



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil et d'Hydraulique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Génie civil
Structures

Réf. :/2018

Présenté et soutenu par :
Zeghidi Mohamed

Le : samedi 23 juin 2018

Etude des caractéristiques et durabilité des bétons légers à base de polystyrène

Jury :

Dr.	MEZGHICHE Bouzidi	MCA	Université de Biskra	Président
Pr.	BOUAZIZ Ahmed	Pr	Université de Biskra	Examineur
Dr.	ABDELAZIZ Salim	MAA	Université de Biskra	Encadreur

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parent, que dieu les grande et les protégé pour leurs soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

A mes frères

A mes sœurs

A ma grande famille Zeghidi

A tous mes amis (es) d'études surtout ceux d'génie civil

A mon Cher ami Aghilas Hafraoui

Remerciements

Ce travail a été effectué au sein de Laboratoire de génie civil, Université Mohamed KHIDER de Biskra.

Je voudrais en tout premier lieu remercier chaleureusement Ma encadreur Docteur Mr ABDELAZIZ Salim au département de génie civil et hydraulique et , qui ont suivi et encadré ce travail avec intérêt et compétence.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en participant à ce jury et de juger ce travail.

On remercie nos enseignants du département de génie civil et d'hydraulique et en particulier : Dr. **MEZGHICHE Bouzidi** et M^r **TAALAH Bachir et IZEMOUREN Ouarda** pour leurs aides et conseils tout au long de notre travail.

Nous adressons nos remerciements aux responsables et techniciens du laboratoire de matériaux de construction de l'université de Biskra pour leurs aides à la bonne réalisation de la partie expérimentale de ce mémoire, en particulier M^r **ABDELMONAIM**.

J'exprime mes profonds remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé au cours de ce travail. Ma reconnaissance va à tous mes collègues du Laboratoire de Génie civil et mes amis, en particulier **S. HADJER**.



Résumé

Ce mémoire est consacré à l'étude de la formulation et de la caractérisation des bétons légers de polystyrène. Ce matériau fait partie de la gamme des bétons spéciaux, utilisé pour améliorer les propriétés thermiques et acoustiques des bétons.

La durabilité du béton, dans des conditions extrêmes, est devenue un sujet d'intérêt majeur et, par conséquent, un domaine de recherche largement exploré. C'est dans ce cadre que s'insère la présente étude.

La formulation du béton léger est faite en substituant le gravier par du polystyrène expansé suivant deux pourcentages : (50 % et 70 %).

Les résultats de l'étude ont montré que l'allègement des bétons par incorporation des granulats de polystyrène est accompagné par une réduction de résistance mécanique, ceci est dû la fragilité des granulats légers et leurs pouvoirs d'absorption plus élevé que le gravier.

L'étude de la durabilité des bétons légers vis-à-vis du gel-dégel a montré une chute de résistance à la compression qui varie entre 5.6 % et 27.5 %.

L'étude de la durabilité des bétons légers vis-à-vis des attaques chimiques a montré une baisse de résistance à la compression pour les solutions de H_2SO_4 et $NaOH$ et une augmentation de résistance à la compression pour les solutions de NH_4NO_3 et Na_2SO_4 .

Mots clés : béton léger, polystyrène, résistance à la compression, durabilité, gel-dégel, attaque chimique, conductivité thermique.



الملخص

هذه الأطروحة مكرسة لدراسة تركيب و خصائص خرسانة البوليسترين الخفيفة. هذه المادة هي جزء من مجموعة من الخرسانة الخاصة ، وتستخدم لتحسين الخصائص الحرارية والصوتية للخرسانة.

أصبحت ديمومة الخرسانة تحت الظروف القاسية موضع اهتمام . في هذا السياق ، تناسب هذه الدراسة، لذلك ، تم استكشاف مجال البحث على نطاق واسع.

يتم تركيب الخرسانة خفيفة الوزن عن طريق استبدال الحصى مع البوليسترين expansé بنسبتين: (50% و 70%).

أظهرت نتائج الدراسة أن تخفيف الخرسانة من خلال دمج ركام البوليسترين يرافقه انخفاض في المقاومة الميكانيكية، وذلك بسبب هشاشة الركام الخفيف والقدرات الممتازة للامتصاص من الحصى.

أظهرت نتائج الدراسة أن تخفيف الخرسانة من خلال دمج ركام البوليسترين يرافقه انخفاض في القوة الميكانيكية ، وذلك بسبب هشاشة الركام الخفيف والقدرات الممتازة للامتصاص من الحصى.

وأظهرت دراسة ديمومة خرسانة خفيفة الوزن ضد تجميد الذوبان انخفاضا في مقاومة الضغط التي تتراوح بين 5.6% و 27.5%.

أظهرت دراسة ديمومة الخرسانة خفيفة الوزن ضد الهجوم الكيميائي انخفاضا في قوة الانضغاط لمحاليل H₂SO₄ و NaOH وزيادة في مقاومة الانضغاط لحلول NH₄NO₃ و Na₂SO₄.

كلمات مفتاحية: الخرسانة الخفيفة، بولسترين، مقاومة الضغط، الديمومة ، التجمد-الذوبان، هجوم كيميائي ،

التوصيل الحراري

TABLE DES MATIERES

DEDICACE

REMERCIEMENTS

RESUME

NOTIONS ET ABREVIATIONS

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES PHOTOS

INTRODUCTION GENERALE.....1

CHAPITRE 1 : BETONS LEGERS ET POLYSTYRENE.

INTRODUCTION.....3

I-1-LE BETON LEGERS.....3

I-1-1-CLASSIFICATION ET TYPES DES BETONS LEGERS4

I-1-1-1 Classification4

I-1-1-2 Types :.....6

I-1-3- GRANULATS LEGERS10

I-1-3-1-Composition chimique et minéralogique.....11

I-1-3-2 Granulat naturels12

I-1-3-3 Granulats artificiels :.....13

I-1-4 FORMULATION DU BETON LEGER14

I-1-5-1 Nature de l'ouvrage14

I-1-5-2 Le dosage15

I-1-6 LES AVANTAGES DES BETONS LEGERS15

Table des matières

I-1-6-1 Avantages physiques et thermiques	15
I-1-6-2 Avantages de Mises En Œuvre	16
I-1-6-3 Avantages Economiques	16
I-1-9 DOMAINE D'UTILISATION DES BETONS LEGRS	16
I-2-LES ISOLANTS SYNTHETIQUES	17
I-2-1 DEFINITION	17
I-2-2 CARACTERISTIQUES	18
I-2-3 LES TYPE	18
1-2-3-1- Le polyuréthane	18
1-2-3-2- Polyisocyanurate	19
1-2-3-3- La mousse résolique (ou phénolique)	20
I-2-3-4-Le polystyrène	20
I-3-CONCLUSION.....	27

CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES ET DURABILITE DU BETON LEGER

INTRODUCTION	28
II-1-CARACTERISTIQUES DES BETONS LEGRS.....	28
II-1-1- CARACTERISTIQUES PHYSIQUES	28
II-1-1-1- Légèreté	28
II-1-1-2-Porosités	28
II-1-1-3-L'absorption :	30
II-1-1-4-La masse volumique.....	30
II-1-1-5-La rhéologie à l'état frais.. .	31
II-1-2-CARACTERISTIQUES MECANIQUES	33
II-1-2-1- Résistance en compression.....	33
II-1-2-2-Résistance à la traction	34
II-1-3-PROPRIETES THERMIQUES	34

Table des matières

II-1-4- AUTRES PROPRIETES DU BETON LEGER	35
II-1-4-1-La résistance au gel	35
II-1-4-2-La résistance au feu	36
II-1-4-3-Aspect acoustique	36
II-2-DURABILITE	36
II-2-1-DEFINITION DE LA DURABILITE	36
II-2-2- LES INDICATEURS DE LA DURABILITE	37
II-2-1- Dégradations par les cycles gel-dégel	37
II-2-1-1- Action des cycles gel/dégel	37
II-2-1-2- Les détériorations liées aux cycles gel-dégel.....	38
II-2-2-Dégradations par l'attaque chimique	39
II-2-2-1-Les attaques sulfatiques	39
II-2-2-2-Les attaques d'acides	43
II-3-CONCLUSION	47

CHAPITRE 3 : MATERIAUX ETUDIES ET METHODES EXPERIMENTALES

INTRODUCTION.....	48
III-1-MATERIAUX UTILISES	49
III-1-1 : LIANT « CIMENT PORTLAND COMPOSE CPJ-CEM-II / A 42.5 »	49
III-1-1-1 : Composition chimique	49
III-1-1-2 : Propriétés physiques	50
III-1-1-3 : Caractéristiques Physico-mécaniques	50
III-1-1-4 : Masse volumique	51
III-1-2-SABLE	51

Table des matières

III-1-2-1-Essai de l'équivalent de sable	52
III-1-2-2-Masse volumique	53
III-1-2-3-Analyse granulométrique	53
III-1-2-4- Absorption d'eau.....	54
III-1-3-GRANULATS	54
III-1-3-1- Granulat naturel	54
III-1-3-1-1-Masse volumique	55
III-1-3-1-2-Absorption d'eau des granulats	55
III-1-3-1-3-Analyse granulométrique	56
III-1-3-1-4-Essais de Los Angeles	56
III-1-3-2-Granulats légers	57
III-1-3-2-1-Polystyrène	57
III-1-3-2-2-Masse volumique	58
III-1-3-2-3- Absorption d'eau	59
III-2 : FORMULATIONS DES BETONS LEGERS	60
III-2-1-METHODE DE SCRAMTAIEV	61
III-2-1-1- Les différents mélanges des bétons	62
III-2-1-2-La formulation des bétons	62
III-2-2- PREPARATION DES EPROUVETTES	64
III-2-2-1-Mélange de béton	64
III-2-2-2-Remplissage et vibration	65
III-2-2-3-Type d'éprouvette	65
III-3-PROGRAMME DES ESSAIS	65
III-3-1-Ouvrabilité	65

Table des matières

III-4-2- Mesures de la masse volumique (pesé hydrostatique)	66
III-3-3-Mesures de la résistance à la flexion	67
III-3-4-Mesures de la résistance à la compression	68
III-3-5- l'essai d'attaques chimiques	68
III-3-7-l'essai du gel-dégel	70
III-4-CONCLUSION	73

CHAPITRE 4 : ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

INTRODUCTION	74
IV-1-CONSISTANCE DES BETONS FRAIS.....	74
IV-1-1-Affaissement du bétons de polystyrène	74
IV-2-PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES BÉTONS DURCIS	75
IV-2-1-Masse volumique	75
IV-2-2- Absorption d'eau pendant la phase de la cure	77
IV-3- PROPRIETES MECANIQUES DES BETONS DURCIS.....	78
IV-3-1-RESISTANCE A LA COMPRESSION	78
IV-3-2-RESISTANCE A LA FLEXION	80
IV-4-DESCRIPTION MACROSCOPIQUE	83
IV-5- DURABILITE	84
IV-5-1- Gél-dégel	84
IV-5-1-1-Aspect extérieur des éprouvettes pendant les cycles du gel-dégel	84
IV-5-1-2- Perte du masse	86

Table des matières

IV-5-1-3-Résistance à la compression	87
IV-5-2- Attaques chimiques	89
IV-5-2-1-Examen visuel	89
IV-5-2-2-Perte de masse	92
IV-5-2-3-Résistance à la compression	97
IV-6-CONFRONTATION	104
IV-7-CONCLUSION	106
CONCLUSION GENERALE	107
Bibliographie	
Annexe	

Liste des figures

Chapitre I : Bétons légers et polystyrène

Figure I-01 : Représentation schématique des différents types de bétons légers	7
Figure I-02 : Variation de la résistance en fonction de masse volumique du béton	10
Figure I-03 : Différents granulats légers naturels	13
Figure I-04 : Différents granulats légers artificiels	13
Figure I-05 : Polymérisation d'uréthane.....	18
Figure I-06 : Le polyuréthane	19
Figure I-07 : Le polyisocyanurate	19
Figure I-08 : La mousse résolique	20
Figure I-09 : Polymérisation du styrène	21
Figure I-10 : Structure alvéolaire du polystyrène	22
Figure I-11 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des billes de polystyrène	25
Figure I-12 : Evolution de la résistance en flexion en fonction du pourcentage des billes de polystyrène	26

Chapitre II : Caractéristiques et durabilité des bétons légers

Figure II-01 : Porosité du béton	29
Figure II-02 : Les trois types de porosité présente dans les matériaux	30
Figure II-03 : test du cône d'Abrams	32
Figure II-04 : Relation entre la résistance en compression à 28j et la densité du béton frais d'un mélange avec des granulats légers	34

Figure II-05 : Conductivité thermique λ en fonction de la Masse volumique sèche du béton cellulaire	35
Figure II-06 : Exemple de dommages causé par le gel-dégel	38
Figure II-07 : Des cas pathologiques d'éléments en béton en contact de sulfate.....	39
Figure II-08 : L'origine des sulfates (interne ou externe)	40
Figure II-09 : L'attaque par les sulfates	41
Figure II-10 : La formation de l'ettringite secondaire	42

Chapitre III : Matériaux étudiés et méthodes expérimentales

Figure III-01 : Courbe granulométrique du sable 0/5	54
Figure III-02 : Courbe granulométrique du granulat naturel(GN) 7/15)	56
Figure III-03 : Absorption d'eau par les granulats du polystyrène pendant 30 minuits	60
Figure III-04 : Absorption d'eau par les granulats du polystyrène pendant heures.....	60

Chapitre IV : Analyse et discussion des résultats

Figure IV-01 : Valeur d'affaissement pour tous les différents mélange de béton.....	75
Figure IV-02 : masse volumique des bétons en Kg/m ³	76
Figure IV-03 : L'absorption d'eau du type de béton	78
Figure IV-04 : Résistances à la compression du béton	79
Figure IV-05 : résistance relative à 28 jours	80

Figure IV-06 : Résistances à la flexion du béton	82
Figure IV-07 : Résistance relative à 28 jours	82
Figure IV-08 : Comparaison entre la compression et flexion à 28 jours	83
Figure IV-09 : La perte de la masse du béton	86
Figure IV-10 : La comparaison de la résistance du béton avant la cure et après la gel-dégel	88
Figure IV-11: pourcentage de réduction de la résistance du béton après le gel-dégel par rapport le béton après la cure de 28 j	88
Figure IV-12 : Perte du la masse pour les béton immergée dans solution du H_2SO_4	93
Figure IV-13 : Augmentation de la masse pour les béton immergée dans solution du NH_4NO_3	95
Figure IV-14 : Augmentaion de la masse pour les béton immergée dans solution du Na_2SO_4	96
Figure IV-15 : Perte du la masse pour les bétons immergée dans solution du $NaOH$	97
Figure IV-16 : Comparaison entre la résistance du béton après le cure 28 jours et les bétons après immersion d'un la solution du H_2SO_4	98
Figure IV-17 : Pourcentage de réduction pour le béton après l'immersion des 28 jours dans la solution du h_2so_4	99
Figure IV-18 : Comparaison entre la résistance du béton après le cure 28 jours et les bétons après immersion d'un la solution du NH_4NO_3	100
Figure IV-19: Pourcentage d'augmentation pour le béton après l'immersion du 28 jours dans la solution du NH_4NO_3	100
Figure IV-20 : Comparaison entre la résistance du béton après le cure 28 jours et les bétons après immersion d'un la solution du Na_2SO_4	101

Figure IV-21 : Pourcentage d'augmentation pour le béton après l'immersion du 28 jours dans la solution du Na ₂ SO ₄	102
Figure IV-22 : Comparaison entre la résistance du béton après le cure 28 jours et les bétons après immersion d'un la solution du NaOH	103
Figure IV-23 : Pourcentage du réduction pour le béton après l'immersion du 28 jours dans la solution du NaOH	103

Liste des tableaux

Bétons légers et polystyrène

Tableau I-01: Classification des bétons légers selon le guide ACI 213R-87.....	5
Tableau I-02 : Classification des bétons légers selon l'utilisation dans la construction	5
Tableau I-03 : Les propriétés comparées des bétons cellulaires	7
Tableau I-04 : Composition chimique des granulats d'argile et schiste expansés	11
Tableau I-05 : Composition chimique des granulats en laitier expansé	12
Tableau I-06 : Composition chimique de la pierre ponce et des granulats de cendres volantes frittées	12
Tableau I-07 : Propriété physique de polystyrène	22

Chapitre II : Caractéristiques et durabilité des bétons légers

Tableau II-01 : Différentes classes de la porosité	30
Tableau II-02 : vibration recommandée en fonction de l'ouvrabilité du béton.....	32

Chapitre III : Matériaux étudiés et méthodes expérimentales

Tableau III-01: composition chimique du ciment utilisé [FICHE TECHNIQUE].....	49
Tableau III-02: Caractéristiques du ciment [FICHE TECHNIQUE].....	50
Tableau III-03: Propriétés du ciment du fiche techniques	50
Tableau III-04: Propriétés du ciment	51
Tableau III-05: Les résultats d'équivalent de sable	52

Tableau III-06: la masse volumique de sable 0/5 de Lioua	53
Tableau III-07 : La masse volumique du gravier 7/15	55
Tableau-III-08 : Propriétés du béton léger confectionné à partir de polystyrène	58
Tableau III-09 : La masse volumique de polystyrène	58
Tableau III-10 : Résultats d'absorption d'eau pour les granulats étudiés	59
Tableau III-11 : L'absorption d'eau en fonction du temps	59
Tableau III-12 : Méthode de calcul des quantités de matériau (méthode de Scramtaiv).....	61
Tableau III-13 : valeurs de α en fonction: $\frac{E}{C}$	62
Tableau III-14: Composition des mélanges de béton pour 1m ³	64
Tableau III-15 : Concentration des solutions dans l'eau	69

Chapitre IV : Analyse et discussion des résultats

Tableau IV-01 : Valeur d'affaissement pour tous les différents mélanges de béton	74
Tableau IV-02 : masse volumique des bétons en Kg/m ³	76
Tableau IV-03 : l'absorption d'eau par l'éprouvettes	77
Tableau IV-04 : comparaison entre la résistances à la flexion entre béton témoin et béton léger.....	79
Tableau IV-05: comparaison entre la résistances à la flexion entre béton témoin et béton léger.....	81
Tableau IV-06 : comparaison entre compression et flexion	81
Tableau IV-07 : Présentation les caractéristiques d'essais	84
Tableau IV-08: Perte du masse du bétons avant et après le gel-dégel.....	86
Tableau IV-09: Résistances à la compression des bétons avant et après gel-dégel	87
Tableau IV-10: Perte du masse du bétons immergé dans solution de H ₂ SO ₄	93

Tableau IV-11: Perte de masse des bétons immergés dans une solution de NH_4NO_3	94
Tableau IV-12: Perte de masse des bétons immergés dans une solution de Na_2SO_4	95
Tableau IV-13: Perte de masse des bétons immergés dans une solution de NaOH	96
Tableau IV-14: Résistance à la compression après 28 j d'immersion dans une solution de H_2SO_4	98
Tableau IV-15 : Résistance à la compression après 28 j d'immersion dans une solution de NH_4NO_3	99
Tableau IV-16 : Résistance à la compression après 28 j d'immersion dans une solution de Na_2SO_4	101
Tableau IV-17: Résistance à la compression après 28 j d'immersion dans une solution de NaOH	103
Tableau IV-18 : Résultats des caractéristiques physiques, mécaniques et de durabilité des bétons légers de polystyrène et de liège	104

Liste des photos

Chapitre III : Matériaux étudiés et méthodes expérimentales

Photo III-01: sable 0/5 de Lioua	51
Photo III-2 : d'équivalent de sable.....	52
Photo III-03 : l'analyse granulométrique de sable 0/5 de lioua.....	53
Photo III-04 : granulats naturels (gravier) 7/15 Ain Touta	54
Photo III-05 : La masse volumique apparente de gravier	55
Photo III-06 : La masse volumique absolue de gravier	55
Photo III-07 : Essais de Los Angeles	57
Photo- III-08 : Granulats de polystyrène	58
Photo III-09 : Mesure de masse volumique apparente et absolue du polystyrène	57
Photo III-10 : moule pour éprouvette cubique (10-10-10)	65
Photo III-11 : moule pour éprouvette prismatique (10-10-40)	65
Photo III-12 : Essai du Slump-test	65
Photo III-13 : Bâti de pesée hydrostatique	66
Photo III-14: Éprouvettes prismatique (40 x 10 x 10) cm ³	67
Photo III-15 : -Machine d'essai de flexion	67
Photo III-16 : Machine Essai de compression	68
Photo III:-17 : Éprouvettes cubiques (10x10x10) cm ³	68
Photo III -18 : Les produits chimiques	69
Photo III -19: Conservation des éprouvettes dans des solutions chimiques à 5%	70
Photo III-20 : le cycle de gel	72

Photo III-21 : le cycle de dégel	72
Photo III-22 : Les échantillons conservés dans l'eau seulement	72

Chapitre IV : Analyse et discussion des résultats

Photo IV-01 : Photographies des coupes sur les différentes éprouvettes de béton	83
Photo IV-02 : Les éprouvette du gel-dégel au 10 ^{eme} cycles	84
Photo IV-03 : Les éprouvette du gel-dégel au 25 ^{eme} cycles	85
Photo IV-04 :Les éprouvette du gel-dégel au 50 ^{eme} cycles	85
Photo IV-05 : Les éprouvettes avant et après l'attaque chimique de H ₂ SO ₄	89
Photo IV-06 : Solution du H ₂ SO ₄ avant et après 28 j	89
Photo IV-07 : Les éprouvette avant et après l'attaque chimique de Na ₂ SO ₄	90
Photo IV- 08 : Solution du Na ₂ SO ₄ avant et après 28 j	90
Photo IV-09 : Les éprouvette avant et après l'attaque chimique de NH ₄ NO ₃	91
Photo IV-10 :Solution du NH ₄ NO ₃ avant et après 28 j	91
Photo IV-11 : Les éprouvettes avant et après l'attaque chimique de NaOH	92
Photo IV-12 : Solution du NaOH avant et après 28 j	92

NOTIONS ET ABREVIATIONS

NOTIONS :

Φ_g : une porosité intrinsèque élevée du granulat

Φ_l : la porosité intrinsèque du liant

Φ_{meso} : la porosité mesocroscopique du matériau.

Vt : volume total occupé par le matériau (m³)

$V_{\text{capillaires}}$: volume des vides contenus dans le granulat (m³)

V_{granulat} : volume total occupé par le granulat (m³)

A^o: Unité de mesure de longueur (1 A^o = 10⁻¹⁰ m)

Vvide : volume des vides contenus dans la matrice de liant (m³)

Vliant: volume total occupé par la pâte de liant (m³)

ρ_0 : désigne la masse volumique réelle du béton frais

E_{v0} : la quantité d'eau évaporable du béton

E : quantité d'eau de gâchage

E_a : quantité d'eau absorbée par les granulats légers

C : quantité de ciment

P : la masse volumique

λ : Conductivité thermique (W.m-1.K-1).

ES_v : Valeur d'équivalent visuel.

ES_p : Valeur d'équivalent par le piston.

R_c : résistance à la compression (MPa)

M_{humide}, la masse humide de l'éprouvette après immersion et déterminée à l'air ;

S_{ous eau}, la masse sous eau de l'échantillon déterminée par pesée hydrostatique ;

ρ_w , la masse volumique de l'eau considérée égale à 1000 kg/m³.

a : le nombre de jours de durcissement

n : le nombre de cycles de gel-dégel

ε : la porosité totale

M_{sat} : la masse d'éprouvette après 7 jours d'immersion dans l'eau

M_{sec} : la masse d'éprouvette sèche avant l'immersion dans l'eau

Abs % : le coefficient d'absorption

R_{c_{rel}} % : le pourcentage de la résistance à compression relative

R_{f_{rel}} % : Le pourcentage de la résistance de flexion relative

R_{c_{com}} % : pourcentage de comparaison entre la résistance de flexion et compression

ΔM_g : La variation de la masse après et avant le gel-dégel

M_b : la masse d'éprouvette après la gel-dégel

M_a : la masse d'éprouvette avant le gel-dégel

ΔR_{c_g} : Variation de la résistance après et avant le gel-dégel

$\Delta R_{c_{a-ch}}$: variation de la résistance avant et après l'attaque chimique du béton

ABREVIATIONS

PSE-E : polystyrènes expansés extrudés

PSE-M : polystyrènes expansés moulés

PSE : polystyrènes expansés

BGL : béton de granulats légers

C-S-H : silicate de calcium hydraté

AEA : agents entraîneurs d'air

SP : super plastifiants

BT : béton témoin

BP : béton de polystyrène



Introduction générale



Introduction générale

La masse volumique du béton ordinaire varie de 2200 à 2600 Kg/m³ tandis que celle du béton léger varie entre 300 et 2000 Kg/m³. L'utilisation d'un béton de masse volumique faible contribue à la réduction du poids des éléments construits avec ce béton et par la suite des dimensions des éléments porteurs, aboutissant à la réduction des efforts transmis au sol par les fondations, et par conséquent les dimensions de cette dernière ; ce qui permet la construction sur des sols de faible capacité portante.

Les bétons légers ont une faible conductivité thermique. Par conséquent, ils peuvent apporter une solution technique très intéressante au problème d'isolation thermique dans les bâtiments. Cependant la faiblesse de certaines propriétés en l'occurrence : les propriétés mécaniques, freinent leur vulgarisation.

La valorisation des déchets ménagers et industriels peuvent apporter des solutions aux problèmes de pollution et de dégradation de l'environnement. Le polystyrène expansé utilisé dans les emballages constitue un déchet intéressant qui peut être intégré dans la confection des bétons légers.

Les structures en béton montrent des signes de vieillissement et de détérioration qui nécessitent une réparation et une réhabilitation. Cependant, avant que le processus de réparation soit effectué, les causes de la détérioration doivent être identifiées pour connaître la durabilité du béton au fil du temps.

Notre travail présenté ici vise à analyser l'influence des granulats légers (polystyrène expansé) sur le comportement mécanique et physiques et la durabilité des bétons légers en suivant une approche expérimentale.

Les objectifs de ce mémoire sont :

- ✓ La formulation de bétons légers avec des granulats légers de polystyrène.
- ✓ La valorisation des déchets ménagers et industriels pour apporter des solutions aux problèmes de pollution et de dégradation de l'environnement,

Introduction générale

- ✓ La caractérisation physique et mécanique des bétons légers de polystyrène avec deux formulations (50 % et 70 %)
- ✓ L'étude de la durabilité des bétons de polystyrène en suivant leur comportement vis-à-vis du phénomène de gel-dégel et des milieux agressifs (température, sol agressif, eau acide ou sulfatée).

La première partie, comporte deux chapitres, est consacrée à la recherche bibliographique. Elle présente une revue générale sur l'état de recherches relatives aux bétons légers et de polystyrène, ainsi que leurs caractéristiques (physiques, mécaniques et thermiques) et la durabilité contre les causes des dégradations qui attaquent le béton léger.

- Au premier chapitre, nous exposons un aperçu approfondi sur les bétons légers ainsi que leur historique et leurs innovations.
- Le deuxième chapitre est consacré aux caractéristiques physique, mécanique et thermique, ainsi que la durabilité des bétons légers.

La deuxième partie, qui contient le troisième et le quatrième chapitre, est consacrée à l'étude expérimentale.

- Le troisième chapitre regroupe les caractéristiques des matériaux utilisés durant notre étude, ainsi que la description de tous les programmes d'essais pour les caractéristiques mécaniques et physiques et la durabilité (le gel-dégel et les attaques chimiques).
- Le quatrième chapitre, contient les résultats de l'étude expérimentale : caractérisation physique et mécanique et la durabilité des différents bétons, ainsi que l'analyse et la discussion de ces résultats.



CHAPITRE I: BETONS LEGERS ET POLYSTYRENE.



INTRODUCTION :

Le béton confectionné avec des granulats naturels provenant de roches dures à une masse volumique qui varie peu parce que la densité de la plupart des roches varie peu. Bien que le volume des granulats dans le béton affecte sa masse volumique, ce n'est pas un facteur important. Ainsi en pratique, la masse volumique d'un béton de densité normale varie de 2200kg/m³ à 2600 kg/m³. En conséquence, le poids propre des éléments de béton est élevé et peut représenter un fort pourcentage de la charge sur la structure. La commission des bétons légers **RILEM propose** de définir les bétons légers comme étant des bétons dont La masse volumique apparente sèche est inférieure à 1800 Kg/m³. D'autres auteurs adoptent des définitions un peu différentes : **l'American Concrete Institute limite** la masse volumique apparente des bétons légers à **1800 Kg/m³** après séchage à l'air pendant 28 jours [1].

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. On retrouve ainsi, le verre expansé (Tasserie 1991), le polystyrène (Vénuat 1983) ou encore les granulats de bois (Ouadi 1991) [2]

En fin la masse volumique après séchage comprise entre 800 et 2100 Kg/m³ entièrement ou partiellement réalisés avec des granulats légers. Il est donc bien difficile de donner une définition précise des bétons en se basant sur une limite supérieure de la masse volumique. Cependant la définition avancée par CORMON semble la plus intéressante, car elle est proche des valeurs limites de masse volumique généralement admises et surtout car elle est la plus précise quant aux conditions de conservation du béton et à la date de mesure [3].

I-1- LE BETON LEGERS :

Le béton léger variée d'un auteur à l'autre ,on observe que la masse volumique sèche d'après CORMON en 1973 est 1800 kg/m³ ,En revanche et en 1998 Jean Festa et George Dreux proposent de définir le béton léger comme un béton dont la masse volumique apparente après séchage comprise entre 800/2100 kg /m³ entièrement ou partiellement réalisé par des granulats légers naturels (argile, schistes et ardoise) ou artificiels (laitier, cendre volante) ;la diminution de la masse volumique du béton se fait par le remplacement d'une certaine quantité de matériau solide par de l'air. Les trois endroits possibles pour incorporer de

l'air dans le béton sont représentés d'après SHORT et KINIBURGH : dans la matrice (béton cellulaire), entre les gros granulats (béton caverneux ou sans fines, c.-à-d. sans sable) et dans les granulats (béton de granulats légers). Évidemment, il est possible d'effectuer des combinaisons comme un béton léger de type caverneux fabriqué en utilisant des granulats légers [4].

D'après ce que n'a vu précédemment les bétons légers sont des bétons dont la masse volumique est inférieure à 1800 Kg/m³. Le béton léger est constitué en partie ou en totalité de granulats légers, de liants hydrauliques ou de résines synthétiques (époxydes, mousses de polyuréthane, etc.). En fait, la majorité de ces bétons a une masse volumique faible, comparativement à celle des bétons conventionnels comprise entre 2200 et 2600 kg/m³ [5].

I-1-1 CLASSIFICATIONS ET TYPES DES BETONS LEGERS :

I-1-1-1 Classification :

L'augmentation du volume d'air, ou des vides dans le béton, s'accompagne d'une diminution de la résistance du matériau. Le guide ACI 213R-87 distingue alors trois catégories de béton léger, classées selon la masse volumique du matériau durci et la résistance mécanique (tableau I.01).

- a) **Les bétons légers de structure** : utilisés pour la fabrication d'éléments porteurs, sont généralement fabriqués avec des granulats légers manufacturés (argile, schistes et laitiers expansés ou cendres volantes frittées). La résistance à la compression minimale recommandée par l'ACI est alors de 17 MPa à 28 jours.
- b) **Les bétons légers de faible densité** : sont fabriqués avec des granulats ultra légers et très poreux (vermiculite exfoliée, perlite expansée) ou avec une matrice cellulaire. Dans ce dernier cas, l'incorporation de bulles d'air peut être faite par génération de gaz dans le matériau à l'état plastique ou par entraînement d'air au cours du malaxage. Ces bétons sont de très bons isolants thermiques, mais ils doivent bien souvent être traités à l'autoclave pour atteindre une résistance suffisante. D'autres granulats non absorbants et plus résistants sont aussi disponibles (verre et polystyrène expansés).
- c) **Les bétons de résistance modérée** : sont dotés de propriétés intermédiaires. Ils peuvent être fabriqués avec des granulats concassés naturels, comme la pierre ponce, les tufs et autres roches d'origine volcanique, ou avec un mortier aéré. La pierre ponce fut par ailleurs le premier granulats légers à être utilisé, notamment pour la construction du dôme du Panthéon et du Colisée à Rome [4]

Tableau I-01: Classification des bétons légers selon le guide ACI 213R-87.

Classification	ρ (kg/m ³)	Rc (MPa)
Béton léger de structure	1350-1900	> 17
Béton léger de résistance modérée	800-1350	7 – 17
Béton de faible résistance	300-800	< 7

De même **Kass J.L et Compbell D** , en Australie, ont adopté une classification fonctionnelle des bétons légers selon leur utilisation dans la construction Cette classification a été recommandée par la suite par les RILEM , selon le **Tableau I.2** :

Tableau I-02 : Classification des bétons légers selon l'utilisation dans la construction [1].

Type de béton léger	De construction	De construction et d'isolation	D'isolation
Masse volumique (kg/m³)	< 1800	Non précise	Non précise
Résistance à la compression (MPa)	> 15	> 3.5	> 0.5
Conductivité thermique (W/m.K)	-	< 0.75	< 0.30

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

- **Des bétons de remplissage** : leur masse volumique apparente est comprise entre

300 et 1000 kg/m³, leurs résistances en compression sont souvent faibles et leurs caractéristiques thermiques sont bonnes [4]

• **Des bétons porteurs isolants** : leur masse volumique apparente est comprise entre 1000 et 1400 kg/m³, leurs résistances mécaniques sont nettement meilleures que celles des précédents et leurs caractéristiques thermiques sont acceptables. On les utilise généralement pour des éléments préfabriqués.

• **Des bétons de structure** : Leur masse volumique est comprise entre 1400 et 1800 kg/m³. Ils sont destinés à la constitution des structures grâce à leurs résistances mécaniques qui peuvent être du même ordre que celles des bétons ordinaires. Leur pouvoir isolant est relativement faible [7].

I.1.1.2 Types :

Le béton léger se caractérise essentiellement par leur faible masse volumique, adaptable aux exigences, par leur excellent rapport poids/résistance et par leur bonne isolation thermique, leur résistance à la chaleur et au feu, leur résistance au gel ainsi que par leur insensibilité générale aux agressions physiques et chimiques traditionnelles dans le domaine de la construction.

Pour développer un béton léger, on doit prendre en considération deux aspects :

- 1) les particularités en matière de formulation des bétons légers,
- 2) la source des constituants spécifiques à la confection de bétons légers dont les matériaux légers naturels, artificiels et recyclés.

Ces deux aspects sont reliés avec la masse volumique qui diminue en remplaçant une quantité de matériaux par de l'air. Ces vides d'air peuvent être incorporés à trois endroits :

- soit dans les granulats.
- soit dans la pâte de ciment.
- Ou entre les gros granulats par élimination de granulats fins.

Ceci produit trois types de dénominations pour ces bétons soient :

- 1- les bétons cellulaires,
- 2- les bétons caverneux (sans fines),
- 3- les bétons de granulats légers (argile expansé, ...)



Figure I-01: Représentation schématique des différents types de bétons légers [4]

a) Le béton cellulaire :

Le béton cellulaire est issu de longues recherches, entamées il y a plus de 150 ans. A cette époque, Zernike étudie des mortiers à base de chaux vive et de sable portés à haute température [8]. Les bétons cellulaires sont en général des mortiers remplis de petites bulles d'air. Ces mortiers sont des mélanges de sables (granulats à base de silice ou légers) et de ciment Portland. Les bulles sont créées à l'intérieur de la pâte grâce aux agents moussants qui sont utilisés dans le béton pour produire un volume d'air important. On cite parmi Ces agents, la poudre d'aluminium ou soit par gâchage avec de l'eau savonneuse. La poudre d'aluminium réagit chimiquement avec le ciment et l'eau lors du malaxage pour donner, d'une part, un sel et, d'autre part, de l'hydrogène qui compose ainsi les petites bulles. Ces processus demandent une grande précision et des calculs de dosage précis ; ils doivent être réalisés en atelier, et non pas sur le chantier.

Tableau I-03 : Les propriétés comparées des bétons cellulaires [5]

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

Les résistances et le module d'élasticité augmentent en fonction de l'augmentation de la masse volumique du béton (voir tableau 1). En conséquence, il est possible d'obtenir une masse volumique souhaitée pour une résistance spécifique. Il est à noter que la résistance en flexion peut être améliorée par l'ajout d'armature ou de microfibras, celles-ci reprennent les efforts de flexion, et aide à contrôler la microfissuration lors de l'application d'une charge [5].

Le béton léger « cellulaire » ou « aéré » s'avère être le béton le plus susceptible de remplir les objectifs du système de plancher projeté. Le béton cellulaire est un matériau malléable, léger, durable et relativement résistant. Ce sont toutes des propriétés que les auteurs Agustín et al. (1990) démontrent comme étant des propriétés à rechercher pour l'habitation à faible coût. Le béton cellulaire non traité à l'autoclave, nécessite peu d'outillage spécialisé et peut être assemblé sans trop de machinerie. [4]. Les bétons cellulaires ont généralement une masse volumique et une résistance à la compression extrêmement faibles. L'utilisation la plus courante des bétons cellulaires se limite au béton de remplissage dans des murs, plafonds, planchers ou comme matériaux de remblai [5]. L'utilisation la plus courante des bétons cellulaires se limite au béton de remplissage dans des murs, plafonds, planchers ou comme matériaux de remblai [5].

b) Le béton caverneux :

Les bétons caverneux sont obtenus en supprimant la totalité ou une partie du sable dans le béton (Connon, 1973). Un béton ne contenant pas de sable produit une agglomération de gros granulats dont les particules sont recouvertes par un film de pâte de ciment d'une épaisseur de 1 à 3 mm. Cette substitution crée à l'intérieur du béton de larges cavités (pores), responsables de la diminution de la masse volumique et de la baisse de résistance à la compression [5]. Ces bétons sont composés d'un mélange de granulats normaux ou légers, enrobés de pâte de ciment les collant entre eux. La pâte de ciment ne remplit pas la totalité des vides interstitiels, et de l'air reste contenu entre les granulats. Ces bétons ont donc une porosité élevée ; ils sont drainant [4]. Ils sont fabriqués avec un minimum d'eau pour éviter le lavage de la pâte de ciment sur les granulats.

Le béton caverneux est un des types de béton léger obtenu quand on ne met pas de granulats fins dans le mélange. Ce béton ne compte que du ciment, de l'eau et de gros granulats. Il existe donc de gros vides au sein de la masse qui sont responsables de sa faible résistance. Toutefois la minuscule dimension de ces vides empêche tout mouvement capillaire de l'eau. La masse volumique du béton caverneux dépend de sa granulométrie.

La résistance en compression du béton caverneux est généralement comprise entre 1.5 et 14 MPa. On note une augmentation de la résistance avec l'âge semblable à celle des bétons de densité normale. La résistance en flexion est habituellement égale à 30 % de la résistance en

compression, c'est-à-dire supérieure à celle du béton ordinaire (Malhotra, 1989). Le retrait du béton caverneux est considérablement plus faible que celui d'un béton de densité normale. Ce béton est très résistant au gel. Sa forte absorption d'eau le rend cependant inutilisable dans les fondations et dans les situations où il peut se saturer en eau [5].

Leur utilisation n'est généralement pas associée à la recherche de la légèreté du produit, mais bien davantage pour les particularités économiques occasionnées par la faible teneur en ciment. On les utilise principalement dans la confection de murs porteurs de bâtiments domestiques et dans les panneaux de remplissage de cadres de structure. Ainsi pour des ouvrages requérant des propriétés drainantes, tels les puits de captage des eaux de ruissellement, confection des éléments architecturaux [5].

c) Les bétons de granulats légers :

Les bétons de granulats légers sont fabriqués comme les bétons courants, mais avec des granulats légers. Il existe en effet de nombreuses variétés de bétons de granulats légers que l'on peut classer de différentes façons. Common propose une classification basée sur l'origine des granulats et on peut ainsi distinguer quatre grands groupes [3].

Le béton de granulats légers, BGL, n'est pas une nouvelle invention en technologie de béton. On l'a connu depuis des périodes antiques, ainsi il est possible de trouver un bon nombre de références en liaison avec l'utilisation de BGL. Il a été fait en utilisant les agrégats normaux d'origine volcanique tels que la ponce, le scoria, etc.

Le béton est traditionnellement connu comme une lourde et froide matière grise ayant de bonne résistance mécanique. Il peut acquiescer n'importe quelles formes, couleur, densité et résistance. La faible densité de la matière engendre une bonne isolation thermique et permet la réduction de poids des structures. Aussi, l'épaisseur des toitures et des murs extérieurs peut être réduite. Par conséquent, Si on garde la même épaisseur, un degré plus élevé d'isolation thermique sera réalisé. La densité, par exemple, peut s'étendre de 300 à 3000 kg/m³ : la conductivité thermique de 0.1 à 3 W/Km ; et la résistance de 1 à 100 MPa ou même plus. La densité est la plupart du temps commandé par le type d'agrégat utilisé. La force dépend également partiellement du type d'agrégats utilisés pour faire le béton. Une gamme de densité et de force de béton est indiquée dans fig. 1.2. Les agrégats légers sont l'ingrédient de base pour la fabrication de BGL [10].

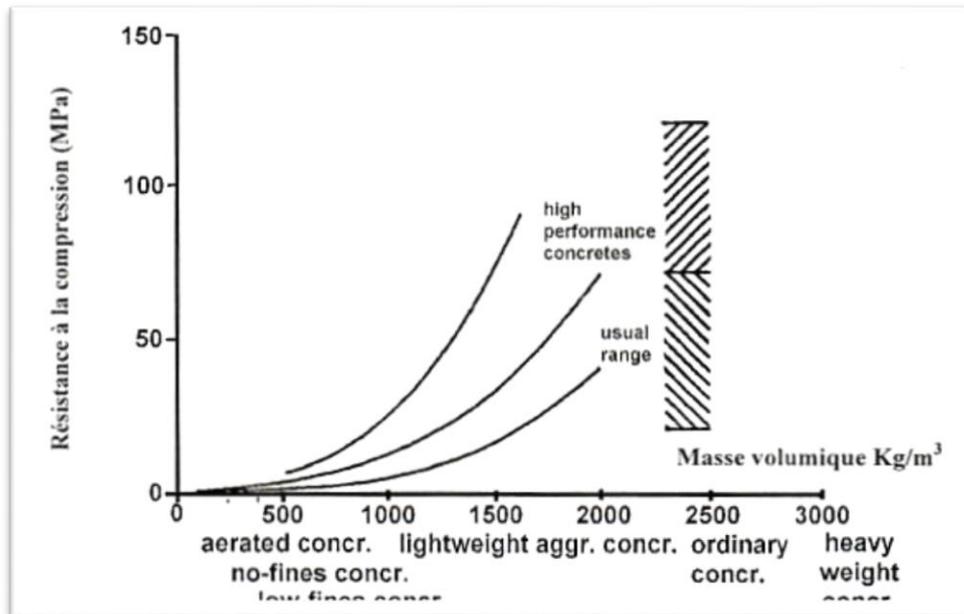


Figure I-02 : Variation de la résistance en fonction de masse volumique du béton [10].

L'augmentation du volume d'air, ou des vides, s'accompagne d'une diminution de la résistance du matériau. Le guide **ACI 213R-87** distingue alors trois catégories de béton léger, classées selon la masse volumique du matériau durci (**Tableau 1.1**) [4].

I-1-3- GRANULATS LEGERS :

La fabrication d'un béton léger repose essentiellement sur l'utilisation de granulats légers. Considérant l'importance de ceux-ci, il convient donc d'exposer les principales caractéristiques et les types de granulats utilisés dans la confection de bétons légers.

Les granulats légers se différencient des autres granulats par leur faible masse volumique. Celle-ci est inférieure à 1200 kg/m^3 , tandis que celle de la pierre naturelle est de 2700 kg/m^3 . L'écart de masse volumique s'explique par la porosité élevée du granulat ϕ_g , c'est-à-dire une importante proportion volumique de vides d'air contenus dans le granulat. Cet air sera appelé : air intra-particule.

$$\phi_g = \frac{V_{\text{capillaires}}}{V_{\text{granulat}}} \quad (\text{I.1})$$

Avec

$V_{\text{capillaires}}$: volume des vides contenus dans le granulat (m^3)

V_{granulat} : volume total occupé par le granulat (m^3) [11].

Les granulats légers sont caractérisés par une structure poreuse, il existe dans le monde d'origine naturelle ou artificielle et ayant subi ou non des transformations. Leur utilisation dans le béton a pour but de diminuer de façon plus ou moins importante, selon le granulat léger choisi, la masse volumique. Par contre, cette réduction de la masse volumique a pour conséquence de diminuer la résistance à la compression.

I-1-3-1- Composition chimique et minéralogique :

Selon leur nature, les granulats légers présentent des compositions chimiques et minéralogiques particulières.

a) Granulats en argile expansée et schiste expansé :

Malgré l'utilisation de matières premières différentes, les granulats d'argile et schiste expansés, ont une composition chimique similaire. Ils sont composés de plus de 85% de silice, d'alumine et d'oxyde de fer. La composition chimique courante de ces granulats est présentée dans le tableau I-4 [12].

Tableau I-04 : Composition chimique des granulats d'argile et schiste expansés [12]

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Alcalis	SO ₃	S
%	50 - 65 %	16 - 25 %	5 - 9 %	1 - 5 %	1,5 - 3,5 %	1,5 - 4,5 %	0 - 1,5 %	0 - 1,5 %

En ce qui concerne la minéralogie, les granulats d'argile et de schiste expansés sont principalement constitués de quartz, les autres silicates ayant un faible taux de cristallisation

b) Granulats en laitier expansé :

Le laitier utilisé comme base de granulats légers doit satisfaire aux spécifications de la norme NF P18-302. Ils sont composés à part égale d'environ 80% de silice et de chaux. Leur composition chimique est présentée dans le Tableau 1-5.

Tableau 1-05 : Composition chimique des granulats en laitier expansé [12].

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	MnO	S	SO ₃
%	38 - 48 %	29 - 38 %	13 - 24 %	<= 6 %	<= 4 %	<= 2 %	<= 2 %	<= 0,5 %

c) Pierre ponce et granulats de cendres volantes frittées :

Varquier donne les compositions chimiques de la pierre ponce et des granulats de cendres volantes, reportées ici dans le Tableau 1-06. La ponce est riche en silice, en alcalins et possède une teneur non négligeable en sulfonitrogène. La cendre volante possède plus d'alumine que les autres types des granulats légers. [12]

Tableau I-06 : Composition chimique de la pierre ponce et des granulats de cendres volantes frittées [12]

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O + Na ₂ O	SO ₃
Pierre ponce	69 %	18 %	1,0 %	2,0 %	3,0 %	5,0 %	1,8 %
Cendre volante	49,5 %	30,2 %	2,4 %	9,5 %	4,6 %	3,0 %	0,9 %

I.1.3.2 Granulat naturels :

Certaines roches, comme la pierre ponce, on a l'état naturel des densités faibles (inférieures à 2) ; en les concassent, on obtient donc des granulats légers. Il existe également d'autres matériaux naturels dans certains pays qui peuvent être utilisés comme granulats

légers pour des utilisations locales. La figure I-03 présente quelques exemples de granulats naturels [12].

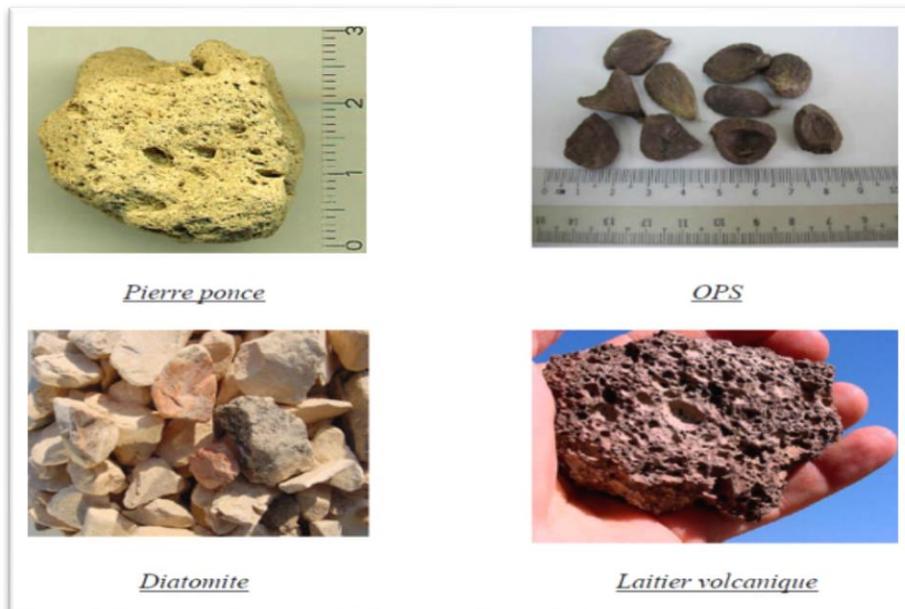


Figure I-03 : Différents granulats légers naturels [12].

I.1.3.3 Granulats artificiels :

Des granulats légers peuvent être également produits artificiellement, soit à partir de matières premières naturelles comme l'argile, le schiste, l'ardoise, ou des matières spéciales dans certaines régions, comme la vase à Taiwan et NYT (napolitain Yalow tuff) en Italie, soit à partir de sous-produits industriels comme les laitiers, les cendres volantes frittées ou encore l'EPS (polystyrène Expandé) figure I-04 [12].



Figure I-04 : Différents granulats légers artificiels [12].

a- Les bétons de granulats légers de matériaux artificiels ne subissant pas de traitement spécial :

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

b- Les bétons de granulats de matériaux artificiels subissant divers traitements spéciaux

On peut utiliser que pour fabriquer des granulats légers de très nombreux déchets industriels comme le laitier de haut fourneau : d'EL-HADJAR que l'on a expansé sur les lieux de production. Les cendres volantes que l'on peut fripper, on le verre que l'on peut également expansé [3].

Pour être complet, il faut en outre signaler que l'on classe également parmi les bétons légers des matériaux réalisés à partir de débris végétaux. Enfin, on réalise aussi des bétons de granulats légers en utilisant des liants organiques (résines synthétiques et mousses plastiques) à la place de liants hydrauliques.

I-1-4 - FORMULATION DU BETON LEGER :

L'étude de la formulation d'un béton consiste à définir la composition optimale des granulats et le dosage en ciment et en eau, de façon à atteindre les propriétés du béton recherchées (Dreux, 1990). Dans l'ensemble, le processus de formulation comprend les étapes suivantes :

- 1) définir la nature de l'ouvrage.
- 2) établir les propriétés du béton en fonction de la nature de l'ouvrage,
- 3) établir le dosage des constituants permettant ainsi d'atteindre les propriétés recherchées. Quoique ces étapes soient claires, aucune méthode de formulation ne permet d'obtenir directement par analyse et manipulation algébrique une formulation finale. La méthode choisie permet simplement d'établir une formulation de départ, pouvant convenir aux propriétés recherchées, et devra être optimisée par essai en laboratoire [5].

I.1.5.1 Nature de l'ouvrage :

La formulation du béton est tributaire de la nature de l'ouvrage. A ce titre, il convient de distinguer deux grandes familles de béton léger :

- a) le béton léger structural.
- b) le béton léger architectural. [5].

I.1.5.2 Le dosage :

Le dosage consiste essentiellement à déterminer la proportion des constituants de manière à produire le béton répondant aux qualités du béton recherché.

Cependant, ce dosage n'est pas aléatoire puisque l'obtention des qualités recherchées repose sur des principes (qualité de la pâte, type de granulat, rhéologie, etc.). Une fois ces principes établis, on peut identifier la méthode de dosage qui correspond le mieux aux matériaux utilisés et aux conditions d'application [5].

– Les principes de dosage :

Le principe de dosage d'un béton repose sur des concepts fondamentaux liés au comportement du béton à l'état frais et durci. L'étude sommaire de ces concepts va permettre, d'une part, de mieux comprendre les mécanismes du comportement interne du béton et d'autre part, aider à la compréhension des concepts menant à la formulation d'un béton léger durable.

On peut, a priori, admettre que le béton est constitué essentiellement de deux phases : la pâte de ciment hydraté et les granulats [5]. Les propriétés du béton varient essentiellement en fonction des matériaux utilisés et de leur dosage. Les principes de dosage font référence à quatre principaux facteurs :

- La qualité de la pâte de ciment hydraté.
- La qualité des granulats.
- La rhéologie recherchée.
- Les propriétés mécaniques.

– Les méthodes de dosage :

En général il n'existe pas de méthode de composition du béton léger qui soit universellement reconnue comme étant la meilleure. La composition du béton léger est toujours le résultat d'un compromis entre une série d'exigences généralement contradictoires.

De façon générale, toutes les méthodes de dosage conçu pour les bétons conventionnels s'appliquent au cas d'un béton léger moyennant quelques modifications, Les méthodes de dosage sont nombreuses. Dans la majorité des cas, elles proposent de fixer initialement un rapport E/L correspondant à la résistance à la compression recherchée. Par la suite, les autres paramètres sont établis à partir de concepts empiriques issus de l'expérience et diffusés sous forme d'abaques [5].

I-1-6- LES AVANTAGES DES BETONS LEGERS :

Le béton léger est utilisé pour plusieurs avantages, on peut les classés en trois catégories qui sont :

I-1-6-1 Avantages physiques et thermiques :

- Légèreté : plus léger qu'un béton classique, le béton léger a une densité de 0,4 à 1,2 en comparaison de 2,2 à 2,5 pour un béton classique.
- Isolant : Le béton léger a un pouvoir isolant thermique et phonique beaucoup plus important qu'un béton classique.
- Non inflammable : La chape en béton léger est classée MO au test de réaction au feu à partir d'un certain dosage en ciment.
- Imputrescible : Le béton léger est un matériau à pH basique, constitué de ciment, de sables lavés et de perles de polystyrène expansé stabilisé.

I-1-6-2 Avantages de Mises En Œuvre :

- Exécution simple et rapide : accessibilité sur chantier entre 24 et 48 h après coulage, selon l'épaisseur.
- Maniabilité : pompable sur de longues distances et de grandes hauteurs, il est facile à mettre en œuvre, notamment en forte épaisseur.
- Coffrages plus légers.
- Les pièces de béton léger sont aussi plus faciles à manipuler et à déplacer, en raison de leur relative légèreté (transport possible de pièces plus grandes).

I-1-6-3 Avantages Economiques :

- Une augmentation de la productivité sur le chantier en raison du faible poids du matériau [9].
- Le béton léger, par sa légèreté, réduit le poids mort des bâtiments, ce qui réduit considérablement la dimension, donc le poids, des fondations [9].
- Économie sur le ferrailage des éléments.
- Le plus faible volume de béton utilisé, il est aussi possible d'économiser sur les quantités de ciment par rapport au béton ordinaire.

I-1-9 DOMAINE D'UTILISATION DES BETONS LEGERS

Selon leur résistance, les bétons légers sont utilisés soit comme :

- **Béton de structure** : c'est le cas des bétons légers de haute performance, les bétons au laitier expansé, à l'argile frittée Expansée, aux cendres volantes...etc.
- **Isolant porteur** : c'est le cas des bétons à la pierre ponce, béton à l'argile expansé...etc.
- **Isolants** : leur résistance est faible, dans cette catégorie on peut citer : Les bétons cellulaires.

Dans la construction on les utilise comme :

- ✓ Bloc de maçonnerai
- ✓ Panneau préfabriqué.
- ✓ Mur antibruit.
- ✓ Bardage.
- ✓ Ouvrage extérieur.
- ✓ Élément de cave.
- ✓ Entre vous et hourdis.
- ✓ Les pavés.

On retrouve le béton léger dans diverses applications :

- **Fondation** : On peut retrouver du béton léger dans les fondations. En effet, ce dernier étant moins lourd que le béton classique, il peut être placé sur une structure demandant une résistance moins élevée à la charge. Ceci peut être un avantage car la structure est donc plus facile à mettre en place et par conséquent, des économies sont faites [13].
- **Rénovation** : Ce béton étant plus léger qu'un béton classique, cela permet donc de réaliser des rénovations sans avoir à renforcer au préalable la structure sur laquelle on souhaite l'appliquer [14].
- **Isolation** : Le béton léger a comme particularité d'être à la fois un bon isolant thermique et phonique. De ce fait, il est très utilisé lors de la conception de mur ou de dalle.
- **Chape** : Le béton léger peut aussi être utilisé afin de concevoir une chape sèche, qui est d'ailleurs considérée comme un bon isolant phonique et thermique [14]. Il s'utilise pour toutes les étapes de la construction, en intérieur comme en extérieur (murs, cloisons, plafonds,...), du gros œuvre extérieur aux divers aménagements et finitions intérieurs.

I-2 -LES ISOLANTS SYNTHETIQUES

I-2-1- DEFINITION:

Les isolants synthétiques sont généralement utilisés pour l'isolation extérieure. Cabeza et al ont étudiés les propriétés d'isolation des panneaux de polyuréthane, polystyrène, en vue de les utiliser comme isolant extérieur dans le bâtiment. Ils ont montré que ces matériaux présentent des caractéristiques thermiques intéressantes. Néanmoins, il existe plusieurs types des isolants synthétiques ; on peut citer le polystyrène, le polyuréthane, les mousses urée formol, les mousses phénoliques, les mousses de polychlorure de vinyle, les polyesters. Parmi les isolants synthétiques, il existe aussi une nouvelle génération d'isolants spécialement conçus pour offrir de hautes performances, comme le PIV (panneau d'isolants sous vide), l'aérogel, la brique monomur en terre cuite, les blocs monomur en argile expansée,...etc. [15]

I-2-2- CARACTERISTIQUES :

- ✓ Moins flexibles que les laines minérales. Attention donc en présence de surfaces irrégulières
- ✓ Meilleure valeur isolante : les panneaux ne doivent donc pas être aussi épais que dans le cas de la laine minérale
- ✓ Imperméables (ce n'est pas toujours le cas pour les laines minérales)
- ✓ Meilleure résistance à la compression que les laines minérales

I-2-3 LES TYPE :**1-2-3-1-Le polyuréthane**

Le polyuréthane est un polymère d'uréthane, c'est à dire une molécule organique. Sa masse molaire est de 446,61078 g/mol. L'uréthane est un composé organique porteur d'une fonction $R-NH-(C=O)O-R'$. Un polymère est une substance composée de macromolécules (très grande molécule, qui possède donc une masse moléculaire élevée). Le polyuréthane est utilisé dans différents domaines tels que la natation mais aussi les colles, peintures, mousses, fibres, etc... Le polyuréthane a des propriétés de flottaison et d'élasticité le rendant très utile dans les domaines nautiques et la natation particulièrement [16].

Le polyuréthane est l'un des isolants thermiques les plus performants, avec un coefficient de conductivité thermique de 0,022 à 0,030 W/m.K. C'est en panneaux qu'il atteint le meilleur de ses qualités. En revanche, il est plus médiocre sur le plan phonique [17]

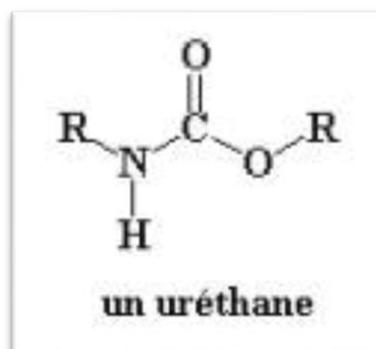


Figure-I-05 : Polymérisation d'uréthane

La molécule de polyuréthane est composée de plusieurs molécules d'uréthane dont la formule est affichée ci-dessus. Il est composé des différents atomes ci-dessus, la chaîne entre crochets est répétée n fois suivant le type de polyuréthane souhaité. De plus le polyuréthane

est hydrophobe ce qui signifie qu'il est insoluble dans l'eau (du grec hydro = eau, et phóbos = peur).

Un composé hydrophobe, ne peut pas créer des liaisons hydrogène avec les molécules d'eau. Il est apolaire, ou de faible polarité, ce qui signifie qu'il ne peut pas faire d'interactions électrostatiques avec l'eau. En effet, la solubilité d'un composé dans un solvant dépend de manière générale des interactions qu'il peut avoir avec le solvant. Un composé hydrophobe est donc un composé qui ne peut pas interagir physiquement avec l'eau. Il est plutôt soluble dans les solvants organiques, comme l'acétone, les hydrocarbures légers, avec lesquels il peut faire des interactions. Le polyuréthane est donc utilisé en natation pour ses propriétés à repousser l'eau plutôt qu'à l'absorber [16]



Figure-I-06 : Le polyuréthane

1-2-3-2- Polyisocyanurate:

Le polyisocyanurate, abrégé PIR, est essentiellement un isolant appartenant à la famille des mousses rigides de polyuréthane (PUR)². La différence principale entre les deux est la présence d'une quantité élevée des structures d'isocyanurate qui sont créées par la trimérisation des trois molécules de l'isocyanate polymétrique dans le PIR³ [18].

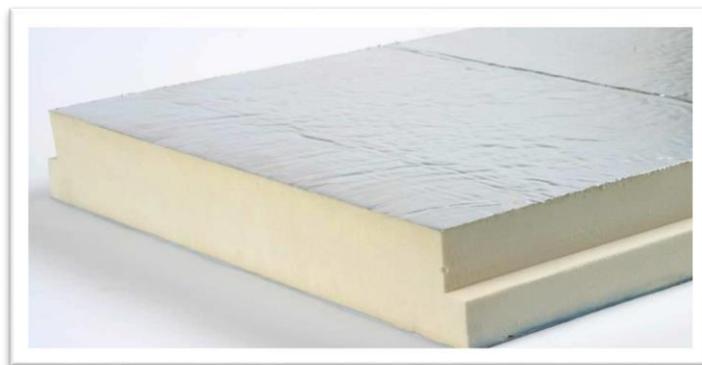


Figure I-07 : Le polyisocyanurate [18].

Le PIR est généralement produit sous forme de mousse et utilisé comme isolation thermique. Sa conductivité thermique typique vaut $0,023 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, dépendant du rapport périmètre : surface⁵. On le retrouve par exemple dans l'isolation des bâtiments et des cuves de méthanier. Pour ces deux applications, sa tenue au feu et sa rigidité sont recherchées [18].

1-2-3-3- La mousse résolique (ou phénolique)

Les mousses résoliques, également appelées mousses phénoliques, ne sont pas encore très répandues en tant qu'isolant, en dépit de performances thermiques élevées.



Figure I-08 : La mousse résolique [19].

Il s'agit d'une émulsion d'un phénoplaste (ou résine phénol-formaldéhyde) : la bakélite. De par ses excellentes propriétés physiques, la bakélite est utilisée –entre autres– dans les armes à feu, les appareils électriques (en tant qu'isolant), les billes de billard ou encore certains stylos haut de gamme (Mont Blanc, pour ne pas les citer) [19].

Performance thermique : Compris entre 0.018 et $0.025 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Format : plaques rigides

I.2.3.4. Le polystyrène :

La découverte du polystyrène remonte à 1839, mais son exploitation à grande échelle en Allemagne et aux États-Unis date des années 30 (première fabrication industrielle : 1933)⁷⁴ Le polystyrène expansé a été inventé en 1944 par Ray Mc Intire (1919-1996) alors

qu'il travaillait pour Dow Chemical sur les caoutchoucs flexibles. Cette découverte fût le fruit du hasard : l'idée de départ était de copolymériser du styrène et de l'isobutène sous pression. Le styrène fut le seul à se polymériser et l'isobutène se vaporisa, s'immiscant dans la matrice du polymère. Commercialisé sous le nom de Syrofoam, ce matériau rigide de faible densité a été d'abord utilisé comme isolant thermique pour le bâtiment. Le polystyrène est obtenu par polymérisation du styrène. C'est dans un autoclave, machine à la panse concave que la réaction aboutit au polystyrène.

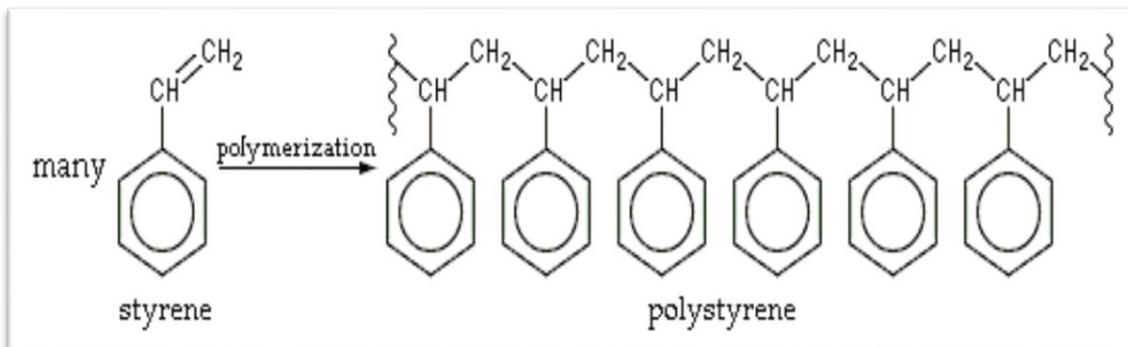


Figure I-09 : Polymérisation du styrène [20]

Il existe deux types de PSE : les polystyrènes expansés moulés (PSE-M) et les polystyrènes expansés extrudés (PSE-E). ³/₄ Le PSE-M est obtenu à partir d'un polystyrène "expansible" qui n'est rien d'autre qu'un polystyrène cristal auquel on a ajouté, en cours de polymérisation, un agent d'expansion (pentane, Tébullition = 35°C). Une pré-expansion est opérée à la vapeur d'eau puis une période de stabilisation permet aux perles de PS pré-expansées de perdre leur excédent d'eau. Enfin, dans un moule, on les expansé et on les moule à la vapeur. ³/₄ Le PSE-E est quant à lui obtenu lors de l'extrusion (mise en forme à la chaleur) par injection sous pression d'un gaz dans le polymère cristal fondu. De par ses caractéristiques que lui confèrent ses 98% d'air, le PSE s'est imposé dans la formulation des bétons légers comme granulats extra léger (la masse volumique). Les billes de polystyrène offrent une masse volumique apparente comprise entre 10 et 50 kg/m³ [20]

a- Composition chimique

Le polystyrène est un polymère thermoplastique linéaire à squelette aliphatique obtenu par polymérisation du motif homopolymère de styrène. Structurellement, c'est un produit de base servant à la fabrication du polystyrène expansé est obtenu sous forme de petites perles blanches, chimiquement très stable, et doué de propriétés thermoplastiques [16]. Suivant les applications, on distingue trois types différents par leur granulométrie et leurs

propriétés :

- Ceux destinés aux fabrications courantes, les perles sphériques reformant un « porogène » (ou agent gonflant) : le pentane.
- Ceux destinés à la fabrication de produit « difficilement inflammable » ou auto extinguibles, cette propriété n'étant acquise qu'après un certain temps de stockage en raison de la teneur en pentane.
- Ceux destinés à la fabrication de produits expansés résistant aux essences et huiles minérales exemptes d'hydrocarbures aromatiques. La structure du polystyrène expansé (PES) comporte des soudures interperles, la taille des ellules se situe habituellement entre 60 et 200 μm (figure I-07) [16]

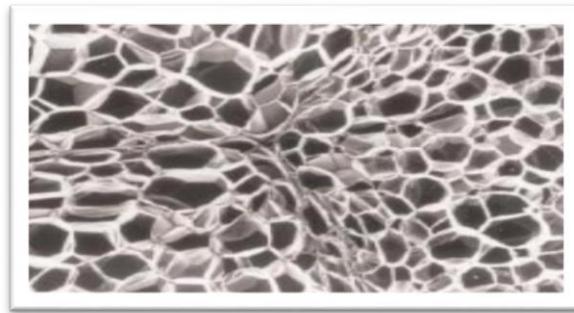


Figure I-10 : Structure alvéolaire du polystyrène [20]

Tableau I-07 : Propriété physique de polystyrène

La formule brute	C₈H₈ isomères.
La masse molaire	104,1491 ± 0,007 g/mol
T° transition vitreuse	95 °C²
Paramètre de solubilité δ	18,72 MPa^{1/2} (35 °C)³
Masse volumique	1,06 g/cm³

b- Fabrication du polystyrène expansé :

La transformation du polystyrène en élément isolant (polystyrène expansé) comprend les étapes suivantes :

✓ *Pré- expansion*

Le produit de base subit une phase de pré- expansion. Celle- ci s'effectue dans un prémousseur muni d'une arrivée de vapeur, d'une arrivée d'air et d'un système d'introduction des perles brutes. L'opération est faite en continu à une vitesse de 250 Kg/ heure et à une température de 97 °C. Le produit obtenu a une densité comprise entre 17 et 18 Kg/ m³.

✓ *Stockage intermédiaire*

Les perles ainsi pré- expansées sont ensuite stockées dans des silos pour y subir un « mûrissement » permettant la mise en équilibre des pressions entre les cellules dans lesquelles le porogène a en grande partie disparu sous l'action de la température et le milieu extérieur.

✓ *Seconde expansion*

Elle est faite selon la même méthode que précédemment mais dans des appareils de volume plus important. C'est au cours de cette opération que les perles sont façonnées suivant le produit que l'on désire obtenir.

c- Propriétés du polystyrène

Les propriétés remarquables du polystyrène sont notamment :

Sa faible masse volumique située généralement, suivant les applications, entre 10 et 30 kg/m³

- Son pouvoir isolant thermique.

- Ses excellentes propriétés mécaniques (résistance en compression, capacité d'amortissement des chocs).

- Son insensibilité de mise en forme (moulage, découpage, ...).

d- Billes de polystyrène

Les billes de polystyrène sont obtenues par expansion de billes pleines. L'expansion est arrêtée lorsque la granulométrie souhaitée est atteinte. Elles sont parfaitement sphériques, La coupe d'une bille révèle une structure alvéolaire et une enveloppe constituée de deux membranes. Ceci explique d'une part son extrême légèreté et d'autre part sa totale imperméabilité à l'eau. En effet, des essais réalisés par Yamura et Yamauchi ont montré que des billes de polystyrène immergées dans l'eau pendant un mois n'ont pas absorbé d'eau. Enfin, ces billes sont hydrophobes et présentent des charges électrostatiques en surface [20].

➤ Domaine d'utilisation :

- **Résistance aux chocs :**

- ✓ Articles de décoration ou matériel de bureau en PS cristal injecté : double-décimètres, équerres et rapporteurs d'écolier.
- ✓ Logistique - Calages en PSE : transport de produits fragiles (électroménager, lave-linge, ordinateur, sèche-linge, réfrigérateur, four, etc.)
- ✓ Maquettisme (maquette) : pièces moulées de PSE à peindre, carte plastique en PS choc. Le côté cassant de ce type de polystyrène est souvent très atténué pour permettre un maximum de manipulation.
- ✓ Maison de disques - PS cristal : boîtiers de CD.
- **Isolation thermique :**
 - ✓ Bâtiment/constructions - Panneaux et blocs en PSE : cloisons isolantes - plancher (isolation sous dalle, isolation sous chape, entrevous) - toitures - coffrages (ils permettent d'ériger des murs en béton armé isolés en une seule opération).
 - ✓ Froid - Parois en PSE : camions frigorifiques, glacières chambres frigorifiques.
- **Résistance à la compression :**
 - ✓ Emballage en PSE : barquettes alimentaires de produits frais, caisses marées et cales.
 - ✓ Travaux publics et génie civil - Blocs en PSE : remblayage de routes et autoroutes - Talus - Murs anti-bruit - Culées de ponts - Protection de conduits enterrés - Pontons.
- **Imperméabilité / Nettoyabilité :**
 - ✓ Alimentaire - Emballage (pots de yaourt, crème fraîche, etc.) et vaisselle à usage unique (gobelets, couverts) en PS choc blanc thermoformé - Vaisselle à usage unique en PS cristal injecté (gobelets, verrines, etc.).
 - ✓ Hématologie - Matériel en PS cristal (plaque de laboratoire, flacon)
- **Densité - Très faible absorption d'eau :**
 - ✓ Ouvrages flottants sur blocs en PSE : pontons - jardins - maisons (Pays-Bas)
 - ✓ Nautisme - Flotteurs en PSE (balises, ligne d'eau), planches de funboard.
 - ✓ Logistique - Réduire le poids des emballages (feuille allégée en XPS)
 - ✓ De 16 à 1 060 kg·m⁻³, écart dû à l'addition de divers matériaux comme le béton armé
- **Propriété électrostatique :**
 - ✓ Médecine - traitement des hyperkaliémies par résine échangeuse de cations en polystyrène de sodium ou Kayexalate.
- **Utilisations militaires :**
 - ✓ Le polystyrène est un des composants du napalm moderne (« napalm-B »), où il sert de gélifiant.

- ✓ Il entre également dans la constitution de la bombe à hydrogène : il maintient en suspension les éléments de la bombe avant son utilisation, et se transforme en plasma au moment de la mise à feu.

➤ **Béton de polystyrène :**

Bien qu'ils soient technologiquement très prometteurs, les bétons de polystyrène posent encore de nombreux problèmes au niveau de la compréhension de leurs propriétés mécaniques.

➤ **Résistance à la compression :**

Chafi a travaillé sur le béton de fibre de polystyrène expansé de densité comprise entre 1.1 et 2.2. Ses résultats ont montré que la résistance à la compression de ce type de béton diminue sensiblement lorsqu'on augmente le taux de fibre. A titre d'exemple, un béton de densité 0.1 résiste à environ 1/10 du béton de densité 0.2

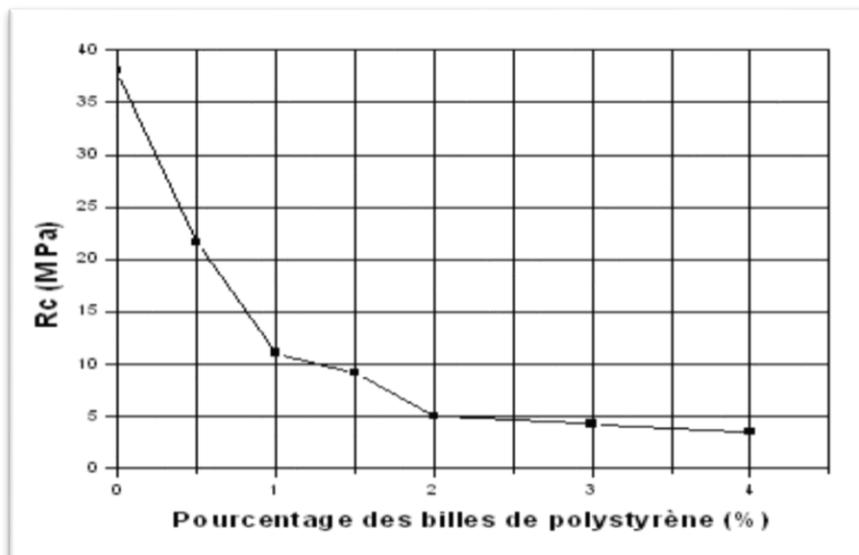


Figure I-11 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage des billes de polystyrène [20].

➤ **Résistance à la flexion :**

Par ailleurs, un comportement aux sollicitations de compression et de flexion très différent est observé. En effet, lorsqu'un béton de densité 1.3 ne possède qu'une résistance à la compression de 1/10 de celle d'un béton de densité 2.2, il a une résistance à la flexion de 4/10 (figure I-12) c'est-à-dire quatre fois plus. On constate que l'ajout du polystyrène au béton a une influence sur la résistance à la flexion moindre que sur la résistance à la compression.

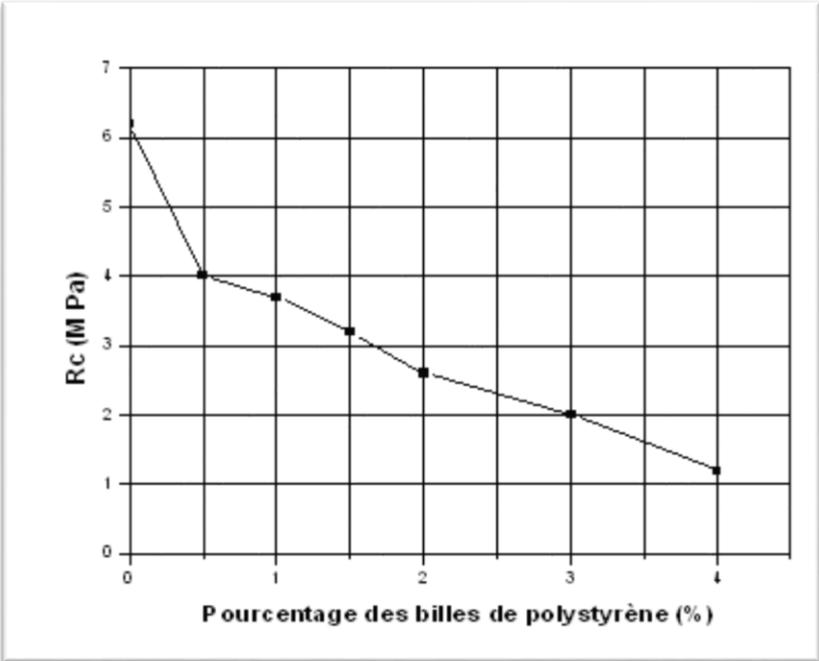


Figure I-12 : Evolution de la résistance en flexion en fonction du pourcentage des billes de polystyrène [20].

I-3-CONCLUSION :

Dans ce premier chapitre de la partie bibliographique, nous avons traité plusieurs points qu'on peut résumer comme suit:

- Il existe dans le monde trois types des bétons légers (le béton cellulaire, le béton caverneux et le béton de granulats légers), qui sont utilisés comme : béton léger structural et béton léger architectural (remplissage).
- On distingue plusieurs types de granulats légers: naturels (végétal, pierre légère, ..), artificielles (polystyrène, laitier,...).
- Les caractéristiques des granulats et de la matrice jouent un rôle important sur le comportement (physique, mécanique et durabilité) du béton léger.
- On remarque que le béton léger est très utile dans différents domaine surtout dans les régions où le climat est sévère (haute et basse températures) et son application est très large.
- Le polystyrène fait partie des isolants synthétiques avec d'autres isolants comme : Le polyuréthane, le polyisocyanurate... .etc.



CHAPITRE II :
CARACTERISTIQUES ET DURABILITE
DES BETONS LEGERS



INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord, quelques généralités sur les caractéristiques : physiques, mécaniques, thermiques, ainsi que la durabilité des bétons légers. Ceci nous conduira à poser la problématique de notre étude pour définir et justifier les axes de cette recherche.

II-1-CARACTERISTIQUES DES BETONS LEGERS :

II-1-1- CARACTERISTIQUES PHYSIQUES :

II-1-1-1- Légèreté

L'emploi des bétons Légers a pour première conséquence une diminution (minimale) de 20 à 30 % de la masse volumique des bétons. La masse volumique d'un béton hydraulique est de l'ordre de 2300kg/m³ alors qu'elle se situe autour de 1600 kg/m³ pour un béton d'argile expansée, entre 600 et 900kg/m³ pour un béton de bois et elle varie entre 350 et 650 kg/m³ pour un béton cellulaire.

L'intérêt est d'avoir un matériau facile à mettre en œuvre lorsqu'il est vendu manufacturé sous forme de parpaings. De plus, ce matériau allégé nécessite des fondations moins importantes lors de la construction [11]

II-1-1-2-Porosités :

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

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

La matrice de liant contient également des vides d'air qui apparaissent au moment de la prise des hydrates et du séchage du matériau. On parle d'air infra-liant qui permet de définir la porosité intrinsèque du liant Φ_l . La taille caractéristique des pores présents entre les hydrates de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou de C-S-H. varie entre 0.01 μm et 5 μm et la taille des pores générés

par un entraîneur d'air varie entre 5 μm et 1000 μm . L'air intra-liant sera également considéré comme de l'air microscopique.

$$\Phi_l = \frac{v_{vide}}{v_{liant}} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

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

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

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

$$\Phi_{meso} = \frac{V_{vide}}{V_t} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

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

V_t : volume total occupé par le matériau (m^3) La porosité d'après [11] est de l'ordre de 9% d'un béton hydraulique, de 36% d'un béton d'argile expansé, de 75 à 82% d'un béton cellulaire et de 52% d'un béton de bois.

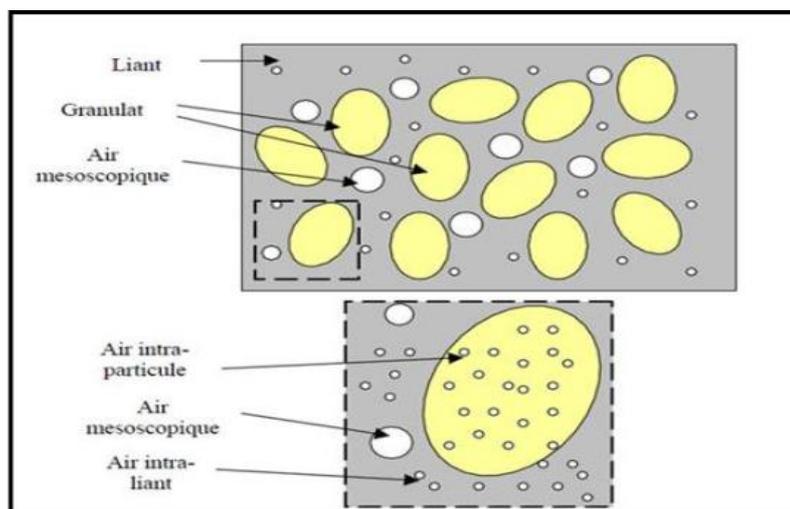


Figure II-01 : Porosité du béton [11].

Selon la taille moyenne des pores et selon l'état physique de l'eau contenue dans le milieu poreux, la Porosité peut être classée comme le montre le tableau II-01 [21]

Tableau II-01 : Différentes classes de la porosité [21].

Rayon des pores	Classe	Etat de l'eau
< 0.0001mm	Microporosité	Eau de rétention exclusivement
0.0001 à 2.5 mm	Porosité capillaire	Eau capillaire et eau gravitaire
>2.5mm	Macroporosité	eau gravitaire dominante

II-1-1-3-L'absorption :

L'absorption est un phénomène physique par lequel un liquide migre de l'extérieur vers l'intérieur d'un milieu poreux grâce à un phénomène de remontées capillaires. L'absorption entraîne un gain de masse du matériau. L'absorption n'est possible que si les capillaires du réseau poreux communiquent pour permettre le transfert de l'eau : on parle alors de porosité ouverte ou connectée (les vides sont inter communicants). Lorsque le matériau contient des pores emprisonnés comme dans le cas du béton cellulaire, on parle de pores occlus (porosité close ou porosité vacuolaire dénommée aussi porosité résiduelle). Ces pores ne participent pas au phénomène d'absorption (Figure II-02).



Figure II-02 : Les trois types de porosité présente dans les matériaux [11].

II-1-1-4-La masse volumique :

La masse volumique est sans contredit l'un des aspects techniques les plus importants de la présente recherche puisque les travaux sont axés sur la légèreté des éléments de béton pouvant être manipulés manuellement. Par exemple, on peut penser à un élément décoratif

extérieur comme une boîte à fleurs de forme cubique de 400 mm avec des parois de 20 mm d'épaisseur.

Le volume de béton d'un tel élément est de 0.016 m³. Dans le cas où le béton utilisé pour la confection de ces éléments aurait une masse volumique de 1000 **kg/m³**, la masse de l'élément serait de 16 kg. Considérant qu'il s'agit d'un élément en béton avec les propriétés qu'on lui connaît, cette masse est, à toutes fins pratiques, raisonnable.

Dans le cas d'un béton conventionnel, la masse de l'élément serait plutôt de 38 kg. La valeur de 1000 **kg/m³** représente donc une valeur appropriée quant à la masse volumique recherchée du béton. La légèreté représente un aspect économique important puisque tout le potentiel de mise en marché de ces éléments en béton repose sur le fait qu'ils puissent être facilement manipulés manuellement. Il est donc essentiel de minimiser autant que possible la masse volumique du béton pour qu'il puisse servir à un nombre maximal d'application.

$$\rho_{bs} = \rho_o - E_{v0} \quad (\text{II.03})$$

Où ρ_o 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 une relation suivante [9] :

$$E_{v0} = E + E_a - 0.25C \quad (\text{II.04})$$

E : quantité d'eau de gâchage

E_a : quantité d'eau absorbée par les granulats légers

C : quantité de ciment

II-1-1-5-La rhéologie à l'état frais

L'ouvrabilité, qui est une propriété importante du béton à l'état frais définit la relation contrainte déformation du matériau, La détermination d'ouvrabilité du béton est exigé pour réaliser le béton de bonne qualité. Les caractéristiques fondamentales pour définir l'ouvrabilité incluent la viscosité, la cohésion, la mobilité, la stabilité, le compactibilité. Une étude étendue a été réalisée à l'université de technologie de Sydney sur la production et les

propriétés du béton de polystyrène. Il a été constaté que l'ouvrabilité du béton de polystyrène expansé pourrait être classée en fonction de l'indice de compactage [22].

L'ouvrabilité (ou maniabilité) se traduit par la capacité du béton de bien remplir tous l'espace du coffrage et d'assurer un bon enrobage des armatures. L'ouvrabilité d'un béton est couramment appréciée par le test du cône d'Abrams, ou le béton est mis dans un moule conique, l'affaissement du béton une fois le moule enlevé donne une appréciation sur sa maniabilité. La mise en place du béton dans le moule se fait en 4 couches d'épaisseurs égales, piquer à l'aide d'une tige à raison de 25 coups pour chaque couche. Le cône est ensuite enlevé doucement sans secousses.

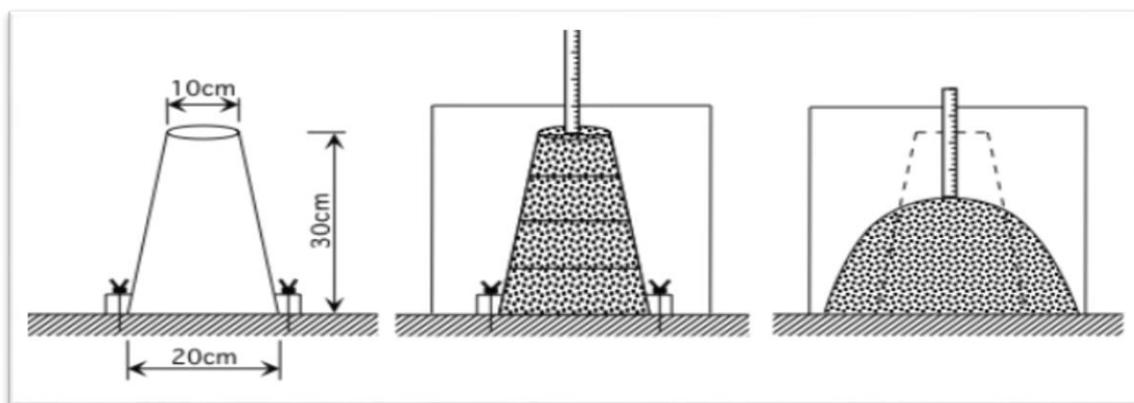


Figure II-03 : test du cône d'Abrams

En fonction de l'affaissement mesuré, la maniabilité du béton est appréciée et une manière de sa mise en œuvre est recommandée.

Tableau II-02 : vibration recommandée en fonction de l'ouvrabilité du béton

Affaissement	Béton	Mise en œuvre
0 – 2 cm	Très ferme	Vibration puissante
3 – 5 cm	Ferme	Bonne vibration
6 – 9 cm	Plastique	Vibration courante
10 – 13 cm	Mou	Piquage
> 13 cm	Très mou	Leger piquage

II-1-2-CARACTERISTIQUES MECANIKES :

La variété des bétons légers donne lieu à un éventail de densités et de résistances très ouvert. Les masses volumiques s'échelonnent de 250 kg/m³ pour les bétons de polystyrène à faible dosage en ciment, jusqu'à 1800 kg/m³ pour certains bétons d'argile expansée.

Corrélativement, on constate une évolution des résistances à la compression de 1 jusqu'à 30, voire 40 MPa.

La résistance à la traction, 9 à 10 fois plus faible que celle à la compression pour un béton classique, peut atteindre un pourcentage plus élevé pour les bétons légers : de l'ordre de 20 % de R_c et même 35 à 40 % pour les bétons de bois, dont les granulats jouent le rôle de fibres qui « arment » le béton.

Le module d'élasticité, qui caractérise la loi de comportement déformation-charge du matériau, est plus faible que celui des bétons plus lourds, ce qui conduit à des flèches plus fortes des pièces fléchies. Cette déformabilité supérieure a pour contrepartie une résistance améliorée aux chocs et aux vibrations.

II-1-2-1- Résistance en compression

Avec des granulats légers et une formulation de béton appropriée, il est possible d'obtenir des résistances à la compression comparables à celles obtenues avec du béton traditionnel. L'évolution des connaissances et des technologies du béton ont permis au fil des ans d'améliorer les propriétés des bétons, dont celles des bétons légers. Par exemple, l'utilisation d'ajouts minéraux (fumée de silice, cendres volantes, laitiers) et d'adjuvants (agents entraîneurs d'air, AEA, super plastifiants, SP, agents réducteurs d'eau, WR et accélérateurs de prise) ont donné la possibilité notamment de diminuer le rapport E/L tout en conservant une bonne maniabilité. Des résistances en compression de 100 MPa ont même été obtenues et sont présentées (voir figure II-03) [22].

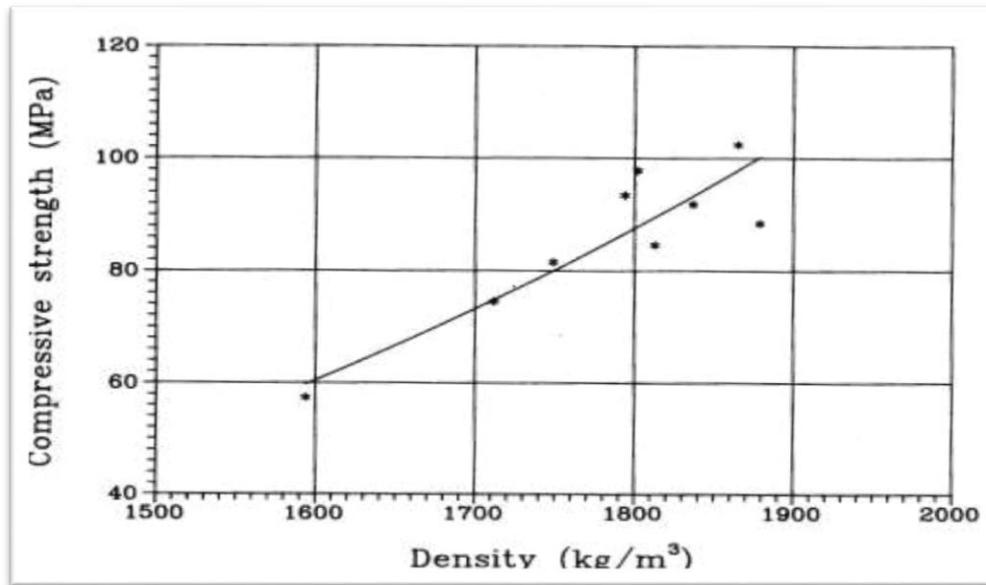


Figure II-04 : Relation entre la résistance en compression à 28j et la densité du béton frais d'un mélange avec des granulats légers [22].

II-1-2-2-Résistance à la traction

De même que pour les bétons ordinaires, les bétons légers présentent une résistance à la traction assez faible. Ceci est d'autant plus vrai pour les bétons légers, puisque la propagation des fissures peut s'effectuer au travers des granulats. Des résistances à la traction par fendage de 3,3 à 4,2 Mpa pour des bétons d'une masse volumique de 1940 kg/m³, ou de 3,5 à 5,6 Mpa pour des bétons, dont la masse volumique variait de 1620 à 1885 kg/m³, ont par exemple été rapportées [22].

II-1-3-PROPRIETES THERMIQUES :

Le pouvoir isolant des matériaux est caractérisé par leur conductivité thermique λ . Cette dernière est définie comme le flux de chaleur par mètre carré, traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température d'un degré entre ses deux faces. Plus le matériau est isolant et plus faible est sa conductivité thermique. On considère que généralement la conductivité thermique augmente avec la densité du matériau [23].

Cette propagation d'énergie se produit dans un solide par agitation des molécules constitutives du matériau. La conductivité thermique λ est donc une grandeur intrinsèque du matériau, qui dépend uniquement de ses constituants et de sa microstructure.

Un béton usuel à base de granulats rigides, contient de l'air, dû à l'arrangement de la phase solide (squelette granulaire) et à la prise de liant. Or, l'air immobile conduit faiblement la chaleur. Les bétons à base de granulats Légers ont donc été développés, car ils permettent d'augmenter la proportion volumique d'air dans le matériau (i.e porosité), en ajoutant l'air intra-particule (i.e porosité). A titre comparatif, un béton hydraulique ($\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$) a une conductivité thermique de $2,0 \text{ W/(m.K)}$ tandis qu'un béton d'argile expansé ($\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$) a une conductivité thermique de $0,60 \text{ W/(m.K)}$ [11].

Cependant, cette relation entre porosité et faible conductivité thermique doit être nuancée en tenant compte d'un autre mode de transfert de la chaleur, la convection. Cette dernière traduit les transferts de chaleur entre un solide immobile et un fluide en mouvement.

Lorsque le matériau contient un important réseau de pores connectés, l'air peut s'y déplacer et les transferts de chaleur par convection peuvent devenir significatifs. En revanche, un matériau contenant un grand nombre de pores occlus comme le béton cellulaire ($\Phi \approx 80\%$) ne présente pas de convection. Plus de la moitié de l'air est immobile dans les pores occlus et la conductivité thermique est faible (Figure II-04).

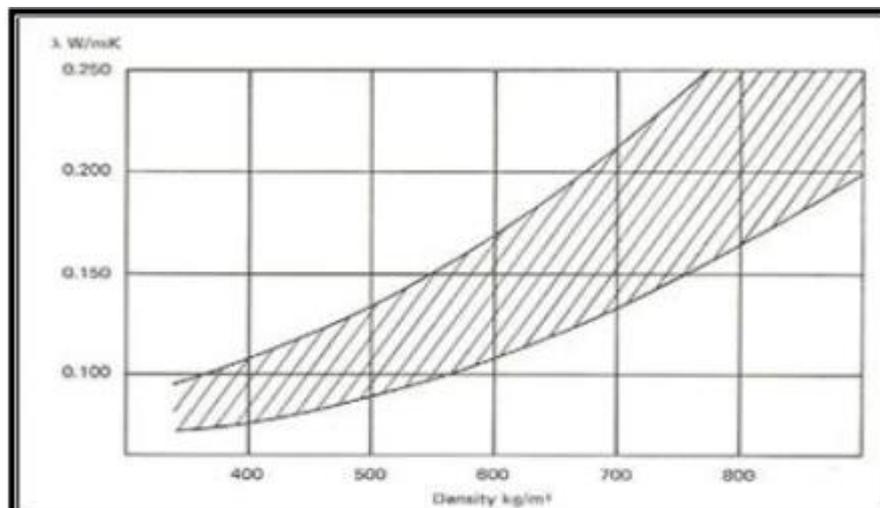


Figure II-05 : Conductivité thermique λ en fonction de la Masse volumique sèche du béton cellulaire [8]

II-1-4- AUTRES PROPRIETES DU BETON LEGER

II-1-4-1-La résistance au gel

Elle est très bonne, malgré la teneur en eau absorbée, car de nombreux pores non saturés subsistent, qui permettent l'expansion de la glace. Il faut noter en outre une bonne aptitude au bétonnage par temps froid, car la faible conductivité thermique permet au béton de conserver la chaleur de prise du ciment.

II-1-4-2-La résistance au feu

Elle se mesure par la durée de tenue d'un élément, à une température déterminée, est meilleure que celle du béton traditionnel, en raison des valeurs peu élevées de la conductivité thermique et du coefficient de dilatation. Ainsi, par exemple la durée de résistance d'une dalle de 12 cm d'épaisseur est d'environ 2 h avec un béton normal, et 4 h avec un béton léger ; de même, les pertes de résistances mesurées à 650° sont respectivement de l'ordre de 40 à 50 % dans le premier cas, et de 15% seulement dans le second.

II-1-4-3-Aspect acoustique

L'isolation acoustique obtenue par des parois homogènes en béton léger, est avant tout, une question de poids et d'imperméabilité à l'air ; elle est due à l'existence de nombreuses cellules fermées dans les agrégats. Certaines parois en bétons pleins de granulats légers, complétées par des enduits étanches, peuvent avoir des performances acoustiques supérieures à celle prévues par la « loi de masse ». Cette amélioration se manifeste pour des épaisseurs supérieures à 15 cm [24.].

II-2-DURABILITE :

II-2-1-DEFINITION DE LA DURABILITE

La durabilité d'un béton est de pouvoir conserver sa résistance et de continuer de remplir sa fonction tout au long de sa durée de vie utile pas à une durée indéfinie, il en résulte que le béton doit résister aux mécanismes de dégradation aux quels il peut être exposé, tels que les cycles de gel-dégel et certaines formes d'attaques chimiques.

La mauvaise durabilité se manifeste par une détérioration qui peut résulter de facteurs externes ou de phénomènes internes du béton. Les actions peuvent être mécaniques, physiques ou chimiques. Ces dernières sont causées par les réactions alcali-silice et alcali-carbonate, les attaques chimiques externes sont causées par la présence d'ions agressifs tels que les chlorures, les sulfates et les gaz carboniques ainsi que de nombreux gaz et liquides

d'origines naturelles ou industrielles. Il convient de noter avant toutes choses que la détérioration du béton est rarement attribuable à une seule cause : le béton peut souvent se comporter de façon satisfaisante en dépit de certaines déficiences, mais lorsqu'un facteur défavorable s'ajoute, les désordres apparaîtront. [25]

II-2-2- LES INDICATEURS DE LA DURABILITE :

II-2-1- Dégradations par les cycles gel-dégel :

II-2-1-1- Action des cycles gel/dégel

Il est généralement admis que l'accroissement de volume accompagnant la transformation de l'eau en glace (de l'ordre de 9%) n'est pas la cause principale de la dégradation du béton, ainsi que l'ont montré les recherches menées notamment par Powers et Litvan, .

Dans la zone atteinte par le gel, des cristaux de glace se forment dans les plus gros capillaires, créant un déséquilibre thermodynamique qui va déclencher une migration de l'eau des capillaires les plus fins vers les capillaires dans lesquels l'eau est gelée (l'eau dans les capillaires les plus fins restants à l'état liquide). C'est l'accroissement des pressions hydrauliques dans les capillaires, engendré par ces mouvements de l'eau interne non gelée vers les « fronts de congélation », ainsi que les pressions osmotiques créées par les différences de concentrations en sels dissous entre l'eau située à proximité de l'eau gelée et celle non gelée présente dans les capillaires fins, qui sont considérés aujourd'hui comme la cause principale des dégradations. Ces pressions (hydrauliques et osmotiques) peuvent localement fissurer la pâte de ciment si elles sont supérieures à la résistance à la traction de la pâte. Ce sont les modifications répétées et alternées de température (température positive à température négative) qui après un certain nombre de cycles peuvent dégrader le béton. Les dégradations sont le résultat d'un endommagement progressif. Elles dépendent de la vitesse de descente en température, du nombre de cycles et de la durée du gel, [26].

Le gel dans l'eau en circulation à l'intérieur de la structure ou dans des fissures déjà existantes à la suite d'une chute de la température va être accompagné par une augmentation du volume de l'eau. La pression qui en résulte conduit à la dégradation du béton. La dégradation du béton dû au gel-dégel se rencontre principalement dans les régions froides. Elles se produisent notamment sur les parties non protégés par un revêtement étanche, et son amplifiées par les utilisations de sel anti verglas. Les symptômes les plus courants sont

l'écaillage présent à la surface de la structure (Figure II-05), et le gonflement de tout ou une partie de la structure accompagné le plus souvent d'une fissuration en réseau. A l'état ultime,



Figure II-06 : Exemple de dommages causé par le gel-dégel [27].

II-2-1-2- Les détériorations liées aux cycles gel-dégel

Il existe deux types principaux de détérioration liée aux cycles gel-dégel : la fissuration interne et l'écaillage des surfaces. Ces effets n'ont pas les mêmes origines et ne sont pas nécessairement concomitants.

a) - La fissuration interne : se manifeste par l'apparition de microfissures en surface et à l'intérieur de la masse de béton soumise au gel. La fissuration interne du béton diminue la performance du matériau en réduisant ses caractéristiques mécaniques, en particulier ses résistances à la compression et à la traction, ainsi que son imperméabilité. Dans un béton mal protégé contre le gel, l'intensité de la fissuration interne dépend surtout du nombre de cycles de gel dégel et de la sévérité des cycles (écarts entre les températures minimales et maximales, taux de gel, degré de saturation...).

b) - L'écaillage : peut également advenir sur les structures fortement exposées aux cycles de gel dégel. Il s'agit d'un mode de dégradation qui touche la surface du béton (les premiers millimètres) en contact avec le milieu externe. Cette action se manifeste par le décollement progressif de petites particules de pâte sous la forme de squames. L'écaillage de surface se produit principalement lorsque le béton est en contact avec des sels fondants, ou

dits de déverglage, couramment utilisés en hiver pour permettre une bonne praticabilité des routes [27].

II-2-2-Dégradations par l'attaque chimique :

Les principaux processus chimiques à la base des dégradations du béton, pour la majorité des attaques chimiques, sont généralement regroupés en trois catégories :

A- L'hydrolyse ou la lixiviation (dissolution) des hydrates.

B- Les échanges ioniques entre les hydrates et le milieu agressif.

C- La formation de produits expansifs à l'intérieur du béton.

II-2-2-1-Les attaques sulfatiques :

a- Définition de l'attaque sulfatique :

La résistance du béton aux attaques des sulfates est l'un des facteurs les plus importants pour sa durabilité. Le problème est aussi ancien que le béton et on a commencé à l'étudier il y a déjà près de 100 ans.

L'attaque sulfatique est accompagnée d'une précipitation de produits sulfatés dits «secondaires» dont la formation est postérieure à l'hydratation du ciment, d'une expansion importante et de détériorations chimico-mécaniques (modification des propriétés de transport et de la porosité, fissures, pertes de résistance et de cohésion). Ceci conduit à la ruine du matériau cimentaire, à plus ou moins long terme en fonction de l'attaque (nature, teneur et concentration des sulfates au contact) et du ciment utilisé. [28]



Figure II-07 : Des cas pathologiques d'éléments en béton en contact de sulfate. [29]

b- Sources des sulfates : On distingue deux types d'attaques : les attaques par les sulfates externes présents dans l'environnement du béton et les attaques sulfatiques internes pour lesquelles les sulfates proviennent des composants du béton lui-même. [28]

-Lorsqu'il s'agit d'une attaque par les sulfates provenant de l'extérieur, il y a formation de couches de gypse et d'ettringite secondaire ainsi que la thaumasite à partir de la surface exposée aux sulfates. L'attaque par les sulfates externes est souvent combinée avec l'attaque par le cation correspondant, selon la provenance des sulfates, qui peuvent réagir avec certains granulats ou fillers, ou avec les C-S-H ou la portlandite, et contribuer davantage à la dégradation du béton. De plus, l'attaque par les sulfates externes peut être combinée à une attaque par l'acide ce qui accélère également la destruction de la pâte hydratée.

-Lorsqu'il s'agit d'une attaque interne par les sulfates, ces derniers proviennent presque uniquement des sulfates de calcium qui se trouvent dans le béton dès sa confection. Par conséquent, ces sulfates sont uniformément répartis dans la pâte hydratée et le seul produit expansif de la réaction est l'ettringite. L'ettringite secondaire qui est le résultat d'une attaque par les sulfates externes, n'est pas seule à endommager le béton, c'est plutôt la formation du gypse qui contribue à la fissuration, la lixiviation et le délaminage des couches superficielles. [30]

Comme le montre La figure II-07, l'origine des sulfates peut être : externe (environnement) ou interne (composants du béton)

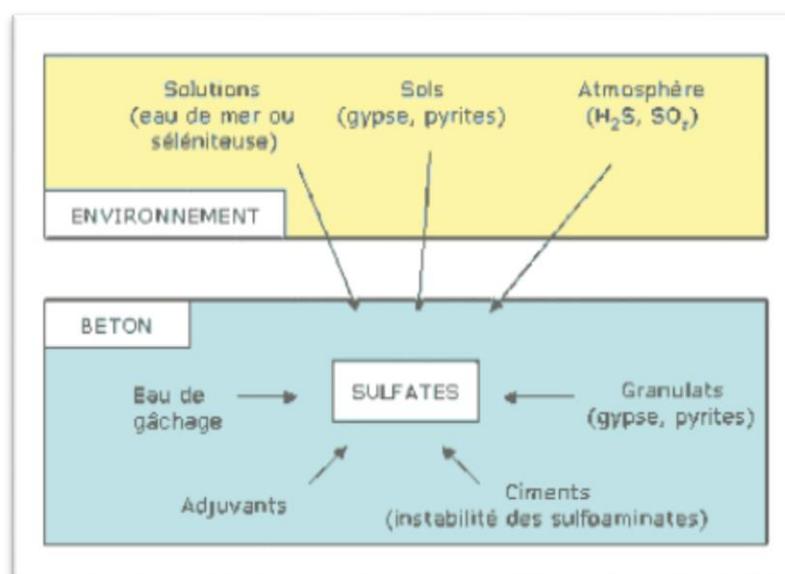


Figure II-08- L'origine des sulfates (interne ou externe). [30]

c- Mécanismes d'attaques :

Le schéma suivant résume les différentes étapes de l'attaque sulfurique

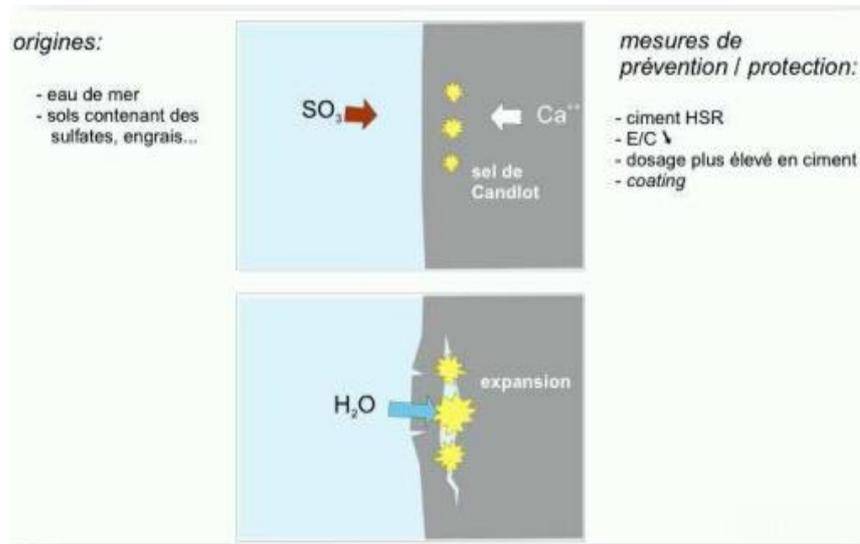


Figure II-09: L'attaque par les sulfates. [31]

Les sulfates peuvent détériorer le béton selon deux mécanismes physico-chimiques :

-Expansion ;

- Perte des propriétés liantes des C-S-H.

Les aluminates et la portlandite sont les deux produits les plus sensibles à l'attaque par les sulfates

➤ **Processus d'attaque par les sulfates internes :**

La dégradation des bétons par les sulfates est due principalement à des phénomènes d'expansion en relation avec la cristallisation d'ettringite, dite ettringite secondaire. La formation de cette ettringite expansive est à distinguer de l'ettringite primaire, obtenue au premier stade de l'hydratation des ciments portland par réaction du gypse, car cette ettringite primaire n'est jamais expansive. Schématiquement, la formation de l'ettringite est résumée ci-après :

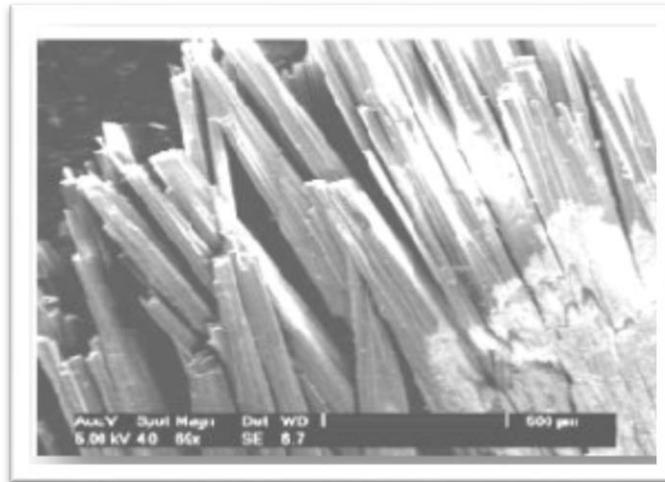


Figure II-10-: La formation de l'ettringite secondaire. [30]

- ✚ Formation de gypse dit secondaire par opposition au gypse primaire ajouté au ciment comme régulateur de prise, la formation du gypse secondaire résulte d'une réaction de substitution entre la portlandite et le sulfate de sodium.
- ✚ Réaction entre le gypse secondaire et les aluminates de calcium du ciment forment l'ettringite, plusieurs scénarios sont envisageables :

· Soit à partir de reliquats de C₃A anhydre :



Aluminate Tricalcique gypse secondaire

l'ettringite

· Soit à partir de l'aluminate tetracalcique hydraté C₃AH₁₃ ou du monosulfoaluminate de calcium C₃ASO₄H₁₂.

➤ **Processus d'attaque par les sulfates externes :**

Au travers du développement qui suit, ce type de dégradation sera abordée autant par son aspect phénoménologique que par les conséquences et les moyens de s'en prémunir en agissant sur des paramètres de formulation.

Les études en laboratoire ont conduit à mieux définir les différentes étapes du processus qui entraîne la dégradation du béton :

- Mise en contact de la surface du béton avec la solution agressive.

- Pénétration des anions SO_4 , par diffusion limitée à une zone superficielle.
- □ Pénétration du cation associé et réaction de substitution : cation (Mg^{+2} , Na^{+2} , $\text{NH}_4 \dots$), Ca^{+2} et formation de gypse en solution ou cristallisé, suivant les concentrations en SO_4 et en $\text{Ca}(\text{OH})_2$.
- Réaction ponctuelle des ions sulfates avec les aluminates anhydres (C_3A) ou hydraté (C_4AH_x et $\text{C}_3\text{ACASO}_4\text{H}_{12}$).
- Fissuration par effet de coin due aux pressions de cristallisation de l'ettringite.
- Accentuation de la pénétration des sulfates à la faveur des fissures.
- Progression de l'attaque suivant un front de dégradation, dont l'épaisseur a tendance à s'élargir au cours du temps.
- Destruction plus au moins complète du béton. [30]

f- Mécanismes De Base

- Les mécanismes de destruction sont fonction de la concentration et de la source des ions sulfates (le cation qui leur est associé) dans la solution d'eau externe ou dans la pâte de ciment. Les dégradations dues aux milieux selvatiques se font selon deux mécanismes simultanés et interactifs :

Expansion : L'action des sulfates peut prendre la forme d'une expansion du béton suite à la formation de produits expansifs, Lorsque le béton se fissure, la perméabilité augmente et l'eau agressive peut pénétrer plus facilement, ce qui accélère le rythme de destruction. Ces expansions peuvent causer des dommages structuraux considérables, En formant l'ettringite secondaire (l'ettringite primaire n'est pas expansive). [25]

1.1) Formation de gypse secondaire (substitution ionique entre la portlandite et les sulfates)

➤ Exemples de l'attaque par les sulfates :

Le cas de sulfate de sodium (Na_2SO_4) :



Portlandite sulfate de sodium gypse secondaire

NaOH : Alcalinité élevée stabilisation des C-S-H.

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$: Produit expansif mais qui se forme uniquement dans les espaces internes de la pâte de ciment hydraté, Dans la majorité des cas, pas ou peu d'expansion.

II-2-2-2-Les attaques d'acides :

Les acides peuvent être divisés en acides organiques et acides inorganiques : l'acide chlorhydrique, l'acide nitrique et l'acide sulfurique par exemple sont des acides inorganiques L'acide formique, l'acide acétique et l'acide oléique sont des acides organiques. Les acides inorganiques sont plus nuisibles pour le béton que les acides organiques. Les milieux acides les plus fréquents sont :

- les eaux naturelles dans les tourbières et les marécages, ou le pH peut s'abaisser jusqu'à 4.
- les milieux industriels : dans les industries chimiques ainsi que les industries agroalimentaires
- les réseaux d'égouts

a- Milieux acides

L'acidité de l'eau est, en générale, mesurée par son PH. L'ion hydrogène contenu dans l'eau de gâchage n'est pas à proprement parler nocif pour le béton, car il peut être très largement neutralisé par le ciment qui contient une réserve importante de produit basique. Les eaux acides peuvent être nocive à cause de l'anion qui lié à l'ion H^+ , en générale Cl^- ou SO_4^{2-} , mais parfois tout autre (acide humique, acide lactique)

b- Acides minéraux

Les acides chlorhydriques et nitriques réagissent avec la chaux de ciment et donnent des sels très solubles, sont très agressifs vis-à-vis des ciments portland.

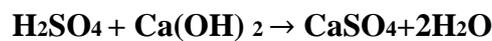
L'acide sulfurique H_2SO_4 est doublement agressif par son acidité et par l'anion SO_4^{2-} qui peut conduire à la formation de sels expansifs tel que le gypse et l'ettringite. [32]

➤ Attaque due au H_2SO_4

Le H_2SO_4 qui se trouve dans les milieux industriels sous forme gazeuse et liquide présente un effet néfaste sur le béton, acier et même la santé des ouvriers. Sachant que le béton est de PH basic cette propriété joue un rôle très important dans la

durabilité du béton, mais la présence des produits chimiques tel que H_2SO_4 à proximité des constructions pose un problème réel.

L'attaque de l'acide sulfurique sur le béton armé se traduit par une perte de masse (détérioration), et la résistance à la compression diminue d'une manière tragique tout ça est le résultat des réactions chimiques entre l'acide et les constituants du ciment à savoir d'une part la formation du gypse secondaire suite à la lixiviation (dissolution) de la portlandite ($Ca(OH)_2$) et silicates de calcium hydratés C-S-H selon la notation cimentière $C=CaO$, $S=SiO_2$, $H=H_2O$ et le carbonate de calcium ($CaCO_3$) des ajouts selon



L'acide phosphorique H_3PO_4 , qui entraîne la précipitation de phosphates de calcium très peu solubles, est modérément agressif.

c- Acides organiques

Les acides organiques tels que l'acide acétique, lactique, butyrique, formique, contenus dans certains eaux usées, attaquent les constituants calciques du ciment. Ces acides faibles, peu dissociés, sont généralement modérément agressifs et provoquent des dégradations lentes.

➤ Paramètres conditionnant la résistance des bétons aux environnements acides

- ✚ Protection supplémentaire par la mise en œuvre de la résine, bitume et autre revêtement
- ✚ - Bien identifier les risques : nature de(s) sel(s), concentrations, mode d'action (mobilité, renouvellement, température.....)
- ✚ Utiliser des ciments à faible teneur en chaux, en particulier des ciments avec ajout

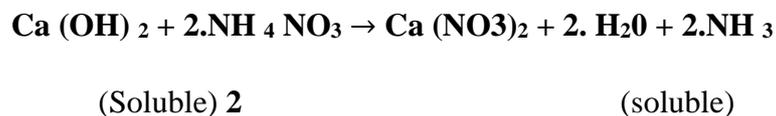
Minéraux consommateurs de chaux comme le laitier, cendres volantes, silico alumineuse, pouzzolane réactives, fumée de silice ;

- ✚ La mise en œuvre de béton de haute compacité, susceptible de ralentir de manière importante le transport des acides au sein du béton

d- Nitrate d'ammonium

Le nitrate d'ammonium est très soluble dans l'eau et réagit dans un premier temps avec la pâte de ciment par des réactions d'échange d'ions avec la formation d'un sel de calcium soluble [Ca (NO₃)] et un dégagement gazeux d'ammoniac (NH₃) et dans un second temps avec celle d'un nitro aluminate de calcium

La décalcification progressive de la pâte de ciment durcie se traduit par la combinaison de la chaux avec la partie acide NO₃ qui conduit à la formation d'un nitrate de calcium soluble. La formation d'ammoniac tend à réduire légèrement le pH et empêche la solution d'atteindre son état d'équilibre. En effet ce dégagement de NH₃ est compensé par une mise en solution de la chaux pour maintenir la constante d'équilibre de la réaction chimique (déplacement de la réaction dans le sens 1)



Le nitrate d'ammonium détériore la pâte de ciment sans provoquer, dans un premier temps et sous certaines conditions, de phénomènes expansifs. En effet le matériau s'affaiblit par solubilisation progressive de la chaux, sans qu'aucun signe extérieur de dégradation n'apparaisse, à condition qu'il soit immergé dans la solution et que les phénomènes de lixiviation puissent être entretenus [33].

II-3-CONCLUSION

Dans ce deuxième chapitre de la partie bibliographique, nous avons traité plusieurs points qu'on peut résumer comme suit :

- ✓ L'emploi de bétons légers réduit d'au moins 20 à 30 % la masse volumique par rapport au béton ordinaire.
- ✓ Il y a trois types de porosité à l'intérieur du béton léger qui sont classés selon le rayon des pores : microporosité, porosité capillaire et macroporosité.
- ✓ La capacité d'absorption du béton léger est liée à la porosité des granulats légers qui peut être soit : connectée, piégée ou occluse.
- ✓ Le béton léger a une résistance faible à la compression et la traction par rapport au béton ordinaire.

Le béton doit résister aux mécanismes de dégradation aux quels il peut être exposé, tels que les cycles de gel-dégel et certaines formes d'attaques chimiques.



CHAPITRE III : MATERIAUX ETUDIES ET METHODES EXPERIMENTALES



INTRODUCTION :

Diverses propriétés ; physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques, permettant de faire un choix répondant à leur destination. Par ailleurs, il est essentiel que ces matériaux soient malaxés correctement afin de produire un mélange homogène à grande échelle et possédant par conséquent des propriétés uniformes. Ainsi, pour évaluer ces propriétés, on doit choisir des moyens adéquats afin de parvenir à un meilleur contrôle.

Utilise durant ce projet de recherche, les procédures des malaxages pour confectionner nos mélanges, ainsi que les différents essais expérimentaux pour les caractériser à l'état frais et durci. Ajoutons que notre travail expérimental a été effectué suivant les normes Européennes en vigueur, sauf les essais utilisés pour caractériser nos mélanges frais ainsi que la mesure du module élastique, qui ne sont pas encore normalisés.

III-1-MATERIAUX UTILISES :**III-1-1 : LIANT « CIMENT PORTLAND COMPOSE CEM II/A-L 42.5»**

Le ciment portland composé est produit en broyant le clinker qui se compose essentiellement de silicate de calcium avec le gypse comme ajout constitué de différentes formes de sulfate de calcium. Tous les bétons ont été fabriqués avec un ciment provenant de la cimenterie de Ain Touta (wilaya de Batna) à savoir le **CEM II/A-L 42.5**

III-1-1-1 : Composition chimique :

L'analyse chimique du ciment a été effectuée au niveau du laboratoire de la cimenterie de Ain-Touta (Batna) selon la norme (NF EN 196-2) .

Les résultats sont donnés dans le tableau III-1:

Tableau III-01: composition chimique du ciment utilisé [FICHE TECHNIQUE].

Elément	Teneur %
SiO₂	20.65
Al₂O₃	4.92
Fe₂ O₃	2.97
CaO	59.4
MgO	1.01
K₂O	0.80
Na₂O	0.19
SO₃	2.75
Cl⁻	0.02
Perte au feu	6.02
Ca O Libre	0.78
Résidus insolubles	0.6
Composition potentiel de Clinker C3A	8.7

III-1-1-2 : Propriétés physiques :

Tableau III-02: Caractéristiques du ciment [FICHE TECHNIQUE].

Nomination		CEM II/A-L 42.5
Caractéristiques		
Masse Volumique Apparente (g/cm ³)		1.05
Masse volumique Absolue (g/cm ³)		3.03
Surface spécifique (BLAINE) (cm ² /g)		3495
Temps de prise	Début	02h27
	Fin	03h27

III-1-1-3 : Caractéristiques Physico-mécaniques :

Tableau III-03: Propriétés du ciment du fiche techniques.

Désignations		Unités	Garanties	Mesures
Poids Spécifiques		g/cm ³	-	3.03
Surface Spécifiques Blaine		Cm ² /g	-	3495
Consistance Normale		%H ₂ O	-	26.04
Temps De Prise	Début	h : min	≥ 1h : 00	2h27
	Fin	h : min	-	3h27
Expansion à Chaud		mm	≤ 10	0.65
Refus sur tamis 45 μm		%	-	10.20
Chaleur d'hydratation	120 heures	j/g	≤270 j/g	LH
Résistance à la flexion	02 jours	MPa	-	5.00
	07 jours	MPa	-	6.77
	28 jours	MPa	-	7.80
Résistance à la compression	02 jours	MPa	≥20.00	23.70
	07 jours	MPa	-	37.03
	28 jours	MPa	≥42.50	47.14

III-1-1-4 : Masse volumique :

Les masses volumiques apparentes et absolues du sable utilisé ont été mesurées d'après la norme [NF P 18-554 et 555].

Le principe de la mesure consiste à mesurer le déplacement de niveau d'un liquide inerte vis à vis du ciment contenu dans un récipient lorsqu'on y introduit une masse donnée du ciment.

En utilisant dans cette mesure pour déterminer la masse volumique absolue, par la méthode du flacon (utilisée s'appelle un pycnomètre). A été réalisé conformément à la norme NF EN 1097-7, (* Norme s'appliquant aux fillers, à défaut d'une norme ciment.).

Tableau III-04: Propriétés du ciment.

Masse Volumique Apparente (g/cm ³)	Masse Volumique Absolue (g/cm ³)
1.05	3.08

III-1-2-SABLE (lavé) :

Le sable lavé utilisé dans tous les mélanges du béton léger provient de la région de Lioua (wilaya de Biskra). Il s'agit d'un sable fin siliceux de granulométrie $\Phi < 5\text{mm}$



Photo III-01: sable 0/5 de Lioua

III-1-2-1-Essai de l'équivalent de sable(lavé) ES (NF P18 – 598) [Normes AFNOR] :

C'est un essai qui estime la propreté du sable lavé, L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sable des éléments sableux plus grossiers, dans cet essai on a deux valeur « ESP »la valeur obtenu par le piston et « ESV » la valeur obtenu visuellement. Les valeurs qu'on a obtenues montrent que le sable utilisé est propre. L'équivalent du sable est calculé suivant la formule ci-dessous :

$$E_{SV} = \frac{h'_2}{h_1} \times 100 ; E_{SP} = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad (\text{III-1})$$

Avec :

h_1 : Hauteur du sable propre + éléments fins.

h_2 : Hauteur du sable propre par le piston.

h'_2 :Hauteur du sable propre par l'œil.

ESv : Valeur d'équivalent visuel.

ESp : Valeur d'équivalent par le piston.



Photo III-2 : d'équivalent de sable

- Les résultats de l'essai sur le sable étudié figurent au (tableau III-5)

Tableau III-05: Les résultats d'équivalent de sable

Type de sable	ESV%	ESP%
Sable 0/5 « lioua »	77	75

L'équivalent de sable $70\% \leq ES \leq 80\%$ car le sable propre à faible pourcentage de fines argileux convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.

III-1-2-2-Masse volumique :

Les masses volumiques apparentes et absolues du sable utilisé ont été mesurées d'après la norme [NF P 18-554 et 555].

Tableau III-06: la masse volumique de sable 0/5 de Lioua.

MASSE VOLUMIQUE g/cm ³	
Absolue	apparente
<i>2.61</i>	<i>1.64</i>

III-1-2-3-Analyse granulométrique : (EN 12620)

L'analyse granulométrique permet de mesurer la distribution dimensionnelle en poids des différents éléments constituant le sable. La masse de l'échantillon pour l'essai est prise selon la formule suivante : $M \geq 0,2 D$ (M dépend des dimensions des éléments les plus grossiers).



Photo III-03 : l'analyse granulométrique de sable 0/5 de lioua

C'est un essai qui consiste à déterminer les différentes dimensions de la fraction des granulats, pour le sable on a obtenu un module de finesse égal à 2.4, alors le sable est considéré comme moyen.

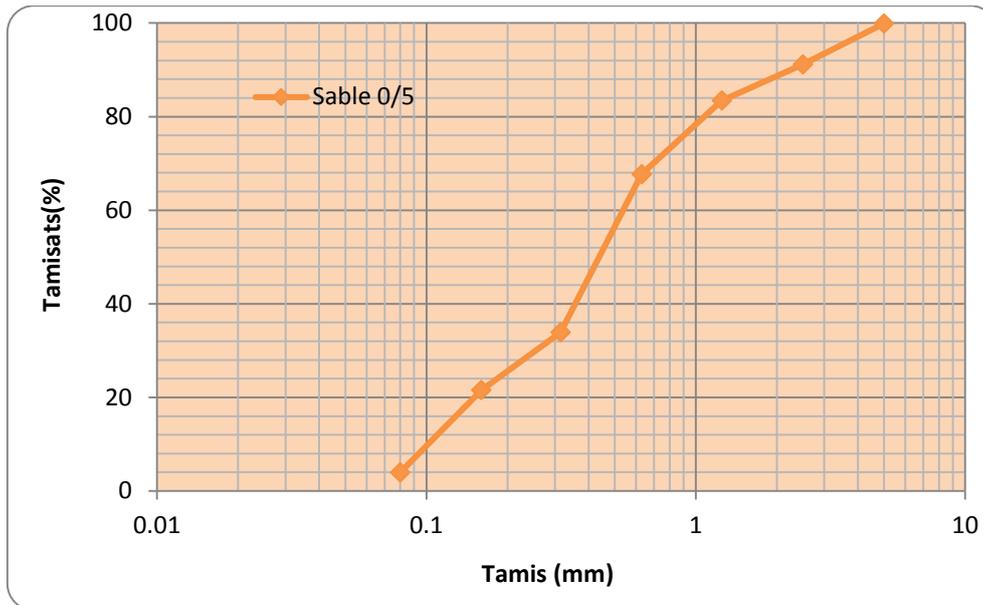


Figure III-01: Courbe granulométrique du sable 0/5

III-1-2-4- Absorption d'eau:

On détermine un coefficient d'absorption qui est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après immersion pendant 24 heures à 22° C à la masse sèche de l'échantillon conformément à la norme [NF P 18-555].

- Absorption d'eau du sable utilisé =12% : le sable utilisé est absorbant.

III-1-3-GRANULATS :

III-1-3-1- Granulat naturel :

Le Gravier naturel (GN) 7/15) utilisé dans tous les mélanges du béton léger provient de la carrière d'Ain Touta (wilaya de Batna)



Photo III-04 : granulat naturel (gravier) 7/15 Ain Touta.

III-1-3-1-1-Masse volumique :

Les masses volumiques apparentes et absolues des Graviers utilisés ont été mesurées d'après la norme [NF P 18-554 et 555].

Tableau III-07 : La masse volumique du gravier 7/15

Masse volumique	Valeur en g/cm ³
Absolue	2.67
Apparente	1.30

**Photo III-05 : La masse volumique apparente absolue de gravier.****Photo III-06 : La masse volumique de gravier.****III-1-3-1-2-Absorption d'eau des granulats :**

On détermine un coefficient d'absorption qui est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après immersion pendant 24 heures à 22° C à la masse sèche de l'échantillon conformément à la norme [NF P 18-555].

- Absorption d'eau du gravier utilisé = 0.4 % : le gravier utilisé est très peu absorbant.

III-1-3-1-3-Analyse granulométrique :

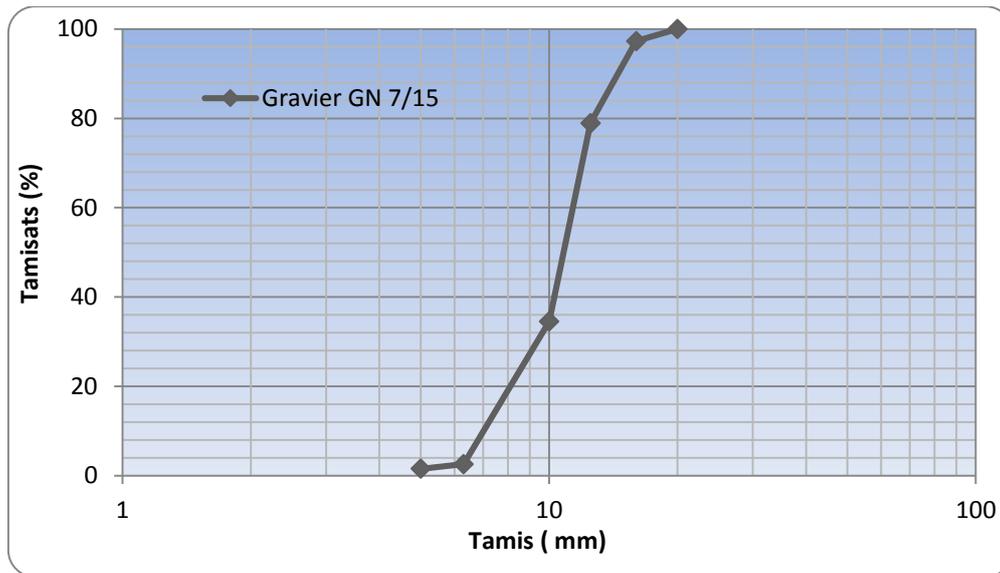


Figure III-02-Courbe granulométrique du granulat naturel(GN) 7/15)

III-1-3-1-4-Essais de Los Angeles (NF EN 1097-2):

La dureté des granulats utilisés a été contrôlée par l'essai de Los-Angeles conformément à la norme (NF P 18-573) [Normes AFNOR], qui exige la valeur limite de 40% à ne pas dépasser.

Le coefficient L.A est calculé en utilisant la formule :

$$LA = ((m1 - m2) / m1) \times 100 \% \quad (\text{III-2})$$

Avec :

m1 : la masse de la quantité de gravier avant l'essai [g].

m2 : la masse du refus à 1.6mm [g].

$$LA = (5000 - 3768) / 50 = 25 \%$$

20% ≤ LA ≤ 30% → gravier assez dur.



Photo III-07 : Essais de Los Angeles

III-1-3-2-Granulats légers :

III-1-3-2-1-Polystyrène :



Photo- III-08 : Granulats de polystyrène

- ❖ **Composition et origine:** La matière première servant à la formation de Polystyrène est constitué de granules de polystyrène non expansé renfermant un pyrogène.
- ❖ **Méthode de fabrication:** Le pyrogène, sous l'action de la chaleur, passe à l'état gazeux, ce qui provoque l'expansion. Une fois expansées les perles peuvent avoir atteint plusieurs fois leur diamètre initial, de 0,4 à 2mm (Cormon, 1973). Le polystyrène présente une masse volumique parmi les plus faibles (10 à 40 kg/m³) en considération aux autres matériaux étudiés (ACI, 1986).
- ❖ **Propriétés du béton:** Les bétons confectionnés à partir de polystyrène ont une masse volumique aussi faible que 550 à 800 kg/m³ selon que l'on emploie une portion de sable ou non. Ces bétons offrent de piètres performances mécaniques : une résistance à la compression de l'ordre de 2,0 à 4,0 MPa en fonction du pourcentage de sable utilisé. Il a été montré que la masse volumique de ces

perles n'ont aucun apport quant aux caractéristiques mécaniques de ces bétons [5]. Les autres propriétés du béton contenant des billes de polystyrène sont présentées dans le (tableau III-8)

Tableau-III-08 : Propriétés du béton léger confectionné à partir de polystyrène [35]

	ρ kg/m ³	f_c (Mpa)	Traction (Mpa)	E (GPa)	Retrait (mm/m)	Dilatation (mm/m)	λ (kcal/mh°C)
polystyrène	300	1	0.3	2	0.1	10 x 10 ⁻⁶	0.05
	à 1000	à 10	à 1.5		à 2.0		à 0.25

III-1-3-2-2-Masse volumique :

Les masses volumiques apparentes et absolues des granulats de liège utilisés ont été mesurés d’après la norme [NF P 18-554 et 555]



Photo III-09 : Mesure de masse volumique apparente et absolue du polystyrène

Tableau III-09 : La masse volumique de polystyrène

Masse volumique	Valeur en g/cm ³
Absolue	0.012
Apparente	0.006

III-1-3-2-3- Absorption d'eau:

On détermine un coefficient d'absorption qui est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après immersion pendant 24 heures à 22° C à la masse sèche de l'échantillon. Les résultats de cet essai sur les granulats étudiés sont portés au (tableau III-10).

Tableau III-10 : Résultats d'absorption d'eau pour les granulats étudiés.

Granulats	G P
Absorption (%)	68.75

L'absorption d'eau pour les granulats substitués en fonction du temps :

D'après les essais d'absorption effectués on remarque que les granulats de substitution utilisés ont une grande absorption d'eau, pour cela on a voulu vérifier la vitesse d'absorption en mesurant l'absorption en fonction du temps. Les résultats sont présentés au (tableau III-11)

Tableau III-11 :L'absorption d'eau en fonction du temps

granulats temps	L'absorption d'eau %
	GP
15 s	16.6
30 s	20
1 min	24
5 min	26.6
10 min	38.54
15 min	42.97
30 min	44.50
1 h	50
2 h	64.52
6 h	68.75
24 h	68.75
48 h	68.75

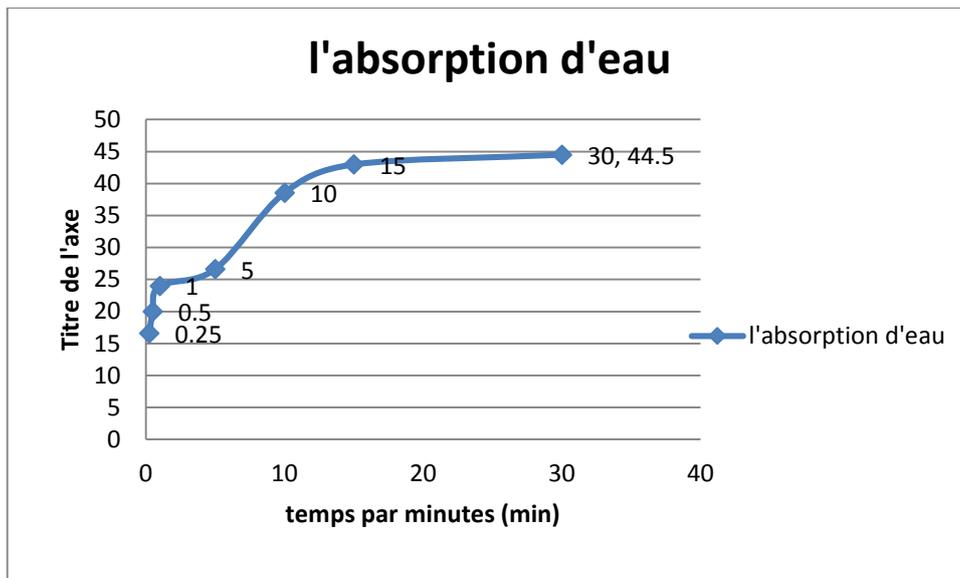


Figure III-03 : Absorption d’eau par les granulats du polystyrène pendant 30 minuits

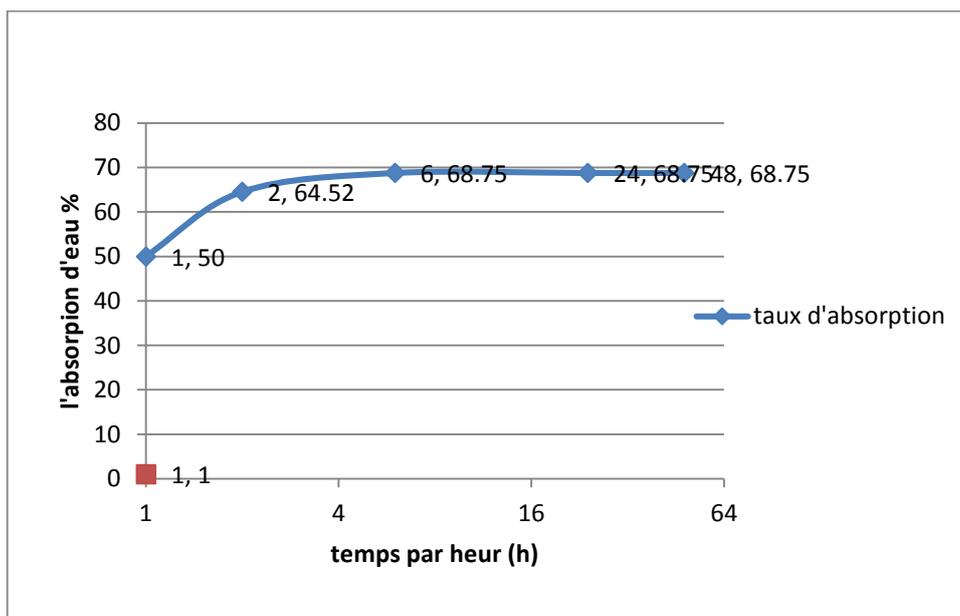


Figure III-04- : Absorption d’eau par les granulats du polystyrène pendant 48 heures

III-2 : FORMULATIONS DES BETONS LEGERS

Il y’a plusieurs méthodes de composition de béton qui sont proposées par des spécialistes tels que **BOLOMEY, FAURY, VALLETTE, DREUX-GORISSE, SCRAMTAIEV...** etc. quelle que soit la méthode utilisée, la composition du mélange calculée ne peut pas correspondre parfaitement au béton désiré, car il n’est pas possible

d'appréhender avec précision la composition du béton, ceci peut-être dû à la qualité des constituants qui influent sur la qualité du béton : forme, angularité, porosité, type de granulats, finesse de mouture et classe vraie de résistance, etc.

Pour notre étude on a choisi la méthode de Scramtaiev comme une méthode de formulation, notons que le calcul de la composition du béton a été fait par la méthode des « volumes absolus » élaborée par le professeur **B. Scramtaïv**.

III-2-1-METHODE DE SCRAMTAIEV:

Cette méthode repose sur le fait qu'un béton lourd, damé à l'état frais, se rapproche de la compacité absolue, ce que signifie que la somme des volumes absolus des matériaux d'origine dans un m³ est égale au volume de la composition du béton damé.

La composition du béton est tout d'abord établie approximativement par calcul, ensuite elle est précisée par la méthode des essais de dosage expérimentaux de mélange de béton.

Tableau III-12 : Méthode de calcul des quantités de matériau (méthode de Scramtaïv).

Le matériau	La formule du calcul de la quantité
Sable	$S = [1000 - (\frac{c}{\rho_c} + \frac{E}{\rho_e} + \frac{PC}{\rho_{pc}})] \times \rho_s, \text{ (kg/m}^3\text{)}$
Eau	$E = \frac{E}{C} \times C, \text{ (kg/m}^3\text{)}$
Pierre concassé (Gravier)	$Pc = \frac{1000}{V \frac{\alpha}{\rho_{pc}} + \frac{1}{\rho_{pc}}}, \text{ (kg/m}^3\text{)}$ $V = 1 - \frac{\alpha}{\gamma}$

Tableau III-13 : valeurs de α en fonction: $\frac{E}{C}$

Les valeurs α en fonction: $\frac{E}{C}$						Quantité de ciment (kg/m ³)
0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	
1,3	1,32	1,26	-	-	-	250
-	1,42	1,38	1,30	-	-	300
-	-	1,44	1,38	1,32	-	350
-	-	-	1,46	1,40	1,31	400
-	-	-	1,56	1,52	1,44	500
-	-	-	-	1,56	1,52	600

III-2-1-1- Les différents mélanges des bétons:

Quatre types de béton ont été formulés

- un béton à base de granulats naturels (béton témoin).**BT**
- un béton mixte (granulats naturels + granulats de polystyrène).**BP1**
- un béton mixte (granulats naturels + granulats de polystyrène).**BP2**

Le diamètre maximal de tous les granulats naturels ou les autres matériaux est de 15mm

Le taux de substitution des granulats naturels par le polystyrène 01 est de: 50%, 50%.

Le taux de substitution des granulats naturels par le polystyrène 02 est de: 30%, 70%.

Les mélanges de béton ont été réalisés avec un rapport Eau/ Ciment constant égale à 0.6 (valeur moyenne pour tous les mélanges) pour pouvoir faire une étude comparative sur la résistance et la conductivité thermique.

La quantité de ciment utilisée pour tous les mélanges est constante, égale à 350 kg /m³

III-2-1-2-La formulation des bétons :

A- Le calcul des quantités de béton ordinaire:

➤ Exemple de calcul :

- On a choisir pour le rapport Eau /Ciment $E/C = 0,6$, et pour le dosage de ciment $C = 350 \text{ kg /m}^3$

- Quantité d'eau :

$$E = \frac{E}{c} \times C \longrightarrow E = 350 \times 0,6 = 210 \text{ kg/m}^3 \longrightarrow E = 210 \text{ kg/m}^3$$

- Quantité du pierres concassés :

$$V = 1 - \frac{\alpha}{\gamma} \longrightarrow V = 1 - \frac{1,35}{2,67} \longrightarrow V = 0,513$$

$$Pc = \frac{1000}{V \frac{\alpha}{\rho_{pc}} + \frac{1}{\rho_e}} \longrightarrow Pc = \frac{1000}{0,513 \cdot \frac{1,44}{1,35} + \frac{1}{2,67}} \longrightarrow P = 1060,69 \text{ kg/m}^3$$

- Quantité de sable:

$$S = [1000 - (\frac{c}{\rho_c} + \frac{E}{\rho_e} + \frac{PC}{\rho_{pc}})] \times \rho_s \longrightarrow S = [1000 - (\frac{350}{3,03} + \frac{210}{1} + \frac{1060,69}{2,67})] \times 2,61$$

$$S = 723,56 \text{ Kg/m}^3.$$

B-Composition de béton léger à base de polystyrène :

a- Pour la substitution de 50 % de volume de béton on a pris la composition suivant :

- La quantité de pierres concassées (GN) est : $P_c = 1060,69 \text{ Kg}$.

La masse volumique apparente de gravier est : 1300 Kg/m^3

$$1300 \text{ Kg} \longrightarrow 1 \text{ m}^3$$

$$1060,69 \text{ Kg} \longrightarrow V$$

$$V = (1060,69 \times 1) / 1300 = 0,816 \text{ m}^3$$

On fait le contraire pour trouver la quantité de polystyrène :

La masse volumique apparente de polystyrène est : 6 Kg/m^3

$$1 \text{ m}^3 \longrightarrow 6 \text{ Kg}$$

$$0,408 \text{ m}^3 \longrightarrow Q_{\text{polys}}$$

$$Q_{\text{polys}} = (0,408 \times 6) / 1 = 2,45 \text{ Kg}.$$

$$1 \text{ m}^3 \longrightarrow 1300 \text{ Kg}$$

$$0,408 \text{ m}^3 \longrightarrow Q_{\text{GN}}$$

$$Q_{GN}=530.40 \text{ kg.}$$

b- Pour la substitution de 30 % , 70 % de volume de béton on a pris la composition suivant :

- La quantité de pierres concassées (GN) est : $P_c = 1060.69 \text{ Kg.}$

La masse volumique apparente de gravier est : 1300 Kg/m^3

$$1300 \text{ Kg} \longrightarrow 1 \text{ m}^3$$

$$1060.69 \text{ Kg} \longrightarrow V$$

$$V = (1060.69 \times 1) / 1300 = 0.816 \text{ m}^3 \longrightarrow (0.816 \times 70) / 100 = 0.571 \text{ m}^3$$

On fait le contraire pour trouver la quantité de polystyrène :

La masse volumique apparente de polystyrène est : 6 Kg/m^3

$$1 \text{ m}^3 \longrightarrow 6 \text{ Kg}$$

$$0.571 \text{ m}^3 \longrightarrow Q_{polys}$$

$$Q_{polys} = (0.571 \times 6) / 1 = 3.43 \text{ Kg.}$$

$$V = (1060.69 \times 1) / 1300 = 0.816 \text{ m}^3 \longrightarrow (0.816 \times 30) / 100 = 0.245 \text{ m}^3$$

$$1 \text{ m}^3 \longrightarrow 1300 \text{ Kg}$$

$$0.245 \text{ m}^3 \longrightarrow Q_{GN} = Q_{GN} = 318.5 \text{ kg.}$$

Tableau III-14: Composition des mélanges de béton pour 1m^3

Proportion GN/GP	E/C	Ciment Kg/m ³	L'eau Kg/m ³	Sable Kg/m ³	Gravier naturel Kg/m ³	Polystyrène Kg/m ³
BT	0.6	350	210	723.67	1060.69	0
BP 50%/50%	0.6	350	210	723.67	530.4	2.45
BP 70%/30%	0.6	350	210	723.67	318.5	3.43

III-2-2- PREPARATION DES EPROUVETTES :

III-2-2-1-Mélange de béton : Pour le béton ordinaire, le malaxage se fait suivant la norme.

Lorsqu'il s'agit de béton qui contient des matériaux légers comme le (liège), le malaxage est fait manuellement pour les préserver et protéger les matériaux légers et leurs propriétés.

III-2-2-2-Remplissage et vibration :

le béton ordinaire est mis dans les moules adéquats aux essais projetés et soumis à deux série de vibration afin d'homogénéiser les constituants du mélange. Lorsqu'il s'agit de béton léger, on vibre légèrement le mélange pour éviter le flottement des matériaux légers sur la face supérieur de l'éprouvette.

III-2-2-3-Type d'éprouvette :

Nous avons utilisé 3 types de moules pour la confection de trois types d'éprouvettes



**Photo III-10 : moule pour éprouvette
Cubique (10×10×10)**



**Photo III-11 : moule pour éprouvette
prismatique (10×10×40)**

III-3-PROGRAMME DES ESSAIS :**III-3-1-Ouvrabilité :**

L'ouvrabilité a été mesurée par l'affaissement au cône d'Abrams (Slump-test), conformément à la norme NF P 18-451. Le béton témoin et le béton léger à base de granulats légers a été fabriqué avec le même rapport E/C=0.6.



Photo III-12 : Essai du Slump-test.

III-4-2- Mesures de la masse volumique (pesé hydrostatique) : (la norme NBN EN 12390-7)

La masse volumique sèche du composite a été évaluée par pesée, à l'aide d'une balance électronique à 0.01 g près, et mesure des dimensions des échantillons, à l'aide d'un pied à coulisse avec une précision de 0,01 mm. Pour chaque composition, la masse volumique sèche apparente représente la moyenne de trois mesures. Par le biais d'une mesure par pesée hydrostatique, nous pouvons déterminer la masse volumique apparente d'une carotte.

Le volume de l'éprouvette est déterminé grâce à une pesée hydrostatique. Après obtention de la masse humide constante, la masse sous eau de l'éprouvette est déterminée.

Le volume V de l'éprouvette est calculé par la relation suivante :

$$V = \frac{M_{\text{humide}} - M_{\text{sous eau}}}{\rho_w (=1000)} \quad (\text{III-3})$$

Avec

- M_{humide} , la masse humide de l'éprouvette après immersion et déterminée à l'air ;
- $M_{\text{sous eau}}$, la masse sous eau de l'échantillon déterminée par pesée hydrostatique ;
- ρ_w , la masse volumique de l'eau considérée égale à 1000 kg/m³.

Les masses volumiques humide (MVH) et sèche (MVS) sont alors calculées par les expressions ci-après

$$MHV = \frac{M_{\text{humide}}}{V} \quad MSV = \frac{M_{\text{sèche}}}{V}$$



Photo III-13 : Bâti de pesée hydrostatique

III-3-3-Mesures de la résistance à la flexion :

L'essai consiste à placer les éprouvettes prismatiques de dimensions $(10 \times 10 \times 40)$ cm³ mûries à l'eau dans la machine de flexion. La résistance à la flexion est calculée à partir de l'effort maximum donnée par l'appareil. L'essai est effectué à 7 jours et 28 jours et on prend la moyenne des résultats sur trois éprouvettes de béton pour chaque formulation : (BT, BP1, BP2).



Photo III-14 - Éprouvettes prismatique

$(40 \times 10 \times 10)$ cm³



Photo III-15 - Machine d'essai de flexion.

III-3-4-Mesures de la résistance à la compression:

Cet essai a été effectué sur une presse de force et de dimension appropriées à l'éprouvette à tester et cela conformément à la norme (NF P 18- 406)

Pour les différents mélanges de béton (BT, BP1, BP2), trois cubes de (10x10x10) cm³ par échéance ont été utilisés pour effectuer l'essai, soit après 7 et 28 jours.



Photo III-16 -Machine Essai de compression



Photo III-17 : Éprouvettes cubiques

(10x10x10) cm³

III-3-5- l'essai d'attaques chimiques :**A -Les produits chimiques :**

- 1-Acide sulfurique (H₂SO₄) = 95 % en solution
- 2-Hydroxyde de sodium (NaOH) = 99 % en granulats
- 3- les nitrates d'ammonium(NH₄NO₃) = 99 % en granulats
- 4- Le sulfate de sodium (Na₂SO₄) = 99 % en poudre

B -Calcule les quantités de la solution par rapport votre concentration :

- 1- pour les poudres et granulats :

$$1L = 50 \text{ g}$$

- 2- pour les solutions :

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2 \quad \text{(III-4)}$$

$$\text{Exemple: } V_1 = \frac{C_2 \times V_2}{C_1} = \frac{0.05 \times 1000}{0.95} = 52.63 \text{ ml pour 1 L}$$

Tableau III-15 : Concentration des solutions dans l'eau .

Solution	Concentration(%)	Quantité/n litres d'eau	Observation
Na ₂ SO ₄	5	200 g / 4 L	
H ₂ SO ₄	5	263 ml/5 L	Acide fort
NH ₄ NO ₃	5	200 g / 4 L	
NaOH	5	300 g/6 L	Basique

C - Conservation des éprouvettes : Après 28 jours de cure dans une solution d'eau, les éprouvettes sont pesées pour déterminer M₁, puis elles sont amenées dans les bacs de conservation. Chaque bac contient une seule solution a une concentration de 5%.

Les éprouvettes conservées dans les différents milieux agressifs sont sorties après 28 jours, sont nettoyées, lavées et séchées, par la suite les éprouvettes sont pesées pour déterminer M₂. Enfin les éprouvettes sont soumises à l'essai de perte de masse après 28 jours. La perte de masse de l'éprouvette est mesurée comme suit :

$$\Delta M \% = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (\text{III-5})$$

M₁ : la masse de l'éprouvette avant le cure de 28 jours

M₂ : la masse de l'éprouvette après l'immersion dans les solutions chimiques à 28 jours



Photo III-18 : Les produits chimiques



Naoh

H2SO4

Na2So4

NH4NO3

Photo III-19: Conservation des éprouvettes dans des solutions chimiques à 5%

D -Résistance en compression

Les échantillons du béton sont soumis à une compression simple

III-3-7-l'essai du gel-dégel : (GOST-87-10060)

I/ 1- Préparation des échantillons (10 × 10× 10) cm du plus gros grain de gravats 15 mm

2- Basé sur la norme (GOST-87-10060) avant l'essai de compression Vérifiez les échantillons s'ils sont intacts et non fissurés. S'il se fissure, l'essai de gel-dégel est terminé.

3- les essais sont effectuées sur des échantillons après qu'ils ont été durcis Pour 28 jours de durcissement c'est conditions naturelles pour être immergé dans l'eau.

II/ 4- Nombre d'échantillons Voir tableau 9.7, Par exemple pour la classe F50

1- Nombre de cycles de gel-dégel = 50

2- Les nombres de cycles après lesquels ils sont examinés s'ils sont solides est 25

3- Nombre d'échantillons à effectuer les essais est 3

4- Le nombre d'échantillons de contrôle est 3

5- Le nombre total d'échantillons dans l'essai est 3 + 3 = 6

III/ 5-

1- Les échantillons doivent être conservés à une température froide ne dépassant pas -15°C

2- Échantillons avec des côtes jusqu'à 15 cm son durée de gel est de 4 heures

3- Le processus de solubilité est dans l'eau à une température de $15-20^{\circ} \text{C}$, la durée de dégel dans l'eau est de 4 heures.

IV/ Temps de contrôle des échantillons Tous les échantillons retenus dans l'eau à $15-20^{\circ} \text{C}$ selon le temps équivalent T_7 , Calculer selon le tableau 9-8 et le nombre de cycles gel-dégel selon la méthode du trio (4×4) pour trois fois par jour, tout 4 heures de gel et 4 heures de dégel être

$$T_7 = a + 0.2 n = 28 + 0.2 \times 50 = 28 + 10 = 38 \text{ jours}$$

a : le nombre du jours de durcissement

n : le nombre de cycles de gel-dégel

C'est à dire 10 jours après le durcissement pendant une période de 28 jours

V/ faire les écrasements des échantillons par compression après le gel et dégel et des échantillons conservés dans l'eau seulement.

VI/ Nous calculons également la perte de la masse dans la relation suivante :

$$\Delta M = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \% \quad (\text{III-6})$$

Où (m_1 et m_2) la masse de l'échantillon avant les essais et après les essais sur les cycles de gel-dégel.



Photo III-20 : le cycle de gel



Photo III-21 : le cycle de dégel



Photo III-22: Les échantillons conservés dans l'eau seulement

III-4-CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les essais effectués et les différentes caractéristiques des matériaux utilisés, la composition des mélanges et les procédures de mesure vont ne permettre de mieux analyser les résultats et faciliter la compréhension de l'influence de différents paramètres étudiés sur les propriétés physicomécaniques et rhéologiques et sa durabilité contre tous les dégradations des bétons.



CHAPITRE IV : ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS



INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, on expose les propriétés physiques, mécaniques et la durabilité contre le gel-dégel et les attaques chimiques des bétons avec granulats légers avec une analyse des résultats obtenus. On a utilisé un matériaux : polystyrène pour avoir une formulation de béton léger. On réalise cette formulation par substitution des granulats naturels par les granulats issus des matériaux cités plus haut, suivant deux rapports (GN/GP) 50/50, (GN/GP) 30/70, tout en respectant la condition d'un béton léger (masse volumique limitée à 2000 Kg/ m³). Pour cela, on a utilisé uniquement les proportions 50/50 et 30/70 pour le même matériaux utilisé.

Une comparaison des résultats obtenus avec ceux des années précédentes est faite sur la base des points communs et des différences dans la formulation et le matériau utilisé .

IV-1-CONSISTANCE DES BETONS FRAIS:**IV-1-1-Affaissement du bétons de polystyrène :**

On a rassemblé tous les résultats d'affaissement pour le matériaux utilisé dans le tableau suivant (tableau IV-01).

Tableau IV-01 : Valeur d'affaissement pour tous les différents mélanges de béton :

Type de Béton	E/C	Ciment Kg/m ³	L'eau Kg/m ³	Affaissement Cm
BT	0.6	350	210	11
BP1	0.6	350	210	9.5
BP2	0.6	350	210	8

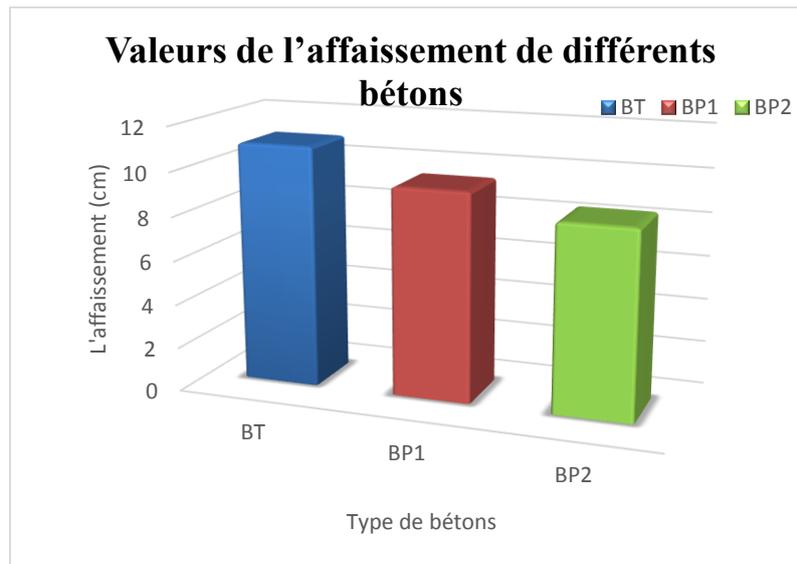


Figure IV-01 : Valeur d'affaissement pour tous les différents mélange de béton

D'après les résultats obtenus on peut dire que :

L'affaissement du béton témoin est plus élevé que celui du béton léger , cela est du aux granulats légers « polystyrène expansé » qui est caractérisé par une forte absorption d'eau et une plasticité plus faible et donc un affaissement plus faible.

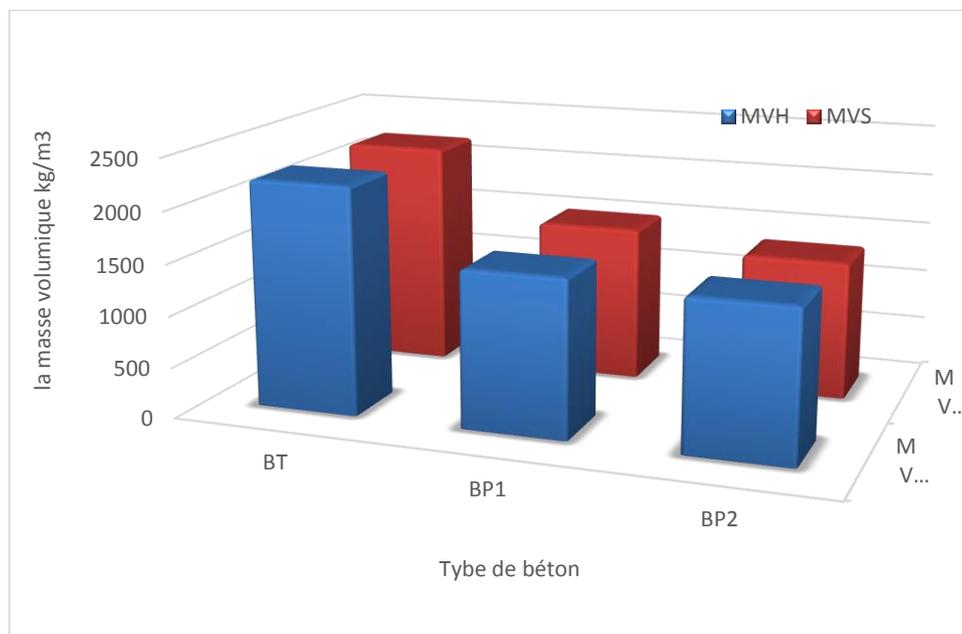
IV-2-PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES BÉTONS DURCIS:

IV-2-1-Masse volumique :

L'introduction des matériaux légers comme le polystyrène dans la composition du béton entraîne une diminution de la masse volumique du béton durci qui varie en fonction de la fraction de matériau léger. Le tableau suivant (tableau IV-02) résume les différentes valeurs de la masse volumique des bétons.

Tableau IV-02 : masse volumique des bétons en Kg/m³.

Type de Béton	Masse volumique sèche du béton Kg/m ³	Masse volumique humide du béton Kg/m ³
BT	2211.3	2226.3
BP1	1525.7	1540.7
BP2	1362.5	1476.5

Figure IV-02 : masse volumique des bétons en Kg/m³

On remarque que la masse volumique du béton témoin (BT) est conforme à celle des bétons lourds (supérieur à 2000 kg/m³).

La masse volumique du béton léger à base de polystyrène (BP1, BP2) est inférieure à 2000 kg/m³, ce qui permet de les classer dans la catégorie des bétons légers.

On remarque que les granulats de polystyrène dans le béton léger (BP1) qui composé 70/30 donnent des bétons plus légers en comparaison avec le béton léger (BP2) avec des granulats de 50/50.

La légèreté de ces bétons est fonction des masses volumiques des granulats : le polystyrène qui a une masse volumique beaucoup plus faible que celle des granulats naturels, donne un béton beaucoup plus léger.

IV-2-2- Absorption d'eau pendant la phase de la cure :

Cet essai permet d'évaluer la quantité d'eau absorbée pendant la phase de la cure humide, ceci consiste à mesurer la masse d'une éprouvette de béton après le démoulage puis en l'immergeant dans l'eau pendant 07 jours et en mesurant l'augmentation de masse exprimée en pourcentage. Cet essai n'est pas normalisé, il permet cependant d'avoir une idée sur l'absorption des bétons à base de polystyrène. Le tableau (IV-03) regroupe les valeurs du coefficient d'absorption en fonction du type de béton.

. L'absorption d'eau est donnée par la relation suivante :

$$Abs(\%) = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sec}} 100\% \quad (IV-1)$$

M_{sat} : la masse d'éprouvette après 7 jours d'immersion dans l'eau

M_{sec} : la masse d'éprouvette sèche avant l'immersion dans l'eau

Les éprouvettes utilisées sont cubiques de dimensions (10×10×10 cm³) et sont conservées dans l'eau (T = 22°C). Les valeurs du coefficient d'absorption en fonction du type de béton sont données dans le (tableauV-03)

Tableau IV-03 : l'absorption d'eau par l'éprouvette

Type de bétons	La masse avant l'immersion kg/m ³	La masse après l'immersion kg/m ³	Pourcentage d'absorption %
BT	2236.12	2262.51	1.18
BP1	1561.29	1637.01	4.85
BP2	1363.48	1456.06	6.79

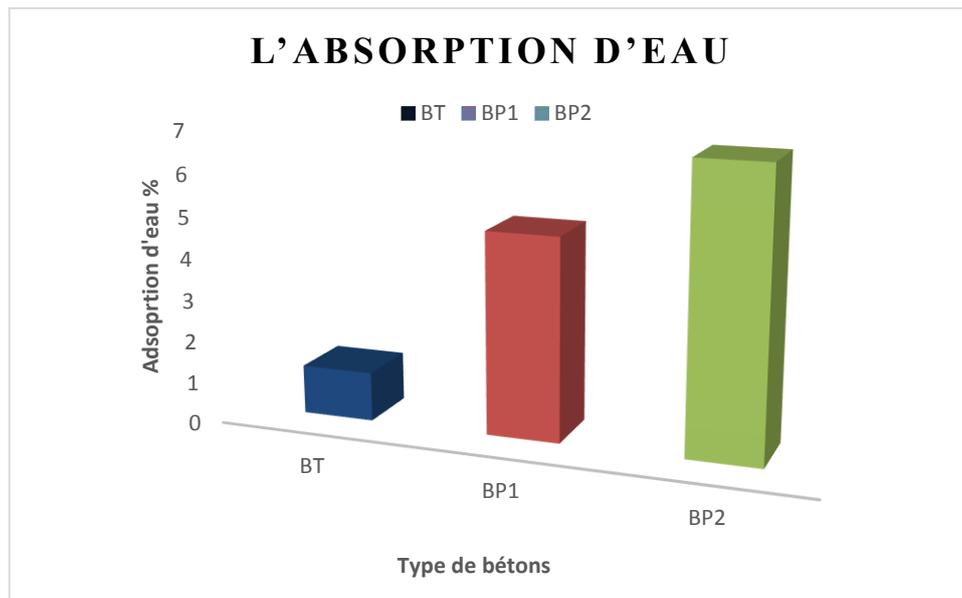


Fig IV-03 : L'absorption d'eau du type de béton

On observe d'après le diagramme que l'absorption augmente avec le pourcentage de granulats légers : le pourcentage d'absorption du béton léger BP2 est plus fort que celui du béton léger BP1. Ceci est dû à la présence des granulats légers qui sont plus absorbant que les granulats naturels (graviers).

IV-3- PROPRIETES MECANQUES DES BETONS DURCIS:

IV-3-1-RESISTANCE A LA COMPRESSION :

La résistance à la compression du béton est généralement considérée comme sa plus importante propriété, la résistance à la compression projette généralement une image globale de la qualité d'un béton puisqu'elle est directement reliée à la structure de la pâte de ciment hydraté, elle est estimée soit à court terme où à long terme.

Le (tableau IV-04) regroupe les résultats de la résistance à la compression à 7 et 28 jours pour les différents mélanges , pour comparé entre les deux valeurs entre béton léger de 50 % du polystyrène (BP1) et béton témoin (BT) , béton léger 50 % du polystyrène (BP1) et béton léger 70 % du polystyrène (BP2) à 28 jours par la relation suivante :

$$R_{C_{rel}} \% = \frac{R_{C_{BP}}}{R_{C_{BT}}} \times 100 \% \quad (IV-2)$$

R_{CBP} : la résistance à compression du béton léger de polystyrène à 28 jours

R_{CBT} : la résistance à compression du béton témoin à 28 jours

Tableau IV-04 : comparaison ent la résistances à la flexion entre béton témoin et béton léger

Type de beton	E/C	Resistance à la compression MPa		$\frac{R_{CBP}}{R_{CBT}} \times 100 \%$ à 28 j
		7J	28J	
BT	0.6			100
		13.1	22	
BP1	0.6	3.2	4.6	21
BP2	0.6	1.1	1.8	8

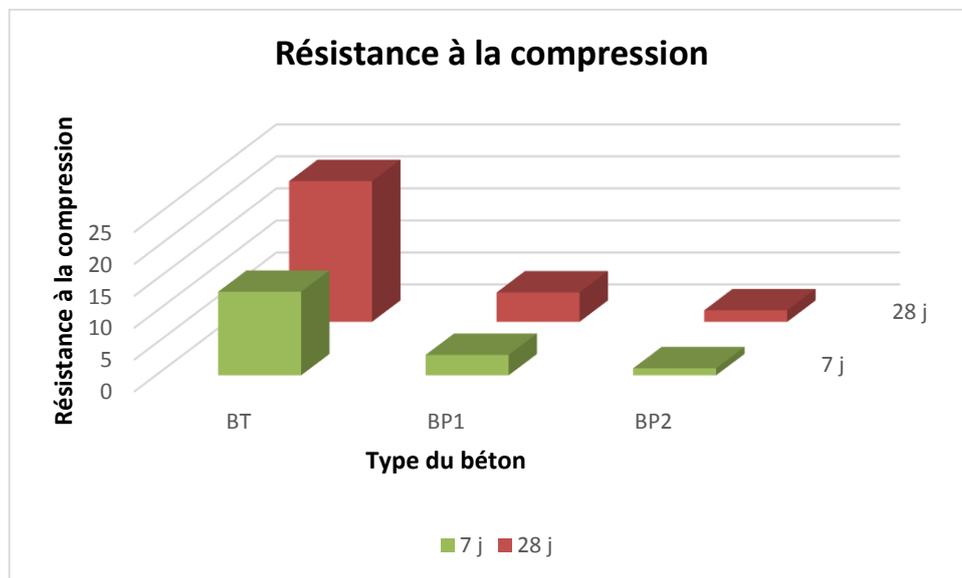


Figure IV-04: Résistances à la compression des bétons.

Remarque à travers la (figure IV-04) :

La résistance à la compression du béton témoin est la plus grande par rapport aux autres types de bétons légers, ceci est vrai aussi bien à 7 jours que 28 jours.

La résistance à la compression de béton de polystyrène BP2 et BP1 est très faible par rapport au béton témoin BT .

Les résultats de la résistance à la compression de béton de polystyrène BP1 est proche de ceux obtenus les années précédentes.

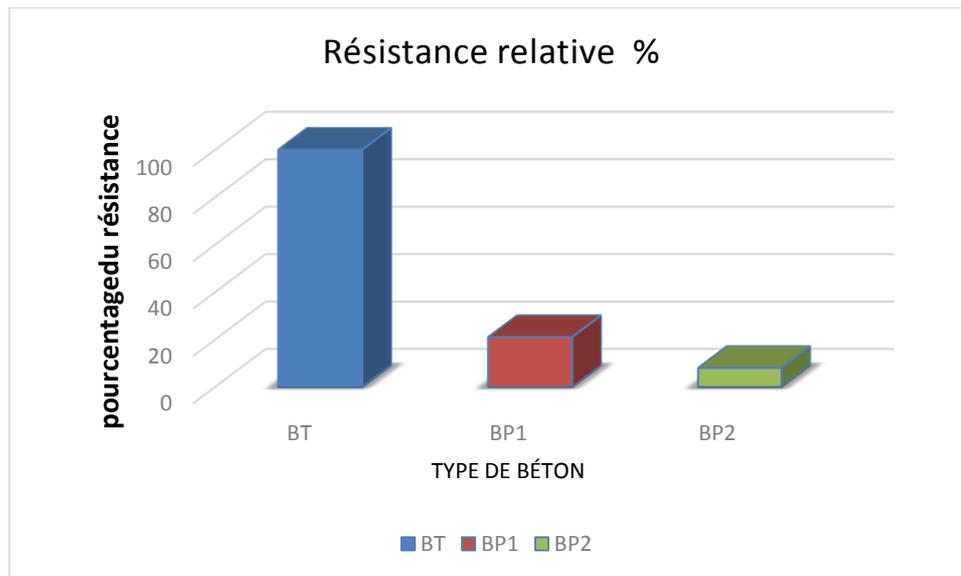


Figure IV-05 : résistance relative à 28 jours

La résistance des bétons à base de polystyrène est faible par rapport au béton témoin ; elle représente respectivement 21 % et 8 % pour BP1 (50 % de polystyrène) et BP2 (70 % de polystyrène). Cette réduction est logique car les granulats de polystyrène présente une faible résistance à la compression. On remarque que cette réduction va en augmentant le pourcentage de granulats légers.

IV-3-2-RESISTANCE A LA FLEXION :

Le tableau (IV-05) suivant regroupe les résultats obtenus lorsque on a appliqué l'essai de la flexion sur l'éprouvette (10x10x40)cm et pour comparé entre les deux valeurs entre béton léger de 50 % du polystyrène (BP1) et béton témoin (BT) , béton léger 50 % du polystyrène (BP1) et béton léger 70 % du polystyrène (BP2) à 28 jours par la relation suivante :

$$Rf_{rel} \% = \frac{Rf_{BP}}{Rf_{BT}} \times 100 \% \quad (IV-3)$$

Rf_{BP} : la résistance de flexion du béton léger de polystyrène à 28 jours

Rf_{BT} : la résistance de flexion du béton témoin à 28 jours

Tableau IV-05: comparaison ent la résistances à la flexion entre béton témoin et béton léger

Type de beton	E/C	Resistance a la flexion MPa		$\frac{Rf_{BP}}{Rf_{BT}} \times 100 \%$ à 28 j
		7J	28J	
BT	0.6	4.4	5.4	100
BP1	0.6	0.33	2	37
BP2	0.6	0.11	1	19

Le tableau (IV-06) suivant regroupe les résultats obtenus lorsque on a appliqué l'essai de la flexion sur l'éprouvette (10x10x40) et l'essai de la résistance à la compression à 28 jours pour les différents mélanges et pour comparé entre les valeurs entre la résistance à la flexion et la compression à 28 jours par la relation suivante :

$$Rc_{com}(\%) = \frac{Rf}{Rc} \times 100 \% \quad (IV-4)$$

Tableau IV-06 : comparaison entre compression et flexion

Type de beton	E/C	Resistance à 28 j MPa		$\frac{Rf}{Rc} \times 100 \%$
		Compression	flexion	
BT	0.6	22	5.4	25
BP1	0.6	4.55	2	43
BP2	0.6	1.8	1	50

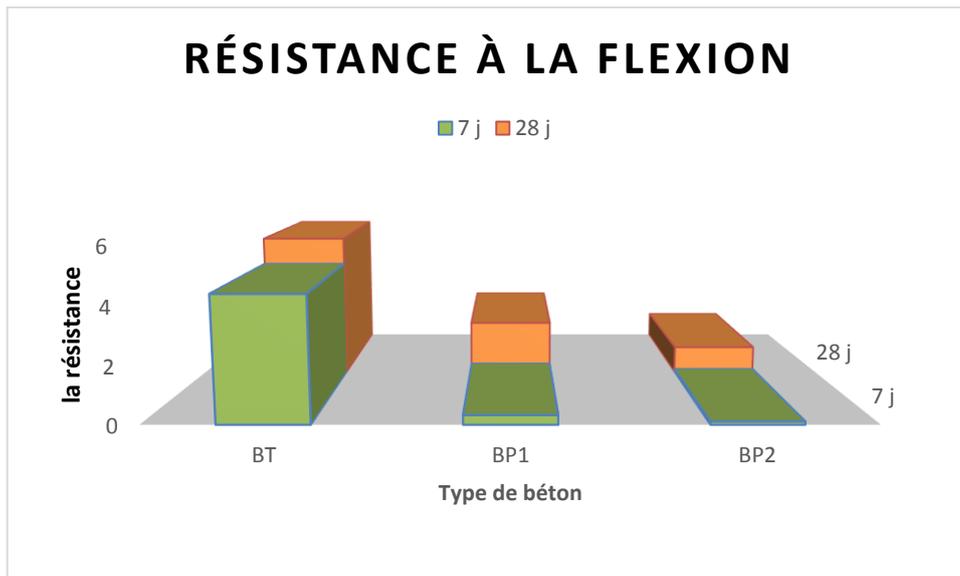


Figure IV-06: Résistances à la flexion des béton

D’après le (fugire IV-06) on remarque :

La résistance à la flexion du béton témoin est la plus grande par rapport aux autres types de bétons légers, ceci est vrai aussi bien à 7 jours que 28 jours.

La résistance à la flexion des bétons de polystyrène du GN/GP (30 % / 70%) est presque nulle à court terme (7 jours) : 0.11 MPa et atteint des valeurs assez faibles à 28 jours : 1 MPa. .La résistance à la flexion des bétons de polystyrène du GN/GP (50 % / 50%) est très faible à court terme (7 jours) : 0.33 MPa et atteint des valeurs assez faibles à 28 jours : 2 MPa.

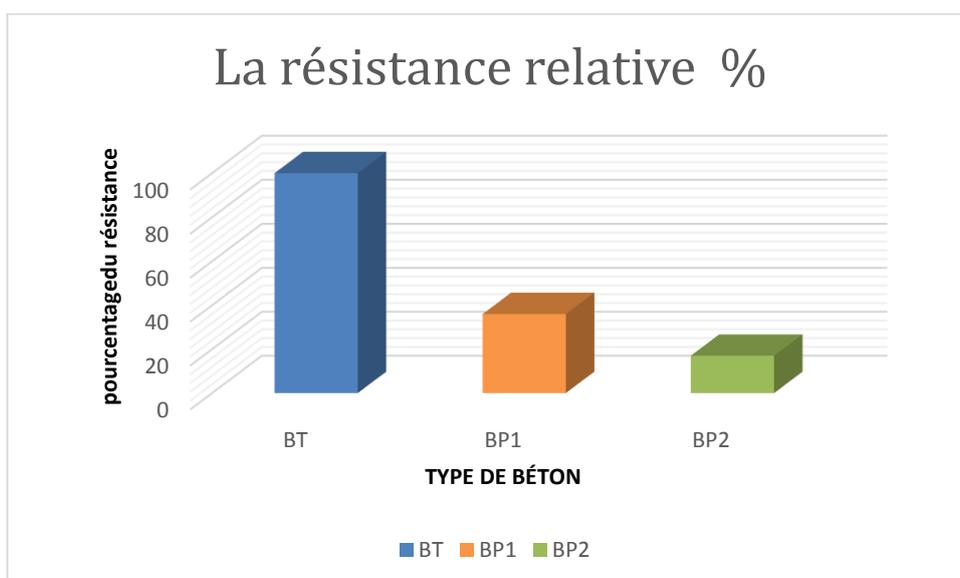


Figure IV-07 : Résistance relative à 28 jours

D'après figure (IV-07), on constate que la résistance à la flexion est passé de 5.4 MPa pour le BT pour atteindre 2 MPa pour BP1 ce qui représente 37 %. Tandis que pour BP2 le pourcentage a atteint 18 % par rapport au béton témoin. Cette réduction de résistance est dû essentiellement à la présence des granulats légers. Néanmoins cette réduction est moins importante que pour la résistance à la compression.

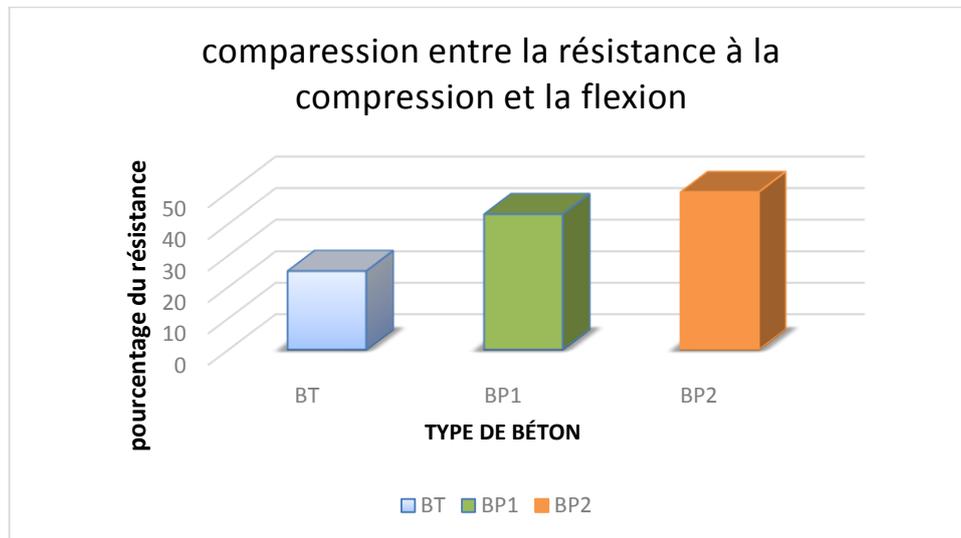


Figure IV-08 : Comparaison entre la compression et flexion à 28 jours

La comparaison entre la résistance à la flexion et la compression, montre que les bétons légers présente un pourcentage plus élevé que ce lui du béton témoin. Ceci est d'autant plus vrai que l'on augmente le pourcentage de granulats légers. Ce résultat est en concordance avec la bibliographie qui relie ce poucentage à la légereté qui est elle-même fonction du poucentage de granulats légers.

IV-4-DESCRIPTION MACROSCOPIQUE:

Les photos ont été prises sur des éprouvettes (10x10x40) cm

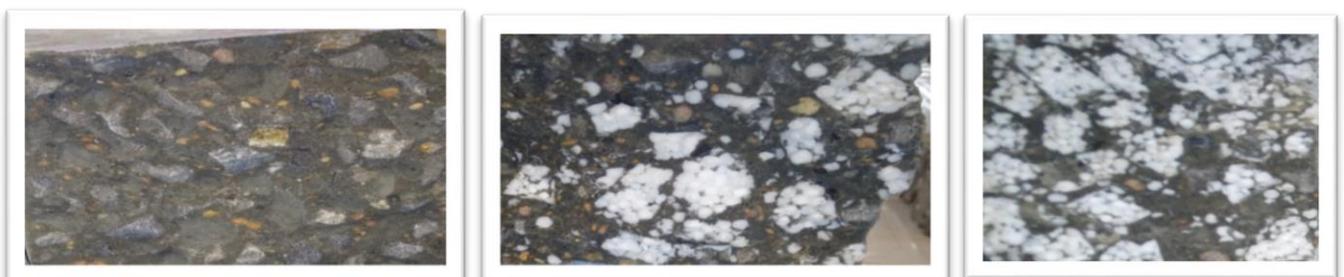


Photo IV-01 : Photographies des coupes sur les différentes éprouvettes de béton

On remarque la bonne répartition des granulats légers sur toute la section des bétons légers BP1 et BP2.

Le polystyrène occupe la majorité de la surface de la section de béton léger BP2.

IV-5- DURABILITE

Dans ce travail des essais de gel-dégel et des essais d'attaques chimiques ont été effectués .

Le tableau suivant IV-07 présente les caractéristiques des essais.

Tableau IV-07 :Présentation les caractéristiques d'essais

Type de béton		Béton témoin	Béton léger	Béton léger
Les essais			50 %	70%
Cure à 28 j		BT	BP1	BP2
Gel-dégel		BT0	BP01	BP02
Attques chimiques	H ₂ SO ₄	BT1	BP11	BP12
	Na ₂ SO ₄	BT2	BP21	BP22
	NH ₄ NO ₃	BT3	BP31	BP32
	NaOH	BT4	BP41	BP42

IV-5-1- Gél-dégel :

IV-5-1-1-Aspect extérieur des éprouvettes pendant les cycles du gel-dégel :



Photo IV-02 :Les éprouvette du gel-dégel au 10^{eme} cycles

- Apparition du polystyrène qui se trouve à l'intérieur du béton due l'écaillage de la surface.



Photo IV-03: Les éprouvette du gel-dégel au 25^{eme} cycles

- Apparition de fissures et de trous qui se développent au cours du temps par expansion et par écaillage et avec une perte d'une petite partie de béton BP 70% .



Photo IV-04 : Les éprouvette du gel-dégel au 50^{eme} cycles

- L'aspect de la surface devient rugueux avec présence de trous.
- Propagation des fissures sur une bonne partie de l'éprouvette.

- Décollement d'une partie du béton de surface par écaillage.

IV-5-1-2- Perte du masse

J'ai suivi l'évolution de la durabilité de mon échantillons par la perte de masse. La mesure de la perte de masse a été effectuée sur trois échantillons identifiés à cet effet , j' ai utilisé l'équation suivante pour calculer la perte de masse :

$$\Delta M_g(\%) = [(M_b - M_a) / M_a] \times 100 \quad \text{(IV-05)}$$

M_b : la masse d'éprouvette après la gel-dégel

M_a : la masse d'éprouvette avant le gel-dégel

Les résultats de perte de masse sont regroupés dans tableau suivant :

Tableau IV-08: Perte du masse du bétons avant et après le gel-dégel .

Les bétons	La masse avant le gel-dégel (kg/m ³)	La masse après le gel-dégel (kg/m ³)	La perte (%)
BT0	2456.1	2426.5	-1.21
BP01	1795.5	1753.3	-2.35
BP02	1530.2	1485.2	-3.27

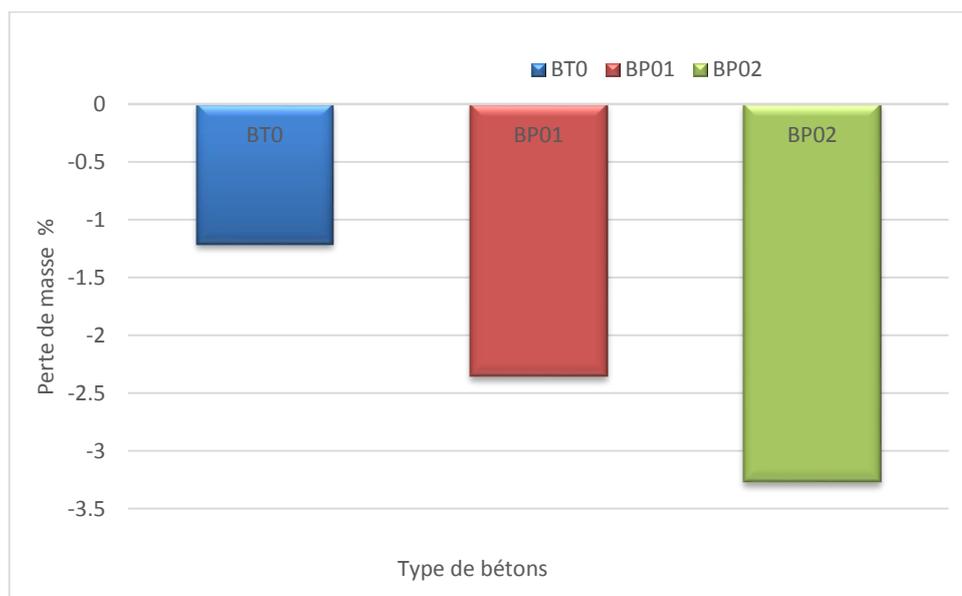


Figure IV-09 : La perte de la masse du béton

L'introduction d'agrégats légers dans le béton a augmenté la perte de masse de celui-ci. Ceci est dû aux propriétés mécaniques du polystyrène, qui se caractérisent par une certaine fragilité. De même, la nature des granulats de polystyrène, connus pour leur faible adhérence, leur incapacité de maintenir leur résistance à basse température et leur inaptitude à se dilater, conduit à la rupture des liaisons entre les billes de polystyrène.

La perte de masse augmente avec l'augmentation du pourcentage de polystyrène.

IV-5-1-3-Résistance à la compression

Le tableau (IV-09) suivant regroupe les résultats obtenus pour l'essai de la compression sur l'éprouvette (10x10x10) cm avant et après l'essai du gel dégel. La comparaison entre les résultats après gel-dégel et ceux obtenus après 28 jours de cure dans l'eau est faite en calculant le pourcentage de réduction de la résistance suivant la relation :

$$\Delta R_{c_g} = \frac{R_{c_b} - R_{c_a}}{R_{c_a}} \times 100 \% \quad (\text{IV-06})$$

R_{c_a} = la résistance après 28 jours de cure

R_{c_b} = la résistance après les cycle du gel-dégel

Tableau IV-09: Résistances à la compression des bétons avant et après gel-dégel .

Type de béton	Rc à la compression après 28 j de cure (MPa)	Type de béton	Rc à la compression après le gel-dégel (MPa)	pourcentage de réduction de la résistance (%)
BT	22	BT0	16.2	-26.4
BP1	4.6	BP01	3.3	-27.5
BP2	1.8	BP02	1.7	-5.6

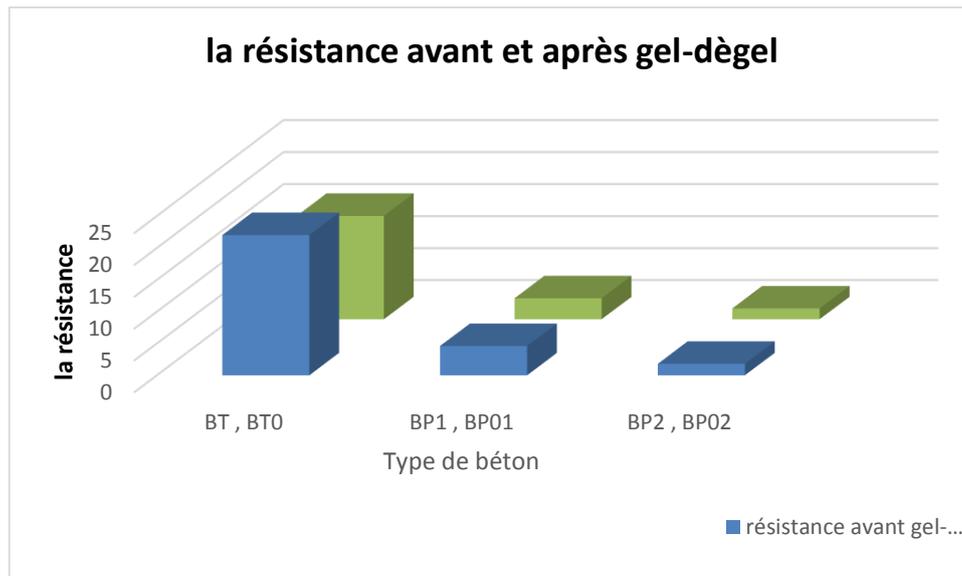


Figure IV-10 :La comparaison du résistance du béton avant la cure et après la gel-dégel

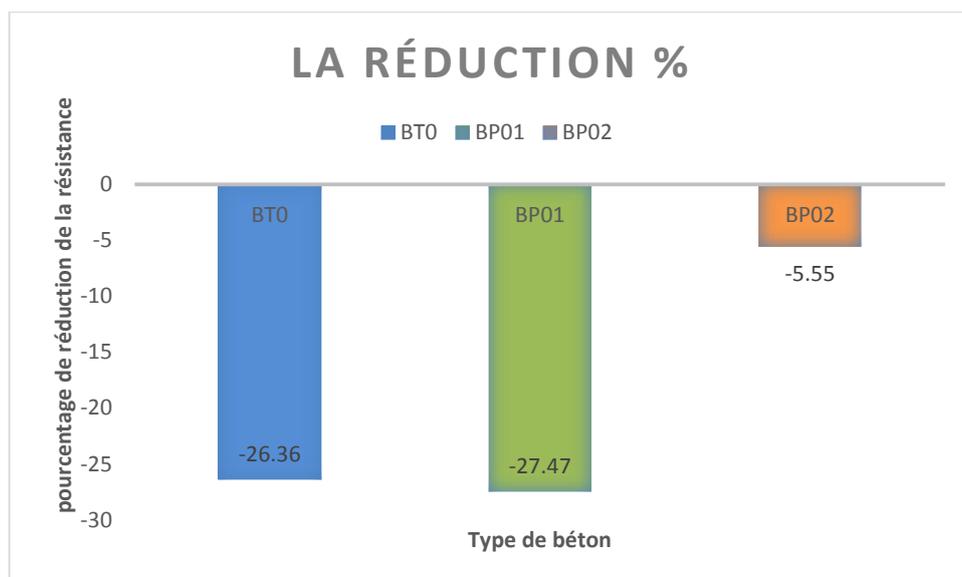


Figure IV-11: pourcentage de réduction de la résistance du béton après le gel-dégel par rapport le béton après la cure de 28 j

D'après le tableau et les graphes, on constate une réduction de la résistance à la compression des bétons qui ont subis des cycles de gels-dégels par rapport aux bétons à l'âge de 28 jours. Cette réduction est constatée pour tous les deux types du bétons (béton témoin et béton léger). Le taux de réduction se situe autour de 26 %. sauf pour le béton léger avec 70 % de polystyrène qui a présenté une petite réduction de 5% ; Ceci est peut être dû à la grande quantité de polystyrène dans le mélange qui a eu pour effet de limiter la propagation des fissures et par conséquent minimise la réduction de résistance à la compression.

IV-5-2- Attaques chimiques**IV-5-2-1-Examen visuel :**

Pendant la période d'essai d'attaque chimique, on remarque des changements sur la surface extérieure des éprouvettes de bétons, et sur leurs évolutions pendant cette période. On exprime ces changements par une série de photos et des remarques. Les photos ont été prises sur des éprouvettes (10x10x10) cm.

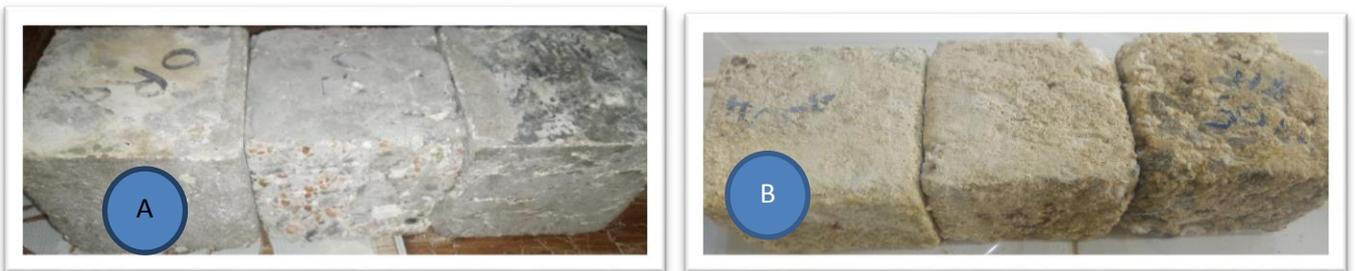
a-Milieu d'acide sulfurique H_2SO_4 

Photo IV-05 : Les éprouvette avant et après l'attaque chimique de H_2SO_4

- Juste après l'immersion des éprouvettes dans la solution d'acide sulfurique une effervescence (dégagement de bulles avec du bruit) a eu lieu, ce qui démontre qu'il y a eu réaction entre l'acide sulfurique et les constituants des bétons.
- Au cours de la période d'essai, nous avons observé une absorption de la solution par les échantillons.

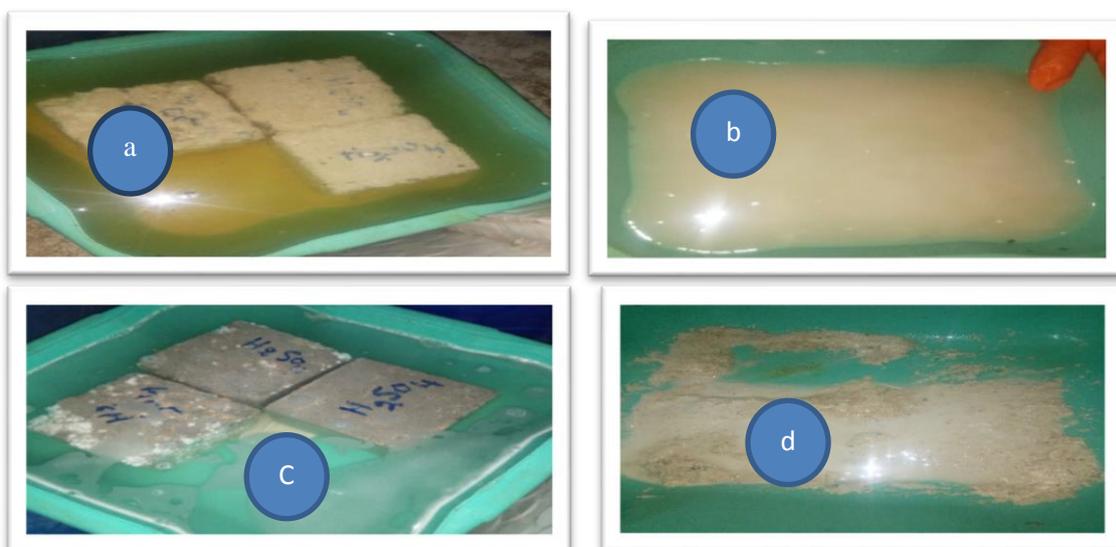


Photo IV-06: Solution du H_2SO_4 avant et après 28 j

- La solution qui était initialement transparente, vire graduellement au jaune avec apparition de débris blanchâtres au fond de l'ustensile qui contient la solution.
- A la fin de l'essai, la solution devient blanc cassée et un dépôt important est recueilli au fond de l'ustensile (**Photo IV-06-d**).
- L'aspect extérieur des éprouvettes se caractérise par une couleur jaune clair et une rugosité prononcée, cependant les surfaces sont lissivées dénuées complètement de la pâte de ciment. Un gonflement des éprouvettes est observé.

b-Milieu de sulfate de sodium Na_2SO_4 :

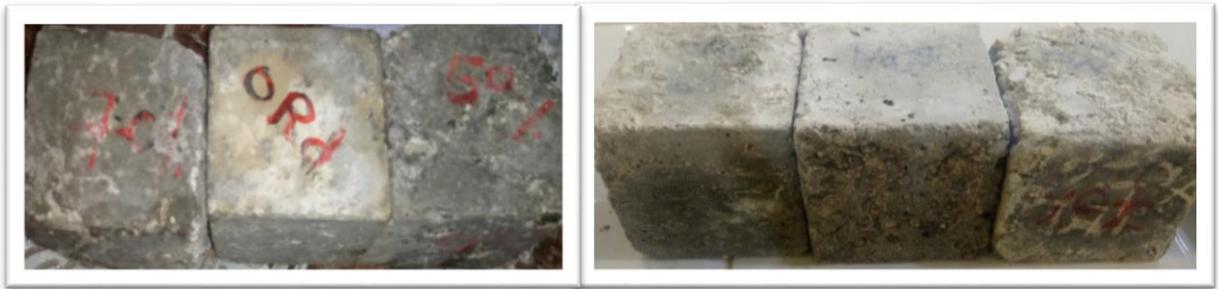


Photo IV-07: Les éprouvette avant et après l'attaque chimique de Na_2SO_4



Photo IV- 08 : Solution du Na_2SO_4 avant et après 28 j

- Pas d'effervescence lorsqu'on met les éprouvettes dans la solution de sulfate de sodium.
- La couleur de la solution ne varie presque pas (transparente) avec apparition d'un faible dépôt blanchâtre au fond de l'ustensile.

- A la fin de l'essai, les éprouvettes changent de couleur pour devenir blanchâtre et présente quelques trous à la surface.

c-Milieu de nitrates d'ammonium NH_4NO_3 :



Photo IV-09 : Les éprouvette avant et après l'attaque chimique de NH_4NO_3

:



Photo IV-10: Solution du NH_4NO_3 avant et après 28 j

- La solution de nitrate reste incolore pendant la phase d'essai avec apparition d'éléments blanchâtre à la surface de la solution.
- Il n'y a pas eu de dépôt ou résidus au fond de l'ustensile.
- A la fin de l'essai, les éprouvettes se colorent d'un jaune clair et présentent des trous et quelques fissures.

d-Milieu d'hydroxyde de sodium NaOH :**Photo IV-11 : Les éprouvette avant et après l'attaque chimique de NaOH****Photo IV-12 : Solution du NaOH avant et après 28 j**

- Dès l'immersion des éprouvettes dans la solution, une effervescence a eu lieu avec apparition d'une couleur blanche en surface qui disparaît au cours de l'essai.
- A la fin de l'essai, l'aspect extérieur des éprouvettes est caractérisé une couleur jaunâtre.

IV-5-2-2-Perte de masse :

Nous avons suivi l'évolution de la durabilité de nos échantillons par la perte de masse. La mesure de la perte de masse a été effectuée sur trois échantillons identifiés à cet effet, précédemment essuyés et nettoyés trois fois avec de l'eau distillée pour éliminer la solution de surface et le béton altérés. Nous avons utilisé l'équation suivante pour calculer la perte de masse :

$$\Delta M_{a-ch} (\%) = \frac{M_f - M_i}{M_f} \times 100 \quad (\text{IV-06})$$

M_i = la masse avant l'immersion dans la solution .

M_f = après 28 j d'immerion dans la solution .

Les résultats de la perte de masse sont présentés dans les tableaux ci-dessous :

a- Milieu de l'acide sulfurique H_2SO_4

Tableau IV-10: Perte du masse du bétons immergé dans solution de H_2SO_4 .

Les bétons	La masse avant l'immersion (kg/m^3)	La masse après l'immersion (kg/m^3)	La perte (%)
BT1	2383.3	2377.7	-0.23
BP11	1603.0	1540.2	-3.23
BT12	1377.5	1333.2	-3.91

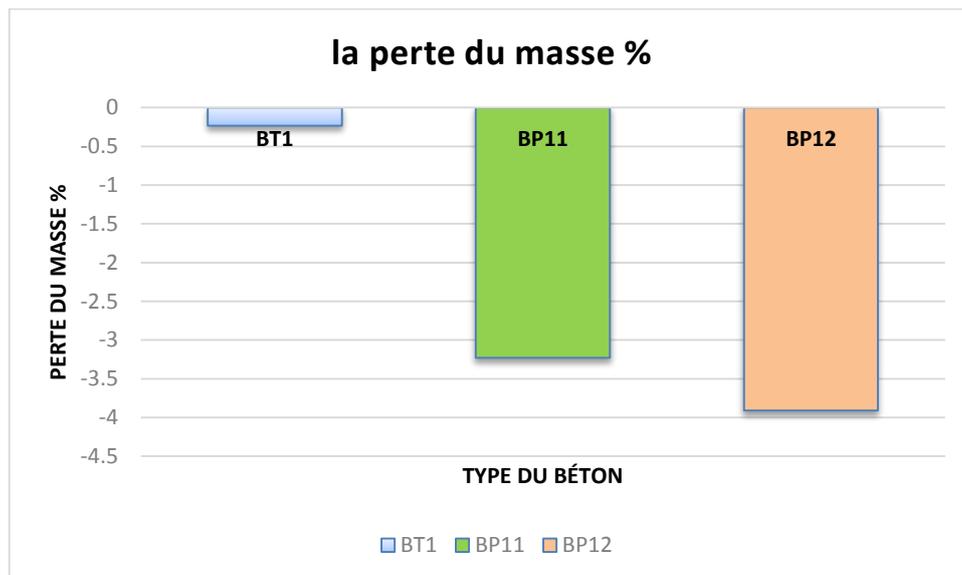


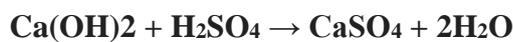
Figure IV-12 : Perte du la masse pour les béton immergée dans solution du H_2SO_4

D'après la figure IV-12, on remarque :

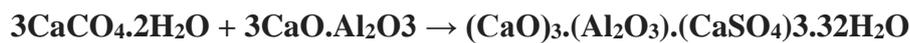
- ✓ Le béton témoin ne présente presque pas de perte de masse. L'attaque chimique fait varier son aspect et son comportement vis-à-vis de l'absorption. Notez que le taux de perte de masse est élevé pour le béton léger polystyrène (BP11 = -3.23, BP12=-3.91), car il est associé au taux d'absorption, ce qui signifie que plus le pourcentage

d'agrégats légers est élevé, plus l'éprouvette de béton est exposé aux attaques chimiques H_2SO_4

- ✓ Les résultats de la perte en masse s'expliquent par l'attaque de l'acide sulfurique, qui est une réaction acide-sulfate, c'est-à-dire, une réaction de l'ion hydrogène provoquant un effet de dissolution et une réaction corrosive des ions sulfates. Lorsque l'acide réagit avec la matrice de ciment, la réaction prépondérante est entre l'acide et l'hydroxyde de calcium ($Ca(OH)_2$) et/ou le silicate de calcium hydraté (CS-H), quand la portlandite n'est plus disponible, en formant du sulfate de calcium selon l'équation suivante :



- ✓ Par la suite, le gypse réagit avec l'hydrate d'aluminate de calcium (C3A) pour former de l'ettringite :



- ✓ L'hydroxyde de calcium réagit également avec le sulfate de sodium, ce qui donne le gypse secondaire formant de l'ettringite secondaire. Ce dernier peut provoquer l'expansion, la fissuration et la détérioration du béton.
- ✓ A la fin de la période d'immersion, on a remarqué qu'il y a formation d'un dépôt blanchâtre au fond de l'ustensile. (Photo IV 05)

b- Milieu de nitrates d'ammonium NH_4NO_3 :

Tableau IV-11: Perte du masse du bétons immergé dans solution de NH_4NO_3 .

Les bétons	La masse avant l'immersion (kg/m^3)	La masse après l'immersion (kg/m^3)	(%)
BT2	2430.0	2440.3	+ 0.42
BP21	1549.6	1566.4	+0.43
BT22	1377.5	1399.0	+1.56

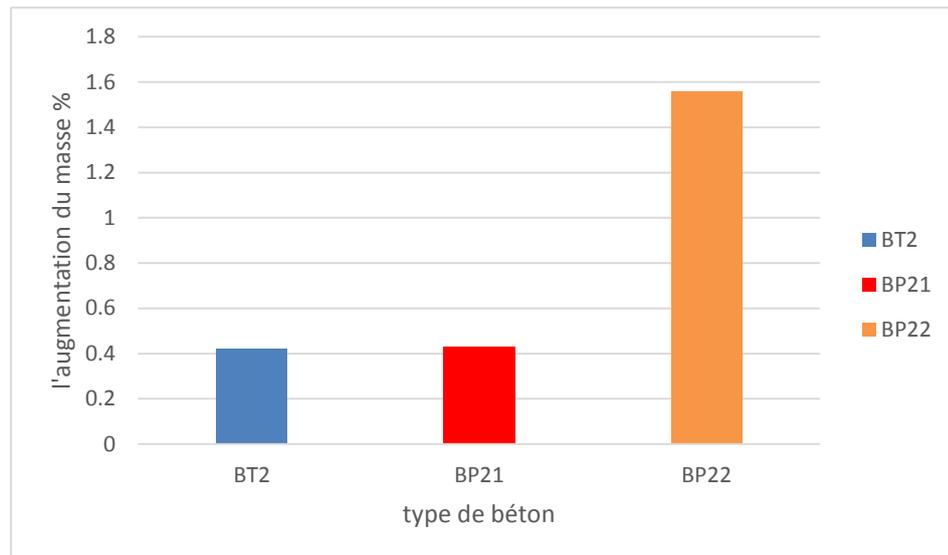


Figure IV-13 : Augmentation de la masse pour les béton immergée dans solution du NH_4NO_3

D'après la figure IV-13, on remarque que :

- ✓ On voit qu'il y a une augmentation significative de la masse, en fonction du type de béton (BT2 : 0.42 % > BP21: 0.43 % > BP22 : 1.56 %) et de sa capacité à absorber. Ceci peut être expliqué par la modification de la cinétique d'absorption des éprouvettes due à l'attaque chimique.
- ✓ Ces résultats sont en concordance avec les études précédentes qui ont montrées qu'il y a augmentation de masse jusqu'à 28 jours d'immersion.

c- Milieu de sulfate de sodium Na_2SO_4 :

Tableau IV-12: Perte du masse du bétons immergé dans solution de Na_2SO_4

Les bétons	La masse avant l'immersion (kg/m ³)	La masse après l'immersion (kg/m ³)	(%)
BT3	2456.1	2465.0	+0.36
BP31	1720.2	1732.0	+0.68
BT32	1364.7	1377.4	+0.93

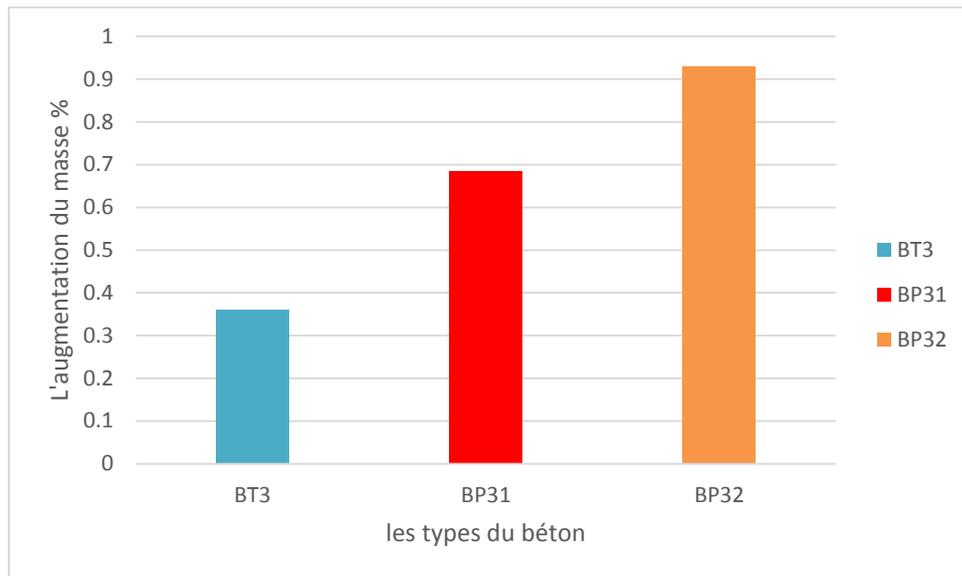


Figure IV-14 : Augmentation de la masse pour les béton immergée dans solution du Na_2SO_4

D'après la figure IV-14, on remarque que :

- ✓ Le béton témoin ne présente presque pas d'augmentation de masse. L'attaque chimique fait varier son aspect et son comportement vis-à-vis de l'absorption. Tandis que pour les bétons à base de polystyrène, bien que les éprouvettes aient perdu des particules par écaillage ou par fissuration, un gain de masse a été constaté pour les deux variantes. Ceci peut être expliqué par la modification de la cinétique d'absorption des éprouvettes due à l'attaque chimique.
- ✓ Ces résultats sont en concordance avec des études antérieures qui précisent qu'il y a gain de masse jusqu'à 28 jours d'immersion et ensuite une tendance à la baisse se fait ressentir pour des âges plus avancés

d-Milieu Hydroxyde de sodium NaOH :

Tableau IV-13: Perte du masse du bétons immergé dans solution de NaOH

Les bétons	La masse avant l'immersion (kg/m^3)	La masse après l'immersion (kg/m^3)	Perte (%)
BT4	2412.6	2412.1	-0.02
BP41	1617.5	1614.4	-0.19
BT42	1348.2	1287.9	-4.47

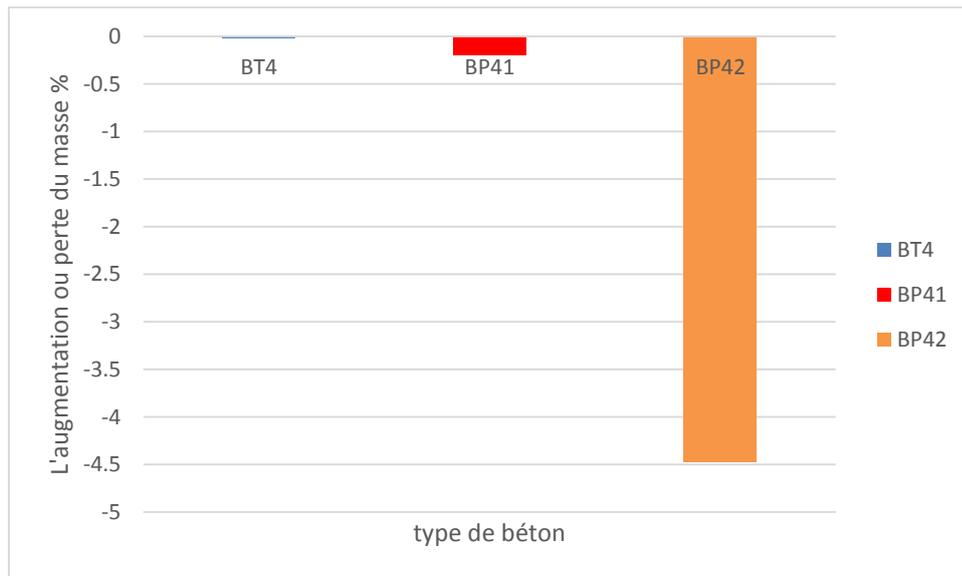


Figure IV-15 : Perte de la masse pour les béton immergée dans solution du NaOH

D'après la figure IV-15, on remarque :

- ✓ On remarque une augmentation de la perte de masse en fonction du pourcentage de granulats légers.
- ✓ La dégradation des éprouvettes BT4, BP41 et BP42 immergés dans la solution d'hydroxyde de sodium n'est pas négligeable. Les pertes de masse observées dans les éprouvettes de béton et le béton léger de polystyrène s'expliquent par la libération de la chaux et la formation de composés solubles et leur migration vers l'extérieur du fait de l'augmentation de la porosité du béton.

IV-5-2-3-Résistance à la compression :

Les échantillons de béton sont soumis à une compression simple après 28 jours d'immersion dans la solution qui contient des produits chimiques. Les résultats des essais sur des bétons légers de polystyrène et des bétons témoins sont donnés dans les figures et les tableaux suivants:

Pour calculer la réduction ou l'augmentation de résistance pour les éprouvettes après immersion, on utilise la relation suivante :

$$\Delta R_{c_{a-ch}} (\%) = \frac{R_{c2} - R_{c1}}{R_{c1}} \times 100 \% \quad (\text{IV-07})$$

- **Rc1 = la résistance après 28 jours de cure**
 - **Rc2 = la résistance après 28 jours d'immersion dans les solutions chimiques**
- L'augmentation (+)
La réduction (-)

a- Milieu de l'acide sulfurique H₂SO₄

Tableau IV-14 : la résistance à la compression après 28 j d'immersion dans la solution de H₂SO₄

Type de béton	Rc à 28 j (MPa)	Rc après 28 j d'immersion	%
BT1	22	16.6	-24.54
BP11	4.6	2.4	-47.25
BP12	1.8	1	-44.44

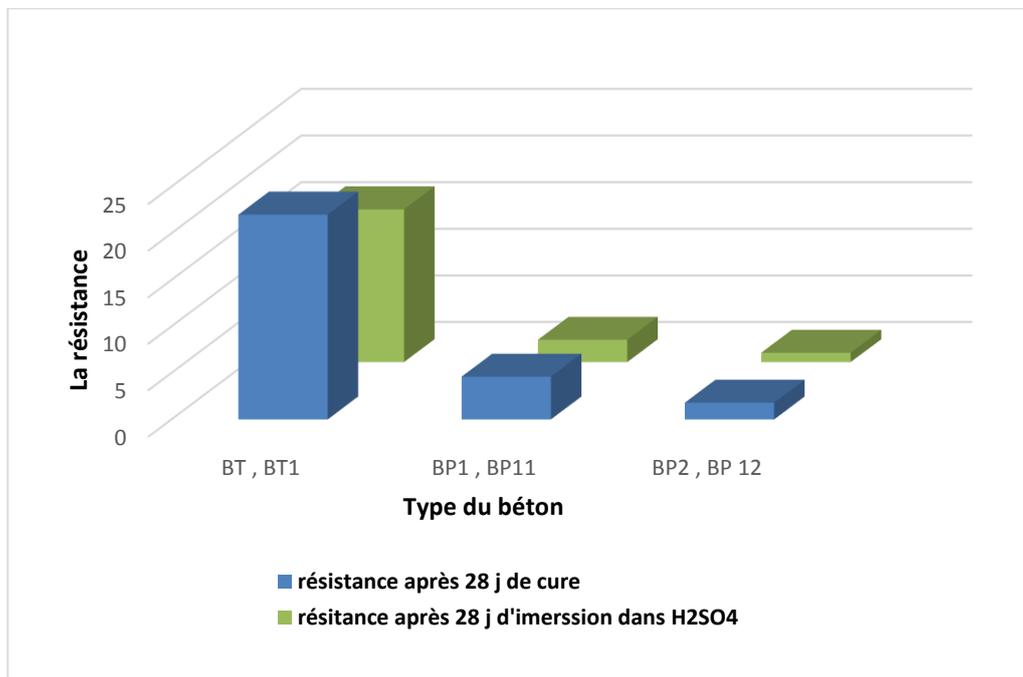


Figure IV-16 : Comparaison entre la résistance du béton après le cure 28 jours et les béton après immersion d'un la solution du H₂SO₄

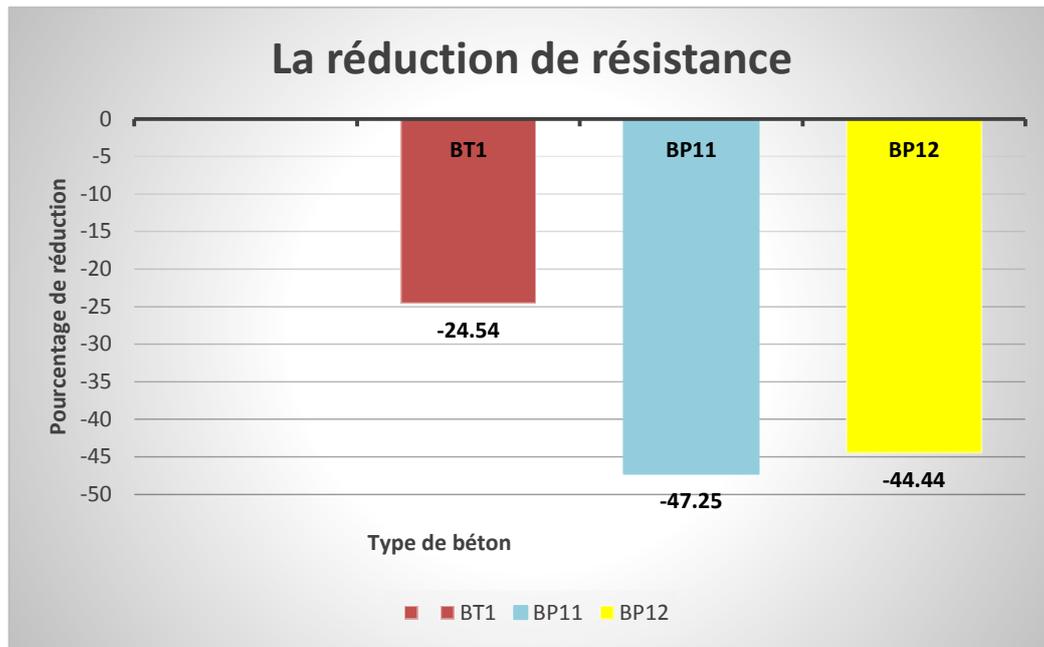


Figure IV-17 : Pourcentage de réduction pour le béton après l'immersion du 28 jours dans la solution du H_2SO_4

D'après les figures IV-16 et IV-17, on remarque :

- ✓ Une forte réduction de résistance à la compression pour les bétons soumis à l'acide sulfurique et notamment pour les bétons légers qui avoisine les 50 %.
- ✓ La réduction de la résistance est due à l'augmentation de la porosité du béton et à la décohésion entre les granulats Ceci est expliqué par la réaction acide-sulfate (formation de gypse et d'ettringite).

b- Milieu de nitrates d'ammonium NH_4NO_3

Tableau IV-15 : la résistance à la compression après 28 j d'immersion dans la solution de NH_4NO_3

Type de béton	Rc à 28 j (MPa)	Rc après 28 j d'immersion	%
BT2	22	25.5	15.90
BP21	4.6	4.7	2.20
BP22	1.8	2	11.11

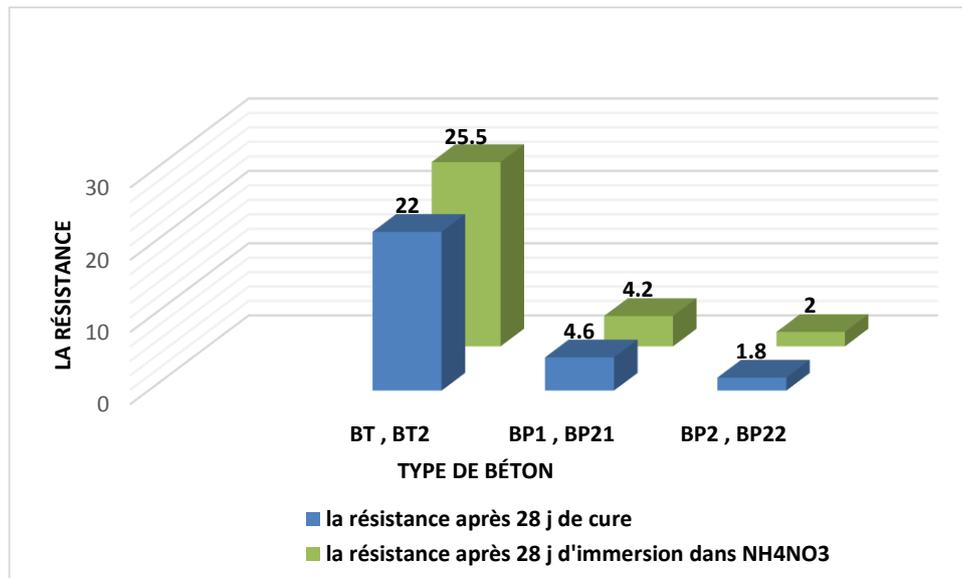


Figure IV-18 : Comparaison entre la résistance du béton après le cure 28 jours et les béton après immersion d'un la solution du NH4NO3

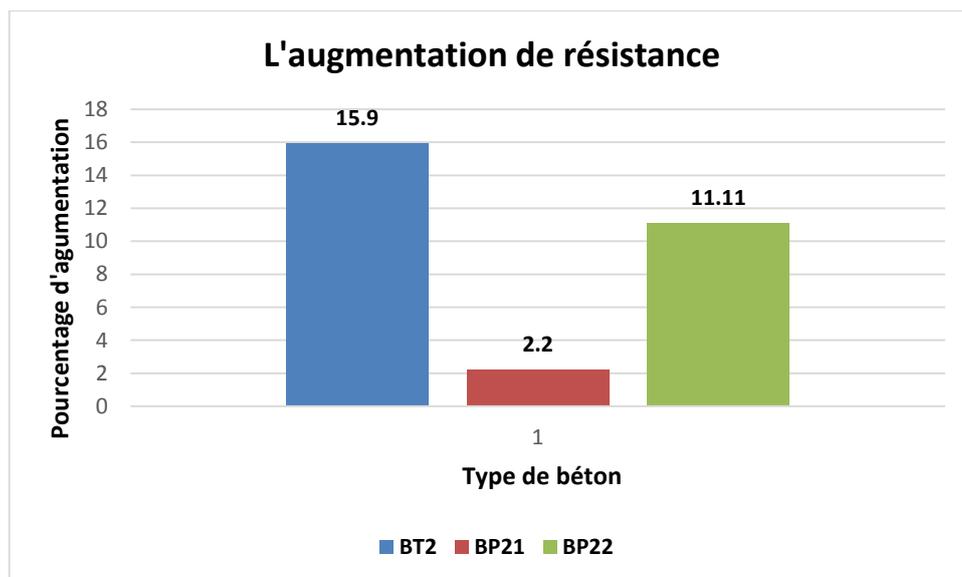


Figure IV-19 : Pourcentage d'augmentation pour le béton après l'immersion du 28 jours dans la solution du NH4NO3

D'après les figures IV-18 et IV-19 on remarque que :

✓ L'attaque chimique par le nitrate d'ammonium a pour effet : l'augmentation de la résistance à la compression des bétons de polystyrène avec un pourcentage significatif pour BP21 : +2.2 % et un taux élevé pour BP22 : +11.11%. On remarque aussi une grande augmentation de résistance pour le béton témoin (16 %).

- ✓ La variation du taux d'augmentation de résistance des bétons de granulats légers est due à la forte capacité du polystyrène à absorber la solution NH_4NO_3 .
- ✓ On remarque que le comportement du béton de polystyrène est différent de celui du béton de liège, que des études ont montrés une diminution de résistance à la compression.

c- Milieu de sulfate de sodium Na_2SO_4

Tableau IV-16 : la résistance à la compression après 28 j d'immersion dans la solution de Na_2SO_4

Type de béton	Rc à 28 j (MPa)	Rc après 28 j d'immersion	%
BT3	22	23	4.5
BP31	4.6	4.9	6.5
BP32	1.8	2.1	16.7

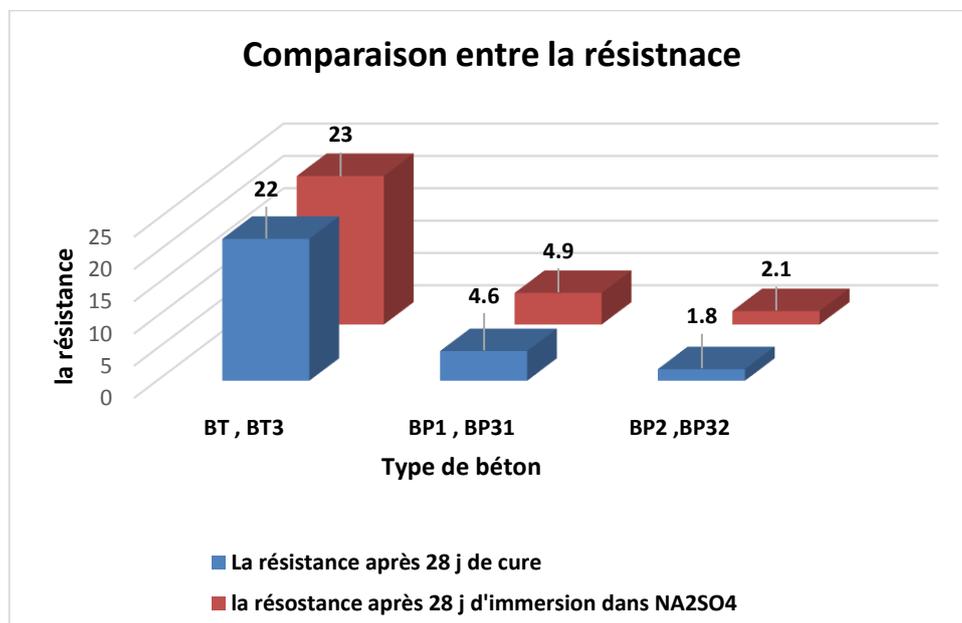


Figure IV-20 : Comparaison entre la résistance du béton après le cure 28 jours et les béton après immersion d'un la solution du Na_2SO_4

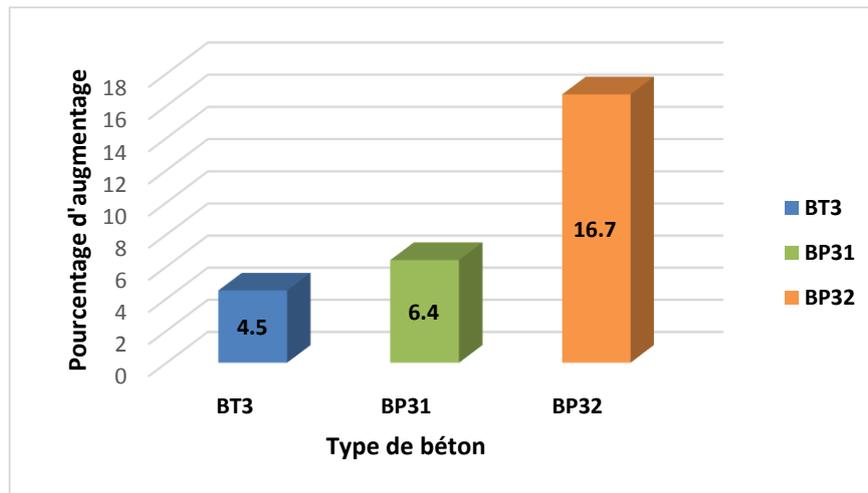


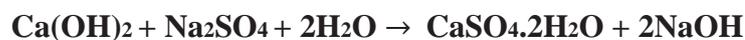
Figure IV-21 : Pourcentage d'augmentation pour le béton après l'immersion du 28 jours dans la solution du Na₂SO₄

D'après les figures IV-20 et IV-21,

✓ On remarque que : Pour toutes les éprouvettes de béton, il y a une augmentation de la résistance à la compression, en fonction de leur capacité à absorber la solution après

28 jours d'immersion, ceci est lié au pourcentage de granulats légers.

✓ D'autres études ont montrées que le sulfate de sodium attaque les éprouvettes en réduisant la résistance à la compression du béton, mais ce résultat est obtenu après une période d'immersion dépassant les 28 jours. Ceci est expliqué par la dissolution des substances calciques de la pâte de ciment et des agrégats de béton ce qui entraîne une augmentation de la porosité dans le béton, et la réduction de la cohésion entre les granulats [34],



d- Milieu de Hydroxyde de sodium NaOH

Tableau IV-17: la résistance à la compression après 28 j d’immersion dans la solution de NaOH

Type de béton	Rc à 28 j (MPa)	Rc après 28 j d’immersion	%
BT4	22	18.7	-15
BP41	4.6	3.6	-21.7
BP12	1.8	1.2	-33.3

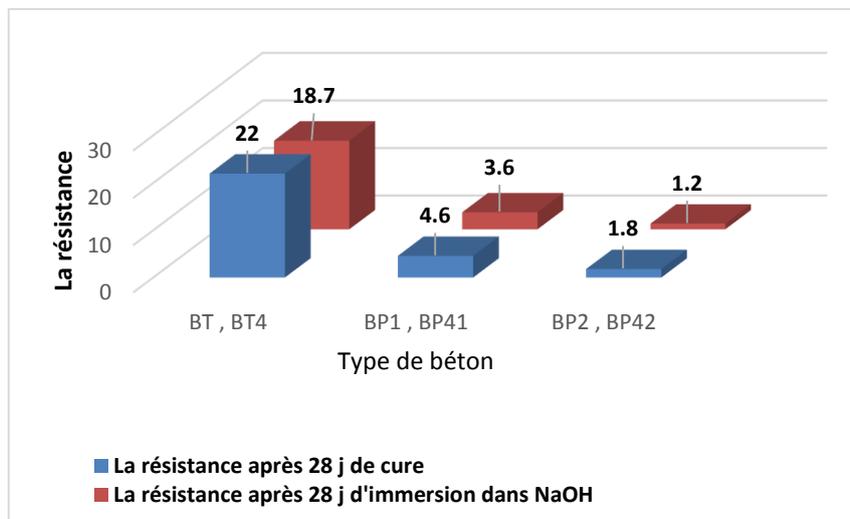


Figure IV-22 : Comparaison entre la résistance du béton après le cure 28 jours et les béton après immersion d’un la solution du NaOH

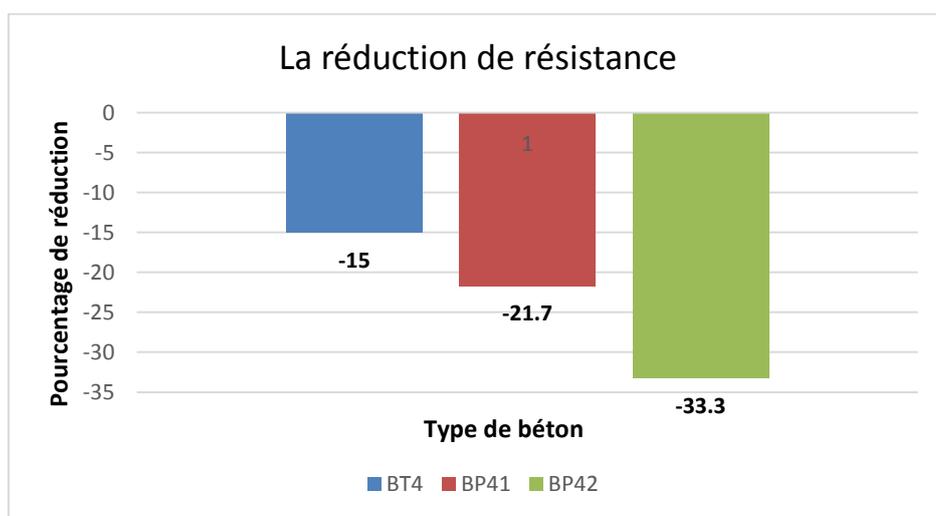


Figure IV-23 : Pourcentage du réduction pour le béton après l’immersion du 28 jours dans la solution du NaOH

D'après les figure IV-21 et IV-22, on remarque que :

- ✓ L'attaque chimique avec de l'hydroxyde de sodium a pour effet de réduire la résistance à la compression de divers bétons. Cette réduction est fonction du type de béton et de sa capacité d'absorber la solution de soude.
- ✓ Cette réduction va dans le même sens que celui de la perte de masse qui est un indice de dégradation physico-chimique.

IV-6-CONFRONTATION

Dans ce qui suit, on va comparer nos résultats avec ceux obtenus dans une autre étude et qui concerne les bétons légers à base de liège naturel.

Les résultats de compression entre toutes les caractéristiques et durabilité entre le béton léger de polystyrène et béton léger de liège suivant le tableau IV-18

- ✓ Pourcentage de la réduction (-)
- ✓ Pourcentage d'augmentation (+)

Tableau IV-18 : Résultats des caractéristiques physiques, mécaniques et de durabilité des bétons légers de polystyrène et de liège

Types de béton léger Les essais			de polystyrène		de liège	
			50 %	70 %	50 %	70 %
Ouvrabilité (cm)			9.5	8	8.5	6
Masse volumique (kg/m ³)			1540.7	1362.5	1735.0	1483.0
Résistance (MPa)	Compression	7 j	3.2	1.1	4.9	3.26
		28 j	4.6	1.8	7.30	7.10
	Flexion à 7 j		0.33	0.11	1.5	0.9
Réduction de résistance à la compression (gel-dégel) (%)			-27.5	-5.6	-17.8	-21.8
Variation de la résistance à la compression (attaques chimiques) (%)	H ₂ SO ₄		-47.25	-44.44	-45.2	-42.3
	NH ₄ NO ₃		+2.20	+11.11	-43.1	-11.3
	NA ₂ SO ₄		+6.5	+16.7	-24.7	-56.3
	NaOH		-21.7	-33.3	-1.4	-57.8

D'après le tableau IV-18, on remarque que :

- ✓ L'affaissement du béton léger de polystyrène est plus élevé que celui du béton de liège; ça veut dire que le béton de polystyrène est plus plastique.
- ✓ La résistance à la compression à 7 jours et 28 jours pour le béton de polystyrène est moins élevée que pour le béton de liège, ceci est dû à la nature et la dureté des granulats légers.
- ✓ La résistance à la flexion pour le béton léger de liège est meilleure que celle du béton léger de polystyrène.
- ✓ Le pourcentage de réduction de la résistance à la compression pour le béton léger de 70 % de polystyrène soumis au gel-dégel est le plus faible, ceci est peut être dû à la grande quantité de polystyrène dans le mélange qui a eu pour effet de limiter la propagation des fissures et par conséquent minimise la réduction de résistance à la compression.
- ✓ Les résultats de l'essai de compression après 28 jours d'immersion dans la solution H_2SO_4 pour le béton léger de polystyrène donnent un grand pourcentage de réduction de l'ordre de 50 %, ceci est dû à la dégradation des granulats de polystyrène soumis à l'acide sulfurique. Par contre le béton de liège n'a subis qu'une grande réduction : entre 42 et 45 %.
- ✓ Les résultats de l'essai de compression après 28 jours d'immersion dans les solutions NH_4NO_3 et Na_2SO_4 pour le béton léger de polystyrène montrent une augmentation résistance. Par contre, le béton léger de liège enregistre une réduction entre 11 et 43 % pour NH_4NO_3 et 25 et 56 % pour Na_2SO_4 . Ceci montre que les granulats de polystyrène résistent mieux au nitrate d'ammonium et au sulfate de sodium par comparaison aux granulats de liège.
- ✓ Les résultats de l'essai de compression après 28 jours d'immersion dans la solution $NaOH$, donnent une réduction de résistance pour les deux bétons : béton léger de polystyrène et de liège, mais notez que la diminution de la résistance dans le béton léger est de 70% de liège ce qui équivaut à 58% de plus que le béton léger 70% de polyester qui est égal à 33%. Ceci montre que la soude agit sur le polystyrène et le liège en réduisant leurs caractéristiques physico-mécaniques.

IV-7-CONCLUSION :

Dans ce quatrième chapitre de l'étude expérimentale, nous avons traité plusieurs points qu'on peut résumer comme suit :

- Les granulats légers étant plus absorbants que le gravier naturel, ceci entraîne une plasticité plus faible et donc un affaissement plus faible.
- L'introduction des matériaux légers (polystyrène) dans la composition de béton entraîne une diminution de la masse volumique du béton durci qui varie en fonction du taux de substitution.
- A 28 jours, la résistance à la compression et à la flexion du béton témoin est la plus grande par rapport aux bétons légers.
- A 28 jours, La comparaison entre la résistance à la flexion et à la compression, montre que les bétons légers présentent un pourcentage plus élevé que celui du béton témoin.
- L'étude de la durabilité à 50 cycles de gel-dégel a montré que la grande quantité de polystyrène dans le mélange a eu pour effet de limiter la propagation des fissures et par conséquent de minimiser la réduction de résistance à la compression par rapport le béton témoin.
- Après 28 jours d'immersion dans les solutions chimiques, tous les types de béton (béton témoin et béton léger à 50 % et 70 % de polystyrène) présentent une augmentation de résistance à la compression pour les deux solutions (NH_4NO_3 , Na_2SO_4), et une réduction de résistance à la compression pour les solutions : (H_2SO_4 , NaOH).



Conclusion générale



Conclusion générale

- L'utilisation des bétons légers dans le domaine de la construction est très bénéfique en terme de légèreté ce qui donne la possibilité de construire sur des sols de faible capacité portante et de diminuer la dimension des fondations en réduisant les charges permanentes.
- La formulation de bétons légers avec des granulats légers de polystyrène vise aussi à valoriser les déchets ménagers et industriels pour apporter des solutions aux problèmes de pollution et de dégradation de l'environnement.
- La caractérisation physique et mécanique des bétons légers de polystyrène a été menée sur deux formulations (taux de substitution de 50 % et 70 %) et l'étude de la durabilité des bétons de polystyrène consiste à suivre leur comportement vis-à-vis du phénomène de gel-dégel et des milieux agressifs.
- Concernant les granulats légers utilisés, on peut faire les remarques suivantes :
 - ✓ La masse volumique du polystyrène est beaucoup plus faible que celle du gravier, ce qui a permis de formuler des bétons légers.
 - ✓ L'absorption d'eau des granulats de polystyrène 68.75% est importante par rapport aux granulats naturels (graviers) 0.12 %, ceci influe sur l'ouvrabilité et la durabilité des bétons de polystyrène.
- Les résultats expérimentaux nous ont conduits aux conclusions suivantes :
 - pour le même rapport $E/C=0.6$, il a été noté qu'il y a une diminution de l'affaissement entre le béton témoin et les bétons légers. Ceci est dû à l'absorption d'eau par les granulats légers qui est plus importante que pour le gravier.
 - La masse volumique des bétons légers à base de polystyrène avec des taux de substitution de 50 % et 70 % reste dans le domaine des bétons légers : inférieure à 2000 kg/m^3 .
 - L'introduction des granulats légers de polystyrène dans le béton fait diminuer la résistance mécanique de celui-ci. Ceci est dû à la fragilité des granulats légers en comparaison aux graviers.

Conclusion générale

- Les résultats des résistances mécaniques des bétons légers et du béton témoin montrent que la baisse de résistance est fonction du pourcentage de substitution : 0, 50 % et 70 %.
- A 28 jours, le béton témoin donne une bonne résistance à la compression (22 MPa) suivi par le béton léger de 50% de polystyrène qui a donné une résistance faible de 4.6 MPa et enfin le béton léger de 70 % de polystyrène qui a donné la résistance la plus faible (1.8 MPa).
- A 28 jours, le béton témoin donne une bonne résistance à la flexion (5.4 MPa) suivi par le béton léger de 50% de polystyrène qui a donné une faible résistance de 2 MPa et enfin le béton léger de 70 % polystyrène qui a donné la résistance la plus faible (1 MPa).
- La comparaison entre la résistance à la flexion et la compression, montre que les bétons légers présente un pourcentage plus élevé que ce lui du béton témoin. Ceci est d'autant plus vrai que l'on augmente le pourcentage de granulats légers. Ce résultat est en concordance avec la bibliographie qui relie ce pourcentage à la légèreté qui est elle-même fonction du pourcentage de granulats légers.
- L'observation macroscopique des différents bétons permet de faire les remarques suivantes:
 - ✓ On remarque la bonne répartition des granulats légers sur toute le section des bétons légers BP1 et BP2.
 - ✓ Le polystyrène occupe la majorité de la surface de la section de béton léger BP2.
- Les résultats des essais de gel-dégel et des d'attaques chimiques permettent de faire les remarques suivantes :
 - 1- Gel-dégel :
 - ✓ Les symptômes de détérioration des différents bétons consistent à l'apparition de trous, l'écaillage des surfaces et des fissures qui se propagent au cours du temps.
 - ✓ La perte de masse augmente avec l'augmentation du pourcentage de polystyrène.

Conclusion générale

- ✓ L'utilisation d'une grande quantité de polystyrène dans le mélange, a eu pour effet de limiter la propagation des fissures et par conséquent de minimiser la réduction de résistance à la compression.

2- Attaques chimiques :

- ✓ L'immersion des éprouvettes dans les solutions chimiques pendant 28 jours a provoqué, suivant le type de solution, un certains nombres de phénomènes:
 - effervescence, - changement de couleur, - gonflement,
 - fissures, -augmentation de rugosité, - écaillage,
 - dépôts solides.
 - ✓ L'étude de la durabilité des bétons légers vis-à-vis des attaques chimiques a montré une baisse de résistance à la compression pour les solutions de H_2SO_4 et $NaOH$ et une augmentation de résistance à la compression pour les solutions de NH_4NO_3 et Na_2SO_4 .
- En comparant les résultats obtenus dans cette étude avec ceux obtenus dans une étude effectuée sur les bétons de liège, on peut dire que:
- Les caractéristiques mécaniques des bétons de liège sont meilleures que celles des bétons de polystyrène, ceci est dû à la nature et aux caractéristiques intrinsèques des granulats légers.
 - Le comportement vis-à-vis du gel-dégel est assez comparable: baisse des performances mécaniques due à l'apparition de fissures et de l'écaillage.

Les bétons de polystyrènes résistent mieux aux attaques chimiques et présentent même, parfois une augmentation de résistance, contrairement aux bétons de liège qui sont plus sensibles aux attaques chimiques

Références Bibliographiques

[1]: **SAITI_ISSAM** , « Étude d'un procédé d'élaboration d'un béton léger cellulaire à base de sable de dune de la région de GHARDAIA ».Thèse de magistère. UNIVERSITE OUARGLA. 2014

[2]: **Mme MOHELLEBI Samira Née BOUAZIZ** : « Caractérisation et Modélisation des paramètres physico-hygro-mécaniques d'un béton léger à base de granulats composites». THESE DE DOCTORAT. UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU 2014

[3]: **BENKHALFA.B**: «contribution a l'étude des bétons légers d'argile expansée pour des éléments armés préfabriqués».Thèse de magistère. Université d'Annaba. 1988.

[4]: **MELANIE SHINK**: «Compatibilité élastique, Comportement mécanique et optimisation Des bétons de granulats légers». Université Laval Québec Avril 2003.

[5]: **CONTANT.M**: «Confection de bétons légers la fabrication d'éléments architecturaux». Projet d'application présenté à L'école de technologie supérieure. Ecole de technologie supérieure L'université du Québec Édition. Montréal 14 Avril 2000.

[6]: " Béton léger", VUB – Matériaux de construction d'après-guerre,
<http://matériauxdeconstructiondapresguerre.be/material/lightweight-concrete>

[7] **Madani BEDERINA**, " Caractérisation Mécanique Et Physique Des Bétons De Sables A Base De Déchets De Bois", Thèse De Doctorat En Génie Civil, De L'université De Laghouat, 25 Avril 2007.5

[8] **SFBC** : «Mémento du béton cellulaire » Eyrolles juin 2005 France.

[9] **NEVILLE.A** : «Propriétés des bétons». Eyrolles. Paris, 2000

[10] **JOHN L, CLARKE**: «Structural lightweight aggregate Concrete »Edited by chief structural

[11]: **CEREZO.V:** «Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales». Thèse de doctorat en Génie civil. Université Lyon. 2005.

[12]: **Yang KE:** «Caractérisation et Modélisation des paramètres physico-hygro-mécaniques d'un béton léger à base de granulats composites». Thèse de doctorat en Génie civil. Université Cergy-Pontoise. 2008.

[13] "Béton léger", TECHNI.CH-Rapport technique / domaine du bâtiment - génie-civil
Contenu, Janvier 2014

[14] <http://www.guidebeton.com/b%C3%A9ton-leger>

[15]: **Nadia BENMANSOUR** « DEVELOPPEMENT ET CARACTERISATION DE COMPOSITES NATURELS LOCAUX ADAPTES A L'ISOLATION THERMIQUE DANS L'HABITAT »THESE doctorat ; L'UNIVERSITE HADJ LAKHDAR DE BATNA

[16]:www.tpe-combi.e-monsite.com/pages/i-les-particularites-de-ces-combinaisons/a-le-composant-principal-le-polyurethane.html

[17]:www.isolation.ooreka.fr/comprendre/polyurethane

[18]:www.prodestravaux.com/isoler-le-toit/materiaux-isolation/isolant-synthetique

[19]: www.energieplanete.fr/isolants-differents-types-mousse-resolique.html

[20]: **Nassima Sotehi:** «Caractéristiques Thermiques des Parois des Bâtiments et Amélioration de L'isolation». Thèse de doctorat en Génie civil. MENTOURI - CONSTANTINE. 2010.

[21]: **BEDERINA M.:** Caractéristiques mécaniques et physiques des bétons de sable à base de déchets de bois -Thèse de doctorat ENP Alger (2007)

[22]: **THOMAS.C:** « propriétés mécaniques et durabilité d'un béton léger»,-Thèse de doctorat UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC 2013

[23]: **Bentchikou, M** Contribution à l'étude et à l'élaboration de matériaux composites pour l'isolation thermique: Cas de béton de fibres de papiers recyclés ; thèse de doctorat 2008

[24]: **STEOPOE A.** (1970):: "La durabilité du béton", Eyrolles, Paris

[25]: **Melle BENSEKRANE Kaoutar**, Durabilité des ouvrages en béton destinés à l'évacuation des eaux usées dans la vallée de OUARGLA, mémoire de magistère, université de Ouargla 2012

[26] :**OUALIT, Mehena,** "Indicateurs de durabilité du béton dans le contexte Algérien" , mémoire de magistère, Université M'Hamed Bougara- BOUMERDES 2009

[27].Fiches techniques : Les constituants des bétons et des mortiers (TOME 1) , Ciments et bétons (Centre d'information sur le ciment et ses applications).

[28].**CHHAOUI Ramdane** : Durabilité des matériaux cimentaires vis-à-vis d'un environnement chimiquement agressif (Mémoire de Magister- USTMB d'Oran - 2008).

[29].**Saida BOUALLEG** : Effet des milieux agressifs sur les caractéristiques de durabilité des bétons et des matrices cimentaires (Mémoire de Magister Université Mohamed Boudiaf de M'sila-2004

[30].**KERBOUCHE** : Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques et la durabilité des mortiers (Mémoire de Magister- l'ENSET d'Oran-2009)

[31] **Dr. Ir. P. Boeraeve** : Cours de Béton armé

[32] **FD P 18-011**, "Fascicule de documentation "définition et classification des environnements chimiquement agressifs".

[33] **TANG L, NILSSON L .O Chloride**, "Diffusivity in high strength concrete at different ages", Nord Constr. Res. Vol. 11, n° 1, 1992 p.162-171.

[34] **Girardi F., Vaona W., Di Maggio R.**, Resistance of different types of concretes to cyclic sulfuric acid and sodium sulfate attack, *Cement & Concrete Composites*, 595–602, 2010

[35] **HERIHIRI .H.**, «Formulation et Caractérisation des Bétons Légers. ».Thèse de magistère. UNIVERSITE BISKRA. 2010

Références Normative :

NF P 18- 406, la norme a pour objet de définir l'essai de rupture par compression

NF P 18-451, la norme a pour objet de définir un essai des bétons frais dit « essai d'affaissement ».

NF P 18-555, la norme a pour objet de définir les modes opératoires pour mesure le coefficient d'absorption du granulat.

NF P 18-554 et 555, la norme a pour objet de définir les modes opératoires pour mesure la masse volumique du granulat.

NF P 18-573, la norme a pour objet de définir pour la détermination de la résistance la fragmentation d'un granulat grossier : l'essai Los Angeles

NF P18 – 598, la norme a pour objet de définir une caractéristique des sables intitulée «équivalent de sable».

NF EN 1097-2, la norme a pour objet de définir pour la détermination de la résistance la fragmentation d'un granulat grossier : l'essai Los Angeles

EN 12390-7, la norme a pour objet de définir de détermination de la masse volumique du béton durci par pesée hydrostatique.

EN 12620, la norme a pour objet de définir analyse granulométrique

GOST-87-10060, la norme rissien pour fait l'essai de durabilité du béton s'appelée gel-dégel



Annexe



