

TABLE DES MATIERES

<i>Dédicaces</i>	I
REMERCIEMENTS	III
RESUME	IV
الملخص	V
SUMMARY	VI
TABLE DES MATIERES	VII
LISTES DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS	X
LISTE DES TABLEAUX	XIII
LISTE DES FIGURES	XIV
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : BETONS LEGERS	3
I.1 INTRODUCTION :	4
I.2 Historique :	4
I.3 Bétons légers :	6
I.3.1 Définition.....	6
I.3.2 Classification	7
I.3.3 Types de bétons légers.....	9
I.3.4 Les granulats légers	13
I.3.5 Qualités des bétons légers	21
I.4 Le polystyrène expansé	Erreur ! Signet non défini.
I.4.1 Définition et origine du polystyrène.....	21
I.4.2 Les types et formes de polystyrène	22
I.4.3 Fabrication du polystyrène expansé	24
I.5 CONCLUSION	26
CHAPITRE II : PROPRIETES DES BETONS LEGERS	27
II.1 INTRODUCTION.....	28
II.2 Caractéristiques physiques	28
II.2.1 La masse volumique	28
II.2.2 L'absorption	29
II.2.3 La porosité.....	30
II.2.4 La légèreté	31
II.2.5 La rhéologie.....	32
II.3 Caractéristiques mécaniques	33
II.3.1 Résistance à la compression	34
II.3.2 Résistance à la traction	35

II.4	Caractéristiques thermiques et acoustiques	35
II.4.1	Propriétés thermiques	35
II.4.2	Propriétés acoustiques	38
II.5	Autres caractéristiques.....	41
II.5.1	Résistance au feu	41
II.5.2	Résistance au gel	42
II.6	Durabilité du béton léger	42
II.6.1	Définition.....	42
II.6.2	Indicateurs de la durabilité	43
II.7	CONCLUSION	44
	CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX	45
III.1	INTRODUCTION	46
III.2	Caractérisation des matériaux utilisés	46
III.2.1	Ciment	46
III.2.1.1	Propriétés physiques	47
III.2.1.2	Propriétés mécaniques	48
III.2.1.3	Analyses chimiques	48
III.2.2	Sable	48
III.2.2.1	Masse volumique.....	49
III.2.2.2	Equivalent de sable.....	51
III.2.2.3	Absorption du sable.....	52
III.2.2.4	Analyse granulométrique.....	54
III.2.3	Polystyrène	56
III.2.3.1	Masse volumique.....	56
III.2.3.2	Taille des billes.....	58
III.3	Méthodes de formulation.....	58
III.3.1	Formulation par la méthode des volumes absolus :.....	58
III.3.2	Formulation du fabricant « EDILTECO France » :.....	60
III.4	Préparation du béton léger.....	62
III.4.1	Préparation à la bétonnière	62
III.4.2	Préparation à la centrale à béton.....	63
III.5	CONCLUSION	63
	CHAPITRE IV : ETUDE DE CAS.....	64
IV.1	INTRODUCTION	65
IV.2	Caractéristiques physiques	65
IV.2.1	Caractéristiques physiques à l'état frais	67
IV.2.1.1	La rhéologie.....	Erreur ! Signet non défini.

IV.2.2	Caractéristiques physiques à l'état durcis.....	68
IV.3	Caractéristiques mécaniques	70
IV.3.1	Résistance à la compression	70
IV.3.2	Résistance à la flexion	71
IV.4	Caractéristiques thermiques.....	72
IV.5	Cas d'utilisation du béton léger à base de polystyrène expansé :.....	73
IV.5.1	Le polystyrène POLYTERM BLU FEIN	73
IV.5.2	Applications de POLYTERM BLU FEIN.....	75
IV.5.3	Formulations à base de POLYTERM BLU FEIN	75
IV.5.4	Caractéristiques du béton léger à base de POLYTERM BLU FEIN.....	76
IV.6	CONCLUSION	78
	CONCLUSION GENERALE	79
	BIBLIOGRAPHIE	81

LISTES DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

Abréviations :

LC : Lightweight Concrete

RILEM : International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures

PS : Polystyrène

HIPS : High Impact Polystyrene

PSE : Polystyrène expansé

GPPS : General purpose polystyrene

PSR : Polystyrène rigide

CFC : Chlorofluorocarbures

PSE-M : Polystyrène expansé moulé

PSX : Polystyrène expansé extrudé

AEA : Agent entraîneur d'air

SP : Superplastifiant

WR : agent réducteur d'eau

BA13 : Bords amincis 13

CEM : Ciment portland

PVC : Polychlorure de vinyle

PE : Polyéthylène

CT : Conductivité thermique

Symboles :

ρ : Masse volumique

R_c : Résistance à la compression

ρ_{bs} : Masse volumique sèche

E_{vo} : Quantité d'eau évaporable du béton

E : Quantité d'eau de gâchage

E_a : Quantité d'eau absorbée

Φ_g : Porosité inhérente

Φ_l : Porosité inhérente du liant

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)

V_t : volume total occupé par le matériau

C : Chaleur spécifique

λ : Conductivité thermique

a : Vitesse de transfert thermique

Π : Perméabilité d'un matériau

v : vitesse d'écoulement du fluide

η : viscosité dynamique du fluide

Q : débit volumique du fluide

Δl : épaisseur du matériau poreux (m)

S : section de passage du fluide (m^2)

ΔP : Différence de pression appliquée sur chaque face de l'échantillon

σ : La résistance traversée par l'air

ρ_{app} : Masse volumique apparente

ρ_{abs} : Masse volumique absolue

ESV : Equivalent de sable visuel

ESP : Equivalent de sable par le piston

Ab : absorption du sable

P : masse du polystyrène

α : Coefficient d'écartement (ou coefficient d'excès de mortier)

ρ_c : masse volumique absolue du ciment

ρ_e : masse volumique absolue de l'eau

ρ_p : masse volumique absolue du polystyrène

ρ_s : masse volumique absolue du sable

Abs : Absorption du béton

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

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

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1: Classification Des Bétons Légers En Fonction De La Densité	7
Tableau I-2: Classification des bétons légers selon le guide ACI 213R-87	7
Tableau I-3: Classification des bétons légers selon l'utilisation dans la construction	8
Tableau I-4: Les propriétés comparées des bétons cellulaires	10
Tableau II-1 : Classification de la porosité	31
Tableau II-2: Vibration recommandée en fonction de l'ouvrabilité du béton	33
Tableau II-3: Caractéristiques thermiques de quelques matériaux	37
Tableau II-4: Caractéristiques acoustiques de quelques matériaux	41
Tableau III-1: Propriété physiques du ciment MATINE (fiche technique)	47
Tableau III-2: Analyses chimiques du ciment MATINE (fiche technique)	48
Tableau III-3: Valeur de α en fonction de E/C	59
Tableau III-4: Formulation du béton léger « Polys Béto »	61
Tableau IV-1: Affaissement du béton léger	68
Tableau IV-2: Masse volumique du béton léger	69
Tableau IV-3: Absorption d'eau du béton léger	70
Tableau IV-4: Résistance à la compression du béton léger	71
Tableau IV-5: Résistance à la flexion du béton léger	72
Tableau IV-6: Formulation du béton léger à base de POLITERM	75
Tableau IV-7: caractéristiques du béton léger à base de POLITERM	77

LISTE DES FIGURES

Figure I-1: Représentation schématique des différents types de bétons légers	9
Figure I-2: Argile expansé (tiré de : jnina.tn).....	14
Figure I-3: Pierre ponce (tiré de : neobienetre.fr).....	15
Figure I-4: Pouzzolane (tiré de : aquaportail.com)	16
Figure I-5: Cendres volantes frittées (tiré de : aquaportail.com)	17
Figure I-6: Schiste expansé (tiré de : ecobiotex.fr).....	17
Figure I-7: Laitiers bouletés expansés (tiré de : ctpl.info).....	18
Figure I-8: Granulats de liège (tiré de : biosfaire-materiaux.com)	19
Figure I-9: Polystyrène expansé (photo prise au laboratoire).....	20
Figure I-10: Polymérisation du monomère de styrène (tiré de : Techniques de l'ingénieur, s. d.).....	22
Figure I-11: Origine du polystyrène pré-expansé	24
Figure I-12: Etapes d'expansion du polystyrène	25
Figure II-1: Trois types de porosité présente dans les matériaux	30
Figure II-2: Essai du cône d'Abrams (tiré de : wikipedia.com).....	32
Figure II-4: Conductivité thermique sèche et humide de deux bétons de bois DURISOL	38
Figure III-1: Ciment MATINE de Lafarge (photo prise du site lafarge.dz)	47
Figure III-2: Sable de Terga (photo prise au laboratoire)	49
Figure III-3: Masse volumique méthode du ballon (photo prise au laboratoire).....	50
Figure III-4: Essai de l'équivalent de sable (photo prise au laboratoire)	51
Figure III-5: Essai de l'absorption du sable (photo prise au laboratoire)	53
Figure III-6: Analyse granulométrique (photo prise au laboratoire).....	55
Figure III-7: Analyse granulométrique (Refus cumulés en fonction des diamètres)	55
Figure III-8: Billes de polystyrène expansé (photo prise au laboratoire)	56
Figure III-9: Masse volumique méthode du ballon (photo prise au laboratoire).....	57
Figure III-10: Sac de polystyrène expansé POLYS BETO (photo prise du site editelco.fr)	61
Figure IV-1: Béton 1	66
Figure IV-2: Béton 2	66
Figure IV-3: Béton 3	67
Figure IV-4: CT mètre	73
Figure IV-5: Eprouvettes (27x13x4) cm3	73
Figure IV-6: Logo de l'entreprise EDILTECO	Erreur ! Signet non défini.
Figure IV-7: Logo de l'entreprise « Polystyrène des oasis »	Erreur ! Signet non défini.
Figure IV-8: produit POLITERM BLU FEIN	74

INTRODUCTION GENERALE

Le monde a connu ces dernières années une avancée remarquable en ce qui concerne l'utilisation des nouvelles technologies dans tous les secteurs, tout comme le secteur de la construction. Mais le béton reste et s'impose comme l'ingrédient principal dans la réalisation des éléments structurels dans un projet de construction.

Ce matériau magique permet non seulement d'avoir la forme souhaitée et dessinée sur les plans mais aussi la résistance et la rigidité nécessaires pour la pérennité du matériau.

On ne cesse de trouver le béton dans pratiquement tous les éléments principaux et secondaires d'un bâtiment depuis les fondations jusqu'à la dernière dalle en passant par tous les poteaux intermédiaires. Ceci est dû aux caractéristiques mécaniques favorables que présente ce matériau, qui a permis l'atteinte des hauteurs de bâtiments à gratter le ciel.

Les performances mécaniques de ce matériau dépendent fortement de ses caractéristiques physiques, notamment de sa masse volumique qui reste parmi les sujets de recherches d'actualité. Cette caractéristique se manifeste par son poids important qui représente parfois une charge permanente considérable sur la structure. Ce paramètre devient dans certains cas une contrainte à ne pas dépasser surtout lorsqu'il s'agit de la rénovation d'une ancienne bâtisse.

L'inconvénient du béton réside parfois dans sa capacité à transmettre le flux de chaleur. Ceci est expliqué par la valeur importante de sa conductivité thermique, qui se répercute négativement sur l'enveloppe du bâtiment en réduisant ainsi son confort thermique.

D'où est venue l'idée du béton léger, sur lequel on substitue une partie de ses constituants par des matériaux légers. Cette procédure permet à la fois d'avoir un béton à caractéristiques mécaniques réduites, surtout lorsqu'il s'agit d'un élément non porteur, et d'avoir moins d'impact sur la structure en matière de poids. De plus, l'ajout des matériaux légers, telles que les microbilles de polystyrène, permet au béton, formant l'enveloppe du bâtiment, d'avoir de bonnes caractéristiques thermiques.

Toutes ces hypothèses ouvrent très grand les portes à une étude plus approfondie sur le béton léger en général, et le béton léger à base de microbilles de polystyrène en particulier pour permettre à la fin de vérifier ces hypothèses.

Pour cela, nous allons procéder dans le premier chapitre de notre étude, par définir les bétons légers. Nous présenterons les différents matériaux utilisés dans un béton léger, puis nous détaillerons petit à petit le béton léger à base de microbilles de polystyrène et son utilisation dans le bâtiment.

Le deuxième chapitre sera réservé aux caractéristiques potentielles du béton léger à base de microbilles de polystyrène et des potentiels avantages que peuvent apporter les microbilles de polystyrène au béton.

Le troisième chapitre sera consacré à la caractérisation de chaque matériau composant notre béton léger. Toute propriété peut s'avérer utile pour la détermination de la qualité de béton souhaitée. La seconde partie de ce troisième chapitre concernera quelques formulations du béton léger à base de microbilles de polystyrène ainsi que le mode opératoire du gâchage qui peut être préconisé.

Enfin, dans le quatrième chapitre, nous allons comparer les résultats obtenus par différentes formulations vis-à-vis des caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques du béton léger à base de microbilles de polystyrène. Nous terminerons ce chapitre par un cas innovant de l'utilisation des microbilles de polystyrène dans différentes formulations de bétons légers.

CHAPITRE I : BETONS LEGERS

CHAPITRE I : BETONS LEGERS

I.1 INTRODUCTION :

Le béton est le matériau pouvant apporter résistance et rigidité à nos structures. A l'opposé de ses nombreux avantages, il présente aussi quelques inconvénients notamment sa masse et son impact sur la répartition des charges sur la structure. A partir de cela, l'idée d'un béton léger s'est apparue pour rallier à la fois légèreté et rigidité aux éléments non porteurs du bâtiment.

Dans ce cas-là, la question qui se pose : qu'est-ce qu'un béton léger en général et un béton léger à base de microbilles de polystyrène en particulier ? Et quelles sont ses différentes formes d'application dans le bâtiment ?

Pour répondre à toutes ces questions, on va essayer dans ce chapitre d'expliquer ce qui rend un béton léger et donner des exemples sur les applications du béton léger.

On aura aussi la chance d'interpréter le béton léger à base de microbilles de polystyrène, le classer en fonction de ses différents types et parler des quelques applications du béton léger à base de microbilles de polystyrène dans des projets de construction.

I.2 Historique :

Le béton est un matériau artificiel, composé d'agrégats (le plus souvent de sable et de gravier), d'eau et de ciment. Lorsqu'on parle de « béton léger », on parle d'un béton avec un faible poids spécifique. Une densité réduite est obtenue en ajoutant des ingrédients spécifiques au mélange, ou en utilisant des techniques de production spéciales qui permettent une réduction de densité, soit 500 à 2000 kg / m³ pour le béton léger au lieu de 2000 à 2500 kg / m³ de béton « ordinaire » ou « classique » (ESCSI, 2002).

Au fil des années, le béton léger a connu plusieurs types avec des matériaux différents comme le polystyrène expansé, le liège, schiste argileux, l'argile ou des agrégats d'ardoise expansés. Ce produit remarquable est souvent utilisé aujourd'hui dans la construction de bâtiments, où, grâce à ses propriétés de légèreté, de durabilité élevée et d'imperméabilité, il répond parfaitement aux exigences techniques strictes de la construction dans la ville moderne ainsi que dans les formes esthétiques et artistiques, qui font de ces villes de meilleurs endroits pour vivre et travailler (ESCSI, 2002) (Chandre et al, 2002).

CHAPITRE I : BETONS LEGERS

Le béton léger a été utilisé dans la construction bien avant l'époque de l'Empire romain. Les premiers types de béton léger ont été fabriqués à partir de pierre ponce grecque et italienne comme agrégat léger (ESCSI, 2002) (Chandre et al, 2002). De la chaux éteinte ordinaire a été utilisée comme matériau cimentaire dans le mélange. En raison de la faiblesse évidente des matériaux, ces premiers bétons légers étaient loin d'avoir les performances structurelles que nous attendons et atteignons aujourd'hui. Cependant, ils étaient étonnamment durables, et des exemples de ces premiers bétons légers peuvent encore être trouvés dans diverses structures anciennes en Méditerranée (ESCSI, 2002).

Dans leur expansion militaire et leur colonisation, les Romains ont introduit l'utilisation de béton léger partout et chaque fois que des matériaux locaux appropriés tels que le calcaire étaient disponibles pour la production de chaux vive comme matériau de ciment (ESCSI, 2002).

De nombreux matériaux différents ont été utilisés dans le béton léger depuis l'époque romaine, et certains d'entre eux ont une qualité structurelle nettement meilleure que les matériaux romains. Cependant, jusqu'au XXe siècle, ces améliorations étaient liées à la résistance des matériaux de cimentation utilisés, et non à la lumière des granulats (ESCSI, 2002).

La première amélioration de la résistance du béton s'est produite pendant la période coloniale romaine, lorsque des activités de construction très dispersées étaient nécessaires, et dans certains cas, du calcaire impur de diverses qualités devait être utilisé pour préparer la chaux calcinée requise. Dans le cas de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer comme impuretés, la résistance du béton est nettement supérieure à celle de la chaux pure. Ce matériau de qualité supérieure a été appelé chaux de cendres, puis il a été appelé ciment romain dans toute l'Europe (ESCSI, 2002).

Les recherches sur les agrégats légers pendant la Première Guerre mondiale ont conduit à la production commerciale d'ardoise pour la première fois. Après la guerre, d'autres expériences ont été menées par des entreprises privées utilisant un petit four de 3- 1/2 x 25 pieds dans le sud du Kansas (ESCSI, 2002).

Dès juin 1919, l'ingénieur en chef de la « Turner Construction Company » à New York a pu suggérer que le béton léger pouvait entraîner des économies importantes dans la construction de gratte-ciel commerciaux en réduisant les besoins en acier du cadre. Lors de la 15e réunion de « l'American Concrete Institute » à Atlantic City en 1919, il a déclaré : "En plus de la

CHAPITRE I : BETONS LEGERS

rentabilité des armatures en acier, le poids plus faible des planchers du bâtiment permet d'économiser du béton dans les piliers (ESCSI, 2002).

Le premier grand projet utilisant du béton léger structurel a été entrepris en 1928 et 1929, sous la forme d'une extension au bureau de la Southwestern Bell Telephone Company à Kansas City. Le bâtiment avait été construit à l'origine comme une structure de 14 étages, et la société avait constaté que les fondations et la sous-construction supporteraient huit étages supplémentaires, en tenant compte de la charge morte supplémentaire du béton lourd conventionnel (ESCSI, 2002).

I.3 Bétons légers :

I.3.1 Définition

Lors de la construction d'un certain nombre de structures, la réduction de poids entraînera probablement des économies générales. L'utilisation d'agréments légers permet la production de béton dont la densité peut varier entre 500 kg / m^3 et 2000 kg / m^3 , mais plus la densité est faible, plus la résistance à la compression est faible. Elle n'est que de 2 à 5 MPa pour le béton de vermiculite avec une densité moyenne de 500 kg / m^3 , mais elle peut atteindre 40 MPa pour le béton d'argile à ardoise expansé avec une densité de 1700 kg / m^3 à 1900 kg / m^3 , avec des agrégats légers de bonne qualité ont été fabriqués (Festa et al, 1998) (Mehta, 1986).

Le béton léger peut être utilisé pour la construction de structures résistantes (poutres, dalles, poteaux, etc.) mais sera plus particulièrement utilisé pour la fabrication d'agglomérats, pour les bétons non porteurs ou à faible charge et pour le béton isolant. L'isolation est d'autant meilleure que la densité est faible.

Plusieurs ouvrages importants tels que des ponts en béton armé et en béton précontraint, des bâtiments, des toitures en voiles minces ont été réalisés en béton léger. Cependant, après une période de grande popularité, l'utilisation de béton léger est assez lente et surtout limitée aux éléments préfabriqués.

CHAPITRE I : BETONS LEGERS

I.3.2 Classification

Deux caractères de base peuvent définir le béton léger, les autres données nécessaires pour le calcul vont dépendre de ces deux caractères, il s'agit de :

- La masse volumique sèche, désignée par ρ_{bs} .
- La résistance à la compression à l'âge de 28 jours.

Les bétons légers sont classés par la norme EN 206 dans les six catégories de densités suivantes, fonction de leur masse en Kg/m^3 dans le (tableau I-1) (Festa et al, 1998) (Unal, 2007).

Tableau I-1: Classification Des Bétons Légers En Fonction De La Densité (Festa et al, 1998)

Classe de densité	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
Kg/m^3	901-1000	1001-1200	1201-1400	1401-1600	1601-1800	1801-2000

On retrouve une autre classification qui se base essentiellement sur la masse volumique puisqu'elle est étroitement liée avec la résistance, ce qui explique pourquoi la norme ACI 213R-87/13.141 classe les bétons en fonction de la masse volumique (entre 300 et 1900 kg/m^3) en trois catégories comme indiqué dans le (tableau I-2) :

Tableau I-2: Classification des bétons légers selon le guide ACI 213R-87

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

CHAPITRE I : BETONS LEGERS

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 qu'on retrouve dans le (tableau I-3) (RILEM, 1970) :

Tableau I-3: Classification des bétons légers selon l'utilisation dans la construction (RILEM, 1970)

Type de béton léger	De construction	De construction et d'isolation	D'isolation
Masse volumique (kg/m ³)	< 1800	Non précisée	Non précisée
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, il existe une classification suivant la masse volumique apparente du béton léger :

• Des bétons de remplissage :

La masse volumique apparente est comprise entre 300 et 1000 kg/m³, ces bétons ont une faible résistance à la compression et de bonnes caractéristiques thermiques (Saiti, 2014).

• Des bétons porteurs isolants :

On a une masse volumique apparente comprise entre 1000 et 1400 kg/m³, ils ont une résistance mécanique meilleure que les précédents avec des caractéristiques thermiques acceptables (Bidjocka, 1990). On les utilise généralement pour des éléments préfabriqués (Saiti, 2014).

• Des bétons de structure :

Pour une masse volumique comprise entre 1400 et 1800 kg/m³. On les utilise pour la constitution des structures grâce à leurs résistances mécaniques comparables à celles des bétons ordinaires. Tandis qu'ils ont des caractéristiques d'isolation faibles (Saiti, 2014).

I.3.3 Types de bétons légers

Le béton léger se caractérise essentiellement par sa faible densité, adaptable aux exigences, par son excellent rapport poids / résistance et par sa bonne isolation thermique, sa résistance à la chaleur et au feu, sa résistance au gel ainsi que son insensibilité générale aux agressions physiques et chimiques traditionnelles dans l'industrie de la construction (Hamad, 2014).

Pour développer du béton léger, deux aspects doivent être pris en compte :

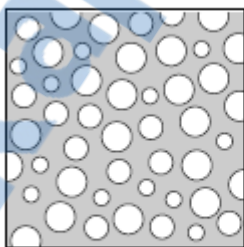
- La particularité de la formulation du béton léger.
- Sources d'ingrédients spécifiques utilisés pour fabriquer du béton léger, y compris des matériaux légers naturels, artificiels et recyclés.

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

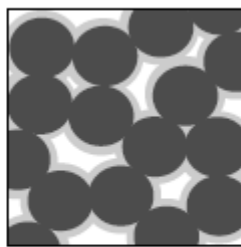
- Soit en agrégats.
- Soit dans la pâte de ciment.
- Ou entre des agrégats grossiers en éliminant les agrégats fins.

De cela, on se retrouve avec trois types de bétons légers, comme indiqué dans la (figure I-1) :

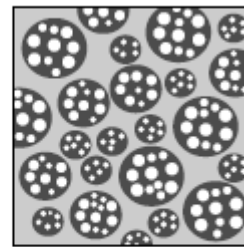
- Les bétons cellulaires.
- Les bétons caverneux.
- Les bétons de granulats légers.



Béton cellulaire



Béton caverneux



Béton de granulats légers

Figure I-1: Représentation schématique des différents types de bétons légers (Shink, 2003)

CHAPITRE I : BETONS LEGERS

a) Béton cellulaire :

Le béton cellulaire est le résultat d'une longue recherche commencée il y a plus de 150 ans. À cette époque, Zernikov a étudié les mortiers à base de chaux vive et de sable à haute température (Syndicat National du Béton Cellulaire, 2005).

Les bétons cellulaires sont généralement des mortiers remplis de petites bulles d'air. Celles-ci sont des mélanges de sable (silice ou granulats légers) et de ciment Portland. Les bulles se créent à l'intérieur de la pâte grâce aux agents moussants qui sont utilisés dans le béton pour produire un grand volume d'air (Laurent et al, 1995). Ces agents incluent la poudre d'aluminium ou le gâchage avec de l'eau savonneuse. La poudre d'aluminium réagit chimiquement avec le ciment et l'eau pendant le mélange pour donner, d'une part, un sel et, d'autre part, l'hydrogène qui compose les petites bulles. Ces processus nécessitent une haute précision et des calculs de dosage précis, ils doivent être réalisés en atelier et non sur site. On retrouve les propriétés dans le (tableau I-5).

Tableau I-4 : Les propriétés comparées des bétons cellulaires (Constant, 2000)

Masse volumique sèche	Résistance en compression	Résistance en flexion	Module d'élasticité	Conductivité thermique
Kg/m ³	MPa	MPa	GPa	W/m.K
450	3,2	0,65	1,6	0,12
525	4	0,75	2	0,14
600	4,5	0,85	2,4	0,16
675	6,3	1	2,5	0,18
750	7,5	1,25	2,7	0,2

Les résistances et le module d'élasticité augmentent avec l'augmentation de la masse volumique du béton (voir tableau I-5). En conséquence, il est possible d'obtenir une masse volumique souhaitée pour une résistance spécifique. Il convient de noter que la résistance à la flexion peut être améliorée en ajoutant des renforts ou des microfibrilles, celles-ci reprennent les

CHAPITRE I : BETONS LEGERS

efforts de flexion et aident à contrôler la microfissuration lors de l'application de la charge (Constant, 2000).

Le béton "cellulaire" ou "aéré" semble être le béton le plus susceptible de remplir objectifs du système de plancher projeté. Le béton cellulaire est un matériau moulable, malléable, léger, durable et relativement solide. Ce sont toutes des propriétés que les auteurs Agustin et al. (1990) démontrent comme des propriétés recherchées dans les logements à faible coût. Le béton cellulaire, non traité à l'autoclave, nécessite peu d'outils et de machinerie (Shink, 2003).

Les bétons cellulaires ont une résistance à la compression et une masse volumique faibles. Leur utilisation se voit au béton de remplissage dans des murs, plafonds, planchers ou comme matériaux de remblai (Constant, 2000).

b) Béton caverneux :

Ce béton est obtenu en retirant tout ou une partie du sable dans le béton (Connon, 1973). Un sans le 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. De larges pores sont créés à l'intérieur du béton par cette substitution, responsables de la diminution de la masse volumique et de la baisse de résistance à la compression (Constant, 2000).

Ces bétons sont constitués d'un mélange d'agrégats ordinaires ou légers et sont cimentés ensemble pour les lier. La pâte de ciment ne remplira pas tous les vides et l'air restera entre les agrégats. Par conséquent, ces bétons ont une porosité élevée, ils sont drainants. Ils sont fabriqués avec un minimum d'eau pour éviter de laver la pâte de ciment sur les granulats (Shink, 2003).

La résistance à la compression du béton caverneux est comprise entre 1,5 et 14 MPa. Semblable au béton de densité normale, la résistance au vieillissement augmente avec l'âge. La résistance à la flexion est généralement de 30% de la résistance à la compression, c'est-à-dire supérieure à celle du béton ordinaire (Malhotra, 1989). Le retrait du béton caverneux est nettement inférieur à celui du béton de densité ordinaire. Ce béton est très résistant au gel. Cependant, sa forte absorption d'eau le rend impossible à utiliser sur les fondations et dans les cas où il peut être saturé d'eau (Neville, 1963).

Leur utilisation vise généralement les particularités économiques occasionnées par la faible teneur en ciment et non pas la légèreté du produit. On les utilise pour la confection de murs porteurs de bâtiments domestiques et dans les panneaux de remplissage de cadres de



CHAPITRE I : BETONS LEGERS

structure. Aussi, leur utilisation s'étend sur les ouvrages qui demandent des propriétés drainantes, tels que les puits de captage des eaux de ruissellement. Puis, on retrouve la confection des éléments architecturaux (Constant, 2000).

c) Béton de granulats légers :

Le béton de granulats légers n'est pas une nouvelle invention dans la technologie du béton. Il est connu depuis les antiquités, il est donc possible de trouver plusieurs références liées à son utilisation. Nous avons utilisé des agrégats normaux d'origine volcanique tels que la pierre ponce, la scorie, etc. Les Sumériens l'ont utilisé dans le bâtiment de Babylone au 3ème millénaire A.C. Les Grecs et les Romains ont utilisé la pierre ponce dans la construction des bâtiments. Certaines de ces magnifiques structures de l'antiquité existent toujours, comme la cathédrale Sainte-Sophie à Istanbul, en Turquie, construite par deux ingénieurs, Isidore de Miletus et Anthemius de Tralles, commandée par l'empereur Justinien au IVe siècle après J.C. Le temple romain, Panthéon, qui a été érigé entre 118 et 128 après J.C; les Romains utilisaient des agrégats naturels légers et des vases en argile creuse pour leur "opus Caementitium" afin de réduire le poids. On le retrouve aussi dans la construction des pyramides à l'époque des Mayas au Mexique (Aslam et al, 2015).

Le béton est traditionnellement connu comme une matière grise lourde et froide avec une bonne résistance mécanique. Cependant, il est généralement connu que le béton n'est pas nécessairement seulement des blocs de gris lourds et tranchants. Il peut acquérir n'importe quelle forme, couleur, densité et résistance. La faible densité du matériau génère une bonne isolation thermique et permet de réduire le poids des structures. De plus, l'épaisseur des toits et des murs extérieurs peut être réduite. Par conséquent, si la même épaisseur est conservée, un degré d'isolation thermique plus élevé sera atteint. La masse volumique, par exemple, peut aller de 300 à 3000 kg / m³ ; conductivité thermique de 0,1 à 3 W / m.K ; et une résistance de 1 à 100 MPa ou même plus (Mueller et al, 2008). La densité est principalement contrôlée par le type d'agrégat utilisé. La résistance dépend également en partie du type de granulats utilisés pour fabriquer le béton (Aslam et al, 2015).

CHAPITRE I : BETONS LEGERS

I.3.4 Les granulats légers

On classe souvent les bétons légers sous quatre catégories suivant la nature des granulats légers utilisés dans la composition, on distingue alors :

- Les granulats légers naturels : la ponce ou la pouzzolane, matériaux volcaniques naturels de structures très poreuse.
- Les granulats légers ayant subi un traitement thermique : granulats d'argile, d'ardoise, de schiste ou de perlite expansée.
- Les granulats légers de matériaux artificiels : sous-produit de la combustion de charbon, le mâchefer ou des ordures ménagères.
- Les granulats légers de matériaux artificiels ayant subi des traitements spéciaux : granulats de nombreux déchets industriels, comme le laitier de haut fourneau que l'on peut expandre.
- Les granulats de type végétal : chanvre, paille, moelle de tournesol, le liège.

I.3.4.1 Fabrication des granulats légers :

On fabrique habituellement les granulats légers artificiels à base de matières premières naturelles (argile, schiste, ardoise) ou de sous-produits industriels (laitiers, cendres volantes) ; par l'expansion en four rotatif ou la cuisson sur grilles (Arnould et al, 1986).

L'expansion est alors générée par la formation d'un gaz à l'intérieur du matériau en fusion (entre 1000 et 1300°C) ; on conserve la structure poreuse par le refroidissement rapide du matériau. On peut obtenir ces granulats par le concassage des masses expansées ou par préformage avant l'expansion (moulage et déchiquetage de l'argile, pulvérisation des schistes et de l'ardoise, frittage des cendres volantes). Le moulage et le frittage aident à obtenir des granulats de forme sphérique (granulat bouleté ou roulé). La fabrication du laitier liquide à 1450°C est faite sans opération de concassage ni préformage ; il est alors projeté dans l'atmosphère au moyen d'un tambour rotatif tandis que des jets d'eau assurent l'expansion des particules en fusion (Malhotra, 1989).

Ces granulats manufacturés sont à l'heure actuelle les meilleurs granulats pour la fabrication des bétons légers de structure. On a un penchant pour les granulats roulés au lieu des granulats concassés car leur forme arrondie et leur faible absorption d'eau améliorent les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons légers (Ke et al, 2008).

CHAPITRE I : BETONS LEGERS

I.3.4.2 Quelques types de granulats légers :

a) Argile expansé :

Stephen HAYDE est le premier à avoir fabriqué de l'argile expansé et il déposa un brevet le 12 février 1918 (Arnould et al, 1986).

L'expansion des granulats revient à la réduction des oxydes de fer par les matières organiques. En effet, les argiles utilisées dans les industries contiennent à la fois des matières organiques et du fer en proportions importantes. Si l'un de ces composants est absent, il n'y a pas d'expansion (Morin et al, 1976).

Cependant, toutes les argiles ne gonflent pas. Il y en a seulement celles qui contiennent de la pyrite, de l'hématite ou de la dolomie. Dans la (figure I-2) on retrouve la forme de l'argile expansé.



Figure I-2: Argile expansé (tiré de : jnina.tn)

L'argile traitée (1150-1200 ° C) gonfle suite à l'évolution du gaz et en parallèle une peau externe se forme par vitrification de la surface du matériau. Lors du refroidissement, il existe un agrégat dur léger, c'est-à-dire des particules de forme arrondie à peau brune rougeâtre enveloppant une texture alvéolaire noirâtre. Par broyage, on obtient des granulats de différentes tailles et dont la masse volumique apparente varie entre 300 et 1000 kg/m³ (Herihiri, 2010).

b) Pierre ponce :

La pierre ponce est un matériau naturel d'origine volcanique qui se présente comme une accumulation de fragments de toutes tailles de roche volcanique acide. Il est obtenu par refroidissement rapide de la roche fondue. Ses éléments sont arrondis (grains d'un diamètre

CHAPITRE I : BETONS LEGERS

maximum de 10 à 20 mm). La pierre ponce est constituée de silice, d'alumine et d'alcalin. Il est de couleur grisâtre, avec une grande porosité et une faible densité (peut flotter sur l'eau) (Herihiri, 2010). Dans la (figure I-3) on retrouve la forme de la pierre ponce.



Figure I-3: Pierre ponce (tiré de : neobienetre.fr)

La ponce a une faible résistance à la compression due à sa faible masse volumique. Cependant on le retrouve comme béton de structure et surtout comme béton isolant.

c) Pouzzolane :

Ce nom est à l'origine donné aux cendres volcaniques claires et friables, disponibles à Pouzzoles à 25 km du Vésuve (Italie), dont le mélange avec la chaux a des propriétés hydrauliques (pouzzolanité) connues depuis l'Antiquité.

La pouzzolane est un agrégat minéral naturel léger d'origine volcanique (cristallisation du magma volcanique refroidi assez lentement) qui se présente sous la forme de roche formée de scories volcaniques (type strombolien). La roche est lavée, broyée et tamisée. Il est silico-alumineux (par exemple : $\text{SiO}_2 = 50\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 20\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 10\%$) (Herihiri, 2010) (Mansour et al, 2010). La pouzzolane est généralement de couleur rouge brun ou noir ou exceptionnellement grise (Arnould et al, 1986). Dans la (figure I-4) on retrouve la forme de la pouzzolane.



Figure I-4: Pouzzolane (tiré de : aquaportail.com)

Dans la matière première, il peut y avoir une différence de couleur des pouzzolanes d'une même carrière en raison de l'état d'oxydation du fer du matériau. En effet, les réactions d'oxydation à chaud sont plus ou moins avancées en fonction de la position des scories dans le cône (construit par le volcan), et ainsi on distingue les faciès «cœur de cône» de couleur rouge dominante et «bas- de-cone "de teinte plus foncée. Du point de vue chimique, ils correspondent à des magmas basaltiques basiques. La présence de grandes quantités de sulfures peut être la cause de graves dommages aux structures utilisant de la pouzzolane d'où ces zones doivent être identifiées et éliminées. Sa densité est légèrement supérieure à celle de la pierre ponce, de l'ordre de 700 à 900 kg/m³. Le béton reconstitué est peu plus dense et plus résistant que le béton ponce (Constant, 2000).

d) Cendres volantes frittées :

Les cendres volantes se présentent sous la forme d'une fine poudre gris noirâtre constituée de particules vitreuses sous formes sphériques. Elles peuvent être utilisées pour la fabrication d'agrégats légers de bonnes performances. Ces cendres sont obtenues en brûlant du charbon pulvérisé à environ 1500 ° C, utilisé dans les centrales thermiques. Dans la (figure I-5) on retrouve la forme des cendres volantes frittées.



Figure I-5: Cendres volantes frittées (tiré de : aquaportail.com)

Elles sont collectées à l'aide d'un séparateur pneumatique et électrostatique. Les cendres volantes sont composées de 50% de silice et 32% d'alumine (Herihiri, 2010).

e) Schiste expansé :

La composition chimique des schistes est à peu près la même que celle des argiles, sauf que les premières sont riches en carbone et que leurs températures de dilatation sont plus élevées. Les schistes expansés sont le résultat de l'expansion de différents types de schistes, y compris les schistes carbonifères et houillers, les schistes bitumineux, les schistes classiques ou même les ardoises (Cormon, 1972). Dans la (figure I-6) on retrouve la forme du schiste expansé.



Figure I-6: Schiste expansé (tiré de : ecobiotex.fr)

Plus l'expansion est importante, plus la température est élevée. Par exemple, la masse volumique en vrac est d'environ 1000 kg/m^3 à 1300°C comparativement à 380 kg/m^3 pour une température de 1450°C (Herihiri, 2010).

CHAPITRE I : BETONS LEGERS

Le béton à base de schiste est utilisé comme béton de structure puisqu'il a une bonne résistance à la compression.

f) Laitiers bouletés expansés :

Le laitier est un sous-produit de la production de fonte brute. Il se compose de silice, d'alumine et de chaux. Plusieurs méthodes permettent d'obtenir des agrégats légers. L'expansion la plus courante est la coulée de liquide dans un puits en béton dont le fond comporte de nombreuses entrées d'eau (une canalisation constituée d'une buse assurant une bonne répartition de l'eau sur toute la surface). Et puis l'évaporation de l'eau provoque une expansion. La roche résultante est ensuite concassée et tamisée (Arnould et al, 1986). Dans la (figure I-7) on retrouve la forme des laitiers bouletés expansés.



Figure I-7: Laitiers bouletés expansés (tiré de : ctpl.info)

Ainsi nous avons un laitier expansé, granulat alvéolaire et de couleur gris plus ou moins foncé avec une masse volumique allant de 600 à 900 kg/m³ (Herihiri, 2010).

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

CHAPITRE I : BETONS LEGERS

g) Liège :

L'une des ressources végétales qui peuvent être utilisées pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments est le liège. Le liège est l'écorce externe du chêne-liège, qui fleurit principalement dans le sud de l'Europe et en Afrique du Nord (Silva et al, 2005) (Gil, 2009). C'est un matériau naturel et renouvelable qui est récolté périodiquement, tous les 9 à 12 ans. Au cours de son cycle de vie, le chêne-liège produit trois types de liège, à savoir le liège vierge du premier décapage, le liège de reproduction du deuxième décapage et le liège de reproduction des récoltes suivantes (Silva et al, 2005).

C'est matériau cellulaire, présente plusieurs qualités telles que la légèreté, l'élasticité, l'imperméabilité aux gaz et aux liquides et de bonnes capacités d'isolation (Silva et al, 2005) (Knapic et al, 2016). Le liège de reproduction, qui a une surface lisse et une structure cellulaire uniforme, présente une qualité suffisante pour être utilisé dans la production de bouchons en liège, l'application de référence qui a le plus grand marché. Les principales applications de ce liège vierge sont généralement les panneaux de liège et les semelles de chaussures qui sont moins rentables que l'industrie des bouchons. Une partie du liège de reproduction restante est utilisée pour la production naturelle et expansée (après avoir subi 300 °C de température et 40 kPa de panneaux isolants sous pression. Maintenant, le reste est utilisé dans d'autres applications innovantes (Tedjditi et al, 2020). Dans la (figure I-8) on retrouve la forme des granulats de liège.



Figure I-8: Granulats de liège (tiré de : biosfaire-materiaux.com)

CHAPITRE I : BETONS LEGERS

Au cours de la dernière décennie, Bras & al. ont évalué les propriétés rhéologiques, mécaniques et thermiques de mortiers industriels en liège destinés à la correction des ponts thermiques. Dans cette étude, différentes doses (de 0 à 80%) de liège de 0,5 à 2 mm des granulés ont été testés. L'avantage d'utiliser le liège industriel par rapport au polystyrène expansé a été démontré. Moreira et al ont enquêté sur effet de différents dosages de ciment (150, 250 et 400 kg / m³) sur propriétés des chapes légères incorporant du liège expansé déchets de granulés. Moreira et al. (Moreira et al, 2014) ont signalé que la résistance à la compression des chapes légères variaient entre 0,12 et 1,98 MPa à 28 jours, tandis que la conductivité thermique de ces chapes oscillait entre 0,195 W / m. K et 0,318 W / m. K selon les dosages de ciment (Moreira et al, 2014).

h) Billes de polystyrène expansées :

Le polystyrène est le plus utilisé pour l'isolation thermique des bâtiments et l'emballage des produits industriels ou alimentaires. Les billes de polystyrène proviennent de matières premières contenant un pyrogène. Dans la (figure I-9) on retrouve la forme du polystyrène expansé.



Figure I-9: Polystyrène expansé (photo prise au laboratoire)

Ce dernier sous l'action de la chaleur passe à l'état gazeux et provoque ainsi une expansion. Ce matériau en mousse rigide a une très faible masse volumique (10 à 40 kg/m³) (Herihiri, 2010).

CHAPITRE I : BETONS LEGERS

I.3.5 Qualités des bétons légers

Ces types de matériaux sont principalement utilisés en préfabrication ainsi qu'en raison de certaines de leurs qualités (Festa et al, 1998) :

- La légèreté : réduction du poids mort, économies de main-d'œuvre, économies sur les fondations et les structures porteuses, réduction du coffrage et des étais, manipulation plus facile en préfabrication.
- Le pouvoir isolant : la même isolation thermique est donnée à 20% près par :
 - 10 cm de béton cellulaire.
 - 20 cm de béton plein de granulats légers.
 - 30 cm de béton caverneux.
 - 60 cm de béton plein classique.
- L'aptitude à se travailler après durcissement : certains bétons légers (bétons cellulaires, bétons de pierre ponce, de perlite ou vermiculite ...) peuvent se travailler comme le bois, à la scie, au vilebrequin et supportent le coulage.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MEMOIRE 

En revanche, l'inconvénient principal de ces bétons est la faiblesse de leurs résistances mécaniques qui interdit pratiquement leur emploi en béton armé, sauf en ce qui concerne certains bétons de granulats légers suffisamment dosés et bien étudiés avec emploi, de préférence, de sables naturels roulés (Festa et al, 1998).

I.4 Le polystyrène expansé

I.4.1 Définition et origine du polystyrène

Le polystyrène (PS) est obtenu par la polymérisation du styrène (figure I-10), un matériau issu de la pétrochimie. Plus de 90% de la production de styrène provient de la déshydrogénation de l'éthylbenzène fabriqué à partir du benzène et de l'éthylène (Vignes, 2006). Sa formule chimique est $(C_8H_8)_n$. Il ne contient que du carbone et de l'hydrogène comme éléments chimiques (Babu et al, 2003). Voici un schéma dans la (figure I-10).

Rapport-gratuit.com 
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MEMOIRE

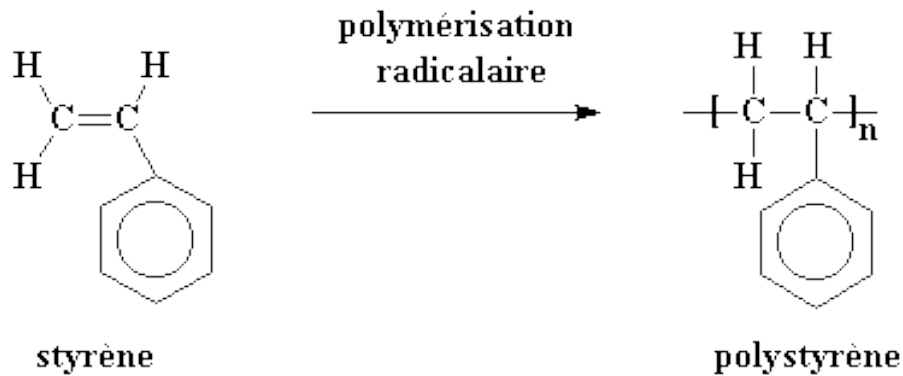


Figure I-10: Polymérisation du monomère de styrène (tiré de : Techniques de l'ingénieur, s. d.)

Les produits commerciaux sont fabriqués à partir du PS atactique caractérisé par une disposition irrégulière des atomes, il est amorphe et ne peut pas cristalliser. Deux procédés de polymérisation sont actuellement utilisés pour la fabrication du PS : la polymérisation radicalaire en suspension et la polymérisation radicalaire en masse. Pour empêcher la polymérisation à basses températures, pendant le stockage et le transport du styrène liquide, le monomère est stabilisé avec des inhibitions telles que le 4-tert-butylcatechol (Maul et al, 2000).

Le développement de la production industrielle du PS a commencé vers 1925. Les premiers succès ont été obtenus en Europe en 1930, plus précisément en Allemagne, par les usines *d'IG - Farbenindustrie*. Aux États-Unis, la première production à l'échelle industrielle a été réalisée en 1938 par *Dow Chemical Company* (Maul et al, 2000).

I.4.2 Les types et formes de polystyrène

Il existe trois formes de polystyrène : PS standard (cristal), le PS choc (*High Impact Polystyrene* (HIPS)) et le PS expansé (PSE).

a) Polystyrène standard (cristal) :

Ce PS est également appelé polystyrène à usage général (*General Purpose Polystyrene*(GPPS)) ou polystyrène rigide (PSR). Il est amorphe, transparent, brillant, rigide, cassant et peut être un polymère coloré. Il est souvent appelé cristal PS en raison de son aspect transparent. Il s'agit du premier PS obtenu après polymérisation. Toutes les autres formes du

CHAPITRE I : BETONS LEGERS

PS sont obtenues par modification de celui-ci. Le cristal PS peut également être façonné par injection et des pièces moulées, telles que des gobelets transparents ou des boîtiers de *Digital Versatile Disc* (DVD), sont obtenues. Dans ce cas, il porte le nom de PS injecté (Mahiout, 2014).

b) Polystyrène choc :

Ce matériau résulte de la polymérisation du styrène en présence d'un élastomère renforçant. Généralement, du polybutadiène y est inséré à cet effet. Le PS choc est également un polymère amorphe composé de deux phases distinctes : l'une continue, composée de PS, appelée matrice et l'autre discontinue comprenant des nodules de polybutadiène dispersés dans la matrice. La couleur du PS choc passe de translucide à opaque, car les deux phases n'ont pas le même indice de réfraction. Sa résistance au choc est aussi une conséquence de cette structure à deux phases. Le niveau de résistance est lié à la teneur en polybutadiène (Carrega, 2012). Les PS chocs supportent des impacts plus importants que le PS normal.

c) Polystyrène expansé :

Il existe deux types de PSE : le PS expansé moulé et le PS expansé extrudé.

Le polystyrène expansé moulé (PSE-M) est obtenu à partir d'un PS expansible composé de billes PS (billes sphériques) de type standard (cristal) contenant un agent d'expansion (un solvant à haute pression de vapeur, p.ex. Pentane) ajouté pendant la polymérisation du PS (Carrega, 2012).

Ces perles subissent une dilatation thermique (mélangée à de la vapeur) et peuvent atteindre 60 fois le volume des perles pré-expansées. Elles sont ensuite stabilisées puis soudées dans le moule par chauffage à la vapeur fraîche. Il est important de noter que les chlorofluorocarbures (CFC) ont déjà été utilisés comme agents gonflants. Après avoir été identifiées comme substances appauvrissant la couche d'ozone (SAO), elles ont été retirées du marché.

Le polystyrène expansé extrudé (PSX) est obtenu par extrusion. Il est surtout connu comme le *direct gazing* ou l'expansion physique. Il consiste à faire fondre le granulé cristallin PS sous pression dans une extrudeuse, puis à mélanger le ou les agents de nucléations et les agents gonflants liquides avec le polymère fondu ou du gaz. Le mélange est maintenu sous pression et poussé à travers la filière. La plaque ou la feuille résultante est ensuite refroidie

CHAPITRE I : BETONS LEGERS

(Techniques de l'ingénieur, 2008). Cette méthode permet la fabrication de matériaux faits de microbulles ; des isolants de plus haute densité sont ainsi obtenus.

I.4.3 Fabrication du polystyrène expansé

Le polystyrène expansé est fabriqué à partir de polystyrène expansible, qui est un plastique cellulaire rigide contenant un agent d'expansion (Mihlayanlar et al, 2008). L'EPS est obtenu à partir de pétrole brut comme indiqué sur le diagramme de la (figure I-11) ci-dessous (EPS packaging group, 2012).

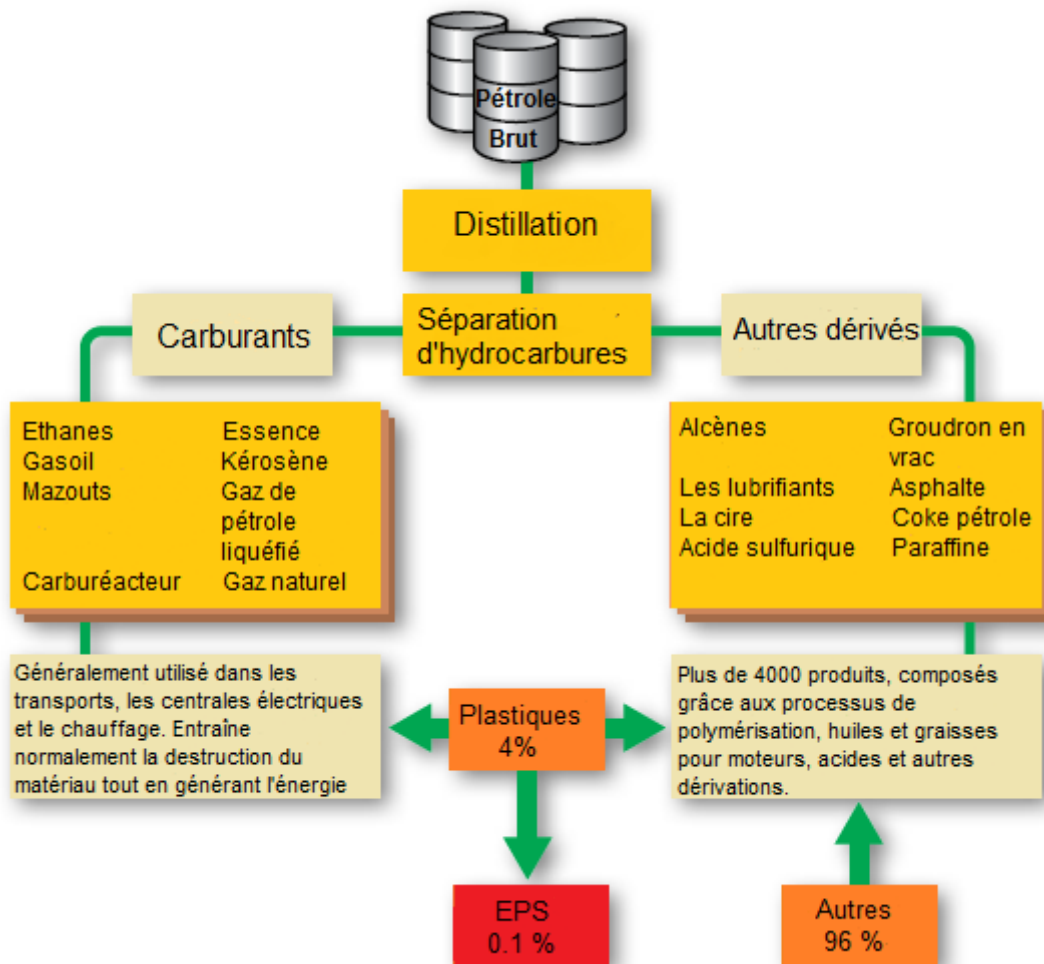


Figure I-11: Origine du polystyrène pré-expansé (EPS packaging group, 2012)

CHAPITRE I : BETONS LEGERS

Sur le diagramme qui va suivre on remarque que l'EPS nous vient des puits de pétrole par un processus chimique. Maintenant, nous allons voir ce qui se produit dans la transformation qui nous mène au polystyrène expansé (EPS). La conversion du polystyrène expansible en polystyrène expansé s'effectue en trois étapes comme indiqué dans la (figure I-12) (EPS packaging group, 2012).

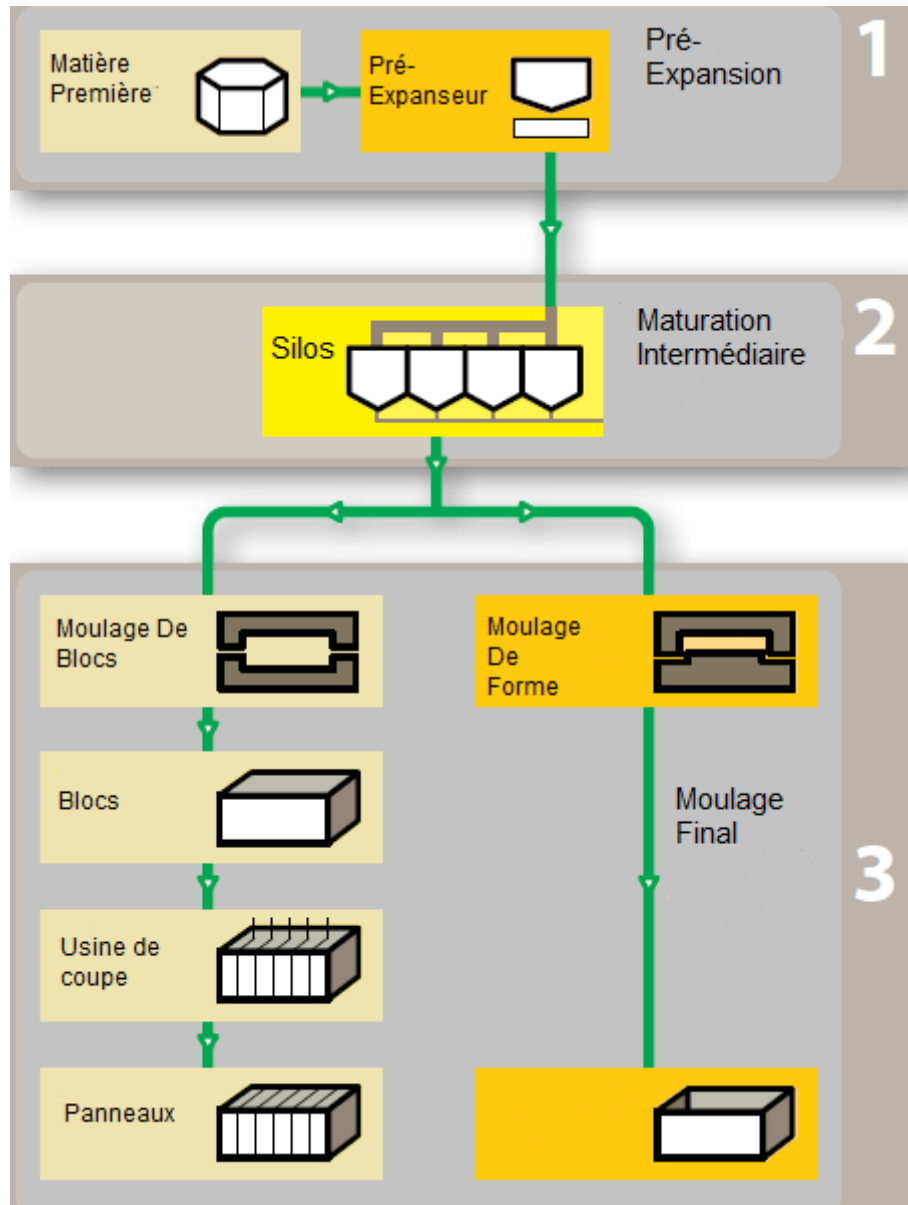


Figure I-12: Etapes d'expansion du polystyrène (EPS packaging group, 2012)

CHAPITRE I : BETONS LEGERS

a) Pré-expansion :

La matière première est chauffée dans des machines appelées pré-expandeurs avec vapeur à des températures comprises entre 80-100°C. La densité de la matière passe de quelque 630 kg/m³ à des valeurs entre 10 et 35 kg/m³. Au cours de ce processus de pré-expansion, les billes compactes de la matière première se transforment en perles de plastique cellulaire avec de petites cellules fermées qui retiennent l'air dans leur intérieur (EPS packaging group, 2012).

b) Maturation intermédiaire et stabilisation :

En ce qui concerne le refroidissement, les particules récemment expansées avec des vides doivent être compensées avec la diffusion de l'air. Ce processus est effectué pendant l'étape de maturation intermédiaire dans des silos aérés. Les billes sont séchées en même temps. C'est ainsi que les billes obtiennent une plus grande élasticité mécanique et augmentent leur expansion - très important dans l'étape suivante (EPS packaging group, 2012).

c) Expansion et moulage final :

Au cours de cette étape, les billes stabilisées et pré-expansées sont transportées dans des moules où elles sont à nouveau soumises à la vapeur afin qu'elles se lient entre elles. On obtient ainsi des formes moulées ou de grands blocs (qui sont ensuite sectionnés à la forme voulue comme des planches, des panneaux, des cylindres...) (EPS packaging group, 2012).

I.5 CONCLUSION

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

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

**CHAPITRE II :
PROPRIETES DES
BETONS LEGERS**

CHAPITRE II : PROPRIETES DES BETONS LEGERS

II.1 INTRODUCTION

Au cours du chapitre précédent, on a eu l'occasion de connaître ce que c'est qu'un béton léger, et on a parlé de ce qui peut rendre un béton léger.

Un béton léger, comme son nom l'indique, est connu par son poids réduit par rapport à un béton classique. Mais, quels sont toutes les caractéristiques qui peuvent distinguer un béton léger à base de microbilles de polystyrène ?

Dans ce chapitre nous allons découvrir les propriétés physiques et mécaniques de différents bétons légers. On parlera aussi des propriétés thermiques et acoustiques que peut apporter un béton léger. Et on terminera par parler de quelques autres caractéristiques telles que sa résistance au feu et sa durabilité dans le temps dans un bâtiment de construction.

II.2 Caractéristiques physiques

II.2.1 La masse volumique

La masse volumique a une définition un peu spéciale quand il s'agit d'un béton léger. En effet, trois masses volumiques différentes peuvent être définies : la masse volumique à l'état frais, la masse volumique à l'état séché à l'air et la masse volumique à l'état séché au four.

La masse volumique du béton fraîchement malaxé peut être facilement déterminée comme la masse volumique à l'état frais. Cependant, dans le processus de séchage à l'air, l'humidité sera perdue jusqu'à ce qu'elle atteigne une masse volumique à l'état séché à l'air. Si le béton est séché à 105 ° C, il a atteint sa masse volumique à l'état séché au four.

Ainsi, la masse volumique sèche pbs du béton léger, est la masse volumique qu'aurait le béton léger si toute l'eau ne servant pas à l'hydratation du ciment s'évaporerait. Elle peut être déduite de la masse volumique à l'état frais par la relation suivante :

$$\rho_{bs} = \rho_0 - E_{V0} \quad (\text{II} - 1)$$

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

CHAPITRE II : PROPRIETES DES BETONS LEGERS

Cette quantité peut être caractérisée par la relation suivante :

$$E_{V_0} = E + E_a - 0.25 C \quad (\text{II} - 2)$$

Où E désigne la quantité d'eau de gâchage, E_a la quantité d'eau absorbée par les granulats légers, et C la quantité de ciment. Il a été noté, que l'écart entre la masse volumique sèche ρ_{bs} et la masse volumique du béton frais ρ_0 varie entre 150 et 250 kg/m³ [8].

La masse volumique à l'état séché à l'étuve, peut être égale approximativement à la masse volumique sèche. Plusieurs recherches montrent en effet, que quel que soit l'humidité initiale dans les granulats, la masse volumique à l'état séché à l'air est supérieur de 50 kg/m³ à la masse volumique à l'état séché à l'étuve (Gesoglu et al, 2012).

Ainsi, la prise de poids d'un béton léger immergé, ne dépasse pas 40 kg/m³ et est de 30 kg/m³ pour un béton traditionnel. Les auteurs expliquent essentiellement, ce gain de poids, expliqué par le remplissage des vides du mortier, et non par la migration d'eau vers les granulats légers, les pores de surface étant en grande partie bouchés par le mortier, au moment du malaxage et au début de la prise, du fait des échanges d'eau entre le mortier et les granulats légers (Arnould et al, 1986).

II.2.2 L'absorption

L'absorption est un phénomène physique dans lequel le liquide migre de l'extérieur du milieu poreux vers l'intérieur en raison de la remontée capillaire. L'absorption conduit à une augmentation de la masse du matériau. Elle n'est possible que lorsque les capillaires du réseau poreux sont connectés pour permettre le transfert d'eau : c'est ce qu'on appelle des pores ouverts ou des pores connectés (les pores communiquent entre eux). Lorsque le matériau contient des pores emprisonnés comme du béton cellulaire, nous l'appelons pores occlus (porosité close ou porosité vacuolaire dénommée aussi porosité résiduelle). Ces pores ne sont pas impliqués dans le phénomène d'absorption (Veronique, 2005), dans la (figure II-1) on retrouve les différents types de porosité.

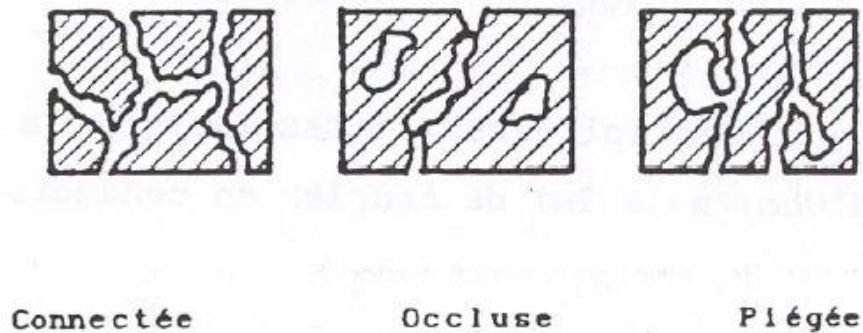


Figure II-1: Trois types de porosité présente dans les matériaux (Veronique, 2005)

II.2.3 La porosité

Généralement, le béton est composé de plusieurs éléments solides (granulats, liants) et de plusieurs types de vides dont la taille varie de quelques dizaines d'angströms (\AA) à plusieurs millimètres, selon la source de ces pores.

En raison de la présence d'air dans les particules, les granulats ont une porosité inhérente appelée Φ_g . Compte tenu de la taille caractéristique du capillaire (de l'ordre du μm), la porosité du granulat sera considérée comme la porosité microscopique (Zeghidi, 2018).

La matrice du liant contient également des vides d'air qui apparaissent lorsque l'hydrate se solidifie et que le matériau sèche. Nous parlons de l'air infra-liant, qui peut déterminer la porosité inhérente du liant Φ_l . La taille caractéristique des pores existant entre l'hydrate de Ca (OH) 2 ou C-S-H varie entre $0,01 \mu\text{m}$ et $5 \mu\text{m}$ et la taille des pores créés par l'agent entraîneur d'air varient entre $5 \mu\text{m}$ et $1000 \mu\text{m}$. L'air intra-liant sera également considéré comme du micro-air (Zeghidi, 2018).

$$\Phi_l = \frac{v_{vide}}{v_{liant}} \quad (\text{II} - 3)$$

Avec :

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

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

CHAPITRE II : PROPRIETES DES BETONS LEGERS

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

$$\Phi_{\text{meso}} = \frac{v_{\text{vide}}}{v_t} \quad (\text{II} - 4)$$

Avec :

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

Vt : volume total occupé par le matériau (m³) La porosité d'après est de l'ordre de 9% d'un béton hydraulique, de 36% d'un béton d'argile expansé, de 75 à 82% d'un béton cellulaire et de 52% d'un béton de bois (Veronique, 2005).

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-1) (Bedrina et al, 2012).

Tableau II-1 : Classification de la porosité (Zeghidi, 2018)

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

II.2.4 La légèreté

Le premier résultat de l'utilisation du béton léger est (au moins) une réduction de la masse volumique du béton de 20 à 30%. La masse volumique du béton hydraulique est d'environ 2300 kg / m³, tandis que la masse volumique du béton d'argile expansée est d'environ 1600 kg/m³ et la masse volumique du béton de bois est comprise entre 600 et 900 kg / m³. Le béton cellulaire varie entre 350 et 650 kg / m³ (Veronique, 2005).

L'avantage est que les bétons légers sont des matériaux faciles à mettre en œuvre et à traiter lorsqu'ils sont vendus sous forme de blocs de béton. De plus, ce matériau léger nécessite moins de fondations lors de l'application (Veronique, 2005).

II.2.5 L'ouvrabilité

On parle maintenant de l'ouvrabilité, qui est une propriété importante du béton frais, elle détermine le rapport contrainte-déformation du matériau. La détermination de l'ouvrabilité du béton est nécessaire pour obtenir un béton de bonne qualité.

Les caractéristiques de base qui définissent l'aptitude au traitement comprennent la viscosité, la cohésion, la fluidité, la stabilité et la compactabilité. L'Université de technologie de Sydney a mené des recherches approfondies sur la production et les performances du béton de polystyrène. En conséquence, il a été constaté que l'ouvrabilité du béton de polystyrène expansé peut être classée en fonction de l'indice de compactage (Calais, 2013).

L'ouvrabilité se reflète dans la capacité du béton à remplir correctement tous les espaces du coffrage et à assurer un bon enrobage des armatures. La maniabilité du béton est généralement évaluée par le test du cône d'Abrams, dans lequel le béton est placé dans un moule en cône, et une fois le moule retiré, l'affaissement du béton peut être évalué pour sa maniabilité. Placer le béton en 3 couches d'égale épaisseur dans le moule et percer chaque couche avec une tige à raison de 25 coups. Ensuite, on enlève le cône sans secousses (Zeghidi, 2018), la (figure II-2) nous montre l'essai de l'affaissement.

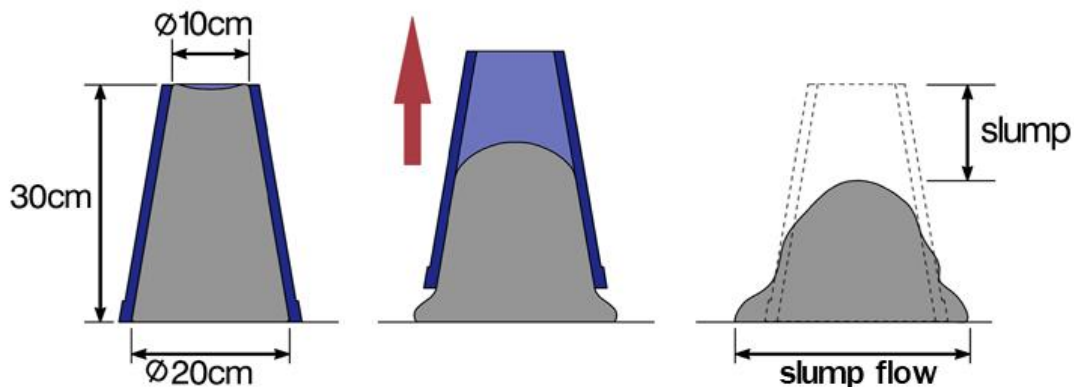


Figure II-2: Essai du cône d'Abrams (tiré de : wikipedia.com)

En mesurant l'affaissement obtenu, on détermine une appréciation de la maniabilité du béton et recommandation de sa mise en œuvre suivant le (tableau II-2).

Tableau II-2: Vibration recommandée en fonction de l'ouvrabilité du béton (Zeghidi, 2018)

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

II.3 Caractéristiques mécaniques

Les granulats légers modifient les performances et le niveau de performance mécanique du béton. En fait, les granulats légers sont poreux, ils sont donc moins résistants que les granulats ordinaires. Par conséquent, par rapport aux matériaux contenant des granulats rigides, le fonctionnement mécanique et les modes de rupture du béton léger changent (Chi et al, 2003).

Si le béton contient des granulats rigides plus résistants que le mortier, ceux-ci constitueront des difficultés pour le système. La contrainte exercée sur le matériau provoque une déformation importante du liant, tandis que la contrainte dans le granulat est négligeable. Par conséquent, une zone de concentration de contraintes est générée dans le mortier et cette zone peut se fissurer. Etant donné que l'adhérence entre le granulat et le mortier n'est pas suffisante pour résister au niveau de contrainte appliquée, une fissuration du mortier se produit autour des particules décollées de la pâte de ciment. Par conséquent, la résistance du béton est contrôlée par la résistance de la zone servant d'interface entre le mortier et le granulat rigide (Chi et al, 2003).

Au contraire, dans le cas d'un béton léger contenant des granulats de faible résistance, la contrainte se propage à travers la pâte, contournant la «faiblesse» du matériau. Le mortier est soumis à des contraintes élevées, de sorte que la déformation de la pâte et du granulat est très importante. Une fois les granulats écrasés, ils ne participent plus vraiment à la résistance du

CHAPITRE II : PROPRIETES DES BETONS LEGERS

matériau et le mortier finit par céder. Par conséquent, la résistance à la traction du granulat contrôle la résistance à la compression du béton léger. Ce mode de rupture est possible car les granulats légers ont une surface poreuse plus grande, ce qui crée une excellente adhérence entre la pâte et le grain. Ce n'est donc pas la liaison au niveau de la surface de contact qui est détruite comme dans le cas de granulats rigides mais le granulat qui cède (Chi et al, 2003).

La diversité du béton léger apporte une large gamme de densité et de résistance. La plage de densité du béton de polystyrène à faible teneur en ciment est de 250 kg/m^3 , et la plage de densité de certains bétons d'argile expansée peut atteindre 1800 kg/m^3 . Corrélativement, on constate une évolution des résistances à la compression de 1 jusqu'à 30, voire 40 MPa (Zeghidi, 2018).

La résistance à la traction est 9 à 10 fois inférieure à la résistance à la compression du béton traditionnel. Le béton léger peut atteindre un pourcentage plus élevé : R_c est d'environ 35 à 40% du béton de bois et ses granulats sont comme des fibres pour armer le béton (Zeghidi, 2018).

Le module d'élasticité, qui caractérise la loi de comportement de la déformation et de la charge du matériau, est inférieur à celui du béton plus lourd, ce qui conduit à une déformation plus forte des pièces fléchies. Cette excellente déformabilité a amélioré la résistance aux chocs et aux vibrations (Zeghidi, 2018).

II.3.1 Résistance à la compression

L'utilisation de granulats légers et la formulation de béton correcte peuvent obtenir une résistance à la compression comparable à celle du béton traditionnel. Au fil des ans, le développement des connaissances et de la technologie du béton a amélioré la performance du béton, y compris la performance du béton léger. Par exemple, l'utilisation d'additifs minéraux (fumée de silice, cendres volantes, scories) et d'adjuvants (agent entraîneur d'air, AEA, superplastifiant, SP, agent réducteur d'eau, WR et accélérateur de solidification) peut être particulièrement envisagée pour maintenir un bon fonctionnement tout en réduisant la possibilité de rapport E / L (Taleb et al, 2018).

CHAPITRE II : PROPRIETES DES BETONS LEGERS

Dans le cas du béton léger, le granulats (léger) est différent du béton conventionnel et sa résistance est généralement inférieure à celle du mortier. D'autre part, en raison de sa surface poreuse et de l'adhérence qui en résulte, il y a une bonne adhérence entre le mortier et le grain. Donc la rupture passe par la destruction des granulats légers, sur le plan où une grande quantité de granulats est coupée (Calais, 2013).

II.3.2 Résistance à la traction

Comme le béton ordinaire, le béton léger à la traction est assez faible. Cela est particulièrement vrai pour le béton léger, car la propagation des fissures peut se produire à travers les granulats. Des résistances à la traction par fendage de 3,3 à 4,2 MPa pour des bétons d'une masse volumique de 1940 kg/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 (Calais, 2013).

II.4 Caractéristiques thermiques et acoustiques

II.4.1 Propriétés thermiques

La conductivité thermique λ est le flux thermique par mètre carré, elle traverse un matériau d'un mètre d'épaisseur et la différence de température entre les deux côtés est de 1 degré. En agitant les molécules qui composent le matériau, cette propagation d'énergie se produit dans le solide. Par conséquent, la conductivité thermique λ est une quantité inhérente au matériau, qui ne dépend que de sa composition et de sa microstructure.

En raison de la disposition de la phase solide (squelette granulaire) et du collage du liant, le béton classique à base de granulats rigides contient de l'air. Cependant, l'air immobile conduit mal la chaleur. Par conséquent, des bétons à base de granulats légers ont été développés car ils peuvent augmenter le rapport volumique de l'air (c'est-à-dire la porosité) dans le matériau en ajoutant de l'air à l'intérieur des particules (c'est-à-dire des granulats). A titre de comparaison, la conductivité thermique du béton hydraulique ($\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$) est de 2,0 W/m.K, tandis que la conductivité thermique du béton d'argile expansée ($\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$) est de 0,60 W/m.K (Chi et al, 2003).

CHAPITRE II : PROPRIETES DES BETONS LEGERS

Cependant, la relation entre la porosité et la faible conductivité thermique doit être déterminée en considérant un autre mode de transfert de chaleur, la convection. Ce dernier convertit le transfert de chaleur entre un solide fixe et un fluide en mouvement. Lorsque le matériau contient un grand réseau de pores connectés, l'air peut le traverser et le transfert de chaleur par convection devient important. 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 (Chi et al, 2003).

Le deuxième élément qui peut caractériser les propriétés thermiques des matériaux est la chaleur massique ou chaleur spécifique C , en $J/kg.K$. Cette quantité représente la chaleur nécessaire pour augmenter la température de l'unité de masse de $1^\circ C$. Plus la chaleur spécifique est élevée, plus le matériau a besoin d'énergie pour élever la température. Par conséquent, il sera moins sensible aux changements de température dans l'environnement extérieur. Un coefficient C plus élevé convertira une forte inertie thermique, donc lorsque les conditions externes changent, la tendance au changement du matériau est faible. Par conséquent, il agit comme un régulateur de température à l'intérieur de la structure (Chi et al, 2003).

Enfin, la diffusivité a ($J/m.K$) est définie par la conductivité λ et la chaleur spécifique C . Cette quantité caractérise la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans le corps. Plus la valeur de a est faible, plus la chaleur met du temps à traverser le matériau.

$$a = \frac{\lambda}{\rho C} \quad (II - 5)$$

Ainsi, le pouvoir isolant du matériau dépend non seulement de la valeur de λ mais également de la vitesse de transfert thermique traduite par a . Dans le (tableau II-3) on retrouve les caractéristiques thermiques de quelques matériaux.

CHAPITRE II : PROPRIETES DES BETONS LEGERS

Tableau II-3: Caractéristiques thermiques de quelques matériaux

	ρ (kg/m ³)	porosité ϕ	C (J/kg.K)	λ (W/m.K)
Air	1.2		1000	0.026
Eau liquide	998		4180	0.602
Cuivre	8900		390	400
Contre-plaqué	700		1500	0.12
Béton hydraulique	2330	8%	1050	1.8 à 2
Béton cellulaire	350 à 650	75% à 82%	880	0.16 à 0.33
Béton argile expansé	1600	36%	900	0.46
Béton de bois	600 à 900	52%	1200	0.09 à 0.3
Brique	1800		860	1.15
Enduit de chaux	1600		850	0.7
Liège expansé	110		2000	0.037
Plaque de plâtre BA13	825		1008	0.25

Dans le (tableau II-3) nous avons comparé quelques matériaux par rapport à leurs caractéristiques thermiques. On constate par exemple, qu'un béton cellulaire est plus poreux qu'un béton de bois et possède une conductivité thermique plus faible. En revanche, sa diffusion de chaleur est plus rapide.

Le dernier élément lié aux propriétés thermiques du béton léger est lié à la capacité d'absorption de ces matériaux, qui peuvent contenir de grandes quantités d'eau. L'eau est un excellent conducteur, elle peut améliorer la conductivité thermique du béton, remplaçant ainsi l'air isolant. Divers travaux permettent de corréliser la conductivité thermique λ et la teneur massique en eau ω du béton léger à travers des formules empiriques. Des mesures

CHAPITRE II : PROPRIETES DES BETONS LEGERS

expérimentales sur béton de bois montrent que lorsque la teneur en eau ω est de 30%, la conductivité thermique augmente de 40% à 90%. Cependant, le changement de λ dépend de la densité sèche, car la même teneur massique en eau ω des deux bétons de bois ne représente pas le même volume d'eau dans chaque matériau humide. Cela permet d'expliquer les différences que l'on peut observer dans la (figure II-4) ci-dessous (Chi et al, 2003).

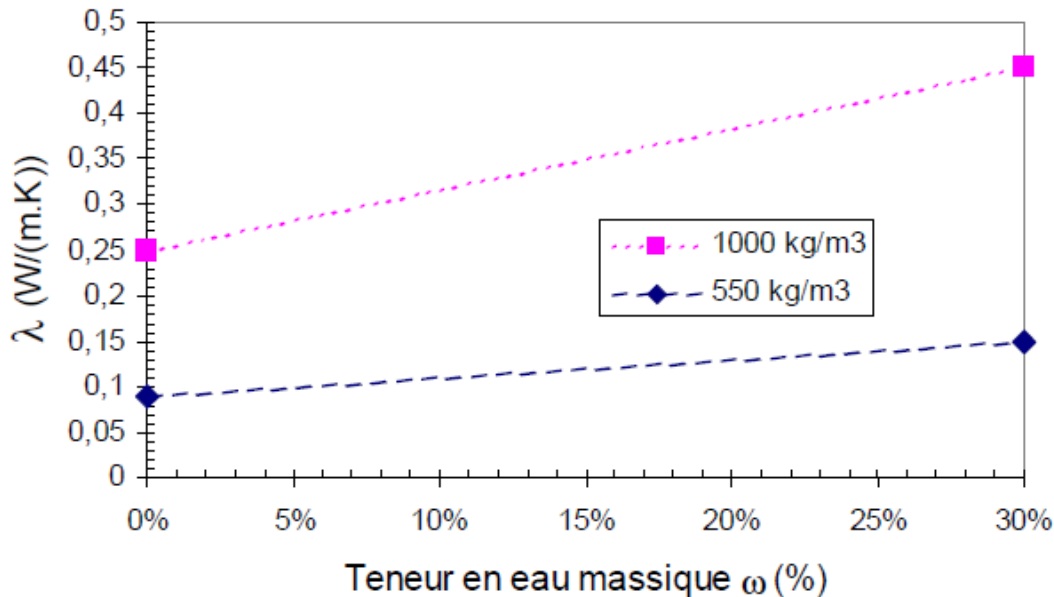


Figure II-3: Conductivité thermique sèche et humide de deux bétons de bois DURISOL (Kosny, 1996)

II.4.2 Propriétés acoustiques

Lors de l'émission d'un son, l'onde sonore se propage dans l'air jusqu'à atteindre un obstacle. Lorsque l'onde incidente entre en contact avec le matériau, deux ondes sont générées : une onde réfléchie se propageant dans le même milieu que l'onde incidente, et une onde transmise traversant directement le matériau. Le traitement acoustique est une méthode qui affecte les ondes transmises ou réfléchies pour améliorer l'acoustique de la pièce (Chi et al, 2003).

L'isolation acoustique vise à limiter la propagation du son de part et d'autre du matériau. Cette isolation est généralement réalisée par des matériaux à haute densité car leur inertie rend plus difficile leur déplacement dans les ondes sonores. Par conséquent, les vibrations qu'ils

CHAPITRE II : PROPRIETES DES BETONS LEGERS

génèrent, génèrent moins de vagues. Comme son nom l'indique, le béton léger ne peut exercer cet effet de masse.

La propagation du son peut également être limitée en rendant la surface du matériau étanche. Ensuite, l'onde est réfléchiée et renvoyée vers la source d'émission. Par conséquent, les matériaux à faible perméabilité sont de bons isolants et, en un sens, ils peuvent empêcher la transmission du son entre deux pièces adjacentes. Cependant, l'onde réfléchiée peut interférer avec l'intelligibilité de la voix dans la pièce, provoquant ainsi des interférences (Chi et al, 2003).

La troisième méthode d'action sur les ondes sonores est l'absorption. Ces matériaux atténuent le son par dissipation visqueuse. Cependant, ce mécanisme de dissipation d'énergie suppose que les ondes peuvent pénétrer le matériau et avoir suffisamment d'espace pour s'atténuer. Par conséquent, une certaine perméabilité et une grande porosité ouverte sont nécessaires.

La perméabilité Π d'un matériau homogène est définie par la loi de Darcy, qui relie le débit du fluide traversant à la perte de charge et à la surface traversée. Dans le cas d'un écoulement non turbulent en milieu isotrope, on a :

$$V = \frac{\Pi}{\eta} \nabla P \quad (\text{II} - 6)$$

$$Q = \frac{\Pi}{\eta} S \frac{\Delta P}{\Delta l} \quad (\text{II} - 7)$$

Avec v : vitesse d'écoulement du fluide (m.s-1)

Π : coefficient de perméabilité du matériau (m²)

η : viscosité dynamique du fluide (Pa.s)

Q : débit volumique du fluide

Δl : épaisseur du matériau poreux (m)

S : section de passage du fluide (m²)

$\Delta P = P_2 - P_1$: différence de pression appliquée sur chaque face de l'échantillon (Pa)

CHAPITRE II : PROPRIETES DES BETONS LEGERS

Lorsque le fluide traversant le matériau poreux est de l'air, la résistance σ traversée par l'air est utilisée comme paramètre. En raison de la relation suivante, il peut être calculé directement à partir de la valeur mesurée sur le perméamètre (Chi et al, 2003) :

$$\sigma = \frac{P2 - P1}{\Delta l Q} S \quad (\text{II} - 8)$$

σ varie entre 1 000 et 300 000 Pa.s.m⁻² pour les matériaux poreux couramment utilisés en génie civil. En combinant (II-7) et (II-8), on en déduit la relation de passage entre la résistivité à l'air et la perméabilité macroscopique :

$$\frac{\Pi}{\eta} = \frac{1}{\sigma} \quad (\text{II} - 9)$$

La capacité d'absorption du matériau est caractérisée par le coefficient d'absorption α . Lorsque $\alpha = 1$, toute l'énergie de l'onde incidente est dissipée, le son est donc complètement amorti. Lorsque $\alpha = 0$, le son n'est pas du tout atténué. Ce facteur α dépend de la fréquence. Il est généralement mesuré sur toute la gamme de fréquences, puis moyenné sur des bandes de fréquences appelées octaves. Cela facilite la comparaison des matériaux entre eux. Parmi les bétons légers, seul le béton de bois est actuellement utilisé en raison de ses propriétés acoustiques, car c'est un bon compromis entre une densité spécifique et une bonne absorption (Chi et al, 2003).

CHAPITRE II : PROPRIETES DES BETONS LEGERS

Dans le (tableau II-4) ci-dessous nous retrouvons une comparaison des caractéristiques acoustiques entre différents matériaux :

Tableau II-4: Caractéristiques acoustiques de quelques matériaux (Chi et al, 2003)

	ρ (kg/m ³)	porosité ϕ	perméabilité Π (m ²)	α
Contre-plaqué	700			0.1 à 0.4
Béton hydraulique	2330	8%	10^{-16} à 10^{-18}	0.3 à 0.4
Béton argile expansé	1600	36%		
Béton cellulaire	350 à 650	75 à 82%	1 à $4 \cdot 10^{-14}$	0.21 à 0.32
Béton de bois	600 à 900	52%		> 0.55
Brique	1800			< 0.05

En comparant un peu les valeurs du tableau, on remarque que la porosité toute seule ne peut expliquer l'absorption acoustique d'un matériau. Si on regarde le béton cellulaire, il possède une forte porosité mais il n'absorbe pas plus de 40% du son du fait qu'il est peu perméable. L'onde sonore ne pénètre pas dans le matériau et ne peut donc pas être atténuée. Il en va de même pour le plâtre et la brique dont les surfaces sont peu perméables.

II.5 Autres caractéristiques

II.5.1 Résistance au feu

La résistance au feu est mesurée avec la durée de tenue d'un élément à une certaine température, elle est meilleure que celle du béton traditionnel, en raison des faibles valeurs de conductivité thermique et du coefficient de dilatation. Par exemple, la durabilité d'une dalle de 12 cm est d'environ 2 heures pour le béton normal et de 4 heures pour le béton léger. De même,

CHAPITRE II : PROPRIETES DES BETONS LEGERS

les pertes de résistance mesurées à 650 ° sont respectivement de l'ordre de 40 à 50% dans le premier cas et de seulement 15% dans le second (Zeghidi, 2018).

II.5.2 Résistance au gel

La résistance au gel d'un béton léger est très bonne et cela malgré la teneur en eau absorbée. De ce fait, de nombreux pores non saturés subsistent et qui permettent l'expansion de la glace. Sans oublier de noter qu'en période froide de l'année le bétonnage d'un béton léger a une bonne aptitude car la faible conductivité thermique permet lui permet de conserver la chaleur de prise du ciment (Zeghidi, 2018).

II.6 Durabilité du béton léger

II.6.1 Définition

La durabilité du béton consiste à pouvoir conserver sa résistance et continuer à remplir sa fonction tout au long de sa vie, et non indéfiniment, il s'ensuit que le béton doit résister aux mécanismes de dégradation auxquels il peut être vulnérable, comme les cycles de gel-dégel et certaines formes d'attaque chimique.

Si on parle d'une mauvaise durabilité, elle se manifeste par une dégradation qui peut résulter de facteurs externes ou de phénomènes internes du béton. Les actions peuvent être mécaniques, physiques ou chimiques. Ils sont généralement provoqués par des réactions alcali-silice et alcali-carbonate, les attaques chimiques externes sont dues à la présence d'ions agressifs tels que chlorures, sulfates et dioxyde de carbone, ainsi que de nombreux gaz et liquides d'origine naturelle ou industriel. Tout d'abord, il convient de noter qu'une détérioration spécifique de la qualité est rarement attribuée à une seule cause : le béton peut souvent fonctionner de manière satisfaisante malgré certaines lacunes, mais lorsqu'un facteur défavorable est ajouté, des perturbations apparaissent [8].

CHAPITRE II : PROPRIETES DES BETONS LEGERS

II.6.2 Indicateurs de la durabilité

II.6.2.1 Dégradation par le cycle gel-dégel

Il est généralement admis que l'augmentation de volume (9%) accompagnant la conversion de l'eau en glace n'est pas la principale cause de dégradation du béton, comme le montrent les études menées notamment par Powers et Litvan. Dans la zone touchée par le gel, des cristaux de glace se forment en plus gros capillaires, créant un déséquilibre thermodynamique qui fera migrer l'eau des capillaires fins vers les capillaires où l'eau est gelée. Il s'agit d'une augmentation des pressions hydrauliques dans les capillaires, engendrée par les mouvements de l'eau interne non gelée vers les «fronts de gel» ainsi que les pressions osmotiques résultant des différences de concentrations de sels dissous dans l'eau situé à proximité d'eau gelée et d'eau non gelée présente dans les fins capillaires qui sont aujourd'hui considérés comme la principale cause de dommages (Mehena, 2009).

Il existe deux principaux types de dégradation associés aux cycles de gel-dégel : la fissuration interne et l'écaillage de surface. Ces effets ne proviennent pas de la même source et ne coexistent pas nécessairement.

a) La fissuration interne :

Elle se manifeste par l'apparition de microfissures en surface et à l'intérieur de la masse de béton soumise au gel. Les fissures internes du béton réduisent les propriétés mécaniques, en particulier sa résistance à la compression et à la traction et son imperméabilité.

b) L'écaillage :

Il s'agit d'un mode de dégradation qui affecte la surface du béton (dans le premier millimètre) en contact avec l'environnement extérieur. Cet effet se manifeste par la séparation progressive des petites particules de pâte sous forme de petites écailles.

II.6.2.2 Dégradation par les attaques chimiques

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

- L'hydrolyse ou la lixiviation (dissolution) des hydrates.
- Les échanges ioniques entre les hydrates et le milieu agressif.

CHAPITRE II : PROPRIETES DES BETONS LEGRS

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

a) Les attaques sulfatiques :

L'attaque sulfatique s'accompagne de la précipitation du soi-disant produits sulfatés «secondaires» qui se forment à la suite de l'hydratation du ciment, de l'expansion importante et de la dégradation mécano-chimique (modification des propriétés de transport et de la porosité, fissures, perte de résistance et de cohésion). Ceci conduit à la destruction du matériau cimentaire sur une durée plus ou moins longue en fonction de l'attaque (type, teneur et concentration en sulfates au contact) et du ciment utilisé (Chihaoui, 2008).

b) 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 nocifs pour le béton que les acides organiques. Les milieux acides les plus fréquents sont :

- Les eaux naturelles dans les marécages et les tourbières, où le Ph peut s'abaisser jusqu'à 4.
- Les milieux industriels : dans les industries chimiques et les industries agroalimentaires.
- Les réseaux d'égouts.

II.7 CONCLUSION

Un béton léger à base de microbilles de polystyrène se caractérise dans un premier temps par sa légèreté. Il se caractérise également par sa faible densité et sa résistance mécanique moyennement faible par rapport à un béton classique.

En plus des propriétés physiques et mécaniques, il a l'avantage de répondre aux caractéristiques thermiques et acoustiques.

Ces avantages nous encouragent davantage à mener une étude plus profonde sur le béton léger à base de microbilles de polystyrène, en caractérisant en détails les matériaux qui composent ce type de béton.

CHAPITRE III :
CARACTERISATION
DES MATERIAUX

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX

III.1 INTRODUCTION

Un bon béton doit être formulé par de bons constituants. C'est pourquoi avant d'étudier les caractéristiques d'un béton léger à base de microbilles de polystyrène, il faut d'abord étudier les caractéristiques de ses constituants.

Et pour ce faire, il faut répondre à la problématique suivante : quelles sont les propriétés des différents constituants du béton léger qui influent sur la caractérisation de ce béton ? Et quelles sont les quantités adéquates de chaque constituant pour formuler un bon béton léger ?

Dans ce chapitre, on va essayer d'apporter des réponses à toutes ces questions en commençant par étudier les caractéristiques de chaque matériau. Ensuite, nous étudierons plusieurs formulations afin de confectionner un bon béton léger à base de micro billes de polystyrène.

III.2 Caractérisation des matériaux utilisés

III.2.1 Ciment

MATINE™ est un ciment gris pour bétons de haute-performance destiné à la construction des Ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments. C'est une marque déposée de la société Lafarge Holcim. MATINE™ est certifié, conforme à la norme Algérienne [NA442-2013] et Européenne [EN 197-1] de classe CEM II/A-L-42,5 N. La (figure III-1) nous montre un sac de ciment de la marque.

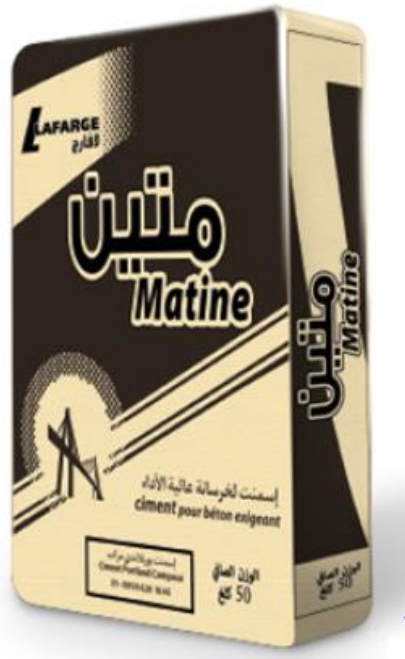


Figure III-1: Ciment MATINE de Lafarge (photo prise du site lafarge.dz)

III.2.1.1 Propriétés physiques

Tableau III-1: Propriété physiques du ciment MATINE (fiche technique)

Propriétés physiques	Valeur
Consistance normal (%)	26,5 ± 2
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm ² /g) (NA231)	3700 - 5200
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1000
Masse volumique apparente (kg/m ³)	894.47
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2924
Expansion (mm)	≤ 3

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX

III.2.1.2 Propriétés mécaniques

La résistance à la compression à 2 jours est supérieure ou égale à 10 MPa, tandis que pour 28 jours elle est supérieure ou égale à 42,5 MPa.

III.2.1.3 Analyses chimiques

Tableau III-2: Analyses chimiques du ciment MATINE (fiche technique)

Analyses chimiques	Valeur
Perte au feu (%) (NA5042)	8 ± 2
Teneur en sulfates (SO ₃) (%)	$2,5 \pm 0,5$
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	$1,7 \pm 0,5$
Teneur en chlorures (NA 5042) (%)	$0,02 \pm 0,05$

III.2.2 Sable

Durant les essais qu'on a faits, le sable utilisé a été fourni par l'entreprise BHT (Entreprise de bâtiment et hydraulique Tlemcen) et il provient de la région de Terga à Ain Temouchent qui est montré dans la (figure III-2).



Figure III-2: Sable de Terga (photo prise au laboratoire)

III.2.2.1 Masse volumique

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MEMOIRE

Tout d'abord, on a commencé par mesurer la masse volumique du sable de Terga, en deux étapes, une masse volumique apparente et une masse volumique absolue :

a) Masse volumique apparente :

Suivant la méthode pratiquée habituellement, nous avons procédé à définir la masse volumique d'un mètre cube du sable (vides compris). Après avoir fait trois essais de suite, la moyenne de la masse volumique apparente obtenue est :

Masse volumique apparente : $\rho_{app} = 1404,6 \text{ kg/m}^3$

b) Masse volumique absolue :

Pour la masse volumique absolue, nous avons fait deux méthodes, celle de l'éprouvette et celle du ballon.

➤ Méthode de l'éprouvette :

En remplissant l'éprouvette graduée avec un volume V_1 et une masse de sable M , puis en lisant le nouveau volume V_2 , on a refait l'essai trois fois pour obtenir le résultat moyen suivant :

$$\rho_{abs} = \frac{M}{v_2 - v_1} \quad (\text{III} - 1)$$

$\rho_{abs} = 2531,5 \text{ kg/m}^3$

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX

➤ Méthode du ballon :

Cette méthode est plus précise que celle de l'éprouvette, on a commencé par peser la masse du ballon rempli d'eau (m_1) tout en faisant attention à éliminer tous les bulles d'air. On a ensuite préparé un échantillon de sable de masse m^2 . Pour enfin peser la masse m^3 qui représente la masse m^2 du sable dans le ballon rempli d'eau. Dans la (figure III-3) l'essai du ballon.



Figure III-3: Masse volumique méthode du ballon (photo prise au laboratoire)

Après avoir fait trois essais consécutifs, on a obtenu le résultat moyen suivant :

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{m_2}{(m_1 + m_2) - m_3} \quad (\text{III} - 2)$$

$$\rho_{\text{abs}} = 2521,3 \text{ kg/m}^3$$

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX

III.2.2.2 Equivalent de sable

L'essai de l'équivalent de sable va nous permettre de déterminer le pourcentage de propreté du sable utilisé et ainsi le classifier. En général, l'essai consiste à séparer les fines particules fines, contenues dans le sable, des éléments sableux grossiers.

➤ Mode opératoire :

- On a commencé par remplir les trois éprouvettes avec la solution lavante jusqu'à atteindre le premier trait, puis verser la quantité de sable sec tout en éliminant les bulles d'air.
- Après un repos de 10 minutes, on a agité les éprouvettes dans la machine avec 90 allers retours puis on a rempli les éprouvettes jusqu'au trait supérieur en laissant reposer 20 minutes. La (figure III-4) nous montre l'essai de l'équivalent de sable.



Figure III-4: Essai de l'équivalent de sable (photo prise au laboratoire)

Avec cet essai on va obtenir deux valeurs, ESV la valeurs obtenue visuellement et ESP la valeur obtenue par le piston.

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX

Par la suite on mesure les valeurs h_1 , h_2 et $h'2$ pour calculer l'équivalent de sable avec la formule suivante :

$$ESV = 100 \times \frac{h_2}{h_1} \quad (\text{III} - 3)$$

$$ESP = 100 \times \frac{h'2}{h_1} \quad (\text{III} - 4)$$

h_1 : Hauteur du sable propre + éléments fins.

h_2 : Hauteur du sable propre visuel

$h'2$: Hauteur du sable propre par le piston

ESV : Valeur de l'équivalent de sable visuel

ESP : Valeur de l'équivalent de sable par le piston

Après avoir calculé la moyenne des trois essais, nous avons obtenu le résultat de l'équivalent de sable suivant :

$$ESV = 77,5 \%$$

$$ESP = 78 \%$$

Donc, la valeur de l'équivalent de sable convient parfaitement pour notre futur béton car elle est comprise entre 75% et 85% pour ESV et entre 70% et 80% pour ESP.

III.2.2.3 Absorption du sable

Suivant la norme NF P 18-554, l'absorption va permettre de définir le coefficient d'absorption A_b . Ce dernier représente le rapport de l'augmentation de la masse d'un échantillon de sable, après immersion dans l'eau, à la masse sèche de ce même échantillon.

Pour mener à bien l'essai, l'immersion va durer 24h dans une température de 20 °C.

➤ Mode opératoire :

Pour la réalisation de cet essai, on a commencé par l'immersion d'une quantité de sable dans l'eau durant 24h. Le jour suivant, on a fait sécher le sable avec un séchoir pour obtenir des granulats dites imbibées (surface sèche de l'échantillon de sable).

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX

Ensuite, on a pesé 2 masses différentes pour obtenir M_i (masse imbibée) et on les a mis dans l'étuve pendant 24h.

Une fois le sable sorti de l'étuve, on a pesé les nouvelles masses sèches M_s comme le montre la (figure III-5).



Figure III-5: Essai de l'absorption du sable (photo prise au laboratoire)

Pour obtenir le coefficient d'absorption on utilise la relation suivante :

$$Ab = 100 \times \frac{M_i - M_s}{M_s} \quad (\text{III} - 5)$$

$$Ab = 4,5 \%$$

Le résultat obtenu est acceptable pour le béton léger qu'on s'apprête à confectionner.

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX

III.2.2.4 Analyse granulométrique

L'essai analyse granulométrique permet de déterminer la distribution des différentes dimensions des granulats de sable. L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtées les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieur des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis. Les résultats sont exprimés en courbe représentant les pourcentages cumulés des refus de chaque tamis en fonction des diamètres de tamis.

On a commencé par éliminer les fines dont le diamètre est inférieur à 0,06 mm par voie humide : La quantité de l'échantillon à étudier de 1 kg de sable on le met sur ce tamis, on commence à mettre de l'eau sur cette quantité de sable, l'eau alors coule au-dessous du tamis avec les fines. On continue l'opération jusqu'à ce que l'eau qui coule devienne clair. A ce moment-là, on peut dire qu'on a éliminé les fines dont le diamètre est inférieur à 0,06 mm.

Ensuite le refus (la quantité restante dans ce tamis) est mise dans l'étuve pour une période de 24h afin d'avoir un échantillon sec, on le pèse (la différence nous donne ainsi le poids des fines éliminées dans la première étape) et on met l'échantillon dans le tamis se trouvant le plus haut de la série.

La série des tamis est passée sur un tamiseur pour permettre une bonne exécution de l'expérience. Après cela, on pèse le refus dans chaque tamis, on traduit par la suite les pesés en pourcentage par rapport à la quantité initiale et on représente les pourcentages cumulés de chaque refus dans un graphe afin d'avoir une idée sur la distribution des diamètres de l'échantillon. La (figure III-6) nous montre l'essai de l'analyse granulométrique.

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX



Figure III-6: Analyse granulométrique (photo prise au laboratoire)

Les résultats sont présentés sous forme d'un graphe dans la (figure III-7) suivante :

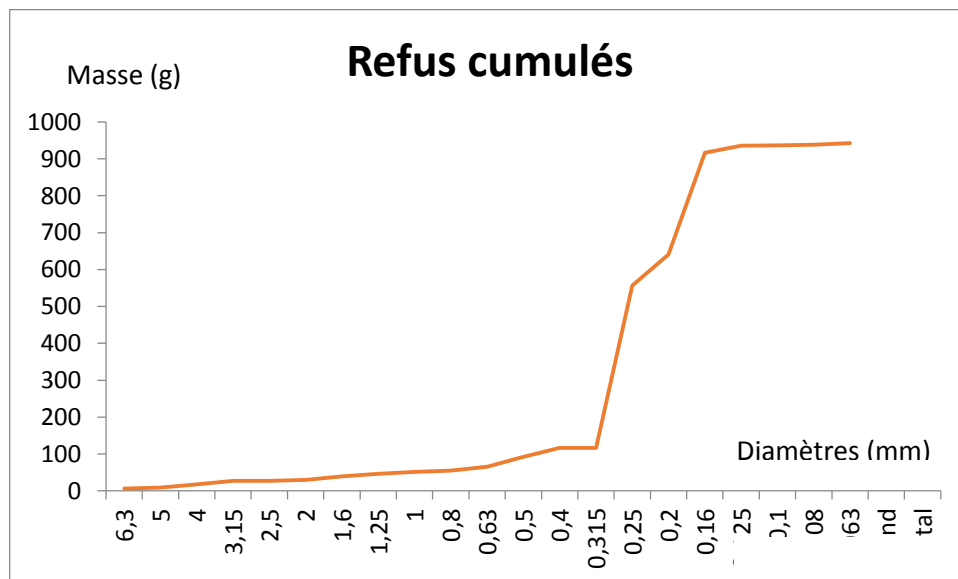


Figure III-7: Analyse granulométrique (Refus cumulés en fonction des diamètres)

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX

III.2.3 Polystyrène

Dans le contexte de notre projet, nous avons étudié le polystyrène expansé qu'on va utiliser par la suite dans la confection de notre béton léger à base de microbilles de polystyrène. Les billes de polystyrène ont été fournies par l'entreprise BHT construction par le biais de notre encadreur externe, Monsieur **SOUALEM**. Le polystyrène concerné est montré dans la (figure III-8).



Figure III-8: Billes de polystyrène expansé (photo prise au laboratoire)

III.2.3.1 Masse volumique

Le premier essai sur les billes de polystyrène est de mesurer la masse volumique d'un échantillon. On a mesuré donc la masse volumique apparente puis la masse volumique absolue.

a) Masse volumique apparente :

La masse volumique apparente est la masse par unité de volume, comprenant à la fois les vides pouvant exister dans ou entre des grains. Elle se mesure à l'aide d'un récipient-mesure de 1 litre.

On pèse le récipient à vide. Par la suite on le pèse rempli et rasé par les billes de polystyrène expansé. La différence entre les deux pesés nous donne la masse des billes de

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX

polystyrène comprises dans un volume de 1 litre. On aura donc un résultat de la masse volumique en kg/l.

Après avoir fait trois essais de suite, la moyenne de la masse volumique apparente obtenue est :

Masse volumique apparente : $\rho_{app} = 17 \text{ kg/m}^3$

b) Masse volumique absolue :

La masse volumique absolue est la masse par unité de volume, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. Elle se mesure à l'aide d'un ballon d'eau contenant une masse de l'échantillon.

On élimine les vides pouvant exister dans ou entre des grains en remplissant le ballon par l'eau jusqu'à élimination des bulles d'air. La masse de l'échantillon divisée sur la différence de volume entre et le ballon contenant de l'échantillon plus l'eau et le ballon rempli simplement d'eau permet de déterminer la masse volumique de l'échantillon en kg/m³. L'essai est montré dans la (figure III-9).



Figure III-9: Masse volumique méthode du ballon (photo prise au laboratoire)

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX

Après avoir fait trois essais consécutifs et en calculant avec la formule (III-2), on a obtenu le résultat moyen suivant :

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{m_2}{(m_1 + m_2) - m_3}$$

$$\rho_{\text{abs}} = 29,6 \text{ kg/m}^3$$

III.2.3.2 Taille des billes

Cet essai consiste à mesurer la taille moyenne des billes de polystyrène de l'échantillon.

On a procédé par mesurer le diamètre de chaque bille séparément, on a ainsi pris les mesures de 22 billes de polystyrène à l'aide d'un pied à coulisse.

Les résultats sont presque égaux et sont de l'ordre de 4,5 mm (plus ou moins 0,5 mm).

III.3 Méthodes de formulation

III.3.1 Formulation par la méthode des volumes absolus :

La méthode des volumes absolus a été proposée par l'académicien B.G. Scramtaiev. Elle est basée sur les principes suivants : La somme des volumes absolus de tous les matériaux qui composent 1 mètre cube de béton frais est égale à 1000 litres. Autrement dit, la porosité du béton frais est considérée comme nulle (TP Scramtaiev, 2017).

Cette méthode de détermination de la composition du béton comprend les quatre parties suivantes :

Calcul de la composition du béton :

a) Déterminer la quantité de ciment pour 1 m³ de béton frais :

On a choisi pour le rapport Eau /Ciment E/C = 0,6, et pour le dosage de ciment C = 350 kg /m³. Dans le (tableau III-3) on a les différentes valeurs du coefficient d'écartement α .

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX

Tableau III-3: Valeur de α en fonction de E/C (EDILTECO, 2018)

Les valeurs de α en fonction de 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
1,07	1,42	1,38	1,3	-	-	300
-	-	1,44	1,38	1,32	-	350
-	-	-	1,46	1,4	1,31	400
-	-	-	1,56	1,52	1,44	500
-	-	-	-	1,56	1,52	600

α : Coefficient d'écartement (ou coefficient d'excès de mortier)

b) Déterminer la quantité d'eau pour 1 m³ de béton frais :

$$E = \frac{E}{C} \times C \quad (\text{III} - 7)$$

$$E = 350 \times 0,6$$

$$E = 210 \text{ kg/m}^3$$

c) Déterminer la quantité de polystyrène pour 1 m³ de béton frais :

$$V = 1 - \frac{\rho_{papp}}{\rho_{pabs}} \quad (\text{III} - 8)$$

$$V = 1 - \frac{0,02}{0,03}$$

$$V = 0,34$$

$$P = \frac{1000}{V \times \frac{\alpha}{\rho_{papp}} + \frac{1}{\rho_{pabs}}} \quad (\text{III} - 9)$$

$$P = \frac{1000}{0,34 \times \frac{1,44}{0,02} + \frac{1}{0,03}}$$

$$P = 17,42 \text{ kg/m}^3$$

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX

ρ_{pabs} : masse volumique absolue du polystyrène

ρ_{papp} : masse volumique apparente du polystyrène

P : masse du polystyrène

V : porosité intergranulaire

d) Déterminer la quantité de sable pour 1 m³ de béton frais :

$$S = \left[1000 - \left(\frac{c}{\rho_c} + \frac{E}{\rho_e} + \frac{P}{\rho_p} \right) \right] \times \rho_s \quad (\text{III} - 10)$$

$$S = \left[1000 - \left(\frac{350}{2,92} + \frac{210}{1} + \frac{17,42}{0,03} \right) \right] \times 2,53$$

$$S = 226,38 \text{ kg/m}^3$$

ρ_c : masse volumique absolue du ciment

ρ_e : masse volumique absolue de l'eau

ρ_p : masse volumique absolue du polystyrène

ρ_s : masse volumique absolue du sable

III.3.2 Formulation du fabricant « EDILTECO France » :

La présente formulation a été proposée par l'entreprise « EDILTECO France » dans la fiche technique des microbilles de polystyrène « Polys Béto ». Ce dernier est un polystyrène expansé à granulométrie contrôlée, enrobé d'un adjuvant, il remplace totalement ou partiellement le sable et le gravier traditionnel (EDILTECO, 2018). Un sac polys béton est représenté dans la (figure III-10).



Figure III-10: Sac de polystyrène expansé POLYS BÉTO (photo prise du site editelco.fr)

La formulation est en fonction de différentes masses volumiques du béton dans le (tableau III-4) :

Tableau III-4: Formulation du béton léger « Polys Béto » (EDILTECO, 2018)

Masse volumique	500 kg/m ³	700 kg/m ³	900 kg/m ³	1200 kg/m ³	1500 kg/m ³
Ciment	300 kg	300 kg	350 kg	350 kg	350 kg
Polystyrène	800 litres	700 litres	650 litres	450 litres	200 litres
Sable	150 kg	350 kg	430 kg	850 kg	1100 kg
Eau	140 litres	140 litres	160 litres	160 litres	160 litres

III.4 Préparation du béton léger

III.4.1 Préparation à la bétonnière

III.4.1.1 Technique de malaxage 1

Cette technique est utilisée par l'entreprise « Bourbon Plastiques Bâtiment », spécialisée dans la production du polystyrène expansé « BPBât » et des tubes PVC et PE (Bourbon plastiques bâtiment, 2017).

Pour bien préparer le mélange du béton léger à base de microbilles de polystyrène, l'entreprise recommande les étapes suivantes mentionnées sur la fiche technique « Béton allégé » :

- Eviter le mélange manuel et utiliser un malaxeur ou une bétonnière.
- Commencer par verser l'eau, l'adjuvant puis le ciment dans le malaxeur, ensuite verser les billes progressivement.
- Ajouter le sable et malaxer jusqu'à obtenir un mélange homogène. Poursuivre le malaxage encore 3 minutes.
- Pour éviter le risque de ségrégation, le béton allégé ne doit pas être trop fluide.
- A la fin, lancer le malaxage à grande vitesse pour retrouver l'homogénéité du béton (entre 5 et 10 mn).

III.4.1.2 Technique de malaxage 2

Cette technique est utilisée par l'entreprise « EDILTECO France », spécialisée dans la production du polystyrène expansé « Polys Béto », des mortiers et chapes (EDILTECO, 2018).

L'entreprise propose les consignes suivantes pour la méthode de malaxage :

1. Commencer par verser le sable puis le ciment dans la bétonnière en marche.
2. Versez les 2/3 de l'eau nécessaire à la formulation.
3. Versez les billes Polystyrène progressivement.

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX

4. Laissez malaxer pendant 2 minutes.
5. Versez le 1/3 de l'eau restante.
6. Continuer le malaxage pendant 5 minutes jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène et de couleur uniforme.
7. N'utilisez pas plus de 80 % du volume de la bétonnière pour obtenir un mélange homogène.
8. Lors de la première gâchée, la bétonnière est sèche et le produit aura tendance à adhérer aux parois ; Humidifiez sans excès les parois de la machine et laissez malaxer 1 à 2 minutes de plus mais veillez à ne pas rajouter inutilement de l'eau.

III.4.2 Préparation à la centrale à béton

Cette méthode a été utilisée lors du coulage du béton léger à base de microbilles de polystyrène dans le projet de construction de l'hôtel Renaissance Tlemcen (2009).

La technique nous a été communiquée par notre encadrant externe Mr. SOUALMI qui était présent sur chantier.

1. Versement des microbilles de polystyrène directement dans les camions toupies (il n'y avait pas un autre silo pour le stockage des microbilles)
2. Préparation du béton dans la centrale à béton : sable, ciment, eau et adjuvent.
3. Versement du béton dans ces camions toupies
4. Malaxage du mélange (microbilles + béton) dans les camions toupies.

III.5 CONCLUSION

Il est important d'étudier les caractéristiques de chaque matériau composant notre béton léger, ainsi que l'utilisation des bonnes proportions de chaque constituant. Cela aide à confectionner un béton léger à base de micro billes de polystyrène avec de bonnes caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques. C'est d'ailleurs ce qu'on va découvrir lors du prochain chapitre.

CHAPITRE IV :

ETUDE DE CAS

IV.1 INTRODUCTION

Notre travail consistait à formuler des bétons légers à base de micro billes en polystyrène. Malheureusement, ce travail n'a pas pu être mené à cause de la pandémie.

Dans ce chapitre, nous présenterons une interprétation personnelle de certains résultats expérimentaux issus de la littérature. La méthodologie des essais expérimentaux est aussi rapportée dans cette partie.

De plus, nous présenterons un produit de polystyrène expansé innovant qui est utilisé dans des conceptions de bétons légers.



IV.2 Caractéristiques physiques

Dans cette partie de notre recherche, nous allons décrire les différents essais censés être réalisés au laboratoire (annulés dans la période épidémiologique du corona virus). Cela dans le but de déterminer les différentes propriétés physiques du béton léger à base de billes de polystyrène expansé.

On a recueilli les résultats obtenus lors des études précédentes pour trois bétons légers à base de microbilles de polystyrène (Hammou, 2019) (Zeghidi, 2018).

Béton 1 : c'est un béton avec une formulation contenant 50% de polystyrène et 50% de gravier, voir la (figure IV-1).

CHAPITRE IV : ETUDE DE CAS



Figure IV-1: Béton 1 (Hammou, 2019)

Béton 2 : c'est un béton avec une formulation contenant 50% de polystyrène et 50% de gravier, voir la (figure IV-2).



Figure IV-2: Béton 2 (Zeghidi, 2018)

CHAPITRE IV : ETUDE DE CAS

Béton 3 : c'est un béton avec une formulation contenant 70% de polystyrène et 30% de gravier, voir la (figure IV-3).



Figure IV-3: Béton 3 (Zeghidi, 2018)

IV.2.1 Caractéristiques physiques à l'état frais

IV.2.1.1 Ouvrabilité

Suivant la norme NF P 18-451, on réalise l'essai « slump-test » ou dit l'affaissement par le cône d'Abrams. Cet essai consiste à mouler des troncs de cône en béton (base de diamètre 20 cm, partie haute de diamètre 10 cm). On remplit le cône en 3 couches piquées chacune 25 coups avec une tige métallique de 16 mm de diamètre. Le moule est ensuite soulevé avec délicatesse et l'on mesure, aussitôt après, l'affaissement.

CHAPITRE IV : ETUDE DE CAS

Les résultats sont mentionnés dans le (tableau IV-1) ci-dessous :

Tableau IV-1: Affaissement du béton léger (Zeghidi, 2018) (Hammou, 2019)

Type de béton		Béton 1	Béton 2	Béton 3
Quantité de ciment	kg/m ³	350	350	350
Quantité d'eau	kg/m ³	210	210	210
Quantité de sable	kg/m ³	539,88	723,67	723,67
Quantité de gravier	kg/m ³	1080,19	530,4	318,5
Quantité de polystyrène	kg/m ³	3,27	2,45	3,43
Affaissement	cm	4,7	8	9,5

On remarque que la formulation du béton 1 qui contient une grande quantité de graviers a un affaissement faible. Dans le cas normal le béton léger aura un faible affaissement car les granulats légers (polystyrène) ont une grande absorption en eau.

Notre étude consistait à étudier un béton léger formulé sans gravier, et les résultats de l'affaissement seraient plus proches de ceux du béton 3 (70% polystyrène).

IV.2.2 Caractéristiques physiques à l'état durcis

IV.2.2.1 La masse volumique

On évalue la masse volumique sèche du béton léger en le pesant à 0,01 g près à l'aide d'une balance électronique et en mesurant la taille de l'échantillon à l'aide d'un pied à coulisse (NF EN 12390-7). Pour chaque composition, la masse volumique sèche apparente représente trois valeurs moyennes mesurées. A l'aide de la pesée hydrostatique, nous pouvons déterminer la masse volumique apparente d'une éprouvette.

CHAPITRE IV : ETUDE DE CAS

On a recueilli les résultats obtenus lors des études précédentes pour trois bétons légers à base de microbilles de polystyrène (Hammou, 2019) (Zeghidi, 2018), et un quatrième résultat obtenu de la formulation composée du polystyrène « POLYS BETO » (TP Scramtaiev, 2017), voir la (tableau IV-2).

Tableau IV-2: Masse volumique du béton léger (Zeghidi, 2018) (Hammou, 2019)

Type de béton		Béton 1	Béton 2	Béton 3	Béton 4
Quantité de ciment	kg/m ³	350	350	350	350
Quantité d'eau	kg/m ³	210	210	210	160
Quantité de sable	kg/m ³	539,88	723,67	723,67	1100
Quantité de gravier	kg/m ³	1080,19	530,4	318,5	-
Quantité de polystyrène	kg/m ³	3,27	2,45	3,43	3
Masse volumique	kg/m ³	1660.7	1525.7	1362.5	1500

On remarque que le gravier, qui est un matériau lourd, influence l'augmentation de la masse volumique du béton. Plus la masse du gravier diminue et la masse du polystyrène augmente, la masse volumique du béton diminue et on le classe dans la catégorie des bétons légers.

IV.2.2.2 L'absorption

Pour déterminer l'absorption d'eau on va recourir à la détermination de la quantité d'eau absorbée par le béton léger pendant la phase de cure. L'essai consiste à mesurer la masse d'une éprouvette de béton après le démoulage puis on l'immerge dans l'eau pendant 07 jours et on mesure l'augmentation de sa masse. Ce paramètre est exprimé en pourcentage (Zeghidi, 2018).

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

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

CHAPITRE IV : ETUDE DE CAS

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

M_{sec} : la masse sèche de l'éprouvette 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). Voir la (figure IV-3).

Tableau IV-3: Absorption d'eau du béton léger (Zeghidi, 2018) (Hammou, 2019)

Type de béton		Béton 1	Béton 2	Béton 3
Quantité de ciment	kg/m ³	350	350	350
Quantité d'eau	kg/m ³	210	210	210
Quantité de sable	kg/m ³	539,88	723,67	723,67
Quantité de gravier	kg/m ³	1080,19	530,4	318,5
Quantité de polystyrène	kg/m ³	3,27	2,45	3,43
Absorption	%	5,1	4,85	6,79

On remarque dans le tableau ci-dessus des résultats qui indiquent une influence de la composition du béton sur l'absorption d'eau. On constate une augmentation de l'absorption d'eau lorsqu'on augmente la quantité de polystyrène expansé dans la formulation du béton léger.

IV.3 Caractéristiques mécaniques

IV.3.1 Résistance à la compression

La résistance à la compression du béton est généralement considérée comme sa propriété la plus importante, elle donne une image globale de la qualité du béton car elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydratée estimée à court ou long terme.

CHAPITRE IV : ETUDE DE CAS

L'essai de compression du béton léger se fait suivant la norme en utilisant des éprouvettes confectionnées de 16x32 cm. On effectue l'écrasement des éprouvettes à l'aide d'une presse mécanique.

Les résultats de la résistance à la compression des différents bétons légers sont mentionnés dans le (tableau IV-4) ci-dessous :

Tableau IV-4: Résistance à la compression du béton léger (Zeghidi, 2018) (Hammou, 2019)

Type de béton		Béton 1		Béton 2		Béton 3	
Quantité de ciment	kg/m ³	350		350		350	
Quantité d'eau	kg/m ³	210		210		210	
Quantité de sable	kg/m ³	539,88		723,67		723,67	
Quantité de gravier	kg/m ³	1080,19		530,4		318,5	
Quantité de polystyrène	kg/m ³	3,27		2,45		3,43	
Résistance à la compression MPa		7j	28j	7j	28j	7j	28j
		2,9	4,4	3,2	4,6	1,1	1,8

A travers ces résultats, on remarque que la résistance est liée directement à la composition du béton, à savoir l'utilisation du gravier ou pas. Dans le cas du béton avec gravier, la résistance va augmenter considérablement, tandis qu'avec le béton 3 qui est composé de seulement 30% de gravier et 70% de polystyrène expansé sa résistance à diminué.

IV.3.2 Résistance à la flexion

L'essai de résistance à la flexion consiste à placer des éprouvettes prismatiques de dimensions (10x10x40) cm³ dans la machine de flexion. On calcule la résistance à la flexion à partir de l'effort maximum donnée par l'appareil. L'essai est effectué à 7 jours et 28 jours et on

CHAPITRE IV : ETUDE DE CAS

prend la moyenne des résultats sur trois éprouvettes de béton pour chaque formulation (Zeghidi, 2018).

Les résultats de la résistance à la flexion des différents bétons légers sont mentionnés dans le (tableau IV-5) ci-dessous :

Tableau IV-5: Résistance à la flexion du béton léger (Zeghidi, 2018) (Hammou, 2019)

Type de béton		Béton 1		Béton 2		Béton 3	
Quantité de ciment	kg/m ³	350		350		350	
Quantité d'eau	kg/m ³	210		210		210	
Quantité de sable	kg/m ³	539,88		723,67		723,67	
Quantité de gravier	kg/m ³	1080,19		530,4		318,5	
Quantité de polystyrène	kg/m ³	3,27		2,45		3,43	
Résistance à la flexion MPa		7j	28j	7j	28j	7j	28j
		1,8	3	0,33	2	0,11	1

On remarque dans le tableau ci-dessus des résultats qui indiquent une influence de la composition du béton sur sa résistance à la flexion. Donc, on a une diminution de la résistance à la flexion lorsqu'on augmente la quantité de polystyrène expansé dans la formulation du béton léger. Ce qui est logique vu la légèreté des microbilles de polystyrène expansé.

IV.4 Caractéristiques thermiques

Pour réaliser l'essai de détermination de la conductivité thermique du béton léger, il faut préparer des éprouvettes prismatiques de dimensions (27x13x4) cm³. On procède par la mise de la sonde de mesure entre deux éprouvettes, et l'organe de commande est configuré pour mesurer la conductivité thermique. Après 400 secondes, le CT mètre donne les résultats (Hammou, 2019).

Le résultat de la conductivité thermique obtenue avec le CT mètre lors de l'étude réalisée en 2017 sur un béton léger à base de billes de polystyrène expansé est de (Meghazi, 2017). Dans

CHAPITRE IV : ETUDE DE CAS

la (figure IV-4) on a le CT mètre et dans la (figure IV-5) l'exemple de l'éprouvette utilisé pour l'essai :

$$\lambda = 1.058 \text{ (W/m.K)}$$



Figure IV-4: CT mètre



Figure IV-5: Eprouvettes (27x13x4) (Hamou, 2019)

IV.5 Cas d'utilisation du béton léger à base de polystyrène expansé :

IV.5.1 Le polystyrène POLYTERM BLU FEIN

a) Présentation de l'entreprise EDILTECO :

EDILTECO est une entreprise italienne créée en 1981 dont la mission est d'amener la recherche et le confort dans la construction. Elle est spécialisée dans la production et la vente d'enduits isolants thermiques à base de billes de polystyrène expansé vierge, de ciment et d'additifs.

Aujourd'hui, EDILTECO est une référence en Italie et dans le monde, elle est présente dans différents pays comme filiales ou partenaires.

L'un de ses produits phares est fabriqué sous licence en Algérie chez l'entreprise « polystyrène des oasis » dans la Wilaya Boumerdes.

CHAPITRE IV : ETUDE DE CAS

b) Présentation du produit POLITERM BLU FEIN :

Le granulat POLITERM est l'élément essentiel de toute la gamme sols, c'est une bille de polystyrène vierge expansé à granulométrie contrôlée, enrobée d'un adjuvant breveté, spécialement conçu et développé dans le laboratoire EDILTECO. Les mortiers et bétons légers élaborés avec le POLITERM possèdent de bonnes propriétés isolantes, destinés à réaliser tous supports de revêtement de sol, chapes et sous-chapes, rattrapages de niveaux, formes de pentes, isolation thermique et acoustique aux bruits de chocs, remplissages divers (Blilguhftin, 2018). Voir la (figure IV-8).



Figure IV-6: produit POLITERM BLU FEIN

Les granulats sont expansés et traités dans l'usine, ils ne peuvent en aucun cas contenir de polystyrène recyclé, déchet de polystyrène ou autre agrégat organique ou artificiel (Blilguhftin, 2018).

CHAPITRE IV : ETUDE DE CAS

IV.5.2 Applications de POLYTERM BLU FEIN

- Chapes de base pour sous-sols et planchers, espace entre les planchers, les toits et les planchers en bois.
- Chapes monocouche pour le collage direct de revêtements de sol, de sous-sols et de planchers flottants.
- Formation des pentes sur les terrasses et les toits plats, également avec la pose directe de l'étanchéité.
- Remplissage sous les chaussées d'asphalte circulables.
- Chapes sous les sols industriels (Blilguhftin, 2018).

IV.5.3 Formulations à base de POLYTERM BLU FEIN

Pour la formulation indiquée dans la fiche technique d'ETDILTECO, il est recommandé d'utiliser uniquement du ciment Portland CEM I ou CEM II 32,5 / 42,5 / 52,5 de bonne qualité pour les mélanges. Faute d'un ciment de mauvaise qualité, les caractéristiques finales du mortier ne seront pas atteintes (Blilguhftin, 2018). Voir les formulations dans le (tableau IV-6).

Tableau IV-6: Formulation du béton léger à base de POLITERM (Blilguhftin, 2018)

Masse volumique	Sacs de POLITERM	Eau	Ciment	Sable
350	2 sacs de 420 L ou 5 sacs de 170 L	160	350	Pas nécessaire
300		140	300	
250		110	250	
200		90	200	
110		50	110	

CHAPITRE IV : ETUDE DE CAS

On remarque que ce type de formulation ne comporte pas de sable dû aux propriétés de mélange de « Politerm Blu Fein ». Le sable peut cependant être utilisé en sachant qu'il réduit les performances en termes d'allégement, d'isolation thermique et d'absorption d'eau. L'utilisation du sable fait varier le dosage de l'eau en fonction de la quantité de sable et de son humidité résiduelle. L'utilisation de sable peut être nécessaire pour le pompage de chapes sable-ciment avec des pompes Turbosol (Blilguhftein, 2018).

La mise en œuvre recommandée pour cette formulation est comme suit :

- Faire marcher le malaxeur.
- Insérer la quantité d'eau nécessaire.
- Introduire la moitié de la quantité de polystyrène POLITERM.
- Ajouter la quantité nécessaire du ciment.
- Introduire la deuxième moitié de la quantité de polystyrène POLITERM.
- Malaxer pendant 10 minutes.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MEMOIRE 

IV.5.4 Caractéristiques du béton léger à base de POLYTERM BLU FEIN

Grâce au béton léger à base du polystyrène expansé POLITERM, on obtient des résultats intéressants en termes de caractéristiques physiques, mécanique, thermique et acoustique. Voir les caractéristiques dans le (tableau IV-7).

CHAPITRE IV : ETUDE DE CAS

Tableau IV-7: caractéristiques du béton léger à base de POLITERM (Bliluhftein, 2018)

CHARACTERISTIQUES	110	200	250	300	350
Conductivité thermique (W/m.K)	0,043	0,065	0,067	0,08	0,103
Résistance à la compression (MPa)	0,528	0,69	0,83	1,61	1,69
Résistance à la flexion (MPa)	0,12	0,37	0,46	0,95	0,59
Module d'élasticité (MPa)	n.d.	235,3	n.d.	551,1	n.d.
Chaleur spécifique (J/kgK)	1000 *	1000 *	1000 *	1000 *	1000 *
Performance acoustique (ΔL_w)	n.d.	14 dB **	14 dB **	26 dB ***	n.d.
Isolation aux bruits ($L'_{nT,W}$)	n.d.	n.d.	61 dB épaisseur 11 cm	n.d.	n.d.
Classe de résistance au feu	n.d.	A2-s1,d0			

* : $1000 \text{ J/kg.K} = 0,24 \text{ kcal/kg.K}$

** : Valeur obtenue au laboratoire avec 5 cm de Politerm Blu + 5 cm de chape.

*** : Valeur obtenue au laboratoire avec 7 cm de Politerm Blu + Fonotech 5mm (rouleau d'isolation phonique).

On remarque à travers les résultats du tableau qu'on a un béton très léger et qui propose une performance thermique et acoustique importante. En plus d'être très léger (jusqu'à 110 kg/m^3), la conductivité thermique du béton peut aller jusqu'à 0.043 W/m.K .

IV.6 CONCLUSION

Après avoir exposé les résultats obtenus dans ce chapitre, nous pouvons constater l'apport bénéfique des microbilles de polystyrène expansé au béton notamment en ce qui concerne la réduction importante de sa masse. Mais aussi sur son comportement thermique en ayant une conductivité thermique très petite par rapport un béton ordinaire.

CONCLUSION GENERALE

Notre travail consistait à la formulation et à la caractérisation des bétons légers à base de microbilles de polystyrène. Toutefois en raison de la pandémie du Covid-19, une bonne partie du travail expérimental au niveau du laboratoire a été annulée.

A l'issue de la recherche bibliographique, nous pouvons apporter les conclusions suivantes :

- L'utilisation de bétons légers est une démarche très utilisée dans le bâtiment pour rénover les anciennes bâtisses. Ils donnent la possibilité de construire sur des sols de faible capacité portante et de diminuer la dimension des fondations en réduisant les charges permanentes.
- Les constituants d'un béton léger ont évolué en fonction de l'époque de la construction et de la région. Plusieurs types de granulats légers peuvent être utilisés pour obtenir de bons résultats.
- Le béton léger est surtout caractérisé par une résistance mécanique plus faible que celle d'un béton ordinaire. Alors que la résistance à la traction est de 9 à 10 fois inférieure à la résistance à la compression pour un béton traditionnel, elle peut cependant atteindre un pourcentage plus élevé en termes de rapport de résistance pouvant atteindre plus de 30% pour les bétons légers.
- Le béton léger peut être caractérisé avec une conductivité thermique inférieure à 0,06 W/m.K et des performances acoustiques respectables.

Sur le plan de la formulation d'un béton léger, on peut noter que :

- Pour atteindre de bonnes performances, il faut opter pour un ciment portland de type CEM I ou CEM II.
- Un sable propre permet de profiter pleinement des caractéristiques du polystyrène expansé dans le mélange final.
- La méthode de formulation des volumes absolus de Scramtaiev conduit à une grande quantité de polystyrène pour un mélange de 1 m³. Cette méthode est donc recommandée pour les bétons légers comportant du gravier et du polystyrène.
- La méthode EDILTECO permet d'avoir un bon mélange de béton léger sans ajouter de gravier. Le béton formulé par cette méthode peut être un choix parfait pour des chapes ou des structures non porteuses.

- Les techniques de malaxages du béton léger diffèrent surtout par l'ordre d'ajout des composants dans la bétonnière. Le but est d'avoir un mélange homogène minimisant les pertes des microbilles de polystyrène (très légères), donc il faudra éviter de les ajouter en premier et commencer par le ciment, le sable et l'eau.
- Le taux d'absorption des microbilles de polystyrène expansé est important, ce qui nous donne un affaissement très faible et un béton ferme.
- Le polystyrène expansé apporte une grande légèreté et permet de classer le béton comme léger pour une masse volumique inférieure à 1500 kg/m^3 .
- La résistance à la compression et flexion diminue pour le béton léger à base de polystyrène mais il est possible de compenser cette résistance en diminuant la quantité de polystyrène dans le mélange.
- Le polystyrène expansé offre de bonnes caractéristiques thermiques au béton léger, ce qui permet une bonne isolation dans les nouvelles et anciennes constructions. La conductivité thermique est aux alentours de $1,058 \text{ W/m.K}$.

Toutefois, il est donc recommandé de continuer de faire plus d'investigations sur les bétons légers à base de microbilles de polystyrène.

- En perspective, il serait intéressant d'étudier les différentes formulations du béton léger pour en tirer une méthode référence qui aidera à développer ce matériau.
- Il serait aussi judicieux d'étudier les caractéristiques thermiques et acoustiques du béton léger à base de microbilles de polystyrène expansé pour faire valoir ses performances dans le bâtiment.
- Une étude technico-commerciale serait aussi importante sur le béton léger à base de polystyrène pour différentes utilisations : chapes, mortier, remplissage.
- Enfin, il est aussi important d'étudier la durabilité du béton léger à base de polystyrène dans des milieux climatiques différents.

BIBLIOGRAPHIE

Lightweight-Aggregate-History - Expanded Shale Clay And Slate Institute.

Nouveau guide du béton et de ses constituants - J.Festa, G.Dreux - Librairie Eyrolles.

RILEM : Commission des bétons légers. Terminologie et définition. Matériaux et construction N°13 (1970), pp60-69.

I.Saiti «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, Université de Ouargla, 2014.

M. Shink, « COMPATIBILITÉ ÉLASTIQUE, COMPORTEMENT MÉCANIQUE ET OPTIMISATION DES BÉTONS DE GRANULATS LÉGERS », p. 172.

Mémento du béton cellulaire - Syndicat national du béton... - Librairie Eyrolles.

M. Constant : «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.

Proprietes des betons - Adam M. Neville - Librairie Eyrolles.

M. Aslam, P. Shafigh, et M. Z. Jumaat, « Structural Lightweight Aggregate Concrete by Incorporating Solid Wastes as Coarse Lightweight Aggregate », *Appl. Mech. Mater.*, vol. 749, p. 337-342, avr. 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.749.337.

Granulats et bétons légers - M. Arnould , M. Virlogeux - Librairie Eyrolles.

V. M. Malhotra, « Matériaux complémentaires en cimentation pour le béton », 86-8F, 1989. doi: 10.4095/305060.

Y. Ke, A. L. Beaucour, S. Ortola, H. Dumontet, et R. Cabrillac, « Comportement Mécanique des Bétons de Granulats Légers : Étude Expérimentale et Modélisation », p. 8.

O. Herihiri « Formulation et Caractérisation des bétons légers », Thèse de magister, Université de Biskra, 2010.

J.L. Vignes « ETHYLBENZENE C₈H₁₀, STYRENE C₈H₈ ». Consulté le: mars. 29, 2020. [En ligne]. Disponible sur : <https://cutt.ly/JfFKUX2>.

J. Maul, B. G. Frushour, J. R. Kontoff, H. Eichenauer, et K.-H. Ott, « Polystyrene and Styrene Copolymers », in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, American Cancer Society, 2000.

S. Mahiout « Mettre en valeur ou bannir le polystyrène », Essai dans un centre universitaire, Université Sherbrooke, 2014.

Carrega Marc, *Matières plastiques: propriétés, mise en forme et applications industrielles des matériaux polymères / Marc Carrega, Vincent Verney et coll. ; avec la collaboration de Jean-François Agassant, Bruno Ameduri, Michel Biron... [et al.]*, 3e édition. Paris: Dunod L'Usine nouvelle, 2012.

Techniques de l'ingénieur, "Polystyrène expansé ou PSE" Consulté le : sept. 29, 2020. [En ligne]. Disponible sur : <https://cutt.ly/rfFKOCM>.

EPS packaging group « Expanded polystyrene (EPS) and the environment ».

M. Gesoğlu, E. Güneyisi, et H. Ö. Öz, « Properties of lightweight aggregates produced with cold-bonding pelletization of fly ash and ground granulated blast furnace slag », *Mater. Struct.*, vol. 45, n° 10, p. 1535-1546, oct. 2012, doi: 10.1617/s11527-012-9855-9.

C. Véronique, « Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique », p. 249.

- M. Zeghidi « Etude des caractéristiques et durabilité des bétons légers à base de polystyrène », Thèse de master, Université de Biskra, 2018.
- M. Bederina, T. Bouziani, M. Khenfer, et M. Quéneudec, « Absorption de l'eau et son effet sur la durabilité des bétons de sable allégés par ajout de copeaux de bois », *MATEC Web Conf.*, vol. 2, p. 01006, 2012, doi: 10.1051/mateconf/20120201006.
- T. Calais, « PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET DURABILITÉ D'UN BÉTON LÉGER », p. 205.
- J. M. Chi, R. Huang, C. C. Yang, et J. J. Chang, « Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete », *Cem. Concr. Compos.*, vol. 25, n° 2, p. 197-205, févr. 2003, doi: 10.1016/S0958-9465(02)00020-3.
- J. Kosny, « Wooden Concrete–High Thermal Efficiency Using Waste Wood », p. 8.
- O.Mehena « Indicateurs de durabilité du béton dans le contexte Algérien », Thèse de magistère, Université M'Hamed Bougara, BOUMERDES, 2009.
- R.Chihaoui « Durabilité des matériaux cimentaires vis-à-vis d'un environnement chimiquement agressif », Thèse de Magister, USTMB d'Oran, 2008.
- TP Scramtaiev « L'essai de Méthode des volumes absolus », p. 14.
- Edilteco France, « CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES POLYS BETO », France.
- Bourbon Plastiques Bâtiment « Bille de polystyrène béton allégé », France, 2017.
- H. Meriem, « Etude comparative sur les caractéristiques de différents types de bétons légers », Thèse de master, Université Mohamed Kheider, Biskra, 2019.
- A.Meghazzi Habellah « étude des performances mécaniques et thermiques des bétons légers », Thèse de master, Université Mohamed Kheider, Biskra, 2017.

- P. Blilguhftin, « Superlight Thermal Insulating Aggregate, With Fine Grain, For The Preparation Of Lightweight Mortars For Sscreeds », p. 3.
- A. K. Tedjditi, F. Ghomari, O. Taleb, R. Belarbi, et R. Tarik Bouhraoua, « Potential of using virgin cork as aggregates in development of new lightweight concrete », *Constr. Build. Mater.*, vol. 265, p. 120734, déc. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120734.
- S.P. Silva, M.A. Sabino, E.M. Fernandes, V.M. Correlo, L.F. Boesel, R.L. Reis, Cork: Properties, capabilities and applications, *Int. Mater. Rev.* (2005), <https://doi.org/10.1179/174328005X41168>.
- L. Gil, Cork composites : A review, *Materials (Basel)*. 2 (2009) 776–789, <https://doi.org/10.3390/ma2030776>.
- S. Knapic, V. Oliveira, J.S. Machado, H. Pereira, Cork as a building material: a review, *Eur. J. Wood Wood Prod.* 74 (2016) 775–791, <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1076-4>.
- S. Chandre, L. Berntsson, Historical Background of Lightweight Aggregate Concrete, *ResearchGate*.
- P. K. Mehta, « CONCRETE. STRUCTURE, PROPERTIES AND MATERIALS », 1986, Consulté le : sept. 10, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://trid.trb.org/view/273357>.
- O. Ünal, T. Uygunoğlu, et A. Yildiz, « Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation », *Build. Environ.*, vol. 42, n° 2, p. 584-590, févr. 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.09.024.

C. Bidjocka, « AConception de bétons légers isolants porteurs : Application aux pouzzolanes naturelles du Cameroun », These de doctorat, Lyon, INSA, 1990.

A. J. Hamad, « Materials, Production, Properties and Application of Aerated Lightweight Concrete: Review », *Int. J. Mater. Sci. Eng.*, 2014, doi: 10.12720/ijmse.2.2.152-157.

J. P. Laurent et C. Guerre-Chaley, « Influence de la teneur en eau et de la température sur la conductivité thermique du béton cellulaire autoclavé », *Mater. Struct.*, vol. 28, n° 8, p. 464, oct. 1995, doi: 10.1007/BF02473166.

A. Mueller, S. N. Sokolova, et V. I. Vereshagin, « Characteristics of lightweight aggregates from primary and recycled raw materials », *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, n° 4, p. 703-712, avr. 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.06.009.

D. Morin et J. C. Maso, « COMPORTEMENT MECANIQUE DU BETON D'ARGILE EXPANSEE EN TRACTION BIAXIALE », *MATER CONSTR ESSAIS RECH*, vol. 9, n° 53, sept. 1976, Consulté le : sept. 10, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://trid.trb.org/view/1068971>.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MEMOIRE 

M. S. Mansour, M. T. Abadlia, et K. Bekkour, « Effet de la pouzzolane sur le comportement rhéologique des pâtes cimentaires », vol. 2, p. 9, 2010.

P. Cormon, « BETONS LEGERS D'AUJOURD'HUI. », *EYROLLES*, 1972, Consulté le: sept. 17, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://trid.trb.org/view/1078119>.

K. G. Babu et D. S. Babu, « Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume », *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, n° 5, p. 755-762, mai 2003, doi: 10.1016/S0008-8846(02)01055-4.

E. Mihlayanlar, Ş. Dilmaç, et A. Güner, « Analysis of the effect of production process parameters and density of expanded polystyrene insulation boards on mechanical properties and thermal conductivity », *Mater. Des.*, vol. 29, n° 2, p. 344-352, janv. 2008, doi: 10.1016/j.matdes.2007.01.032.

O.Taleb, F. Ghomari, M. A. Boukli Hacene, E-H. Kadri, H.Soualhi, « Effet du dosage en superplastifiant sur les caractéristiques rhéologiques des bétons autoplaçants », *Nature Technology Journal*, Vol. A: Fundamental and Engineering Sciences, 18 (2018) 17-26: http://www.univ-chlef.dz/revuenatec/issue-18/Article_A/Article_405.pdf