulométrique : $M \geq 0.2 D_{max}$: Figure (III.2, III.3).

Tableau (III.4) : Analyse granulométrique de laitier cristallisé pour la fraction 8/16.

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus partiels (%)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
16	0	0	0	100
12.5	1520	47.53	47.53	52.47
10	978.88	30.59	78.12	21.88
8	700.16	21.88	100	0

Tableau (III.5) : Analyse granulométrique de laitier cristallisé pour la fraction 3/8.

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus partiels (%)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
8	0	0	0	100
6.3	758.4	47.4	47.4	52.6
5	345.6	21.6	69	31
3	496	31	100	0

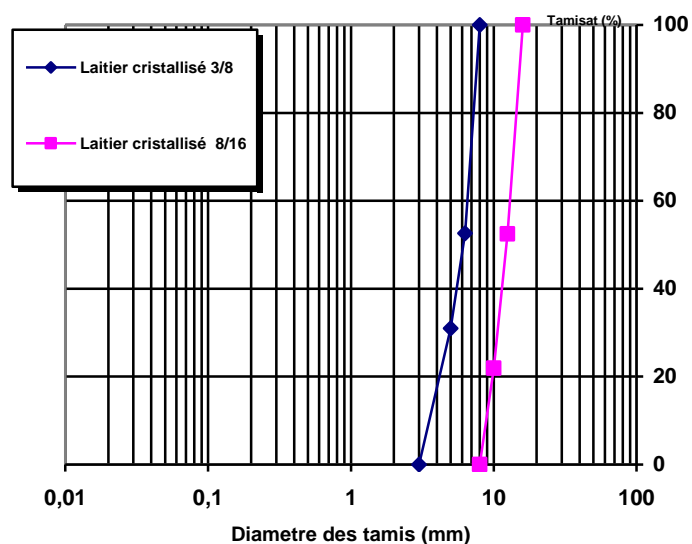


Figure (III.2) : Courbe granulométrique du laitier cristallisé pour la fraction 3/8 et la fraction 8/16.

C/- Propriétés physiques

- Masse volumique apparente = 1200 kg/m^3
- Densité à l'état saturé superficiellement sec = 1.80
- Le module de los Angeles = 30 % (Assez Dur).
- Absorption = 6 %



Photo (III.1) : Laitier cristallisé de fraction 3/8 et la fraction 8/16.

III.1.1.4. Pouzzolane naturelle

La pouzzolane, dans ses utilisations comme granulat, est définie par la norme NF P 17 301 comme « une roche naturelle constituée par des scories volcaniques, elle possède une structure scoriacée et alvéolaire ». La pouzzolane est généralement rouge ou noire ou exceptionnellement grise [100].

La pouzzolane utilisée est une pouzzolane naturelle de provenance du gisement de Beni-Saf (Chlef, Algérie), utilisée dans notre travail est de fractions suivantes :

- La fraction 3/8.
- La fraction 8/16.

A/- Analyse chimique

L'analyse chimique de la **pouzzolane naturelle** a été effectuée au niveau du laboratoire de la cimenterie de Aïn- touta (Batna).

Les résultats sont illustrés sur le tableau (III.6).

Tableau (III.6)

La composition chimique du granulat de pouzzolane naturelle.

Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	SO ₃	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	PAF
10%	9%	55%	0.9%	3%	18%	0.1%	0.80%	2.6

B/- Analyse granulométrique

Tableau (III.7) : Analyse granulométrique de la pouzzolane naturelle pour la fraction 8/16.

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus partiels (%)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
16	0	0	0	100
12.5	1787.84	55.87	55.87	44.13
10	424	13.25	69.12	30.88
8	988.16	30.88	100	0

Tableau (III.8) : Analyse granulométrique de la pouzzolane naturelle pour la fraction 3/8.

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus partiels (%)	Refus cumulés (%)	Tamisats cumulés (%)
8	0	0	0	100
6.3	408.64	25.54	25.54	74.46
5	433.44	27.09	52.63	47.37
3	757.92	47.37	100	0

C/- Propriétés physiques

- Masse volumique apparente = 900 kg/m³
- Densité à l'état saturé superficiellement sec = 1.60
- Le module de los Angeles = 34 % (Mis Dur).
- Absorption = 10 %.



Photo (III.2) : Pouzzolane naturelle de fraction 3/8 et la fraction 8/16.

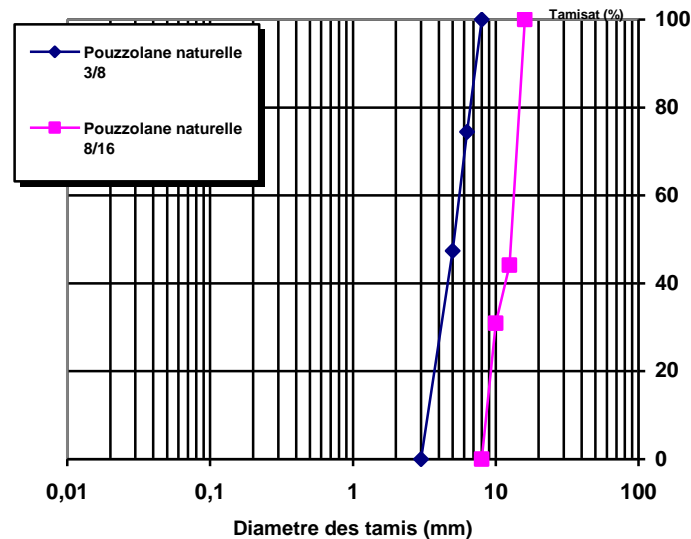


Figure (III.3) : Courbe granulométrique de la pouzzolane naturelle pour la fraction 3/8 et la fraction 8/16.

III.2.1.5. Eau de gâchage

L'eau utilisée lors de la fabrication des mélanges de béton est une eau potable de robinet de la ville de Biskra. Il s'agit d'une eau potable exempte d'impuretés. Sa température n'est pas contrôlée lors des gâchées, quoique le béton obtenu a une température assez constante d'un mélange à l'autre, de 18 à 20 °C.

III.2.1.6. Superplastifiant

Un superplastifiant a été utilisé dans tous les mélanges, et ce dans des proportions constantes. Il a été incorporé mélangé avec l'eau de gâchage dans le mélange en pratiquant ce que l'on appelle une double introduction, selon Jacques Baron et Jean-Pierre [101]. Le superplastifiant en question est le MEDAFLOW 145 (Granitex), un adjuvant qui est, lui aussi, utilisé fréquemment dans la pratique. Ce produit sert à augmenter la maniabilité des mélanges, et ce sans changer le rapport eau/ciment ou E/L. Ses caractéristiques sont les suivantes :

- FormeLiquide
- Couleurbrai clair

- pH 5 – 6
- Densité..... $1.065 \pm 0,015$
- Teneur en chlore $< 1\text{g/L}$
- Extrait sec $30 \pm 1.5\%$



Photo (III.3) : Superplastifiant MEDAFLOW 145 mélangé avec l'eau.

III.2.1.7. Fumée de silice

Elle est de provenance d'usine de Granitex. Afin d'améliorer les propriétés physiques et mécaniques du béton, la fumée de silice a été incorporée avec le ciment dans le malaxeur et ce dans dix huit mélanges de béton avec une proportion en masse de ciment de 8% et notamment en présence du superplastifiant. La fumée de silice utilisée est un MEDAPLAST HP adjuvant à base de micro silice dont les caractéristiques sont :

- Forme Poudre
- Couleur..... Grise
- Densité apparente..... 0.5
- Masse volumique absolue 2.2

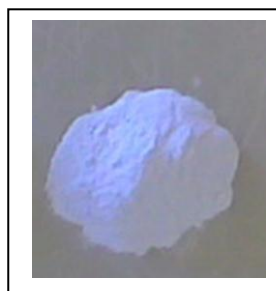


Photo (III.4) : Fumée de silice.

III.2.1.8. Pouzzolane naturelle

La pouzzolane naturelle utilisée a été de provenance du gisement de Beni-Saf, elle

a été incorporée avec le ciment dans le malaxeur et ce dans douze mélanges de béton avec une proportion en masse de ciment de 10%,15%,25% et 8% de la fumée de silice.

III.2.1.8.1. Propriétés physiques

- Masse volumique apparente = 930 kg/m^3
- Masse volumique absolue = 2600 kg/m^3
- Surface spécifique = $4550 \text{ cm}^2/\text{g}$



Photo (III.5) : Pouzzolane naturelle.

III.3. Compatibilité ciment/superplastifiant

La mise en place d'un béton à hautes performances légers peut donner lieu à certains problèmes de maniabilité, qui sont souvent tributaires de l'utilisation de superplastifiant avec certains ciments composés. La nouveauté essentielle apparue dans la technologie des bétons dans les années 80 est bien l'utilisation croissante des adjuvants superplastifiants (appelés aussi fluidifiants).

Ces produits ont la capacité de transformer un béton de consistance ferme en une suspension fluide, qui s'étale et remplit un récipient sous son propre poids. On peut aussi les utiliser pour diminuer la quantité d'eau de gâchage dans une proportion de l'ordre de 30% tout en gardant au mélange une maniabilité permettant sa mise en œuvre par les méthodes usuelles. Cependant, ces produits présentent à l'usage deux inconvénients [102] :

- Leur effet diffère beaucoup d'un ciment à l'autre, pour des raisons, en partie obscures, liées à la physico-chimie du système.
- La fluidité conférée au mélange peut être de très courte durée.

Le principal effort fourni pour palier à cette difficulté est de choisir le couple ciment superplastifiant le plus efficace permettant d'obtenir une réduction maximale de l'eau, une bonne ouvrabilité et une rhéologie satisfaisante du béton pendant le temps de mise en œuvre. Lors de l'utilisation de superplastifiants dans la confection de ces bétons, certains ciments peuvent parfois présenter des phénomènes d'incompatibilité ciment/superplastifiant : irrégularité des affaissements au cône d'Abrams initiaux et des temps de prise, et surtout, perte rapide de maniabilité après fabrication.

III.3.1. Méthode du cône Marsh

Cette méthode consiste à préparer un certain volume de coulis et à mesurer son temps d'écoulement, pour apprécier la fluidité de différents types de coulis.

III.3.2. Compatibilité ciment/superplastifiant

L'étude de la compatibilité ciment/superplastifiant (C/SP) peut se faire sur coulis. On pourra utiliser un essai d'écoulement du type cône Marsh tel que proposé par De Larrad et Puch [103], Hanna et coll [104] ou Rollet et coll [105]. Les résultats de la fluidité du coulis sont représentés par une courbe donnant le temps d'écoulement du système C/SP en fonction du dosage en superplastifiant juste après le malaxage du coulis et une heure après, Figure (II.5).

Le type de courbe obtenue nous renseigne sur trois points essentiels qui gouvernent le comportement rhéologique de la combinaison ciment/superplastifiant étudiée [106] :

- Le dosage critique correspondant au point de saturation (cassure dans la courbe de fluidité/dosage en superplastifiant).
- Le degré de fluidité atteint pour ce dosage critique (temps d'écoulement).
- L'évolution dans le temps de la fluidité de la combinaison ciment/superplastifiant (position relative des deux courbes à 5 et à 60 minutes).

Lorsqu'on rajoute du superplastifiant au-delà du point de saturation, on n'améliore plus la fluidité du système C/SP et, on ne fait qu'augmenter les risques de sédimentation et de retard de prise du ciment dus à un surdosage en superplastifiant. Lorsqu'on étudie la compatibilité C/SP, on peut se retrouver face à quatre situations, représentées schématiquement sur la figure (II.4), dans le cas où l'essai a été fait sur coulis à partir du cône de Marsh.

La figure (II.4.a) représente le cas d'une combinaison C/SP parfaitement compatible : le dosage correspondant au point de saturation n'est pas très élevé, de l'ordre de 1%, la viscosité du système est relativement faible et elle n'augmente que très légèrement pendant la première heure qui suit le premier contact ciment-superplastifiant-eau, quelque soit le dosage en fluidifiant.

La figure (II.4.b), au contraire, représente le cas d'une combinaison C/SP incompatible : le dosage correspondant au point de saturation est très élevé (supérieur à 2%), la viscosité est élevée et elle augmente inexorablement dans le temps si bien que, dans certains cas, il est impossible de mesurer la fluidité du système 5 minutes après le début du malaxage pour un dosage en extrait sec supérieur à 2%. Une telle combinaison est évidemment à rejeter.

Les figures (II.4.c) et (II.4.d) représentent des cas intermédiaires. Dans la figure (II.4.c), on a le cas d'une combinaison C/SP qui présente un excellent comportement rhéologique à court terme mais qui se dégrade dans le temps. On pourra essayer de corriger cette situation en

introduisant une certaine quantité de retardateur de façon à se ramener toujours au cas de la figure (II.4.a). Dans le cas de la figure (II.4.d), on est en présence d'une combinaison C/SP qui ne présente pas un excellent comportement rhéologique initial (dosage de saturation et temps d'écoulement élevés) mais dans la rhéologie ne se détériore pas dans le temps. Dans ce cas aussi, on pourra essayer d'utiliser un retardateur pour corriger la situation.

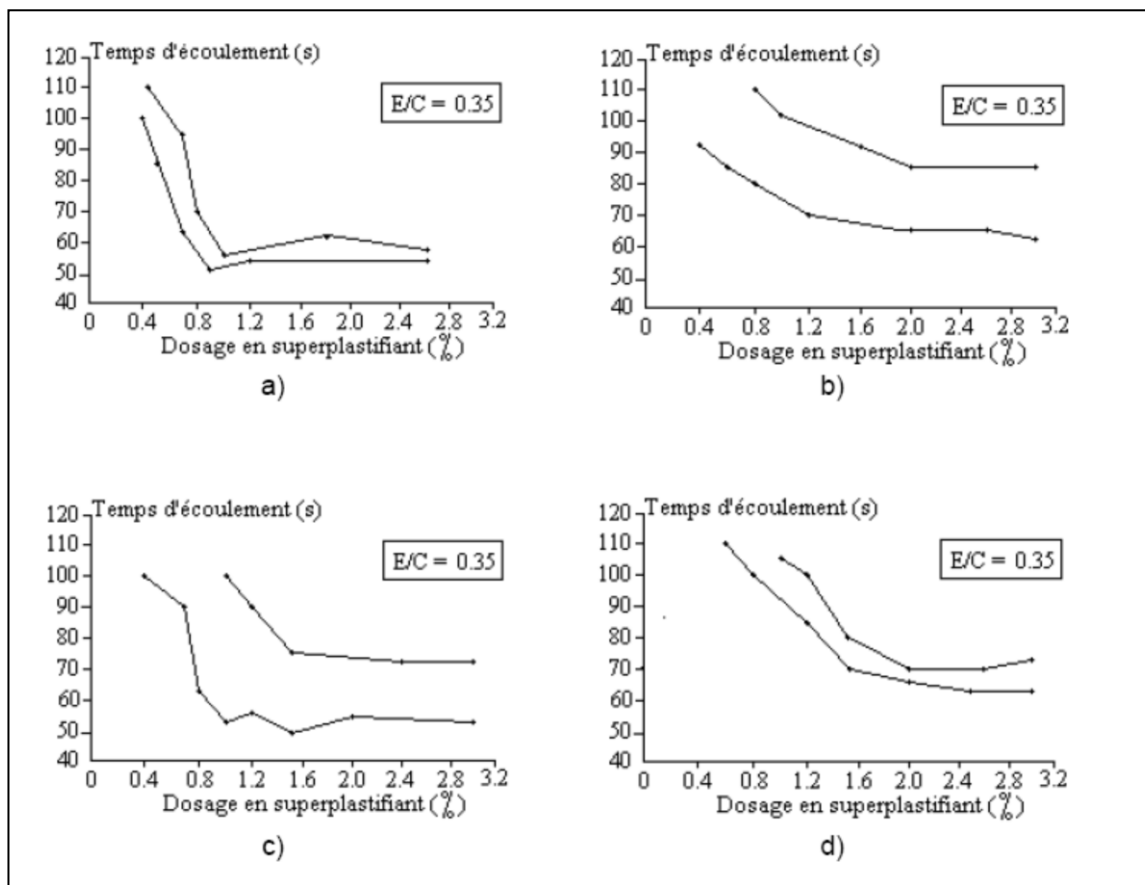


Figure (III.4): Différents types de comportement rhéologique.

III.3.3. Présentation de l'essai

Ce travail consiste à étudier le comportement rhéologique du couple ciment superplastifiant C/SP suivant :

- CIMENT PORTLAND COMPOSÉ CPJ-CEM II/A 42.5.
- MEDAFLOW 145 (Granitex).

Le rapport E/C utilisé est de 0.35.



Photo (III.6) : Equipement utilisé.

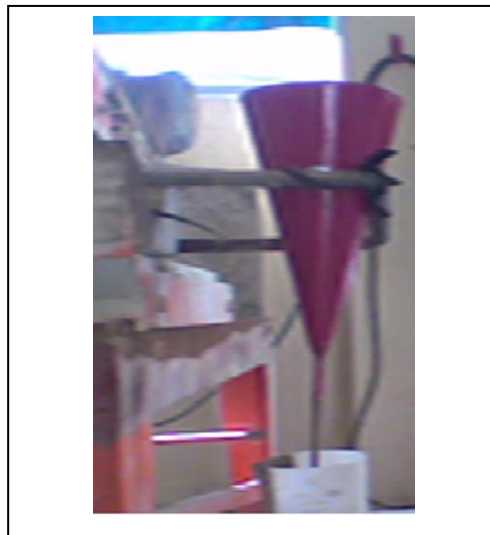
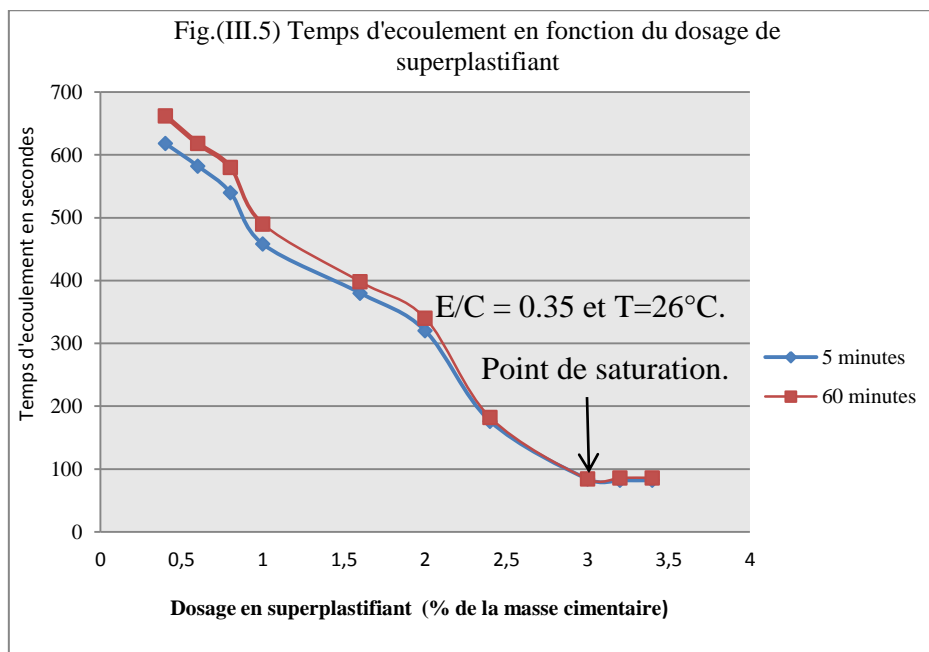


Photo (III.7) : Mesure du temps d'écoulement du coulis.

III.3.4. Résultats obtenus

Les résultats obtenus sont rassemblés sur la figure (III.5).



III.3.5. Commentaire

- La combinaison C/SP étudiée est compatible et le point de saturation est très élevé (3%) parce que la teneur en extrait sec du superplastifiant utilisé est plus ou moins basse 30%.
- Les deux courbes sont très proches parce que le MEDAFLOW 145 permet l'obtention d'un long maintien d'ouvrabilité.

III.3.6. Besoin de prévisibilité et de robustesse

Le béton à hautes performances exige une maniabilité accrue. Toutefois, étant donné que les exigences augmentent en termes de performance, la fiabilité de conception du mélange devient un aspect plus critique. A cela s'ajoute un besoin croissant de prévisibilité des propriétés du béton et la sélection a priori de ses composants ainsi que leur dosage, afin de répondre aux exigences de conception en minimisant la sensibilité aux variations d'approvisionnement des matériaux.

III.3.7. Influence de la séquence d'introduction du superplastifiant

Comme dans le cas des réducteurs d'eau et même de façon encore plus nette, on observe qu'en général lorsqu'on a le loisir de le faire, on a tout intérêt à rajouter le superplastifiant plus tard possible lors du malaxage. On laisse ainsi le temps au sulfate de calcium pour former une coquille d'ettringite qui bloquera temporairement l'hydratation du ciment Portland avant le superplastifiant ne soit introduit. Les molécules de Superplastifiant n'entrent donc pas en compétition avec le sulfate de calcium pour réagir avec le C_3A ; elles demeurent disponibles pour disperser les particules de ciment et augmenter ainsi les effets du superplastifiant sur la consistance du béton. Il n'est pas toujours possible de retarder

l'introduction de toute la quantité de superplastifiant qui est nécessaire pour en obtenir un béton ayant un affaissement désiré ; c'est notamment le cas des bétons à hautes performances légers, où si l'on ne gâchait le béton qu'avec la quantité d'eau nécessaire à l'obtention du faible rapport E/C, on obtiendrait un béton très sec sur lequel d'ailleurs le superplastifiant, introduit par la suite, n'aurait qu'assez peu d'effet. On préfère alors pratiquer ce que l'on appelle une double introduction, c'est-à-dire que, dans un premier temps, on incorpore immédiatement dans le béton juste assez de superplastifiant pour que l'on puisse obtenir un béton plastique, 50 à 100 mm d'affaissement, que l'on peut malaxer convenablement et l'on retarde l'introduction du reste du superplastifiant, en un deuxième temps, vers la fin de période de malaxage ou, mieux encore, à la livraison (Figure II.6).

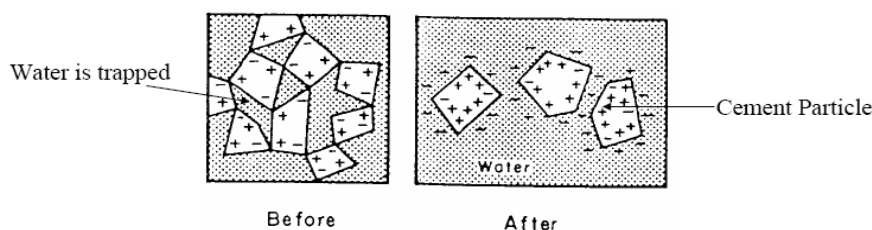


Figure (III.6) : Effet de superplastifiant sur la pâte de ciment.

Une autre possibilité, pratiquée à l'université de Sherbrooke, consiste à incorporer dans le béton une faible quantité de retardateur (gluconate de sodium) au moment de son malaxage avec toute la quantité de superplastifiant nécessaire. En effet, ces molécules (courtes) de retardateur agissent plus vite sur le C_3A que les molécules (plus grosses) de superplastifiant, réagissant avec le C_3A [101].

III.4. Conclusion

La méthode de mesure de la fluidité par le cône de Marsh est un moyen efficace pour une première sélection du couple ciment superplastifiant, susceptible d'être utilisé pour la confection d'un béton à haute performance.

La fluidité du coulis est liée à la composition du ciment et du type d'addition minérale présente dans sa composition. Ceci influe directement sur le choix du type de superplastifiant le mieux adapté et qui confère la plus grande fluidité et la meilleure compatibilité au coulis.

Le superplastifiant MEDAFLOW 145 à base de poly carboxylates d'éther modifiés entraîne une plus grande fluidité pour un grand dosage de saturation.

En se basant sur l'approche au Cône de Marsh, nous avons étudié l'influence du rapport Eau/liant, ainsi que celui de l'adjuvant sur la fluidité des pâtes de ciments. Les résultats obtenus vont dans le sens de la mise au point des coulis et leur formulation pour leurs

utilisations comme matériau indépendant, ou` pour les introduire dans une composition de béton en tant que phase suspendant.

Parmi les essais développés pour la caractérisation des fluidités des coulis, l'utilisation de l'essai au Cône de Marsh. L'essai au Cône de Marsh a été préalablement utilisé pour la détermination de la fluidité relative des pâtes de ciments avec superplastifiant pour la recommandation de L'AFREM pour la formulation des bétons à hautes performances légers.

Le point de saturation est défini par le dosage de superplastifiant en extrait sec audessus duquel le temps d'écoulement ne décroît plus d'une manière appréciable. Le fait qu'une combinaison ciment- superplastifiant ne présente pas un point de saturation bien identifiable peut indiquer une incompatibilité.

Les paramètres les plus importants qui contrôlent la rhéologie des ciments et des superplastifiants sont les suivants :

- Le rapport eau/liant auquel l'essai est effectué ; il faut cependant qu'il soit aussi voisin que possible de celui qui sera utilisé pour fabriquer le BHP léger ;
- La température initiale de l'eau utilisée pour fabriquer le coulis ;
- La finesse du ciment ;
- La composition physique et chimique du ciment ;
- L'efficacité du malaxage.

En outre, la combinaison des superplastifiants et des ajouts cimentaires permet aussi de favoriser une meilleure utilisation et une utilisation en plus grande quantité d'additions minérales hydrauliques ou pouzzolaniques en diminuant la quantité de **C-H-S** nécessaire pour développer les premiers liens qui donnent la résistance au jeune âge du béton.

L'utilisation combinée de deux ajouts cimentaires, du pouzzolane et de la fumée de silice ou d'autres ajouts cimentaires, est aussi très bénéfique parce que qu'une faible quantité de fumée de silice permet de compenser la plus faible réactivité du pouzzolane ou d'autres ajouts cimentaires.

Les BHPL pouvaient être fabriqués en utilisant les ressources locales et les méthodes de fabrication de béton tout à fait usuelles. Le succès de la fabrication des BHPL n'a rien à voir avec la chance ; ce succès est plutôt obtenu en combinant l'expérience et les résultats de travaux fondamentaux lors de la sélection des ingrédients de façon à rendre cette sélection moins empiriques. Toutefois, on n'a pas encore atteint une situation où cette sélection peut être faite sans travail d'optimisation en laboratoire ou en usine.

CHAPITRE IV :
FORMULATION ET CARACTÉRISATION
PHYSICO-MECANIQUE DES BHPL

CHAPITRE IV

FORMULATION ET CARACTÉRISATION PHYSICO-MECANIQUE DES BHPL

IV.1. Introduction

La recherche de hautes performances légères passe par la réduction de la porosité du béton durci, c'est-à-dire de son pourcentage de vide. On cherchera donc, pour formuler un BHP légers, à diminuer la porosité de la matrice cimentaire et à optimiser le squelette granulaire.

La limitation de la porosité implique essentiellement deux conditions :

- une très faible teneur en eau.
- une granulométrie comportant des éléments fins en quantité suffisante pour remplir les espaces entre les plus gros granulats.

Deux démarches sont généralement associées pour optimiser la formulation d'un BHP légers:

1- Défloculation des grains de ciment :

L'emploi des superplastifiants permet une réduction de la teneur en eau du mélange à consistance égale.

Les rapports E/Liant sont de l'ordre de 0.35 au lieu de 0.45 à 0.50 pour un béton usuel (soit une réduction de la teneur en eau de plus de 30%).

Les superplastifiants s'opposent à la floculation des grains de ciment, ce qui augmente leur réactivité, facteur en particulier de performances à court terme.

2- Optimisation du squelette granulaire :

Les performances des BHP légers peuvent encore être optimisées par l'extension du spectre granulaire grâce, en particulier à l'ajout de particules ultrafines. Les ultrafines les plus utilisées sont les fumées de silice. Elles ont une action sur la granulométrie du mélange, en comblant les micros vides inter-granulaires, mais présentent également une réactivité avec la chaux libre, liée à leur caractère pouzzolanique.

On adaptera également chaque classe granulaire afin d'obtenir un mélange à très haute compacité (les éléments fins remplissant les espaces entre les plus gros granulats).

La première démarche peut être utilisée seule et permet déjà des gains de propriété importants (en terme de résistance mécanique, on peut ainsi atteindre des bétons de classe de résistance 50-60 MPa). La seconde voie implique obligatoirement le recours simultané à l'emploi de superplastifiants. Elle permet d'obtenir de nouveaux gains de performances.

La formulation actuelle de BHP légers comporte le plus souvent en moyen 400 à 550 Kg de ciment, environ 700 Kg de sable et de 1000 à 1100 Kg de gravillon. L'emploi d'un superplastifiant dosé entre 1 et 2% du poids de ciment permet de réduire la teneur en eau de gâchage à une valeur comprise entre 140 litres et 160 litres.

IV.2. La formulation du béton

Dans le cadre de cette étude, trois séries de bétons ont été conçues avec deux types de granulats, et ce dans des proportions bien définies. Ces deux types de granulats légers sont :

- **Laitier cristallisée** de fraction 3/8 et la fraction 8/16.
- **Pouzzolane naturelle** de fraction 3/8 et la fraction 8/16.

Les fractions sont utilisées à des proportions égales (50%, 50%).

La première série est réalisée sans ajouts cimentaires, la deuxième est réalisée en remplaçant 8% de la masse de ciment par la fumée de silice et la troisième est réalisée par le remplacement combiné de 8% de la masse de ciment par la fumée de silice [107] et le remplacement de (10%, 15%, 25%) de la masse de ciment par la pouzzolane naturelle.

Les mélanges de béton ont été réalisés avec un rapport eau/ciment ou eau/liant variable tout en contrôlant la fluidité du béton, le slump de 20 à 23 cm qui définit la classe de béton fluide indiqué par la norme NF P 18-305 [108], le rapport eau/ciment ou eau/liant utilisé pour tous les mélanges varie de 0.25, 0.30, 0.35 et 0.5.

Ces rapports eau/ciment ou eau/liant ont été choisis à des fins de comparaison de l'effet de eau/ciment ou eau/liant sur la résistance. Il a fallu recourir à un superplastifiant pour tous les mélanges, et à l'ajout de la fumée de silice et de la pouzzolane naturelle et ce afin d'obtenir des mélanges avec un affaissement convenable, et améliorer la résistance de ces derniers.

Le malaxeur est humidifié avant l'introduction des matériaux afin d'éviter l'absorption d'une partie d'eau de gâchage. Les constituants sont mis dans le malaxeur dans l'ordre suivant :

Granulats légers, le sable, le ciment et la fumée de silice.

Le malaxage est effectué à sec pendant une minute, l'eau est ensuite introduite au fur et à mesure du malaxage durant une minute, après l'introduction, le malaxage continue pendant deux minutes.

On rappelle que le malaxage n'est pas très long pour ne pas casser les granulats légers, On a préféré alors pratiquer ce que l'on appelle une double introduction, c'est-à-dire que, dans un premier temps, on incorpore immédiatement dans le béton juste assez de superplastifiant (mélangé avec de l'eau) pour que l'on puisse obtenir un béton plastique, de 50 à 100 mm d'affaissement, que l'on peut malaxer convenablement et l'on retarde l'introduction du reste du superplastifiant en un deuxième temps, vers la fin de la période de malaxage. Une telle

façon de procéder a pour effet de réduire sensiblement la quantité de superplastifiant nécessaire pour obtenir un affaissement donné sur le chantier [101].

La séquence de malaxage effectuée lors de la fabrication des bétons à hautes performances légers avec l'ajout d'un superplastifiant est présentée au tableau (III.1). Cette séquence ne correspond pas à celle utilisée pour les bétons ordinaires, elle est plus longue de manière à laisser le temps à la défloculation de se produire.

Tableau (IV.1) : Séquence de malaxage des bétons.

Temps (minutes)	Opérations
0	Ajout des matériaux secs et démarrage du malaxeur
1	Ajout d'une quantité d'eau avec superplastifiant
2	Arrêt du malaxeur
3	Ajout du reste de la quantité d'eau avec superplastifiant + démarrage du malaxeur
4	Arrêt du malaxeur et début des tests sur béton frais

Les tableaux (IV.2, IV.3) : présentent la formulation complète des 26 mélanges de béton pour des rapports eau/ciment ou eau/liant de 0.25, 0.30, 0.35 et 0.5.

Notons que La méthode de formulation adoptée pour le mélange des constituants entrant dans la composition du béton est celle de **l'université de Sherbrooke** élaborée par le professeur **P.C.Aïtcin** et son équipe de recherche [23]. .

IV.3. Préparation des granulats légers

Les granulats légers sont bien séchés et gardés dans un endroit sec pour ne pas rattraper des quantités d'eau additionnels, après le calcul des taux d'absorption d'eau des granulats légers on ajoute cette quantité à l'eau de gachage pour se rassurer de ne pas absorber l'eau de gachage et influencer la maniabilité.

Tableau (IV.2) : Composition des mélanges de béton à base de laitier cristallisé de fraction 3/8 et 8/16 à proportion (50 %,50 %).

N°	E/C (E/L)	Eau l/m ³	Ciment kg/m ³	Pierres concassees kg/m ³	Sable kg/m ³	Superplastifiant l/m ³ (1%)	Fumée de silice (8%) kg/m ³	Pouzzolane Naturelle kg/m ³	Densités kg/m ³
1 ^{ère} série									
1	0.25	192.9	560	1070	166.7	17.55	/	/	1941.4
2	0.30	199.46	466.66	1070	240.01	14.62	/	/	1928.3
3	0.35	202.37	400	1070	292.5	12.52	/	/	1914
4	0.5	207.16	280	1070	398.2	9.38	/	/	1765.85
2 ^{ème} série									
5	0.25	194.094	515	1070	118.56	17.53	45	/	1939.56
6	0.30	198.41	467	1070	204	14.62	37	/	1922.99
7	0.35	202.37	468	1070	292.5	12.52	32	/	1905
3 ^{ième} série									
8	0.25	194.74	459.2	1070	144.75	17.53	44.8	56 (10%)	1920.75
9	0.25	194.63	431.2	1070	140.05	17.53	44.8	84 (15%)	1916.05
10	0.25	194.39	375.2	1070	130.62	17.53	44.8	140(25%)	1827.20
11	0.30	199	383.01	1070	227.67	14.62	37.33	46.66 (10%)	1909.66
12	0.30	198.84	359.34	1070	215.25	14.62	37.33	69.99 (15%)	1905.16
13	0.30	198.65	312.67	1070	213.7	14.62	37.33	116.66 (25%)	1939.06

Tableau (IV.3) : Composition des mélanges de béton à base de pouzzolane naturelle de fraction 3/8 et 8/16 à proportion (50 %,50 %).

N°	E/C (E/L)	Eau l/m ³	Ciment kg/m ³	Pierres concassees kg/m ³	Sable kg/m ³	Superplastifiant l/m ³ (1%)	Fumée de silice (8%) kg/m ³	Pouzzolane Naturelle kg/m ³	Densités kg/m ³
1 ^{ère} série									
1	0.25	224.35	560	1070	44.10	17.55	/	/	1827
2	0.30	226.5	466.66	1070	145.76	14.62	/	/	1820
3	0.35	231.37	400	1070	176.10	12.52	/	/	1790
4	0.5	236.12	280	1070	272.5	9.38			1765.9
2 ^{ème} série									
5	0.25	223.95	515	1070	28.76	17.53	45	/	1804.76
6	0.30	228.1	467	1070	107.87	14.62	37	/	1789.53
7	0.35	231.13	468	1070	166.4	12.52	32	/	1780
3 ^{ième} série									
8	0.25	223.44	459.2	1070	21.62	17.53	44.8	56 (10%)	1797
9	0.25	223.6	431.2	1070	14.7	17.53	44.8	84 (15%)	1784
10	0.25	223.36	375.2	1070	5.27	17.53	44.8	140(25%)	1741
11	0.30	227.91	383.01	1070	100.025	14.62	37.33	46.66 (10%)	1782.02
12	0.30	227.82	359.34	1070	96.15	14.62	37.33	69.99 (15%)	1777.81
13	0.30	227.61	312.67	1070	88.32	14.62	37.33	116.66 (25%)	1764.98

IV.4. Masse volumique du béton léger

La masse volumique est une caractéristique fondamentale du béton léger. Elle dépend principalement de la masse volumique des granulats légers utilisés (masse volumique des grains) et de la composition du béton léger, en particulier du rapport G/S, du volume absolu de granulats légers au volume absolu de sable. Mais la définition d'une masse volumique de référence n'est pas sans difficulté, du fait de l'importance de la qualité d'eau contenue dans le béton léger frais et de ses variations lors du durcissement et de la durée de vie de l'ouvrage, qui sont notablement plus importants que dans le cas du béton traditionnel et qui dépend considérablement des conditions de conservation du béton.

IV.5. Confection et cure des éprouvettes

Des moules cubiques (10x10x10) cm³ ont été utilisés pour les essais de compression, d'absorption d'eau par immersion et de ramollissement, des prismes (10x10x40) cm³ pour les essais de flexion simple et les essais de déformabilité. La conservation des éprouvettes est faite conformément aux normes NF P 18-404 [108], la conservation des éprouvettes couvertes par du plastique a été faite à l'air pendant 24 h ensuite, après décoffrage, les éprouvettes sont complètement immergées (100% d'humidité, température de 20 °C ± 2 °C) dans un bac qui contient de l'eau potable de laboratoire. La durée de cure est un facteur important de la durabilité, ceci surtout pour les ciments composés. Dans la perspective de notre étude, cinq régimes de cure ont été adoptés : une cure de 7, 14, 28, 90 et 180 jours, pour les bétons.



Photo (IV.1) : Cure des éprouvettes.

IV.6. Caractérisation physique du béton

IV.6.1. Caractérisation du béton frais

IV.6.1.1. La maniabilité

Les affaissements sont mesurés grâce au cône d'Abrams conformément à la norme NF P 18-451 [108], il s'agit de constater un cône de béton sous l'effet de son propre poids. Plus cet affaissement sera grand et plus le béton sera fluide.

Il faut signaler tout d'abord, que tous les bétons ont été fabriqués à maniabilité constante ce qui permet de faire une comparaison entre eux.

Le béton frais présente une remarquable ouvrabilité facilitant son pompage et sa mise en œuvre liée au superplastifiant entrant dans sa composition (1 % de la masse de ciment). Les BHP légers fabriqués sont des bétons fluides avec un E/C ou E/L très bas (0.25 à 0.35). Les valeurs d'affaissements au cône sont supérieures à 16 cm dans tous les cas.

Les caractéristiques du béton durci, notamment sa résistance mécanique ne sont pratiquement pas modifiées par rapport au même béton non adjuvanté. Le béton fluide durci présente un très bon aspect de surface, homogène, exempt de défaut (bullage, nids de gravillons, faiénçage).

Ses propriétés entraînent d'autres avantages :

- Rapidité de mise en œuvre et de serrage.
- Facilité de bétonnage des éléments fortement ferraillées.
- La vibration peut être réduite, voire dans certain cas supprimée pour les dallages peu armé ou d'un réglage.
- Auto - étalement : il suffit d'un talochage ou d'un réglage léger pour niveler la surface du béton.
- Il faut, par contre, veiller à la stabilité et à la bonne étanchéité des coffrages, plus sollicités par la poussée provoquée par ces bétons, qui se comportent comme un fluide de masse volumique élevée.

Application :

Le béton fluide trouve ses applications lorsqu'intervient l'une des conditions suivantes :

- Manutention par pompage.
- Ouvrages en béton de formes complexes ou fortement ferraillées, ouvrages minces.
- Ouvrages horizontaux (dallages, voiries et planchers).

Parmi les applications usuelles, on peut citer :

- Les sols industriels.
- Les travaux routiers.

- Les fondations, les radiers généraux.
- Les poutres présentant une grande densité d'armatures.
- Les voiles minces, les poteaux fortement armés.



Photo (IV.2) : Essai d'affaissement.

IV.6.1.1.1. Résultats obtenus

Les résultats obtenus sont rassemblés sur les tableaux (IV.4, IV.5).

Tableau (IV.4) : Affaissements des bétons avec laitier cristallisé pour la fraction 3/8 et la fraction 8/16 à proportion (50%,50%).

Affaissement (cm)					
E/C (E/L)	1 ^{ère} série	2 ^{ème} série	3 ^{ème} série		
0.25	21	22	22	22	22
0.30	21	22	23	23	23
0.35	21	/	/		
0.5	21		/		

Tableau (IV.5) : Affaissements des bétons avec de la pouzzolane naturelle pour la fraction 3/8 et la fraction 8/16 à proportion (100%).

Affaissements (cm)					
E/C (E/L)	1 ^{ère} série	2 ^{ème} série	3 ^{ème} série		
0.25	20	21	21	21	21
0.30	20	20	21	21	21
0.35	21	21	/		
0.5	21	/	/		

IV.6.1.1.2. Commentaire

On voit que l'utilisation de 1% de superplastifiant de la masse de ciment avec 140 l/m^3 d'eau (selon la méthode de formulation **de l'université de Sherbrooke**) donne toujours un béton fluide, plus le rapport E/C ou E/L est réduit plus le béton est visqueux et nécessite la vibration.

La fluidité de béton est augmentée avec l'utilisation de la fumée de silice, en raison de leurs petites particules sphériques et de leur immense surface spécifique qui peuvent combler l'espace entre les grains de ciment au lieu qu'il soit occupé par l'eau et cause généralement une réduction de la quantité d'eau exigée pour le béton maniable (plus grande quantité d'eau libre qui va fluidifier le béton).

IV.6.1.2. Étude de la maniabilité du béton en fonction du temps

Les BHP légers sont des bétons avec des propriétés ou attributs qui satisfont les critères d'exécution. Le BHP léger exige une zone de transition béton-armatures très dense. La maniabilité doit être compatible avec ces derniers besoins fondamentaux pour réaliser le BHP léger. Pour faire ainsi, le mélange devrait être facile à vibrer et assez fluide au passage par le renfort encombré. Le BHP légers possède trois caractéristiques : durabilité élevée, haute résistance et haute maniabilité.

Un affaissement minimum de 100 millimètres est donc préféré. La durabilité est liée à la basse perméabilité. De haute résistance et basse perméabilité, bien que nécessairement concomitantes, soient liés l'une à l'autre parce que la haute résistance exige le bas volume des pores (inférieur à 5%). Ainsi, deux caractéristiques restantes qui ont besoin de contrôle soigneux et de la surveillance à l'étape de production sont haute résistance et haute maniabilité. Un BHP léger livré en chantier se doit donc de conserver une maniabilité adéquate pendant à peu près 1h30 tandis que, dans les usines de préfabrication ou la mise en place est plus rapide, il est suffisant en général qu'il conserve une bonne maniabilité pendant environ 30 minutes.

Alors il est essentiel de connaître les propriétés d'écoulement de BHP léger frais et pour cela on a choisi l'étude de la maniabilité de BHP léger frais en fonction du temps.

On a choisi la meilleur composition selon la résistance à la compression de la 3^{ième} série de chaque fraction utilisée : $E/L = 0.25$ (8% FS + 25% PN).

Les résultats obtenus sont rassemblés sur la figure (III.1).

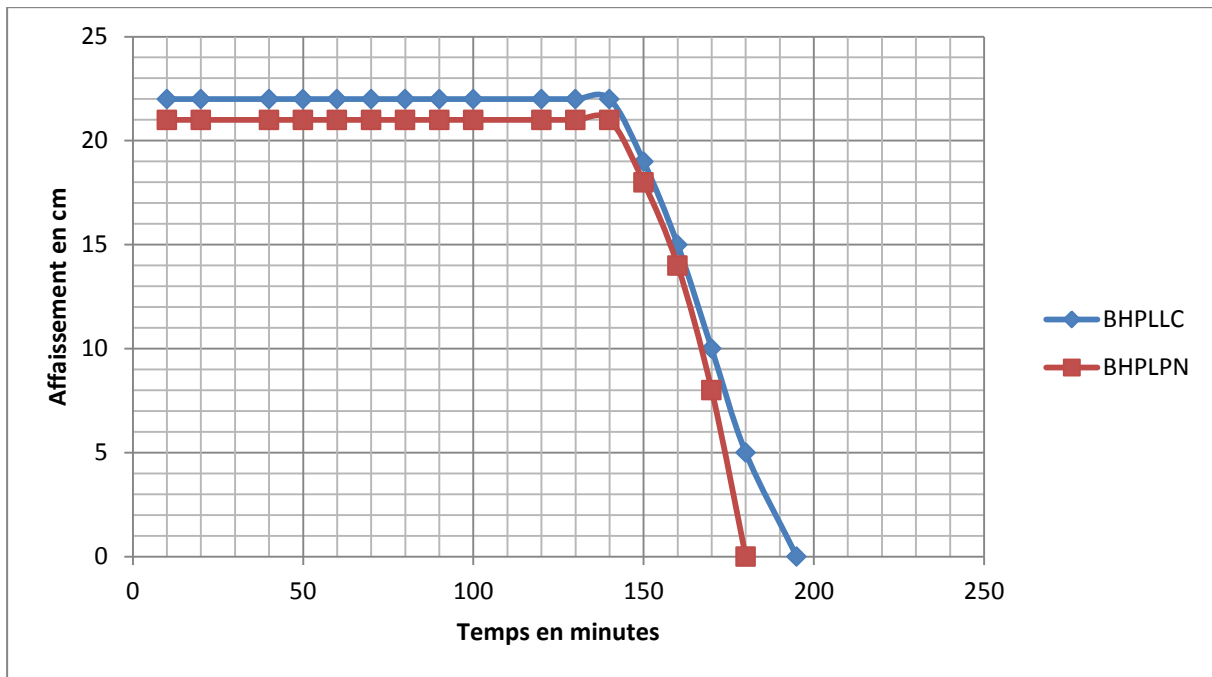


Figure (IV.1) : Variation d'affaissement du béton en fonction du temps.

IV.6.1.2.1. Commentaire

La teneur en air des mélanges des bétons frais a été 1.5%. Les effets de la fluidification sont limités dans le temps (150 minutes), le béton retrouvant ensuite progressivement sa consistance initiale. Malgré sa fluidité, on ne constate ni ségrégation ni ressuage, la cohésion étant maintenue.

D'après la figure (IV.1), on constate que les deux bétons ont le même comportement rhéologique les premières 150 minutes avec une petite différence après, liée au type de granulats et à la granulométrie des granulats.

En général l'écoulement dominé par le comportement de la pâte de ciment (ciment + superplastifiant + fumée de silice + pouzzolane naturelle) et l'effet des interactions hydrodynamiques engendrées par la présence des granulats est minime. Dans la pratique, ceci revient à transformer un béton de consistance traditionnelle en un béton HP légers, c'est-à-dire un béton fluide et visqueux. Toutefois, dans notre cas pour parvenir à ces propriétés rhéologiques, la quantité de ciment exigée est considérable, posant alors le problème du retrait et d'un fort dégagement de chaleur lors de l'hydratation du ciment. La nécessité d'effectuer une substitution du ciment par des ajouts cimentaires (fumée de silice et pouzzolane naturelle) nous amène alors à suivre le chemin traditionnel de formulation des BHP légers, ce qui ne sera pas sans conséquences sur les résistances mécaniques développées par le béton.

IV.6.2. Caractérisation mécaniques du béton

IV.6.2.1. Étude des propriétés du béton durci

IV.6.2.1.1. Résistance à la compression

La résistance à la compression est généralement considérée comme la principale propriété caractéristique du béton.

Cette caractéristique est la plus importante propriété d'usage du matériau béton facilement mesurable qui a fait des progrès spectaculaire. Elle est passée de 30 MPa à 35 MPa, il y a quelques années, à plus de 100 MPa pour les bétons à très hautes performances. Voire de 200 pour des bétons de laboratoire. Les gains de résistance ne sont pas les seuls avantages de ces bétons qui tirent leurs propriétés d'une forte réduction de leur porosité. Ils sont également plus résistant aux agents agressifs, aux phénomènes de gel/dégel et de façon générale, présentent une durabilité accrue.

L'essai de la résistance à la compression à été effectuée sur une presse Digimax Plus 70-C0019/B de marque Controls, d'une capacité 1000 KN en compression et cela conformément à la norme NF P 18-406, EN 12390-3 [108]. Elle est constituée par deux plateaux (Photo, celui du bas est fixe alors que celui du haut est relié à un piston exerçant une force axiale croissante. La vitesse de chargement été de l'ordre de 0.50 MPa/s. Les valeurs et l'interprétation des résistances sont données dans ce chapitre.

Il s'agit des essais de résistance à la compression qui sont réalisés après 7, 14, 28, 90 et 180 jours, de conservation à l'eau, à l'aide d'une presse mécanique et électronique.

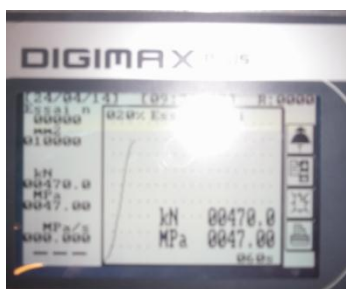


Photo (IV.3) : Eprouvettes (10x10x10) cm³.



Photo (IV.4) : Résultats d'essais de compression sur éprouvettes (10x10x10) cm³ pour le béton avec E/C = 0,30 à 14 jours.

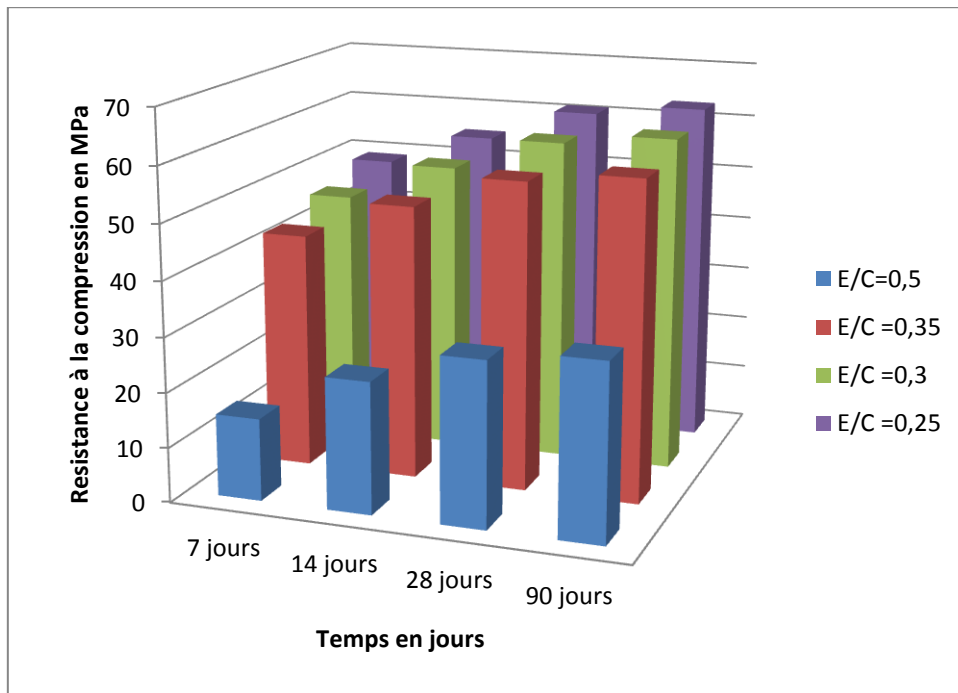


Figure (IV.2) : Evolution de la résistance à la compression de béton à base de laitier cristallisé en fonction du temps et du rapport E/C.

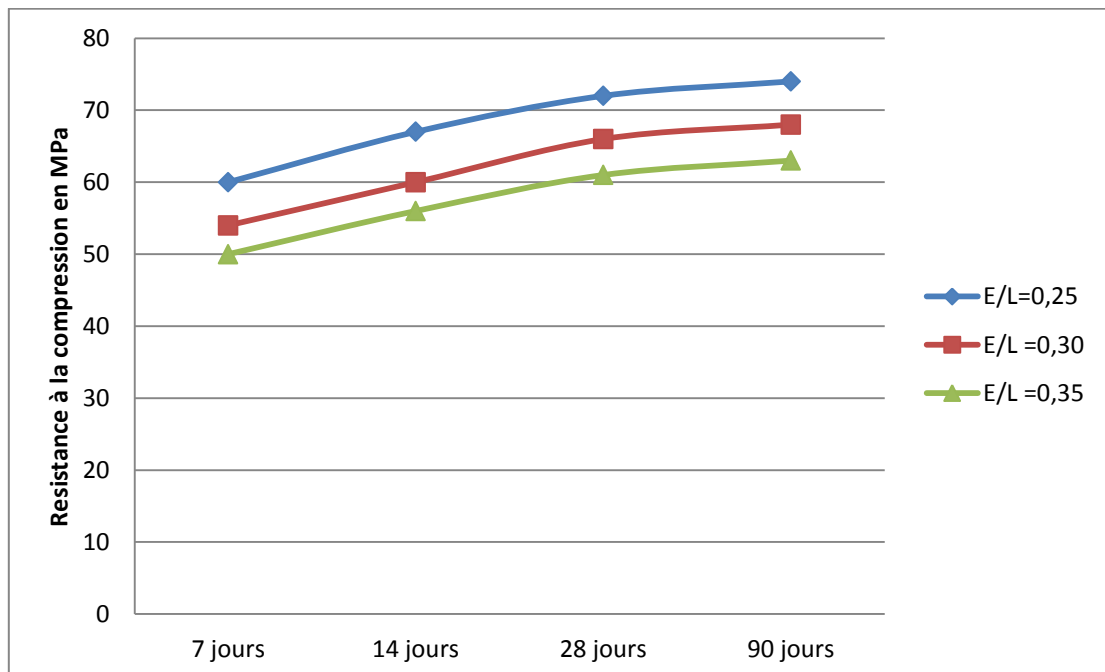


Figure (IV.3) : Evolution de la résistance à la compression de béton à base de laitier cristallisé en fonction du temps et de l'ajout de la fumée de silice.

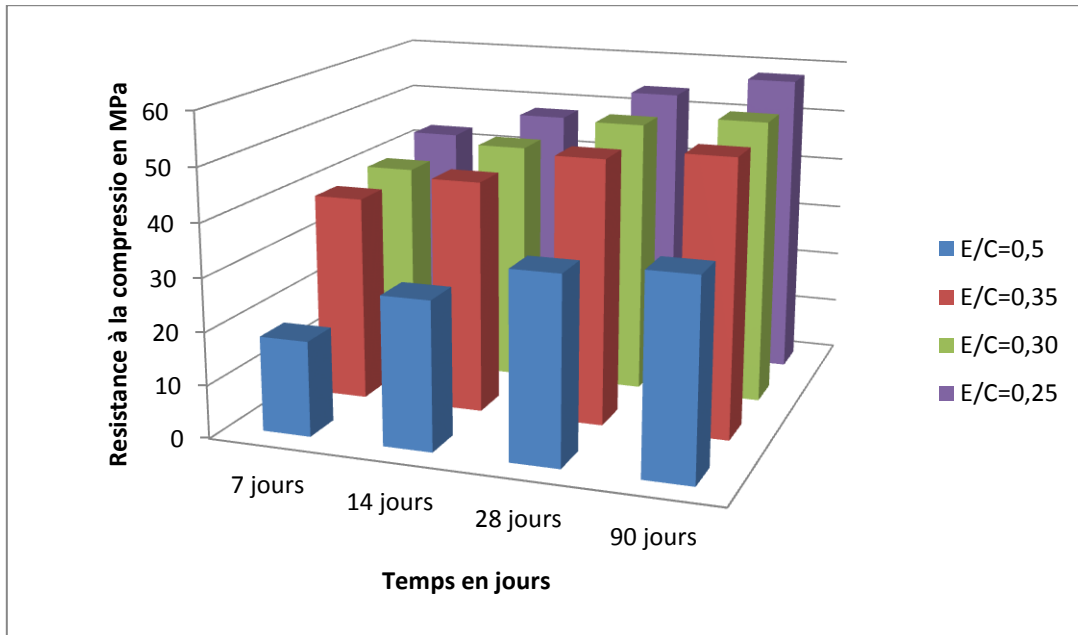


Figure (IV.4) : Evolution de la résistance à la compression de béton à base de pouzzolane naturelle en fonction du temps et du rapport E/C.

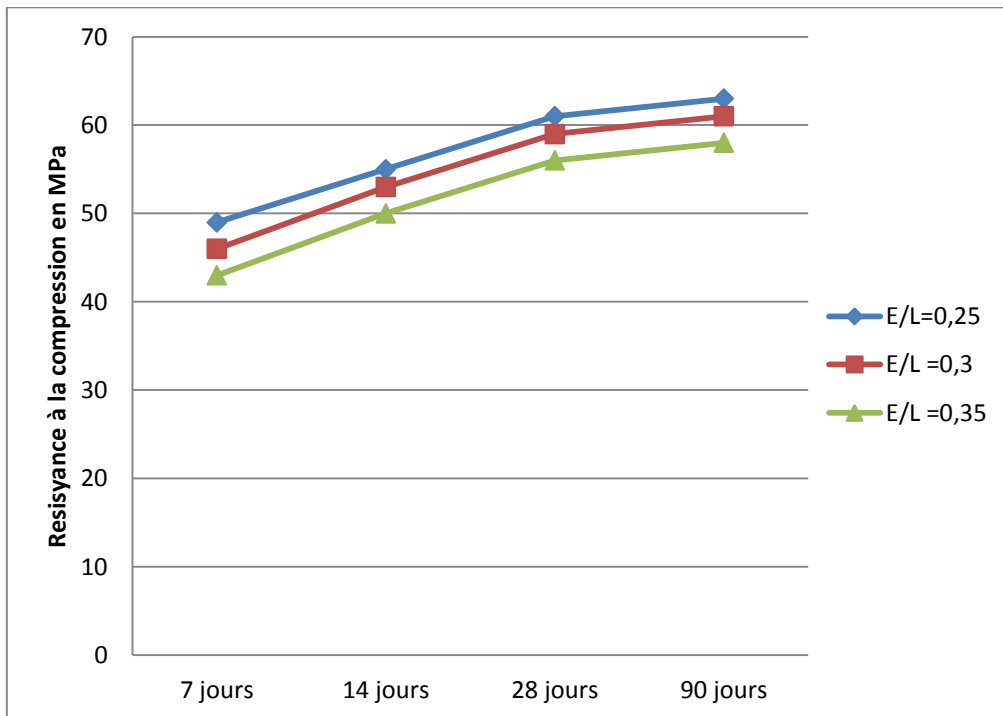


Figure (IV.5) : Evolution de la résistance à la compression de béton à base de pouzzolane naturelle en fonction du temps et de l'ajout de la fumée de silice.

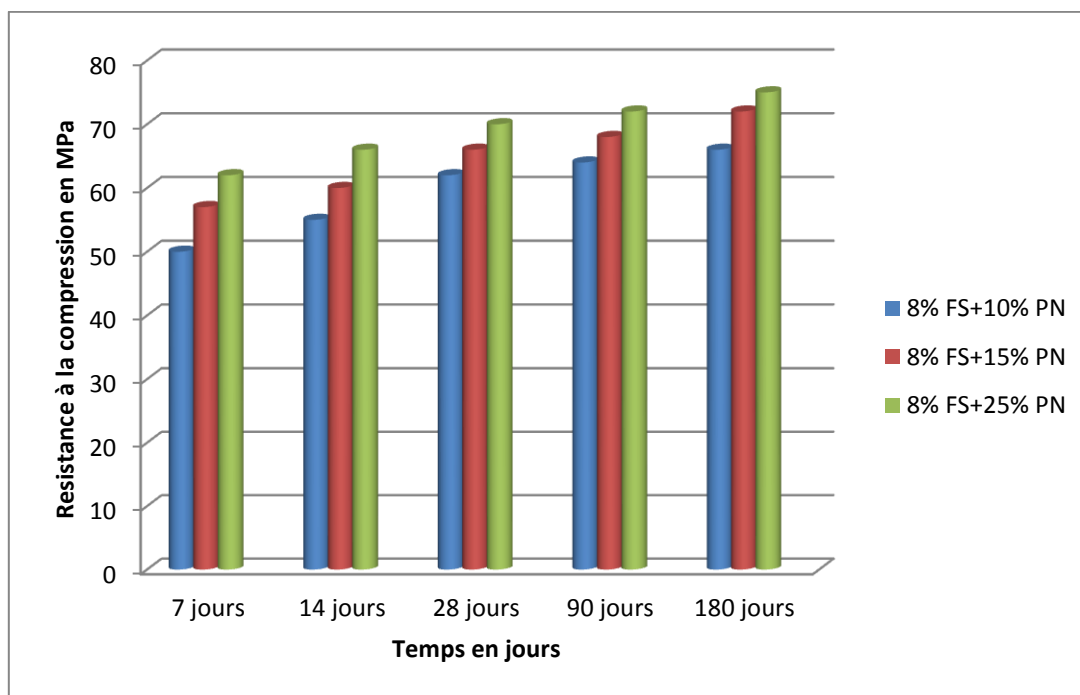


Figure (IV.6) : Evolution de la résistance à la compression du béton à base de laitier cristallisé en fonction du temps et de l'ajout de la fumée de silice et de la pouzzolane naturelle pour $E/L = 0,25$.

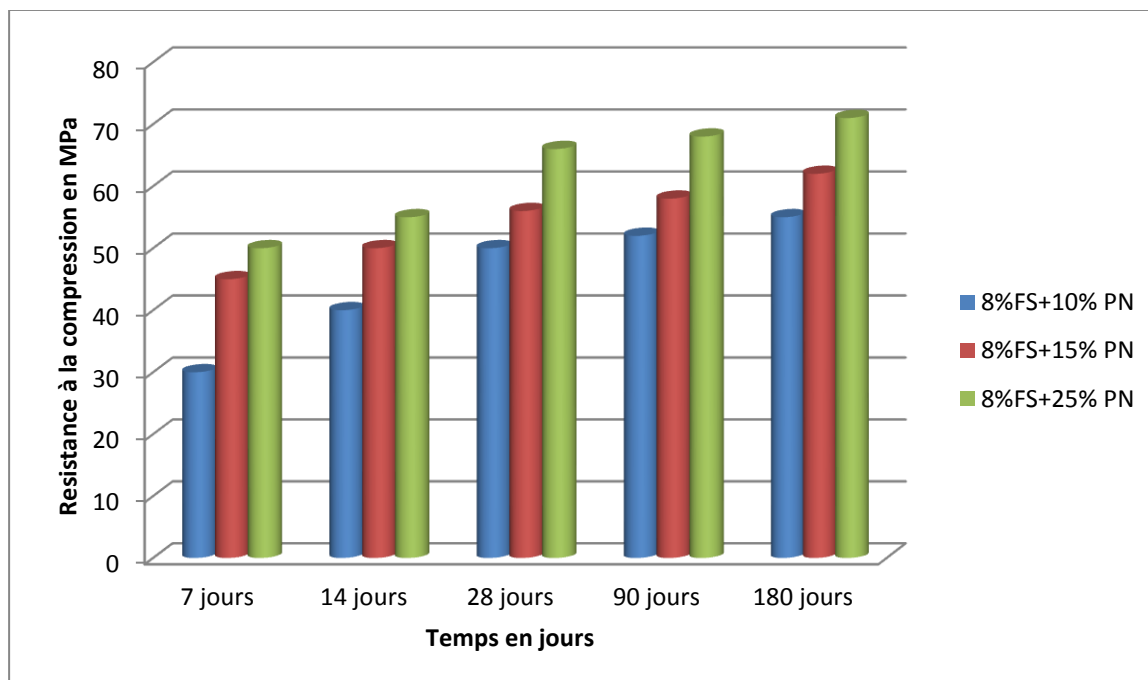


Figure (IV.7) : Evolution de la résistance à la compression du béton à base de laitier cristallisé en fonction du temps et de l'ajout de la fumée de silice et de la pouzzolane naturelle pour $E/L = 0,30$.

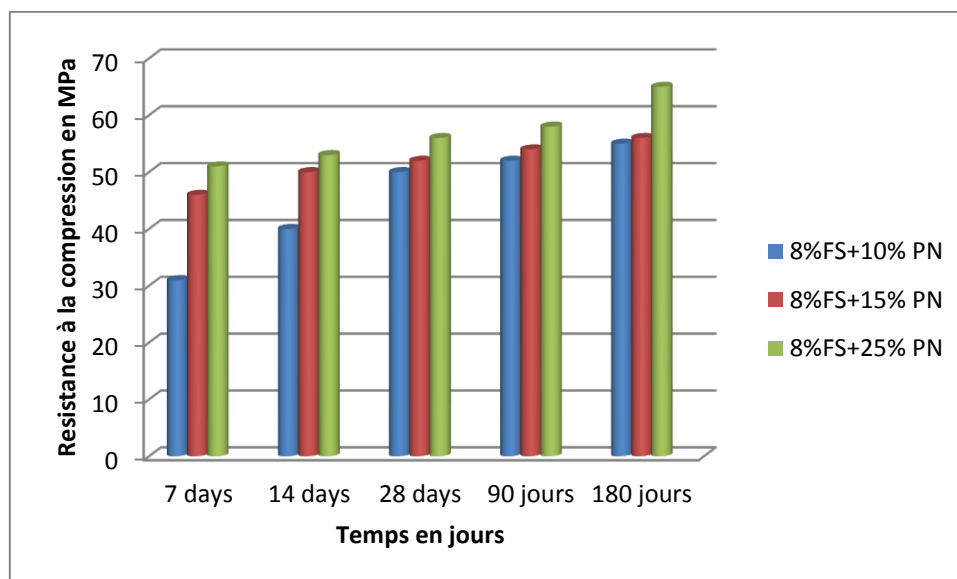


Figure (IV.8) : Evolution de la résistance à la compression du béton à base de pouzzolane naturelle en fonction du temps et de l'ajout de la fumée de silice et de la pouzzolane naturelle pour $E/L = 0,25$.

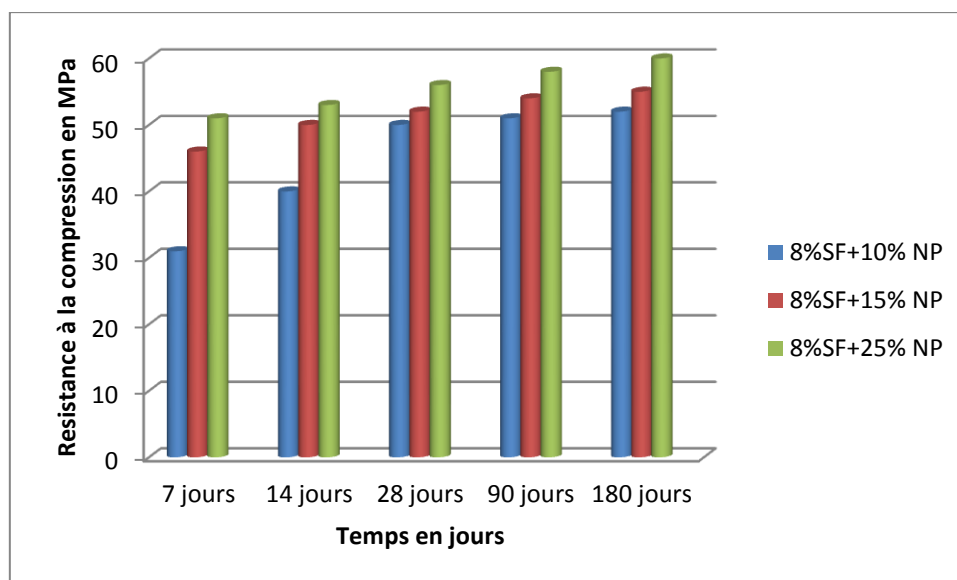


Figure (IV.9) : Evolution de la résistance à la compression du béton à base de pouzzolane naturelle en fonction du temps et de l'ajout de la fumée de silice et de la pouzzolane naturelle pour $E/L = 0,30$.

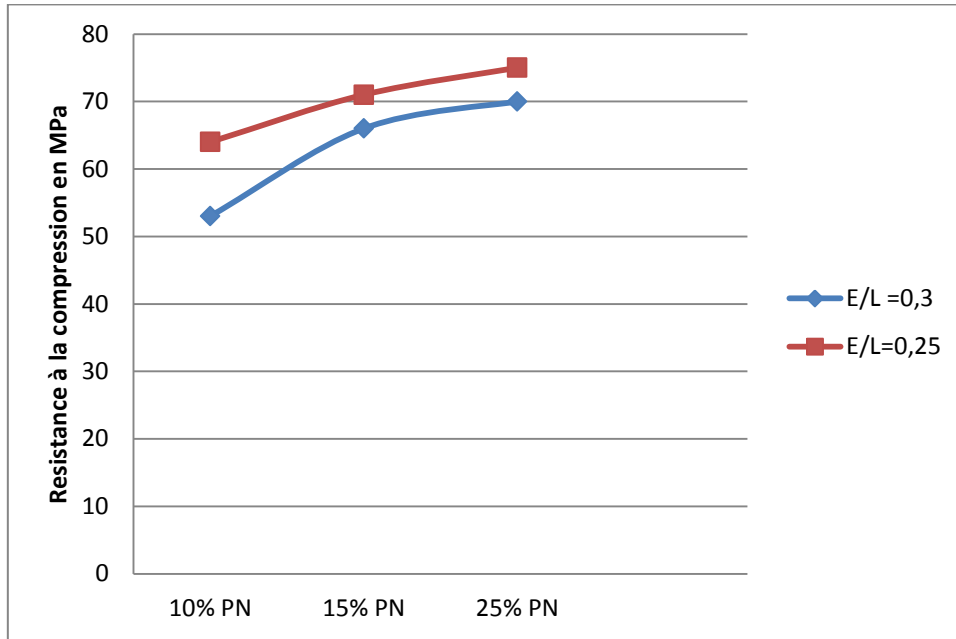


Figure (IV.10) : Evolution de la résistance à la compression à 180 jours de béton en fonction de l'ajout de 8% de la fumée de silice et (10% , 15% , 25%) de la pouzzolane naturelle et du rapport E/L des bétons à base de laitier cristallisée de fraction 3/8 et la fraction 8/16.

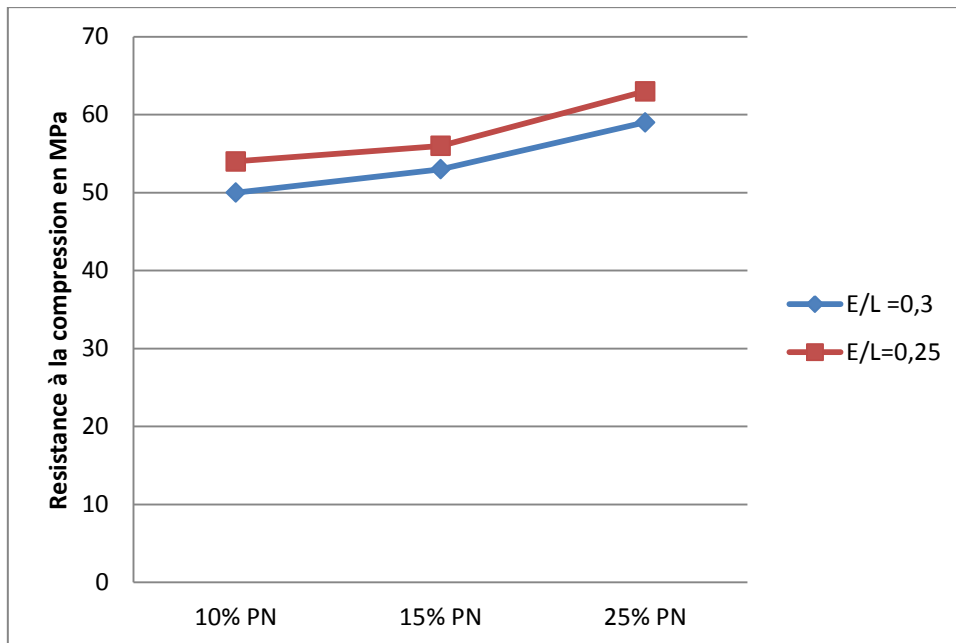


Figure (IV.11) : Evolution de la résistance à la compression à 180 jours de béton en fonction de l'ajout de 8% de la fumée de silice et (10% , 15% , 25%) de la pouzzolane naturelle et du rapport E/L pour les bétons à base de pouzzolane naturelle de fraction 3/8 et la fraction 8/16.

IV.6.2.1.1.1. Commentaire

Dans ce travail, nous avons étudié la résistance des bétons à la compression avec et sans ajouts cimentaires.

Nous avons montré l'influence de la réduction du rapport E/C, l'influence de l'ajout de la fumée de silice (produits ultrafins), de l'ajout combiné de la fumée de silice et de la pouzzolane naturelle et l'influence de type des granulats sur la résistance des bétons à la compression.

A partir des courbes représentées dans les figures (IV.2, IV.4) on remarque une augmentation sensible de la résistance mécanique des échantillons élaborés avec E/C de 0.50, 0.35, 0.30 et 0.25.

L'utilisation de superplastifiant (réducteurs d'eau) permet la réduction du rapport E/C en s'opposant à la floculation des grains de ciment, donc nos bétons présentent un squelette granulaire conventionnel noyé dans une matrice de compacité accrue.

Le rapport E/C réduit ce qui signifie que la quantité d'eau est très faible par rapport à la masse de ciment, les grains de ciment sont très près les uns des autres. Toute l'eau pourra réagir avec le ciment et il ne restera que très peu de porosité capillaire, la perméabilité du béton sera très faible et les propriétés mécaniques du béton seront très élevées.

La cinétique de montée en résistance notée est rapide ceci résulte du dosage en ciment élevé (finesse de mouture et la teneur en aluminates) la teneur en retardateur de prise, ainsi que, bien sûr, de la température du béton.

On voit clairement qu'on n'a pas atteint les résistances visées par la méthode de formulation de l'**université de Sherbrooke**, par exemple :

Pour E/C = 0.25 on obtient 100 MPa à 28 jours selon le graphe de Sherbrooke, mais on a trouvé :

- 62 MPa pour le laitier cristallisé de fraction 3/8 et la fraction 8/16 (50%,50%).
- 54 MPa pour la pouzzolane naturelle de fraction 3/8 et la fraction 8/16 (50%,50%).

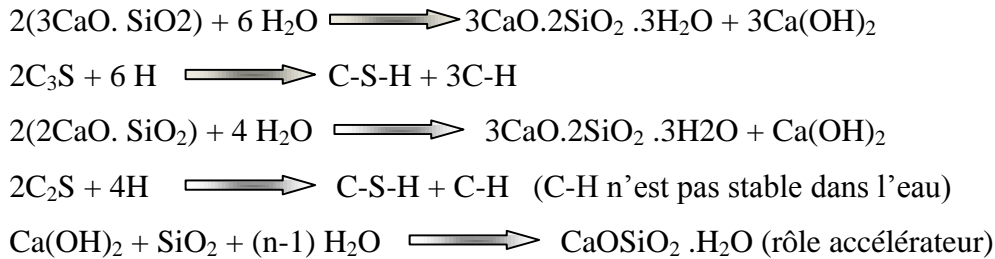
Cette diminution de résistance est expliquée par plusieurs facteurs :

- la qualité du sable : le module de finesse est de 2.52, il doit être de 2.7 à 3.
- l'utilisation du CPJ au lieu du CPA.
- le type de granulat léger.

A partir des courbes représentés dans les figures (IV.3, IV.5) on remarque une augmentation sensible de la résistance mécanique des échantillons élaborés avec l'ajout de la fumée de silice par rapport à l'échantillon témoin, de résistance caractéristique à 28 jours supérieure à 72 MPa, La cinétique de montée en résistance notée est plus rapide, cela peut

être expliqué par le double rôle de la fumée de silice :

- Il y a d'abord l'effet pouzzolanique correspondant à l'association partielle ou totale des fines avec l'eau et la chaux libérée par l'hydratation du ciment, la fumée de silice fixe la portlandite Ca(OH)_2 en une combinaison peu soluble, selon les réactions :



- ensuite l'effet filler (ou de remplissage) caractérisé par une mouture poussée qui facilite leur pénétration entre les grains de ciment et la diminution du rapport E/L, la fumée de silice jusqu'alors reconnue comme jouant le mieux ce rôle est la plus efficace (ajout actif) grâce à sa finesse très élevée, elle permet de combler les minuscules vides dans la zone de transition entre les granulats et la pâte de ciment durcie, sa largeur n'est que de 40 μm , mais elle joue un rôle crucial lors de la reprise des contraintes par le béton.

L'utilisation de la fumée de silice dans le béton augmente les résistances du béton, l'élasticité, de résistance aux attaques chimiques et à l'abrasion, d'améliorer la durabilité et la protection contre la corrosion. La diffusivité du béton peut être réduite en ajoutant de la fumée de silice qui rend la microstructure béton plus dense.

La présence du superplastifiant est en outre essentielle pour éviter la formation de conglomérats. La compacité augmentée, ce qui améliore la durabilité.

Alors nous avons enrichi les bétons de ces particules par l'augmentation de la finesse des constituants (ciment, ajout) qui est très poussée sachant bien que seul les particules ayant des dimensions inférieures à 60 μm qui s'hydratent .

La résistance maximum à la compression du béton en combinaison avec la fumée de silice dépend sur trois paramètres notamment le taux de remplacement, rapport eau/liant et la composition chimique du ciment. La composition chimique du ciment joue un rôle essentiel dans le béton pour réaliser la maniabilité requise avec un rapport E/L inférieur.

$$\left[\begin{array}{l}
 - \text{Pour } E/L (E/C) = 0.25 : [R_{c28}\{\text{CPJ} + 8\% \text{FS}\} = 1.18 R_{c28}\{\text{CPJ}\}] \\
 - \text{Pour } E/L (E/C) = 0.30 : [R_{c28}\{\text{CPJ} + 8\% \text{FS}\} = 1.11 R_{c28}\{\text{CPJ}\}] \\
 - \text{Pour } E/L (E/C) = 0.35 : [R_{c28}\{\text{CPJ} + 8\% \text{FS}\} = 1.07 R_{c28}\{\text{CPJ}\}]
 \end{array} \right]$$

La résistance du béton léger structural à base d'agrégats légers dépend de la résistance et du module de l'élasticité des grains légers, la forme des grains, la courbe de granularité, leurs volumes dans le mélange de béton et la résistance de la pâte de ciment durci.

La résistance de la particule des gros granulats ou la qualité de la zone de transition détermineront la résistance limitée de béton. Après avoir atteint le plafond de résistance, le béton de poids normal démontrera une petite pente positive pour la relation force/liant, tandis que pour un béton léger, la pente sera nettement inférieure.

Les plafonds de résistance de l'agrégat léger varieront considérablement selon la carrière et les usines de fabrication. Cette variation est due à la matière première et aux caractéristiques structurelles du système poreux développé au cours du processus de cuisson. L'objectif du producteur d'agrégats est de fabriquer un agrégat léger uniforme de qualité structurale supérieure qui présente des pores bien répartis de taille modérée (5 à 300 μm) entourés d'une matrice céramique vitreuse relativement fissurée. La taille, la forme et la distribution des pores vésiculaires détermineront la résistance à la compression et à la traction des particules d'agrégats légers. En général, un volume de pore plus important se corrèlera avec une résistance plus faible. Parce que la liaison de l'agrégat léger à la matrice environnante est supérieure à la résistance de la particule, la surface de rupture est à la fois à travers l'agrégat et la matrice. Comme la résistance à la traction d'une particule de poids normale très forte dépasse beaucoup la résistance à la traction de la matrice, en général la surface de rupture passera autour de l'agrégat grossier et à travers la zone de contact plus faible.

Une caractéristique importante du béton d'agrégat léger est la bonne liaison entre l'agrégat et la pâte de ciment hydratée environnante. C'est la conséquence de plusieurs facteurs. Tout d'abord, la texture superficielle rugueuse de l'agrégat est propice à un bon verrouillage mécanique entre les deux, il y aura toujours une quantité de la pâte de ciment qui pénètre dans les surfaces des pores dans les particules d'agrégats grossiers. Deuxièmement, les modules d'élasticité des particules d'agrégats légers et de la pâte de ciment durci ne diffèrent pas beaucoup d'entre eux.

Les principaux facteurs influençant la résistance à la compression du béton agrégat léger sont la composition du béton et les propriétés physiques des agrégats, principalement la résistance inhérente à l'agrégat léger. Compte tenu de la limite inférieure du béton léger structural proposé par ACI 363R-92, notre béton peut être considéré comme un béton structural. Selon la classification RILEM, les bétons légers pour usages structurels ont une densité comprise entre 1600 et 2000 kg/m^3 et une résistance à la compression supérieure à 15 MPa.

L'effet de la résistance de l'agrégat léger dans le béton léger est plus grand que les agrégats normaux dans le béton normal. La résistance des agrégats normaux est de 1,5 à 2,0 supérieures à la résistance du béton normale, tandis que la résistance des agrégats légers est considérablement inférieure à celle du béton léger. Pour un rapport E/C donnée, la résistance à la compression du béton léger est contrôlée par la caractéristique des granulats légers, comme indiqué dans les codes ACI 213 comme le plafond de résistance de LWC. La résistance à la compression du LWC peut être divisée en deux phases. La phase de mortier contenant du ciment, de l'eau et du sable soutient principalement la résistance du LWC, et la phase LWA réduit principalement la densité de LWC. Cette résistance ne peut pas dépendre directement de la taille des agrégats mais peut dépendre de la densité.

Cependant, sa dépendance est insignifiante pour les agrégats dont la densité est supérieure à 1400 kg / m^3 .

LWHPC n'ont pas forcément une densité entre 1850 et 2000 kg / m^3 . Berra et Ferrara (1990) font un LWHPC ayant une résistance à la compression de 60 MPa (mesurée sur des cubes de 150 mm de dimension) avec une densité de 1700 kg / m^3 [23].

A partir des figures (IV.6, IV.7, IV.8, IV.9, IV.10, IV.11) on voit clairement que la résistance mécanique du béton avec l'ajout combiné de la fumée de silice et de la pouzzolane naturelle (ajout moyennement actif c'est-à-dire moins efficace que la fumée de silice) augmente avec l'augmentation du dosage de la pouzzolane naturelle en raison de son double rôle. On remarque que l'ajout de 25% de pouzzolane naturelle a présenté un meilleur résultat par rapport aux autres dosages d'ajouts, l'ajout combiné de la fumée de silice et de la pouzzolane naturelle conduit bien à des bétons qui sont à classer parmi les bétons à hautes performances, la cinétique notée en résistance est moins rapide. Un autre effet positif de ces additions est leur influence favorable sur la stabilité du béton frais. Cette influence est particulièrement utile lors de la fabrication de bétons à très haute ouvrabilité.

$$\left[\begin{array}{l}
 - \text{Pour } E/L = 0.25 : [R_{c28}\{\text{CPJ} + 8\% \text{ FS} \} = 1.016 R_{c28}\{\text{CPJ} + 8\% \text{ FS} + 10\% \text{ PN} \}] \\
 - \text{Pour } E/L = 0.25 : [R_{c28}\{\text{CPJ} + 8\% \text{ FS} \} = 1.081 R_{c28}\{\text{CPJ} + 8\% \text{ FS} + 15\% \text{ PN} \}] \\
 - \text{Pour } E/L = 0.25 : [R_{c28}\{\text{CPJ} + 8\% \text{ FS} \} = 1.19 R_{c28}\{\text{CPJ} + 8\% \text{ FS} + 25\% \text{ PN} \}] \\
 - \text{Pour } E/L = 0.30 : [R_{c28}\{\text{CPJ} + 8\% \text{ FS} \} = 1.05 R_{c28}\{\text{CPJ} + 8\% \text{ FS} + 10\% \text{ PN} \}] \\
 - \text{Pour } E/L = 0.30 : [R_{c28}\{\text{CPJ} + 8\% \text{ FS} \} = 1.06 R_{c28}\{\text{CPJ} + 8\% \text{ FS} + 15\% \text{ PN} \}] \\
 - \text{Pour } E/L = 0.30 : [R_{c28}\{\text{CPJ} + 8\% \text{ FS} \} = 1.12 R_{c28}\{\text{CPJ} + 8\% \text{ FS} + 25\% \text{ PN} \}]
 \end{array} \right]$$

En technologie du béton, il n'est pas rare que le changement d'une variable entraîne des situations conflictuelles et que le résultat final est déterminé par l'influence du facteur le plus dominant.

Les essais de compression simple effectués à 28 jours sur les bétons gâchés montrent sur toutes les figures présentées l'effet de type des granulats sur la résistance mécanique du béton. Les travaux de Pierre Claude Aïtcin (2001) ont montré que la résistance mécanique du béton augmentait lorsque les particules des granulats sont petites, plus elles sont résistantes, par suite de concassage qui élimine les défauts internes des granulats, tels que les gros pores, les microfissures et les inclusions des minéraux. L'expérience montre aussi qu'il est très difficile de produire des BHP légers de classe III en utilisant des gros granulats supérieurs à 25 mm. Dans le cas de la plupart des granulats naturels, il semble qu'une taille maximale de 10 à 12 mm est probablement optimale pour fabriquer des BHP légers, ce qui ne signifie pas qu'un granulats de 20 mm ne puisse être utilisé. Quand la roche-mère (d'où proviennent ces granulats) est suffisamment forte et homogène, des granulats de 20 à 25 mm peuvent être utilisés sans affecter négativement la maniabilité et la résistance du béton, alors cela revient à nous de faire des essais d'affaissement et de compression sur des bétons à base de plusieurs fractions de granulats et d'avoir de nouveaux résultats.

Il est difficile d'imaginer que la résistance mécanique de la pâte de ciment est de l'ordre de celle des granulats, l'écart entre les deux est probablement beaucoup plus faible que dans le cas d'un béton ordinaire. Dans ce cadre, une variation de type des granulats ne pourrait avoir qu'un impact très clair sur les performances mécaniques.

Le béton à hautes performances légers se caractérise par une meilleure adhérence entre les granulats et la matrice de ciment. En outre, la résistance de la matrice sera pratiquement égale à la résistance des granulats. Dès lors, l'apparition et le développement de fissures d'adhérence ou de microfissures seront retardés. A l'approche de la rupture, les fissures se seront désormais généralement propagées au travers des granulats, Photo (IV.5), Figure (IV.12).

Le durcissement à l'eau a plus d'effet sur la perméabilité que sur la résistance du béton, le durcissement est plus important pour le béton avec des ajouts cimentaires que pour le béton normal. Que les régimes de durcissement dans les premiers temps du béton ont un rôle important sur le degré d'hydratation du ciment. Le coefficient de connectivité du béton est très sensible.



Photo (IV.5) : Macrostructure du béton à base de pouzzolane naturelle de fraction 3/8 et la fraction 8/16.



Photo (IV.6) : Macrostructure du béton à base de laitier cristallisée de fraction 3/8 et la fraction 8/16.

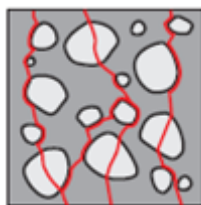


Figure (IV.12) : Béton à hautes performances : les granulats sont également fissurés [39].



Photo (IV.7) : Macrostructure des granulats légers de laitier cristallisé.



Photo (IV.8) : Macrostructure du granulat léger de la pouzzolane naturelle.

Le BHP légers présente en d'autres termes un comportement de rupture fragile (éclatement) plus marqué que le béton de résistance conventionnelle, ce comportement présente plus de similarité microstructurale avec les céramiques que les bétons usuels très poreux, plus le matériau est très résistant plus le comportement de fragilité augmente selon Yve Malier (1992). Photo (IV.9).



Photo (IV.9) : Eclatement du béton à base de laitier cristallisée de fraction 3/8 et la fraction 8/16.

Le choix du BHP légers comme matériau à un impact sur les coûts de construction initiaux (superplastifiant, fumée de silice, ciment) mais la quantité de béton et de ferrailage est réduite, il a aussi des conséquences tout au long de la vie utile des structures. En effet, ce choix a des effets sur les activités d'inspection, d'entretien et de réparation ainsi que sur sa disposition à la fin de sa vie utile. De plus, ces effets touchent également les usagers de la structure, la société, etc, donc le BHP légers est le béton le plus économique à long terme.

IV.6.2.1.2. Résistance à la flexion

Dans cet essai un prisme de béton non armé de $(10 \times 10 \times 40) \text{ cm}^3$ est soumis à un effort de flexion par application jusqu'à rupture d'une charge en deux points symétriques conformément à la norme NF P 18-407, NF EN 12390-5, Figure (IV.13). Les points d'application de la charge étant placés aux tiers de la portée [109]. Les essais sont réalisés après 7, 14 et 28 jours de cure dans l'eau à $20 \pm 2^\circ\text{C}$, la résistance à la flexion est donnée par la formule suivante :

$$R_f = \frac{P.l}{a^3}, N/mm^2 (MPa)$$

P : la charge de rupture (en newtons).

a : cote de la section carrée de l'éprouvette (mm).

l : longueur de la poutre (mm).



Photo (IV.10) : Dispositif de chargement pour l'essai de flexion.

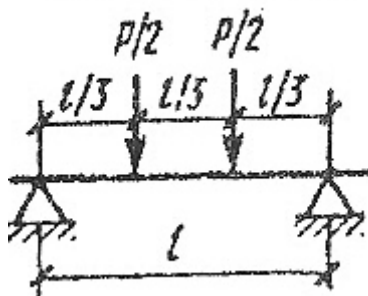


Figure (IV.13) : Dispositif de chargement pour l'essai de flexion [110].

Dans le cadre de cette étude, on a effectué cet essai sur les meilleures compositions des bétons à base des deux types de granulats utilisées :

- Laitier cristallisée de fraction 3/8 et la fraction 8/16 (50%, 50%).
- Pouzzolane naturelle de fraction 3/8 et la fraction 8/16 (50%, 50%).

En utilisant la fumée de silice et la pouzzolane naturelle, les deux bétons sont réalisés avec un remplacement combiné de 8% de la masse de ciment par la fumée de silice et un remplacement de 25% de la masse de ciment par la pouzzolane naturelle avec $E/L = 0.25$, les résultats sont portés sur la figure (IV.14).

Tous les résultats sont obtenus à partir de la moyenne des résultats de 3 éprouvettes, en raison de la dispersion des résultats et de l'hétérogénéité du matériau béton.

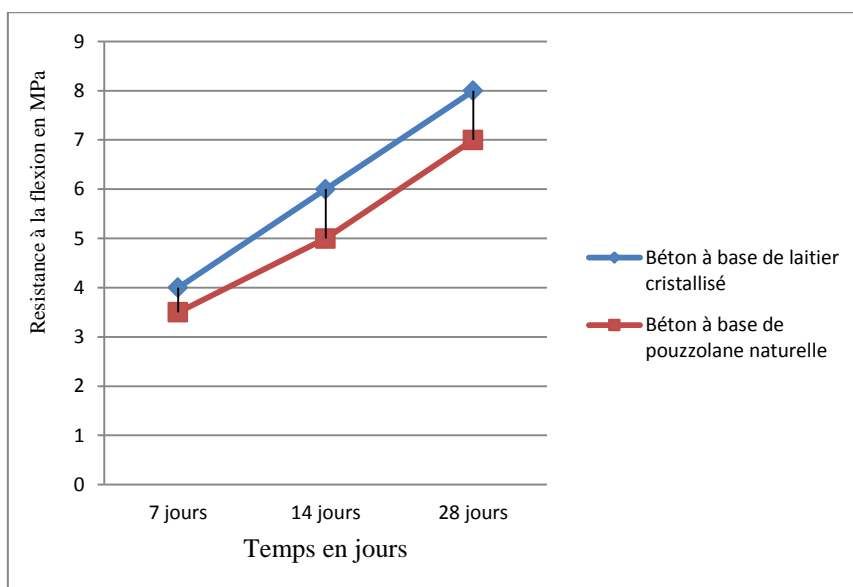


Figure (IV.14) : Evolution de la résistance à la flexion de béton en fonction du temps et de type de granulats utilisées.

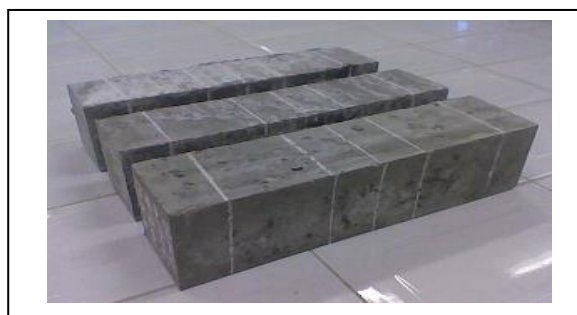


Photo (IV.11) : Epreuves (10x10x40) cm³.



Photo (IV.12) : Rupture des épreuves du béton à base de laitier cristallisé de fraction 3/8 et la fraction 8/16.

IV.6.2.1.2.1. Commentaire

On peut conclure que les particules ultra-fines de la fumée de silice, qui consistent principalement en silice amorphe et les particules fines de la pouzzolane naturelle augmentent la résistance à la flexion du béton par des actions pouzzolaniques et physiques. Les résultats

de la recherche actuelle indiquent que le type des granulats a un effet sur la résistance des bétons à la flexion, les bétons à base de laitier cristallisée sans plus résistants et performants que les bétons à base de pouzzolane naturelle parce que le laitier est plus résistant et plus dense que la pouzzolane naturelle. La résistance à la flexion du béton est importante pour résister à la fissuration due au retrait et aux changements de température.

IV.7. Conclusion

Basé sur les analyses des résultats expérimentaux, les conclusions suivantes sont dérivées de cette étude :

A/- Pour le béton frais

- L'emploi du superplastifiant à base poly carboxylates d'éther modifiés dosé de 1% de la masse de ciment permet d'obtenir des bétons fluides avec une meilleure maniabilité et une diminution du potentiel de ségrégation et une faible tendance au ressuage, en plus, en incorporant des particules aussi fines, il est constaté que l'adhésion et la cohésion interne des mélanges sont meilleures avec une grande homogénéité.
- Le superplastifiant à base poly carboxylates d'éther modifiés permet de maintenir la maniabilité pendant trois heures ce qui est très avantageux pour le transport des bétons aux chantiers (les bétons prêt à l'emploi) et pour la mise en place.
- Le mode d'introduction de superplastifiant choisi est efficace.
- Le superplastifiant à base poly carboxylates d'éther modifiés présente un léger retard de prise.

B/- Pour le béton durci

- Des bétons avec des résistances à la compression élevées ont été obtenus en employant le superplastifiant à base poly carboxylates d'éther modifiés dosé de 1% de la masse de ciment et des bas rapports E/C qui sont respectivement : 0.25, 0.30 et 0.35.
- Les bétons avec E/C de 0.50 ne sont pas classés parmi les bétons à hautes performances légers en raison de leurs faibles résistances à la compression.
- Le remplacement de 8% de la masse de ciment par la fumée de silice, fourni généralement des bétons de bonne résistance, elle permet d'accélérer la réaction d'hydratation de la pâte cimentaire, cette accélération est dû à la grande finesse des particules de la fumée de silice qui peut aussi remplir les pores les plus fines comme la zone d'interface pâte de ciment - granulat qui est très petite.

- Le béton sans fumée de silice (CPJ) a eu une résistance à 28 jours qui est approximativement de 81.39% de la résistance de béton avec la fumée de silice, à 90 jours le béton a eu une résistance qui est approximativement de 91.5% de la résistance de béton avec fumée de silice, cette augmentation de la résistance améliore la compacité. On voit, d'après les résultats obtenus, que les bétons avec la fumée de silice sont plus résistants que les bétons sans fumée de silice, donc on peut avoir des bétons avec une résistance à la compression de 62 MPa pour les betons à base de laitier cristallisée de fraction 3/8 et la fraction 8/16 et de 52 MPa pour les betons à base de pouzzolane naturelle de fraction 3/8 et la fraction 8/16 avec E/C de 0.25 sans fumée de silice, alors on peut éviter l'utilisation de la fumée de silice pour un béton de résistance à la compression de 62 ou 52 MPa et un affaissement de 21 ou 22 cm, étant donné que la fumée de silice est l'ingrédient le plus cher dans la composition du béton, c'est très important du point de vue économique.
- Le remplacement combiné de ciment par 8% de la fumée de silice avec divers dosages de pouzzolane naturelle (10%, 15%, 25%), fourni généralement des bétons de bonne résistance même après les 28 jours, ces bétons sont considérés des bétons à hautes performances, la pouzzolane naturelle a le même effet que la fumée de silice, mais elle est moins efficace en raison de sa finesse qui est plus faible .
- Leur cinétique d'hydratation est plus lente que les autres bétons à cause de la réactivité de la pouzzolane naturelle qui est moyenne.
- L'utilisation du remplacement combiné de ciment par 8% de la fumée de silice et 25% de la pouzzolane naturelle donne les meilleurs résultats par rapport aux autres dosages, ces résultats sont comparables avec les bétons sans pouzzolane naturelle (bétons avec fumée de silice avec le même rapport E/L).
- L'effet de type des granulats sur les caractéristiques des bétons frais et durcis est très clair, les bétons à base de laitier cristallisée sans plus résistants et performants que les bétons à base de pouzzolane naturelle parce que le laitier est plus résistant et plus dense que la pouzzolane naturelle.
- L'effet du remplacement combiné de ciment par 8% de la fumée de silice et 25% de la pouzzolane naturelle sur la flexion est similaire à celui de la résistance à la compression.

CHAPITRE V : DURABILITÉ, DEFORMABILITÉ ET MODULE

DE YOUNG DES BHPL

CHAPITRE V

DURABILITÉ, DEFORMABILITÉ ET MODULE DE YOUNG DES BHPL

V.1. Introduction

L'expression durabilité du béton est généralement utilisée pour caractériser de façon très générale la résistance d'un béton face à l'attaque d'un agent agressif physique ou chimique. La nature, l'intensité et les mécanismes concernés dans chacun des cas et les différents impacts peuvent varier considérablement. L'expression durabilité du béton est donc parfois perçue comme beaucoup trop vague. D'ailleurs aucune méthode normalisée ne permet de mesurer la durabilité d'un béton ; il n'y a pas d'unité pour évaluer la durabilité du béton comme il en existe lorsque l'on veut mesurer la résistance à la compression ou, de façon plus précise, la résistance à l'écaillage d'un béton exposé à des cycles de gel-dégel lents en présence de sels fondants. Certains préfèrent donc spécifier le type d'attaque concerné immédiatement après le terme durabilité, c'est pourquoi il vaut mieux parler des durabilités du béton plutôt que de la durabilité.

Les agents agressifs qui attaquent le béton peuvent être classés schématiquement en deux grandes catégories : les agents externes et les agents internes. Parmi les agents externes, on peut citer les ions chlorures, le gaz carbonique, les sulfates, les cycles de gel-dégel, les bactéries et les abrasifs. Parmi les agents internes, on retrouve les ions chlorure incorporés dans certains accélérateurs, les alcalins du ciment avec des granulats potentiellement réactifs.

V.6.2.2. Absorption d'eau massive par immersion



Figure (V.1) : Schéma des canaux capillaires et des vides dans le béton durci [111].

On a choisi l'essai d'absorption d'eau pour la caractérisation de la porosité de béton, Figure (V.1).

La durabilité et la durée de vie du béton exposé à la météo est liée à la perméabilité du béton de couverture protégeant le renforcement. BHPL est généralement très peu perméable à l'air, à l'eau et aux ions chlorure.

La structure dense de pores du béton à haute performance léger, ce qui le rend si imperméable, lui donne des caractéristiques qui le rendent éminemment adapté aux utilisations où le béton de haute qualité ne serait normalement pas considéré. Pour la résistance à l'attaque chimique sur la plupart des structures, BHPL offre une performance beaucoup améliorée. La résistance à divers sulfates est obtenue principalement par l'utilisation d'un béton dense et fort de très faible perméabilité et faible rapport eau-ciment ; Ce sont toutes des caractéristiques de BHPL. De même, comme l'ont expliqué Gagne et d'autres (1994) [112], la résistance à l'acide provenant des déchets est également beaucoup améliorée.

Dans la réalisation d'un béton durable, devant résister à l'action d'agents agressifs divers, l'importance des propriétés de transfert, et donc de la porosité interconnectée est évident. A cet effet, nous avons étudié l'absorption d'eau des meilleures compositions des bétons à base des deux types de granulats utilisées :

- Laitier cristallisée de fraction 3/8 et la fraction 8/16 (50%, 50%).
- Pouzzolane naturelle de fraction 3/8 et la fraction 8/16 (50%, 50%).

En utilisant la fumée de silice et la pouzzolane naturelle, les deux bétons sont réalisés avec un remplacement combiné de 8% de la masse de ciment par la fumée de silice et un remplacement de 25% de la masse de ciment par la pouzzolane naturelle avec E/L = 0.25.

Après démoulage à 1 jour, les éprouvettes sont conservées dans l'eau à 20 °C jusqu'à 28 jours. Les échantillons sont alors immergés dans l'eau jusqu'à 24 h qui précèdent l'essai.

Un conditionnement des échantillons à 40 °C pendant les 24 h qui précèdent l'essai d'absorption est réalisé [113].

On mesure la diminution de masse exprimée en pourcentage de la masse immergée :

L'absorption d'eau en masse (%) est :

$$W_M = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sec}} 100\%$$

Les valeurs du coefficient d'absorption en fonction des fractions des granulats sont illustrées dans la figure (V.2).

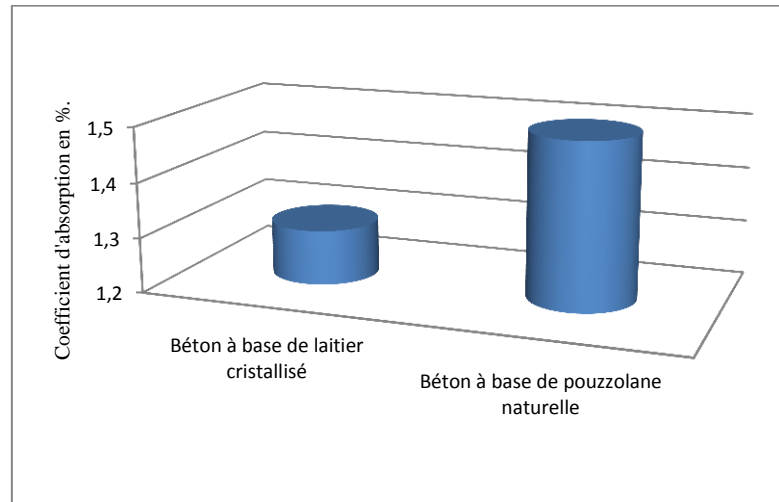


Figure (V.2) : Variation de coefficient d'adsorption en fonction de type de granulats utilisées (E/L=0,25 avec 8 % FS+25 % PN).



Photo (V.1) : Epreuves (10x10x10) cm³ après 28 jours de cure.



Photo (V.2) : Epreuves (10x10x10) cm³ après un séchage à 40 °C pendant 24 h

V.6.2.2.1. Commentaire

Les coefficients d'absorptions obtenus sont inférieurs à 5% ce qui signifie que notre béton est un très bon béton selon la norme NBN B 15-211 (1989).

Il est nettement visible que les bétons à base de laitier cristallisée de fraction 3/8 et la fraction 8/16 sont moins poreux que les bétons à base de pouzzolane naturelle de fraction 3/8 et la fraction 8/16, notre BHP léger a des coefficients d'absorptions réduits en raison de la porosité qui est réduite (selon la composition : 8% FS + 25% PN) et qui améliore les

performances du béton, cela accroît considérablement la durabilité du béton qui conditionne la durée de vie des ouvrages.

En général, les bétons légers ont une absorption d'eau considérablement plus élevée que les bétons à poids normal. Une absorption élevée, cependant, n'indiquent pas nécessairement que les bétons auront une faible durabilité ou une perméabilité élevée [213R-87, A.C.I. 1987].

La plupart des agrégats légers présentent une absorption d'eau moins des agrégats de poids normal. Il en résulte un béton d'agrégat léger ayant des absorptions plus élevées que les bétons de poids normal typique mais la différence n'est pas aussi grande que prévu étant donné que les particules d'agrégats en poids léger dans un BHP léger sont entourées d'une matrice de haute qualité. L'absorption d'eau est, bien sûr, dépendante du temps et très dépendante sur le type d'agrégats et, dans une certaine mesure, sur la taille des particules. Elle varie d'être assez lente, continuant à un rythme plus ou moins constant pendant longtemps, à être extrêmement rapide suivie d'abord d'un taux constant beaucoup plus lent pendant longtemps.

Pour certains cas et buts l'absorption à jeune âge est importante et cela va d'environ 5 à 15% du poids sec après 24 h, peut-être 3% à 12% après 30 min. Les données pour les agrégats normaux sont de 0,5% à 2% pour une absorption de 24 h.

L'absorption de 24 heures d'agrégats légers varie de 5 à 20% en masse d'agrégats secs, mais, pour un agrégat de bonne qualité pour béton, il n'est généralement pas supérieur à 15 pour cent.

Par comparaison, l'absorption d'un agrégat de poids normal est habituellement moins de 2%. D'autre part, l'agrégat de poids normal fin peut être d'humidité de 5 à 10%, parfois encore plus, mais cette eau est en surface des particules d'agrégats. Il y a une autre conséquence importante de l'absorption d'eau par l'agrégat léger : lorsque l'hydratation du ciment abaisse l'humidité relative des pores capillaires dans la pâte de ciment durci ; l'eau dans l'agrégat migre vers l'extérieur dans ces capillaires, une hydratation améliorée est ainsi possible, la situation pourrait être appelée «durcissement interne humide», cela rend le béton d'agrégat léger moins sensible à un durcissement humide insuffisant.

V.6.2.3. Le coefficient de ramollissement

Le coefficient de ramollissement est le rapport de la résistance à la compression d'un matériau saturé d'eau (R_{sat}) à la résistance à la compression du matériau sec (R_{sec}).

$$K_{ram} = \frac{R_{sat}}{R_{sec}} \geq 0.80$$

Les valeurs du coefficient de ramollissement en fonction des fractions des granulats sont clairement exposées sur la figure (V.3).

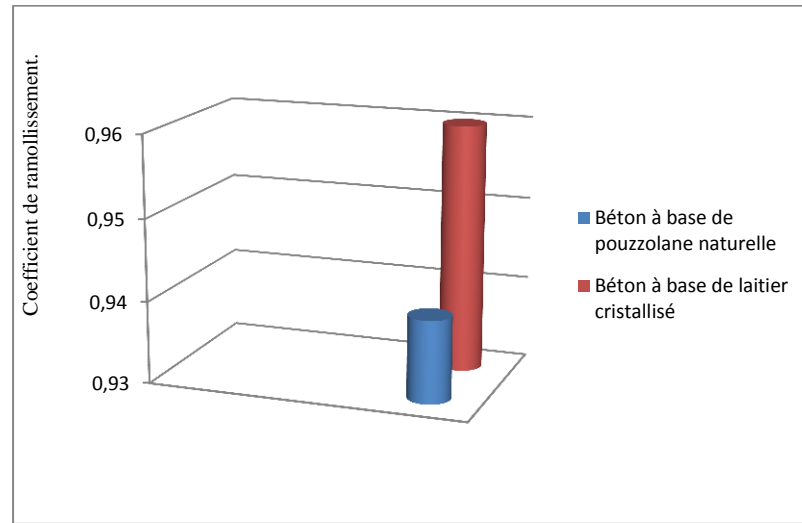


Figure (V.3) : Variation de coefficient de ramollissement en fonction de type de granulats utilisés ($E/L=0,25$ avec 8 % FS et 25 % PN).

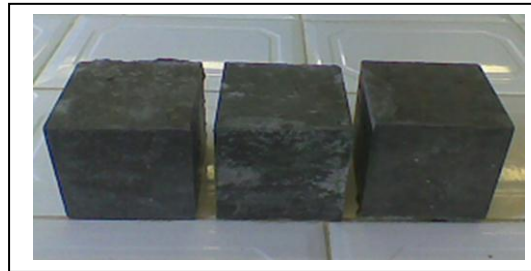


Photo (V.3) : Eprouvettes (10x10x10) cm³ après 28 jours de cure.

V.6.2.3.1. Commentaire

Le coefficient de ramollissement caractérise la résistance à l'eau des matériaux, l'essai est réalisé à 28 jours.

Nous constatons d'après les résultats obtenus, que les bétons à base de laitier cristallisé de fraction 3/8 et la fraction 8/16 se comportent à l'eau mieux que les bétons à base de pouzzolane naturelle de fraction 3/8 et la fraction 8/16 cela est lié à la perméabilité réduite des bétons avec ajouts (8% FS + 25% PN).

V.6.2.4. Déformabilité et module d'élasticité

Le module d'élasticité du béton est un facteur clé pour l'estimation de la déformation des éléments structurels, le module d'élasticité du béton est proportionnel à la racine carrée de la résistance à la compression dans la gamme de la résistance de béton normale.

Le module élastique de BN était beaucoup plus élevé que celui de BAL, essentiellement en raison de module d'élasticité supérieur d'AN, environ 50-75 GPa contre 17-20 GPa d'AL [114]. En utilisant l'équation suivante développée par Hobbs [115], il est possible de calculer le module élastique d'un béton basé sur le module élastique de la matrice et des agrégats:

$$E_C = \frac{(E_A - E_M) \cdot \phi_A + E_A + E_M}{E_A + E_M + \phi_A \cdot (E_M - E_A)} \cdot E_M$$

Où :

E_A [MPa] : module d'élasticité des agrégats.

E_M [MPa] : module d'élasticité de la matrice cimentaire.

Φ : volume de la fraction des granulats.

Les différences entre les modules élastiques mesurés des différents mélanges LWAC pourraient être causées par des différences dans le module élastique de la pâte, en raison du durcissement interne, et par état d'humidité différent [116].

Le module d'élasticité du béton est fonction du module de chaque constituant (matrice cimentaire, agrégats léger et agrégats normales) et leurs proportions relatives dans le mélange. Le module élastique du béton normal est plus élevé que le béton léger, car les modules des particules d'agrégats de poids normal sont supérieurs aux modules de particules agrégées légères.

Le module est significativement affecté (+ 25%) par l'humidité, le type d'agrégat et d'autres variables. Lorsque les conditions de conception nécessitent une précision des données de module élastique, des essais de laboratoire devraient être réalisés sur des bétons spécifiques proposés pour le projet conformément à la procédure de la norme ASTM C 469. En général, tous les agrégats légers structuraux ont une composition chimique comparable et sont fabriqués de manière similaire et à des températures similaires. L'agrégat léger atteint une faible densité par la formation d'une structure poreuse dans laquelle les pores sont généralement sphériques et enveloppés dans une matrice vitreuse. Avec de telles similitudes, la variabilité de la rigidité de l'agrégat serait principalement due à la densité d'agrégats légers. Comme pour le béton normal, l'augmentation de la rigidité de la matrice est directement liée à la force de la matrice qui, à son tour, affecte la résistance du béton. Lorsque de gros pourcentages de matériaux cimentaires sont utilisés, le plafond de résistance de béton léger peut être atteint. Un facteur affectant la rigidité du béton normal est la variation du module d'élasticité d'agregats dans une gamme de densité particulière. À la même gravité spécifique,

La Rue (1946) a constaté que le module d'élasticité des agrégats naturels pourrait varier d'un facteur de 3, la formule ACI 318 n'a pas été suffisamment étalonnée pour prédire le module de bétons à haute résistance [117].

Lorsque les conceptions sont contrôlées par des propriétés élastiques, la valeur spécifique de E_c doit être mesurée sur le mélange de béton proposé conformément à la procédure de la norme ASTM C 469.

De Larrard 49 [118] propose dans ces travaux un modèle plus élaboré (modèle trisphérique) qui est l'évolution du modèle biosphérique fonde par Hashin.

Dans le but d'étudier l'influence des deux types de granulats utilisés :

- Laitier cristallisée de fraction 3/8 et la fraction 8/16.
- Pouzzolane naturelle de fraction 3/8 et la fraction 8/16.

Et l'ajout de la fumé de silice et de la pouzzolane naturelle sur la déformabilité du béton à 28 jours, on a confectionné deux sortes de béton, un béton à base de laitier cristallisée de fraction 3/8 et la fraction 8/16 (50%, 50%) et un béton à base de pouzzolane naturelle de fraction 3/8 et la fraction 8/16 (50%, 50%), les deux bétons sont réalisés par le remplacement combiné de 8% de la masse de ciment par la fumée de silice et le remplacement de 25% de la masse de ciment par la pouzzolane naturelle avec E/L de 0.25, chaque série comprend trois échantillons prismatiques (10x10x40) cm³.

Les essais ont été effectués à 28 jours du durcissement, la déformation a été mesurée au moyen de comparateurs à cadran ayant la valeur d'une division de 0.01 mm qui sont installés à l'aide de cadres appropriés sur une distance de 200 mm dans le sens longitudinal et de 100 mm dans le sens transversal, Photo (V.4).

Définition de la résistance prismatique des éprouvettes par la formule :

$$R_{Pri} = P/F$$

P : la charge de destruction, daN.

F : l'air de la section de l'éprouvette, cm².

Module d'élasticité de béton

Le module d'élasticité se détermine pour chaque éprouvette au niveau de la charge égal 30% de la charge de destruction.

$$E_{el} = \sigma_1 / \varepsilon_{1el}, \sigma_1 = P_1 / F$$

σ_1 : Accroissement de la contrainte de zéro conventionnel au niveau de 30% de la charge de destruction.

P_1 : charge de destruction correspondante.

ε_{1el} : Accroissement des déformations relatives élasto-instantanées longitudinales, des éprouvettes correspondant à la charge $P_1 = 0.3P$.

ε_{2el} : Accroissement des déformations relatives élasto-instantanées transversales, des éprouvettes correspondant à la charge $P_1 = 0.3P$.

L'accroissement des déformations relatives longitudinales et transversales se détermine comme la moyenne arithmétique des indications des indicateurs des quatre cotés du prisme.

$$\varepsilon_{1el} = \frac{\Delta l_1}{l_1}$$

$$\varepsilon_{2el} = \frac{\Delta l_2}{l_2}$$

Δl_1 et Δl_2 : Accroissement absolu de déformation longitudinales et transversales des éprouvettes correspondant à l'accroissement des contraintes.

l_1 et l_2 : les bases fixes pour les mesures de déformation longitudinales et transversales des éprouvettes.



Photo (V.4) : Essai de déformabilité sur éprouvette prismatique (10x10x40) cm³.

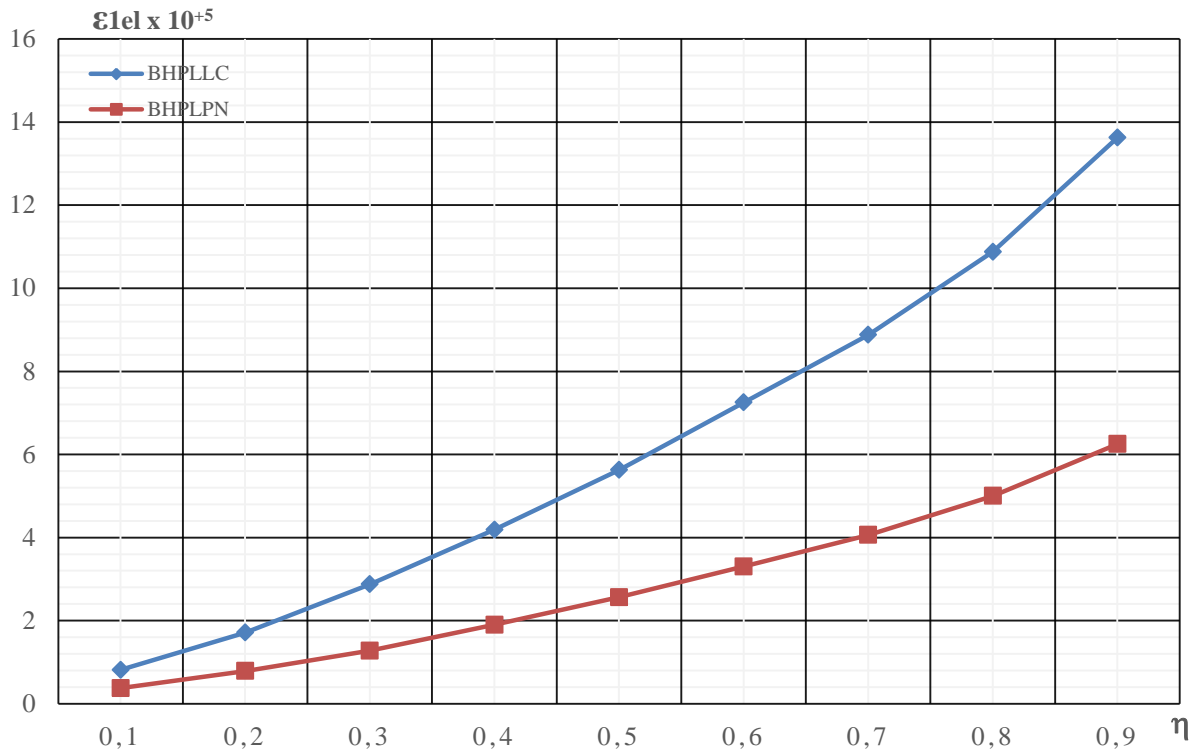


Figure (V.4) : Déformation élasto-instantanées longitudinales du béton ϵ_{1el} en fonction des contraintes relatives η pour les séries de prismes BHPLLC et BHPLPN

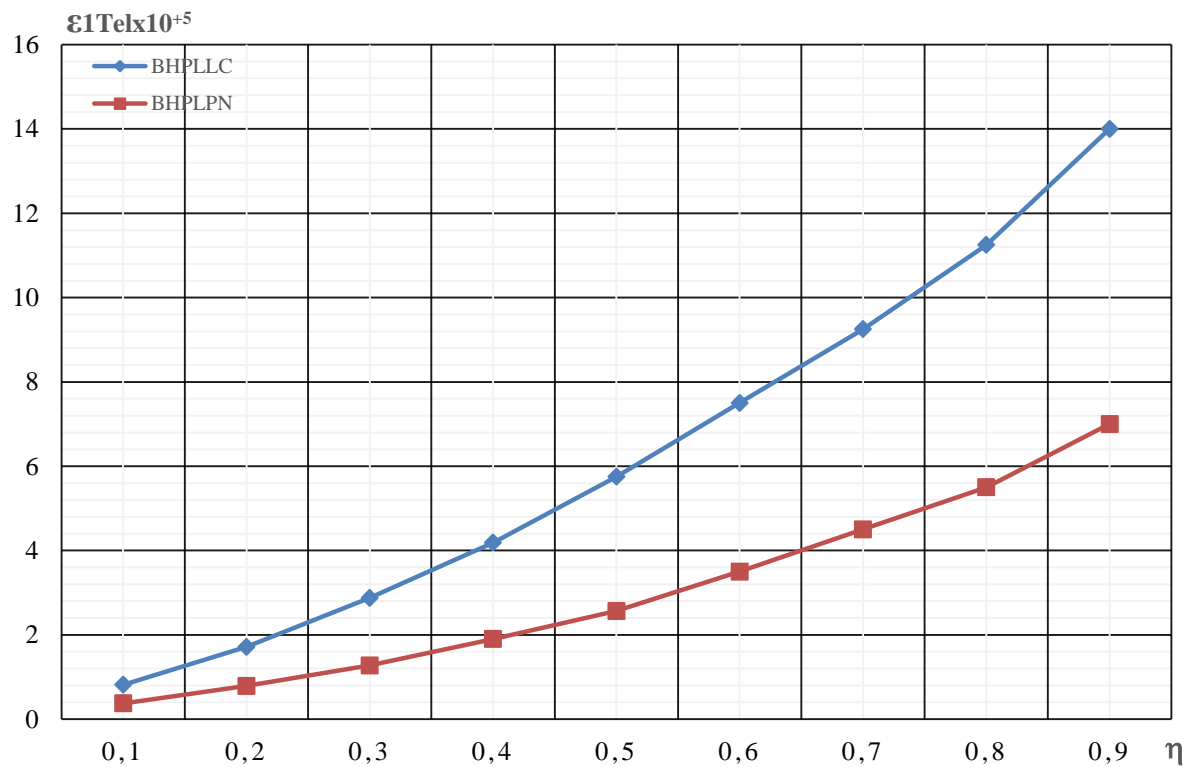


Figure (V.5) : Déformation élasto-instantanées totales longitudinales du béton ϵ_{1Tel} en fonction des contraintes relatives η pour les séries de prismes BHPLLC et BHPLPN

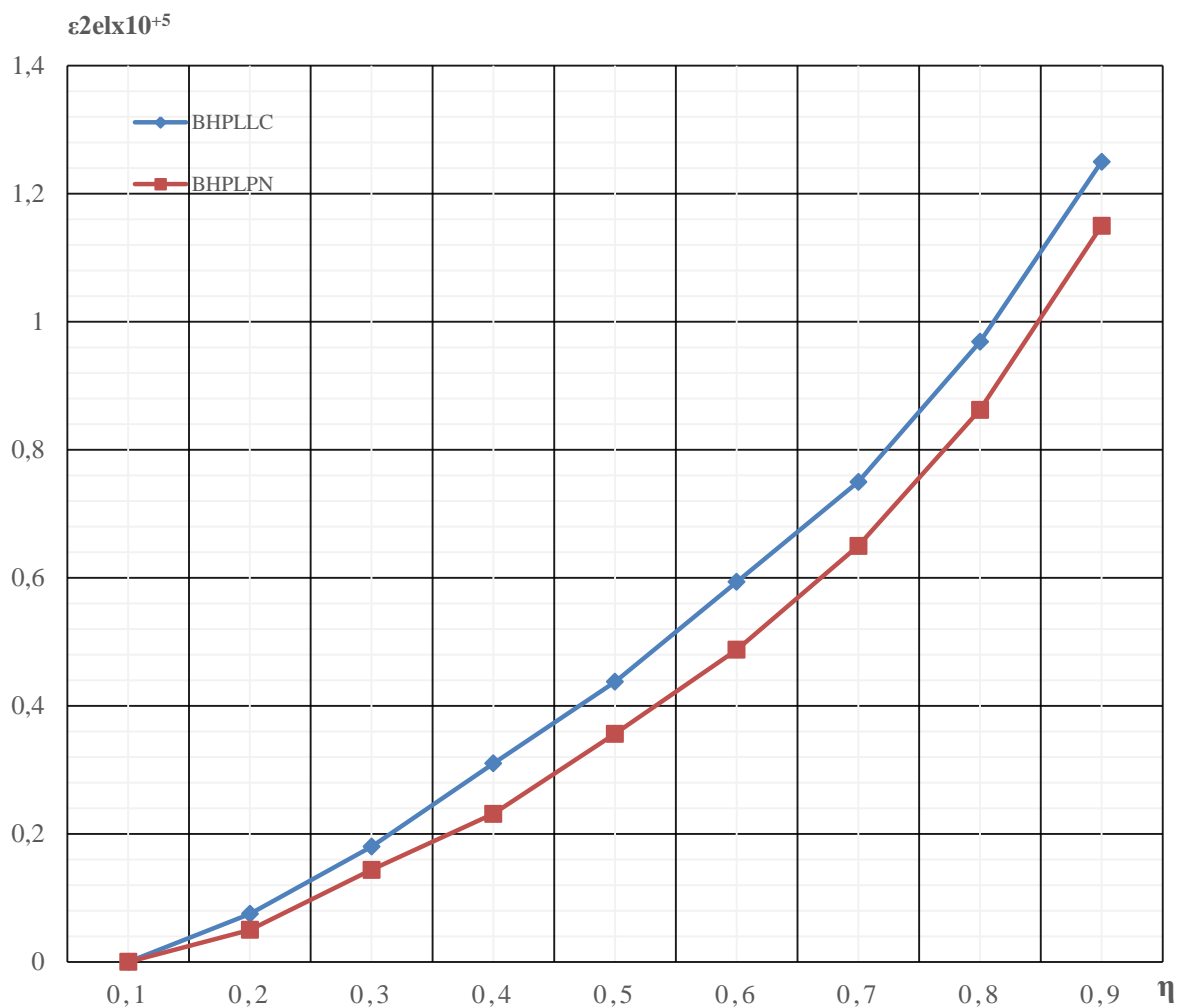


Figure (V.6) : Déformation élasto-instantanées transversales du béton ϵ_{2el} en fonction des contraintes relatives η pour les séries de prismes BHPLLC et BHPLPN

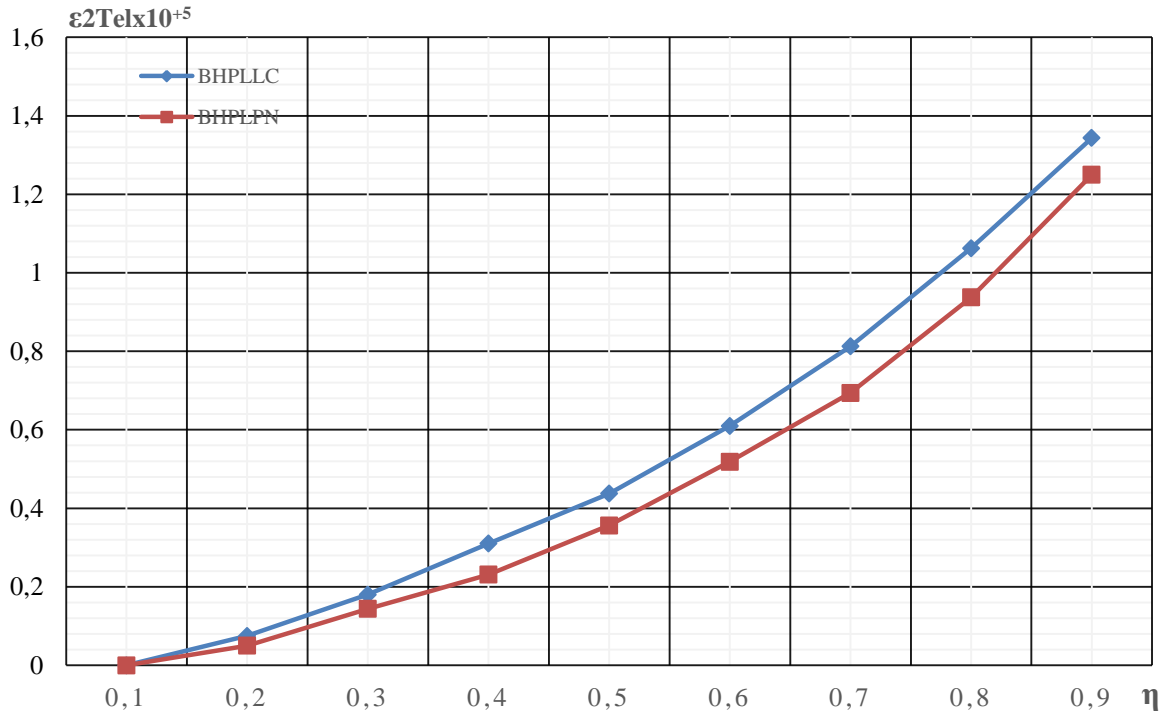


Figure (V.7) : Déformation élasto-instantanées totales transversales du béton ϵ_{2Tel} en fonction des contraintes relatives η pour les séries de prismes BHPLLC et BHPLPN

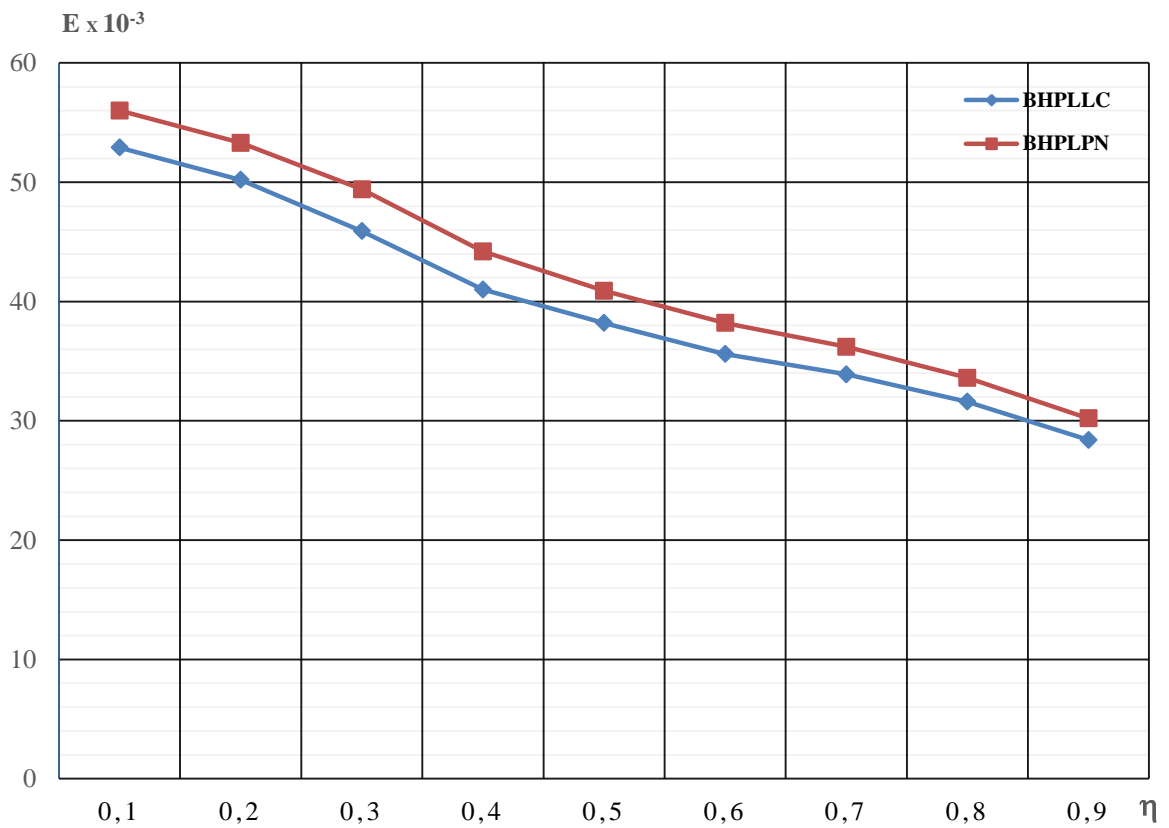


Figure (V.8) : Module de déformabilité E du béton en fonction des contraintes relatives η pour les séries de prismes BHPLLC et BHPLPN

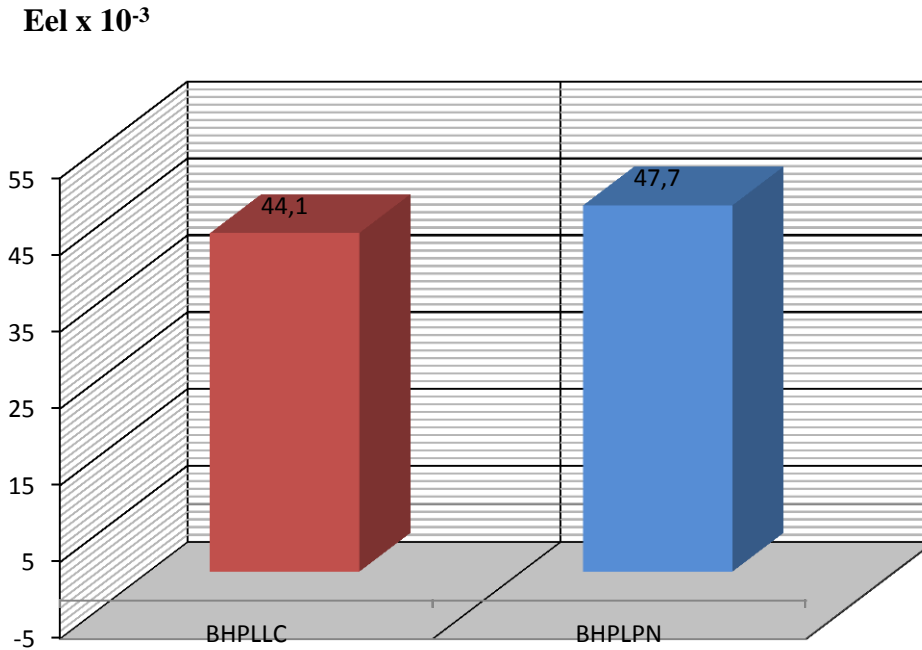


Figure (V.9) : Module d'élasticité E du BHPLLC et BHPLPN

V.4.2.4.1. Commentaire

D'après les figures (V.4, V.5, V.6, V.7, V.8), on peut voir une représentation schématique suivant les résultats des essais appliqués sur trois prismes (10x10x40) cm³, identiques de chaque série (la fraction 3/8 et 8/16), représentant l'évolution de la relation entre, les déformations élasto-instantanées longitudinales et transversales à l'instant (t) et relatives totales à (t+Δt) avec l'augmentation de la contrainte relative (η) ainsi que le module de déformabilité du béton à la compression. Cette étude nous a permis de mettre en valeur l'influence de la diminution de la taille maximale des granulats sur la déformation du béton à la compression, et de préciser quelques remarques :

- La relation entre la valeur relative de la contrainte et les déformations élasto-instantanées du béton revêt un caractère rectiligne dans l'intervalle (η = 0.1 - 0.7). Un comportement élastique linéaire.

- La relation entre (η) et les déformations est curviligne dans l'intervalle ($\eta = 0.7 - 0.9$), ce qui signale le développement dans les bétons des déformations irréversibles.
- Ces figures montrent bien que la composition de béton fabriqué à base de pouzzolane naturelle présente des basses déformations ainsi qu'un module de déformabilité élevé relativement à celles du béton à base de laitier cristallisée et par conséquent une meilleure déformabilité.
- On voit que le module de déformabilité (E) diminue avec l'augmentation de la contrainte relative.
- En ce qui concerne le module d'élasticité, on note que le béton à base de pouzzolane naturelle présente un meilleur module d'élasticité (voir figure V.9) cela s'explique par la forte adhérence entre la pâte de ciment et les agrégats, le béton est plus homogène.
- Le module d'élasticité du béton est fonction du module de chaque constituant (matrice cimentaire, agrégats légers et agrégats normales) et de leurs proportions relatives dans le mélange. Le module d'élasticité du béton de poids normal est plus élevé que le béton léger parce que les modules des particules d'agrégats de poids normal sont plus grands que les modules des particules d'agrégats légers.

La manière principale dont les agrégats de poids normaux influencent le module d'élasticité est par la qualité du lien qu'ils forment avec la pâte de ciment qui les entoure et par la façon dont le lien est maintenu quand la charge est appliquée au béton. La texture de la surface est importante à cet égard comparée aux agrégats rugueux, les agrégats légers tendent à avoir le module d'élasticité inférieur que les agrégats de poids normaux. Ceci a un impact direct sur le module d'élasticité de béton fait avec les agrégats légers. Pour le béton léger, le module d'élasticité est 40 à 80% de béton de poids normaux, de même résistance à la compression [119].

V.7. Conclusion

- La perméabilité des bétons à base de 8% de la fumée de silice et 25% de la pouzzolane naturelle pour le laitier cristallisée de fraction 3/8 et la fraction 8/16 est moins que celles des bétons à base de 8% de la fumée de silice et de 25% de la pouzzolane naturelle pour les bétons de pouzzolane naturelle de fraction 3/8 et la fraction 8/16

car le laitier cristallisé est moins poreux, le laitier cristallisé est moins poreux que la pouzzolane naturelle et absorbe une quantité moins d'eau, la perméabilité améliorée des bétons en raison du rôle physique et chimique que jouent la fumée de silice et la pouzzolane naturelle qui améliore la microstructure.

- Le comportement à l'eau des bétons à base de 8% de la fumée de silice et 25% de la pouzzolane naturelle pour le laitier cristallisé de fraction 3/8 et la fraction 8/16 est mieux que celles des bétons à base de 8% de la fumée de silice et 25% de la pouzzolane naturelle pour la pouzzolane naturelle de fraction 3/8 et la fraction 8/16, ces deux bétons ont un bon comportement en raison du rôle physique et chimique que jouent la fumée de silice et la pouzzolane naturelle.
- On voit clairement que l'utilisation du remplacement combiné de ciment par 8% de la fumée de silice et 25% de la pouzzolane naturelle permet d'obtenir un béton économique avec des performances améliorées : résistance à la compression, résistance à la flexion, module d'élasticité, absorption d'eau massique par immersion, coefficient de ramollissement, microstructure qui sert à améliorer la durabilité.
- A partir des essais réalisés, on peut affirmer que l'utilisation de la fumée de silice permet d'améliorer la microstructure qui va améliorer la durabilité du béton, c'est-à-dire que les ouvrages seront de plus longue durée de vie avec un impact économique et sociale à long terme.
- Le module d'élasticité de béton à base de pouzzolane naturelle de fraction 3/8 et la fraction 8/16 est supérieur à celui du béton à base de laitier cristallisé de fraction 3/8 et la fraction 8/16, ce qui signifie qu'il est plus durable.
- Un module d'élasticité supérieur, susceptible d'améliorer la stabilité aérodynamique de ponts élancés.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS

CONCLUSION GÉNÉRALE

La formulation et la fabrication des bétons dont la résistance en compression à 28 jours atteint plus de 56 MPa voire 72 MPa est aujourd'hui possible à BISKRA et il faut qu'elle n'est plus du domaine expérimental, la fabrication des BHP légers est possible par la disponibilité des produits dans notre pays.

Les BHP légers nécessitent un contrôle rigoureux assurant la reproductibilité des caractéristiques et la maîtrise de la fabrication, la maîtrise industrielle des BHP légers et la capacité à livrer tous types de chantier nécessite des formations spéciales.

La formulation des BHP légers est différente de celle des bétons ordinaires en raison de :

- le rapport E/C ou E/L est très bas.
- Le béton contient souvent les ajouts cimentaires qui changent rigoureusement les propriétés de béton frais et durci.
- Le facteur d'affaissement peut être ajusté en utilisant de gamme élevée des réducteurs d'eau sans changer la teneur en eau.

Le BHP léger offre d'immenses avantages aux lotisseurs, aux conseillers et aux entrepreneurs en établissant des structures passionnantes qui peuvent être construites et prévues dans notre WILAYA.

Le superplastifiant à base poly carboxylates d'éther modifiés peut réduire la porosité du matériau en rendant le béton maniable avec moins d'eau, une augmentation de la densité et des résistances mécaniques du béton, le bon produit chimique et une augmentation des résistances à la corrosion, réduire le retrait de séchage du béton, le retrait du béton après la prise est une fonction de la quantité d'eau et plus le rapport agrégat/ciment est haut, moins le retrait se produira lors du séchage. Cela accroît considérablement la durabilité du béton, qui prolonge la durée de vie de l'infrastructure dans laquelle il est utilisé, réduisant ainsi l'impact écologique du secteur de la construction. En outre, les superplastifiants permettent aussi de remplacer d'importants volumes de ciment par des matériaux naturelles comme la pouzzolane naturelle et le calcaire ou des matériaux provenant de déchets industriels comme les fumées de silice, les laitiers et les cendres volantes qui réduisent les émissions de CO₂ associés à la production de ciment (la production de 1 tonne de ciment dégage approximativement 1 tonne de CO₂ dans l'atmosphère), la réutilisation de ces matériaux dans le béton sera non seulement économique et écologiques, mais elle peut également provoquer des améliorations de résistances, de durabilité et de réalisation.

La structure amorphe de la fumée de silice, son contenu élevé de SiO_2 et sa grande surface spécifique le rend très réactif avec l'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 produit par l'hydratation de ciment, pour former d'hydrate additionnelle de silicate de calcium (C-S-H). Cette réaction est plus significative à la zone de transition pâte-agrégat. Dans un bétons sans fumée de silice, grands cristaux de l'hydroxyde de calcium (C-H) habituellement se forment dans la zone de transition, dû à leur petite taille et leur forme sphérique, les particules de fumée de silice tendent à agir en tant que remplisseur, elles se sont adaptées dans les espaces vides entre les grains de ciment qui autrement soient occupés par l'eau facilitant les possibilités d'écoulement, l'effet physique de remplisseur des particules de la fumée de silice a pu être signifiant à la zone de transition pâte-agrégat, car elle est densifiée et censé pour améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité.

D'une façon générale l'addition de la fumée de silice aux bétons a montré un bon développement de résistance entre les âges de 7 et 28 jours selon la composition des mélanges, le béton contient 8% de la fumée de silice avec un rapport E/L de 0.25 a une résistance à la compression plus haute que les autres bétons.

Un facteur principal en produisant le béton de haute résistance qui est au-dessus de 72 MPa est d'employer la pouzzolane naturelle moins réactive (que la fumée de silice) combinée avec la fumée de silice et un rapport E/L très bas de 0.25 et de 0.30.

La combinaison de la fumée de silice et de la pouzzolane naturelle dans les mélanges a eu comme conséquence une microstructure très dense et une faible porosité produisent ainsi un béton de perméabilité améliorée et sont donc très résistants à la pénétration des agents agressifs, on voit aussi l'effet de type des granulats sur les caractéristiques des bétons frais et durcis, les bétons à base de laitier cristallisée sans plus résistants et performants que les bétons à base de pouzzolane naturelle parce que le laitier est plus résistant et plus dense que la pouzzolane naturelle.

Les durées de cure plus longues réduisent la perméabilité et a comme conséquence une structure des pores plus fines. C'est très important pour le béton directement exposé à un environnement agressif, la cure diminue aussi le retrait endogène des BHP légers.

Le béton contient 8% de la fumée de silice est le béton le plus durable. Il a également été observé que le BHP légers peut être employé pour obtenir de hautes résistances à la compression, à la flexion, haut module d'élasticité et durabilité élevée dans des structures spéciales, comme les structures marines, superstructures, parkings, pistes d'avion, ponts, tunnels, constructions industriels (centrales nucléaires).

Avec la disponibilité des matériaux et une bonne connaissance des technologies des ajouts cimentaires, il est possible de produire un béton durable et améliorer ces qualités pour la plupart des applications.

En conclusion, si sa mise en œuvre ne soulève pas de difficultés, la fabrication d'un BHP légers exige des précautions importantes lorsque la fourchette de tolérance sur la masse volumique est étroite.

- Le grand nombre de causes de dispersion et l'importance de leurs effets rend nécessaire d'apporter un soin particulier à la fabrication du BHP légers.
- Contrôle régulier des caractéristiques des granulats légers utilisés (masse volumique, teneur en eau, interne et superficiels) et de la teneur en eau du sable.
- Enregistrement des pesées.
- Contrôle de la masse volumique des BHP légers produit.

La régularité de la production est à ce prix.

RECOMMANDATIONS

D'après ce travail nous recommandons de

- Utiliser le superplastifiant à base poly carboxylates d'éther modifiés de forme liquide, pour augmenter la maniabilité du béton.
- Vérifier la compatibilité entre les ciments et les superplastifiants afin de conserver une ouvrabilité satisfaisante pendant toute la durée de mise en place du béton, lors de l'étude de formulation.
- Utiliser la fumée de silice est vraiment nécessaire pour des bétons de résistance à la compression plus de 72 MPa à 28 jours avec E/L de 0.25 et cela réduit la perméabilité et l'absorption d'eau des bétons.
- Utiliser la fumée de silice et le laitier cristallisé pour des bétons de résistance à la compression de 72 MPa à 28 jours avec E/L de 0.25, c'est très avantageux du point de vue économique et environnemental.
- Utiliser le **laitier cristallisé** d'El Hadjar (Wilaya de Annaba) car elles sont efficaces.
- Utiliser les BHP légers car de plus petites dimensions des structures sont nécessaires et le coût d'entretien inférieur peut être prévu.

Perspectives

- Étudier l'influence du superplastifiant et du mode d'introduction des superplastifiants sur le maintien de l'affaissement des bétons et sur la microstructure à jeune âge des pâtes de ciment de même rapport E/C ou E/L que celui du béton à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB).

- Étudier l'hydratation des pâtes de ciment ayant le même rapport E/C ou E/L que celui du béton.
- Étudier l'augmentation de résistance à la compression à 28 jours obtenue avec le superplastifiant.
- Étudier l'influence des ajouts cimentaires sur les interactions entre le ciment et le superplastifiant.
- Étudier l'influence des ajouts cimentaires sur la compatibilité ciment/superplastifiant par l'essai du cône Marsh.
- Étudier l'influence des ajouts cimentaires sur le gain de résistance des bétons.
- Étudier l'influence de cure sur le gain de résistance des bétons.
- Autres caractéristiques du BHP léger, tel que le fluage, la fissuration, le retrait, résistance aux attaques des sulfates, résistance à la corrosion, résistance au feu et durabilité devraient être étudiées, parce qu'il y a des cas où une autre caractéristique est plus importante pour le concepteur ou le propriétaire que la résistance à la compression à 28 jours.
- Utiliser autres méthodes de formulation des BHP légers.
- Utiliser autres granulats légers et autres ajouts cimentaires.
- D'autres études devraient inclure un éventail de variables pour modifier de manière significative les mélanges et déterminer des applications définies pour produire des BHP légers plus efficaces et plus économiques.
- Il est important de recueillir l'information concernant le BHP léger pour expédier la formulation des caractéristiques pour des bétons pouzzolaniques pour l'industrie des bâtiments.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. Mehrdad Massoud Nejad, Mohammad Javad Taheri Amiri, Maryam Mirdoost, Hamed Darvishi, Maedeh Javaheri Barforoosh., Investigating and Comparing the Economic Use of Normal Concrete and Lightweight Concrete in Construction Projects in Iran, *Journal Of Current Research In Science*, 2322-5009, 560-564, 2016.
- [2]. Family H, Delnavaz M., The use of structural lightweight aggregate concrete, case study: a two-storey structure built in Iran University of Science and Technology. The first national conference on lightweight concrete, February, (In persian).
- [3]. D. B. Thatcher, J. A. Heffington, R. T. Kolozs, G. S. Sylva III, J. E. Breen, and N. H. Burns., *Structural Lightweight Concrete Prestressed Girders And Panels.*, Research Report 1852-1., Center For Transportation Research Bureau Of Engineering Research The University Of Texas At Austin September 2001 Revised January 2002
- [4]. Martinez Morales, Salvador. Short-Term Mechanical Properties of High-Strength Lightweight Concrete, Report Number 82-9. Department of Structural Engineering, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, August 1982.
- [5]. AASHTO. *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications: Customary U.S. Units.* 2nd ed., Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 1998.
- [6]. Shideler, J.J., *Lightweight Aggregate Concrete for Structural Use*, *Journal of the American Concrete Institute*, pp. 299-328, October 1957.
- [7]. Zhang, Min-Hong, and GjØrv, Odd E., *Properties of High Strength Lightweight Concrete.*, *Lightweight Concrete Research Studies*, Texas Industries, Inc., 1998.
- [8]. Burg, G., Cichanski, W.J., and Hoff, G.C., *Selected Properties of Three High-Strength Lightweight Concretes Developed for Arctic Offshore Structures*, *Lightweight Concrete Research Studies*, Texas Industries, Inc., 1998.
- [9]. Nilsen, A.U., and Aitcen, P.-C., *Properties of High-Strength Concrete Containing Light-, Normal-, and Heavyweight Aggregates, Cement, Concrete, and Aggregates*, pp. 8-12, Summer 1992.
- [10]. Zhang, Min-Hong, and GjØrv, Odd E., *Mechanical Properties of High-Strength Lightweight Concrete*, *ACI Materials Journal*, pp. 240-247, May-June 1991,

- [11]. Mircea, Doina, Ioani, Adrian, Filip, Mihai, and Pepenar, Ion, Long-Term Durability of Reinforced and Prestressed Elements in Aggressive Environments, *ACI Materials Journal*, pp. 135-140, March-April 1994.
- [12]. ACI Committee 213, Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete, *ACI Manual of Concrete Practice, Part I*, 1998.
- [13]. Reichard, T.W., Creep and Drying Shrinkage of Lightweight and Normal-Weight Concretes, *NBS Monograph 74*, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1964.
- [14]. Mays, G.C., and Barnes, R.A., The Performance of Lightweight Aggregate Concrete Structures in Service, *The Structural Engineer*, pp. 351-361, October 15, 1991.
- [15]. Laamanen, Päivi-Helena, High Strength LWA Concrete for Bridge Construction., *The New Sundbru Bridge in Eidsvoll, Norway.*, *Lightweight Concrete Research Studies*, Texas Industries, Inc., 1998.
- [16]. Melby, Karl, Jordet, Elljarn A., Hansvold, Carl, Long Span Bridges in Norway Constructed in High- Strength LWA-Concrete., *Lightweight Concrete Research Studies*, Texas Industries, Inc., 1998.
- [17]. Sandvik, Melvin, Utilization of High Strength LWA., *Concrete in Norway.*, *Lightweight Concrete Research Studies*, Texas Industries, Inc., 1998.
- [18]. Hanson, George C., *Lightweight Aggregate in Prestressed Concrete Construction*, *Lightweight Concrete Research Studies*, Texas Industries, Inc., 1998.
- [19]. Jennings, T.W., and Brewer, J.A., *Lightweight, Prestressed Concrete.*, *Lightweight Concrete Research Studies*, Texas Industries, Inc., 1998.
- [20]. Murillo, Juan A., Thoman, Steve, and Smith, Dennis, *Lightweight Concrete for a Segmental Bridge*, *Civil Engineering*, pp. 68-70, May 1994.
- [21]. Vaysburd, Alexander M., *Durability of Lightweight Concrete Bridges in Severe Environments*, *Concrete International*, pp.33-38, July 1996.
- [22]. *Concrete In Practice : Structural Light Weight Concrete*
- [23]. Pierre Claude Aïtcin, *Les bétons à hautes performances*. Edition Eyrolles, 2001.
- [24]. Berre,M, et Ferrara, G. Normal weight and Total Lightweight High strength Concrete : A Comparative Experimental Study, *ACI SP-121*,p,701-733,1990.
- [25]. Celik Ozyildirim, Ph.D., P.E. *Lightweight High- Performance Concrete Bulb-T Beams With Self- Consolidating Concrete in a Bridge Structure*, *Principal Research*

Scientist Final Report VCTIR 14-R15 Virginia Center For Transportation Innovation And Research 530 Edge.

[26]. Ozyildirim, C. Resistance to Penetration of Chlorides into Concrete Containing Latex, Fly Ash, Slag, and Silica Fume. Durability of Concrete. American Concrete Institute, In ACI SP-145, Farmington Hills, MI, pp. 503-518, 1994.

[27]. Ozyildirim, C., Gomez, J., and Elnahal, M. High Performance Concrete Applications in Bridge Structures in Virginia. In ASCE Proceedings: Worldwide Advances in Structural Concrete and Masonry. American Society of Civil Engineers, New York, pp. 153-163, 1996.

[28]. Holm, T.A. Structural Lightweight Concrete for Bridge Redecking. Concrete Construction, Vol., 30, No. 8, pp. 667-672, August 1985,

[29]. Rita Nemes, Lightweight Concrete Made With Expanded Glass Aggregate, A Doctoral Thesis, Budapest University of Technology and Economics, 2006.

[30]. Eléments bibliographiques et caractérisation expérimentale des matériaux

[31]. Yang Ke, Caractérisation Du Comportement Mécanique Des Betons de Granulats Légers : expérience et modélisation, Thèse de doctorat université cergy pontoise Génie Civil, 18 décembre 2008.

[32]. Use of air-cooled blast furnace slag as coarse aggregate in concrete pavement Final report Report No FHWA-HIF-12-008, March 2012.

[33]. Étienne Lepesqueux, Comportement Des Betons Autoplaçants Préparés Avec Des Granulats Légers Mémoire de maîtrise Spécialité : génie civil, Université De Sherbrooke Faculté de génie Département de génie civil.

[34]. Holm, T.A., Bremner, T.W., High-Durability Structural Low-Density Concrete for Applications in Severe Marine Environments, State of the Art Report on High-Strength, Innovations for Navigation Projects Research Program, 2000.

[35]. Chapter 3 Physical Properties of Structural Lightweight Aggregate

[36]. Mohamed R. Afify, Noha M. Soliman, Feasibility of Using Lightweight Artificial Course Aggregates in the Manufacture of R. C. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), 2249 – 8958, Volume-3, Issue-2, December 2013.

[37]. Latifou Bello, Mise Au Point D'une Methodologie Pour Formuler De Nouveaux Bétons Auto-Plaçants Légers Et Durables, Thèse de Doctorat Université Montpellier, 29/09/2014.

- [38].NF EN 206-1/CN : Béton Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité Décembre 2012, Afnor
- [39]. A yeginobali,K G S obolev S V Soboleva and M Tokyay, High strength Natural Light weight aggregate concrete with silica fume.
- [40]. Mang,uriu Geoffrey N. Mutku Raphael.N., Oyawa Walter.O. Abuodha Silvester.O., Properties of Pumice Lightweight Aggregate, Civil and Environmental Research, 2222-1719 , Vol 2, No.10, 2012.
- [41]. Kluge RW, Sparks, MM, Tuma EC Lightweight-aggregate Concrete. ACI Journal, Proceedings No. 945, 625-44,1945.
- [42]. Hossain KMA, Lachemi M. Design, Strength, Durability and Fire Resistance of Lightweight Concrete with Pumice Aggregate ACI Materials Journal No. 5, 104449-57,2007.
- [43]. İ.Uğur Department of Mining Engineering, Süleyman Demirel University, İsparta, Turkey, Improving The Strength Characteristics of The Pumice Aggregate Lightweight Concretes, Civil and Environmental Research, 2222-1719, Vol 2, No.10, 18th International Mining Congress and Exhibition ot Turkey-IMCET, 975-395-605-3, 2012.
- [44]. EIPPCB Best available techniques in ceramic manufacturing industry European Commission Directorate General Joint Research Centre, Draft Reference Document; 2005.
- [45]. Everhart J., Ehlers E., Johnson J. A study on lightweight aggregate Engineering, Experiment Station Bulletin n° 169 part II, pp 21-45, Ohio State University, 1958.
- [46]. Melanie Shink, Compatibilité Elastique, Comportement Mécanique Et Optimisation Des Bétons De Granulats Légers, Thèse de Doctorat, Université Laval Québec, avril 2003.
- [47]. M. Arnould and M. Virlogeux, Matières premières pour la fabrication de granulats légers, Granulats et bétons légers; Bilan de dix ans de recherche, pages 3 24, Paris, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1986
- [48]. S. L. Sarkar, S. Chandra, L. Berntsson, Interdependence of microstructure and strength of structural lightweight aggregate concrete, Cement and Concrete Composites, 14:239 248, 1992.
- [49]. M.-H. Zhang, O. E. GJ RV, Pozzolanic reactivity of lightweight aggregates, Cement and Concrete Research, 20(6):884 890, 1990.

- [50]. V.M. Malhotra, Matériaux complémentaires en cimentation pour le béton, Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie (CANMET), Ottawa, 1989.
- [51]. ASTM C127
- [52]. Holm, T.A., Ries, J.P., Lightweight concrete and aggregates, Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials, ASTM special technical publication 169D, chapter 46, 2006, pp548-560.
- [53]. R.N. Swamy, G.H. Lambert, The microstructure of lytag aggregate, The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 3(4):273-282, November 1981.
- [54]. M.H. Zhang, O.E. GJ RV, Characteristics of lightweight aggregates for high strength concrete, ACI Materials Journal, 88(2):150-158, 1990.
- [55]. G. Fagerlund, Frost resistance of concrete with porous aggregate, Report of cement and concrete institute in Sweden, 1978.
- [56]. M.H. Zhang, O.E. GJ RV, Microstructure of interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste, Cement and Concrete Research, 20(4):610-618, 1990.
- [57]. J. Punkki, O.E. GJ RV, P.J.M Monteiro, Microstructure of high-strength lightweight aggregate concrete, 4th International Symposium on utilization of high strength high performance concrete, pages 1281-1287, Paris, 1996.
- [58]. A. Bentur, S.-i Igarashi, K. Kovler, Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates, Cement and Concrete Research, 31:1587-1591, 2001.
- [59]. D.P. Bentz, K.A. Snyder, Protected paste volume in concrete; Extension to internal curing using saturated lightweight aggregate, Cement and Concrete Research, 29(11):1863-1867, 1999.
- [60]. K. Kohno, T. Okamoto, Y. Isikawa, T. Sibata, H. Mori, Effects of artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete, Cement and Concrete Research, 29(4):611-614, 1999.
- [61]. Y. Asai, Y. Itoh, S. Kante, M. Sakai, H. Saeki, Study on the characteristics of high-strength lightweight concrete for icy waters, Proceedings of the 4th International Offshore and Polar Engineering Conference, volume 4, pages 363-368, Osaka, Japan, April 1994.

- [62]. S. Linsel, H. Garrecht, H.S. Muller, Production and properties of high performance light weight concrete, Proceedings of the 5th International Symposium on Utilization of High Strength / High Performance Concrete, pages 1210-1218, Sandefjord, Norway, June 1999.
- [63]. M. Virlogeux, Generalités sur les caractères des bétons légers, M. Arnould and M. Virlogeux, editors, Granulats et bétons légers; bilan de 10 ans de recherche, pages 111-246, Paris, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1986.
- [64]. J. Muller-Rochholz, Determination of the elastic properties of lightweight aggregate by ultrasonic pulse velocity measurement, The International journal of lightweight concrete, 1(2):87-90, 1979.
- [65]. CEB-FIP, Lightweight Aggregate Concrete, The Construction Press, 1977.
- [66]. CEB-FIP, Béton de granulats légers, Annales de l'ITBTP, janvier-mai et décembre 1980.
- [67]. A.U. Nilsen, P.J.M. Monteiro, O.E. GJ RV, Estimation of the elastic moduli of lightweight aggregate, Cement and Concrete Research, 25(2):276-280, 1995.
- [68]. Holm, T.A., Bremner, T.W., High-Durability Structural Low-Density Concrete for Applications in Severe Marine Environments, State of the Art Report on High Strength, Innovations for Navigation Projects Research Program, 2000.
- [69]. New lightweight aggregates from building waste Quelle/Publication: European Coatings Journal Ausgabe, Seite/Page: 1, Issue: 02/2011.
- [70]. Expanded Shale Clay and Slate Institute, Lightweight Concrete History, Applications economics Booklet, USA, 1971.
- [71]. Ducman V., Mladenovic A., Šuput J. S., Lightweight aggregate based on waste glass and its alkali-silica reactivity. Cement and Concrete Research, 32, pp. 223-226, 2002.
- [72]. González- Corrochno B., Alonso-Azcárate J., Rodas M., Production of lightweight aggregates from mining and industrial waste. Journal of Environmental Management, 90, pp. 2801-2812, 2009,
- [73]. Wang X., Development of lightweight aggregate from dry sewage sludge and coal ash. Waste management, 29, pp. 1330-1335, 2009.
- [74]. Nanes R., Strength of Lightweight Glass Aggregate Concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, 18, pp. 710-714, 2006.
- [75]. Chapter 2 Industrial Waste Aggregates.

- [76]. Lafarge Laitier (Chicago) QU O I D E N E U F Publication Hanley-Wood, LLC, 2001
- [77]. Barkat abderrazzak, Valorisation des déchets de briques dans la réalisation des ouvrages en béton, Mémoire de magister Genie Civil université de ouargla, 2006.
- [78]. T. W. Bremner¹, J. P. Ries and W. H. Wolfe, Environmentally Friendly Uses Of Lightweight Aggregates Corresponding.
- [79]. Tobin, Robert E., Estimating Foundation Costs, available from Lightweight Pressure Co., 650 So. Grand Ave., Los Angeles, CA, 6 pp, 1972,
- [80]. Bremner, T.W., Lightweight Aggregates Can Reduce Energy Needs for Buildings, in Energy and Resource Conservation in the Cement and Concrete Industry, published by Construction Materials Section, Mineral Science Laboratories, CANMET, Ottawa, Canada, 1976.
- [81]. T.Y. Lo, H.Z. Cui, Materials letters, Effect of porous lightweight aggregate on strength of concrete Department of Building and Construction, City University of Hong Kong, Hong Kong, China, July 2003.
- [82]. M. H. Zhang, O.E. Gjorv, Microstructure of the interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste, Cem. Concr. Res. 20(4) 610 – 618, 1990.
- [83]. S. Diamond, The microstructures of cement paste in concrete, Proc. of the 8th International Conference on the Chemistry of Cement, vol. 1, pp. 122 – 147, Rio de Janeiro, 1986.
- [84]. B.D. Barnes, S. Diamond, W.L. Dolch, Micromorphology of the interfacial zone around aggregate in Portland cement mortar, J. Am. Ceram. Soc. 62 (1–2) 21–24, 1979.
- [85]. P.K. Mehta, Concrete: Structure, Properties, and Materials, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1986.
- [86]. S. Diamond, Cement paste microstructure in concrete, in: L.J. Struble, P.W. Brown (Eds.), Microstructural Development During Hydration of Cement, Mater. Res. Soc. Symp. Proc., vol. 85, pp. 21 – 23, 1987.
- [87]. A. Katz (Ed.), RILEM Second International Conference on the Inter- facial Transition Zone in Cementitious Composites, Haifa, Israel, March 8 – 12, E&FN Spon, London, 1998.
- [88]. D. Breton, et al., Contribution to the formation mechanism of the transition zone between rock – cement paste, Cem. Concr. Res. 23 335 – 346, 1993.

- [89] N.K. Khokhrin, *The Durability of Lightweight Concrete Structural Members*, Kuibyshev, USSR, 1973.
- [90]. Thomas Calais, *Propriétés Mécaniques Et Durabilité D'un Béton Leger Application en régions froides*, Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec, 2013.
- [91]. Mauricio Lopez, *Creep And Shrinkage Of High Performance Lightweight Concrete: A Multi-Scale Investigation*, A Doctoral Thesis, Georgia Institute of Technology, December 2005.
- [92]. *Lightweight Aggregate Concrete: Effect Of Age And Curing Method* Rita Nemes1 : 666.972.125 DOI:10.14415/zbornikGFS26.04.
- [93]. EN 206-1:2000 Concrete – Part 1: Specification, performance, production and conformity *Journal Of Faculty Of Civil Engineering*, 26, 2014.
- [94]. Čeh A., Kovač Striko J., Kasaš K., *Konstruktivni laki betoni sa agregatima od recikliranog otpadnog stakla*, PhiDAC Zbornih radova, Novi Sad, 2011, pp 391-398, 21-23 Septembar 2011.
- [95]. Benjamin Thomas Cross, *Structural Performance of High Strength Lightweight Concrete Pretensioned Bridge Girders*, Virginia Polytechnic Institute and State University, A Doctoral Thesis, February 1, 2012.
- [96]. *Engineering Properties Of Structural Lightweight Concrete* Kenneth S. Harmon, PE Carolina Stalite Company – United States
- [97]. *Building Bridges and Marine Structures, Expanded Shale, Clay and Slate Institute (ESCSI)*, Salt Lake City, Utah., 16 pp. 2001.
- [98]. Normes AFNOR Méthodes d'essais des ciments – partie 2 : Analyse chimique des ciments, indice de classement P 15-472, août 1995.
- [99]. Alexandre J., Sebileau J.L., *Le laitier de haut fourneau, Elaboration, Traitements, Propriétés, Emploi*. Corporate Travel Partners Limited., 1988.
- [100]. M.Arnould et M.Virlogeux, *Granulats et bétons légers, Bilan de dix ans de recherche* Presse de l'école nationale des Ponts et Chaussées 1986.
- [101]. Jacques Baron, Jean Pierre Olliver, *Les bétons bases et données pour leur formulation*, Eyrolles Deuxième tirage, 1997.
- [102]. Huynh H.T, *La compatibilité ciment-superplastifiant dans les BHP, synthèse bibliographique*, Bulletin de Liaison des LPC, N° 206, Nov-Déc, pp. 63-73, 1996.
- [103]. De Larrard F, Puch C, *Formulation des BHP : La méthode du coulis*, Bulletin des LPC, N° 161, pp. 75-83. , Mai-juin, 1989

- [104]. Hanna E, Luke K, Perraton D, Aïtcin P.C, Rhéological behaviour of Portland cement in the presence of a superplasticizer, Proceeding of the 3th International conférences on superplasticizer and other chemical admixture in concrete, Ottawa, Malhotra V.M., pp. 171-188,1989.
- [105]. Rollet M, Levy C, Cavailles R, « Evaluation of compatible superplasticizer for the production of high-strength concrete, Proceeding of the 9th International Congress on the chemistry of cement, New Delhi, Vol 5, pp. 115-121,1992.
- [106]. Lessard M., Gendreau M., Baalbaki M., Pigeon M., Aïtcin P.C., Formulation d'un béton à hautes performances à air entraîné, Bulletin de liaison des LPC, N°188, pp. 41-51, Nov- Déc, 1993.
- [107]. H. Katkhuda, B. Hanayneh and N. Shatarat, Influence of Silica Fume on High Strength Lightweight Concrete, World Academy of Science, Engineering and Technology 34, 2009.
- [108]. R.Dupain, Rlanchon, J, C.Saint, Arroman, Granulats, Sols, Ciments et Bétons Normes AFNOR Bétons – Essai d'étude, de convenance et de contrôle-confection et conservation des éprouvettes. Edition Casteilla 1995.
- [109]. Dreux G, Festa J, Nouveau guide du béton et de ses constituants, Huitième édition, Edition Eyrolles, 1998.
- [110]. Vimane Phoummavong, M. Cours en béton armé-Essais de laboratoire, page. 1 à 146.
- [111]. 9. Matériaux Et Produits De Construction.
- [112]. Gagne, R.; Chagnon, D.; and Parizeau, R., L'Utilization du Beton a Haute Performance dans l'Industrie Agricole, Proceedings of Seminar at Concrete Canada Annual Meeting, Sherbrooke, Quebec, pages 23 to 33, October 1994.
- [113]. J.P. Balayssac, Ch.H. Detriche, J. Grandet, Intérêt de l'essai d'absorption d'eau pour la caractérisation du béton d'enrobage, Materials and Structures, 26, 226-230 Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, INSA-UPS Génie Civil, Complexe Scientifique de Rangueil, 31077 Toulouse Cedex, France, 1993.
- [114]. Nilsen, A.U., Monteiro, P.J.M., GjØrv, O.E., Estimation of the elastic moduli of lightweight aggregate, Cem Concr Res, 25(2) 276-280, 1995.
- [115]. Hobbs, D.W., Influence of aggregate restraint on the shrinkage of concrete, ACI J, 71 445-450, 1974.
- [116]. Holm, T., Lightweight Concrete and Aggregates, ASTM Standard Technical Publication 169C, 48 522-532, 2001.

- [117]. Chapter 7 Engineering Properties of Structural Lightweight Concrete, Expanded Shale, Clay & Slate Institute (ESCSI) 2225 E. Murray Holladay Rd, Suite 102 Salt Lake City, Utah 84117 (801) 272-7070, www.escsi.org, April 2007.
- [118]. De Larrard, F. Structures granulaires et formulation des bétons. Laboratoires Central des ponts et Chaussées, p.30-208,2000.
- [119]. Mindess.Sidney, Young Francis J, Concrete Prentice Hall.

ANNEXES

ANNEXES

La méthode de formulation des BHP de l'Université de Sherbrooke

La méthode de formulation développée à l'université de Sherbrooke permet de formuler un BHP sans air entraîné; elle peut aussi être utilisée pour formuler un BHP à air entraîné à condition de tenir compte de la réduction de la résistance à la compression due à la présence du réseau de bulles d'air contenu dans le béton.

Cette méthode très simple suit la même approche que la norme ACI 211-1. IL S'agit d'une combinaison de résultats empiriques et de calculs basée sur la méthode des volumes absolus. La quantité d'eau contenue dans le super plastifiant est considérée comme faisant partie de la quantité d'eau de gâchage. L'organigramme de cette méthode est présenté dans la figure ci-dessous figure 1:

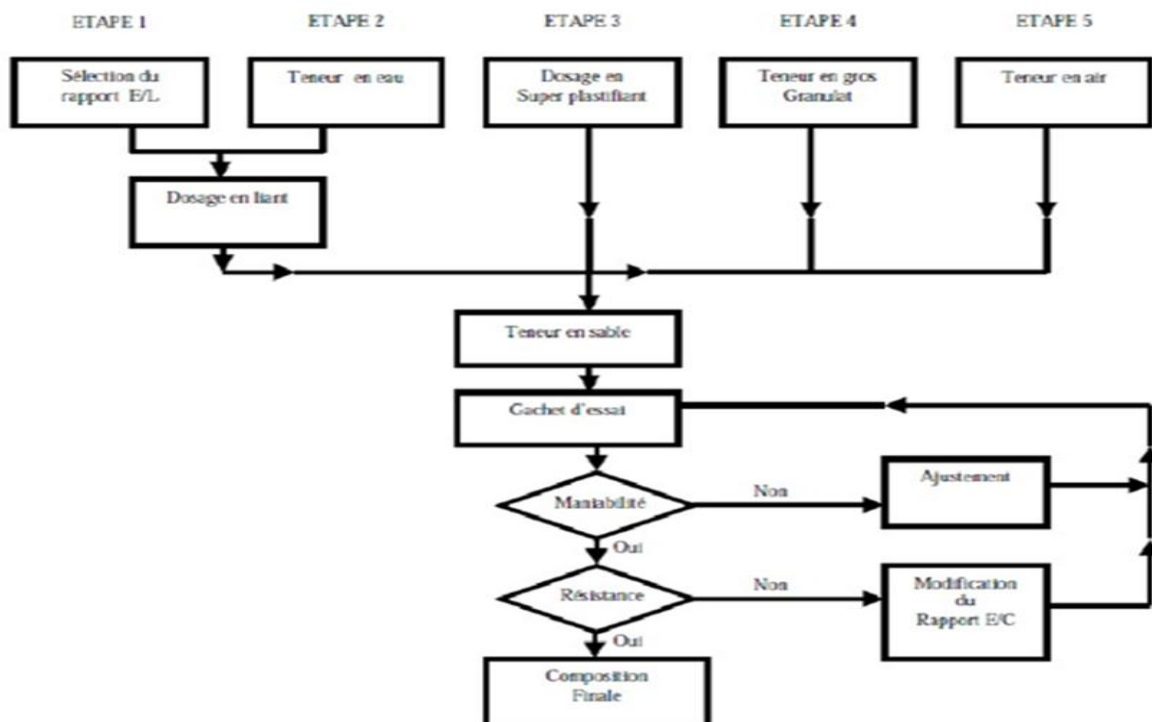


Figure 1 : Organigramme de la méthode proposée pour formuler des BHP

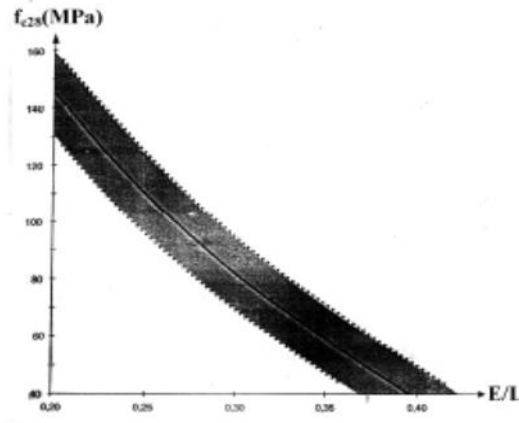
La procédure de formulation commence par le choix de cinq caractéristiques particulières du BHP ou des matériaux utilisés :

- le rapport eau / liant;
- le dosage en eau ;
- le dosage en super plastifiant;
- le dosage en gros granulat;
- la teneur en air.

Tous les calculs nécessaires à la formulation d'un BHP sont présentes sur une seule feuille de calcul (voir page 140).

Rapport eau/liant

On peut trouver le rapport eau /liant en utilisant la figureII-9 pour des bétons ayant une résistance à la compression donnée à 28 jours. Le fuseau de la figure 2 donne une gamme relativement étendue de rapport eau/ciment pour une résistance donnée. Si l'on ne connaît pas l'efficacité du liant que l'on utilise, on peut commencer par prendre la valeur moyenne donnée par ce fuseau.



relation proposée entre le rapport eau/liant et la résistance à la compression

Figure 2 : relation proposée entre le rapport eau/liant et la résistance à la compression

Dosage en eau

Une des plus grandes difficultés rencontrées lorsque l'on calcule la composition d'un BHP est de déterminer la quantité d'eau qu'il va falloir utiliser pour fabriquer un béton qui aura un affaissement de 200 mm plus d'une heure après son malaxage. En effet, la maniabilité d'un BHP est contrôlée par plusieurs facteurs: la quantité initiale d'eau, la réactivité du ciment, la quantité de super plastifiant et son degré de compatibilité avec ce ciment particulier.

La meilleure façon de trouver le bon rapport entre la quantité d'eau et la quantité de présente une approche simplifiée, basée sur le concept de point de saturation. Pour calculer une formulation robuste, on peut ajouter 5L/m³ à toutes les valeurs présentées à la figure 3. Lorsque le point de saturation du super plastifiant n'est pas connu, on suggère de commencer avec un quantité d'eau de malaxage égale à 145 L /m³.

Point de saturation	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	%
Dosage en eau	120 à 125	125 à 135	135 à 145	145 à 155	155 à 165	L/m ³

Figure 3 : Détermination du dosage en eau

Dosage en superplastifiant

Le dosage en super plastifiant se déduit du dosage au point de saturation. Si l'on ne connaît pas le point de saturation, on peut toujours commencer avec un dosage en super plastifiant égale à 1.0%.

Point de saturation

Quand on mesure le temps d'écoulement pour différents dosages en super plastifiant à différents instants et que l'on exprime ce dosage sous forme de pourcentage de solides contenus dans le super plastifiant par rapport à la masse de ciment, on obtient une courbe qui ressemble en général à celle présentée à la figure 4. Cette courbe est composée de deux parties linéaires ayant des pentes différentes. L'intersection de ces deux parties linéaire est ce que l'on appelle le " point de saturation ", c'est-à-dire le point à partir duquel, dans les conditions expérimentales de mesure, toute augmentation du dosage en super plastifiant n'à plus de répercussion sensible sur la rhéologie du coulis. Le dosage en super plastifiant qui correspond à ce point est appelé le point de saturation.

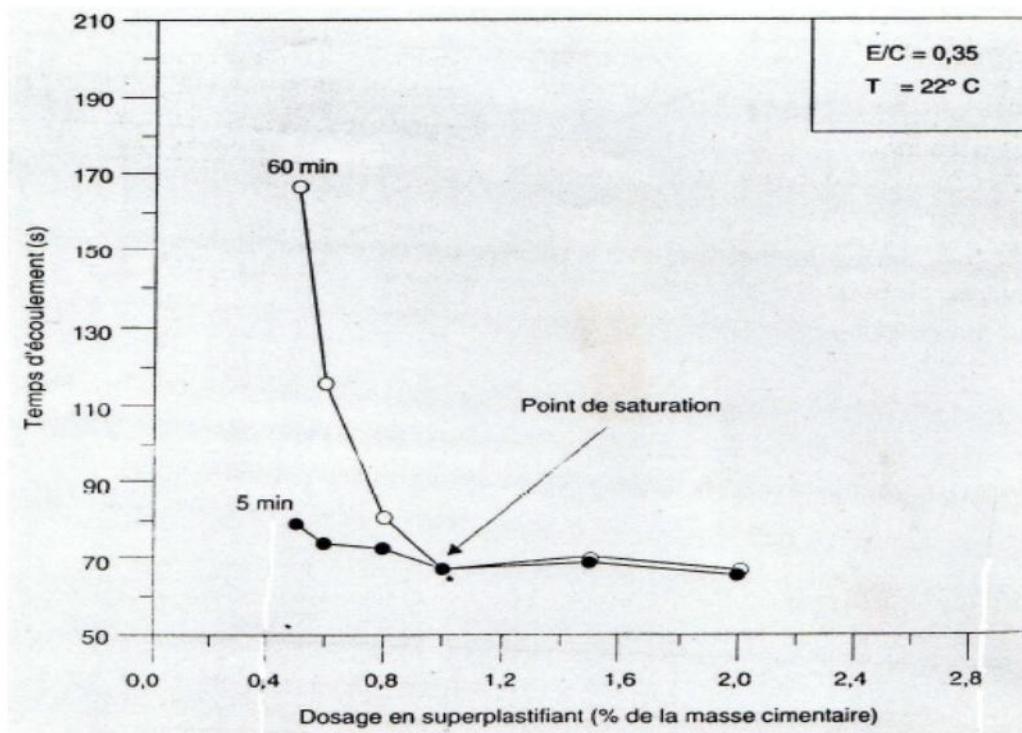


Figure 4 : Temps d'écoulement en fonction du dosage en super plastifiant

Dosage en gros granulat

Le dosage en gros granulat peut être déduite de la figure 5 en fonction de la forme des granulats. S'il y a quelque doute sur la forme des granulats ou si on ne la connaît pas, on peut toujours commencer avec une quantité de gros granulats de 1000 kg/m³.

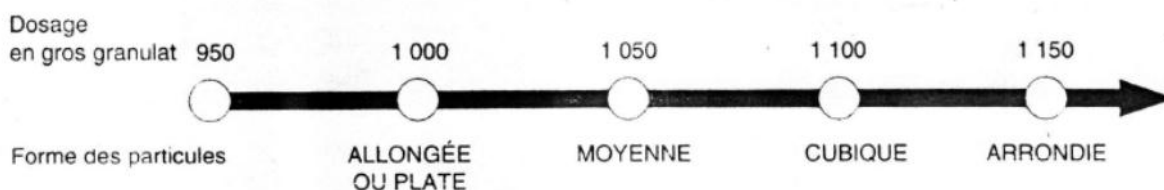


Figure 5 : Dosage en gros granulat

Teneur en air

Les BHP qui sont utilisés dans des environnements où il n'y a pas de cycle de gel dégel n'ont évidemment pas besoin de contenir de l'air entraîné, de telle sorte que la seule quantité d'air que l'on retrouvera dans les BHP est le volume d'air piégé. Cependant, de façon à améliorer la manipulation et la mise en place des BHP.

L'expérience a démontré qu'il était assez difficile de fabriquer des BHP qui contiennent moins de 1% d'air piégé et que, dans les pires des cas, la teneur en air piégé peut être aussi élevée que de 3%. Par conséquent, certains auteurs suggèrent d'utiliser une valeur de 1.5% comme valeur initiale de la quantité d'air piégé.

Feuille de calcul

Tous les calculs nécessaires à la formulation d'un BHP sont présents sur une seule feuille de calcul.

Avant de présenter la pratique de la méthode, les paragraphes ci-dessous expliquent les calculs détaillés qu'il faut effectuer pour remplir chacune des cases de la feuille de calcul.

Calculs:

Case 1: Reporter la valeur du rapport eau/liant telle que choisie à la figure

Case 2: Ecrire la quantité d'eau nécessaire, selon la figure.

Case 3: calculer la masse de liant.

Case 4-1,4-2,4-3: calculer la masse de chaque ajout cimentaire nécessaire.

Case 5: Reporter la masse un gros granulat trouvé à la figure.

Case 6: Ecrire la quantité d'air piégé que l'on prévoit obtenir dans le BHP.

Case 7: Ecrire la quantité de superplastifiant qu'il sera nécessaire d'utiliser en se basant sur la valeur du point de saturation.

A cette étape, la seule information manquante est la masse de granulat fin qu'il faut utiliser.

Cette valeur peut se calculer par la méthode des volumes absolus, c'est-à-dire que l'on soustrait de 1m^3 le volume de tous les ingrédients déjà sélectionnés de façon à trouver le volume restant pour le granulat fin, ce qui se fait dans la colonne 2.

Case 8-1,8-2,8-3: calculer les volumes des différents ajouts cimentaires.

Case 9: calculer le volume de gros granulat.

Case 10: Multiplier la quantité d'air par 10 pour obtenir le volume d'air piégée en l/m^3 .

Case 11: calculer le volume V_{sol} .

Case 12: inscrire la somme de tous les volumes déjà calculés.

Case 13: calculer le volume de granulat fin en l/m^3

Case 14: calculer la masse de granulat fin.

Case 15: calculer la masse de solides dans le superplastifiant M_{sol} .

Case 16: calculer le totale de toutes les masses, pour obtenir la masse volumique du béton.

Jusqu'à présent, les masses de granulats ont toujours été calculées dans des conditions SSS. Il faut donc corriger le dosage en eau de gâchage.

Case 17: Multiplier la masse SSS du gros granulat par $(1+E_h/100)$.

Case 18: Soustraire la valeur trouvée à la case 17 de la valeur de la case 5.

Case 19: Calculer la masse SSS du granulat fin.

Case 20: Soustraire la valeur apparaissant dans la case 19 de celle apparaissant dans la case 14.

(écrire la valeur en signe négatif)

Case 21: Ecrire la quantité d'eau contenue dans le superplastifiant (le signe négatif apparaît déjà dans cette case).

Case 22: Ajouter algébriquement toutes les corrections d'eau.

La composition finale de $1m^3$ de béton avec des granulats humides est maintenant calculée dans la colonne 5.

Case 23: Ajouter la correction de l'eau.

Case 24: Ecrire le dosage en superplastifiant V_{liq} .

Gâchée d'essais : (Colonne 6)

Il nécessaire de fabriquer de (x) kg de béton, ce qui reprisant $(x)/case16 = (f) m^3$ donc toutes les valeurs de la colonne (5) doivent être multipliées par (f).

Case 25 à 29 : Multiplier les valeurs de la colonne 5 par le facteur f.

Case 30: Calculer la masse de la gâchée d'essai en additionnant les masses des différents ingrédients du béton que l'on retrouve dans les cases 25 à 29.

Composition d'un béton à haute performance

La méthode de formulation de l'université de Sherbrooke

GACHEE :

F_{act} : MP2

COMPOSITION D'UN BHP

	G _g	%
ciment		
cendre		

	%			
Granulat	G _g	E _g	E _g	E _g
Gros				
fin				

$$E_g = E_{g1} - E_{g2} \quad M = M_{g1}(1 + E_g)$$

SUPERPLASTIFIANT					
Densité (G _{sup})	Teneur en solides (s) (%)	M _{sol} = c*d/100	V _{sq} = M _{sol} *100/s*G _{sup}	V _k = V _{sq} *G _{sup} *(100-s)/100	V _{sol} = V _{sq} -V _k
		14	11 24	2 21	31 11 11

Matériaux	1 2 3 4 5 6					
	Teneur Kg/m3	Volume L/m3	Dosage état 333 kg/m3	Correction D'humidité L/m3	Composition	
					1 m3	Gâchée d'essais
Eau						
Ciment	E/L = 0					
Gros granulat						
Granulat fin						
Air	POURCENTAGE		0			
Super plastifiant	%					
Total						

La feuille de calcul utilise les symboles suivants :

d_c : densité du ciment ou des ajouts cimentaires

d_{sss} : densité des granulats à l'état saturé superficiellement sec

E_{abs} : quantité d'eau absorbée dans les granulats (en pour cent)

E_{tot} : teneur en eau totale des granulats (en pour cent)

E_h : humidité des granulats (en pour cent)

d_{sup} : densité du super plastifiant liquide

s : teneur en solides du super plastifiant (en pour cent)

M_{sol} : masse de solides dans super plastifiant

d : dosage du super plastifiant exprimée sous forme de pourcentage de la masse de solide par rapport à la masse de matériaux cimentaires.

V_{liq} : volume de super plastifiant liquide

V_E : volume d'eau dans le super plastifiant

V_{sol} : volume de solides dans le super plastifiant

E : masse d'eau en kg/m^3 dans le béton

L : masse de liant par mètre cube de béton

Présentation

Le ciment CPJ-CEM II/A 42,5 est un ciment portland composé obtenu par le mélange finement broyé de clinker et d'ajouts.

Du sulfate de calcium est ajouté sous forme de gypse en tant que régulateur de prise.

Spécifications

Le CPJ-CEM II/A 42,5 de l'ERCE répond aux exigences de la norme NA 442 : 2000

Caractéristiques Physiques :

- Le temps de début de prise mesuré sur pâte pure est \Rightarrow 60 minutes.
- Le retrait à 28 jours d'âge sur mortier normal est \leq 1000 μ m/m.
- La stabilité mesurée sur éprouvette de pâte pure est \leq 10 mm.

Caractéristiques Mécaniques :

Les résistances mécaniques à la compression font apparaître une valeur moyenne des résultats à 28 jours d'âge voisine 52,5 N/mm².

Caractéristiques Chimiques :

La teneur en sulfates (SO₃) dans le ciment

Est \leq 3,5%

La teneur en chlorures (Cl) est \leq 0,1%

Type et Composition du ciment**Désignation :**

Ciment Portland Composé

Identification :

CPJ-CEM II/A 42,5

Composition :

- Clinker : 80 à 94%
- Ajouts : 06 à 20% (Laitier, Pouzzolane, Calcaire)

Conditionnement :

- Vrac
- Sac de 50 Kg

NOTICE TECHNIQUE

1 1 0 1

MEDAFLOW 145

Conforme à la norme NF EN 934-2 :TAB 1 ,TAB 3.1
ET TAB 3.2 NA 774

Super plastifiant – Haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le **MEDAFLOW 145** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la nouvelle génération d'adjuvants. Il est conçu à base de poly carboxylates d'éther modifiés et son utilisation dans le béton permet l'obtention d'un long maintien d'ouvrabilité. Le **MEDAFLOW 145** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la quantité d'eau de gâchage du béton d'une façon remarquable.

CARACTERISTIQUES

- FormeLiquide
- Couleur.....brai clair
- pH..... 5 – 8
- Densité..... 1.085 ± 0,015
- Teneur en chlore..... < 1g/L
- Extrait sec..... 30±1.5%

PROPRIETES ET EFFETS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 145** permet :

Sur béton frais :

- l'obtention d'un E/C très bas
- Béton plastiques à fluides
- une très bonne maniabilité
- un long maintien de l'ouvrabilité
- de faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- bonne résistances initiale et finales .
- de diminuer la porosité
- bel aspect de parement au décoffrage
- de diminuer le retrait

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - nivelant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons avec ferrailage dense

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,3 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.33 à 1.8 litre pour 100 Kg de ciment.

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLOW 145** est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 80% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

Il est recommandé de réaliser des essais dans les conditions de chantier afin de déterminer le dosage fournissant les résultats recherchés.

Par temps chaud, le **MEDAFLOW 145** peut être combiné à un retardataire de prise **MEDARETARD GR**.

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAFLOW 145** est conditionné en bidons de 10 l et fûts de 210 et 240 kg et cubitainer 1100 kg

Délai de conservation :

12 mois dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (5°C < t < 35°C).

Précaution d'emploi:

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur notre site web : www.granitex.dz

*Les renseignements donnés dans cette fiche sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour.
Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.*

**Granitex**

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 18270 Alger

Tél : (213) 021 51 88 81 & 82

Fax : (213) 021 51 84 22 & 021 51 85 23

www.granitex.dz - E-mail: granitex@granitex.dz

DESCRIPTION

Le **MEDAPLAST HP** est un ajout en poudre pour confection de bétons à hautes performances (BHP).

Il permet :

- d'obtenir des bétons durables à résistances mécaniques élevées
- d'obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques et atmosphériques

■ CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES

- Forme Poudre
- Couleur Grise
- Densité apparente 0,5
- Composants..... SiO₂ > 85(%)
..... SO₃ < 2,5 (%)
..... Cl⁻ < 0,2 (%)
- Aire massique > 15 (m²/gr)
- Humidité par étuve à 105°C < 1 (%)
- Taille des particules < 0,1 (microns)

■ PROPRIÉTÉS ET EFFETS

Grâce à ses propriétés le MEDAPLAST HP permet :

Sur béton frais :

- d'améliorer la cohésion
- d'éviter le ressuage et la ségrégation

Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques
- d'obtenir des bétons possédant une excellente imperméabilité
- d'augmenter la résistance à l'érosion et à l'abrasion
- d'obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques
- d'augmenter la durabilité du béton

L'ajout d'un super plastifiant est recommandé (**MEDAPLAST SP, SP40**) afin d'améliorer la fluidité du béton et de diminuer le rapport E/C. Le béton obtenu, une fois appliqué, ne présente aucun ressuage.

■ DOMAINE D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Autoroutes, pistes d'aéroport
- Ouvrages d'art, ouvrages hydrauliques
- Bétons très sollicités
- Bétons soumis aux impacts et aux chocs
- Bétons soumis à des milieux agressifs
- Sols industriels
- Silos

■ DOSAGE

Le dosage du MEDAPLAST HP varie de 5 à 10% du poids du ciment. Ce dosage dépend des performances recherchées.

■ MODE D'EMPLOI

Le MEDAPLAST HP est mélangé à sec avec les composants du béton, avant l'ajout de l'eau de gâchage, pendant 1 minute au moins. Après ajout de l'eau de gâchage mélanger encore pendant 2 minutes au minimum. Malaxer ensuite jusqu'à homogénéisation du béton.

Il est nécessaire de procéder à une cure de plusieurs jours du béton obtenu (toile de jute + arrosage ou **MEDACURE**) surtout par temps chaud ou en présence de courants d'air.

■ CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le MEDAPLAST HP est conditionné en sacs de 2kg.

- Délai de conservation

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur.

■ PRECAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse

Se référer aussi à la **FICHE DE DONNEES DE SECURITE**

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.