

UNIVERSITE DE BLIDA 1



Faculté de technologie

Département de Génie civil

Laboratoire de Géo matériaux et Génie civil

MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : Matériaux en génie civil

Formulation de bétons légers à base de granulats d'argile expansée

Réalisé par :

Derradji Rym

Demerdji Ferial

Dr.Walid YAHIAOUI

U.Saad Dahleb-Blida

Promoteur

Pr.Said KENAI

U.Saad Dahleb-Blida

Co-Promoteur

Octobre,2021

ملخص :

الأطروحة المقدمة مكرسة لدراسة تركيب و خصائص خرسانة الطين الخفيفة الموسعة هذه الأخيرة هي جزء من مجموعة الخرسانة الخاصة وتستخدم بهدف خفض وزن الهياكل مع الحفاظ على نفس الخواص الميكانيكية و تحسين الخواص الأخرى مثل العزل الصوتي و الحراري ويتم تركيبها عن طريق استبدال الحصى بحبيبات مجاميع الطين الموسعة بنسب متفاوتة , فيؤدي إلى نشوء خرسانة ذات كتلة حجميه (من 400 الى 1850 كغ/م³) أقل من الكتلة الحجمية للخرسانة التقليدية (من 2200 الى 2800 كغ/م³).

و مصنع الجي اكسيان (البلدية-بوينان) هو المورد الوحيد لحبيبات الطين الخفيفة الموسعة على مستوى التراب الوطني و لكن استخدامها لا يزال محدود وهذا هو السبب في أن عملنا يهدف أساسا إلى عرض العديد من جوانب هذه الحبيبات و مجالات استخدامها فضلا عن تجربتها في تركيب الخرسانة لدراسة تأثيرها على مقاومتها (ضغط, انحناء) و على العديد من المستويات الأخرى (الامتصاص الشعيري ,الديمومة...).

و بعد التجارب التي أجريت على جميع أنواع الخرسانة المكونة مكنتنا حبيبات الطين الخفيفة الموسعة من الحصول على خرسانة اخف من تلك العادية بنسبة 26بمائة مع مقاومة ضغط تصل إلى 25 ميغا باسكال .

و يتوج هذا بتوليف ببيوغرافي للبحوث السابقة ،للتعرف على المواد و تسهيل التعامل معها في المستقبل.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة الخفيفة, الخرسانة التقليدية, مجاميع الطين الموسعة, الامتصاص الشعيري, كثافة, العزل الحراري, العزل الصوتي, الديمومة, مقاومة الضغط, مقاومة الشد, مقاومة الانحناء.

Résumé :

Dans l'objectif de réduire le poids des structures tout en gardant les mêmes propriétés mécaniques et en améliorant d'autres propriétés tel que l'isolation thermique et acoustique ; les granulats légers d'argile expansée répondent à ces attentes, leur utilisation dans les bétons donne naissance à des bétons de masse volumique (de 400 jusqu'à 1850 kg/m³) nettement plus légère que celle des bétons conventionnels (de 2200 jusqu'à 2800 kg/m³).

ALGEXPAN (Bouinan –Blida) est le seul fournisseur de granulats légers d'argile expansée sur le territoire national, toutes fois leur utilisation reste très limitée.

C'est pour cela que notre travail vise principalement à présenter tous les aspects des granulats légers et leur utilisation ainsi que d'étudier expérimentalement les bétons confectionnés par substitution totale ou partielle des granulats légers d'argile expansée, une caractérisation des matériaux est d'abord présentée, ensuite une campagne expérimentale sur les formulations de bétons légers, ordinaires et mixtes à l'état frais et durci est entreprise.

Après la réalisation des essais à l'état durci sur les différents bétons légers de 26% par rapport aux bétons ordinaires et atteignant les 25 MPa en résistance à la compression, quant à l'absorption capillaire et la durabilité ; on a noté que celle-ci diffère selon la composition du béton.

Le tout couronné par une synthèse bibliographique de recherches antérieures, pour mieux approcher le sujet.

Mots clés : Bétons légers, bétons conventionnels, granulats légers, argile expansée, absorption capillaire, densité, isolation thermique, isolation acoustique, durabilité, résistance à la compression, résistance à la traction, résistance à la flexion.

Abstract :

In order to reduce the weight of structures while maintaining the same mechanical properties and improving other properties such as thermal and acoustic insulation, the light expanded clay aggregates meet these expectations, their use in concretes gives rise to concretes of much lighter density than of conventional concretes .

ALGEXPAN (Bouinan-Blida) is the only supplier of light expanded clay aggregates on the national territory, however their use remains very limited this is why our work is mainly aimed at presenting all aspects of light aggregates and their use as well as experimentally , studying concretes made up by total or partial substitution of light aggregates of expanded clay , a characterization of the materials is first presented , then an experimental study of the formulations of light concrete, ordinary and mixed in the fresh and hardened state is undertaken .After the tests in the hardened state on the various light concretes of 26% lighter compared to ordinary concretes and reaching the 25 MPa in compressive strength, as for capillary absorption and durability , it was noted that it differs according to the composition of the concrete.

The whole is crowned by a bibliographical synthesis of previous research , to better approach the materials .

Keywords :lightweight concrete,convetional concrete,lightweight aggregates,expanded clay,capillary absorption, density,thermal insulation,sound proofing, durability,flexural strength,compressive strength,tensile strength.



Remerciements :

C'est avec un grand plaisir que nous réservons cette page en signe de gratitude et de profonde reconnaissance à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour la réalisation de ce mémoire de fin d'études.

Nous tenons d'abord à remercier Dieu le tout puissant de nous avoir donné santé, volonté et patience pour réaliser ce mémoire.

Ainsi nous remercions notre promoteur Dr.Walid Yahiaoui et notre co-promoteur Professeur Said Kenai pour leurs conseils et directifs.

Un grand merci aux membres du jury d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous tenons surtout à exprimer nos vifs remerciements à notre encadrant Mr.Hamid Zeroub responsable support technique chez LAFARGE HOLCIM ALGERIE ; pour son aide, ses précieux conseils et le soutien qu'il n'a pas hésité à nous apporter ainsi que l'équipe du CDL LAFARGE ALGERIE qui ont précieusement contribués au bon déroulement de notre stage et ce, avec leur assistance permanente.

Nous adressons aussi nos sincères remerciements à Mr.Kribi Messaoud et Mr.Djelloul Nouredine de la part de l'usine ALGEXPAN pour leur bon accueil et leur servitude.

Et bien évidemment un grand merci à tous les profs que nous avons croisés durant notre cursus au sein du département de Génie Civil de l'Université Saad Dahleb Blida -1- .



Dédicaces

Je dédie ce travail a mes très chers parents ; Derradjí Samír et Bouhalila Saoussen sans qui je ne serai jamais arrivé là où j'en suis, je les remercie d'avoir toujours cru en moi, de m'avoir soutenu et épaulé pour que j'aille au bout de mes rêves et objectifs, quoi que je fasse ou que je dise je ne saurai point les remercier comme il se doit.

A mon adorable et chère sœur Lila qui m'a chaleureusement encouragé et motivé depuis le tout début.

A mes formidables amis qui ont toujours répondu présents ; Majda, Walid, Amir et en fin a mon meilleur ami Amine.

A ma très chère binôme, sans qui la réalisation de ce travail n'aurait pas été possible , Merci à toi Feriel pour chaque moment passer ensemble.

A mes copines Khaldi Marwa et Bal Nourhane avec qui j'ai eu la chance de partager cette aventure extraordinaire.

A l'équipe exceptionnelle du CDL LAFARGE ALGERIE qui ont fait de mon expérience au sein du CDL un formidable souvenir , un grand Merci à Mr.Zeroual Redwane ; Mr.Daoud Samir ; Mr.Kefif Nabil ; Mr.Dahakoumiane Rafik et à Mr.Houssine et Mr. Ouldache Ouramdhan et Mr.Mahfouf Kamel et Berkia Billel.

Derradj Rym .

Je dédie ce modeste travail :

En premier, aux êtres les plus chers de ma vie ceux qui m'ont apporté l'amour, le courage durant toutes mes années d'études et le soutien dans les moments les plus difficiles, par leurs sacrifices, à qui les mots ne suffiront pas pour les remercier, mon cher papa « Demerdjî Hamid » et ma très chère maman « Aissani Naïma ».

A ma grande sœur Fella et mon frère Fouad ceux qui ont été présent pour le meilleur et pour le pire.

A mes copines Bal Nourhane et Khaldi Marwa ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail.

A mon ami Kettal Khaled à ma chère binôme Rym, merci pour tous les moments qu'on a vécu ensemble, j'espère que notre amitié durera éternellement.

A l'équipe exceptionnelle du CDL LAFARGE ALGERIE qui ont fait de mon stage pratique un formidable souvenir, un grand Merci à Mr.Zeroual Redwane, Mr. Ouldache Ouramdhan, Mr.Daoud Samir , Mr.Kefif Nabil ; Mr.Dahakoumiane Rafik ,à Mr.Houssine , Mr.Mahfouf Kamel et Mr.Berkia Billel.

Une spéciale dédicace à mon neveu Aymen et mes adorables nièces Amira et Nihal.

Demerdjî Feriel.

Table des matières :

ملخص.....	2
Résumé.....	3
Absract.....	4
Table des matières.....	8
Liste des figures.....	16
Liste des tableaux.....	19
Liste des abréviations.....	21
Introduction générale.....	22
CHAPITRE I : PARTIE 01	24
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE : PROPRIETES ET CARACTERISTIQUES DES BETONS ET GRANULATS LEGERS.	
1.1.Introduction.....	24
1.2. Les bétons légers.....	24
1.2.1.La masse volumique des bétons légers.....	24
1.2.2.Classification des bétons légers.....	24
1.2.3.Les types des bétons légers.....	26
1.2.3.1. Les bétons cellulaires.....	26
1.2.3.2. Les bétons sans fines.....	29
1.2.3.3. Les bétons aérés autoclavés.....	31
1.2.3.4. Les bétons à base des granulats légers.....	32
A. Les bétons à la sciure de bois.....	32
B. Les bétons de polystyrène.....	33

1.3. Les granulats légers.....	34
1.3. a. Les granulats légers naturels.....	34
1.3. b. Les granulats légers artificiels.....	34
1.3. c. Les granulats sous-produits industriels.....	35
1.3.1. La composition chimique des granulats légers artificiels.....	37
1.3.2. La masse volumique des granulats légers.....	37
1.3.3. Absorption d'eau par les granulats légers.....	38
1.3.4. Adhérence entre les granulats légers et la matrice cimentaire.....	39
1.4. Les propriétés des bétons légers.....	39
1.4.1. Les propriétés des bétons légers à l'état frais.....	39
1.4.1.1. Maniabilité.....	39
1.4.2. Les propriétés mécaniques des bétons légers.....	40
1.4.2.1. La résistance à la compression.....	40
1.4.2.2. La résistance à la traction.....	44
1.4.2.3. La résistance à flexion.....	44
1.4.3. Les propriétés élastiques des bétons légers.....	45
1.4.4. Les propriétés thermiques des bétons légers.....	47
1.4.4.1. Le coefficient de dilatation.....	47
1.4.4.2. La conductivité thermique.....	48
1.4.4.3. La résistance au feu.....	49
1.4.5. Les propriétés acoustiques des bétons légers.....	50
1.4.6. Retrait.....	50
1.4.7. Fluage.....	51

1.5. Durabilité.....	51
1.6. Recommandations pour la planification du béton léger.....	53
1.6.1. Technologie du béton	53
1.6.1.a. Les fines.....	53
1.6.1.b. Ciment.....	54
1.6.1.c. Adjuvant.....	56
1.6.1.d. Ajouts.....	56
1.6.2. Formulation des bétons légers.....	57
1.6.3. Mise en place des bétons légers.....	58
1.6.3. a. Le malaxage.....	58
1.6.3. b. Le compactage.....	58
1.6.3. c. La ségrégation.....	58
1.6.3. d. Le surfaçage.....	58
1.6.3. e. Le transport.....	58
1.6.3. f. Traitement de cure.....	59
1.7. Le domaine d'utilisation.....	59
1.7.1. Les bétons d'isolation, non porteurs.....	59
1.7.2. Les bétons d'isolation, porteurs.....	60
1.7.3. Les bétons de structures.....	60
1.8. Les avantages des bétons légers.....	61
1.8.1. Sur le plan technique.....	61
1.8.2. Sur le plan économique.....	61
1.9. Les inconvénients des bétons légers.....	61

CHAPITRE I : PARTIE 02	63
PRESENTATION DU LABORATOIRE DE DEVELOPPEMENT DE LA CONSTRUCTION « CDL », LAFARGE HOLCIM ALGERIE	
PRESENTATION DE L'USINE D'ARGILE EXPANSEE « ARGEXPAN ».	
1.1) Présentation du laboratoire de développement de la construction « CDL ».....	63
1.2) Présentation de l'usine « ARGEXPAN ».....	64
1.2.1) Les granulats d'argile expansée.....	64
1.2.2) Les caractéristiques et propriétés des granulats légers.....	65
1.2.3) Procédures de fabrication des granulats légers.....	65
1.2.3.a) L'extraction de la matière première et son stockage.....	65
1.2.3.b) Concassage, broyage et malaxage.....	66
1.2.3.c) Le façonnage.....	66
1.2.3.d) La cuisson.....	67
1.2.3.e) Le refroidissement.....	68
1.2.3.f) Le criblage.....	68
1.2.4) Production de l'usine « ARGEXPAN ».....	69
Conclusion.....	74
CHAPITRE II : MATERIAUX ET ESSAIS.....	75
2.1. Introduction.....	75
2.2. Caractérisation des matériaux.....	75
2.2.1. Le ciment.....	75
2.2.2. L'adjuvant.....	76
2.2.3. Le sable.....	76

2.2.3.a. Masse volumique apparente des sables EN NF 1097-6.....	77
A).Matériel utilisé.....	77
B).Materiaux utilisés.....	77
C).Conduite de l’essai.....	78
2.2.3.b.Masse volumique absolue/réelle EN NF 1097-6 Annexe B.....	79
• Pour les sables légers.....	79
A).Matériel utilisé.....	79
B).Matériaux utilisés.....	80
C).Mode opératoire.....	80
• Pour les sables ordinaires.....	82
A).Matériel utilisé.....	82
B).Matériaux utilisés.....	82
C).Procédé de l’essai.....	82
2.2.3.c.Absorption des granulats.....	82
2.2.3.d.Essai d’équivalent de sable EN NF P18-598.....	83
A).Matériel utilisé.....	83
B).Materiaux utilisés.....	84
C).Mode opératoire.....	84
2.2.3.e.Essai de la valeur au bleu de méthylène NA 1948.....	85
A).Matériel utilisé.....	85
B).Matériaux utilisés.....	85
C).Mode opératoire.....	85
2.2.3.f.Analyse granulométrique par voie sèche EN NF 933-1 et EN NF 933-2.....	86

A).Matériel utilisé.....	86
B).Matériaux utilisés.....	86
C).Mode opératoire.....	86
2.2.4. Les granulats.....	91
2.2.4.a. Masse volumique apparente EN NF 1097-6 Annexe C.....	91
2.2.4. b.Masse volumique absolue des granulats légers.....	92
A).Matériel utilisé.....	92
B).Matériaux utilisés.....	92
C).Etalonnage du pycnomètre.....	92
D).Mode opératoire.....	92
2.2.4.c.Analyse granulométrique par voie sèche EN NF 933-1 et 933-2.....	94
2.3. Formulation des bétons.....	101
2.3.1.Confection des éprouvettes AVPN NA 5093.....	104
2.3.2.Essai de la masse volumique des bétons à l'état frais.....	105
A).Mode opératoire.....	106
2.3.3.Essai d'affaissement au cône d'Abrams NFP 18-451.....	106
A).Matériel utilisé.....	106
B).Conduite de l'essai.....	107
2.4. Caractérisation mécanique des bétons à l'état durci.....	107
2.4.1. La résistance à la compression.....	107
2.4.2.La résistance à la flexion.....	108
2.4.3. Coefficient d'absorption d'eau par capillarité du béton durci suivant les directives de la norme NF EN 1015-18.....	109

CHAPITRE III : INTERPRETATION DES RESULTATS	113
3.1.Introduction.....	113
3.2.Essais sur les bétons à l'état frais.....	113
3.2.1.Essai de l'affaissement au cône d'Abrams.....	113
3.2.2.Masse volumique fraîche des bétons.....	113
3.3.Essais sur les bétons à l'état durci.....	115
3.3.1.Résistance à la compression.....	115
3.3.2. Corrélation.....	119
3.3.2.a.Relation entre la masse volumique fraîche et la résistance des bétons.....	119
3.3.2.b.Relation entre la masse volumique sèche et la résistance des bétons.....	119
3.3.2.c.Relation entre l'absorption capillaire des bétons et leur résistance.....	119
3.3.3.Résistance à la flexion des bétons.....	120
3.3.4.Absorption capillaire.....	121
3.3.5.Description Macroscopique.....	123
Conclusion.....	124
Conclusion générale.....	125
Références bibliographiques.....	126
Annexe.....	132

Liste des figures:

Figure 1.1 : Gamme de masse volumique réelle sèche des bétons légers avec différents types de granulats légers.....	25
Figure 1.2 : La masse volumique des bétons cellulaires en fonction du pourcentage de leur constituant.....	28
Figure 1.3: La résistance des bétons cellulaires en fonction de leur masse volumique.....	28
Figure 1.4: Domaines de masse volumique de quelques granulats légers et courants.....	37
Figure 1.5 : La relation entre la résistance à la compression et la fraction volumique des granulats légers.....	40
Figure 1.6 : La relation entre la résistance des bétons légers et le volume d'agrégats légers (polytag 6/12mm) initialement humidifiées à 17%.....	41
Figure 1.7: Résultats de l'écrasement à 7 et 28 jours.....	43
Figure 1.8 : L'évolution des modules d'Young de bétons légers en fonction de leur résistance à la compression.....	45
Figure 1.9 : Relation entre le module d'Young du béton léger et la fraction Volumique de granulats légers.....	46
Figure 1.10: La relation entre le degré de compactage et la teneur en eau du béton compacté à granulats arrondis.....	55
Figure 1.11: Le développement de la résistance d'un béton de granulats légers à base de schiste expansé et quatre teneurs en ciment avec une teneur en eau constante.....	56
Figure 1.12 : Laboratoire de développement de la construction CDL LAFARGE.....	63
Figure 1.13: Photo du site et logo de l'usine d'argile expansée.....	64
Figure 1.14 : Le gisement de la matière première.....	66
Figure 1.15 : Le dépôt de la matière première après concassage.....	66
Figure 1.16: Machine à façonnage.....	67
Figure 1.17: Le four rotatif.....	68
Figure 1.18 : Le criblage des différentes fractions.....	68
Figure 1.19 : Les différentes fractions obtenues.....	70

Figure 2.1: Echantillonnage.....	77
Figure 2.2 : Essai de la masse volumique apparente.....	78
Figure 2.3 : Essai de la masse volumique absolue des sables légers.....	81
Figure 2.4: Essai de la masse volumique apparente.....	83
Figure 2.5: Essai de l'équivalent de sable.....	84
Figure 2.6: Réalisation de l'essai de VB.....	85
Figure 2.7 : Courbe granulométrique du sable classique grossier 0/5mm de Beghlia.....	87
Figure 2.8 : Courbe granulométrique du sable correcteur 0/1 mm de Beghlia.....	88
Figure 2.9 : Courbe granulométrique du sable d'argile expansée 0/3 mm nodulaire.....	89
Figure 2.10 : Courbe granulométrique du sable d'argile expansé 0/3 mm concassé.....	90
Figure 2.11 : Essai de la masse volumique apparente.....	91
Figure 2.12 : Réalisation de l'essai de la masse volumique.....	92
Figure 2.13 : Etape de réalisation de l'essai de la masse volumique absolue des granulats légers.....	93
Figure 2.14: Courbe granulométrique des granulats d'argile expansée 3/8 mm nodulaire.....	95
Figure 2.15 : Courbe granulométrique des granulats d'argile expansée 3/8mm concassés.....	96
Figure 2.16 : Courbe granulométrique des granulats d'argile expansée 8/15mm nodulaire.....	97
Figure 2.17 : Courbe granulométrique des granulats d'argile expansée 15/25mm nodulaire.....	98
Figure 2.18 : Courbe granulométrique des granulats ordinaires 3/8mm.....	99
Figure 2.19 : Courbe granulométrique des granulats ordinaires 8/15mm.....	100
Figure 2.20 : Courbe granulométrique des granulats ordinaires 15/25mm.....	101
Figure 2.21 : Moules cubiques de 15*15*15 cm ³	104
Figure 2.22: Eprouvettes étiquetées.....	105
Figure 2.23 : Conservation des moules dans des bacs à eau.....	105
Figure 2.24: Essais de la masse volumique des bétons à l'état frais.....	106
Figure 2.25 : Etapes de réalisation de l'essai du cône d'Abrams.....	107

Figure 2.26: Dispositif de l'essai de compression des bétons.....	108
Figure 2.27: Dispositif d'essai de flexion.....	109
Figure 2.29 : Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire.....	110
Figure 3.1 : Masses volumiques fraîches des bétons.....	114
Figure 3.2 : Effet de super-plastifiant sur la résistance des bétons.....	116
Figure 3.3 : La résistance à la compression des bétons à base de granulats 100% légers.....	116
Figure 3.4 : La résistance à la compression des bétons mixtes formulés.....	117
Figure 3.5: La résistance des différents types de bétons utilisés.....	118
Figure 3.6 : Relation linéaire entre la masse volumique fraîche et la résistance des bétons..	119
Figure 3.7 : Relation entre la masse volumique sèche et la résistance des bétons.....	120
Figure 3.8 : Relation entre l'absorption capillaire et la résistance des bétons.....	120
Figure 3.9 : Résistance à la flexion des différents types des bétons formulés.....	121
Figure 3.10 : Absorption capillaire des différents types des bétons formulés.....	122
Figure 3.11 : Le taux d'absorption des granulats légers.....	123
Figure 3.12 : coupe transversale, bétons légers (à gauche), béton ordinaire(à droite).....	123

Liste des tableaux :

Tableau1.1 : La masse volumique sèche habituelle avec des différents types de granulats légers selon le guide ACI213-R-87.....	25
Tableau 1.2 : Caractéristiques de base des bétons cellulaires d'après [Slough, UK ,199....	27
Tableau 1.3 : Propriétés habituelles des bétons légers sans fines contenant granulats de 9.5 à 19mm.....	29
Tableau 1.4 : Propriétés habituelles des bétons aérés autoclavés (traités à la vapeur sous pression).....	31
Tableau 1.5 : Composition chimique typique des argiles expansibles.....	37
Tableau 1.6 : Le taux d'absorption des granulats légers selon les investigations LWAS...38	
Tableau1.7 : La composition des différents bétons légers de l'étude expérimentale faite par Fiorio.....	40
Tableau 1.9 : Les caractéristiques des matériaux décrites l'association brésilienne des normes.....	42
Tableau 1.10 : Coefficient de dilatation thermique des bétons confectionnés avec des granulats légers.....	47
Tableau1.11 : Coefficient de dilatation thermique du béton, confectionné avec différents types de granulats.....	48
Tableau1.12 : Conductivité thermique en fonction de la masse volumique après séchage à l'étuve pour les bétons a base d'argile expansée et un béton courant.....	49
Tableau 1.13 : Estimation de la résistance au feu des murs creux en maçonnerie.....	49
Tableau 1.14 : La quantité résiduelle du ciment portland dépend du rapport E/C et de la taille des particules de ciment.....	54
Tableau 1.15 : Synthèse revue bibliographique sur les bétons légers.....	70
Tableau 2.1 : Analyse chimique du ciment MATINE.....	75
Tableau 2.2 : Composition Hypothétique du clinker.....	75
Tableau 2.3 : Propriétés physiques du ciment MATINE.....	75

Tableau 2.4: Temps de prise du ciment MATINE.....	76
Tableau 2.5 : Résistance à la compression du ciment MATINE.....	76
Tableau 2.6 : Caractéristiques de l'adjuvant.....	76
Tableau2.7 : Masses volumiques et pourcentage d'humidité des sables.....	79
Tableau 2.8 : Masses volumiques de sables et leur pourcentage d'absorption.....	83
Tableau 2.9: Mesure de l'équivalent de sable.....	85
Tableau 2.10 : Mesure de la valeur au bleu de méthylène.....	86
Tableau 2.11 : Analyse granulométrique du sable grossier de Baghlia 0/5 mm.....	87
Tableau 2.12 : Analyse granulométrique du sable fin 0/1 mm de Boussaada.....	88
Tableau2.13 : Analyse granulométrique des sables d'argile expansée 0/3 mm nodulaire.....	89
Tableau 2.14 : Analyse granulométrique du sable d'argile expansée 0/3 mm concassé.....	90
Tableau 2.15 : Masses volumiques et pourcentage d'absorption et d'humidité.....	94
Tableau2.16 : Analyse granulométrique des granulats d'argile expansée 3/8mmnodulaire..	94
Tableau2.17 : Analyse granulométrique des granulats d'argile expansée 3/8 mm concassés.....	95
Tableau 2.18: Analyse granulométrique des granulats d'argile expansée 8/15 mm nodulaire.....	96
Tableau2.19 : Analyse granulométrique des granulats légers d'argile expansée 15/25 mm nodulaire.....	97
Tableau 2.20 : Analyse granulométrique des granulats ordinaire 3/8 mm.....	98
Tableau2.21 : Analyse granulométrique des granulats ordinaire 8/15 mm.....	99
Tableau 2.22 : Analyse granulométrique des granulats ordinaires 15/25 mm.....	100
Tableau 2.23 : Formulation des bétons ordinaires.....	102
Tableau 2.24 : Formulation des bétons légers.....	102
Tableau 2.25 : Formulation des bétons mixtes.....	103
Tableau3.1: Mesures d'affaissement des différents types de bétons.....	113
Tableau 3.2 : Masses volumiques fraîches des bétons.....	114

Tableau3.3: absorption capillaire des bétons.....122

Liste des abréviations :

BL : Béton léger.

BM : Béton mixte.

GL : Granulat léger.

BO : Béton ordinaire.

GO : Granulat ordinaire

AN : Argile expansée nodulaire.

AC : Argile expansée concassée.

GC : Granulat classique.

R_c : Résistance à la compression.

R_f : Résistance à la flexion.

E/C : Le rapport eau sur ciment.

G/S : Le rapport granulat sur sable.

SP : Super-plastifiant.

ES : Equivalent de sable.

VB : Valeur au bleu de méthylène.

SC : Sable classique.

OR :Ordinaire.

Introduction générale :

Le béton, un matériau composite constitué de granulats (le plus souvent sable et gravillon), eau et ciment principalement, est le matériau le plus exploité dans le domaine de la construction, sa densité varie entre 2200 et 2600 Kg/m³.

En raison de l'importance du poids propre de ses constituants notamment les granulats on note que ceci puisse influencer la charge de la structure à un pourcentage très élevé.

C'est dans l'optique de réduire le poids des structures que les bétons légers sont apparus dès les débuts du 20^{ème} siècle.

Ces bétons font référence à des bétons de masse volumique plus faible allant de 1200 à 2000 kg/m³; soit 30% plus léger que les bétons conventionnels.

Ce matériau s'est fait connaître dans la période comprise entre les deux guerres mondiales en Europe.

Pendant cette période les expériences, se succèdent en visant à réduire le poids du béton sans nuire aux autres propriétés, au cours des années 1920 à 1930 plusieurs types de bétons furent élaborés.

Ce n'est qu'après la deuxième guerre mondiale en 1945 que le béton léger devient très populaire.

La popularité de ce matériau était tenue aux bénéfices importants apportés par ses caractéristiques.

Notamment sa légèreté ; qui est obtenu de 3 manières distinctes, en utilisant des agents moussants, en éliminant les particules fines et en utilisant des granulats légers, mais aussi de par sa faible conductivité thermique et phoniques, et encore sa résistance au cycle gel-dégel et au feu.

Ces bétons étaient produits dans un environnement industriel contrôlé.

Toutes fois l'utilisation des bétons légers revient à bien plus longtemps au 18^{ème} siècle de la part des romains par la construction de leurs édifices tels que le Panthéon et le tour de Pise.

En plus de leurs caractéristiques et une résistance équivalente à celle des bétons ordinaires, les bétons légers ont un large champ d'utilisation structurelle ou non structurelle.

Ces derniers présentent aussi de forts avantages sur le plan technique et économique [41].

Problématique :

Le poids des constituants des bétons conventionnels influe sur le poids des structures à un pourcentage très élevé ; c'est alors là que les bétons légers sont apparus ; ces derniers permettent d'avoir des ouvrages très souples lorsqu'il s'agit de sols à faible portance et des portées plus longues car l'utilisation de ces bétons permet de réduire les sections des éléments.

Structure du mémoire :

La structure de ce mémoire se compose de 3 chapitres :

Chapitre n°1 : Ce chapitre est divisé en deux parties ; la première est consacrée à une synthèse bibliographique de recherches antérieures ; et la deuxième partie à présenter l'entreprise de fabrication de granulats légers d'argile expansée en Algérie ALGEXPAN ainsi que les procédures de fabrication de ses granulats et leurs propriétés.

Chapitre n°2 : Dans ce chapitre, une caractérisation des matériaux utilisés est présentée ainsi que le déroulement des procédures expérimentales à l'état frais et durci sur les différentes formulations réalisées.

Chapitre n°3 : Ce chapitre a pour but d'interpréter les résultats obtenus.

CHAPITRE I : PARTIE 01

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE : PROPRIETES ET CARACTERISTIQUES DES BETONS LEGERS ET GRANULATS LEGERS.

1.1. Introduction :

Ce chapitre présente une étude bibliographique sur les propriétés des bétons légers et des granulats légers ; plus spécialement les bétons légers à base de granulats d'argile expansé et ce, en se basant sur des études et recherches antérieures.

1.2. Les bétons légers :

Béton léger ou alléger, le béton à base de granulats légers, est spécifié parmi les bétons spéciaux, car il diffère des bétons classiques par sa masse volumique légère inférieure à 1800kg/m^3 [5].

1.2.1. La masse volumique des bétons légers :

La densité apparente du béton traditionnel fabriqué avec des agrégats rigides est comprise entre 2200 et 2600kg/m^3 , et la masse volumique apparente sèche des bétons légers est inférieure à 1800kg/m^3 . [RILEM1970][1].

D'autres auteurs ont adopté des définitions différentes, limitant la densité apparente du béton léger à 1800kg/m^3 après avoir été séché pendant 28 jours à l'air libre [American Concrete Institute 1970][5], tandis que des recherches allemandes limitent la densité apparente du béton léger à 2000kg/m^3 [2].

Les bétons légers sont des bétons dont la masse volumique s'échelonne de 400 à 1800kg/m^3 , et cette dernière est devenue changeable en remplaçant une certaine partie des matériaux solides des bétons par des vides remplis d'air ; ces vides peuvent être localisés en trois endroits[2] :

- Au sein des granulats (alors qualifié des bétons légers).
- Dans la pâte de ciment (ce béton est qualifié de béton cellulaire).
- Entre les gros granulats par élimination des granulats fins (le béton correspondant est qualifié de béton sans fines ou béton caverneux) [3].

1.2.2. Classification des bétons légers :

La classification des bétons légers est basée sur la masse volumique de ces derniers car leur résistance y est étroitement liée.

Cela explique pourquoi la norme ACI213-R-87[5] divise le béton en trois catégories et plus précisément en 14 classes en fonction de la masse volumique dont on y trouve :

Le béton de granulats légers de structure, dont la masse volumique est comprise en 1350 et 1900 kg/m^3 (comme son nom indique ce béton est utilisé pour des applications structurelles et présente une résistance à la compression minimale 17MPa) [4].

Le béton léger de faible masse volumique, celle-ci comprise entre 300 et 800 kg/m^3 , n'est pas utilisé pour les applications structurelles mais plutôt comme isolant thermique.

Le béton de résistance moyenne se situe entre les deux, sa résistance à la compression est comprise entre 7 et 17 MPa et ses caractéristiques d'isolation thermique se situent entre celles du béton léger et celles du béton structurel léger [5].

Tableau1.1 : La masse volumique sèche habituelle avec des différents types de granulats légers selon le guide ACI213-R-87[5]

Classification	La masse volumique (kg/m^3)	La résistance a la compression (MPa)
Béton léger de structure	1350-1900	>17
Béton de résistance modéré	800-1350	7-17
Béton de faible résistance	300-800	<17

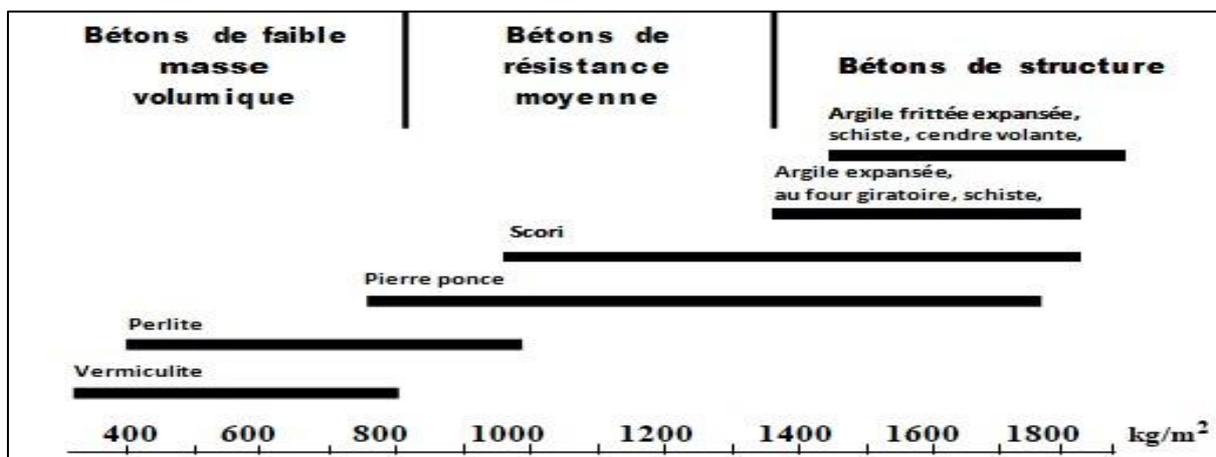
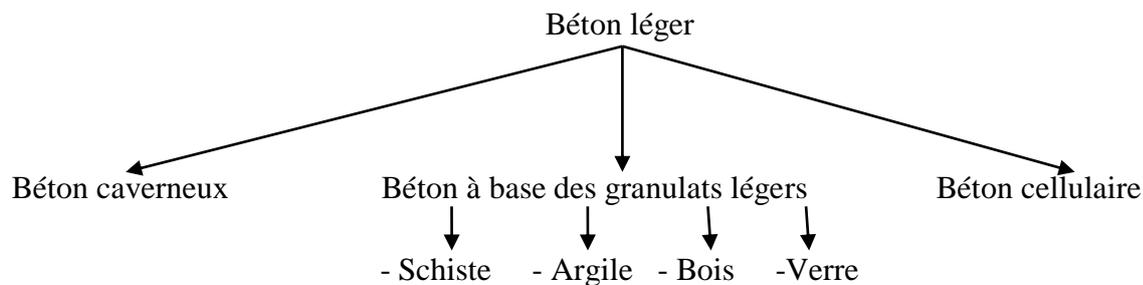


Figure 1.1 : Gamme de masse volumique réelle sèche des bétons légers avec différents types de granulats légers [7].

-La classification des bétons légers proposée par Lafarge [6] :



Une représentation schématique des différents types des bétons légers [M.SHINK2003] [7].

1.2.3. Les type des bétons légers :

1.2.3.1. Les bétons cellulaires :

-Définition :

Dans le processus de classification initiale du béton léger, on montre que l'ajout de vides stables au coulis de ciment est une méthode pour réduire la densité du béton .Les vides peuvent être générés par le gaz ou de l'air d'où les applications béton-gaz ou béton aéré [8].

L'incorporation du gaz se fait généralement avec de la poudre d'aluminium finement divisée, à une proportion d'environ 0.2%de la masse de ciment.

La poudre réagit avec l'hydroxyde de calcium ou l'alcali de ciment libéré par les bulles d'hydrogène ces bulles provoquent une expansion.

-La poudre d'aluminium en présence d'alcalis du ciment réagit comme suit :



En introduisant en même temps du ciment , de l'eau et du sable ,une mousse pré-préparée (dans un générateur spécial de mousse),dans le malaxeur ,des bulles peuvent être générées dans le béton ,ces vides sont très petits et leur taille varie entre 0,1 et 1µm[10].

-Les caractéristiques des bétons cellulaires :

Selon le chercheur Hoff[11], la résistance et la conductivité thermique dépendent de la masse volumique des bétons, donc il a proposé d'exprimer la résistance du béton cellulaire en fonction de la quantité des vides introduits et du volume d'eau évaporable.

La résistance du béton cellulaire durci à l'humidité après confection dépend du volume total des vides dans le béton, en d'autres termes, sa résistance dépend du rapport E/C et du volume des vides introduits [17].

Pour un béton cellulaire de masse volumique sèche de 1600kg/m^3 , il présente un fort retrait de l'ordre de $700 \cdot 10^{-6}$ et jusqu'à $3000 \cdot 10^{-6}$ pour ceux dont la masse volumique sèche est de 400kg/m^3 [17].

Le module d'élasticité du béton cellulaire est généralement compris entre 1.7 et 3.5GPa [11].

Et le tableau ci-dessous montre les propriétés habituelles des bétons cellulaires utilisé au Royaume-Uni.

Tableau 1.2 : Caractéristiques de base des bétons cellulaires d'après [Slough, UK ,1991] [12]

Teneur en ciment (kg/m^3)	300	320	360	400
Masse volumique à la mise en place (kg/m^3)	500	900	1300	1700
Masse volumique séchée au fou (kg/m^3)	360	760	1180	1550
Teneur en granulats fins (kg/m^3)	0	420	780	1130
Teneur en air (%)	78	62	45	28
Résistance a la compression (MPa)	1	2	5	10
Conductivité thermique ($\text{Jm/m}^2\text{s}^\circ\text{C}$)	0.1	0.2	0.4	0.6

-La mise en œuvre des bétons cellulaires :

Le béton cellulaire s'écoule librement, il est facile à pomper et à mettre en place, ne nécessite pas de serrage et, ce type de béton peut contenir des granulats ou non des granulats, ce dernier cas correspond généralement à son isolation thermique et peut obtenir une densité séchée au four de 300kg/m^3 et exceptionnellement 200kg/m^3 .

-Le domaine d'utilisation des bétons cellulaires :

Il peut être utilisé pour les sols, le remplissage de tranchées, l'isolation des toits et d'autres applications d'isolation, ainsi que pour la fabrication des blocs de maçonneries [17].

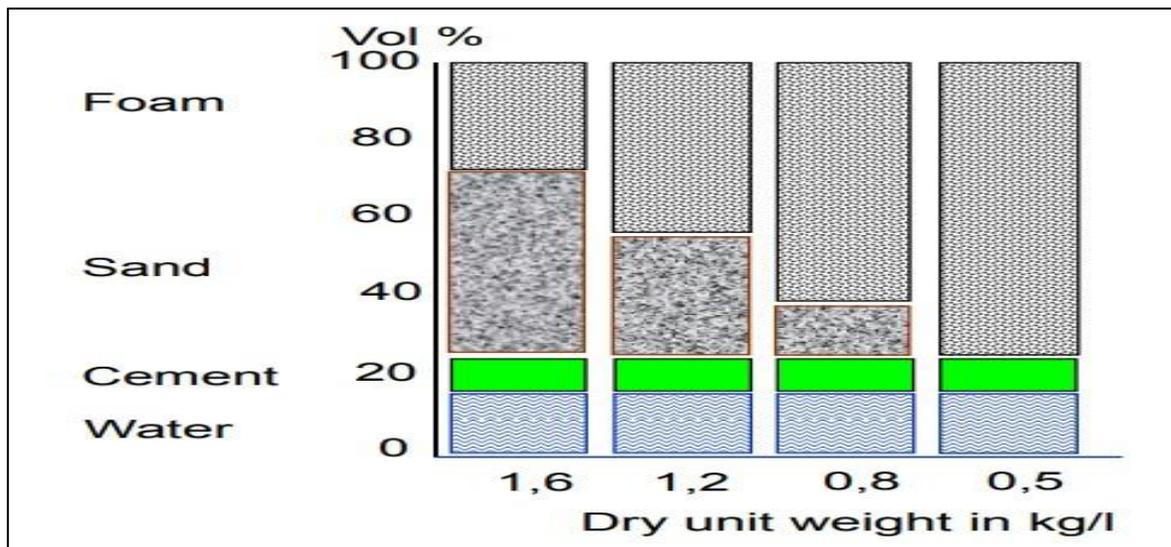


Figure 1.2 : La masse volumique des bétons cellulaires en fonction du pourcentage de leur constituant [68].

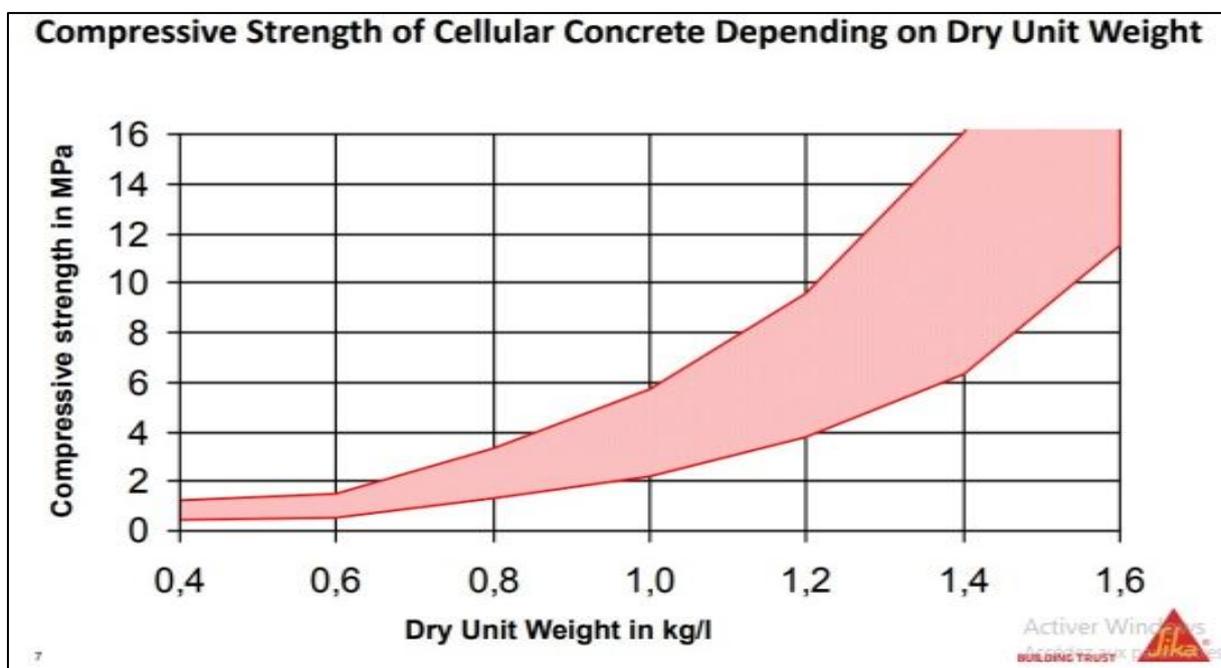


Figure1.3: La résistance des bétons cellulaire en fonction de leur masse volumique [68].

L'illustration n°1 montre la chute de masse volumique des bétons cellulaires en fonction du pourcentage de leur constituant, quant à l'illustration n°2 elle explique l'accroissement de la résistance en compression des bétons cellulaires en fonction de l'augmentation de leur masse volumique.

1.2.3.2. Les bétons sans fines (caverneux) :

Le béton sans fines est une sorte de béton légers ,obtenu par élimination des particules fines, c'est-à-dire qu'il ne contient que du ciment ,de l'eau et des gros granulats c'est une agglomération de gros granulats ,chacun enrobé par une couche de pâte de ciment d'une épaisseur allant jusqu'à 1.3mm .Par conséquent , il existe de grands vides dans la masse , ce qui entraine une faible résistance , mais leur taille empêche tout mouvement capillaire de l'eau [54].

Afin d'obtenir un béton sans fines, de faible masse volumique, il faut utiliser que des granulats d'une seule fraction (la dimension habituelle est de 10 à 20mm), il faut éviter les agrégats plats ou allongés mais aussi les granulats concassés qui se fissurent partiellement sous charge, l'agrégat doit être humidifié avant le malaxage pour faciliter une couverture uniforme de coulis de ciment [17].

-Les caractéristiques des bétons sans fines :

Selon les recherches de.McIntosh ,Botton , Muir[13] la masse volumique des bétons sans fines est en fonction de leur dosage en ciment , dosage en eau ainsi que la masse volumique de leur granulats.

D'après Vernould [17] la masse volumique des bétons sans fines à base de granulats de densité normale varie entre 1600 et 2000kg/m³, mais avec l'utilisation de granulats légers il est possible de descendre à 640kg/m³.

Tableau 1.3 : Propriétés habituelles des bétons légers sans fines contenant granulats de 9.5 à 19mm[13]

Rapport G/C	Rapport E/C	Masse volumique (kg/m³)	La résistance à la compression à 28 jours (MPa)
6	0.38	2020	14
7	0.40	1970	12
8	0.41	1940	10
10	0.45	1870	7

Interprétation :

La résistance à la compression des bétons sans fines est généralement comprise entre 1.5 et 14 MPa, selon la masse volumique qui dépend de la quantité de ciment [13].

La prédiction du rapport E/C optimal est assez difficile, notamment parce qu'elle dépend de l'absorption des agrégats, et le rapport E/C dépend de la quantité de ciment nécessaire pour enrober adéquatement les granulats. (un rapport E/C supérieur au rapport optimal empêche la pâte de ciment d'adhérer aux granulats parce que celle-ci coulait, alors qu'un rapport E/C trop faible ne permettait pas l'adhérence de la pâte de ciment parce qu'elle était trop sèche).

La résistance à la flexion des bétons sans fines est généralement égale à 30% leur résistance à la compression, ce qui est relativement plus élevé que la résistance à la flexion du béton ordinaire selon Willson et Malhotra [21].

Le taux de retrait du béton sans fines est bien inférieur que celui du béton classique dont sa valeur est de $120 \cdot 10^{-6}$, et peut atteindre les $200 \cdot 10^{-6}$ en présence de l'humidité.

Le module d'élasticité de ce béton varie avec sa résistance par exemple pour une résistance de 5 MPa il peut être égal à 10 GPa [34].

Le coefficient de conductivité thermique du béton sans fines confectionnés avec des granulats rigides est d'environ 0.69 à 0.94 J/m²s°C mais n'est que d'environ 0.22 J/m²s°C avec des granulats légers [34].

-Mise en œuvre des bétons sans fines :

Il n'y a pas d'essai d'ouvrabilité pour les bétons sans fines, mais ces derniers nécessitent une inspection visuelle pour voir si l'agrégat est correctement recouvert [34].

Ce type de béton doit être mis en œuvre rapidement car la fine couche de coulis peut sécher, ce qui va diminuer la résistance du matériau, ce béton ne doit pas être vibré ni compacté, mais un pilonnage dans les coins du coffrage et autour des obstacles recommandé.

Puisque le béton sans fines ne ségrège pas, il peut être mis en place d'une hauteur considérable à l'aide d'un monte charge pouvant atteindre les étages [14].

-Le domaine d'utilisation des bétons sans fines :

Le béton sans fines est inutilisable dans les fondations ou dans les situations où il peut se saturer en eau à cause de sa forte absorption d'eau qui peut atteindre 25% en volume, on ne peut pas l'utiliser en béton armé, mais dans le cas où cette utilisation est nécessaire, les armatures doivent être recouvertes d'une fine couche d'environ 3mm de pâte de ciment pour éviter la corrosion des armatures et améliorer l'adhérence [34].

On utilise ces bétons dans les murs porteurs des bâtiments, dans les panneaux de remplissage c'est grâce à leur texture ouverte qui les rend apte à recevoir un revêtement.

1.2.3.3. Les bétons aérés autoclavés :

L'autoclavage est un type de traitement à haute pression à la vapeur, il permet d'obtenir une résistance plus améliorée, ce traitement, se fait généralement à une température de 180°C, de sorte que le ciment portland et la chaux (souvent ajoutée avec un sable siliceux ou des cendres volantes ou un mélange entre ces deux matériaux) donnent une réaction pozzolanique rapide.

-Remarque :

Les cendres volantes donnent une couleur grise au béton alors que celle du sable pur est blanche.

Tableau 1.4 : Propriétés habituelles des bétons aérés autoclavés (traités à la vapeur sous pression)[15]

Masse volumique sèche (kg/m³)	La résistance à la compression (en présence de l'humidité)(MPa)	La résistance à la flexion (MPa)	Module d'élasticité	Conductivité thermique (0,3% d'humidité) (J/m²s°C)
450	3,2	0,65	1,6	0,12
525	4,0	0,75	2	0,14
600	4,5	0,85	2,4	0,16
675	6,3	1,00	2,5	0,18
750	7,5	1,25	2,7	0,20

-Interprétation :

Le tableau ci-dessus donne les caractéristiques des bétons autoclavés confectionnés au Royaume-Uni sous forme de blocs de maçonnerie ou de panneaux armés, habituellement ces bétons ont une faible résistance a la compression qui varie entre 2 et 8 MPa que celle des bétons conventionnels, mais ils offrent l'avantage d'une faible masse volumique de 500 à 1000kg/m³, et des propriétés d'isolation thermiques[34].

1.2.3.4. Les bétons à base des granulats légers :

Ce sont des bétons constitués de granulats de faible densité (billes de polystyrène ; argile, schiste, perlite expansée ; bois ; plastique ...).

Les propriétés des granulats légers peuvent avoir une influence sur les caractéristiques du béton à l'état frais et durci.

Les granulats doivent être choisis en prenant en compte leurs propriétés pour obtenir le béton souhaité

La résistance des granulats légers est conférée au béton ; la qualité et la résistance des granulats légers sont un facteur très important pour la réalisation d'un béton léger résistant

Il est a noté que pour obtenir un BL de résistance équivalente à celle des BO ; l'utilisation d'ajouts cimentaires tel que les cendres volantes et le laitier des hauts fourneaux est indispensable.

Un dosage en eau et en ciment adéquats sont requis pour la confection de ces bétons.

Des granulats de masse volumique et de résistance et de taille adéquate sont un facteur très important.

En respectant ces critères ; on arrive donc à obtenir un béton de résistance pouvant atteindre. 70 à 80 MPa ; pour des masses volumiques respectives de 1800 à 1900 kg /m³ ; et ce pour des bétons de structures [34].

2.3.4.a. Béton à la sciure de bois :

Le béton à la sciure de bois a une masse volumique comprise entre 650 et 1600kg/m³.

En raison de sa grande sensibilité de l'humidité, le béton à grain de bois ne doit pas être utilisé là où il peut être exposé à l'humidité.

Le fil du bois doit être propre et ne doit pas contenir trop d'écorce, il peut contenir beaucoup de matière organique, ce qui nuira à l'hydratation.

La sciure de bois tropical est utilisée pour fabriquer du béton rigide avec une résistance de 30 MPa à 28 jours et une résistance au fendage de 2.5 MPa pour une masse volumique de 1490kg/m³.

D'autres résidus de bois, tel que des fragments et des copeaux, après un traitement chimique approprié, ont aussi été utilisés pour confectionner des bétons non porteurs avec une masse volumique comprise entre 800 et 1200kg/m³.

Généralement ce type de béton est destiné pour les panneaux préfabriqués destinés à la construction des bâtiments à faible consommation d'énergie [18].

1.2.3.4.b. Béton de polystyrène :

Les bétons légers à base de billes de polystyrène expansé doivent être considérés à part. Leur masse volumique relativement faible peut être comprise suivant les formulations entre 400 et 800 Kg/m³ ou plus, jusqu'à 1200 ; 1300 Kg/m³ en diminuant le pourcentage de billes de polystyrène constituant le gros granulat par rapport au mortier [34].

Ces bétons font l'objet de bons isolants thermiques et phoniques, leur coefficient de conductivité étant de l'ordre de 0.20 pour des densités de 0.4 et de 0.3 densité de 0.8, ils peuvent être confectionnés dans des centrales de BPE et sont éventuellement pompables à l'aide de pompes à rotor au travers de canalisation de 80 à 100 mm maximum. Leur mise en place est aisée à la condition de ne pas les vibrer, ce qui provoquerait une remontée des billes de polystyrène [17].

Ces bétons peuvent être utilisés comme forme de pente, en isolation de toitures, en réfection de planchers anciens, mais dans ce dernier cas avec complément d'une chape destinée à éviter le poinçonnement ultérieur.

Ils peuvent être comparés aux bétons cellulaires de point de vue des caractéristiques et usages [34].

1.3. Les granulats légers :

La caractéristique de base des granulats légers est leur porosité, qui conduit à une faible densité apparente. certains granulats légers se trouvent dans la nature, tandis que d'autres sont constitués de matériaux naturels ou sous industriels [16].

C'est-à-dire que les granulats légers peuvent être d'origine naturelle ou artificielle.

1.3.a. Les granulats naturels :

Ce sont tous ceux d'origine volcanique qu'on trouve dans la nature et qu'on obtient par extraction[57].

Les principaux agrégats de cette catégories sont les dialomées, la pierre ponce, les scories, les cendres volcaniques, le tuf à l'exception des dialomées, le reste étant des roches volcaniques

Remarque :

Les granulats légers naturels ne sont pas très utilisés

- La pierre ponce : est une sorte de mousse de verre volcanique de couleur claire avec une densité en vrac comprise entre 500 et 900kg/m³. la pierre ponce dans la confection des bétons remonte a la Rome antique[17].
- Les scories : sont des roches vasculaires et vitreuses, assez semblable au cendres industrielles, elles permettent la confection de béton dont les propriétés sont comparable a celles des bétons a base de pierre ponce [17].

1.3.b. Les granulats artificiels :

Les agrégats légers constitués de matériaux naturels dans la structure en béton sont de l'argile expansée, du schiste et de l'ardoise, qui sont obtenus en chauffant complètement les matières premières dans un four rotatif pour commencer à fondre a une température de 1000 à 1200°C[7].

L'expansion des matériaux survient par suite des gaz générés qui sont piégés au sein de la masse pyroclastique visqueuse (cette structure poreuse est maintenue lors du refroidissement de sorte que la densité apparente du matériau expansée est beaucoup plus faible qu'elle ne l'était avant chauffage[34].

La matière première est généralement concassées a une taille souhaité avant la calcination, mais elle peut être également être concassées après son expansion, cet expansion peut être également réalisée en utilisant une grille frittée dans ce cas le matériau est mouillé (contenant du charbon ou mélangé a du mazot) et transporté sur une grille mobile sous le bruleur afin que la combustion pénètre progressivement dans toute l'épaisseur [34].

Les particules en argiles ou de schistes pulvérisés peuvent être utilisés en boulette.

L'utilisation des matériaux en boulette conduit a obtenir des éléments a coques lisses ou des revêtements de 50 à 100 μm d'épaisseur entourant des substances poreuse , ces éléments presque sphériques ont un glaçage superficiel semi imperméable, et leur taux absorption est bien inferieur a celui des autres sans celui-ci (revêtement/ écorce) en outre ils sont plus facile a manipuler et a mélanger , tout en produisant un béton plus facile a traiter [17].

Les granulats obtenus par le procédé de frittage ont une densité apparente qui varie entre 650 et 900 kg/m^3 et de 300 à 650 kg/m^3 lorsqu'ils sont fabriqués avec un four rotatif.

Le béton fabriqué avec des granulats d'argile ou de schiste expansés a généralement une résistance plus élevé que le béton fabriqué avec d'autres granulats faits de matériaux naturels qui peuvent produire un béton de faible masse volumique , comme la perlite et la vermiculite[17].

- La vermiculite est un matériau avec une structure en couches, très similaire au mica, elle subit une forte expansion a une température comprise entre 650 et 1000°C , le béton a base de vermiculite a une faible résistance et un retrait très élevé , mais il représente une bonne isolation thermique[17] .
- La perlite est une roche volcanique vitreuse traité a une température comprise entre 900 et 1100°C, ces bétons font rapidement prise et les opérations de finitions peuvent se faire en peu de temps [34].

1.3. c.Les granulats des sous-produits industriels :

Les principaux sous produits industriels utilisés dans la fabrication des granulats légers sont les cendres volantes et le laitier de hauts fourneaux.

Les cendres volantes très fines humidifiées, transformées en suspension, puis frittées dans un four adapté pour obtenir une forme ronde, ceux-ci sont considérés comme de très bons granulats avec une densité apparente d'environ 1000kg/m^3 .

Le laitier des hauts fourneaux fabriqué selon 3 procédures :

Dans le premier cas, une quantité limitée d'eau entre en contact avec le laitier déchargé du four sous forme de jet, la vapeur dilate le laitier et se solidifie en une forme poreuse avec un aspect similaire à la pierre ponce.

Dans le second cas, le laitier fondu est rapidement agité avec une quantité précise

D'eau, la vapeur est captée et un gaz se forme grâce à la réaction chimique de certains composants du laitier avec la vapeur d'eau.

Un autre procédé qui est le plus moderne consiste à produire du laitier des hauts fourneaux expansée en boulette, dans lequel le laitier fondu contenant des bulles de gaz est projeté à travers un jet d'eau pour former des boulettes, celle-ci sont de forme arrondie et ont un revêtement lisse en surface.

La masse volumique des bouettes en laitier de haut fourneau est de l'ordre de 850kg/m^3 .

Remarque :

Seuls les granulats produits par expansion d'argile, de schiste, d'ardoise de cendre volantes ou de laitier de haut fourneau peuvent être utilisés pour confectionner des bétons structuraux.

En conclusion, les granulats légers artificiels sont obtenus suite à divers procédés de fabrication à partir d'une matière première d'origine naturelle tel que l'argile expansée ou en traitant un sous produit tel que le laitier des hauts fourneaux ... la caractéristique principale qui regroupe ces granulats est leur porosité élevée qui se traduit en faible densité [57].

Les granulats légers faits à partir de déchets industriels ont été utilisés depuis très longtemps au Royaume Uni.

Parmi ces déchets, les cendres de clinker sont utilisées

Pour fabriquer des GL artificiels, à cause de leur faible coût.

L'industrie des GL a fait d'énormes progrès en termes de qualité et de quantité [58].

La résistance des BL fabriqués à l'aide de granulats issus de déchets industriels peut atteindre les 30 à 80 MPa [59].

1.3.1. La composition chimique des granulats légers artificiels :

Les granulats légers fabriqués à partir d'argile et de schiste expansés ont trois composés majoritaires : la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3) et l'hématite (Fe_2O_3). Un exemple des proportions généralement rencontrées pour des granulats en argile expansé est présenté dans le tableau ci-dessous. Il est à noter que les proportions pour le schiste expansé sont généralement semblables à celles de l'argile [7].

Tableau 1.5 : Composition chimique typique des argiles expansibles [7]

Composés chimiques	Valeurs extrêmes %
SiO_2	50-70
Al_2O_3	16-20
Fe_2O_3	5-9

Les granulats légers peuvent être utilisés dans le béton comme granulats fins ou comme gros granulats. Généralement, les granulats fins légers sont utilisés pour la mise en œuvre de la cure interne, alors que les gros granulats légers sont employés pour des bétons légers de structure, là où la réduction de masse est la plus bénéfique[17].

1.3.2. La masse volumique des granulats légers :

La masse volumique des granulats légers varie en fonction de leurs matières premières et des procédés de fabrication [17].

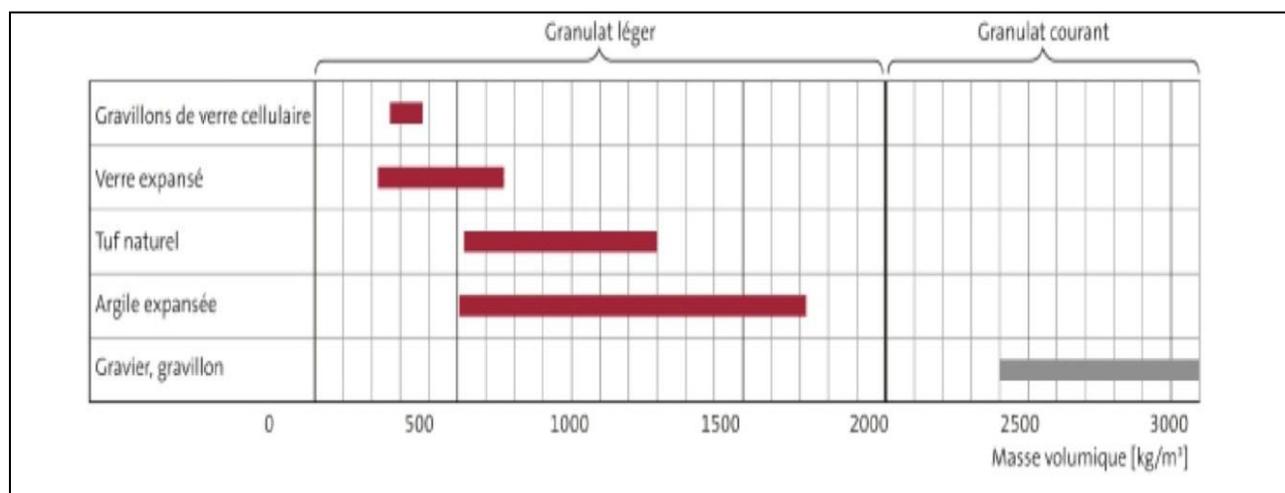


Figure 1.4: Domaines de masse volumique de quelques granulats légers et courants.

1.3.3. Absorption d'eau par les granulats légers :

Selon une étude britannique le taux d'absorption des granulats de densité normale est généralement inférieure à 2%, en comparant avec celle des granulats légers qui est comprise entre 5 et 20% de la masse sèche des granulats (dans le cas des bétons structuraux de bonne qualité le taux d'absorption ne dépasse pas les 15%) [5].

L'absorption d'eau des granulats légers est généralement décrite comme continuité de deux étapes :

L'étape d'absorption rapide, allant quelque secondes à quelque heures, se produira une fois le granulat sec est immergé, une période d'absorption plus lente avant d'atteindre une valeur stable qui, peut durer jusqu'à deux ans, d'un point de vue microscopique ces deux phases s'expliquent par les caractéristiques des pores.

Selon le type de granulat, le diamètre du trou varie de 1 à 300 μ m ; Généralement les pores près de la surface sont facilement pénétrés et fortement interconnectés, les pores internes se remplissent plus lentement et une grande partie d'entre eux n'étant pas interconnectés [31].

On constate que les granulats légers ont la particularité d'absorber de l'eau et ce phénomène est lié directement à leur structure inférieure alvéolaire.

On note que la taille et la distribution des pores influent sur la capacité d'absorption.

Des données de littératures montrent que le taux d'absorption d'eau des granulats légers artificiels est très élevé par rapport de celle des granulats naturels [17].

Tableau 1.6 : Le taux d'absorption des granulats légers selon les investigations LWAS [17]

Les types des granulats légers	Taux d'absorption (% par masse)
Vermiculite expansée	162
Argile expansée	56
Verre expansée	48
Perlite	230

Une conséquence importante liée à l'absorption d'eau par les granulats légers vient du fait que lorsque l'hydratation du ciment fait diminuer l'humidité relative dans les pores de la pâte de ciment durcie, l'eau présente dans le granulat va migrer vers ces endroits capillaires (vides

capillaires) permettant une hydratation supplémentaire , cette situation peut être qualifiée de « murissement humide interne »[17].

1.3.4. Adhérence entre les granulats légers et la matrice cimentaire :

La bonne adhérence entre les granulats et la pâte de ciment hydraté est une caractéristique importante du béton, plusieurs facteurs peuvent expliquer ce phénomène :

La rugosité de la surface de nombreux granulats légers contribue au bon emboîtement mécanique des deux matériaux, en effet, le coulis de ciment pénètre souvent dans les ouvertures situées à la surface du gros granulat.

L'eau absorbée par l'agrégat pendant le malaxage devient disponible pour l'hydratation des particules de ciment incomplètement hydratées au fil du temps.

Le module d'élasticité du granulat léger est très similaire a celui de la pate de ciment donc il n'y a pas de contraintes différentielles induites entre les deux matériaux [17].

Dans le même ordre d'idée Brenner et Holm ont observés que l'air entraîné réduit le module d'élasticité, c'est pour cette raison que le module d'élasticité des bétons légers est beaucoup plus faible que celui des bétons ordinaires[17].

1.4. Les propriétés des bétons légers :

1.4.1. Les propriétés des bétons légers à l'état frais :

1.4.1.1. Maniabilité :

La maniabilité du béton léger et son développement dans les deux ou trois heures après fabrications sont directement liés au phénomène de migration de l'eau entre les granulats léger et la matrice cimentaire , et en raison de la faible densité des granulats légers on dit que la plasticité et consistance ne peuvent pas être correctement contrôler à l'aide de cône d'Abrams , par conséquent, les laboratoire de recherche ont donc développés un autre test utilisant un appareil appelé « maniabilimètre » a béton ,qui consiste a remplir un récipient prallépedique limité par une cloison mobile, l'appareil est soumis des vibrations normalisées et on mesure le temps nécessaire pour que le béton atteigne un repère donné après enlèvement de la paroi mobile [17].

1.4.2. Les propriétés mécaniques des bétons légers :

1.4.2.1. La résistance à la compression :

Les caractéristiques mécaniques des bétons de granulats légers dépendent fortement des propriétés et proportions de ces granulats présents dans la formulation selon l'étude expérimentale faite par Torrenti et al en 1999[73] est confirmées par les études de Fiorio en 2004[78], qui détaillent l'influence de la fraction volumique sur la résistance du béton léger ainsi que leur forme granulométriques et leur rigidité dont il résume ces résultats obtenus par :

L'augmentation de la fraction volumique des granulats est interprétées par une diminution de la résistance à la compression, c'est pour cela il recommande une adjonction de 6% de fines dans les bétons légers, d'après les bétons formulés et nommés selon leurs pourcentage en granulats légers présentés ci-dessous.

Tableau1.7 : La composition des différents bétons légers de l'étude expérimentale faite par Fiorio [73].

	C_0	$C_{0.125}$	$C_{0.25}$	$C_{0.375}$	$C_{0.415}$	$C_{0.45}$
Ciment (kg/m^3)	753,90	659,66	565,42	471,19	441,03	414,64
Sable (kg/m^3)	1055,46	923,53	791,59	659,66	617,44	580,50
Granulat léger (kg/m^3)	0,00	152,90	305,81	458,71	507,64	550,45
Eau (kg/m^3)	336,24	294,21	252,18	210,15	196,70	184,93
Masse volumique sèche (kg/m^3)	1987,56	1852,85	1731,93	1574,60	1556,10	1502,19
Affaissement (cm)	19.8	20	20.2	16.2	17.7	16.6

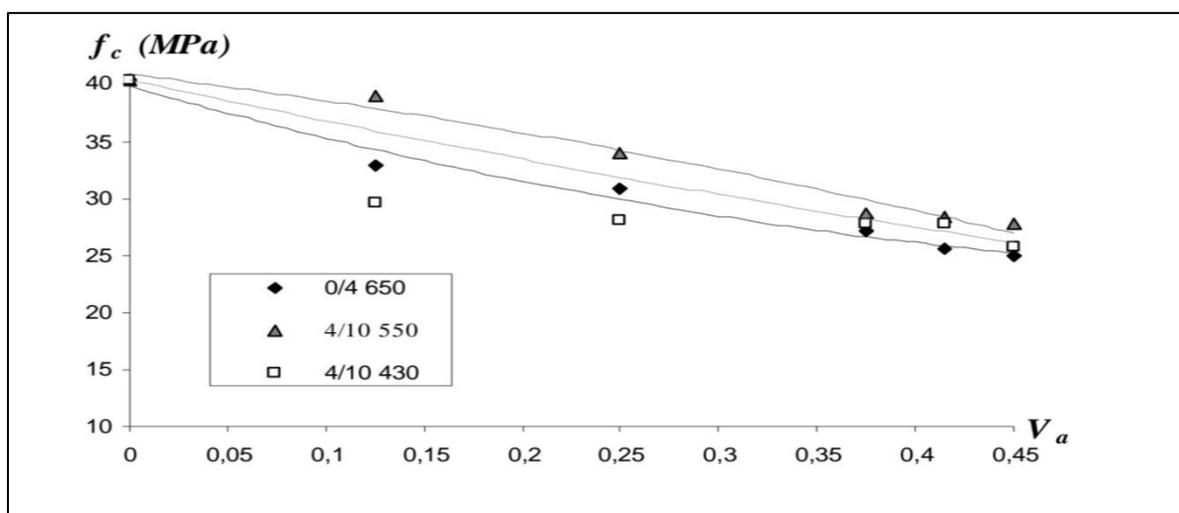


Figure1.5 : La relation entre la résistance à la compression et la fraction volumique des granulats légers [73].

Lucyna Domagla[79] présume que même une petite réduction du rapport E/C peut donner un effet visible sur la résistance et la durabilité et ce pour les bétons ordinaires ; tant dit que pour les bétons légers la diminution du rapport E/C par l'absorption des granulats légers qui est plus complexe.

Etant donné que le granulat légers est la composante la plus faible du composite.

C'est à partir de ceci que vient le point de vue que l'augmentation de la teneur en granulats légers dans le béton devrait conduire à une diminution de la résistance.

C'est pour cela que les granulats légers sont humidifiés au préalable pour ne pas entraîner une baisse de résistance, manque d'ouvrabilité et aucune atteinte à la durabilité.

L'imprégnation des granulats légers dans de l'eau induit a une saturation de ces derniers surtout au niveau des pores inter granulaires ce qui conduit à obtenir un béton de meilleure qualité et une bonne adhérence entre le granulat léger et la matrice cimentaire au niveau des pores intra granulaires .

L'humidification préalable des granulats légers permet de réduire le rapport E/C du mélange, ce qui donne une meilleure résistance, il est remarqué que plus le rapport E/C est petit, plus la résistance augmente avec l'augmentation de a teneur du béton en granulats légers.

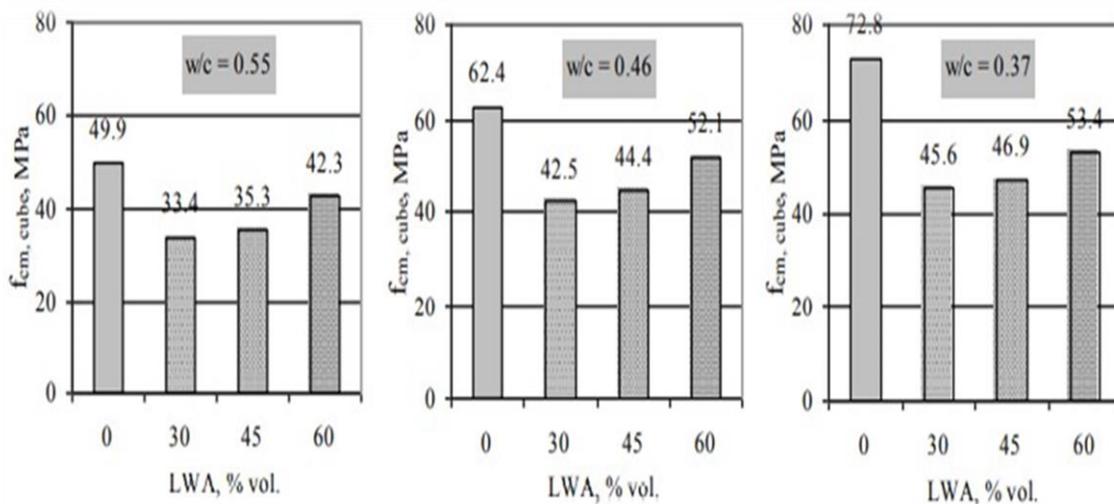


Fig. 3. The relationship of mean compressive strength of lightweight concrete and volume content of LWA (Pollytag 6/12 mm) initially moistened to mc = 17 %.

Figure 1.6 : La relation entre la résistance des bétons légers et le volume d'agrégats légers (pollytag 6/12mm) initialement humidifiées à 17% [79].

Il existe une relation entre la teneur en ciment du béton et sa résistance à la compression [19], le tableau ci-dessous donne quelques valeurs tirés de la norme ACI213-R-87[5] et montre la relation entre le béton léger et le dosage en ciment.

Tableau 1.8: Relation approximative entre la résistance à la compression de béton léger et le dosage en ciment [ACI213-R-87] [5]

Résistance à la compression sur cylindre normalisé (MPa)	Dosage en ciment (kg/m ³)	
	Avec granulats fins légers	Avec granulats de densité normale
17	240-300	240-300
21	260-330	250-330
28	310-390	290-390
34	370-450	360-450
41	440-500	420-500

Les standards brésiliens ABNT NBR 6118 ,2003[20], prescrivent que la résistance minimale du béton de structure doit être de 20 MPa.

Conformément à la recommandation de l'association brésilienne des normes techniques, les caractéristiques des matériaux utilisés pour une étude sont décrites dans le tableau suivant :

Tableau 1.9 : Les caractéristiques des matériaux décrites l'association brésilienne des normes [20]

	Type	Densité kg/m ³	Unité de masse kg /m ³
Ciment	Ciment portland CP II Ep 32	3150	-
Sable	Naturel	2654	1520
Granulats ordinaires	Basalte	2900	1510
Granulats d'argile expansée	Brésilien	700	500

Deux dosages en ciment ont été utilisés : 250 kg/m^3 et 350 kg/m^3 .

Après la formulation du béton léger, le béton a été mis dans des moules cylindriques de 100 mm de diamètre et 200 mm de longueur, les éprouvette ont été démoulées après 24 heures et mises dans une salle de conservation à 60% d'humidité à une température de $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

L'essai d'écrasement a démontré les résultats suivant (à 7 et 28 jours) :

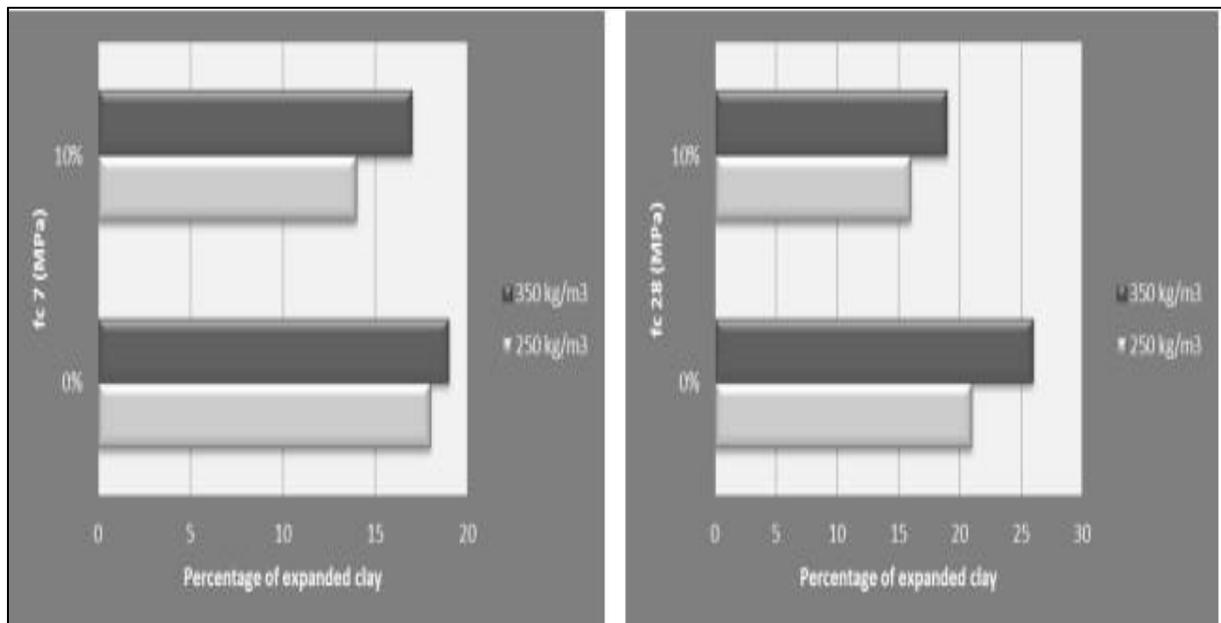


Figure 1.7:Résultats de l'écrasement à 7 et 28 jours [20].

D'après l'association brésilienne des normes le béton ayant un dosage en ciment de 350 kg/m^3 montrent une résistance à la compression meilleure que le béton a un faible dosage en ciment (250 kg/m^3)[20].

Ils ont aussi remarqué que le béton ayant un % de granulats d'argile expansée présente des résultats plus faibles comparé au béton ordinaire.

Leur conclusion est que le béton ordinaire montre une meilleure résistance à 28 jours et que le dosage en ciment est un facteur très important dans le développement de la résistance du béton.

Suite aux informations obtenus par cette étude on conclut que les bétons léger et bétons Ordinaires, l'interaction entre la pâte de ciment et granulats devient meilleure avec un dosage en ciment plus élevé.

Angelin et al[20] ont observés d'après cette étude que la résistance en compression des BL diminue de 13% comparé aux BO.

Le béton présente de grandes résistances lorsqu'on y ajoute divers ajouts pouzzolaniques

(Cendres volantes, fumés de silice, méta kaolin ...) combinés a des adjuvants réducteurs d'eau, ceci augmente la compacité de ce dernier et de ce fait augmente sa résistance.

Les granulats légers structuraux sont capable de produire des bétons de résistance allant de 48 à 69 MPa , en général un accroissement de densité est nécessaire pour obtenir des BL de plus grandes résistances , cet accroissement est possible en y ajoutant des ajouts tel que cités précédemment tout en augmentant le dosage en ciment [60] .

L'influence des agrégats ne peut être négligée, le béton doit avoir une composition qui lui permet d'être compacté avec l'équipement nécessaire, et le béton doit avoir les propriétés requises [61].

Les bétons légers utilisés a des fins structurelles ont une masse volumique comprise entre 1200 et 2000 kg/m³ et des résistances atteignant les 25 à 80 MPa [62].

1.4.2.2. La résistance à la traction :

Comme le béton ordinaire, la résistance à la traction du béton léger est assez faible, car les fissures peuvent se propager à travers les agrégats légers et non pas au niveau de l'interface selon Willson [21]. Pour le béton d'une densité de 1940kg/m³ la résistance à la traction est de 2,3 et 4,2MPa [21], soit de 3,5 à 5,6MPa par exemple, des bétons avec des densités allant de 1620 à 1885 kg/m³ ont été rapportés Zhang, Gjorv[22].

Le renforcement des bétons légers par des fibres métalliques et non métallique est faiblement utilisé mais des macros-fibres sont déjà utilisés pour diminuer les risques de fissurations dues aux efforts de tractions notent Campion et Coll [77].

1.4.2.3. La résistance à la flexion :

Les bétons légers peuvent être utilisés comme membres porteurs de charge structurale [23].

Wu et al [24] ; ont étudiés le comportement de flexion et l'effet de la taille des poutres en béton armé légères ont une capacité de charge et un mode de défaillance similaires à ceux du béton conventionnel.

1.4.3. Les propriétés élastiques des bétons légers :

Le module de Young d'un béton léger est nettement inférieur à celui du béton traditionnel en raison de sa faible masse volumique (les modules de Young des granulats légers est certainement inférieure que ceux des granulats rigides), il est généralement admis que ce module des bétons légers est équivalent aux $\frac{3}{4}$ de celui du béton ordinaire de même résistance [17].

L'accroissement du module d'élasticité des bétons légers est interprétée par une augmentation de la résistance à la compression [34], et cette vision est confirmée dans les travaux de recherche de Willson et al [21] , de Larrard et al [70], et de Zhang et al [22] .

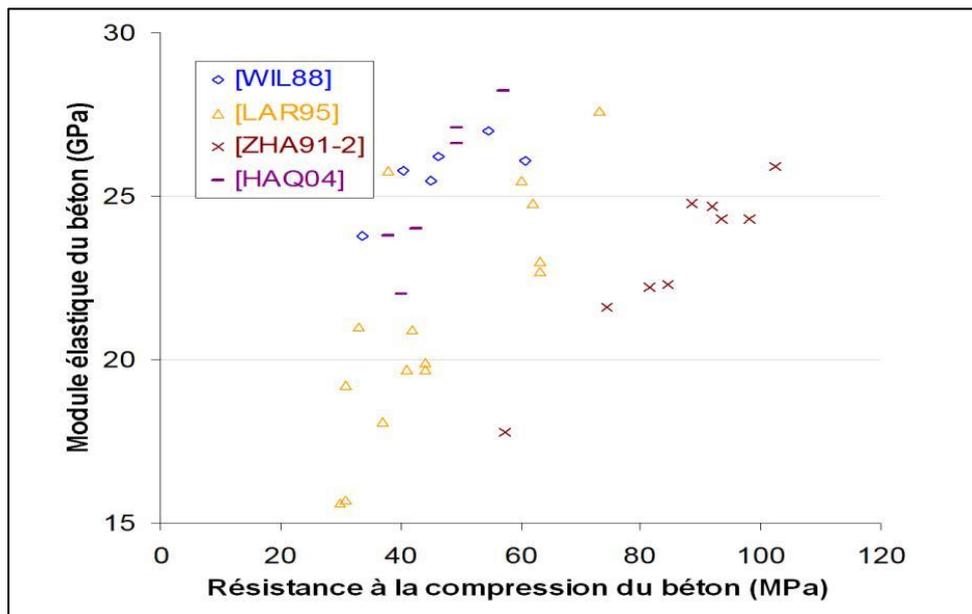


Figure 1.8 : L'évolution des modules d'Young de bétons légers en fonction de leur résistance à la compression [34][22][70].

Cette évolution, est due au fait que les propriétés élastiques des granulats ont une influence plus grande sur le module d'élasticité du béton légers que dans le cas de celui de densité normale [71], parce que le module d'élasticité du granulat est influencé par son indice de vide et dépend de la fraction volumique des granulats utilisés selon l'étude expérimentale faite par Torrenti [72] qui a montré que le module d'élasticité diminue avec l'augmentation de la fraction volumique des granulats de façon quasi proportionnelle [73].

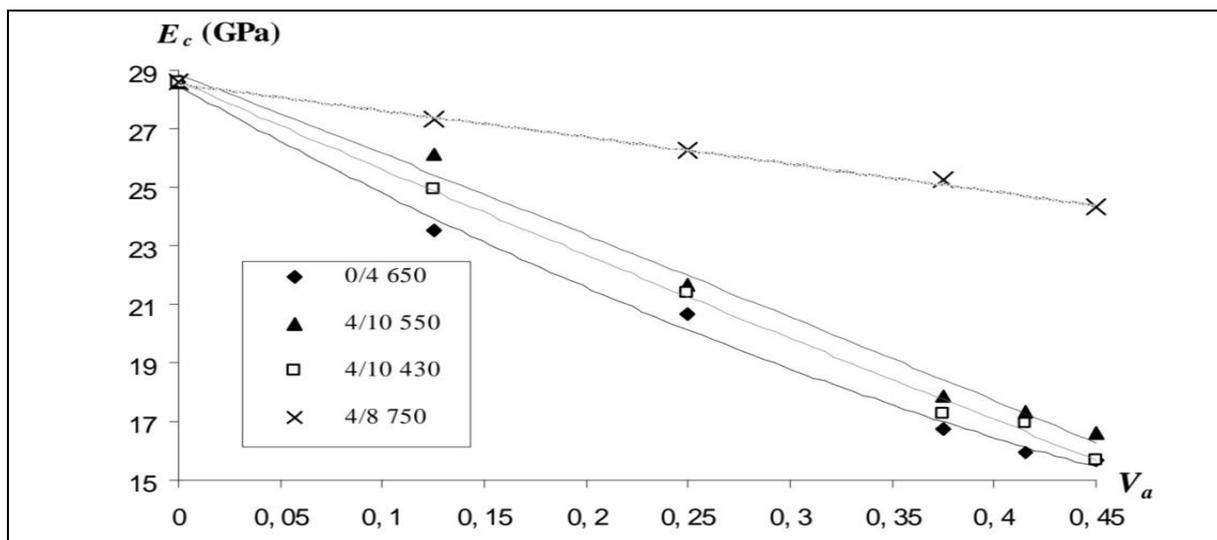


Figure1.9 :Relation entre le module d'Young du béton léger et la fraction Volumique de granulats légers [73].

Et selon la norme ACI318-89[74], le module d'élasticité peut s'exprimer en fonction de la masse volumique du béton comprise entre 1440 et 2480 kg/m³ aussi bien que de sa résistance à la compression suivant la formule :

$$E_c = 43 \cdot 10^{-6} \cdot \rho^{1.5} \cdot \sqrt{f_c} \quad (\text{Eq1.2})$$

D'autre part, la relation entre le module d'élasticité et la résistance à la compression semble mieux représentée par les chercheurs Zhang et Gjorv [22], qui ont développés une nouvelle formule normalisée en Norvège destinée aux bétons légers de haute résistance comprise entre 60 et 100MPa, la formule est la suivante :

$$E_c = 9.5 \cdot f_c \cdot (\rho/2400)^{1.5} \quad (\text{Eq1.3})$$

Zhang et Gjorv [22] montrent que les valeurs du module d'élasticité d'un béton confectionné avec des granulats d'argile expansée ou de cendre volante sont comprises entre 18 et 26 GPa ça veut dire que ces valeurs là sont inférieure à celles du béton ordinaire de 12 GPa [17].

D'après les informations tirées de la littérature on peut noter que le module d'élasticité plus faible des bétons légers permet l'évolution d'une déformation finale plus importante que celle d'un béton ordinaire et de même résistance [26].

1.4.4. Les propriétés thermiques :

1.4.4.1. Le coefficient de dilatation :

Les propriétés thermiques du béton sont directement liées à ses composants, aux propriétés thermiques de la matrice et au degré de saturation du matériau, selon Van Breugel [75] le coefficient de dilatation thermique du béton léger fabriqué à partir de granulats obtenus lors d'un procédé à haute température (granulats manufacturés) peut varier de 7 à 11 $\cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$.

Une variation de température au sein d'un matériau de construction peut entraîner un dépassement des contraintes admissibles, ainsi, mésestimer l'importance du coefficient de dilatation thermique du béton et ignorer le danger créé par l'incompatibilité des coefficients de dilatation thermique du granulats et de la pâte de ciment [27], peut avoir des conséquences très graves sur la durabilité des ouvrages en béton et le tableau ci-dessous présente quelques valeurs habituelles du coefficient de dilatation thermique de béton léger, en comparant ces résultats à ceux illustrés au deuxième tableau, on peut constater que les bétons légers ont généralement une dilatation thermique plus faible que les bétons de densité normale, ce qui peut entraîner certains problèmes quand les deux bétons sont employés côte à côte [28].

Tableau 1.10: Coefficient de dilatation thermique des bétons confectionnés avec des granulats légers [29]

Type de granulat utilisé	Coefficient de dilatation thermique déterminé dans un intervalle de 22-52°C
	$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Pierre ponce	9,4-10,8
Perlite	7.6-11
Vermiculite	8.3-14,2
Cendres	Environ 3,8
Schiste expansée	6,5-8,1
Laitier expansée	7-11,2

Tableau1.11 : Coefficient de dilatation thermique du béton, confectionné avec différents types de granulat [29]

Granulats	Coefficient linéaire de dilatation thermique ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)		
	Béton muri a l'air	Béton muri dans l'eau	Béton mouillé après un durcissement a l'air
-Gravier	13,1	12,2	11,7
-Granite	9,5	8,6	7,7
-Laitier de haut fourneau	10,6	9,2	8,8
-Schiste expansée	12,1	9,2	6,5
-Calcaire	7,4	6,1	5,9

1.4.4.2. La conductivité thermique :

La conductivité thermique est une grandeur physique qui caractérise le comportement d'un matériau à transformer de la chaleur par conduction, elle est mesurée par le coefficient lambda (λ)[17], il est important de noter que la faible conductivité thermique des bétons légers se traduit par un faible transfert de chaleur en milieu ambiant, donc c'est la caractéristique thermique principale à connaître pour déterminer les propriétés thermiques des parois en béton léger et leur pouvoir d'isolation thermique qui est due aux nombreuses bulles d'air interposées dans l'épaisseur du béton[7].

Veronique.C [76] trouve qu'il existe une forte relation entre la porosité et la faible conductivité thermique et selon ses recherches un matériau contenant un grand nombre de pores occlus présente une faible conductivité thermique tels que les bétons cellulaires qui contiennent un pourcentage de pores important (80%), d'autre part il dit que les propriétés thermiques des matériaux est liées par leur pouvoir absorbant de ces matériaux, qui peuvent contenir une quantité d'eau non négligeable ce qui induit à une augmentation de la conductivité thermique.

Remarque :

La conductivité thermique augmente linéairement avec la teneur en humidité.

La norme SIA381/1[69] donne pour les bétons légers à base d'argile expansée des valeurs du coefficient lambda en fonction de la masse volumique sèche.

Tableau1.12: Conductivité thermique en fonction de la masse volumique après séchage à l'étuve pour les bétons a base d'argile expansée et un béton courant [30]

La masse volumique sèche du béton léger (kg/m ³)	Conductivité thermique (W/mK)
1000	0,30
1250	0,50
1500	0,70
1700	1
2400(Béton armé)	1,80

1.4.4.3. La résistance au feu :

La combinaison d'une faible conductivité thermique et d'un faible coefficient de dilatation thermique est favorable dans le cas d'incendie, de plus les granulats sont stables à haute température puisqu'ils ont été soumis à des températures de plus de 1100°C lors de leur fabrication [76].

Le tableau ci-dessous donne quelques résultats de la résistance au feu des murs creux de maçonnerie [31].

Tableau 1.13 : Estimation de la résistance au feu des murs creux en maçonnerie [32]

Type de granulat utilisé	Epaisseur minimale équivalente (mm) pour des feux			
	4heures	3heures	2heures	1 heure
Laitier expansée ou pierre ponce.	119	102	81	53
Argile expansée ou schiste expansée.	145	122	96	66
Gravier, calcaire	157	135	107	71

1.4.5. Les propriétés acoustiques des bétons légers :

Parce que l'énergie du son se propageant dans l'air est convertie en chaleur dans les minuscules interstices de l'agrégat, les performances d'absorption acoustique du béton légers sont bonne et le coefficient d'absorption acoustique est d'environ deux fois plus élevé que celui du béton ordinaire[33].

Les propriétés phoniques des bétons légers sont principalement intéressantes à connaître lorsque ces bétons sont utilisés dans la réalisation de parois séparatives dans les bâtiments d'habitations.

1.4.6. Retrait :

C'est un phénomène de raccourcissement qui accompagne la prise du ciment, on peut l'assimiler à l'effet d'un abaissement de température entraînant un accourcissement.

Les valeurs moyennes de retrait en mm/m mesuré en France [33] :

- Suivant les régions : $\Delta l/l = 2 \cdot 10^{-4}$ à $3 \cdot 10^{-4}$
- Dans les régions humides : $\Delta l/l = 1.5 \cdot 10^{-4}$
- Dans des régions très sèches (Sahara) : $\Delta l/l = 5 \cdot 10^{-4}$

Le béton léger permet un plus grand mouvement de l'humidité que le béton de densité normale, il a un retrait de séchage plus important qui est d'environ 5 à 40% plus élevé que celui du béton ordinaire, mais le retrait de certains granulats peut être encore plus important [33].

Des essais de retrait sont réalisés sur des éprouvettes (à $T=20^{\circ}\text{C}$, $HR=50\%$), sur deux types de bétons l'un à base d'argile expansée à teneur en chaux pauvre (LECA) et le deuxième à base de schiste expansée (Surex), le retrait des deux types de bétons est différents, le béton LECA présente un retrait qui est de 40 à 80% supérieure à celui du béton traditionnel, alors que le béton SUREX présente un retrait qui ne dépasse pas les 35% au maximum à celui conventionnel[17].

Donc selon les résultats du retrait obtenus par le chercheur Arnould[17], il remarque que la nature des granulats est prépondérante en ce qui concerne le retrait ainsi que la teneur en eau initiale du granulat est un paramètre important pour évaluer le taux de retrait du béton léger, cependant, lorsque la capacité d'absorption des granulats légers est réduite (ce qui est le cas

de schiste expansée), il n'y a donc presque pas de différence dans le taux de retrait du béton constitués avec des granulats secs ou pré-humide, ajoute Arnould que l'évolution du retrait dans le temps est influencé par la teneur en eau initiale des granulats.

D'autres essais étaient réalisés en France par le laboratoire central des ponts et chaussées [17] sur un béton à base de schiste expansé ont montré que ce phénomène est de même ordre ou presque le même que celui d'un béton ordinaire.

Les bétons confectionnés avec des granulats d'argile, de schiste et de laitier expansé dont dans la gamme des plus faibles retrait [17].

1.4.7. Fluage :

Est une déformation élastique provoquée par l'application d'un chargement.

En ce qui concerne le fluage du béton léger, on doit tenir compte du fait que le plus faible module d'élasticité des granulats légers peut empêcher le fluage de la pâte de ciment hydraté, il est probable que le transfert interne de l'humidité des granulats vers la pâte de ciment affecte l'évolution du fluage de séchage.

Le faible module élastique des granulats légers augmente les déformations instantanées du béton mais également les déformations sous charge, contrairement des granulats rigides (les granulats légers ne gênent pas les déformations de la pâte de ciment)[55].

1.5. Durabilité :

L'utilisation de granulats légers n'entraîne pas d'effet préjudiciable sérieux sur la durabilité, si ce n'est lorsqu'ils sont saturés et soumis à des cycles de gel dégel, parce que le réseau poreux d'un granulat léger est généralement discontinu, la porosité des granulats eux même ne modifie pas la perméabilité de la pâte de ciment, néanmoins la perméabilité du béton est diminuée quand on remplace une partie du granulat léger fins par des granulats fins de densité normale [34], ce qui est expliqué sans doute par une plus faible valeur du rapport E/C

La faible perméabilité du béton léger est le résultat de plusieurs facteurs :

- Le faible rapport E/C du béton.
- La bonne adhérence entre les granulats légers et la pâte de ciment, résulte une structure plus compacte, des observations, en Suisse, ont été enregistrés sur des échantillons provenant de revêtement de ponts vieux de 12 à 40 ans prouvent que les

granulats légers étaient très bien liées a la pâte de ciment durcie , ils étaient entourés d'une zone de 60µm.

- La compatibilité entre le module d'élasticité des granulats et de la matrice cimentaire engendre très peu de microfissuration sous l'application d'une charge ou par suite d'une variation de température [35].

De plus, la réserve d'eau contenue dans les granulats permet la poursuite de l'hydratation du ciment et la réduction de la perméabilité.

Peu de cas de corrosion d'armature par carbonatation ont été signalés d'après Zhang et Gjorv[22] avec des bétons de bonne qualité, des études menées sur plusieurs ponts et structure marines ont montrés que la faible microfissuration de ces bétons permettent de limiter la diffusion des agents agressifs comme les chlorures et le CO₂[56].

Le béton est un matériau sensible aux fissurations tout au long de sa durée de vie ; ces fissures peuvent apparaitre pour différentes raisons ; il se peut que ça soit due aux actions mécaniques et d'autre à la mauvaise conception.

Selon Bogas et al[80] ; les actions externes tel que la variation thermique ou mécanismes tel que le cycle gel-dégel ou autres opérations expansives peuvent induire à la détérioration du béton en entrainant des fissurations structurelles ou non structurelles ; ces fissures sont dues aux contraintes de traction locales qui dépassent la contrainte limite du béton, l'apparition des fissures donne naissance à des conduites (fissures) qui vont rendre le béton vulnérable aux agents agressifs.

Selon les investigations faites par les chercheurs Holm [26] aucune preuve de réaction alcalis granulats n'a été enregistrée avec des bétons légers.

Réaction alcalis-granulats

Il existe plusieurs types de granulats légers dédiés à la construction sur le marché ; ils varient de part leur composition, densité, porosité et absorption en eau.

Les granulats légers les plus utilisés sont, l'argile expansé, la perlite, la vermiculite expansée.

La plupart des granulats légers ont une structure vitreuse et / ou sont sensibles aux alcalis présents dans le ciment, c'est-à-dire réactif. Ils peuvent réagir d'une manière expansive avec

les alcalis du ciment. Et la possibilité d'une réaction alcalis – granulats doit être prise en compte.

Madevic et al [36] ont montrés qu'il y'avait certains contradictions à propos de la réaction alcalis – granulats des granulats légers. Certaines recherches ont montrés qu'il n'y avait aucune réaction de type alcalis – granulats concernant les GL que ce soit artificiels ou naturels, tandis que d'autres ont montré qu'il y'a de sérieux problèmes à ce sujet. Ces mêmes recherches ont supposées que les pores présents au niveau des GL (Argile, Schiste expansé ...) accumulent le gel, c'est pour cela que certains GL ne montrent aucun effet nocif tel une expansion. Il est à noter que les adjuvants utilisés dans le béton aident le gel à migrer vers les pores des granulats , toutefois ceci pourrait réduire la résistance des GL vis-à-vis de l'alcalis – réaction , car si les granulats sont utilisés à des fins structurelles , cela pourrait donner naissance à de sérieux problèmes ; contrairement aux GL utilisés pour des cloisons isolantes , ce qui pourrait causer des fissurations non dangereuses , mais qui pourraient toucher à l'aspect physique .

Quelques recherches ont montré que les granulats d'argile expansée et la vermiculite ne sont exposés à aucune réaction de type alcalis – granulats [36].

Les deux types de granulats vitreux (verre et perlite) ont montré une grande réaction de type alcalis – granulats [36].

1.6. Recommandation pour la planification du béton léger :

1.6.1. Technologie du béton :

1.6.1.a. Les fines :

Lors de l'utilisation de granulats légers, il faut veiller à obtenir une teneur en fines suffisante dans le béton, la teneur en fines peut être augmenter en augmentant le dosage en ciment ou par ajout d'addition.

L'utilisation de cendres volantes comme sable dans un béton est un moyen efficace de réduire la conductivité thermique.

Une étude de S.Beddu[63] concernait le remplacement du sable par différents pourcentages de cendres volantes pour étudier les propriétés mécaniques et thermiques du béton à 3,7 et 28 jours.

L'utilisation de cendres volantes dans le béton réduit les déchets industriels, suivie d'une réduction des émissions de CO₂ provenant de la production des ciments [63].

1.6.1.b. Ciment :

Le ciment est un liant hydraulique et est défini comme un matériau inorganique finement moulu, qui une fois mélangé à de l'eau forme une pâte qui se fixe et durcit au moyen d'une réaction d'hydratation, après durcissement celui-ci conserve sa stabilité et solidité même sous l'eau [64].

L'ASTM classe les ciments en de nombreux types dont [65] :

Type 1 : ces ciments ont une faible résistance aux sulfates.

Type 2 : utilisés lorsqu'il y'a de faibles résistances de sulfates dans le sol.

Type 3 : ce sont des ciments qu'on utilise lorsqu'on veut obtenir des résistances élevées à jeune âge.

Type 4 : pour des prises rapides.

Type 5 : utilisés pour des environnements à forte teneur en sulfates.

L'hydratation des ciments :

On dit que l'hydratation du ciment portland est complète au bout du 28^{ème} jour après durcissement.

Une fois durci celui-ci devient vulnérable si le rapport eau/ciment est élevé.

Tableau 1.14 : La quantité résiduelle du ciment portland dépend du rapport E/C et de la taille des particules de ciment [65]

	%	%	%	%	
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Surface spécifique de Blaine g/cm ²
Bon	59.6	25.6	13.0	10.0	410
Moyen	47.0	9.1	8.0	5.8	321
Modéré	51.8	18.2	10.6	7.4	374

La quantité d'eau nécessaire pour hydrater complètement les ciments doit être assez variable, la surface spécifique de Blaine ne reflète pas la taille des particules ni la distribution qui peut être totalement différente à la même finesse[65].

Dosage en eau et en ciment :

La teneur en eau de la pâte de ciment du BL à l'état frais est progressivement réduite en raison de l'absorption des GL donc le rapport E/C est également réduit.

La résistance des BL à base de GL n'est pas uniquement influencée par la résistance du ciment mais aussi par la résistance des granulats légers.

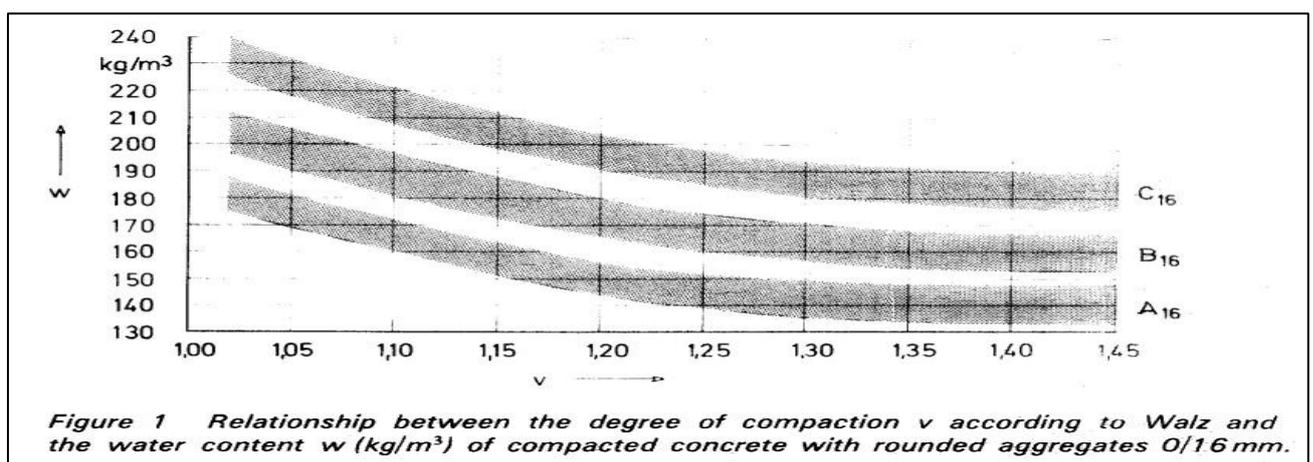


Figure 1.10: La relation entre le degré de compactage et la teneur en eau du béton compacté à granulats arrondis [66].

Le béton de granulats légers exige une plus grande quantité d'eau pour atteindre la consistance souhaitée. Tout comme indiqué sur la figure précédente.

Pour une estimation approximative, la teneur totale en eau doit être réduite de la quantité d'eau que les agrégats secs vont absorber lorsqu'ils vont être pré-mouillés dans de l'eau pendant 30 min[66].

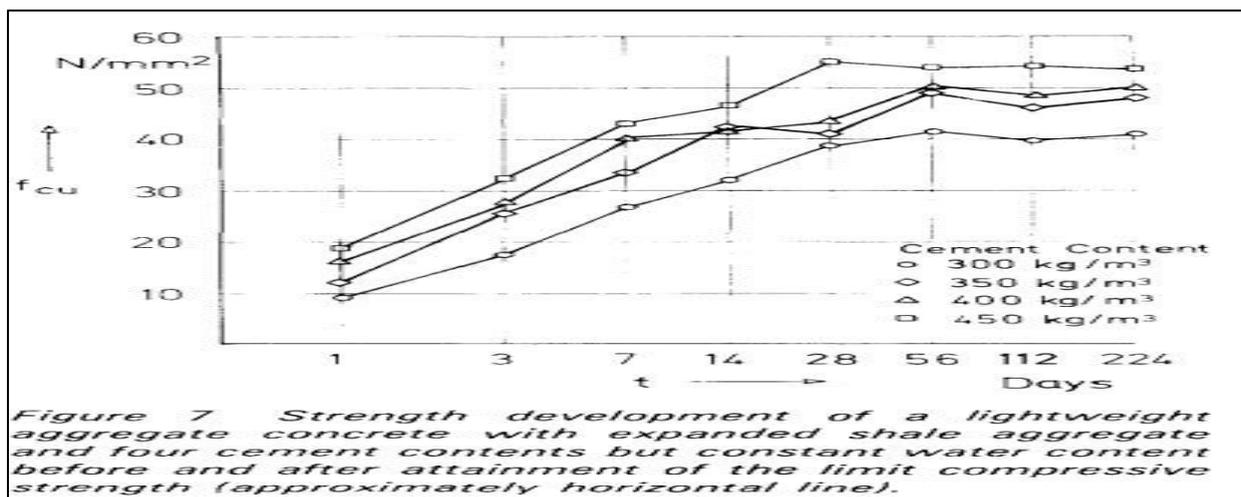


Figure 1.11: Le développement de la résistance d'un béton de granulats légers à base de schiste expansé et quatre teneurs en ciment avec une teneur en eau constante [66].

Tout les ciments sont adaptés a la production du béton léger ,pour les éléments structuraux d'une section supérieure à 40cm , il faut tenir en compte que les granulats peuvent freiner la dissipation de la chaleur d'hydratation, par conséquent, les températures plus élevées au sein de l'élément d'ouvrage peuvent engendrer des fissures , c'est pour cela il est recommandé de choisir des ciment de faible chaleur d'hydratation[17].

1.6.1.c. Adjuvant :

En entrainant des pores et en ajoutant des stabilisants, le risque de ségrégation du béton léger peut être réduit et la cohésion du béton frais peut être considérablement améliorée .Les pores entrainés contribuent également à augmenter la densité de la pate .dans le cas de béton d'isolation thermique la concentration des stabilisants ajoutés la viscosité du coulis de ciment est améliorée, de sorte que les granulats ne remonte plus a la surface.

1.6.1.d. Ajouts :

Dans le béton léger, les additifs sont ajoutés pour compléter la faible teneur en sable léger , ce qui peut amélioré la cohésion du mélange et le degré d'étanchéité de la surface ,évitant ainsi la ségrégation .les cendres volantes peuvent réduire le développement de la chaleur d'hydratation.

1.6.2. Formule des bétons légers :

Les mélanges des bétons légers sont souvent réalisés d'après les formules recommandées par les producteurs de granulats légers, elles se différencient selon le rapport E/C effectif qui dépend de la masse volumique à sec et l'humidité initiales des granulats légers, ainsi que la consistance du béton frais et les conditions de mise en œuvre.

Etant donné que l'argile expansée sèche sous l'eau à la pâte de ciment dès le début du malaxage, il est souvent conseillé de mouiller les granulats avant de les ajouter au mélange il faut toutefois veiller à ne pas les mouiller exagérément, sans quoi le béton léger présente un taux d'humidité élevé même après plusieurs années, avec les conséquences négatives que cela implique : masse volumique et conductivité thermique élevée, résistance au feu et au gel amoindrie, ainsi que le comportement au fluage moins bon.

Avec des granulats légers non mouillés au préalable, il est conseillé de traiter les grains d'argile expansée avec l'eau prévue pour le mélange et d'ajouter ensuite seulement le sable et le ciment.

Une autre solution est de malaxer le mortier de ciment quelques minutes avant d'ajouter l'argile expansée, l'absorption d'eau des granulats s'en trouve diminuée de quelque 30 à 50% car il n'y a ainsi pas d'eau qui entre directement en contact avec les granulats [7].

Les formules recommandées par les fabricants d'argile expansée se rapportent généralement à des mélanges de consistance très plastique.

Les teneurs en ciment se situent le plus souvent entre 300 et 350kg/m³.

Les adjuvants du béton ne devraient être ajoutés que tout à la fin du malaxage afin qu'ils ne pénètrent pas à l'intérieur des grains [53].

D'après Holm et Bremner, seuls les granulats légers manufacturés de très grande qualité peuvent développer des bétons de haute performance.

1.6.3. Mise en œuvre du béton léger :

1.6.3.a. Le malaxage :

La durée du malaxage recommandée pour un béton léger compacte est de 90 secondes après l'adjonction de tous les composants, en cas d'utilisation d'agent moussant la durée de malaxage augmente jusqu'à 180 à 200 secondes [17].

1.6.3.b. Le compactage :

Le béton léger exige un plus grand effort de compactage, à cause de sa faible masse volumique et à cause des granulats légers qui amortissent l'énergie de vibrations.

Il faut utiliser des aiguilles vibrantes pour assurer un bon serrage du béton léger.

La durée de vibration doit être adaptée à la consistance afin d'éviter que les granulats remontent à la surface [17].

1.6.3.c. La ségrégation :

Le béton léger a tendance à ségréger plus fortement que le béton ordinaire, le risque de la ségrégation est particulièrement important lorsque la fluidité est trop forte et la masse volumique des granulats légers est faible, cela peut être corrigé par l'utilisation d'ajouts (cendres volantes, poudres minérales) ou des adjuvants (stabilisants, entraîneurs d'airs) [17].

1.6.2.d. Le surfaçage :

Le surfaçage du béton léger est la seule opération de mise en œuvre qui demande un peu d'expérience.

Les méthodes de vibration superficielle conduisent à la remontée des granulats légers donc la meilleure solution qui reste est le talochage avec des taloches en bois [17].

1.6.2.e. Le transport :

Le transport du béton léger est assuré par des camions malaxeurs.

La seule difficulté particulière que présente le transport du béton léger provient de la capacité d'absorption des granulats légers : si le temps de transport est important, les granulats vont absorber une partie de l'eau du mortier, provoquant un certain raidissement du béton.

Ce problème était résolu par une limitation de la durée entre la fabrication et la mise en place du béton léger qui ne doit pas dépasser une heure et demie [37].

Remarque :

En cas de durée de transport plus longue, des essais préliminaires sont nécessaires.

1.6.2.f. Traitement de cure :

En tant que produit de cure interne , l'eau contenue dans les granulats légers doit toujours protégé le béton contre un dessèchement rapide, sans quoi il se produit une forte différence entre le cœur et la zone extérieure du béton léger ce qui peut provoquer des fissures dans le réseaux et comme la capacité thermique du béton léger est inférieure a celui du béton ordinaire donc il s'échauffe plus fortement que le béton ordinaire pendant les premières heures de l'hydratation de ciment (cela augmente le danger de fissuration d'origine thermique) [37] .

Un coffrage plus tardif et les recouvrements avec des nattes thermo-isolantes constituent des mesures préventives.

1.7. Le domaine d'utilisation des bétons légers :

-En raison, de leurs propriétés spéciales, les bétons légers sont utilisés dans de nombreux domaines, le premier est la rénovation des anciens bâtiments et les transformations [38] :

-Grâce à leurs propriétés thermo-isolantes, les bétons légers conviennent pour les murs extérieurs et les éléments de façade.

-Et en raison de leur bonne résistance au gel et aux agressions chimiques, ils sont utilisés pour les chapes et les revêtements des ponts.

Les domaines d'utilisation des bétons légers sont divers, on peut les divisés en trois domaines d'utilisations :

1.7.1. Des bétons d'isolation, non porteurs :

Leur masse volumique est faible $600\text{kg}/\text{m}^3$ de même leur résistance à la compression est de 1 à 15 MPa.

Ces bétons sont utilisés pour :

- La protection d'étanchéité sur terrasse ;
- Le rattrapage de niveau.
- En isolation du sol sur terre plein.
- En forme de pente isolante pour toiture de terrasse ;
- Chapes, planchers d'isolation.

1.7.2. Les bétons d'isolation, porteurs :

Leurs masse volumique varie de 1000 à 1300 kg / m³ leur résistance à la compression est de l'ordre de 15 à 20 MPa.

Ces bétons peuvent être employés pour réaliser :

- Blocs, hourdis, panneaux préfabriqués, bardage.
- Blocs de maçonnerie.
- Murs préfabriqués.

1.7.3. Les béton léger de structure :

Ils ont une masse volumique de 1700 à 1800 kg / m³ et leur résistance caractéristique à la compression dépasse 20MPa.

Ces bétons sont utilisés pour :

- Restauration d'enceins immeubles.
- Immeubles de grande hauteur.
- Portée importante (poutre, voiles..).

Exemples de structures faites avec du BL[39] :

- The bank of America , Charlotte .NC .
- Wabash River Bridge .
- Hibernia Offshore Platform (2001) .
- Modular Hybrid Pier San Diego .
- TWA Terminal at Kennedy airport , New York .
- Marina City towers , Chicago .
- Nations Bank Corporate Center , Charlotte , NC.
- The New Tokyo metropolitan government building .
- The picasso Tower Madrid .
- Wellington Westpac Trust stadium .

1.8. Les avantages des bétons légers :

1.8.1. Sur le plan technique :

Grâce à sa légèreté, le béton léger a une densité comprise entre 0,4 et 1,2 comparativement au béton classique qui dispose d'une densité comprise entre 2,2 et 2,5.

Les bétons légers donnent des performances acoustiques en particulier en matière d'absorption phonique grâce à leur structure alvéolaire.

Une meilleure résistance au feu, grâce à leur faible conductivité thermique et leur faible coefficient de dilatation thermique.

Une grande facilité de mise en œuvre et de travail après durcissement il est possible de scier, percer, clouer les bétons légers avec des outils traditionnels (particulièrement le béton cellulaire).

Pompable sur de longues distances et des grandes hauteurs, il est facile de le mettre en œuvre notamment en fortes épaisseurs.

Donne une excellente finition.

Facile à transporter et déplacer.

1.8.2. Sur le plan économique :

Une augmentation de la productivité sur le chantier en raison du faible poids des matériaux.

Le béton léger, par sa légèreté, réduit le poids mort des bâtiments ce qui réduit

Considérablement la dimension et donc le poids des fondations.

Economie sur le ferrailage des éléments.

Le plus faible volume de béton utilisé, il est aussi possible d'économiser sur les quantités de ciments par rapport au béton ordinaires.

1.9. Les inconvénients des bétons légers :

- Le processus de fabrication des granulats légers artificiels n'est pas écologique en raison de la forte demande en chaleur, les températures de cuisson peuvent atteindre les 1200°C[40].

- Le cout des granulats légers est supérieur à celui des granulats classique, en raison de la forte demande d'énergie pour le processus de préparation, si les granulats légers ne sont pas disponibles localement ils devraient être importés ce qui les rend plus couteux.
- Les bétons légers comprennent des propriétés mécaniques plus faibles comparées aux bétons conventionnels, ainsi que des signes de durabilité moins bons que les bétons Ordinaires.

Ces bétons nécessitent un grand dosage en ciment afin de présenter de bonnes résistances [42].

- Une résistance mécanique faible.
- Variations dimensionnelles pouvant être élevées (retrait de séchage, gonflement par suite de reprise d'humidité)
- Porosité et perméabilité à l'air élevées (nécessite d'augmenter la distance d'enrobage)
- Fabrication plus complexe.

CHAPITRE I : PARTIE 02

PRESENTATION DU LABORATOIRE DE DEVELOPPEMENT DE LA CONSTRUCTION, LAFARGE HOLCIM ALGERIE.

PRESENTATION DE L'ENTREPRISE D'ARGILE EXPANSEE « ALGEXPAN »

1.1) Présentation du laboratoire de développement de la construction CDL :

Vue la croissance du secteur de la construction en Algérie depuis le début des années 2000, le groupe Lafarge Holcim a vu que l'Algérie représentait un marché stratégique.

En 2013 Lafarge a implanté

son premier laboratoire de développement de la construction situé dans la zone de Rouïba a Alger , un des premiers laboratoires dans son genre en Algérie ainsi qu'en Afrique , ce dernier vise a développer et innover dans le domaine de la construction , et c'est grâce au personnel unique et son genre et hautement qualifié.

Celui-ci présent dans tout les domaines permet de former un personnel (mains d'œuvre et autres experts tel qu'ingénieurs, architectes...) de la construction tout.

Le CDL vise à participer dans le domaine de la construction tout en se liant au réseau académique Algérien et toutes institutions locales.



Figure1.12 : Laboratoire de développement de la construction CDL LAFARGE.

1.2) Présentation de l'usine « ALGXPAN » :

Seule usine en Algérie et en Afrique ; à produire des granulats légers manufacturés d'argile expansée 100% algériens, celle-ci se situe à Bouinan, Wilaya de Blida.

L'usine se situe en hauteurs et détient un gisement d'argile à propriétés expansives les granulats produits présentent une harmonie entre résistance et légèreté, les granulats sont obtenus par transformation de l'argile en pierres poreuses et résistantes à l'aide d'un traitement thermique sans additifs.

L'extraction de 1m^3 de matière première contribue à la production de 2 à 3m^3 de matériaux, leur production journalière s'élève à 600m^3 .



Figure 1.13: Photo du site et logo de l'usine d'argile expansée.

1.2.1) Les granulats légers d'argile expansée :

L'argile est la matière première de la plupart des produits obtenues en céramique ; la céramique est un phénomène de transformation de l'argile en divers produits finis ; la construction est considérée comme leur domaine d'utilisation le plus fréquent.

-L'argile expansée est un dérivé des schistes, verres expansés ces derniers sont dit comme matériaux de construction légers et isolants ; 40 à 75 % plus légers que les granulats ordinaires.

-Les granulats d'argile expansée sont obtenus après la cuisson de billes d'argile crue dont le diamètre est variable.

-Le poids des granulats légers d'argile expansée est de 5 fois plus léger que les granulats ordinaires.

-Les granulats obtenus après cuisson ont une enveloppe externe dure dite écorce est une structure interne alvéolée (poreuse) ; cette écorce se forme grâce aux silices contenus dans l'argile, quant aux pores, ils sont obtenus grâce à la température de cuisson adéquate qui provoque l'expansion.

1.2.2) Caractéristiques et propriétés des granulats d'argile expansée :

Ces granulats se présentent généralement sous forme arrondie, leur diamètre varie de 0/3 mm, 3/8 mm 8/15mm à 15/25 mm ; au niveau de l'usine ALGEXPAN toutes ces granulométries sont disponibles sous forme nodulaire en plus des 0/3mm et 3/8mm de type concassé.

L'obtention de ces granulats se fait en plusieurs étapes, en commençant par l'extraction, le façonnage, la cuisson et en fin le criblage.

En plus de leur légèreté, ces granulats ont des propriétés isolantes que ça soit thermique ou phonique ; les vides de ces derniers ont la capacité d'absorbé l'énergie acoustique et thermique ce qui fait que ces granulats donnent des bétons / mortiers de faible conductivité thermique.

1.2.3) Procédures de fabrication des granulats d'argile expansée :

1.2.3.a) L'extraction de la matière première et son stockage :

Celle-ci se fait dans le lieu où se trouve le gisement en quantités abondantes à l'aide du dispositif nécessaire.



Figure 1.14 : Le gisement de la matière première.



Figure 1.15 : Le dépôt de la matière première après concassage.

1.2.3.b) Concassage, broyage et malaxage :

Cette étape consiste à diminuer la taille des roches extraites à l'aide d'un broyeur concasseur jusqu'à 0.1 ou 0.2 mm, après cela de l'eau est ajouté jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène.

1.2.3.c) Le façonnage :

Le façonnage se fait à l'aide d'un moule spéciale de forme cylindrique, celui-ci transformera la pâte réceptionnée en petites pattes de formes arrondie et de différents diamètres.



Figure 1.16: Machine à façonnage.

1.2.3.d) La cuisson :

Pour obtenir des granulats d'argile expansée, ces derniers doivent passer par 4 étapes :

- Le préchauffage des granulats :

C'est une étape intermédiaire qui consiste à sécher les granulats à 400°C après cela vient le début de la phase de cuisson, la réaction engendré est dite déshydratation.

- La phase de cuisson :

A ce niveau la on remarque une augmentation du volume des granulats après cela il y'a vitrification des surfaces extérieurs du grain, ceci est le résultat de la cristallisation de la silice et des alumines (700°C – 900°C) quant aux autres constituants ils subissent une oxydation.

- La phase d'expansion :

Celle-ci subvient en poursuivant la cuisson ; à ce moment on a une dilatation thermique des matériaux c'est alors à ce moment qu'on obtient une petite explosion, on peut alors dire que l'expansion est alors un phénomène qui caractérise la limite finale de ces matériaux a ce dilaté, cette dernière se fait lorsque les matériaux atteignent une température de 1200°C.

- Les argiles à propriété d'expansion doivent contenir:

- Au moins 25% d'alumine.
- Environ 5 à 8 % d'oxyde de fer.
- Moins de 6% d'oxyde d'alcalin.
- Riche en silice (supérieur à 40 %).

1.2.3.e) Le refroidissement :

Cette étape la vient juste après la sortie des granulats du four pour parvenir dans un refroidisseur de température allant de 200 °C à 400°C, cette étape est cruciale car elle nous évite tout choque thermique .



Figure 1.17: Le four rotatif.

1.2.3.f.) Le criblage :

Après refroidissement, les granulats passent au criblage, cette étape consiste à séparer les différentes fractions des granulats.



Figure 1.18 : Le criblage des différentes fractions.

-Les granulats passent par une série de tamis pour au final obtenir 4 classes granulaires.

2.4) Production de l'usine ALGEXPAN :

- Classe 0/3 mm (sable nodulaire).
- Classe 3/8 mm (petits granulats nodulaires).
- Classe 8/15 mm (granulats nodulaires).
- Classe 15/25 (granulats nodulaires).
- Classe 0/3mm (granulats concassés).
- Classe 3/8mm (granulats concassés).





Figure 1.19 : Les différentes fractions obtenues.

Tableau 1.15 : Synthèse revue bibliographique sur les bétons légers

Référence	Chercheur/auteur	Les propriétés	Observation
[1]	RILEM (1983)	Masse volumique	La masse volumique des bétons légers est inférieure à 1800kg/m^3 .
[5]	ACI (1970)		La masse volumique des bétons légers est limitée à 1800kg/m^3 après séchage à 28 jours.
[2]	Chercheurs allemands (1972)		La masse volumique des bétons légers est limitée à 2000kg/m^3
[5]	ACI213-R-87 (1994)	Classification des bétons légers	Cette classification est basée sur la masse volumique de ces bétons qui les divise en 3 catégories.
[6]	Lafarge Holcim Suisse (2010)		La classification des bétons légers se fait selon l'introduction des vides dans ces derniers.
[11]	Hoff(1972)	Béton cellulaire	Les propriétés des bétons cellulaires à savoir résistance et conductivité thermique dépendent des volumes de vides introduits dans le béton ainsi que le volume d'eau évaporable

[13]	Mcintoch et al	Béton sans fines	La masse volumique des bétons sans fines est en fonction de leur dosage en ciment en eau et la masse volumique de leurs granulats.
[17]	Vernould(1986)		La masse volumique des bétons sans fines ordinaires varie entre 1600 et 2000kg/m ³ mais peut être descendre à 640kg/m ³ dans le cas des bétons légers.
[21]	Willson etMalhotra (1988)	Béton sans fines	La résistance à la flexion des bétons légers est inférieure à leur résistance à la compression de 30%.
[34]	Neville (1998)	Béton de granulats légers	Pour obtenir des bétons légers de résistance équivalente à celle des bétons ordinaires, l'utilisation des ajouts cimentaire est indispensable C'est là que des résistances de 70 à 80MPa sont obtenues.
[57]	Ali Ghalib Aress	Granulats légers	Les granulats légers naturels sont tous d'origine volcanique. Les granulats légers artificiels sont obtenus soit à partir de matière première naturelle suite à un procédé de fabrication ou en traitants des sous produits industriels
[5]	ACI-213-R-87 (1994)	Absorption d'eau par les granulats légers	Le taux d'absorption des granulats légers est compris entre 5 et 20% et pour les bétons structuraux le taux ne dépasse pas des 15%.
[17]	Vernould(1986)		Le taux d'absorption des granulats légers artificiels est plus élevé que celui des granulats légers naturels.

[17]	Vernould(1986)	Maniabilité des bétons légers	L'essai de cône d'Abrams n'est pas significatif lorsqu'il s'agit des bétons légers.
[73],[78]	Torrenti et al (1999) ; confirmé par Fiorio en (2004)	Résistance à la compression	La résistance à la compression des bétons légers dépend leur fraction volumique ;plus cette dernière augmente elle induit à une baisse de résistance, l'adjonction de 6% des fines est recommandée pour la formulation des bétons légers
[79]	Lucyana Domagla (2015)		-Les granulats légers doivent être préalablement humidifiés même saturés avant utilisation.
[5]	ACI213-R-87 (1994)		La résistance en compression des bétons légers dépend du type et dosage du ciment utilisés.
[20]	Angelin et al		La résistance en compression des bétons légers diminue de 13% comparé aux bétons ordinaires.
[21]	Willson (1988)	Résistance à la traction	La résistance à la traction des bétons légers et aussi faible que celle des bétons ordinaires, à cause de la propagation des fissures à travers les granulats.
[21], [22]	Willson , Zhang et Gjorv(1988,1999)		La résistance à la traction des bétons légers ne dépasse pas les 5,6MPa.
[77]	Compion et Coll(1991 ,2000)		Les bétons légers doivent être renforcés par des macro-fibres pour résister à la traction.
[24]	Wu et al	Résistance à la flexion	Le mode de défaillance des poutres en bétons légers et leur capacité de charge est similaire aux bétons ordinaires.
[17]	Arnould (1986)	Propriétés élastiques	L'accroissement du module d'élasticité des bétons légers est proportionnel à l'accroissement de la résistance en compression.
[22],[70],	Zhang et al,Larrard		Le module d'élasticité et influencé par

[21]	et al ,willson et al (1998,1999)		l'indice des vides et les fractions volumique des granulats légers utilisés ; le module d'élasticité diminue avec l'augmentation des fractions volumiques.
[22]	Zhang et Gjorv (1999)		Le module d'élasticité des bétons légers structureux varie entre 18 et 20 GPa mais reste inférieure à celui des bétons conventionnels de 12 GPa
[75]	Van Breugl (1998)	Le coefficient de dilatation	Le coefficient de dilatation des bétons légers vari entre 6 et $11 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.
[76]	Véronique (2005)	La conductivité thermique	Un béton léger contenant un grand nombre de pores occlus présente une faible conductivité thermique.
[76]	Veronique (2005)	La résistance au feu	Plus le béton est de faible conductivité thermique et à un faible coefficient dilatation, plus il est résistant au feu.
[33], [17]	Dreux et Festa,Arnould (1986,2007)	Retrait	Le retrait des bétons légers et d'environ 5à40% plus élevé que celui des bétons ordinaires.

Conclusion :

D'après ce que les recherches ont démontré, on déduit que les bétons légers présentent une faible densité comparé aux bétons conventionnels.

Il a été montré que l'obtention des bétons légers se reposait sur l'élimination des matériaux lourds en les remplaçant par des matériaux plus légers ou en éliminant les matériaux de fines granularité ou même par injection d'air ou d'agents moussants, c'est de là que sont obtenus les différents types de bétons légers, ces derniers sont classés selon leur masses volumiques qui varient entre 400 et 1800 kg/m³ et à chacun d'eux une utilisation propre.

Cette variation de masses volumiques se traduit en variation de résistances d'un type de béton léger à un autre.

Les bétons légers structurels sont le plus souvent des bétons à base de granulats légers, les recherches ont démontrés qu'il existe plusieurs types de granulats légers, certains sont d'origine naturelle et d'autres artificiel, ces granulats sont caractérisés par leur faible masse volumique, forte absorption en eau, résistance au cycle gel-dégel mais aussi par leur structure alvéolé.

La résistance des granulats légers est conférée aux bétons, toutes fois les bétons légers exigent un fort dosage en ciment pour de meilleurs résultats en termes de résistance.

Ces granulats ne sont pas uniquement présents dans le domaine de la construction, ils le sont aussi dans le domaine de l'agriculture et même de la décoration.

Les bétons légers présentent des avantages incontournables lorsqu'il s'agit de réduire le poids des structures, mais bien d'autres avantages tel qu'une meilleure résistance au feu pour la majorité d'entre eux, une meilleure isolation thermique et acoustique.

CHAPITRE II : MATERIAUX ET ESSAIS.

2.1. Introduction :

Ce chapitre présente les principales caractéristiques des matériaux utilisés dans la formulation du béton et la procédure expérimentale. On décrit ainsi les méthodes d'essais réalisés.

2.2. Caractérisation des matériaux :

2.2.1. Le ciment :

Pour la réalisation de cette étude, le ciment utilisé est un ciment portland composé CEM II /A 42.5 ce ciment vient de Lafarge Algérie, mieux connu sous le nom de MATINE.

- Analyses chimique du ciment :

Tableau 2.1 : Analyse chimique du ciment MATINE

Perte au feu %	Résidus %	Teneur en sulfates %	Teneur en oxyde de magnésium MgO %	Teneur en Chlorures %	Teneur équivalent en alcalins %
7.50-12	0.7-2.00	2.00-2.70	1.00-2.00	0.01-0.05	0.3-0.75

- Composition hypothétique du clinker (Bogue) :

Tableau 2.2: Composition Hypothétique du clinker

Silicates tricalciques C ₃ S %	Silicates bicalciques C ₂ S %	Aluminates tricalciques C ₃ A %	Aluminates tetracalciques C ₄ AF %
58.00-64.00	12.00-18.00	6.00-8.00	10.00-12.00

- Propriétés physiques :

Tableau 2.3: Propriétés physiques du ciment MATINE

Masse volumique absolue (kg/m ³)	Consistance normale de la pate de ciment %	Finesse (SSB) (cm ² /g)	Retrait a 28 jours (µm/m)	Expansion en (mm)
3050	25-28.50	4150-5250	<1000	6.3-2.5

- Temps de prise (NA 230) :

Tableau 2.4: Temps de prise du ciment MATINE

Début de prise (min)	Fin de prise (min)
140-195	195-290

- Résistance à la compression :

Tableau 2.5 : Résistance à la compression du ciment MATINE

02 jours (MPa)	28 jours (MPa)
>10.0	≥42.5

2.2.2. L'adjuvant :

L'adjuvant utilisé est un super-plastifiant connu sous le nom de Vescocrete Tempo 12 de la marque Sika ; celui-ci confère au béton une longue rhéologie et une robustesse à la ségrégation NF EN 934-2.

Source : notice produit Sika vescocrete Tempo 12.

- Description du produit :

Tableau 2.6 : Caractéristiques de l'adjuvant

Aspect/ couleur	Densité	Valeur pH	Teneur totale en chlorures %	Equivalent oxyde de sodium %
Liquide brun clair à foncé.	1.06 +/- 0.01	4.5 +/- 1.0	0.1	1

2.2.3. Le sable :

Dans cette étude plusieurs types de sables ont été utilisés dont :

a) Sables classiques (ordinaires) :

- 0/1 mm (fin) en provenance de Boussaâda.

- 0/5 mm (grossier) en provenance de Baghlia.

b) Sables artificiels d'argile expansée :

- 0/3 mm nodulaire.

- 0/3 mm concassé.

Ces deux sables proviennent de l'usine de fabrication de granulats d'argile expansée ALGEXPAN à Bouinan Blida.

2.3.3.a. La masse volumique apparente des sables EN NF 1097-6[43] :

Après prélèvement et échantillonnage à l'aide de la méthode de quartage, notre échantillon est prêt pour réaliser l'essai.



Figure 2.1: Echantillonnage.

A).Matériel utilisé :

- Récipient cylindrique de 5L et 1L.
- Des bacs normalisés.
- Une raclette.
- Une règle métallique ;
- Une balance précise au gramme.

B).Matériaux utilisés :

- Sables d'argile expansée 0/3mm AN et 0/3mm AC.

-Sables ordinaires 0/1mm et 0/5 mm.

C).Conduite de l'essai :

-Après échantillonnage, on verse dans le cylindre une quantité d'échantillon à une hauteur de 1.5cm.

- On arase l'excès avec une règle, et on dépose le cylindre délicatement sur une balance pour éviter tout tassement.



Figure 2.2 : Essai de la masse volumique apparente.

Remarque : l'essai a été réalisé sur des sables humides afin de déterminer leurs teneurs en humidité par la suite.

-On note alors M (la masse de l'échantillon) ; et on calcule alors la masse volumique (humide)

-On pèsera après 1000g de chaque échantillon qu'on va les passer à l'étuve jusqu'à masse constante pour pouvoir déterminer la teneur en eau et par la suite la masse volumique apparente.

- Résultats obtenus :

$$\rho \text{ (humide)} = M/V \text{ (Eq2.1)}$$

Avec :

M : La masse de l'échantillon (g).

V : le volume du récipient cylindrique selon la fraction de granulats.

La masse volumique apparente :

$$\rho_{app} = \rho_{moy} - \left(\frac{\rho_{moy} * \text{humidité}}{100} \right) \text{(Eq2.2)}$$

Tableau2.7 : Masses volumiques et pourcentage d'humidité des sables

Type du sable	Masse volumique humide (kg/m ³)	% d'humidité	Masse volumique apparente (kg/m ³)
0/3mm AN	874.93	3.73	787.00
0/3mm AC	708.8	5.48	669.00
0/5mm	-	2.24	2600
0/1mm	-	0	2650

Remarque :La teneur en eau des matériaux dépend des conditions de stockage.

-La teneur en eau dépend des conditions de stockage.

-Lorsqu'il s'agit de granulats légers nodulaire on remarque que plus les granulats est gros (contiennent plus de pores), plus la masse volumique apparente diminue.

2.3.3. b.Masse volumique absolue/ réelle EN NF 1097-6 Annexe B[43]:

- Pour les sables légers :

A).Matériel utilisé :

-Pycnomètre à sable ;

-Tamis 0.063mm ; 4mm ;

-Une pelle ;

-Une raclette ;

-Une balance précise au gramme ;

-Des bacs ;

-Etuve.

B).Matériaux utilisés :

Sable d'argile expansée :

-Nodulaire 0/3mm .

-Concassé 0/3mm.

C).Mode opératoire :

La détermination de la masse volumique absolue du sable utilisé dans ce travail à été effectué selon les étapes suivantes :

–Tout d'abord l'échantillon utilisé est un échantillon représentatif

–La prise d'essai doit être supérieure à 1kg

–On passe après notre sable aux tamis de 4mm et 0.063mm

–On garde seulement le refus du tamis 0.063mm qu'on lavera par la suite afin d'éliminer les fines, à la fin de cette étape on mélange délicatement notre sable (pour l'homogénéiser)

–On pèsera alors dans le pycnomètre 400g de sable

– On y rajoutera de l'eau jusqu'à remplissage

– Au final on refermera le pycnomètre et on laisse poser pendant 24h

Après 24h :

– On agite le pycnomètre avant 15 min de la prise d'essai dans le but d'éliminer les bulles d'air ;

– Après cela on y rajoute de l'eau à une certaine hauteur jusqu'à débordement dans le même but d'éliminer les bulles d'air ;

– On pèse notre pycnomètre, eau, sable (M_2) ;

– On videra ensuite le pycnomètre de toute son eau et on reversera le sable dans un bac, qu'on laissera sécher superficiellement à l'air libre ;

– On vérifiera si le sable à sécher superficiellement à l'aide du cône, qu'on remplira de notre échantillon qui subira **25 piques**, on le reversera ensuite sur une surface plane ;

- Après séchage superficielle on pèsera notre sable et on notera M_1 ;
- On pèse notre pycnomètre rempli d'eau uniquement M_3 ;
- D'après les indicatifs de la norme **EN NF 1097-6 annexe – F [43]** ;
- On pèse ensuite notre sable pour déterminer le degré de saturation M_1 ;
- Après pesage de M_1 on met notre échantillon dans l'étuve à 115°C jusqu'à masse constante M_4 .



Figure 2.3 : Essai de la masse volumique absolue des sables légers.

- Interprétation des résultats :
 - La masse volumique absolue :

$$\rho_{\text{abs}} = \rho_w * \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad (\text{Eq2.3})$$

- La masse volumique réelle après séchage à l'étuve :

$$\rho_{\text{réelle}} = \rho_w * \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad (\text{Eq2.4})$$

- Le coefficient d'absorption d'eau :

$$W_{A24} = \frac{100 * (M1 - M4)}{M4} \quad (\text{Eq2.5})$$

- La masse volumique de saturation :

$$\rho_{\text{ssd}} = \frac{M1}{M1 - (M2 - M3)} * 1000 \quad (\text{Eq2.6})$$

Avec :

ρ_w : la masse volumique de l'eau ;

M_1 : la masse de l'échantillon sèche superficiellement à l'air libre ;

M_2 : la masse du pycnomètre +eau+ sable ;

M_3 : la masse du pycnomètre rempli d'eau ;

M_4 : la masse de l'échantillon séché à l'étuve.

- Pour les sables ordinaires :

A). Matériels utilisés :

- Eprouvette graduée ;
- Une balance.

B). Matériaux utilisés :

- Eau de robinet.
- Sable classique.

C). Procédé de l'essai :

- On remplit les éprouvettes avec un volume $V_1 = 1000 \text{ ml}$ d'eau
- Ensuite on y introduit les granulats (environ 300g) toutes en éliminant les bulles d'air
- On note V_2
 - . Interprétation des résultats :

$$\rho = \frac{M}{V_2 - V_1} \quad (\text{Eq2.7})$$

Remarque : Cette méthode est simple et rapide, toutefois sa précision est faible.

2.2.3.c. Absorption des granulats classique :

- On a pris une quantité de 100g de chaque fraction de granulats classique totalement sèche d'un récipient on y a déposé notre quantité de granulats et on y ajoute de l'eau

- On laisse reposer pendant 24 heures
- Après 24h, on sèche nos granulats superficiellement à l'aide d'un séchoir
- On note M_w
- Selon la norme (NF P 15-554 pour les granulats et 18-555 pour les sables) [67] ; on a la formule :

$$A_b = \frac{M_w - M_s}{M_s} * 100 \text{ (Eq2.8)}$$

Avec :

M_w : masse de l'échantillon superficiellement sèche

M_s : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve



Figure 2.4: Essai de la masse volumique apparente.

Tableau 2.8 : Masses volumiques de sables et leur pourcentage d'absorption

Type du sable	Masse volumique absolue (kg/m ³)	Masse volumique réelle (kg/m ³)	Coefficient d'absorption %
0/3AN	1942.00	1762.00	5.26
0/3AC	1720	1548.00	7.23
0/1mm	2670	2650	0.20
0/5mm	2500	2360	1.41

2.2.3.d. Essai d'équivalent de sable EN NF P18-598[51] :

Cet essai a pour but de mesurer la propreté du sable.

A). Matériels utilisés :

- Une éprouvette ;
- Un piston ;
- Une agitatrice automatique ;
- Entonnoir ;

- Règle graduée.
- Diviseur a couloir.
- Balance précise au gramme.

B). Matériaux utilisés :

- Sable d'argile expansée 0/3mm AN et AC.
- Sables ordinaires 0/1 mm et 0/5 mm.
- Solution lavante préparée (125 g de solution dans 5 l d'eau).

C). Mode opératoire :

- Nos sables doivent être préalablement séchés et tamisés au tamis de 2 mm.
- Ensuite on passera nos sables au diviseur à couloir pour obtenir un échantillon représentatif .
- Peser une quantité de 120 g de chaque sable.
- Les étapes de réalisation de l'essai sont tel que la norme EN NF P18-598[51] décrit.



Figure 2.5:Essai de l'équivalent de sable.

- Résultats :

$$Es \text{ (visuel)} = (H'2 / H1) * 100$$

$$Es \text{ (Piston)} = (H2 / H1) * 100$$

Avec :

H1 : Hauteur de sable.

H'2 : Hauteur du sable sans impuretés.

H2 : Hauteur du sable avec piston.

Tableau 2.9: Mesure de l'équivalent de sable

Type du sable	Es (piston)
0/3 mm AN	91.41>80%
0/3 mm AC	93.93%>80%
0/1 mm	60<63.984<70%
0/5 mm	60<66.4<70%

2.2.3.e.Essai de la valeur au bleu de méthylène NA1948 [46] :

A).Matériel utilisé :

-Un bécher.

-Baguette en verre.

-Papier filtre .

-Agitateur .

B).Matériaux utilisés :

-Sables.

-Solution de bleu de méthylène.

-Eau distillée.

C).Mode opératoire :

Peser 260 g de chaque sable et 500 ml d'eau déminéralisée, agiter à l'aide de l'agitateur pendant 5 min (600 tours), après 5 min on réduit la vitesse 0 400 tours par min, après chaque minute on ajoute une dosette de 5 ml de bleu de méthylène et on prélève à l'aide la baguette une goutte de liquide et on la dépose sur le papier filtre.

Si au tour de la goutte il n'y a pas d'auréole et ce après au moins trois reprises on déduit que le sable est propre, si le contraire le sable contient de l'argile.



Figure 2.6: Réalisation de l'essai de VB.

- Valeurs du VB :

Tableau 2.10 : Mesure de la valeur au bleu de méthylène

Type du sable	VB
0/3 mm AN	0.19
0/3 mm AC	0.19
0/1 mm	2
0/5 mm	0.11

2.2.3.f. Analyse granulométrique par voie sèche EN NF 933-1 et EN NF933-2[45] :

Après séchage de nos granulats à l'étuve (105°C) pour éliminer toute présence d'eau et de matière organique pendant 24 heures, on procède à l'échantillonnage.

A).Matériel utilisé :

Une série de tamis normalisés.

Une balance précise au gramme ;

Des bacs ;

Une pelle ;

Une tamiseuse électrique

B).Matériaux utilisés :

Sables légers d'argile expansée 0/3 mm AN et AC.

Sables ordinaire 0/1 mm et 0/5 mm.

C).Mode opératoire :

On pèse d'abord des tamis vide ;

- Après dressage de tamis, on y introduit la masse de l'échantillon ;
- Ensuite on les dresses de manière croissante jusqu'à la plus grande ouverture ;
- Après cela on pèse une masse de 2000g de chaque fraction, après dressage des tamis dans la tamiseuse, on y introduit la masse de l'échantillon ;
- En dernier lieu on met la tamiseuse en marche pendant 20min pour les granulats classique et 10min pour les granulats légers ;
- Après tamisage, on pèse nos tamis avec leur refus.

- Résultats :

Tableau 2.11 : Analyse granulométrique du sable grossier de Baghlia 0/5 mm

Sable classique grossier 0/5mm				
-Masse volumique absolue : 2570kg/m ³				
-Masse volumique apparente : 2600 kg/m ³				
-Module de finesse : 3.83				
Ouverture des tamis (mm)	Masse de refus (g) Ri	Masse de refus cumulée (g) Rn	Pourcentage des refus cumulés (Rn/M)*100	Pourcentage des tamisats cumulés 100-[(Rn/M)*100]
8	0	0	0	100
6.3	0	0	0	100
5	140	140	9.49	90.51
4	180	320	21.70	78.3
3.15	128	448	30.39	69.61
2	164	612	41.51	58.49
1.6	82	694	47.08	52.92
1	164	858	58.20	41.8
0.5	224	1082	73.40	26.6
0.315	174	1256	85.21	14.79
0.25	76	1332	90.36	9.64
0.125	120	1452	98.50	6
0.063	18	1470	99.72	0.28
Fond	4	1474	100	0

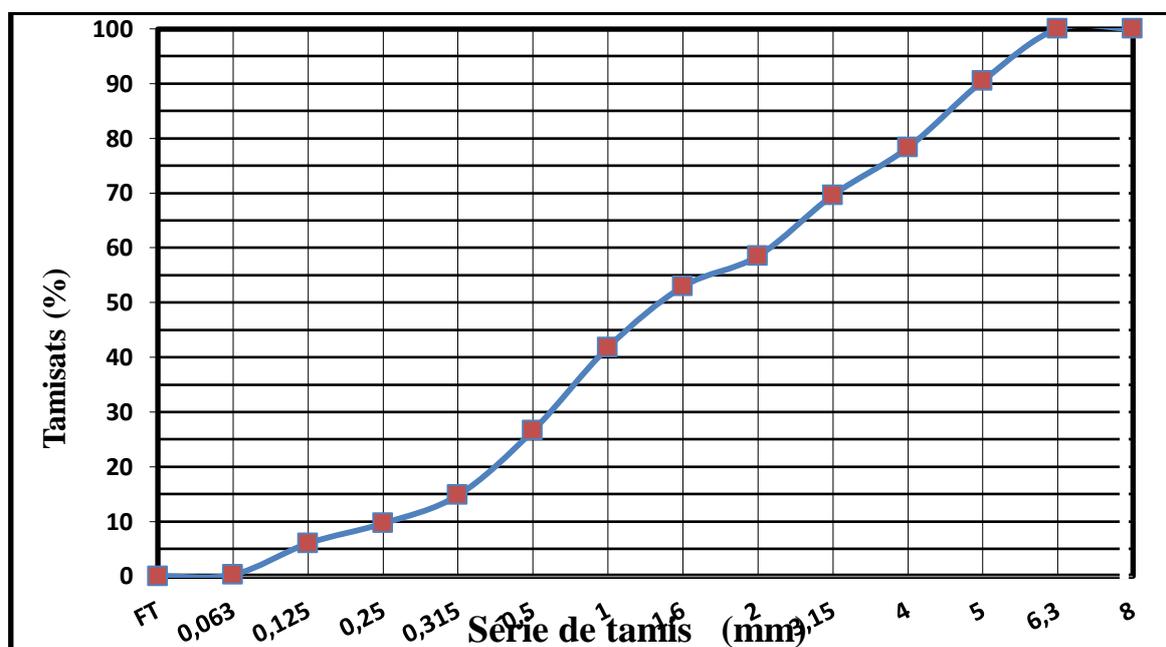


Figure 2.7 : Courbe granulométrique du sable classique grossier 0/5mm de Beghlia.

Tableau 2.12 : Analyse granulométrique du sable fin 0/1 mm de Boussaada

Sable correcteur 0/1mm				
Masse volumique absolue : 2670 kg/m ³				
Module de finesse : 1.33				
Ouverture des tamis (mm)	Masse de refus (g) Ri	Masse de refus cumulée (g) Rn	Pourcentage des refus cumulés (Rn/M)*100	Pourcentage des tamisats cumulés 100-[(Rn/M)*100]
8	0	0	0	100
6.3	0	0	0	100
5	0	0	0	100
4	0	0	0	100
3.15	0	0	0	100
2	0	0	0	100
1.6	0	0	0	100
1	0	0	0	100
0.5	12	12	1	99
0.315	152	164	13.71	86.29
0.25	266	430	35.95	64.05
0.125	722	1152	96.32	3.68
0.063	42	1194	99.83	0.17
Fond	2	1196	100	0

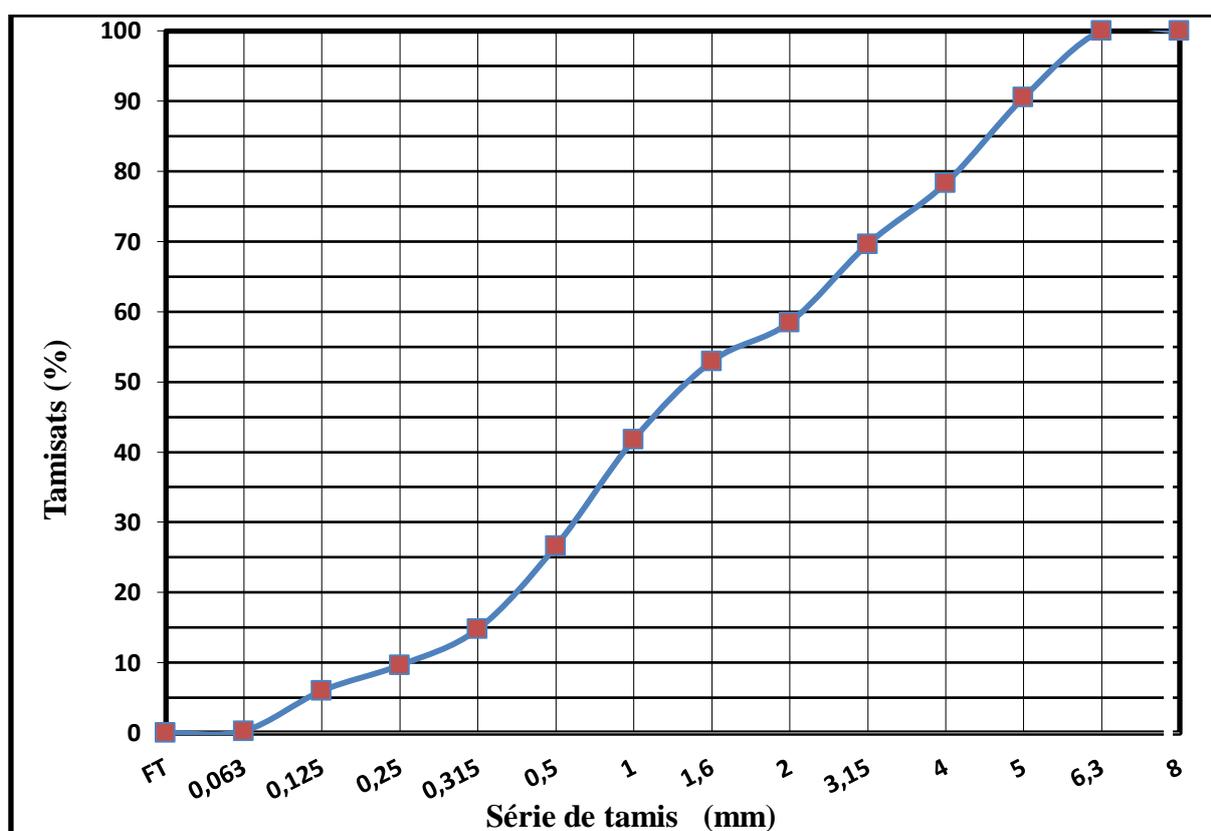


Figure 2.8 : Courbe granulométrique du sable correcteur 0/1 mm de Beghlia.

Tableau2.13 : Analyse granulométrique des sables d'argile expansée 0/3 mm nodulaire

Sable nodulaire 0/3				
-La masse volumique absolue de l'échantillon :1942 kg/m ³				
-La masse volumique apparente de l'échantillon :0.787 kg/m ³				
Module de finesse :3.22				
Ouverture des tamis (mm)	Masse de refus (g) Ri	Masse de refus cumulée (g) Rn	Pourcentage des refus cumulés (Rn/M)*100	Pourcentage des tamisats cumulés 100-[(Rn/M)*100]
5	4.84	4.84	0.24	100
4	2.82	7.66	0.38	99.62
3.15	4.65	12.31	0.61	99.39
2.5	15.62	27.93	1.39	98.61
1.6	657.98	685.91	34.29	65.71
1.25	371.11	1057.02	52.85	47.15
0.63	545.76	1602.78	80.13	19.87
0.315	226.19	1828.97	91.44	8.56
0.16	102.27	1931.16	96.55	3.72
0.08	34.52	1965.68	98.28	1.72
Fond	27.07	1992.75	99.63	0.37

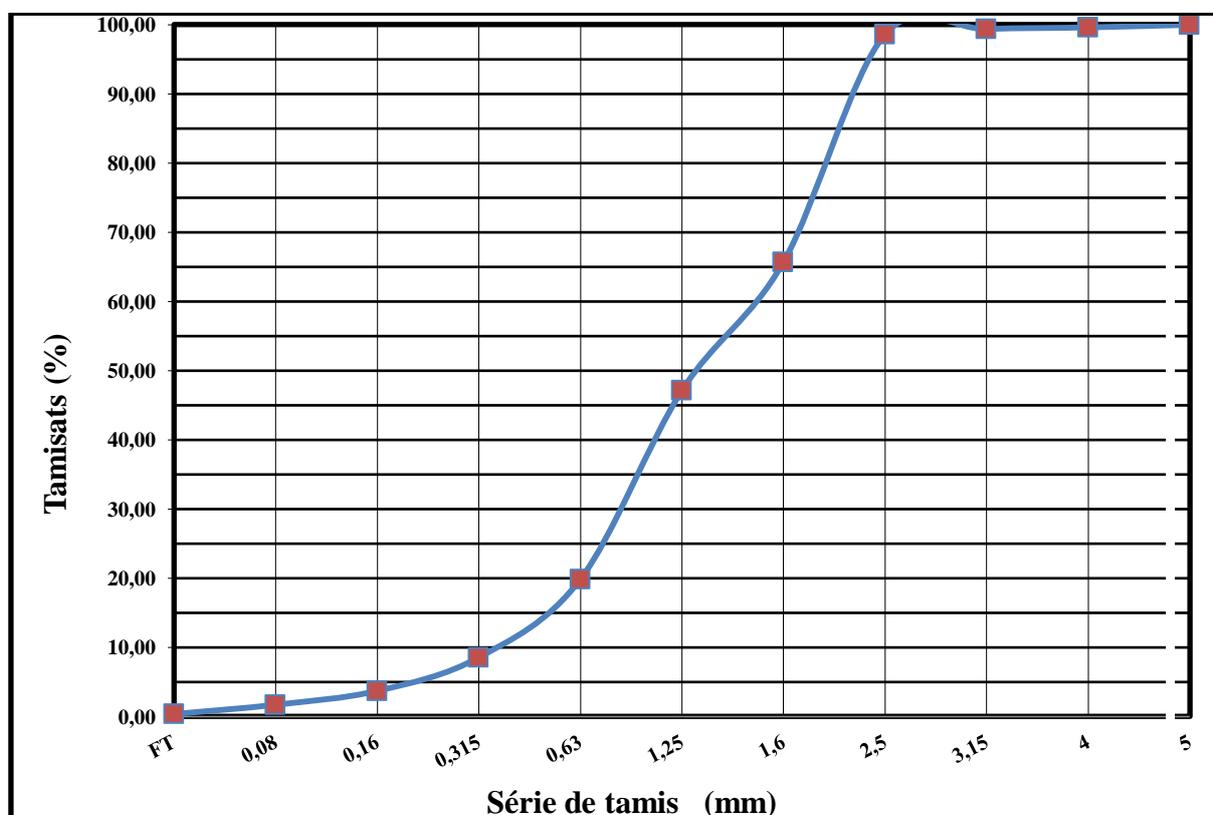
**Figure 2.9** : Courbe granulométrique du sable d'argile expansée 0/3 mm nodulaire.

Tableau 2.14 : Analyse granulométrique du sable d'argile expansée 0/3 mm concassé

Sable concassé 0/3				
-La masse volumique absolue de l'échantillon :1720 kg/m ³				
-La masse volumique apparente de l'échantillon :0.669kg/m ³				
-Le module de finesse :2.52				
Ouverture des tamis (mm)	Masse de refus (g) Ri	Masse de refus cumulée (g) Rn	Pourcentage des refus cumulés (Rn/M)*100	Pourcentage des tamisats cumulés 100-[(Rn/M)*100]
5	3.63	3.63	0.18	100
4	2.5	6.13	0.30	99.7
3.15	7.55	13.68	0.68	99.32
2.5	51.46	65.14	3.25	96.75
1.6	418.95	484.09	24.20	75.8
1.25	237.55	721.64	36.08	63.92
0.63	460.07	1181.71	59.08	40.92
0.135	266.97	1448.68	72.40	27.6
0.16	174.43	1623.11	81.15	18.85
0.08	125.7	1748.81	87.44	12.56
Fond	241.08	1989.89	99.49	0.51

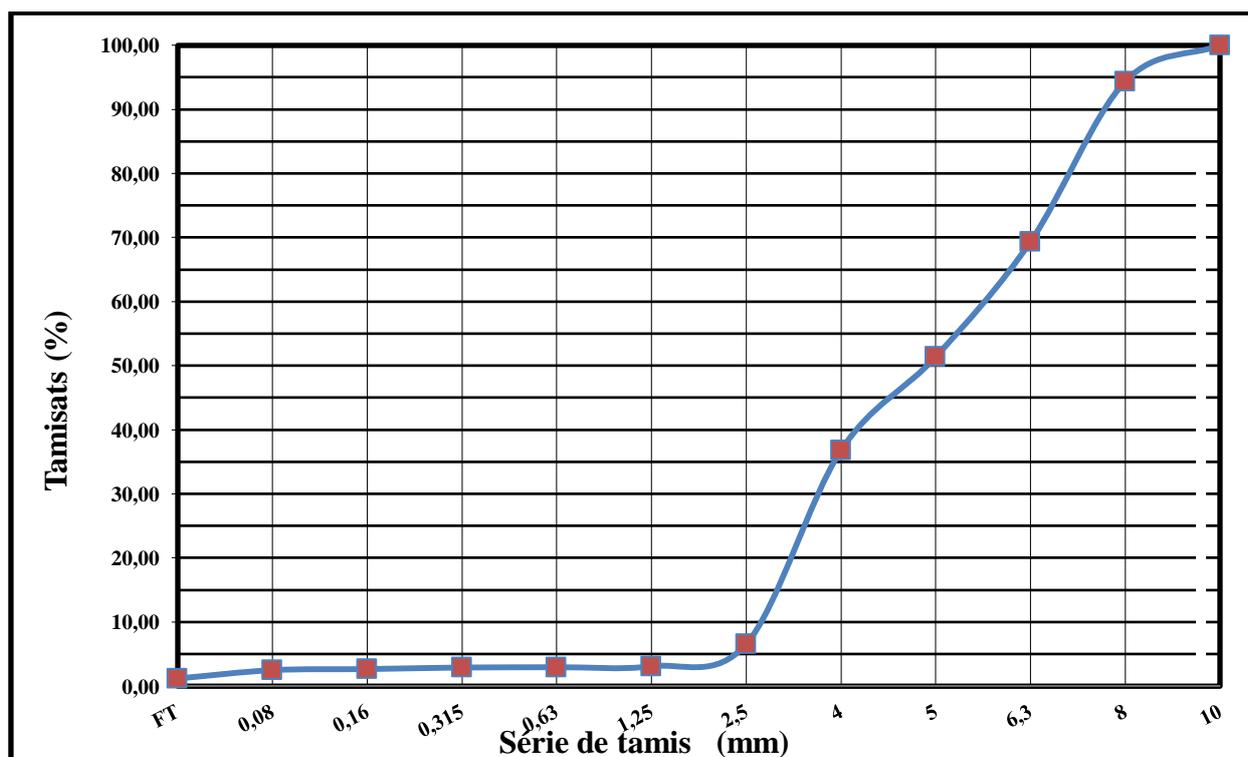


Figure 2.10 : Courbe granulométrique du sable d'argile expansée 0/3 mm concassé.

2.2.4. Les granulats :

Plusieurs types de granulats ont été utilisés dans cette étude dont :

- Granulats classiques de carrière :

- 3/8 mm

- 8/15mm

- 15/25 mm

- Granulats légers d'argile expansée provenant d'ALGEXPAN :

- 3/8 AN.

- 8/15 AN.

- 15/25 AN.

- 3/8 AC.

La particularité des granulats nodulaires est leur enveloppe dure qui les rend moins absorbant.

2.2.4. a. Masse volumique apparente EN NF 1097-6 Annexe C [43] :

Le matériel utilisé ainsi que la conduite de l'essai sont tel que cités précédemment.



Figure 2.11 : Essai de la masse volumique apparente.



Figure 2.12 : Réalisation de l'essai de la masse volumique.

2.2.4.b. Masse volumique absolue des granulats légers [43] :

A).Matériels utilisés :

- Une pelle ;
- Une Raclette ;
- Des bacs ;
- Une balance précise au gramme ;
- Un pycnomètre de 1000ml.

B).Matériaux utilisés :

- Granulats d'argile expansée 3/8(AN-AC) , 8/15(AN) ,15/25(AN).
- Eau du robinet.

C).Etalonnage du pycnomètre :

Déterminer le volume du pycnomètre en remplissant d'eau jusqu'au trait de jauge à une température ambiante $22^{\circ}\pm 3^{\circ}\text{C}$.

(La masse du pycnomètre = masse du pycnomètre eau – masse du pycnomètre vide).

On le place ensuite pendant 1h dans une enceinte d'eau à $T=22\pm 3^{\circ}\text{C}$, pour permettre aux gaz de s'échapper.

D).Mode opératoire :

-Après étalonnage on vide les $\frac{3}{4}$ d'eau du pycnomètre et on y rajoute les 400g de granulats (selon la norme)[43].

-On remplit ensuite le pycnomètre d'eau jusqu'au trait de jauge.

-On laisse reposer pendant 5min / 24h.

-Après repos on agite le pycnomètre 15min avant la prise d'essai (pour évacuer les bulles d'air), ensuite on rajoute de l'eau jusqu'au trait de jauge.

-On pèse ensuite le pycnomètre + l'échantillon + l'eau (M_F).

-Après cela on vide notre pycnomètre de son eau au tamis de 0.063, on séchera ensuite nos granulats à l'aide d'un tissu absorbant et on les dépose dans un bac

-On laissera les granulats sécher superficiellement à l'air libre, avant de peser.

-On note M_w .



Figure 2.13 : Etape de réalisation de l'essai de la masse volumique absolue des granulats légers.

- Interprétation des résultats :

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{(M_2 - M_1) \cdot \rho_w}{M_p + (V_p \cdot \rho_w) + M_w - M_f} \quad (\text{Eq2.9})$$

-Par la même occasion on peut aussi déterminer le coefficient d'absorption des granulats :

Coefficient d'absorption :

Il mesure le volume des pores accessibles à l'eau, ce qui signifie que plus sa valeur est importante, plus le granulat est absorbant.

$$W_f = \frac{M_w - (M_2 - M_1) \cdot 100}{(M_2 - M_1)} \quad (\text{Eq2.10})$$

M_1 : masse volumique de pycnomètre vide.

M_2 : masse volumique de pycnomètre+granulats sec.

V_p : volume de pycnomètre.

ρ_w : masse volumique d'eau.

M_p : masse de l'échantillon superficielle.

M_w : masse de l'échantillon superficiellement sec.

Tableau 2.15 : Masses volumiques et pourcentage d'absorption et d'humidité

Type du granulat	Masse volumique apparente (kg/m ³)	Masse volumique absolue (kg/m ³)	Coefficient d'absorption %	% d'humidité
3/8 mm AN	701.00	1209.00	8.12	10.00
3/8 mm AC	568.00	1150	14.2	4.7
8/15mm AN	747.00	1255.00	6.87	7
15/25mm AN	535.00	916.00	4.37	6
3/8mm OR	2830	2570	0.19	0
8/15mm OR	2820	2660	0.92	0
15/25mm OR	2820	2720	2.04	0

2.2.4.c. Analyse granulométrique par voie sèche EN NF 933-1 et EN NF 933-2[45] :

L'essai se déroule comme cité précédemment, en utilisant le même matériel.

Tableau 2.16 : Analyse granulométrique des granulats d'argile expansée 3/8mm nodulaire

Granulat nodulaire 3/8mm				
-La masse volumique absolue de l'échantillon :1209 kg/m³				
-La masse volumique apparente de l'échantillon :0.701 kg/m³				
Ouverture des tamis (mm)	Masse de refus (g) Ri	Masse de refus cumulée (g) Rn	Pourcentage des refus cumulés (Rn/M)*100	Pourcentage des tamisats cumulés 100-[(Rn/M)*100]
10	33.21	33.21	2.06	97.94
8	233.49	266.7	16.61	83.39
6.3	526.27	792.96	49.40	50.6
5	326.27	1119.23	69.73	30.27
4	156.88	1276.11	79.50	20.5
2.5	259.56	1535.67	95.68	4.32
1.25	20.47	1556.14	96.95	3.05
0.63	29.05	1585.19	98.76	1.24
0.315	8.71	1593.9	99.30	0.7
0.16	4.24	1598.14	99.57	0.43
0.08	1.94	1600.08	99.69	0.31
Fond	2.94	1603.02	99.87	0.13

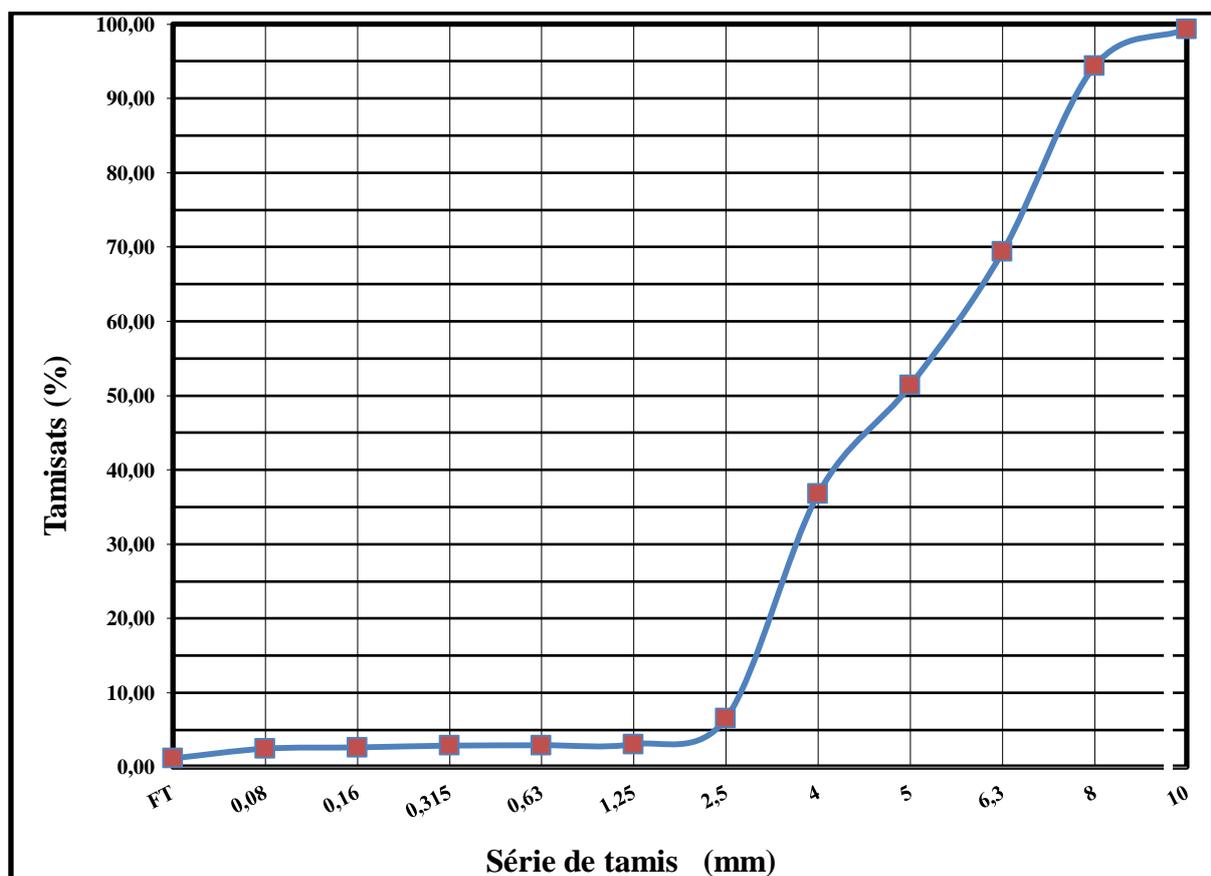


Figure 2.14: Courbe granulométrique des granulats d'argile expansée 3/8 mm nodulaire.

Tableau 2.17 : Analyse granulométrique des granulats d'argile expansée 3/8 mm concassés

Granulat concassé 3/8mm				
-La masse volumique absolue de l'échantillon : 1150 kg/m ³				
-La masse volumique apparente de l'échantillon : 568 kg/ m ³				
Ouverture des tamis (mm)	Masse de refus (g) Ri	Masse des refus cumulée(g) Rn	Pourcentage des refus cumulés (Rn/M)*100	Pourcentage des tamisats cumulés 100-[(Rn/M)*100]
10	1.31	1.31	0.65	99.35
8	111.39	112.7	5.63	94.37
6.3	500.23	612.93	30.64	69.36
5	359.14	972.07	48.60	51.4
4	291.93	1264	63.2	36.8
2.5	604.42	1868.42	93.42	6.58
1.25	69.82	1938.24	96.91	3.09
0.63	2.95	1941.19	97.05	2.95
0.315	0.95	1942.14	97.10	2.9
0.16	4.8	1946.94	97.34	2.66
0.08	3.42	1950.336	97.51	2.49
Fond	25.86	1976.22	98.81	1.19

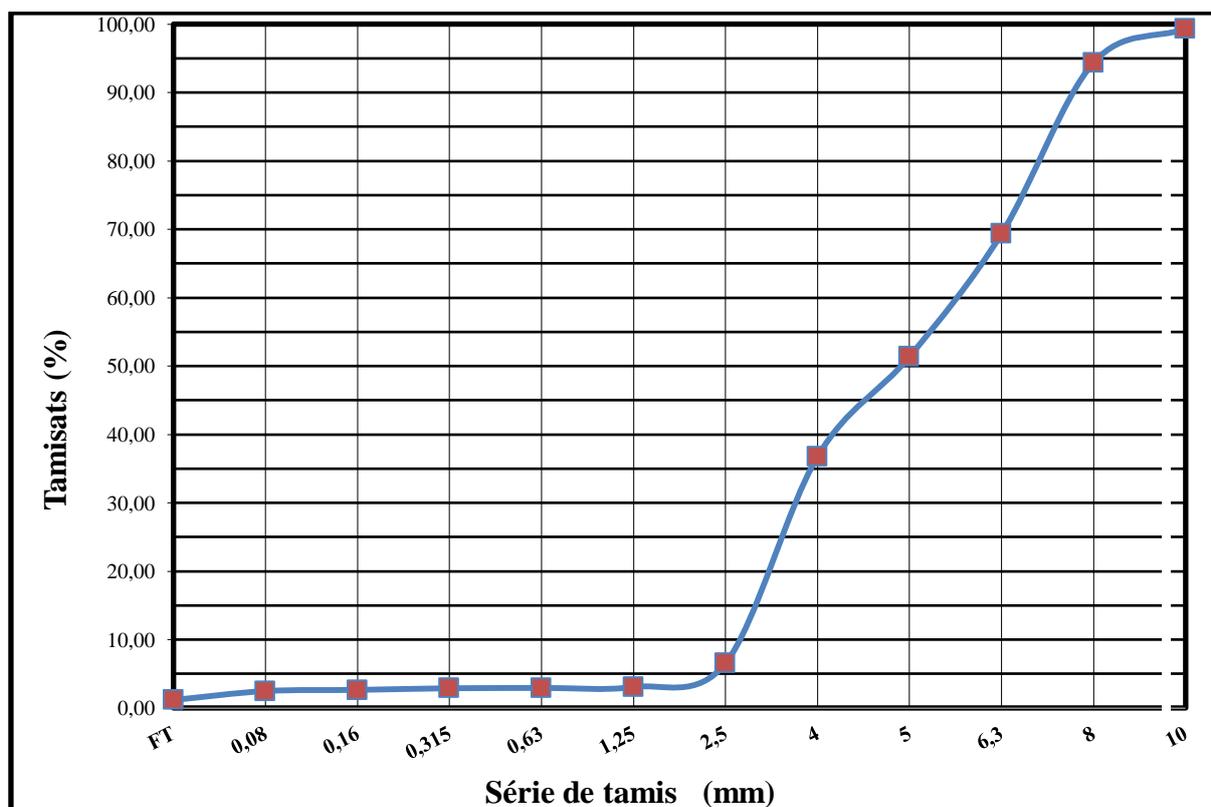


Figure 2.15 : Courbe granulométrique des granules d'argile expansée 3/8mm concassés.

Tableau 2.18: Analyse granulométrique des granules d'argile expansée 8/15 mm nodulaire

Granulat 8/15mm				
-La masse volumique absolue de l'échantillon :1255 kg/m ³				
-La masse volumique apparente de l'échantillon :0.747 kg/m ³				
Ouverture des tamis (mm)	Masse de refus (g) Ri	Masse de refus cumulés (g) Rn	Pourcentage des refus cumulés (Rn/M)*100	Pourcentage des tamisats cumulés 100-[(Rn/M)*100]
16	300.45	300.45	15.02	84.98
12.5	1454.57	1755.02	87.75	12.25
10	213.86	1968.88	98.44	1.56
8	9.81	1978.69	98.93	1.07
6.3	2.54	1981.23	99.06	0.94
5	0.79	1982.02	99.10	0.9
4	0.58	1982.6	99.13	0.87
2.5	1.03	1983.63	99.18	0.82
1.25	0.54	1984.17	99.20	0.8
0.63	0.52	1984.69	99.23	0.77
0.315	0.77	1985.46	99.27	0.73
0.16	0.93	1986.39	99.31	0.69
0.08	0.38	1986.77	99.33	0.67
Fond	4.04	1990.81	99.54	0.46

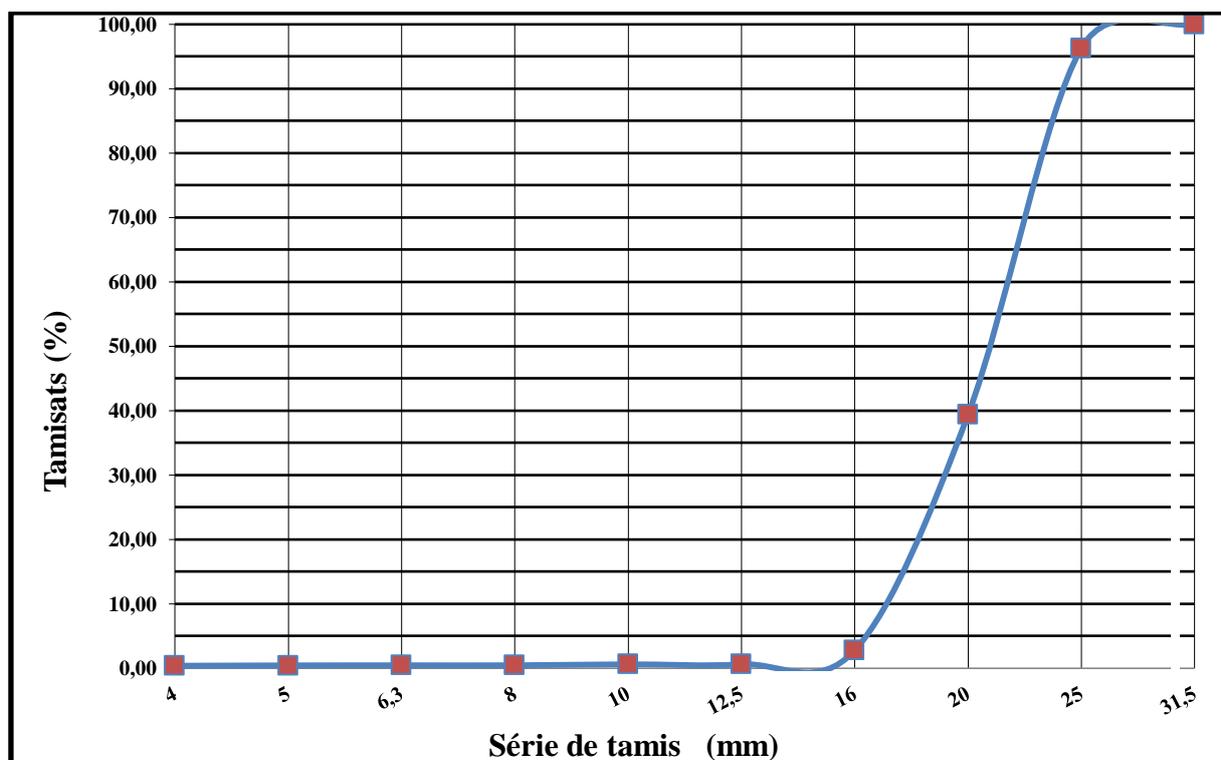


Figure 2.16 : Courbe granulométrique des granulats d'argile expansée 8/15mm nodulaire.

Tableau 2.19 : Analyse granulométrique des granulats légers d'argile expansée 15/25 mm nodulaire

Granulats 15/25mm				
-La masse volumique absolue de l'échantillon :0.916 kg/m ³				
-La masse volumique apparente de l'échantillon :0.535 kg /m ³				
Ouverture des tamis (mm)	Masse de refus (g) Ri	Masse de refus cumulée (g) Rn	Pourcentage des refus cumulés (Rn/M)*100	Pourcentage des tamisât cumulés 100- [(Rn/M)*100]
31.5	0.01	0.01	0.05	99.95
25	4.22	4.23	0.21	99.79
20	835.33	839.56	41.97	58.03
16	1012.52	1852.08	92.60	7.4
12.5	118.27	1970.35	98.51	1.49
10	3.14	1973.49	98.68	1.32
8	2.21	1975.7	98.78	1.22
6.3	1.84	1977.54	98.87	1.13
5	1.29	1978.83	98.94	1.06
4	0.31	1979.14	98.95	1.05
Fond	15.16	1994.3	99.71	0.29

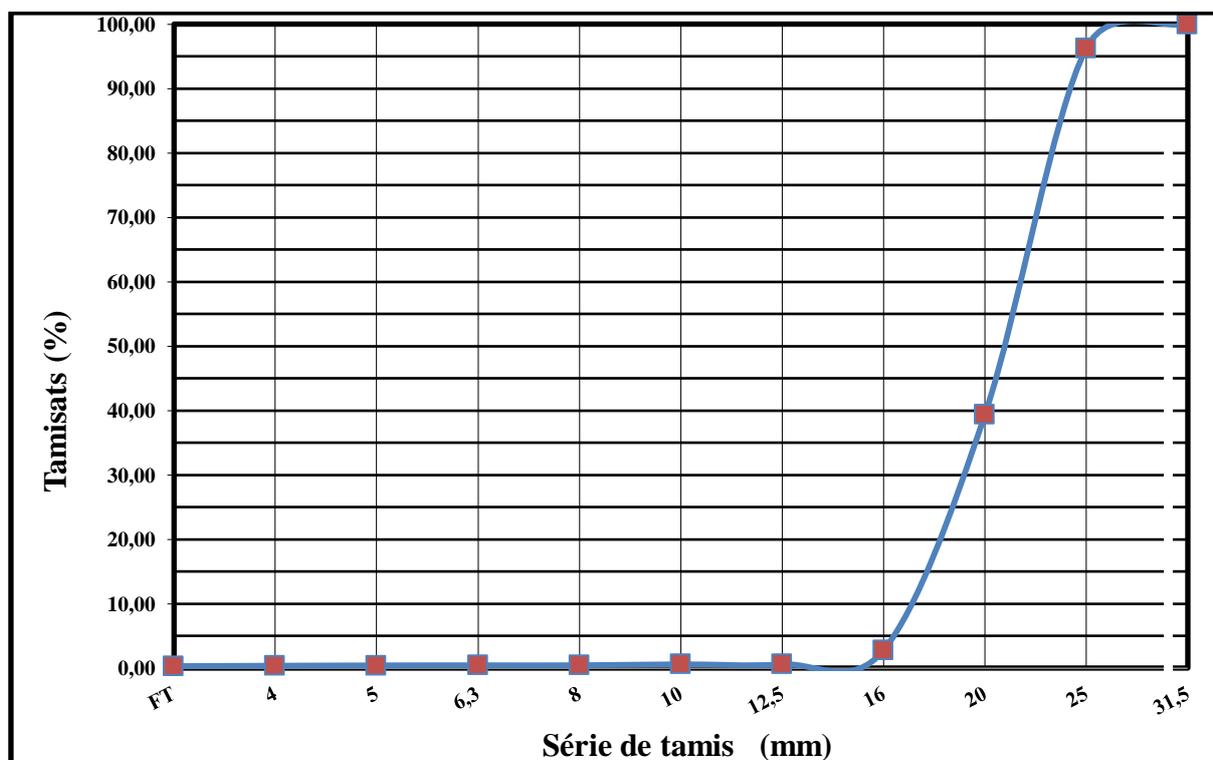


Figure 2.17 : Courbe granulométrique des granulats d'argile expansée 15/25mm nodulaire.

Tableau 2.20 : Analyse granulométrique des granulats ordinaire 3/8 mm

Granulat 3/8mm				
-La masse volumique absolue de l'échantillon : 2570 kg/m ³				
-La masse volumique apparente de l'échantillon : 2830 kg/m ³ .				
Ouverture des tamis (mm)	Masse de refus (g) Ri	Masse de refus cumulée (g) Rn	Pourcentage des refus cumulés (Rn/M)*100	Pourcentage des tamisats cumulés 100- [(Rn/M)*100)
10	0.4	0.4	0.02	99.98
8	2.31	2.71	0.13	99.87
6.3	399.05	401.76	20.08	79.92
5	681.39	1083.15	54.15	45.85
4	491.97	1575.12	78.75	21.25
2.5	397.18	972.3	98.61	1.39
1.25	10.16	1982.46	99.12	0.88
0.63	2.27	1984.73	99.23	0.77
0.315	1.94	1986.67	99.33	0.67
0.16	1.96	1988.63	99.43	0.57
0.08	1.88	1990.51	99.52	0.48
Fond	3.9	1994.41	99.72	0.28

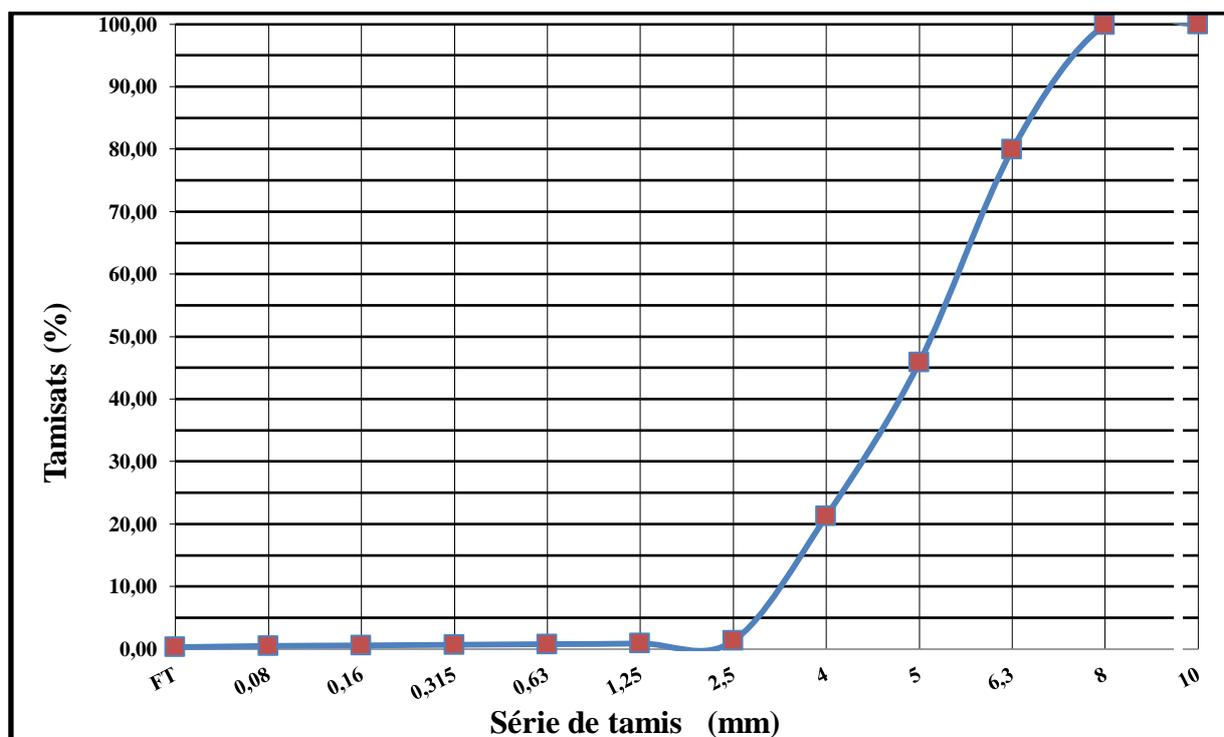


Figure 2.18 : Courbe granulométrique des granulats ordinaires 3/8mm.

Tableau 2.21 : Analyse granulométrique des granulats ordinaire 8/15 mm

Granulat 8/15mm				
-La masse volumique absolue de l'échantillon : 2660 kg/m ³				
-La masse volumique apparente de l'échantillon : 2082 kg/m ³				
Ouverture des tamis (mm)	Masse de refus cumulée (g) Rn	Masse de refus cumulée (g) Rn	Pourcentage des refus cumulés (Rn/M)*100	Pourcentage des tamisats cumulés 100- [(Rn/M)*100]
16	120.24	120.24	0.60	99.4
14	335.06	455.3	22.76	77.24
12.5	339.72	795.02	39.75	60.25
10	519.98	1315	65.75	34.25
8	368.27	1683.27	84.16	15.84
6.3	264.14	1947.41	97.37	2.63
5	36.5	1983.91	99.33	0.67
4	2.85	1986.76	99.34	0.66
2.5	0.29	1987.05	99.35	0.7
1.25	0.39	1987.44	99.37	0.63
0.63	0.3	1987.74	99.38	0.62
0.315	0.49	1988.23	99.41	0.59
0.16	0.76	1988.99	99.44	0.56
0.08	1.66	1990.65	99.53	0.47
Fond	2.3	1992.95	99.64	0.36

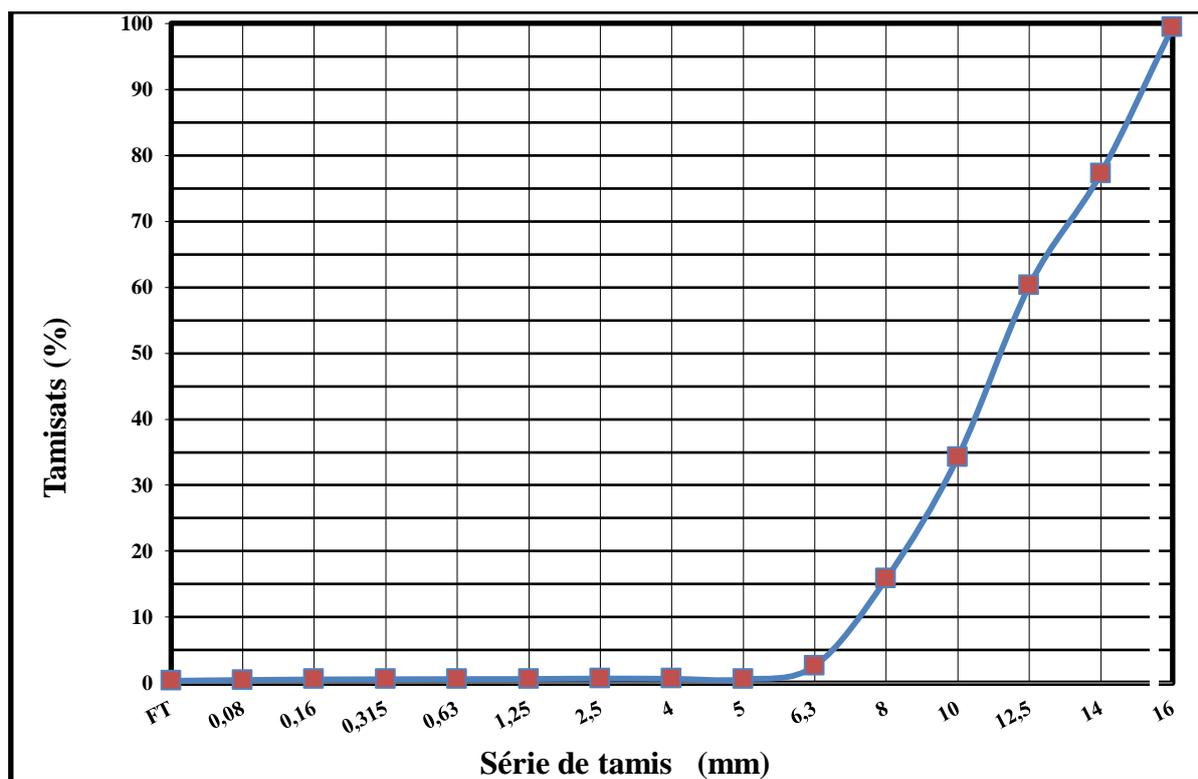


Figure 2.19 : Courbe granulométrique des granulats ordinaires 8/15mm.

Tableau 2.22 : Analyse granulométrique des granulats ordinaires 15/25 mm

Granulat 15/25mm				
-La masse volumique absolue de l'échantillon : 2720 kg/m ³				
-La masse volumique apparente de l'échantillon : 2820 kg/m ³				
Ouverture des tamis (mm)	Masse de refus (g) Ri	Masse de refus cumulée (g) Rn	Pourcentage des refus cumulés (Rn/M)*100	Pourcentage des tamisats cumulés 100-[(Rn/M)*100]
31.5	0	0	0	100
25	74.42	74.42	3.72	96.28
20	1137.63	1212.05	60.60	39.4
16	731.78	1943.83	97.19	2.81
12.5	43.95	1987.78	99.19	0.62
10	0	1987.78	99.38	0.62
8	2.94	1990.72	99.53	0.47
6.3	0	1990.72	99.53	0.47
5	0	990.72	99.53	0.45
4	0	1992.72	99.53	0.40
Fond	2.69	1993.41	99.67	0.33

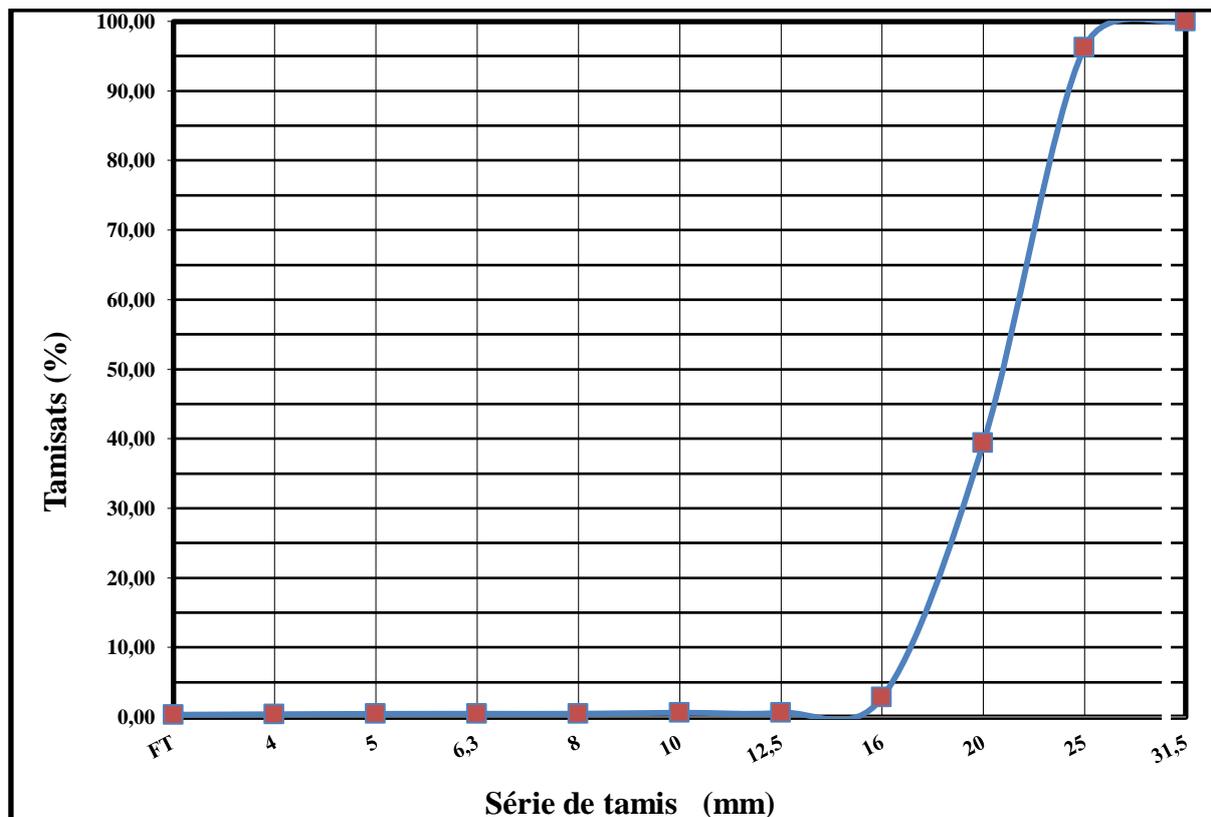


Figure 2.20 : Courbe granulométrique des granulats ordinaires 15/25mm.

2.3. Formulation des bétons :

Les bétons exigent des performances qui dépendent d'une consistance adaptée à leur utilisation, celle-ci est donnée par le biais de l'affaissement au cône d'Abrams notée A_{ff} , quant à leur qualité ; celle-ci dépend de leur résistance à des échéances de 7, 14, 28 jours f_c .

On note que la résistance du béton dépend de la résistance du liant (ciment) utilisé, celle-ci est définie par sa classe vraie σ_c .

Le squelette granulaire du béton se compose d'un mélange de sable et de granulats ; ces derniers contribuent à la résistance du béton par leur forme, qualité mécanique ainsi que leur adhérence à la matrice cimentaire[67].

Dans cette présente étude 7 types de béton ont été réalisés :

BO : béton ordinaire.

BO SP : béton ordinaire adjuvanté.

BL SP1 : béton léger adjuvanté formule 1.

BL SP 2 : béton léger adjuvanté formule 2.

BL SP 100% AN : béton léger adjuvanté 100% granulats d'argile expansée nodulaire.

BM 1 :béton mixte formule 1.

BM 2 :béton mixte formule 2.

Tableau 2.23 : Formulation des bétons ordinaires

Les dosages en matériaux	Formulation des bétons ordinaires	
	BO sans adjuvant	BO SP
Le dosage en ciment (kg/m ³)	400	400
Le dosage en eau (kg/m ³)	232	168
Le dosage en SP (%)	0	1
Le rapport E/C	0.58	0.42
Le rapport G/S	1.22	1.22
Dosage en 0/1mm (kg/m ³)	351.9	351.9
Dosage en 0/5mm (kg/m ³)	398.4	398.4
Dosage en 3/8 mm (kg/m ³)	92.69	92.69
Dosage en 8/15mm (kg/m ³)	431.7	431.7
Dosage en 15/25mm (kg/m ³)	441.5	441.5
Densité théorique (kg/m ³)	2348.31	2284.31
Densité fraiche (kg/m ³)	2408	2203

Tableau 2.24 : Formulation des bétons légers

Les dosages en matériaux	Formulation des bétons légers		
	BL SP 1	BL SP 2	BL SP 100%AN
Le dosage en ciment (kg/m ³)	400	400	400
Le dosage en eau (kg/m ³)	242.8	243.76	244.22
Le dosage en SP	0.6	0.6	0.6
Le rapport E/C	0.60	0.60	0.61
Le rapport G/S	1.27	1.22	1.22
Dosage en 0/1mm	-	-	232
Dosage en AC 0/3mm	552	-	-
Dosage en AC 3/8mm	58.4	58.4	-
Dosage en AN 0/3mm	-	-	437.3
Dosage en AN 3/8mm	66.8	-	-
Dosage en 8/15mm	112	156.42	86.9
Dosage en 15/25mm	221.6	189.6	240.6
Densité théorique (kg/m ³)	1642.8	1616.04	1882.1
Densité fraiche (kg/m ³)	1600	1610	1897

Tableau 2.25 : Formulation des bétons mixtes

Dosage en matériaux	Types de bétons mixtes	
	BM SP 1	BM SP 2
Dosage en ciment (kg/m ³)	400	400
Dosage en eau (kg/m ³)	180	211.96
Dosage en SP (%)	0.6	0.6
Le rapport E/C	0.45	0.52
Le rapport G/S	1.22	1.22
Dosage en 0/1mm	222.3	371
Dosage en 0/5mm	-	430.3
Dosage en AN 0/3mm	418.5	-
Dosage en AN 3/8mm	-	45.64
Dosage en AN 8/15mm	-	215.0
Dosage en AN 15/25mm	-	156.5
Dosage en 3/8mm	438.34	-
Dosage en 8/15mm	438.3	-
Dosage en 15/25mm	448.5	-
La densité théorique	2201.89	1618,4
La densité fraiche	2207	1581.8

- Calcul de l'eau totale pour les formulations contenant des granulats légers :

Dans ce cas on prend en compte l'absorption des granulats ainsi que leur teneur en humidité.

$$E_{\text{eff}} = E_t - [(W_{X_i} \cdot m_{X_i}) + -(Abs_{X_i} \cdot m_{X_i})] \quad (\text{Eq2.11})$$

Avec :

E_{eff} : Eau efficace.

E_t : Eau totale.

W_{X_i} : Teneur en humidité des granulats.

Abs_{X_i} : Absorption des granulats.

m_{X_i} : Masse des granulats.

- Gâchée de l'essai NF P 18-404[67]:

La norme NF P 18-404[67] distingue les essais d'étude, ces derniers sont réalisés au laboratoire, ils permettent de vérifier la qualité de l'essai, la maniabilité du béton et sa résistance.

Selon la norme, les constituants sont introduits dans le malaxeur dans l'ordre qui suit : gros granulats, liant, sable et eau de gâchage, les constituants sont d'abord malaxés à sec pendant une minute, puis deux minutes après l'ajout de l'eau.

2.3.1. Confection des éprouvettes AVPN NA 5093[81] :

Après la précédente étape on procède au remplissage des moules conforme à la norme NA 5074[50].

Ces moules ont été préalablement nettoyés et lubrifiés à l'aide d'une huile qui facilitera le démoulage.



Figure 2.21 : Moules cubiques de $15*15*15 \text{ cm}^3$.

- Le mélange doit être prélevé par vidage latéral ou central.
- Le remplissage se fait comme suit :
 - Remplissage des moules à moitié (première couche), ensuite on applique une vibration qui se doit d'être répartie sur les coins et ce l'aide d'une aiguille vibrante (pour les bétons ordinaires) et une tige de piquage (pour les bétons légers en appliquant 25 coups), cette même étape est répétée une seconde fois pour une seconde couche .
 - On lisse la surface des éprouvette à l'aide de truelle ou taloche en acier .
 - suite à cela les éprouvettes doivent être marquées avec des étiquettes.



Figure 2.22: Epreuves étiquetées.

-Les éprouvettes sont ensuite réservées dans une salle de conservation d'une température de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative de 50% pendant 24 h .

-Après 24 h on procède au démoulage des éprouvettes qui ensuite seront entreposées dans des bacs d'eau de température $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ jusqu'au moment de la réalisation de l'essai .



Figure 2.23 : Conservation des moules dans des bacs à eau.

2.3.2.Essai de la masse volumique des bétons à l'état frais :

La masse volumique du béton frais est définie comme la masse d'un mètre cube de béton frais compact (volume des pores inclus), cette prise permet d'obtenir rapidement des indications sur la qualité du béton.

A). Mode opératoire :

Mise en place du béton frais dans une éprouvette cubique de $(15 \times 15 \times 15)$ cm³ de volume et de masse m_1 puis pesé l'ensemble (éprouvette et béton), soit m_2 .

La masse volumique fraiche est déterminée selon la formule suivante :

$$\rho \text{ (à l'état frais) } = (m_2 - m_1) / V \text{ (Eq2.12)}$$

Avec :

m_1 : masse de l'éprouvette cubique $(15 \times 15 \times 15)$ cm³ vide ;

m_2 : masse de l'éprouvette remplie de béton ;

V : volume de l'éprouvette cubique $(15 \times 15 \times 15)$ cm³.



Figure 2.24: Essais de la masse volumique des bétons à l'état frais.

2.3.3. Essai d'affaissement au cône d'Abrams NF P 18-451[52] :

Cet essai permet de constater la consistance et la maniabilité du béton, à l'aide de l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son poids propre .

Cet essai est utilisable tant que la dimension maximale des agrégats ne dépasse pas les 40mm.

A). Matériel utilisé :

- Moule tronconique (H= 30cm , φ_{inf} =20cm , φ_{sup} =10 cm) .

- Plaque d'appuis.
- Tige de piquage.
- Règle / portique de mesure.

B).Conduite de l'essai :

- On humidifie la plaque d'appuis légèrement ainsi que le moule.
- On fixe le moule a la plaque.
- On y introduit alors le béton en trois couches tout en piquant chaque couche de 25 coups.
- On arase l'excédent de béton.
- On soulève enfin le moule avec précaution.
- On mesure l'affaissement a l'aide de la règle graduée.



Figure 2.25 : Etapes de réalisation de l'essai du cône d'Abrams.

2.4. Caractérisation mécanique des bétons à l'état durci :

Six éprouvettes cubique de dimension $(15*15*15)$ cm³ ainsi que trois autre prismatique $(7*7*28)$ cm³ ont été réalisées pour chaque béton et destinées aux essais de caractérisation mécanique du béton, les six éprouvettes vont subir un essai de compression à 7 jours ; 14 jours et 28jours (deux éprouvettes pour chaque échéance), les éprouvettes prismatiques seront soumise également a un essai de flexion à 3 appuis (une éprouvette pour chaque échéance).

2.4.1. La résistance à la compression :

L'essai a pour but de connaitre la résistance à la compression d'une éprouvette en béton et selon les directives de la norme NA 5071[50] l'éprouvette doit être centrée au niveau du plateau inférieure de la presse avec une erreur de 1% de sa longueur, ensuite soumise à une charge jusqu'à rupture [49].

Le dispositif de l'essai est une presse de force de dimension appropriée à l'éprouvette à tester en répondant aux prescriptions des normes NA5076 [47].



Figure 2.26: Dispositif de l'essai de compression des bétons.

-la charge de rupture P est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai soit la section S orthogonale de l'éprouvette la résistance R_c est exprimée en MPa a pour expression :

$$R_c = P/S \text{ (Eq2.13)}$$

Remarque :

La résistance à la compression est réalisée sur deux éprouvettes cubiques afin de déterminer la résistance en compression moyenne.

2.4.2. La résistance à la flexion :

L'essai de flexion 4 points permet également de mesurer la résistance à la rupture du béton , une éprouvette prismatique est placée sur deux appuis et l'on applique au centre une charge croissante (une contrainte) jusqu'à rupture a une vitesse de 4,9KN/min , cet essai se caractérise par la simplicité du montage de l'éprouvette .



Figure 2.27: Dispositif d'essai de flexion.

-Lors du test la partie supérieure est en compression et la partie inférieure en traction.

2.4.3. Coefficient d'absorption d'eau par capillarité du béton durci suivant les directives de la norme NF EN 1015-18[48] :

Le coefficient d'absorption d'eau par capillarité est mesuré sur des éprouvettes de béton prismatiques ($7*7*28$) cm^3 , confectionnées conformément à l'EN 1053-3 conservées dans une chambre d'humidité (HR50%) pendant 28 jours.

L'essai consiste à mesurer l'augmentation en masse d'une éprouvette de béton (après l'avoir séchée dans une étuve ventilée), due à l'absorption après une immersion partielle dans un bac d'eau de sorte que l'eau ne touche l'éprouvette que dans l'épaisseur de 10mm, la face inférieure de l'éprouvette est posée sur des supports et les faces latérales sont imperméabilisées par une résine époxydique, afin d'avoir une seule surface en contact avec l'eau et d'assurer une absorption unidirectionnelle à travers la face inférieure qui touche l'eau.



Figure 2.29 : Dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire.

L'augmentation en masse de l'éprouvette est mesurée après 10 min et 90min de l'immersion, pour chaque temps de mesure, l'éprouvette est tirée du bac d'eau essuyée à l'aide d'un tissu absorbant et pesée, puis la retournée au récipient.

Le coefficient est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$C = 0,1 * (M_2 - M_1) \text{ [kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}] \text{ (Eq2.14)}$$

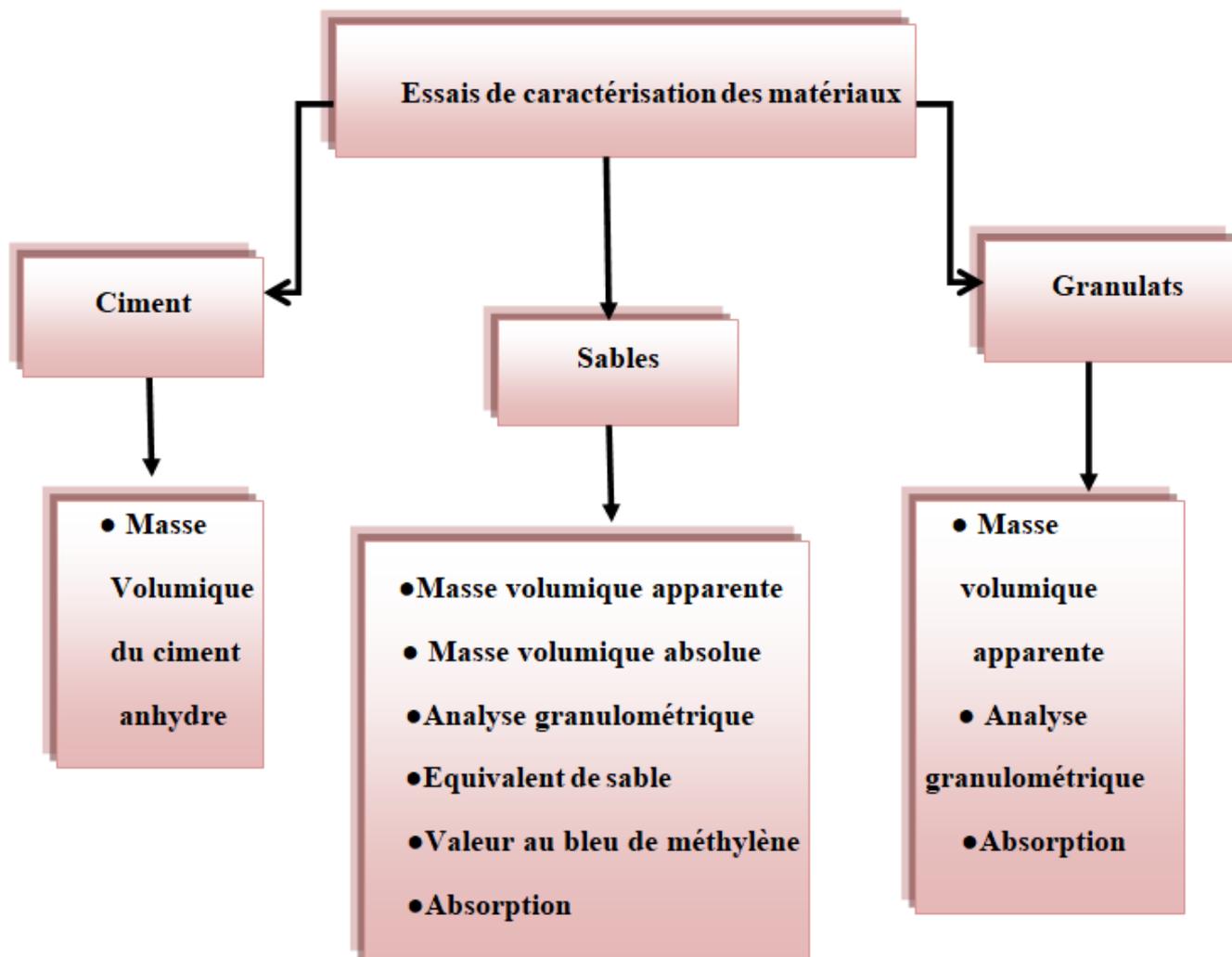
C : coefficient d'absorption près de $0,1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$.

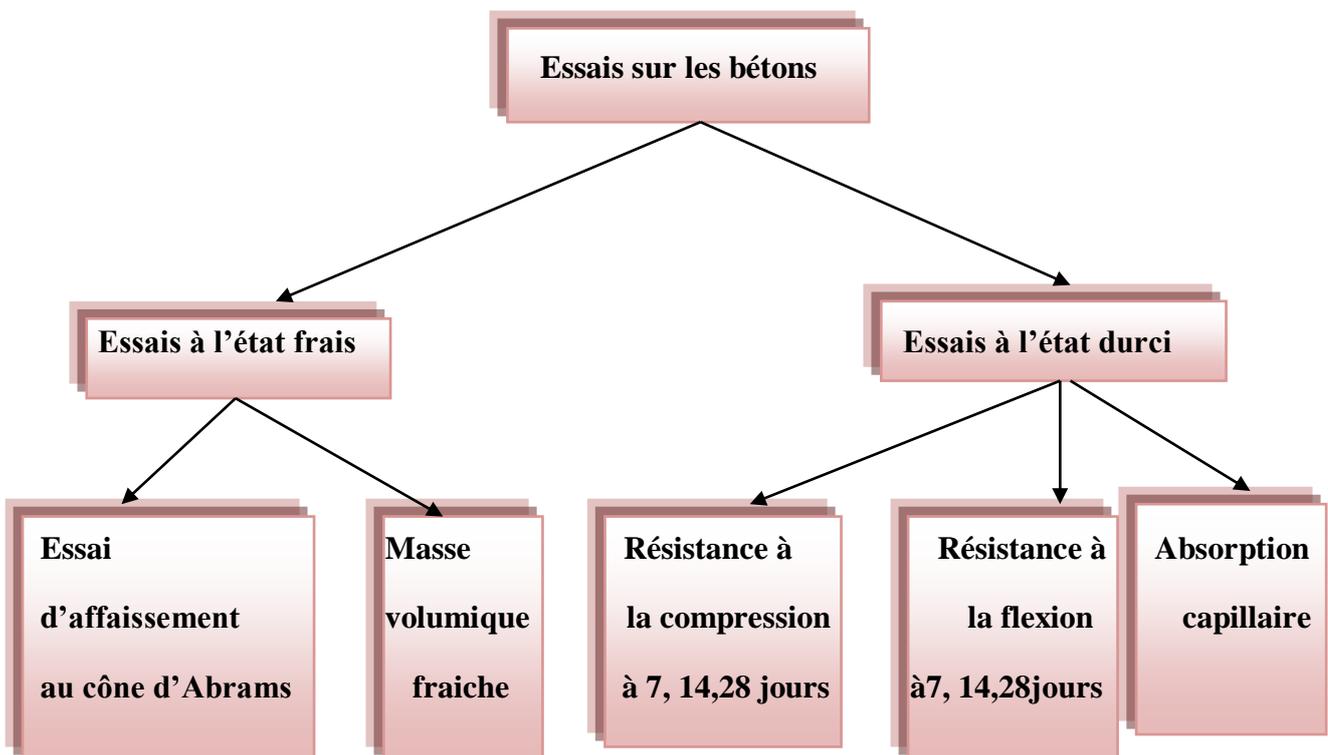
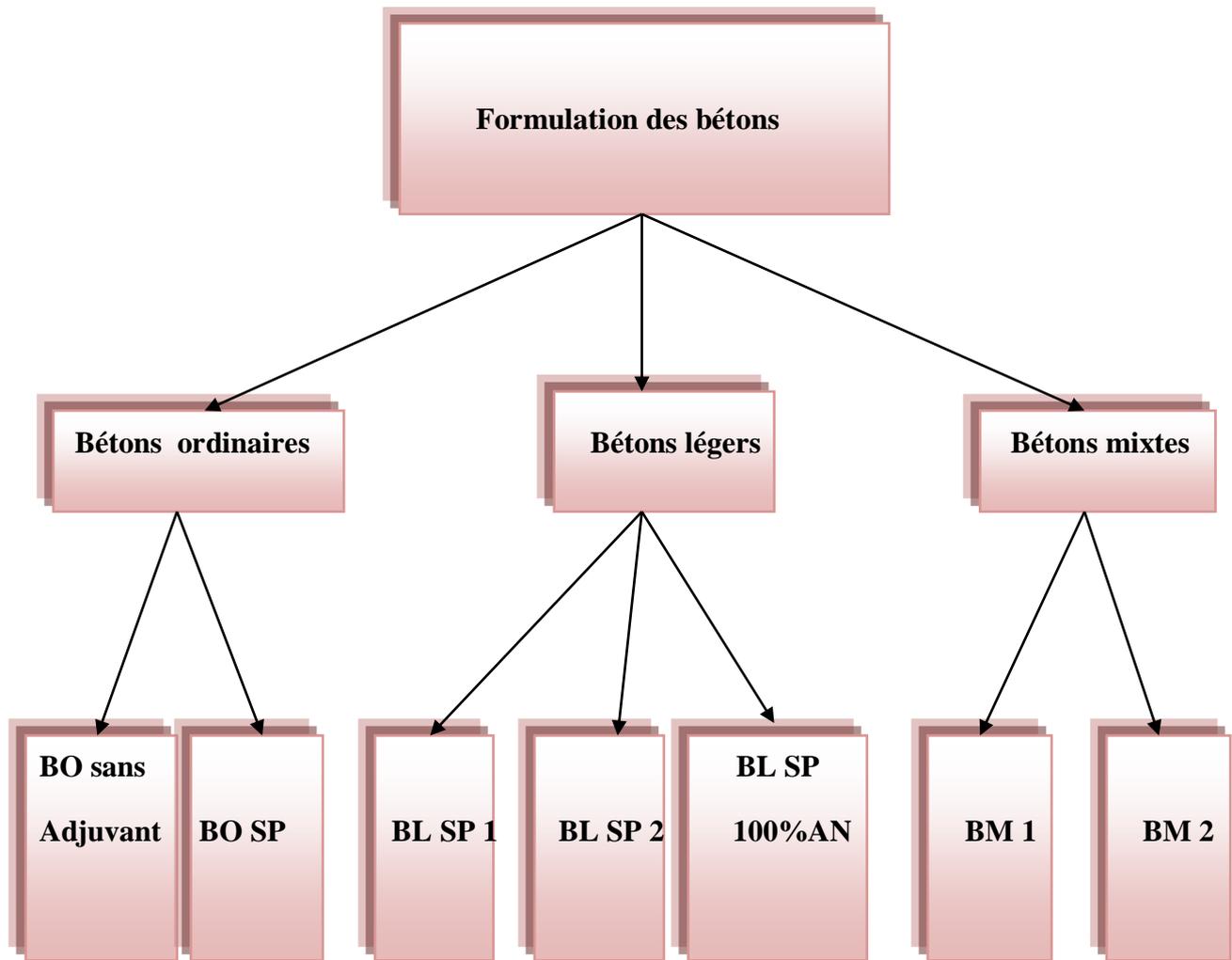
M_1 : la masse de l'éprouvette après une immersion de 10 min.

M_2 : la masse de l'éprouvette après une immersion de 90 min.

Récapitulatif du programme des essais :

Notre étude expérimentale était dédiée à la réalisation d'essais de caractérisation des matériaux utilisés, afin de pouvoir réaliser les différentes formulations des bétons et réaliser les essais à l'état frais et durci ; l'organigramme ci-après synthétise notre programme expérimental :





CHAPITRE III : INTERPRETATION DES RESULTATS.

3.1.Introduction :

Ce chapitre est consacré à l'étude des résultats obtenus dans le cadre des essais expérimentales réalisés sur les bétons formulés, et ce en exposant les propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des bétons (Bétons légers, Bétons ordinaires et Bétons mixtes) à l'âge de 7, 14 et 28 jours.

En fin une comparaison des résultats est établie entre ces différents bétons.

3.2.Essais sur les bétons à l'état frais :

3.2.1.Essai de l'affaissement au cône d'Abrams :

Cet essai nous a donné les résultats prescrits dans le tableau ci-dessous ; contrairement aux idées reçues dans les recherches bibliographiques, l'essai d'affaissement au cône d'Abrams détermine l'ouvrabilité des bétons légers tout comme les bétons ordinaires.

Vernould [17] ; approuve que l'essai d'affaissement au cône d'Abrams n'est pas significatif lorsqu'il s'agit de bétons légers , et ce à cause de la légèreté des granulats légers qui n'ont pas la même gravitation que les granulats ordinaires .

Et il est préférable d'utiliser un maniabilimetre pour déterminer l'ouvrabilité des bétons légers , cette dernière est déterminée suite à la vitesse d'écoulement du béton léger , plus la vitesse est courte plus le béton est fluide [17].

Notons que l'affaissement souhaité était de 22 cm.

Tableau3.1: Mesures d'affaissement des différents types de bétons

Type du béton	Affaissement (cm)
BO 1	21.5
BO SP 2	21
BL SP 1	22
BL SP 2	21.5
BL SP 3	22
BM SP 1	21.5
BM SP 2	21

3.2.2.Masse volumique fraiche des bétons :

La masse volumique des bétons est directement liée à la masse volumique de leurs constituants, les résultats de l'essai sont démontrés sur le tableau ci-dessous.

On remarque que les bétons contenant des matériaux dense ont une masse volumique supérieure à 2000 kg/m^3 et celle des bétons légers varie de 1600 à 1897 kg/m^3 ce qui est inférieur à 2000 kg/m^3 , ce qui s'accorde avec les recherches antérieurs.

Les bétons légers contenant des granulats concassés sont de masse volumique inférieure à celle des bétons légers contenant des granulats légers nodulaires ceci est due à la légèreté des granulats concassés par rapport aux granulats nodulaires.

C'est de là qu'on déduit que les caractéristiques des granulats utilisés sont conférés aux bétons.

Tableau 3.2 : Masses volumiques fraîches des bétons

Type du béton	Masse volumique fraîche kg/m^3
BO	2408
BO SP	2203
BL SP 1	1600
BL SP 2	1610
BL SP 100% AN	1897
BM 1	2207
BM 2	1781

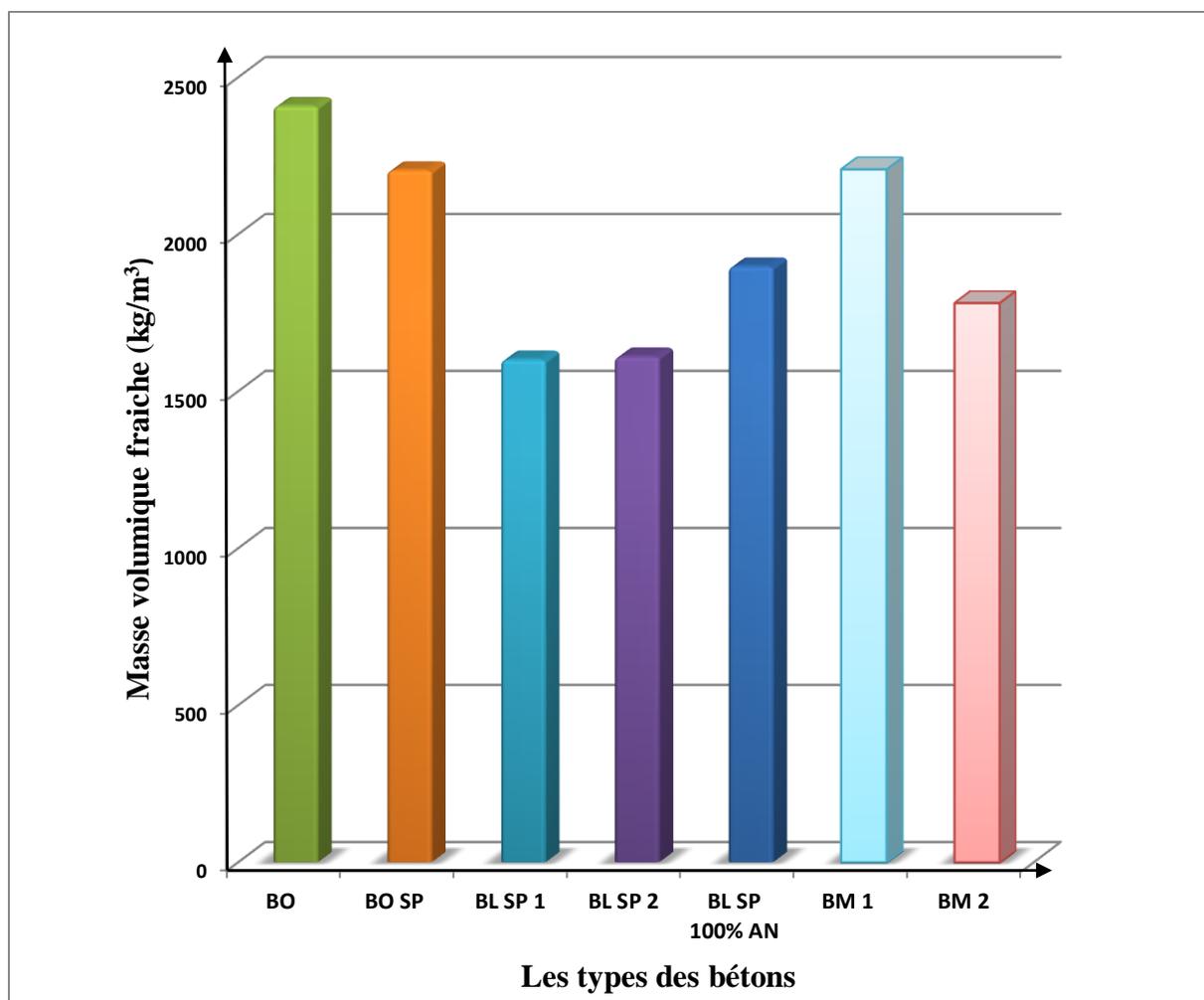


Figure 3.1 : Masses volumiques fraîches des bétons.

3.3.Essais sur les bétons à l'état durci :

3.3.1.Résistance à la compression :

L'une des propriétés les plus importantes pour un béton est sa résistance à la compression ; c'est ce qui nous donne une idée sur la qualité du béton confectionner.

Les résultats d'écrasement des bétons à 7 ,14 et 28 jours sont montrés ci-dessous dans un tableau puis traduits en graphes.

L'utilisation d'un super-plastifiant nous a permis de réduire le rapport E/C du béton ordinaire , car nous sommes passer d'un rapport $E/C = 0.58$ pour le BO à un rapport $E/C = 0.42$ pour le BO SP , cette réduction s'est traduite par un accroissement de la résistance du BO SP par rapport au BO sans adjuvants .

L'utilisation d'un SP nous a permis d'atteindre la résistance souhaitée à 14 jours et même de la dépasser.

Quant aux bétons légers aucun d'entre eux n'a atteint la résistance souhaitée , toutes fois le BL 100% AN a présenté de meilleurs résultats comparé aux BL SP 1 et BL SP 2 ; et ce grâce à sa composition , car celui-ci est composé de granulats d'argile expansée de type nodulaire de toutes les fractions , ces granulats sont plus résistants comparé aux granulats concassés , grâce à leur enveloppe rigide (écorce) mais aussi grâce à la présence d'un sable correcteur dans le BL SP 100% AN qui fait que son taux de fines est plus important que celui des BL SP 1 et BL SP 2 .

Etant donnée que la résistance maximale des bétons légers atteinte est de 25MPa ceci ne répond pas à la résistance souhaité tous de même cette résistance est suffisante pour dire que nous avons obtenus un béton de structure car d'après l'association brésilienne des normes la résistance minimale pour un béton de structure est de 20MPa [20].

En ce qui concerne les bétons mixtes ; on note que le BM 1 qui contient de type AN + sable correcteur et des granulats dense, présente une résistance atteignant les 44.83 MPa à 28 jours et ce grâce aux caractéristiques des matériaux utilisés qui lui ont été conférés.

Par contre, le BM 2 qui est à base de granulats légers de type AN et de sables ordinaires, donne des résultats moins bons et qui n'atteignent même pas la résistance souhaitée.

La résistance à la compression des bétons contenant des éléments denses est nettement supérieure à celle des bétons légers.

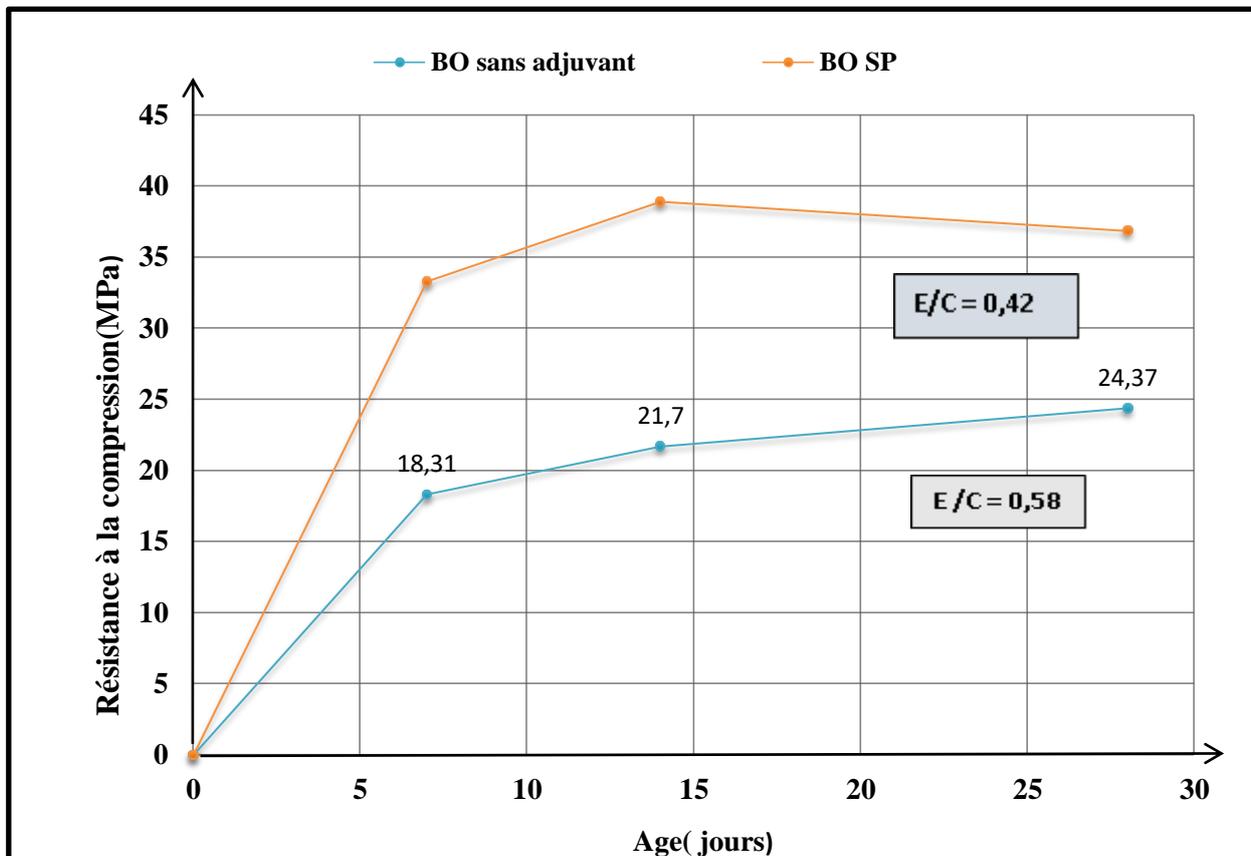


Figure 3.2 : Effet de super-plastifiant sur la résistance des bétons.

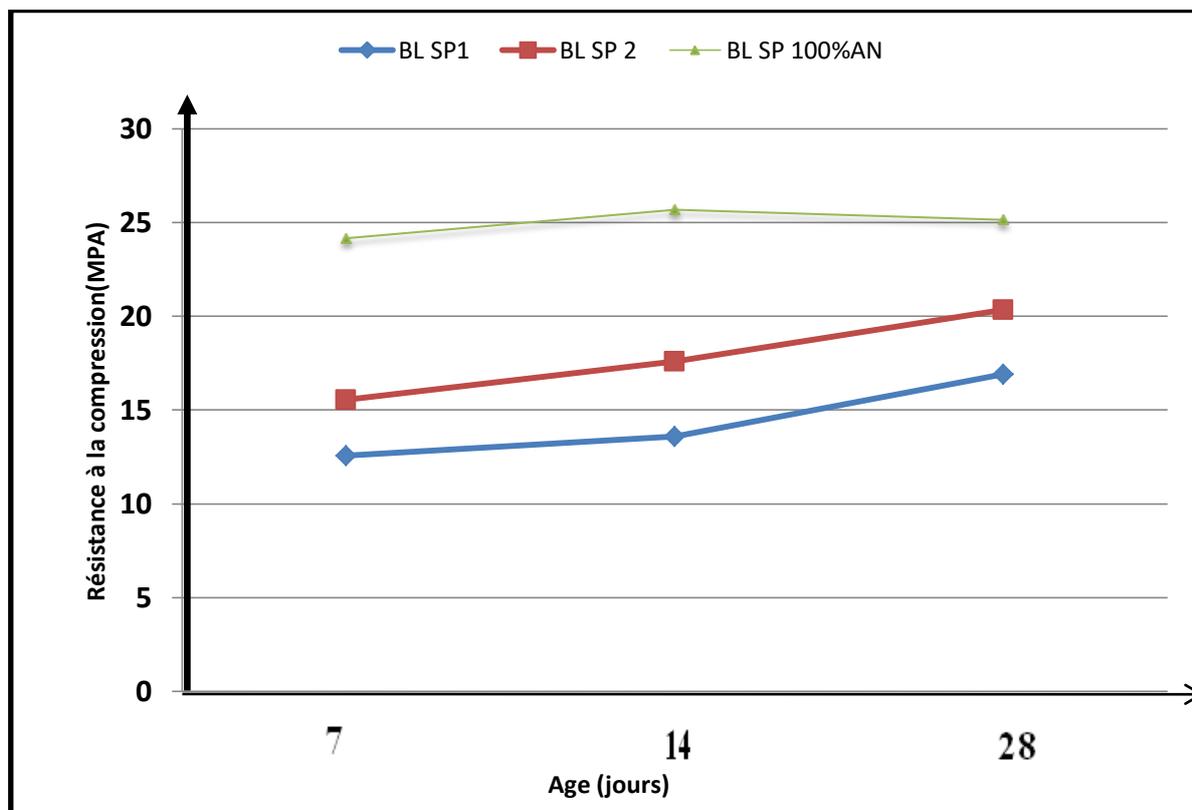


Figure 3.3 : La résistance à la compression des bétons à base de granulat 100% légers.

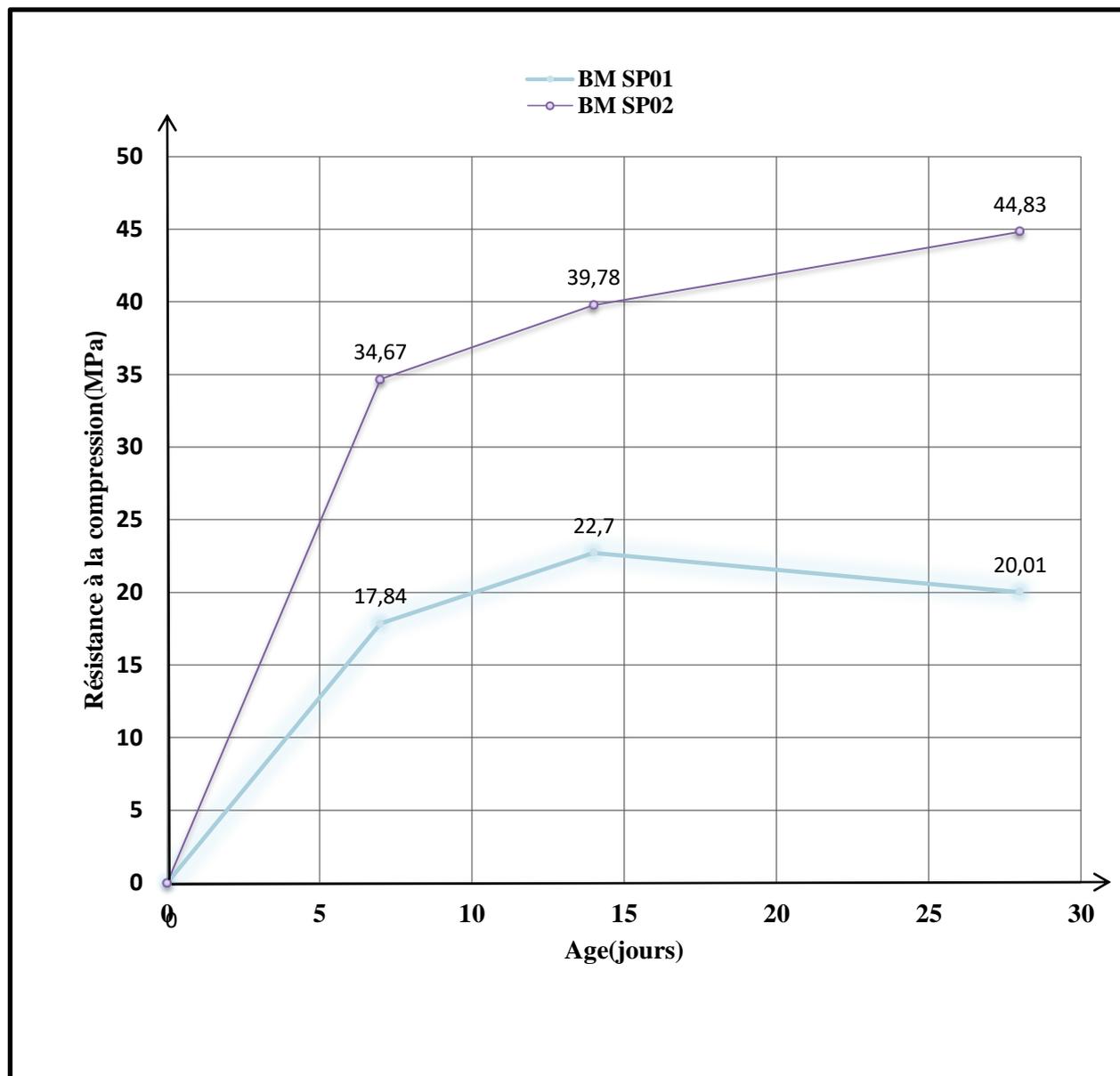


Figure 3.4 :La résistance à la compression des bétons mixtes formulés.

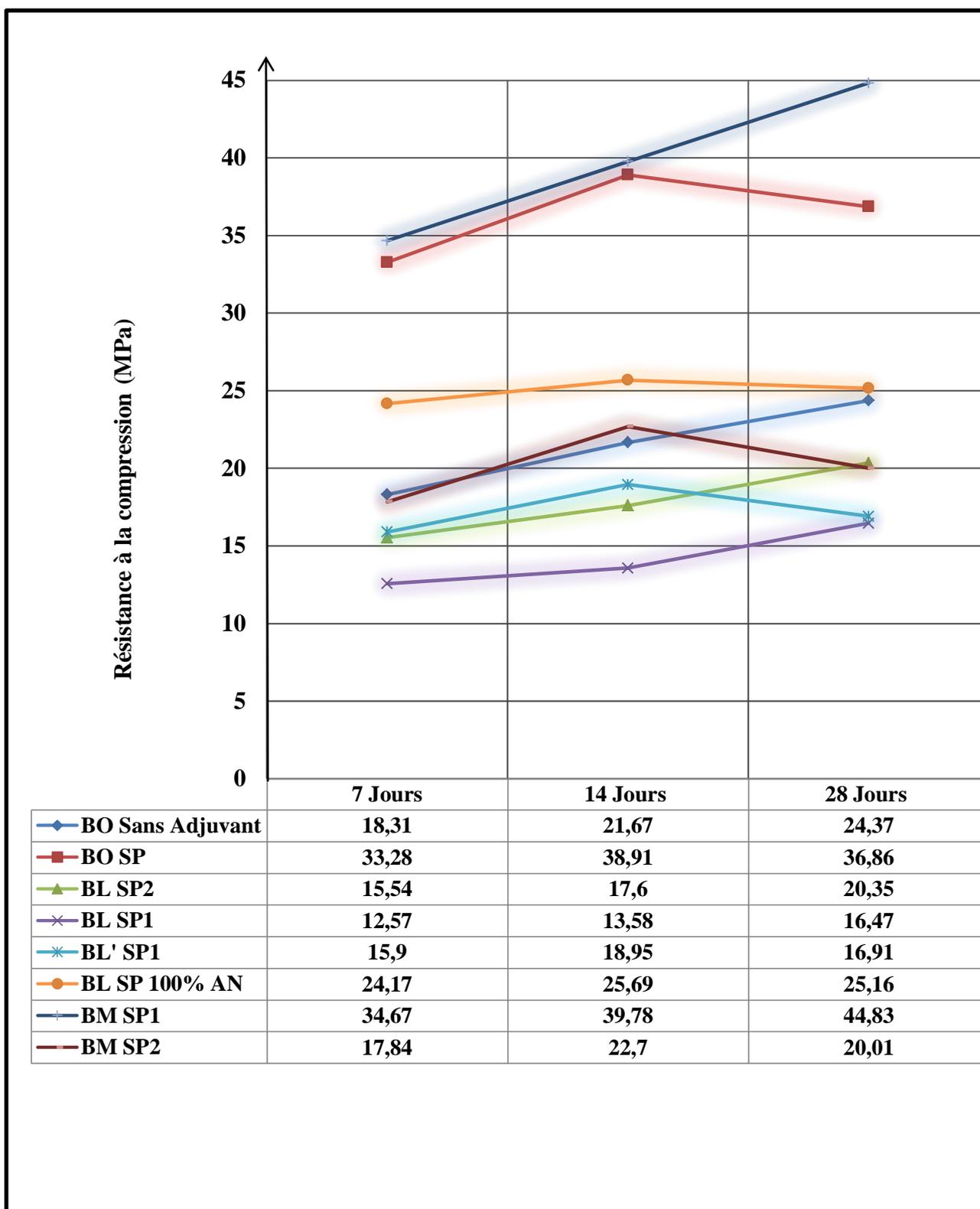


Figure 3.5: La résistance des différents types de bétons utilisés.

3.3.2.Corrélation :

3.3.2.a.Relation entre la masse volumique fraiche et la résistance des bétons :

Le coefficient de corrélation entre la masse volumique fraiche des bétons et leur résistance à la compression à 28 jours est de l'ordre 0.89, puisque ce dernier se rapproche de 1, on déduit que la relation linéaire entre la masse volumique fraiche et la résistance à la compression des bétons est positive et forte, c'est-à-dire que plus la masse volumique fraiche est élevée plus le béton présente une résistance élevée.

3.3.2.b.Relation entre la masse volumique sèche et la résistance des bétons :

Le coefficient de corrélation entre la masse volumique sèche des bétons et leur masse volumique est égale à 0.53 ce qui se traduit par une relation linéaire positive modérée entre ces deux paramètres.

3.3.2.c.Relation entre l'absorption capillaire des bétons et leur résistance :

Le coefficient de corrélation entre l'absorption capillaire et la résistance en compression des bétons (BL SP1, BL SP2, BL SP 100%AN et BO) est égale à 0.92, ce qui nous mène à déduire qu'il y'a une forte relation entre ces deux paramètres , alors que le béton à une faible absorption cela veut dire qu'il a une compacité élevée et de ce fait le béton est de forte résistance.

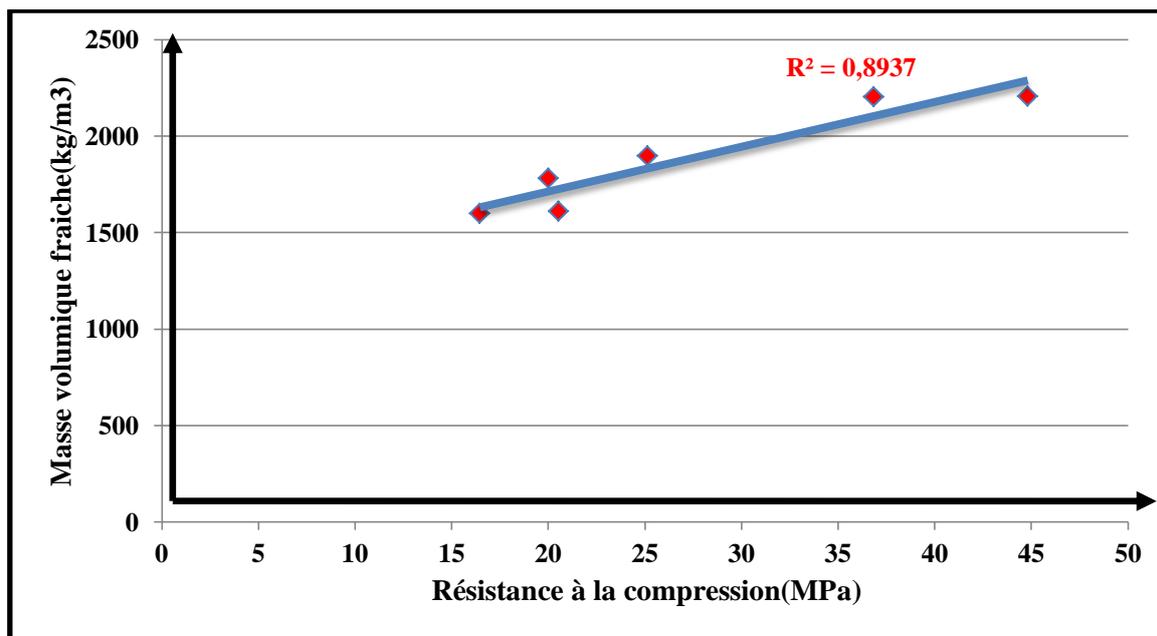


Figure 3.6 :Relation linéaire entre la masse volumique fraiche et la résistance des bétons.

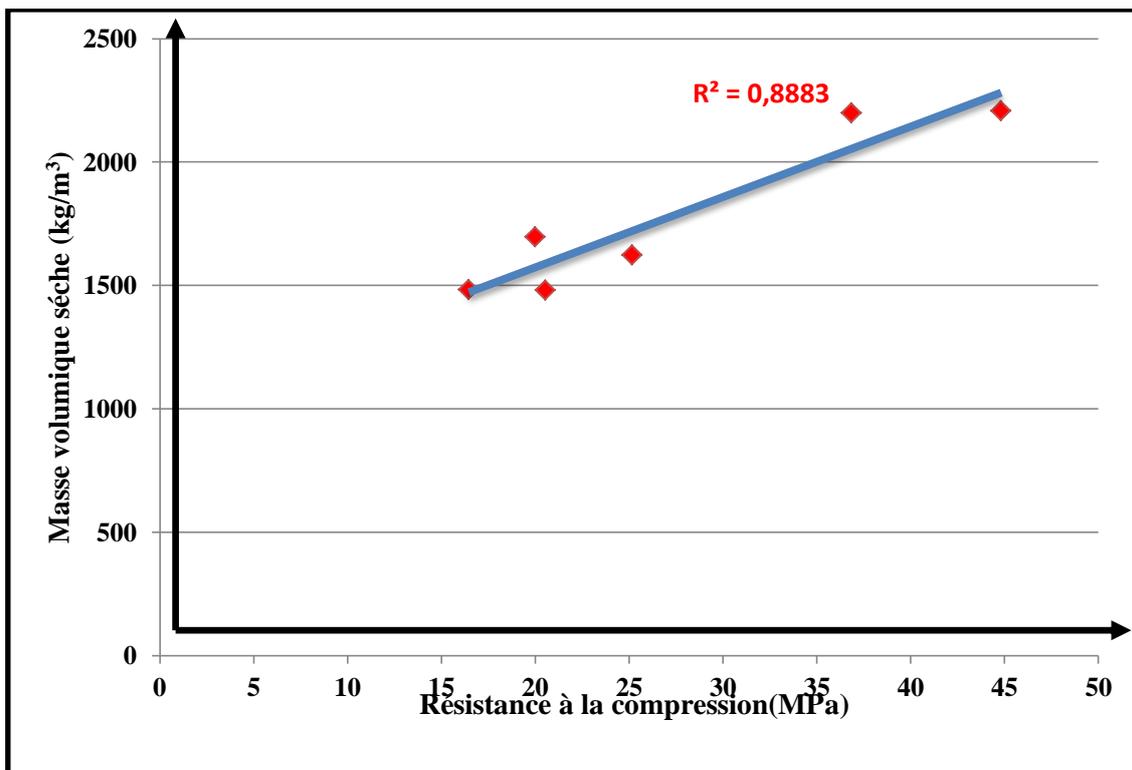


Figure 3.7 : Relation entre la masse volumique sèche et la résistance des bétons.

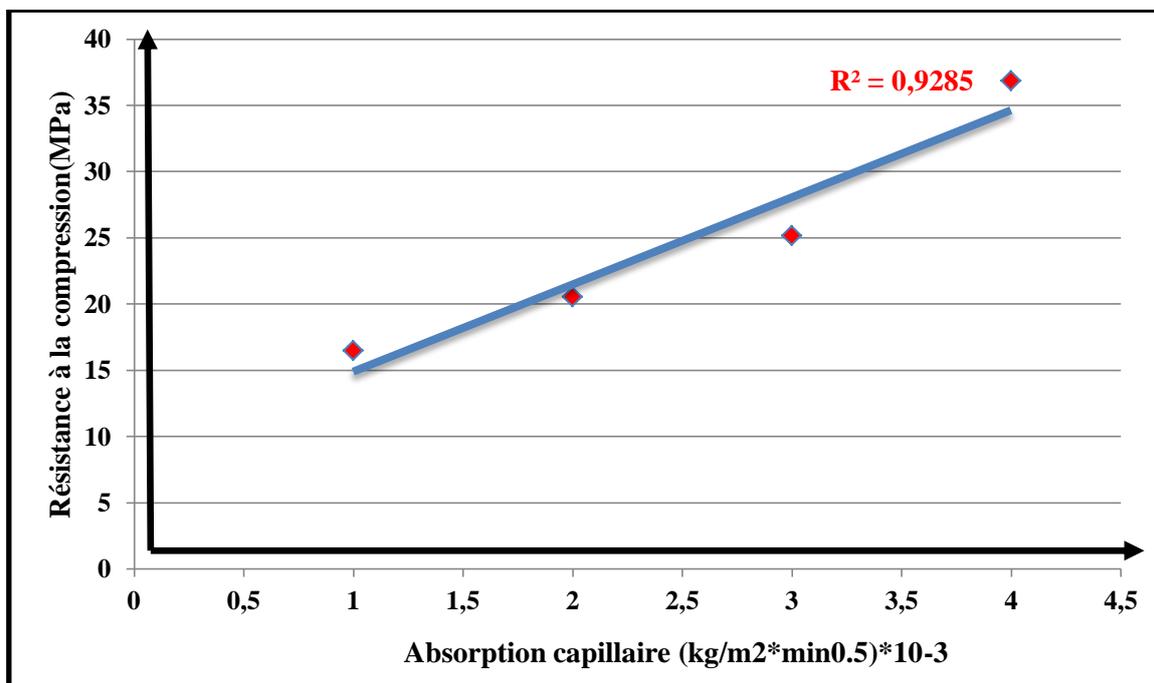


Figure 3.8 : Relation entre l'absorption capillaire et la résistance des bétons .

3.3.3. Résistance à la flexion des bétons :

La mesure de la résistance à la flexion des bétons a été prise aux échéances de 7 , 14 et 28 jours ; les résultats obtenus sont marqués sur le tableau ci-dessous .

On observe d'après les résultats que les bétons contenant des matériaux denses donnent de meilleures résistances à la flexion comparant aux bétons contenant des matériaux légers .

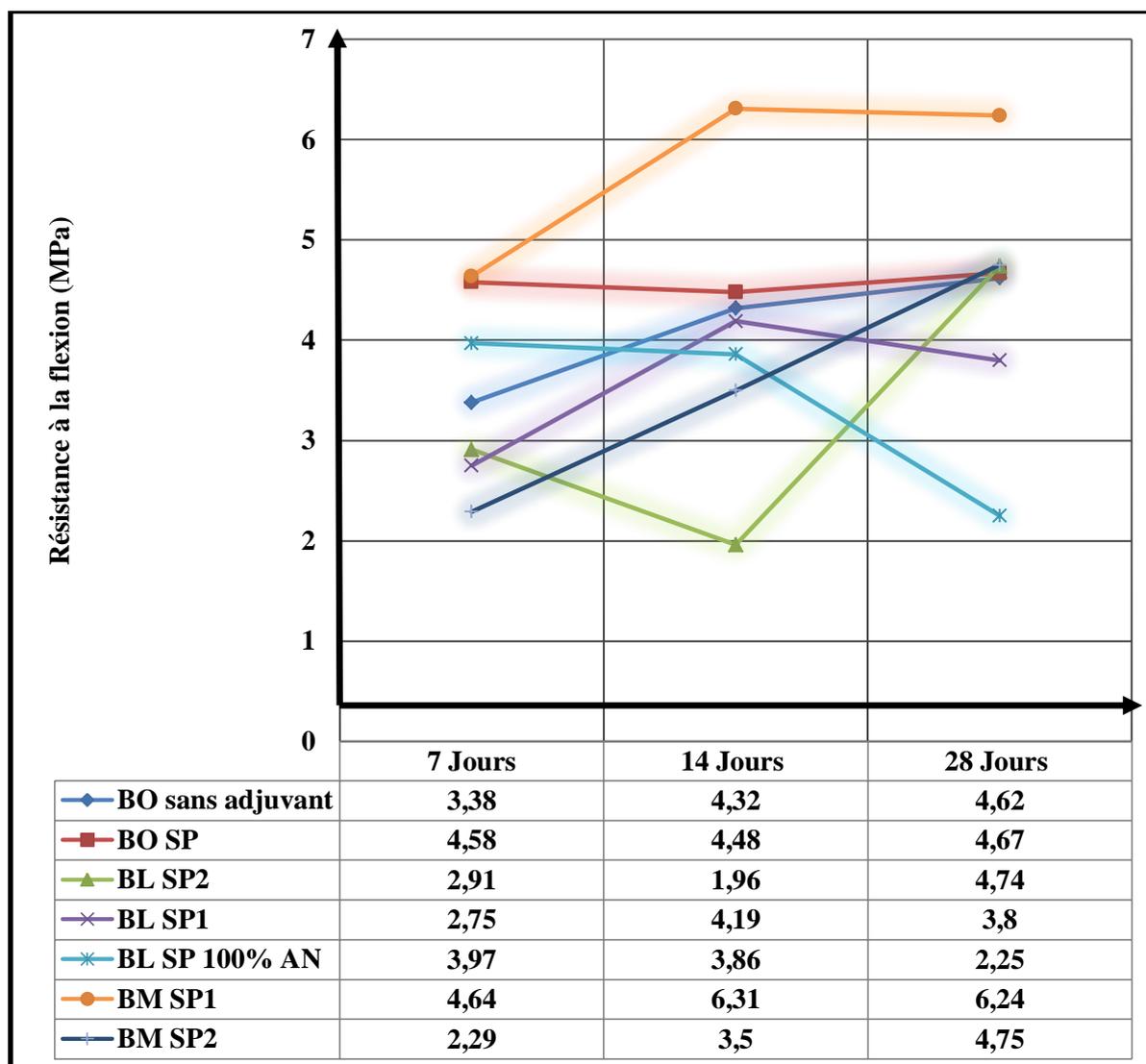


Figure 3.9 : Résistance à la flexion des différents types de bétons formulés.

3.3.4. Absorption capillaire :

Cet essai nous a permis d'évaluer la quantité d'eau absorbée par les bétons pendant 90 min c'est-à-dire l'absorption des gros pores .

Les résultats obtenus nous ont permis de réaliser le tableau ci-dessous ainsi que le diagramme.

D'après les résultats obtenus il est clair que l'absorption des bétons ordinaires est supérieure à celle des bétons légers, ceci pourrait être expliqué par le fait que la présence des pores dans les granulats légers permet une meilleure adhérence à la matrice cimentaire ce qui limite le réseau de gros pores contrairement aux bétons ordinaires ce qui répond aux attentes des recherches antérieures [17].

D'après les recherches effectuées les granulats légers ayant un pourcentage d'absorption qui varie de 5 à 15 % sont les plus adéquats pour la fabrication des bétons légers de structure, cette absorption des granulats est due à la présence de pores à leur surface qui sont saturés en eau ce qui entraîne une meilleure hydratation du ciment et facilite leur adhérence à la matrice cimentaire[5]; les granulats légers d'argile expansée utilisés pour la confection de nos bétons répondent à ce critère car l'absorption la plus élevée est de 14,2%.

Tableau3.3: absorption capillaire des bétons

Type de béton	Le coefficient d'absorption [$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$]
BL SP 01	$0,8 \cdot 10^{-3}$
BL SP 02	$9 \cdot 10^{-3}$
BL SP 100% AN	$4 \cdot 10^{-3}$
BO SP	$15 \cdot 10^{-3}$

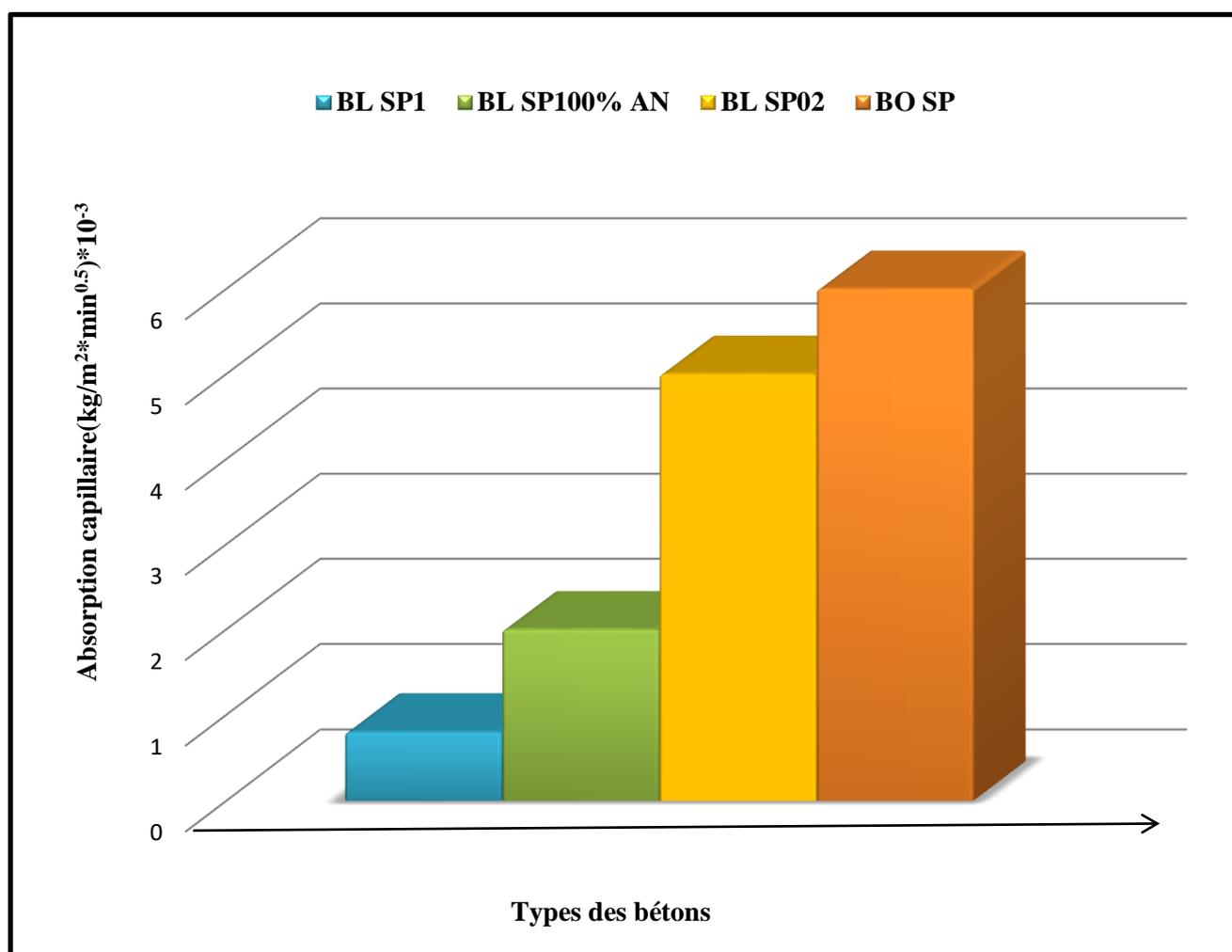


Figure 3.10 : Absorption capillaire des différents types des bétons formulés.

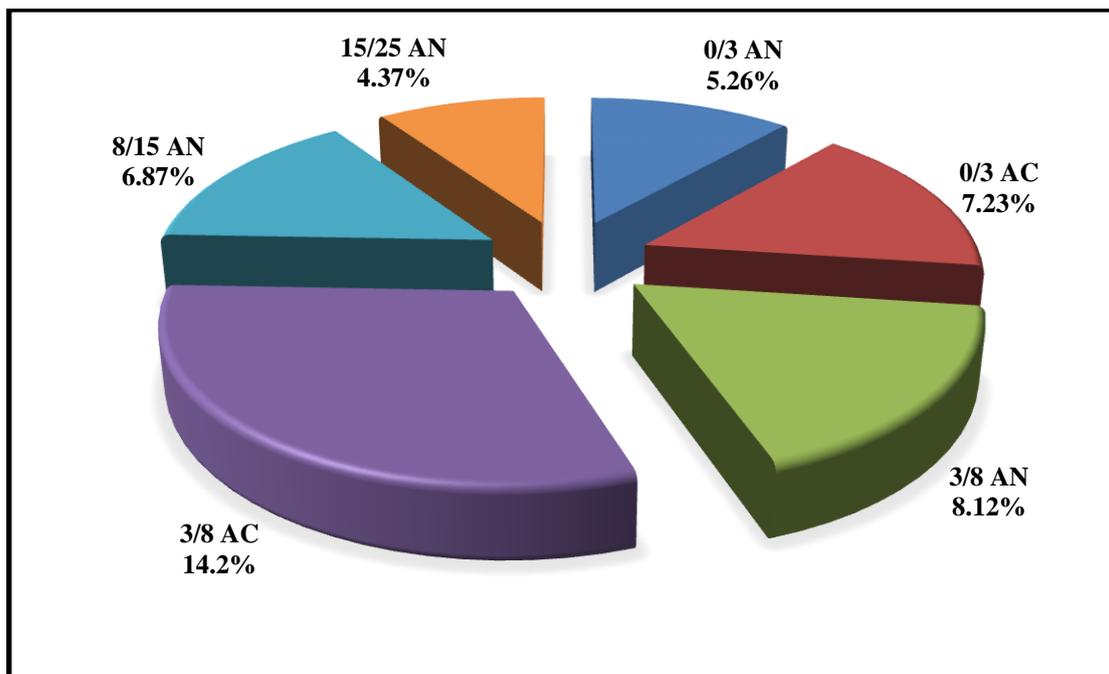


Figure 3.11 : Le taux d'absorption des granulats légers.

3.3.5. Description Macroscopique :

Après l'obtention d'une coupe transversale des deux types de bétons ; ordinaire et léger , on remarque une bonne distribution des granulats sur toute la section du béton que ce soit pour les granulats ordinaires ou légers .

On remarque aussi la présence de vides bien distribués au sein des granulats légers ce qui leur donne leur légèreté .

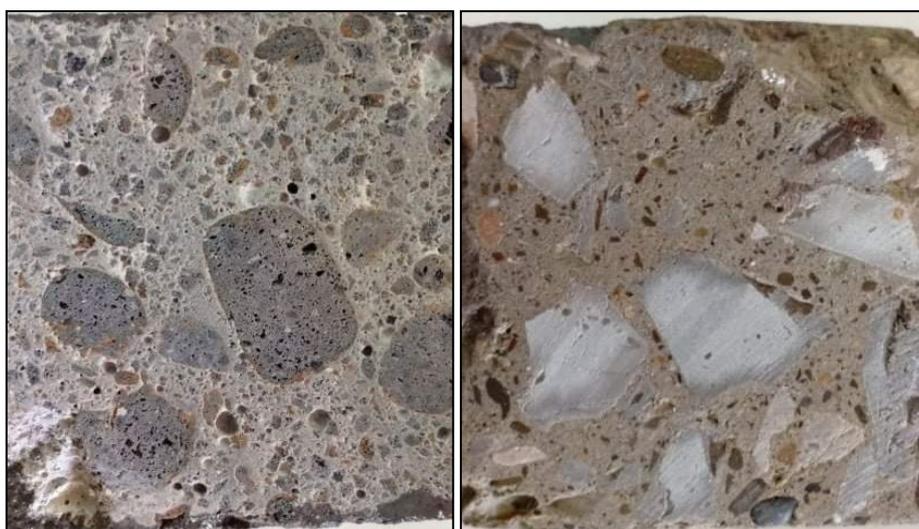


Figure 3.12 : coupe transversale, bétons légers (à gauche), béton ordinaire(à droite).

Conclusion :

Cette étude a permis de comparer entre les propriétés des bétons légers à base de granulats d'argile expansée et les bétons ordinaires ; en procédant par la réalisation d'une série d'essais physiques et mécaniques ainsi de durabilité, à partir des résultats obtenus on conclut :

- L'utilisation des granulats légers dans le béton entraîne une diminution de la masse volumique de ce dernier, tant à l'état frais que durci, cette diminution varie selon la composition du béton léger.
- La résistance à la compression à 28 jours pour le béton témoin BO SP est nettement supérieure à tout le béton légers réalisés ($R_{C28} \text{ BO SP} = 36.86 \text{ MPa}$).
- La résistance à la compression maximale pour les bétons légers à 28 jours n'atteint pas la résistance souhaitée ($R_c \text{ BL SP}_{28\text{max}} = 25.16 \text{ MPa}$).
- Quant à la résistance à la flexion des bétons légers, celle-ci aussi est inférieure à celle des bétons ordinaires et ce contenu de la résistance des matériaux utilisés.
- La résistance des bétons dépend de leur masse volumique, celle-ci aussi dépend de la masse volumique des matériaux utilisés, c'est-à-dire que plus les matériaux sont de faible densité, plus le béton l'est aussi.
- En ce qui concerne l'absorption capillaire des bétons, celle-ci dépend de la distribution des pores dans le béton et de leur disponibilité, si ces pores sont occupés par la matrice cimentaire cela donnera un béton à faible absorption capillaire.
- Il est à noter aussi que l'utilisation d'un SP ou autre adjuvant adéquat est indispensable lors des formulations des bétons si on veut obtenir de bons résultats.

Conclusion générale :

Les bétons légers entraînent d'énormes bénéfices dans le domaine de la construction car ils permettent de réduire les charges des structures et de là vient la possibilité de construire sur des sols à faible capacité portante, en plus de leur légèreté ces bétons présentent des points forts en terme d'isolation thermique et acoustique.

Cette étude a permis d'étudier la particularité des bétons à base de granulats d'argile expansée par rapport au béton conventionnel ; ainsi de présenter le matériau de granulats d'argile expansée et ses caractéristiques au marché Algériens pour rendre son utilisation plus populaire.

Une approche bibliographique a été menée et il en a résulté que les bétons légers sont directement influencés par les caractéristiques des matériaux utilisés à savoir masse volumique, pourcentage en fines, dosage en ciment... ainsi la densité de tous les bétons légers confondus varient de 400 à 1800 kg/m³.

La formulation des différents bétons ont donné lieu aux constatations et conclusions suivantes :

- La masse volumique des bétons conventionnels formulés est supérieure de 2000kg/m³ quant à la masse volumique des bétons légers celle-ci varie de 1600 à 1800kg/m³.
- Pour les bétons légers la masse volumique est inversement proportionnelle au taux de vides des granulats légers introduits dans la formulation.
- La résistance des bétons légers formulés dépend de la masse volumique ainsi que de la rigidité des granulats utilisés ; la résistance en compression à 28 jours maximale obtenue pour les bétons légers est de 25 MPa ce qui fait que ces bétons peuvent être utilisés à titre structural.
- Comparer aux bétons de matériaux légers les bétons ordinaires présentent une meilleure résistance à 28 jours.
- Comparer aux bétons ordinaires les bétons légers présentent une faible absorption capillaire, et ce grâce aux pores présents dans les granulats légers qui une fois saturés en eau permettent une meilleure hydratation de la pâte de ciment mais aussi une meilleure adhérence pâte-ciment ce qui réduit les réseaux des gros pores dans le béton et entraîne une meilleure durabilité car l'absence de gros pores favorise l'infiltration d'agents agressifs.
- L'utilisation de super-plastifiant ou autres adjuvants adéquat est indispensable pour obtenir un béton fluide et qui présente un béton fluide et de bonne qualité.

Références bibliographiques

- [1] Rilem, E,Iso, R.& Rilem, P,Recommandation de la Rilem . (1983).
- [2] I. Djakam. Elaboration d'un béton léger à partir des matériaux locaux, mémoire de master, Université de M'sila,(2016).
- [3] L, Zegichi,Les bétons légers,cours,(2020).
- [4] Madani Bederina,Caractérisation mécanique et physique des bétons de sables à base de déchets de bois, Thèse de doctorat en Génie Civil, de l'université de Laghouat, (25 Avril 2007).
- [5] ACI213R-87.Guide for structural lightweight aggregate concrete, ACI manual of concrete practice,(Detroit, michigan1994).
- [6] R. Ghemali.Y Khalfaoui,Elaboration d'un béton cellulaire bio-sourcier à base des déchets industriels, mémoire de master, Université de Bordj Bou Arreridj, (06 juillet 2019).
- [7] SHINK, M.Compatibilité élastique, comportement mécanique et optimisation des bétons de granulats légers, Thèse présentée à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval, Québec (2003).
- [8] J. Cox, A. Ingelaere, J. Sizaire, P. Meulders, E V. Overmeire, Le béton cellulaire matériau d'avenir, Belgique, fédération Belge du béton cellulaire (Febecel).
- [9] Untec, Mémento technico-économique du béton cellulaire, syndicat national des fabricants de béton cellulaire(2012).
- [10] I. SATTI, Etude d'un procédé d'élaboration d'un béton léger cellulaire à base de sable de dune de la région de GHARDAIA, mémoire de master, Université KASDI MERBAH – OUARGLA(2014).
- [11] G.C.Hoff, Porosity-strength considérations for cellular concrete,cement and concrete research (Jan1972).
- [12] British, Cement association, fearned concrete composition and propreties ,(Slought, UK, 1991).
- [13] R.H.McIntosh ,J.D.Botton , C.H.D Muir,No fines concrete as structural material.

- [14] K.M.Brook, No-fines concrete,16,No 8-app,27-8(London,1982).
- [15] Building Research Etablissement , Autoclaved aeratedconcrete,.(Watrford,England1989).
- [16] S. Bouaziz,Caractérisation et modélisation des paramètres physico-hygro-mécaniques d'un béton léger à base de granulats composites, thèse de doctorat, Université de Tizi-Ouzou, (2014).
- [17] Arnould, M and VIRLOGUEUX,*Granulats et Bétons Légers*, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (1986).
- [18] P.PARAMASIVRAM.and Y.O.study of sawdust concrete.
- [19] F.D.Lydon , concrete mix design , 2nd Edn (applied science publishers, London,1982.
- [20] Mechanical evaluation of concrete containing lightweight aggregates.
- [21] WILSON, H.S. and MALHOTRA, V.M. "Development of High Strength Lightweight Concrete for Structural Applications", The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, (1988).
- [22] ZHANG, M.-H. and GJØRV, O.E. "Mechanical Properties and High-Strength Lightweight Concrete", ACI Materials Journal,(1991).
- [23] M.Jamal Shannag , Saleh Aldghaither , Abdelhamid Cherif, Flexural Response of Containing, Natural Lightweight Aggregates.
- [24] Wu , CH ; Kan ; YC Huang ; CH , yen and chess , LH ; flexural behavior and size effect of full scale reinforced Lightweight concrete beam ; journal of anarin science and technology .
- [25] ZHANG, M.-H. and GJØRV, O."Characteristics of Lightweight Aggregates for High-Strength Concrete", ACI Materials Journal, (1991).
- [26] T.A .HOLM,lightweight concrete and aggregates , in significance of tests and propeties of concrete and concrete –making materials ,Eds P .Klieger and J.Lamond,Philadelphia,pa,(1994).
- [27] S.D.VENECANIN,thermal incopatibility of concrete composants and thermal propeties of carbonate rocks ,ACIMaterials,(1990).

- [28] L.Krisrensen and T.C.HANSEN ,cracks in concrete core due to fire or thermal heating shock,ACIMaterials journal,(1994).
- [29] S.L.METERS,thermal coefficient of expansion of portland cement –long time tests , industrial and enineering chemistry,(Eston.pa1940).
- [30] N.DAVEY,concrete mixes for various building purposes, proc .of a symposium on mix design and quality control of concrete , (cement and concrete Assoc ,London,1954).
- [31] T.A .HOLM,lightweight concrete and aggregates , in significance of tests and propreties of concrete and concrete –making materials (2004).
- [32] C.C.CARLSON , lightweight aggregates masonry units.J.Amer.cocncr.
- [33] G.Dreux,J.Festa,nouveau guide du béton et ses constituants,Ed8,(2007).
- [34] NEVILLE, A. M. Propriétés des bétons, Eyrolles,(1998).
- [35] WHITING, D. "Durability of High-strength concrete", conf: Concrete durability, (1987).
- [36] A.Madevic, J.S. S uput , V.Ducman , A.S. S kapin ,Alkali-silica reactivity of some frequently used lightxeight aggregates,Solvian National Building and Civil Engineering Institute , Dimic eva 12,1000 Ljubljana,Slovenia, received 18 march ; accepted 14 January (2004).
- [37] HENKENSIEFKEN, R., NANTUNG, T., BENTZ, D.P. and WEISS, J. "Volume change and cracking in internally cured mixtures made with saturated lightweight aggregate under sealed and unsealed conditions", Cement and Concrete Research , (2008).
- [38] Normes SN EN 206,2013(2e édition) et SIA 262:2013.
- [39] E .Murray Holladay Rd, Chapter 9 ; High Performance Lightweight concrete ; Expanded Shale .
- [40] Priyadharshini ; P.G ; Santhi ; A.S , a review on artificial aggregates . International journal of earth science and engineering (2012)
- [41] http://materiauxdeconstructiondapresguerre.be/materiel/beton-leger/?fbclid=IwAR3rz0EdtUrrahnZqCRe9AXHvjzKEi06WYR3A_QPMLoorwHEyAPS1ZQ_-ag
- [42] Mohammad Alizadeh Nomeli , Mohr Zamin Jumaat, Manufacturing of high strength LWAC using blended coarse LWA,Journal of building engineering.

- [43] La norme NF EN 1097-6, essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau (juin 2021).
- [44] La norme NF EN 13055-1, granulats légers, partie 1 : granulats légers pour bétons et mortiers (décembre 2002).
- [45] La norme NF EN 933-1, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats, partie 1 : détermination de la granularité- analyse granulométrique par tamisage décembre(1997).
- [46] La norme NA 1948, Essais pour déterminer, essais pour déterminer les caractéristiques géométriques de granulats, Qualification des fines, Essai au bleu de méthylène,Ed2(2006).
- [47] La norme NA5076, Essais pour béton durci, Résistance en compression, Caractéristiques des machines d'essai, Ed1(2006).
- [48] La norme 1015-18, méthode d'essai des mortiers pour maçonnerie, partie 18 : détermination du coefficient d'absorption d'eau par capillarité du mortier durci (mai2003).
- [49] La norme NA 5075, Essai pour béton durci, résistance à la compression des éprouvettes, Ed1(2006).
- [50] La norme 5074, Essai pour bétons durci, Formes dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules ,Ed1(2006).
- [51] La norme P 18-598, Granulats, Equivalent de sable,(octobre1991).
- [52] La norme NF P 18-451, Béton, essai d'affaissement,(décembre 1981).
- [53] COQUILLAT, G. (1976), "Bétons légers de structure", Le bâtiment, bâtir.
- [54] A. SHORT, W. KINNIBURGH, Lightweight Concrete, CR Books ltd., 1968.
- [55] A.M. NEVILLE, W.H. DILGER, J.J. BROOKS, Creep of plain and structural concrete, Construction Press, London(1982).
- [56] G.C. MAYS, R.A. BARNES, The performance of lightweight aggregate concrete Structures in service, The Structural Engineer,(1991).
- [57] Ali Ghalib Aress. Lightweight concrete a project submitted to the civil engineering département college of engineering Diyala University.
- [58] The internation journal of lightweightconcrete . The construction press Ltd .lightweightaggregate in UK D.BrainHorler (1979).
- [59] M.N. Haque *, H. Al-Khaiat, O. Strength and durability of lightweight. KayaliDepartment of Civil Engineering, College of Engineering and Petroleum, Kuwait

University, P.O. Box 5969, Safat 13060, Kuwait Received 16 April 2002; accepted 2 December (2002).

[60] Benefits of lightweight HPC, Holm and Ries; HPC Bridge views issue, Sep/Oct 2001.

[61] The international journal of lightweight concrete, Mix design of lightweight aggregate concrete for structural purposes P. Gurbl.

[62] Agoumimelch Ahmed, Ouanoughi Billal, Mémoire de Master; formulation et caractérisation d'un Béton Léger à base de granulats obtenus par recyclage de boues de barrages, Université M'Hamed Bougara Boumerdes (2017).

[63] Salmia Beddu, Mushtaq Ahmad*, Daud Mohamad, Muhamed Imran bin Noorul Ameen, Zarina Itam, Nur Liyana Mohd Kamal. Utilization of fly ash cenosphere to study mechanical and thermal properties of lightweight concrete, and Nur Amalina Nadiah Basri Department of Civil Engineering, Universiti Tenaga, Nasional Putrajaya Campus, Malaysia.

[64] Shazrul Saruji, The effect of silica fume percentages on compressive strength and drying shrinkage of self-consolidated light weight concrete, Faculty of Civil Engineering, July (2019).

[65] Muhammad Imtiaz. How to make lightweight concrete using styrofoam but still durable, Civil engineering département CECOS University of IT & Emerging sciences.

[66] Mix design of lightweight aggregate concrete for structural purposes, The International Journal of Lightweight Concrete. (1979).

[67] R. Dupin, R. Lanchon, J.C. Saint-Arroman, Granulats, sols, ciment et bétons, Caractérisation des matériaux de génie civil.

[68] Ashref E (technical and export manager), lightweight concrete technology and application, Sika Egypte.

[69] Dr. Peter Lunk, Cathleen Homan, Erich Ritschard, Dr. Jean-Gabriel Hammerschlag, Krestin Wassmann, Dr. Thomas Schmidt, guide pratique de béton, concevoir et mettre en œuvre des bétons durables, 6ème édition (français, édition suisse), janvier (2015).

[70] Larrard, F., concrete mixture proportioning, a scientific approach modern concrete, technologie series, London (1999).

- [71] M^{me} MEDINE Malika, Etude expérimentale des bétons légers Incorporant des granulats issus du broyage Des pneus usés, thèse de doctorat , université de Sidi Bel-Abbes (2018).
- [72] Torrenti J. M., Dentec P., Boulay C., « Sembla J. F., « Projet de processus d'essai pour la détermination du module de déformation longitudinale du béton », Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées,(1999).
- [73]Y. Ke , A. L. Beaucour , S. Ortola, H. Dumontet , R. Cabrillac,Comportement Mécanique des Bétons de Granulats Légers : Étude Expérimentale et Modélisation,France.
- [74] ACI318-95building code requirements for structural concrete ,ACI manual of concrete,detroit,Michigan,(1996).
- [75] K. van BREUGEL, LWAC material properties: State-of-the-art, Technical Report BE96-3942/R2, European Union - Brite Euram III, EuroLightCon, December (1998).
- [76] Veronique.C, Propriétés mécaniques ,thermique et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales,thèse de doctorat (2005).
- [77] G. CAMPIONE, N. MIRAGLIA, M. PAPIA, Experimental investigation on lightweight _bre reinforced concrete with hooked steel _bres, Proceedings of the 5th International RILEM Symposium, Fibre-Reinforced Concretes (FRC), Lyon, September (2000).
- [78] Fiorio B., Beaucour A.L., Ortola S. Optimization of the Mechanical Behavior of Lightweight Aggregate Concrete by the use of High Performances Cementitious Matrixes , France, April(2004).
- [79] Lucyna Domagałaa, Scientific-Technical Conference Material Problems in Civil Engineering ,The effect of lightweight aggregate water absorption on the reduction of water-cement ratio in fresh concrete, Warszawska Poland(2015).
- [80] J.A. Bogas*, A. Carriço, J. PontesCERIS ,Influence of cracking on the capillary absorption and carbonation ofstructural lightweight aggregate concrete, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, Lisbon, Portugal.
- [81] La normeAVPN NA5093,Essai pour béton durci ,Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance,Ed1(2007).

Annexe :

Il est recommandé d'augmenter le taux de fines pour les bétons légers en utilisant des ajouts cimentaires tel que fumées de silices, laitier des hauts fourneaux..Ou en augmentant le dosage en ciment et ce pour améliorer les performances mécaniques des bétons légers et éviter les phénomènes de ségrégation et ressuage.



Le phénomène de ressuage rencontré lors de la formulation.



Le phénomène de ségrégation rencontrée lors de la formulation des bétons légers.