

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
المركز الجامعي لعين تموشنت
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
Institut de Technologie
Département de Génie Mécanique



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : TECHNOLOGIE
Filière : GENIE CIVIL
Spécialité : VOIE ET OUVRAGE D'ART

Thème

*ETUDE DE L'INFLUENCE DES GRANULATS
POZZOLANQUES SUR LES CARACTERISTIQUES
MECANIQUE DES BETONS LEGERS*

Présenté Par :

- 1) BENZINA Ahlem
- 2) HACHEM Nafissa

Devant les jurys composés de :

Mme ATTIA Aminagrade.	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Président
Mme ABDESSLAM Rabha	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Mme BELABASSI ZinnaB	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Examineur

Année universitaire 2017/2018

Remerciements

Au terme de ce travail, nous tenons à remercier en premier lieu ALLAH

Miséricordieux qui nous a donné la volonté et la patience pour achever ce mémoire.

Nous adressons toutes nos gratitude à l'encadreur de ce mémoire, Mme ABDESSLAM Rabha.

Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi aux les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Nous exprimons également notre gratitude à tous les professeurs et enseignants qui ont collaboré à notre formation depuis notre premier cycle d'étude jusqu' à la fin de notre cycle universitaire.

Nôtres remerciement vont également aux responsables et tous les ingénieurs du laboratoire Matériaux des constructions de C.U.B.B.A.T.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude

A Monsieur : MANAA GHALI

Mme : DERBEL AHLEM

Mme : HADJAME RAHMOUNA

A tout le personelles de :

Laboratoire des Tavaux public du ouest LTPO (AINE TEMOUCHENT).

Et enfin, que nos chers parents, familles et mes amis pour leurs aides, soutien et encouragement afin de nous assurer cette formation de master dans les meilleures conditions.

Résumé :

Cette étude fait partie d'une thématique de recherche principale axé sur la valorisation et l'exploitation des ressources locales, malgré sa disponibilité, sa consommation reste très faible.

Dans ce travail, on s'intéresse à la confection d'un béton léger à base de granulats pouzzolaniques, l'utilisation de la pouzzolane comme granulats est dans le but de valoriser un produit naturels est abondant dans la nature qui est la pouzzolane naturelle.

D'une manière générale, ce travail a pour but de familiariser l'utilisation des bétons légers en Algérie vues les avantages qu'ils présentent. Sachant que les granulats légers ne sont pas disponibles d'où l'utilisation de la pouzzolane naturelle

Mots Clés : Béton léger, pouzzolane, caractéristique mécanique, granulats légers, résistance.

Abstract:

This study is part of a main research theme focused on the valorization and exploitation of local resources, despite its availability, its consumption remains very low.

In this work, we are interested in the making of a lightweight concrete based on pozzolanic aggregates, the use of pozzolan as aggregates is in order to promote a natural product is abundant in nature which is natural pozzolan.

In general, this work aims to familiarize the use of lightweight concrete in Algeria the benefits they present. Knowing that light aggregates are not available hence the use of natural pozzolana

The key words: Lightweight concrete, pozzolan, mechanical characteristic, light aggregates, resistance.

ملخص :

هذه الدراسة جزء من موضوع بحثي رئيسي يركز على تثمين المواد المحلية واستغلالها ، على الرغم من توافرها ، ولا يزال استهلاكها منخفضاً للغاية.

في هذا العمل ، نحن مهتمون بصنع خرسانة خفيفة الوزن تعتمد على أساس حبيبات البوزلان تستخدم هذه الحبيبات من أجل تعزيز منتج طبيعي وفير في الطبيعة وهو البوزلان الطبيعي.

بشكل عام ، يهدف هذا العمل إلى تعريف استخدام خرسانة خفيفة الوزن في الجزائر بالفوائد التي يقدمونها. مع العلم أن حبيبات الخفيفة غير متوفرة وبالتالي استخدام البوزلان الطبيعية

الكلمات المفتاحية : الخرسانة خفيفة الوزن ، البوزلان ، الخصائص الميكانيكية ، الركام الخفيف ، المقاومة.

Notations :

ρ_T : masse spécifique du toluène

M1 : la masse de récipient vide

M2 : la masse de récipient + le sable.

V1: le volume de récipient

Es : équivalent de sable mesuré ou piston

Esv : équivalent de sable mesuré visuellement

h1 : hauteur de sable propre et élément fins

h2 : hauteur de sable propre seulement

h2' : hauteur du sable propre seulement au piston

Ri : refus cumulé en (%).

Ms : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105°C.

Mh : masse de l'échantillon imbibé par l'eau

ϕ_g : Porosité intrinsèque de granulats.

ϕ_1 : La porosité intrinsèque du liant.

V_{vides} : Volume des vides contenus dans la matrice de liant.

V_{liant} : Volume total occupé par la pâte de liant.

E_c : Le module d'Young du béton.

ρ_{bs} : La masse volumique sèche du béton.

f_{cck} : La résistance caractéristique à la compression d'un cylindre.

Mf : Module de finesse.

LA (%) : Coefficient de Los Angeles.

E/C : Rapport eau sur ciment.

G/S : Rapport granulats sur sable.

ρ_{app} : Masse volumique apparent.

ρ_{ab} : Masse volumique absolu.

Ab(%) : Le coefficient d'absorption.

Rc : Résistance à la compression.

BP350: béton de granulats pouzzolane dosage de ciment 350 kg

BO350: béton de granulats ordinaire dosage de ciment 350 kg

BP400 : béton de granulats pouzzolane dosage de ciment 400 kg

BO400 : béton de granulats ordinaire dosage de ciment 400 kg

BPA350 : béton de granulats pouzzolane dosage de ciment 350 kg adjuvanté

BOA350 : béton de granulats ordinaire dosage de ciment 350 kg adjuvanté

BPA400 : béton de granulats pouzzolane dosage de ciment 400 kg adjuvanté

BOA400 : béton de granulats ordinaire dosage de ciment 400 kg adjuvanté

Sommaire :

Remerciements	2
Notations :	6
Résumé :	3
Abstract :	4
:ملخص	5
Introduction générale :	2

Chapitre I: les granulats légers pour béton de structure.

1. Introduction :	5
2. Différents types de granulats légers :	5
2.1. Granulats naturels :	5
2.1.1. Pierre ponce :	6
2.1.2. Diatomite :	6
2.1.3. Pouzzolane naturelle :	6
2.3. Granulats artificiels :	6
2.3.1. Argile expansé :	7
2.3.2. Cendre volante :	7
2.3.3. Laitier expansé :	7
2.3.4. Schist expanse:	8
2.3.5. Polystyrène expansé :	8
3. Composition chimique et minéralogique de granulats légers	9
4. Procédés de fabrication :	10
5. Caractéristiques physiques des granulats légers :	10
5.1. Porosité :	10
5.2. Absorption d'eau :	11
6. Propriété mécanique des granulats légers :	13
6.1. Résistance des granulats légers :	13
6.2. Caractéristiques élastiques des granulats légers :	13
7. Conclusion :	14

Chapitre II : propriétés physiques et mécaniques des béton à base de granulats léger.

1. Introduction :	17
2. Types et classification de béton léger	17
3. Les avantage des bétons légers par apport aux bétons ordinaires	18
4. Propriétés physiques des bétons à base de granulats légers :	19
4.1. Interaction des granulats avec la matrice cimentaire :	19

4.2.	Maniabilité et murissement des bétons légers	20
4.3.	Porosité :.....	20
4.4.	Absorption d'eau :	22
4.5.	La masse volumique de bétons légers :.....	22
5.	Propriétés mécaniques des bétons de granulats légers :.....	23
5.1.	Résistance à la comprissions des bétons légers :.....	23
6.	Propriétés élastiques des bétons légers :	28
6.1.	Différents facteurs influençant les propriétés élastiques :.....	29
6.2.	Prédication du module d'Young des bétons légers à partir de relations empiriques :.....	29
7.	Domaines d'utilisation :.....	32
8.	Conclusion :.....	32

Chapitre III : Matériaux utilisé et méthodes d'essais .

1.	Introduction :.....	33
2.	Matériaux utilisés :	33
2.1.	Ciment :.....	33
2.1.1.	Les caractéristiques physiques :	34
2.2.2.	Analyse chimique sur ciment :.....	35
2.2.3.	Analyse minéralogique des ciments :	35
2.2.	Sable :.....	36
2.3.	Gravier ordinaire et gravier pouzzolanique :.....	36
2.3.1.	Analyse chimique :	36
2.3.2.	Analyse minéralogique :	37
2.4.	Adjuvant :.....	37
2.5.	L'eau de gâchage :	38
3.	Essais effectués dans laboratoire :.....	38
3.1.	Essais sur le Ciment :.....	38
3.1.1.	La masse volumique des liants :.....	38
3.2.	Les essais sur Le sable ;.....	40
3.2.1.	La masse volumique des sables :.....	40
3.2.2.	Equivalent de sable	41
3.2.3.	Coefficient d'absorption :.....	42
3.2.4.	L'analyse granulométrique :.....	43
3.2.5.	Module de finesse :.....	44
3.3.	Le gravier ordinaire :.....	45
3.3.1.	Les masses volumiques apparentes et absolues :.....	45

3.3.2.	Coefficient d'absorption :.....	46
3.3.3.	La teneur en eau :.....	46
3.3.4.	Los Angles :.....	47
3.3.5.	Analyse granulométrique :.....	48
3.4.	Le gravier pouzzolanique :.....	49
3.4.1.	Les masses volumiques apparentes et absolues.....	49
3.4.2.	Absorption du granulat :.....	50
3.4.3.	L'analyse granulométrique.....	50
4.	Formulations des bétons en fonction du dosage de ciment sans adjuvant :.....	51
5.	Formulations des bétons en fonction du dosage de ciment avec adjuvant :	53
6.	Étape de confection du béton :	54
6.1.	Préparation des mélanges :.....	54
	Mise en place du béton dans les moules :.....	55
6.2.1.	Le cône d'Abrams :.....	55
6.2.2.	La conservation des éprouvettes avant démoulage:.....	56
6.2.3.	Conservation après démoulage :.....	56
7.	La perte de masse :	57
8.	La résistance à la compression :	57
Chapitre IV: résultats et interprétations.		
1.	Introduction :	58
2.	La courbe des masses volumiques :.....	58
3.	Les courbes granulométriques :	58
3.1.	La granulométrie de sable :	59
3.2.	Les courbes granulométriques des granulats :.....	59
3.2.1.	La granulométrie de gravie classe (2/5) :.....	59
3.2.2.	La granulométrie de gravie classe (3/8) :.....	60
3.2.3.	La granulométrie de granulats pouzzolanique (2/5):	60
3.2.4.	La granulométrie de granulats pouzzolanique (3/5) :.....	61
4.	Résultats de la perte et le gain de masse :	61
4.1.	Résultat de la perte et le gain des masses du béton en fonction de ciment sans adjuvant :	61
4.2.	Résultats de la perte et le gain de masse de bétons en fonction de ciment avec adjuvant. .	66
5.	Résultat de la résistance mécanique à la compression :	69
5.1.	Résultat de la résistance mécanique à la compression de béton sans adjuvant	69
5.2.	Résultat de la résistance à la compression de béton avec adjuvant :	73
6.	Conclusion :.....	76

Liste des figures :

Figure 1. Différent granulats légers naturels.(modifié)[2]	6
Figure 2. Les grains de l'argile expansée. [4].....	7
Figure 3 . Les grains de cendre volante. [4]	7
Figure 4. Les granulats de laitier expansé. [4].....	8
Figure 5. Les granulats de schiste expansé. [4]	8
Figure 6. Les granulats de polystyrène expansé. [4].....	8
Figure 7. Composition chimique de polystyrène. [11].....	10
Figure 8. Absorption d'eau en fonction du temps des granulats d'argile expansés bouletés (Arg.) et de cendres volantes frittées (CV); granulats 4/8 mm, densité apparente ρ_g . [20].....	12
Figure 9: Taux d'absorption en fonction du temps des granulats d'argile expansés bouletés (Arg.) et de cendres volantes frittées (CV); granulats 4/8 mm, densité apparente ρ_g . [20]	12
Figure 10. évolution du module de déformation dynamique de différents granulats en fonction de leur masse volumique.[25]	14
Figure 11. Représentation schématique des différents types de béton léger, [32].	18
Figure 12. Courbes contrainte /déformation de béton léger confectionnés avec de l'argile expansée : (A) granulats fins et grossiers légers ; (B) granulats fins ordinaires [28].	19
Figure 13. Interface pate-granulats et mécanismes d'interaction identifiés. [34].....	19
Figure 14. Porosité du béton. [42]	21
Figure 15. Relation entre la résistance en compression à 28j et la densité du béton frais d'un mélange avec des granulats légers [45].....	23
Figure 16. Evolution de la résistance à compression des bétons légers en fonction de leur dosage de ciment (a), et de leur densité (b). [37], [51], [54], [55], [56].....	28
Figure 17. Évolution des modules d'Young de bétons légers en fonction de leur résistance à compression [51], [54], [55] et [56].....	31
Figure 18. Confrontation des modules d'Young de bétons légers obtenus par les formules empiriques et les résultats expérimentaux de [51], [54], [55] et [56]	31
Figure 19.le sac de ciment.	34
Figure 20.Gravier pouzzolane et Gravier ordinaire.	36
Figure 21. Essai de la masse absolue du liant.....	39
Figure 22. Equivalent sable.	42
Figure 23.la série de tamis.	43
Figure 24. La machine de Los Angeles.	47
Figure 25. Moule de $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$	54
Figure 26. Préparation de mélange.	55
Figure 27. Le cône d'Abrams.	55
Figure 28. L'essai d'affaissement du béton frais.	56
Figure 29. La mise en place du béton.	56
Figure 30. Le démoulage des éprouvettes.	57
Figure 31. Conservation des éprouvettes dans un bain d'eau de 20C°	57
Figure 32. Machine d'essais de la compression.	58

Figure 33. La rupture de l'éprouvette.	59
Figure 34. Évaluation des masses volumiques.	58
Figure 35. Granulométrie de sable	59
Figure 36. Granulométrie de gravie (2/5).	59
Figure 37. Granulométrie de gravie (3/8).....	60
Figure 38. Granulométrie de la pouzzolane.....	60
Figure 39. Granulométrie de la pouzzolane.....	61
Figure 40 . Evaluation la perte et le gain de masse des bétons à 3j.	62
Figure 41. Evaluation la perte et le gain de masse des bétons à 7j.	63
Figure 42. Evaluation la perte et le gain de masse des bétons à 28j.	63
Figure 43. Evaluation du différent de masse des bétons à 60j.	64
Figure 44. Evaluation la perte et le gain de masse des bétons en fonction de temps.	65
Figure 45. Evaluation la perte et le gain de masse de béton adjuvante à 3j.	66
Figure 46. Evaluation la perte et le gain de masse de béton adjuvante à 7j.	67
Figure 47. Evaluation la perte et le gain de masse de béton adjuvanté à 28j.	68
Figure 48. Evaluation la perte et le gain de masse de béton adjuvanté à 60j.	68
Figure 49. Evaluation de la perte et le gain de masse de béton adjuvé en fonction de temps.....	69
Figure 50:Evolution de la résistance à la compression de béton léger en fonction de temps.	70
Figure 51. Evolution de la résistance à la compression du béton ordinaire en fonction de temps. ..	71
Figure 52. Evolution de la résistance à la compression de béton léger en fonction de temps.	71
Figure 53. Evolution de la résistance à la compression de béton ordinaire en fonction de temps. ..	72
Figure 54. Evaluation de la résistance à la compression de béton en fonction de temps.....	73
Figure 55. Evolution de la résistance à la compression de béton léger en fonction de temps.	73
Figure 56.Evolution de la résistance à la compression de béton ordinaire en fonction de temps. ...	74
Figure 57. Evolution de la résistance à la compression de béton léger en fonction de temps.	74
Figure 58. Evolution de la résistance à la compression de béton ordinaire en fonction de temps. ..	75
Figure 59. Evaluation de résistance à la compression du béton adjuvantes en fonction de temps. ...	75
Figure 60. La rupture de béton de pouzzolane.	76

Liste des tableaux :

Tableau 1. Composition chimique de laitier expansé	9
Tableau 2. Compositions chimiques des granulats de ponce, diatomite et cendre volante.....	9
Tableau 3. Composition chimique de l'argile expansée.	9
Tableau 4. Absorption d'eau de différents granulats légers. [18], [15]	11
Tableau 5. Classification des bétons légers selon le guide ACI 213R-87. [33]	17
Tableau 6. Porosité ouverte des granulats et proportion capillaire de diamètre >2 µm. [43]	22
Tableau 7. Comparaison des résistances de bétons légers et classiques en fonction de leur dosage en ciment. [50].....	24
Tableau 8. Données expérimentales sur la résistance et le module d'Young de bétons légers, leur dosage en ciment, leur masse volumique pour différent ciment [37], [51], [54], [55] et [56]	25
Tableau 9. Estimation du module d'Young d'un béton léger ($\rho_{bs}=1700 \text{ kg/m}^3$, $f_c= 30 \text{ MPa}$) par les différentes formules empiriques.	30
Tableau 10. Récapitulatif des résultats des essais sur ciments.	34
Tableau 11. Composition chimique de ciments [laboratoire de CICA].....	35
Tableau 12. Composition minéralogique de ciment.	35
Tableau 13. Analyse chimique de la pouzzolane.....	36

Tableau 14. L'analyse minéralogique de l'adjuvant.....	37
Tableau 15. Résultat d'équivalent sable.....	42
Tableau 16. Les coefficients d'absorption des sables.....	43
Tableau 17. L'analyse granulométrique de sable.....	44
Tableau 18. Les masses volumiques des graviers.....	46
Tableau 19. Les coefficients d'absorption des graviers.....	46
Tableau 20. La teneur en eau des graviers.....	47
Tableau 21. Les résultats de los Angeles.....	48
Tableau 22. Analyse granulométrique du gravier de classe 3/8.....	48
Tableau 23. Analyse granulométrique du gravier de classe 2/5.....	49
Tableau 24. Masse volumique abs de la pouzzolane.....	49
Tableau 25. Masse volumique apparente de la pouzzolane.....	50
Tableau 26. Coefficient d'absorption de la pouzzolane.....	50
Tableau 27. Analyse granulométrique de la pouzzolane de classe 3/8.....	50
Tableau 28. Analyse granulométrique de la pouzzolane de classe 2/5.....	51
Tableau 29. La formule de béton à base de granulats pouzzolane.....	51
Tableau 30. La formule de béton ordinaire.....	52
Tableau 31. La formule de béton à base de granulats de la pouzzolane.....	52
Tableau 32. La formule de béton ordinaire.....	52
Tableau 33. La formule de béton à base de granulats pouzzolane.....	53
Tableau 34. Formulation du béton ordinaire.....	53
Tableau 35. La formulation du béton à base des granulats de la pouzzolane.....	53
Tableau 36. La formule de béton ordinaire.....	54
Tableau 37. Codification de béton utilisé.....	61
Tableau 38. La perte et le gain de masse des bétons à 3j.....	62
Tableau 39. La perte et le gain de masse des bétons à 7j.....	62
Tableau 40. La perte et le gain de masse de béton à 28j.....	63
Tableau 41. La perte et le gain de masse des bétons à 60j.....	64
Tableau 42. La perte et le gain de masse de béton adjuvanté à 3j.....	66
Tableau 43. La perte et le gain de masse de béton adjuvanté à 7j.....	67
Tableau 44. La perte et le gain de masse de béton adjuvanté à 28j.....	67
Tableau 45. La perte et le gain de masse de béton adjuvanté à 60j.....	68
Tableau 46. Résistance à la compression de béton léger dosage 350 kg.....	70
Tableau 47. Résistance à la compression de béton ordinaire dosage 350 kg.....	70
Tableau 48. Résistance à la compression de béton léger dosage 400 kg.....	71
Tableau 49. Résistance à la compression de béton ordinaire dosage 400 kg.....	72
Tableau 50. Résistance à la compression de béton léger dosage 350 kg adjuvanté.....	73
Tableau 51. Résistance à la compression de béton ordinaire dosage 350 kg adjuvanté.....	74
Tableau 52. Résistance à la compression de béton léger dosage 400 kg adjuvanté.....	74
Tableau 53. Résistance à la compression de béton ordinaire dosage 400 kg adjuvanté.....	75

Introduction

Générale

Introduction générale :

Pour compenser le déficit de la fabrication des matériaux de construction et réduire les coûts, plusieurs projets de recherche ont développé des matériaux dans lesquels des déchets industriels combinés (produits laitiers ou cendres volantes) ou des ressources naturelles telles que le pouzzolane sont exploités

Le béton léger est connu pour les avantages qu'il présente vis-à-vis l'isolation thermique et phoniques, mais ces dernières années plusieurs recherches se focalisent sur l'utilisation des bétons légers comme des éléments structurels, il existe plusieurs méthodes pour l'allègement du béton soit par introduction de bulle d'air soit par utilisation des granulats légers,

Il existe plusieurs type et pour la fabrication de granulats légers comme l'argile expansé ou le schiste expansés mais le processus de fabrication nécessitent un cout assez élever et par la suite le cout du béton sera plus cher par conséquence, de ce fait l'utilisation des granulats légers naturelle nous permet d'économiser l'énergie de fabrication et par la suite la protection de l'environnement

Granulats pouzzolaniques sont des roches volcaniques présentant une structure phosphorique (et donc siliceuse) avec une structure alvéolaire (poreuse).

L'Algérie, possède une grande quantité de matériau pouzzolane naturelle d'origine volcanique, qui s'étend sur 160 kilomètres entre la frontière algéro-marocaine et le sahel d'Oran.

La présence de gisements importants de pouzzolane dans la région a permis de lancer plusieurs voies de recherche.

L'utilisation de cette pouzzolane n'est encore utilisée que dans la fabrication du ciment tandis que son utilisation dans le béton est en cours des recherches. Plusieurs études ont montré des améliorations dans les propriétés mécaniques des mortiers et du béton contenant ce pouzzolane. Il est principalement utilisé comme un ajout dans le ciment et le béton.

La carrière de FerPhos de Béni-Saf, pouzzolane, produit de grandes quantités de granulats 0/4 extraites de son gisement de roche de la pouzzolane. Le but de notre étude est d'utiliser cette pouzzolane comme un granulats léger pour la fabrication d'un béton léger. En plus de l'analyse qualitative de ces granulats, l'étude est principalement orientée vers la formulation du béton léger pour différents groupes de granulats. Les résultats sont exprimés en termes de résistance à la compression.

Ce document est présenté en quatre chapitres.

Le premier chapitre est une synthèse de différents type des granulats légers naturel et artificiel et leurs compositions chimiques et minéralogies, ainsi leurs propriétés physiques telles que la porosité et l'absorption, et leurs propriétés mécaniques telles que la résistance et les caractéristiques élastiques.

Le deuxième chapitre présent les bétons légers et leurs différentes caractéristiques physiques et mécaniques ainsi que l'influence des granulats légers sur sa résistance enfin on présente leurs avantages et le domaine d'utilisation dans les structures.

Les essais physiques et mécaniques réalisés au laboratoire de Génie Civil de Centre Université de Ain-Temouchent sur les granulats et les bétons sont ensuite présentés au troisième

chapitre. Deux type de granulats pouzzolane et granulats ordinaire utilisés dans les formulations des bétons.

Dans le chapitre quatre, on retrouve les résultats expérimentaux de mesures de la résistance à la compression du béton de à base de granulats pouzzolane et le béton ordinaire (témoin).

Enfin la Conclusions nous permettra de faire une analyse entre les deux types des bétons (béton à base de granulats pouzzolaniques et béton à base de granulats ordinaire).ainsi que quelques perspectives

Chapitre I :

Les granulats légers
pour béton de
structures

1. Introduction :

L'utilisation des granulats légers date de l'époque romaine qui se situe entre 27 avant J. C. et 476 après J. C. Plusieurs édifices pour ne citer que la Panthéon et le Colisée da Rome sont réalisés en partie en béton léger (BREMNER et AL. 1994). Par exemple, le dôme du panthéon d'une portée d'environ 43 mètres a été réalisé avec des matériaux de densités variables dont un contenant de la pierre ponce. Après le déclin de l'empire Romain, l'utilisation des granulats légers naturels tels que la pierre ponce, la pouzzolane, la diatomite etc., a été ralentie jusqu'à l'avènement des granulats légers artificiels tels que l'argile expansée, l'ardoise expansée, cendre volant fritee etc., au XXIème siècle. [1]

Historiquement, l'ingénieur HAYDE STEPHEN est le premier à fabriquer des granulats légers par l'application d'un traitement thermique sur un matériau expansible (ARNOULD et VIRLOGEUX 1986) et (TANG et AL. 2011). Il déposa un brevet en 1918 pour la technique d'expansion de l'argile. De l'ardoise et du schiste à partir d'un four rotatif. C'est le début de la production et de la commercialisation des granulats légers artificiels. Les granulats légers artificiels s'est développé au début des années 1970 avec l'implantation de la première usine en 1964 à WATTEN dans le nord. Selon (CHEN et AL 2012), les granulats légers sont aujourd'hui présents dans différents domaines tels que le bâtiment (béton préfabriqué et béton prêt à l'emploi), les travaux public (remblai), l'horticulture (grainage de jardin), du traitement des eaux (filtre ou lit bactérien). Certains sont peu résistants voire faibles tandis que d'autres sont résistants et durs. [1]

2. Différents types de granulats légers :

Les granulats légers sont très nombreux et ils se différencient les uns des autres par leur origine, leur composition, leur forme, leur état de surface, leur structure, leur porosité, leur densité, leur résistance...

Les granulats légers sont caractérisés par une structure poreuse, ce qui explique leur légèreté, ils peuvent être d'origine naturelle ou artificielle dont la masse apparente est inférieure à 1000 kg/m^3 .

2.1. Granulats naturels :

Un certain nombre de granulats légers existe à l'état naturel, Parmi les granulats d'origine minérale naturellement poreux : la pierre ponce, diatomite, pouzzolane ...

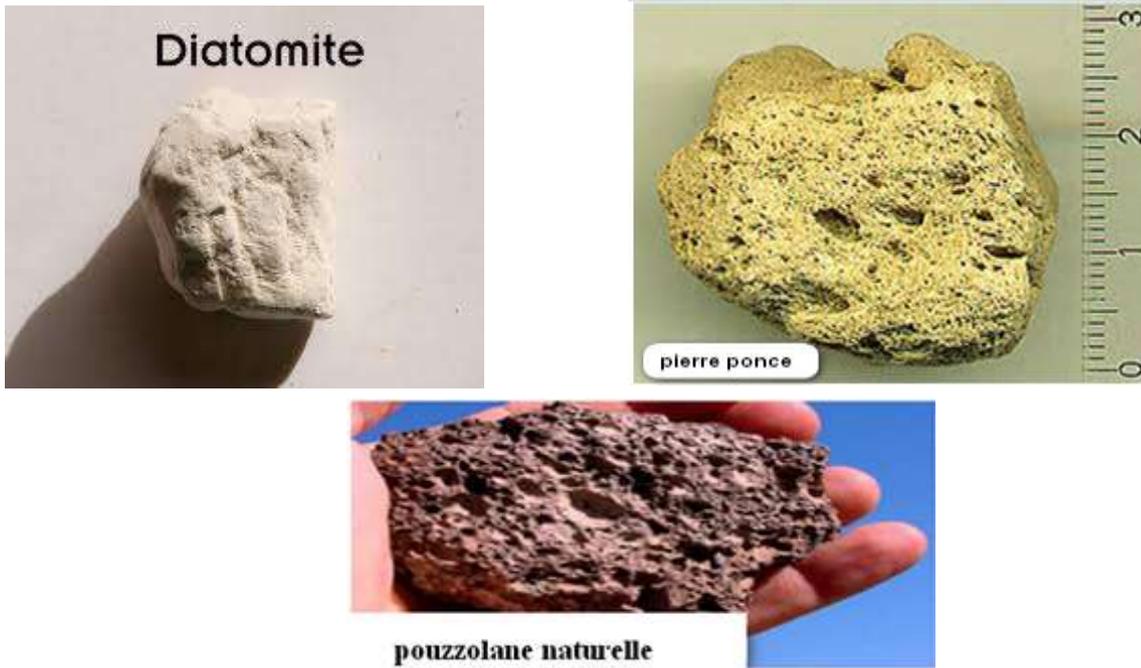


Figure 1. Différents granulats légers naturels. (modifié) [2]

2.1.1. Pierre ponce :

Les ponce sont des roches pyroclastiques friables caractérisées par une teinte claire et une grande richesse en verre volcaniques fortement vésiculés qui leur confèrent une grande porosité et une faible densité (elles peuvent flotter sur l'eau). Les éléments qui composent ces roches sont anguleux à l'origine et s'émoussent rapidement. Leur taille varie le plus souvent de 1 à 15 cm et les éléments les plus gros mesurent plusieurs décimètres de longueur. Si des quantités de gaz et de vapeur suffisantes sont disponibles lors de l'éruption. Augmentant sa violence, l'émulsion ponceuse peut se fragmenter pour donner des éléments très fins, c'est-à-dire des cendres volcaniques vitreuses (granules, échardes ...) possédant un diamètre inférieur à 3 mm. [3]

2.1.2. Diatomite :

La diatomite est une roche sédimentaire siliceuse constituée essentiellement de squelettes de diatomées (algues unicellulaires). Les matériaux diatomés bruts font l'objet d'un traitement en usine, qui comprend principalement le broyage, le séchage, la sélection granulométrique, la calcination et l'activation (calcination avec ajout d'un agent floculant). [4]

2.1.3. Pouzzolane naturelle :

La pouzzolane provient de la cristallisation de magma volcanique refroidi assez lentement (scorie, lave mousseuse, crasse volcanique). La roche s'exploite en carrière. Elle est parfois lavée, concassée et criblée. La pouzzolane est colorée en rouge brun, en noire ou en teinte intermédiaire. C'est une roche silicoalumineuse (par EX : $\text{SiO}_2=50\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3=20\%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3=10\%$). Sa densité est un peu plus élevée que celle de la ponce, de l'ordre de 700 à 900 kg/m^3 . Les bétons confectionnés sont un peu plus denses et plus résistants que les bétons de ponce. [9]

2.3. Granulats artificiels :

Des granulats légers peuvent être également produits artificiellement, soit à partir de matières premières naturelles comme l'argile, le schiste, l'ardoise, soit à partir de sous-produits comme les

laitiers, les cendres volantes frittés ou encore l'EPS (Polystyrène Expandé). [5] les granulats artificiels sont les granulats d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des modifications thermiques ou autres. [6]

2.3.1. Argile expansé :

Sous l'action de fortes températures, certaines argiles possèdent la propriété de gonfler à la suite d'un dégagement de gaz lié à un ramollissement de la matière. Parallèlement, une peau extérieure se forme par vitrification à la surface du matériau. [10]



Figure 2. Les grains de l'argile expansée. [4]

2.3.2. Cendre volante :

Les cendres volantes résultent de la combustion du charbon dans les centrales thermiques; elles sont récupérées au moyen de séparateurs pneumatiques et électrostatiques puis humidifiées pour faciliter la manutention. Les cendres volantes sont une poudre fine constituée principalement de particules vitreuses sous forme sphériques. Les compositions chimiques des cendres volantes dépendent des impuretés contenues dans le charbon utilisé. [8]



Figure 3 . Les grains de cendre volante. [4]

2.3.3. Laitier expansé :

Le laitier expansé est comme étant un granulat alvéolaire de nature cristalline provenant du refroidissement du laitier à l'air, en présence d'une quantité d'eau limitée. Le laitier expansé peut se présenter sous diverses formes selon les procédés de fabrication : par expansion, mise en granules ou refroidissement par air. Sa couleur est souvent gris plus ou moins foncé. [10]



Figure 4. Les granulats de laitier expansé. [4]

2.3.4. Schist expande:

Les schistes expansés proviennent de l'expansion de schistes de toutes natures (schistes carbonifères et houillers, schistes bitumineux, schistes classiques ou encore ardoises). [10]



Figure 5. Les granulats de schiste expansé. [4]

2.3.5. Polystyrène expansé :

Le polystyrène est un matériau alvéolaire rigide. Peu dense, dont les principales utilisations sont l'isolation thermique de bâtiment et l'emballage des produits industrielles ou alimentaires. [1]

Ces matériaux sont destinés à constituer des bétons légers et isolants thermiques, donc ayant de très basses masses volumiques ($300 \text{ à } 800 \text{ kg/m}^3$). [10]



Figure 6. Les granulats de polystyrène expansé. [4]

3. Composition chimique et minéralogique de granulats légers

La ponce et la diatomite sont composés a grande pourcent de dioxyde silicium et aussi de aluminium, de fer, calcium et possède une teneur non-négligeable en sulfoxinium. [12]

Les granulats de laitier expansé est composé de 80% silice et de chaux. [13]

La cendre volante possède plus d'alumine que les autres types de granulats. [12]

Les Granulats en argiles expansés et schiste expansé sont composés de plus de 85% de Silice, d'aluminium et d'oxyde de fer. Leur minéralogie principalement et le plus abondant constitués de quartz. [14], [15], [16]

Le polystyrène est un polymère thermoplastique linéaire à squelette aliphatique obtenue par polymérisation du motif homopolymère de styrène.

La composition chimique des granulats courante ce présenté dans les tableaux suivant :

Tableau 1. Composition chimique de laitier expansé .

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	TiO_2	MgO	K_2O	Na_2O	MnO	SO_3	P_2O_5
Laitier expansé	35.85%	5.08%	7.77%	37.22%	0.17%	3.55%	0.27%	0.12%	2.0%	/	0.09%

Tableau 2. Compositions chimiques des granulats de ponce, diatomite et cendre volante.

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	TiO_2	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3
Ponce	52-75%	11-17%	0.5-5%	1-8%	1%	0.5-3%	3-9%	3-9%	1%
Diatomite	60.40%	3.156%	1.29%	13.38%	0.027%	2.15%	0.786%	1.210%	
Cendre volante	49 .5%	30.2%	9.5%	4.6%	/	2.4%	1.5%	1.5%	0.9%

Tableau 3. Composition chimique de l'argile expansée.

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	TiO_2	SO_3	S	Alcalis
Argile expansé	50-60%	16-25%	5-9%	1-5%	1.5-3.5%	0-1.5%	0-1.5%	1.5-4.5%

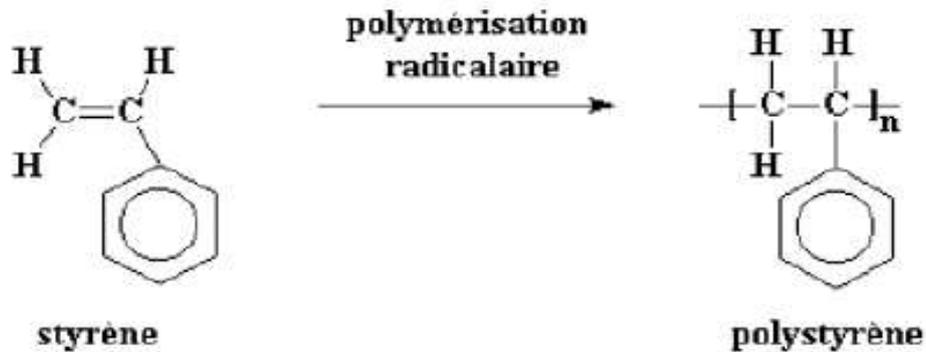


Figure 7. Composition chimique de polystyrène. [11]

4. Procédés de fabrication :

La principale caractéristique des granulats légers est leur porosité élevée qui se traduit par une faible densité apparente. Certains granulats légers sont des roches à l'état naturel, mais la majorité des granulats légers utilisés est manufacturée à partir de matières premières naturelles (argile, schiste, ardoise) ou de sous-produits industriels (laitiers, cendres volantes). Les procédés de fabrication usuels sont l'expansion en four rotatif ou la cuisson sur grilles [14]. L'expansion est alors générée par la formation d'un gaz à l'intérieur du matériau en fusion (entre 1000 et 1300°) et la structure poreuse est conservée par le refroidissement rapide. Les granulats peuvent être obtenus par le concassage des masses expansées ou par préformage avant l'expansion (moulage et déchetage de l'argile, pulvérisation des schistes et de l'ardoise, frittage des cendres volantes). Le moulage et le frittage permettent d'obtenir des granulats de forme sphérique (granulats bouletés). Les laitiers expansés peuvent être fabriqués sans opération de concassage ni préformage. Le laitier liquide (environ 1450 °C) est alors projeté dans l'atmosphère au moyen d'un tambour rotatif tandis que des jets d'eau assurent l'expansion des particules en fusion. [13]

5. Caractéristiques physiques des granulats légers :

5.1. Porosité :

Les granulats légers sont caractérisés par une très grande porosité varie de 25 jusqu' à 75 % du volume apparent) [7], la porosité des granulats manufacturés varie proportionnellement à la taille des grains, plus la taille des grains augmente plus ils sont poreux et la densité apparente diminue. La porosité peut également dépendre du préformage avant l'expansion. La taille de pore varie considérablement de moins de 4mm jusqu'à plus de 1mm. La taille et la distribution des pores influencent la résistance des granulats

Il existe deux types de pores, les pores fermés sont isolés et ne sont pas reliés ensemble, et les pores ouverts forment un système poreux continue dans les matériaux qui peut contribuer au transport de la matière dans les matériaux, plus les pores interconnecté plus l'absorption d'eau est

élevée, le pourcentage des pores ouverts dans les ensemble des pores sont variable par apports la nature des granulats léger, [17]

Certains types de granulats comme l'argile expansée ont une enveloppe externe dense entre 0.1 et 0.3 mm d'épaisseur, moins poreuse que l'intérieur. Lors de la cuisson des nodules d'argile, quand la température de fusion est atteinte, il se forme en effet une pellicule vitrifiée à la surface des nodules. Sur les cendres volantes frittées, aucune différence de structure n'a par contre été observée entre la périphérie et l'intérieur du granulat. [18]

5.2. Absorption d'eau :

L'absorption d'eau par les granulats légers dépend de leur réseau poral et de la présence ou non d'une enveloppe plus dense à la surface des granulats. Les données de la littérature montrent que l'absorption d'eau des granulats légers manufacturés initialement secs varie généralement entre 10 et 20 % après 24 heures d'immersion. Cependant, le taux d'absorption initial est très élevé : plus de 50 % de l'absorption est souvent complétée dès les toutes premières minutes. [19], [20]

Pour les granulats cassés, l'absorption de l'eau après les 30 premières minutes d'immersion est environ 30% supérieure à celle des granulats entiers de même surface. Les différences d'absorption sont moins importantes pour les granulats ne présentant pas ou peu de différence de microstructure entre l'intérieur et la surface, come les cendres volantes frittées. La norme NF P18-309 sur les granulats d'argile expansée limita le pourcentage de grains cassés à 8% ou 5% afin que les propriétés d'absorption soient peu influencées par la présence des surfaces cassées.

Le tableau 4 présente un récapitulatif des propriétés d'absorption à 24H DE différents granulats légers selon leur masse volumique.

Tableau 4. Absorption d'eau de différents granulats légers. [18], [15]

Réf. Grav		Nature	Masse volumique des grains (kg /m ³)	Absorption d'eau à 24 h (%)
[18]	Type1	Argile	1370	16
	Type2	Argile	1250	15
	Type3	Argile	1070	18.5
	Type4	Argile	1300	15.5
	Type5	Cendre volante	1440	16.5
[15]	Swedish leca	Argile	735	10.2
	Type5	Argile	911	16.1
	Type6	Argile	1155	17.1
	Type8	Argile	1535	21.0

Certains moyens tels que le pré mouillage ou l'utilisation d'un traitement de surface visant à réduire l'absorption des granulats s'avèrent très efficaces pour diminuer la perte de maniabilité des bétons légers. La paraffine et la pâte de ciment ont entre autres été utilisés. [26], [27]

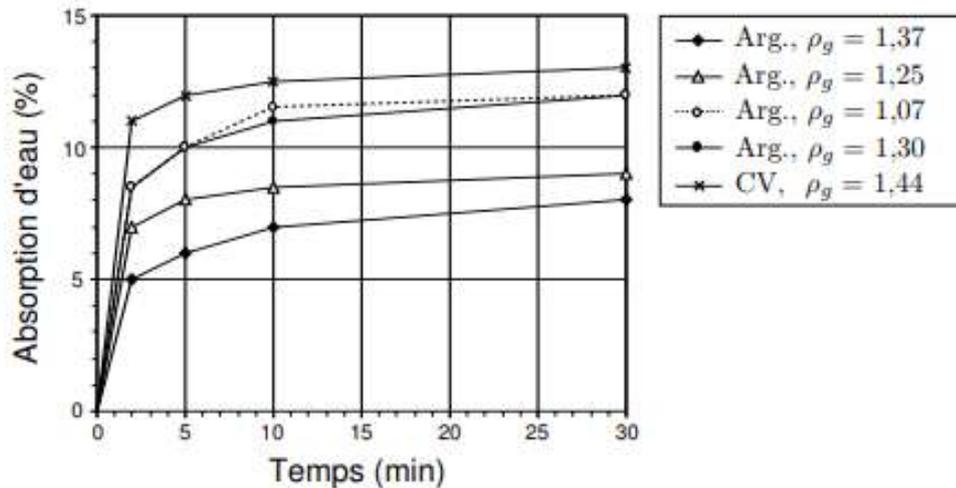


Figure 8. Absorption d'eau en fonction du temps des granulats d'argile expansés bouletés (Arg.) et de cendres volantes frittées (CV); granulats 4/8 mm, densité apparente ρ_g . [20]

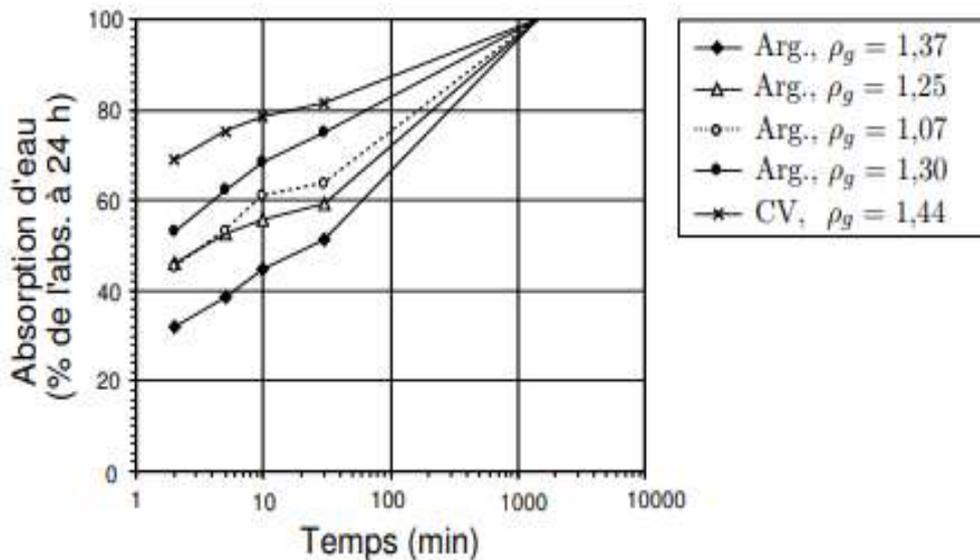


Figure 9: Taux d'absorption en fonction du temps des granulats d'argile expansés bouletés (Arg.) et de cendres volantes frittées (CV); granulats 4/8 mm, densité apparente ρ_g . [20]

Finalement, la densité des granulats à l'état saturé surface sèche est difficile à exprimer, car la présence de gros pores en surface ne permet pas d'établir à quel moment cet état est atteint.

6. Propriété mécanique des granulats légers :

Ils difficile de caractériser les propriétés des granulats léger avec précision à cause de la variabilité entre chaque grain (la porosité, densité, forme...). A ce jour, on ne trouve que peu de données fiables quant à la résistance des granulats légers.

6.1. Résistance des granulats légers :

- L'essai d'écrasement au pot est l'essai le plus facile et le plus utilisée, [21] le principe de cet essai est de mesurer la résistance à l'écrasement en vrac. Cependant, les résultats ne représentent pas la résistance des granulats confinés dans le béton. Sa méthode de utilisation est comme suivent, un échantillon de granulats compacté par vibration est comprimé, a l'aide d'un piston, dans cylindre de 100 mm de hauteur et de $175 \text{ 0 } 200 \text{ cm}^2$ de section. La vitesse d'enfoncement du piston est de 0.2 mm par seconde et l'essai est terminé lorsque l'enfoncement du piston atteint 20 mm. La résistance conventionnelle des grains en N/cm^2 est définie par le quotient de la face nécessaire pour obtenir l'enfoncement de 20 mm du piston par section du cylindre.

- L'essai des compressions hydrostatiques qui caractérise la résistance à la pression hydrostatique (pression de rupture). L'essai consiste à prend un granulats léger est mis en place dans une enceinte plastique très déformable, qui est placée à l'intérieur d'un bain d'huile de la presse. Cette huile est mise en pression, par étapes, jusqu' à l'écrasement du granulats léger en triple étreinte, qui se manifeste par une brusque chute de pression. La résistance du grain est alors caractérisée par la pression de rupture.

- L'essai au fil donne la résistance à la traction par fendage.il est obtenu par placer un mince fil d'acier autour d'un granulats léger et à exercer une traction croissante, jusqu'à ce que le grain soit coupé en deux. La résistance du grain est caractérisée par le rapport de la force de traction à rupture à la surface de la boucle que forme le fil d'acier autour du grain.

6.2. Caractéristiques élastiques des granulats légers :

Le module d'élasticité du béton a été considéré comme un facteur essentiel dans la conception de structures en béton. Pour prédire efficacement le module d'élasticité du béton léger, il faut d'abord évaluer le module d'élasticité du granulats léger. Les granulats légers synthétiques couramment utilisés dans la construction en béton possèdent des intérieurs très poreux et des extérieurs relativement denses.

Une méthode dynamique développée par MULLER-ROCHHOLZ [22] permet d'évaluer le module élastique des granulats légers par des mesures de vitesse de propagation d'ondes à ultrasons. Dans cet essai, les vitesses d'impulsion des ondes longitudinales et transversales à travers des granulats sont mesurées. Le module d' Young, le coefficient de poisson, le module de cisaillement sont obtenue par corrélation avec vitesse. L'exactitude des valeurs est contrôlée sur matériaux connus comme l'acier et le verre.

A partir des différentes mesures réalisées par ultrasons et présentées (figure 10), le manuel « lightweight concrete » édité par la FIP (Fédération Internationale de la Précontrainte) et le CEB (Comité Européen de Béton) et l'ACI [23],[24] proposent une relation empirique entre le module de déformation dynamique assimilé au module d'Young (E_g) et la masse volumique des grains (ρ_g).

$$E_g = 8000 \rho_g^2$$

E_g Est exprimé en MPa, et ρ_g en t/m^3

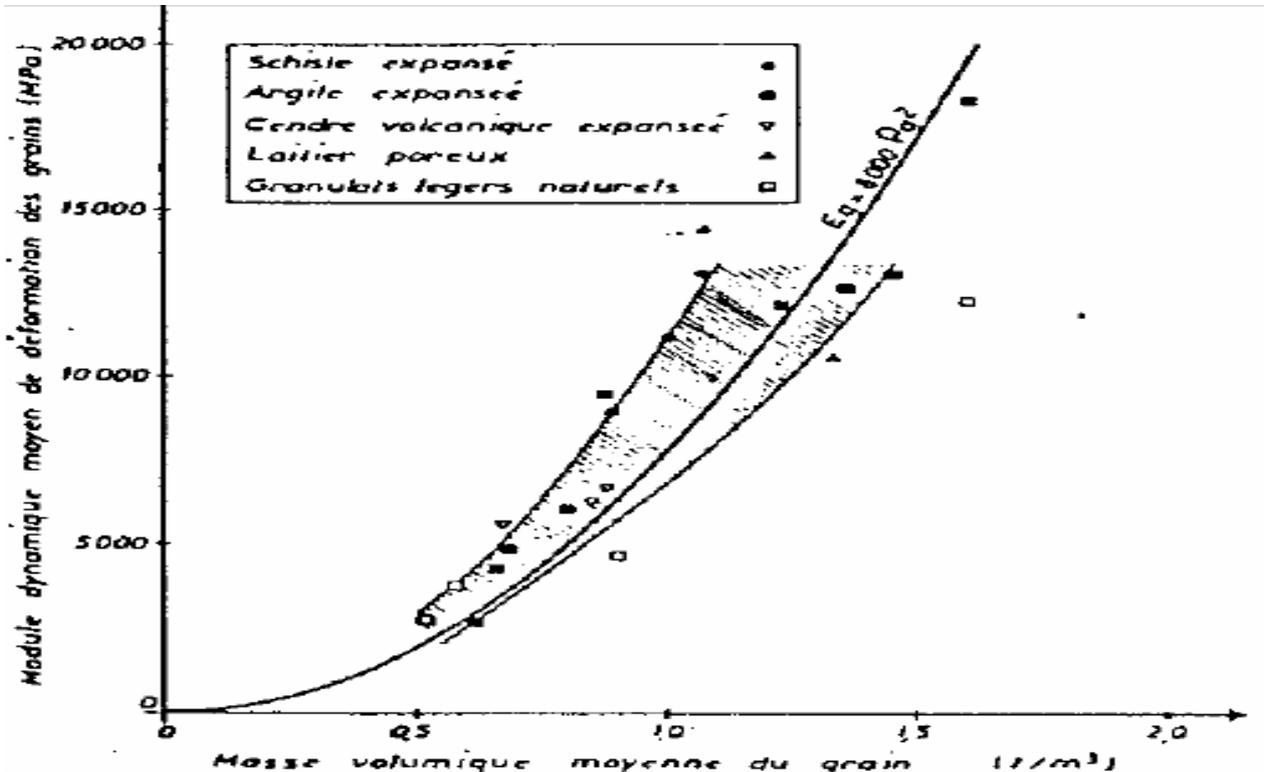


Figure 10. évolution du module de déformation dynamique de différents granulats en fonction de leur masse volumique.[25]

7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synthèse des connaissances actuelles sur les différents granulats légers et leurs compositions chimiques et minéralogiques, ainsi que les caractéristiques physiques et mécaniques des granulats légers.

Cette étude a permis de mettre en évidence l'influence notable des granulats légers sur le comportement mécaniques du béton léger. Les granulats légers sont en effet moins résistants et en général 3 à 4 fois plus déformables que la pâte de ciment.

Chapitre II :

Propriétés physiques
et mécaniques des
bétons à base de
granulats légers

1. Introduction :

Le béton léger fait partie de la gamme des bétons spéciaux développés par des ingénieurs. Ses caractéristiques spécifiques suggèrent de nouvelles applications architecturales. Ce qui le distingue du béton ordinaire est sa faible masse volumique. En effet, la masse volumique d'un béton de densité normale varie de 2200 à 2600 kg /m³, tandis que celle du béton léger oscille entre 300 et 1850 kg/m³. La technologie de ces nouveaux bétons peut être profitable pour la construction notamment dans les pays en voie de développement. Son faible poids, sa résistance et ses autres propriétés le rendent pertinent à utiliser dans des conditions de mise en chantier plus spécifiques. De plus, l'utilisation d'un béton de masse volumique faible peut permettre de construire sur un sol de faible capacité portante [28]

2. Types et classification de béton léger

Le béton confectionné avec des granulats naturels provenant de roches dures a une masse volumique qui varie peu parce que la densité de la plupart des roches varie peu [29]. Bien que le volume des granulats dans le béton affecte sa masse volumique, ce n'est pas un facteur important. Ainsi en pratique, la masse volumique d'un béton de densité normale varie de 2200kg/m³ à 2600 kg/m³. En conséquence, le poids propre des éléments de béton est élevé et peut représenter un fort pourcentage de la charge sur la structure. La commission des bétons légers RILEM [30] propose de définir les bétons légers comme étant des bétons dont la masse volumique apparente sèche est inférieure à 1800 Kg/m³. D'autres auteurs adoptent des définitions un peu différentes : l'American Concrete Institute [31] limite la masse volumique apparente des bétons légers à 1800 Kg/m³ après séchage à l'air pendant 28 jours.

On diminue la masse volumique du béton en remplaçant une certaine quantité de matériau solide par de l'air. Les trois endroits possibles pour incorporer de l'air dans le béton sont : dans la matrice (béton cellulaire), entre les gros granulats (béton caverneux ou sans fines, c.-à-d. sans sable) et dans les granulats (béton de granulats légers). La figure1 illustre ces trois types de béton [32]. Evidemment, il est possible d'effectuer des combinaisons comme un béton léger de type caverneux fabriqué en utilisant des granulats légers. L'augmentation du volume d'air, ou des vides, s'accompagne d'une diminution de la résistance du matériau. Le guide ACI 213R-87 [33] distingue alors trois catégories de béton léger, classées selon la masse volumique du matériau durci (tableau1).

Tableau 5.Classification des bétons légers selon le guide ACI 213R-87. [33]

Classification	ρ_b (kg/m ³)	f'_c (MPa)
Bétons légers de structure	1350– 1900	>17
Bétons légers de résistance modérée	800 – 1350	7 – 17
Bétons de faible densité	300 – 800	<7

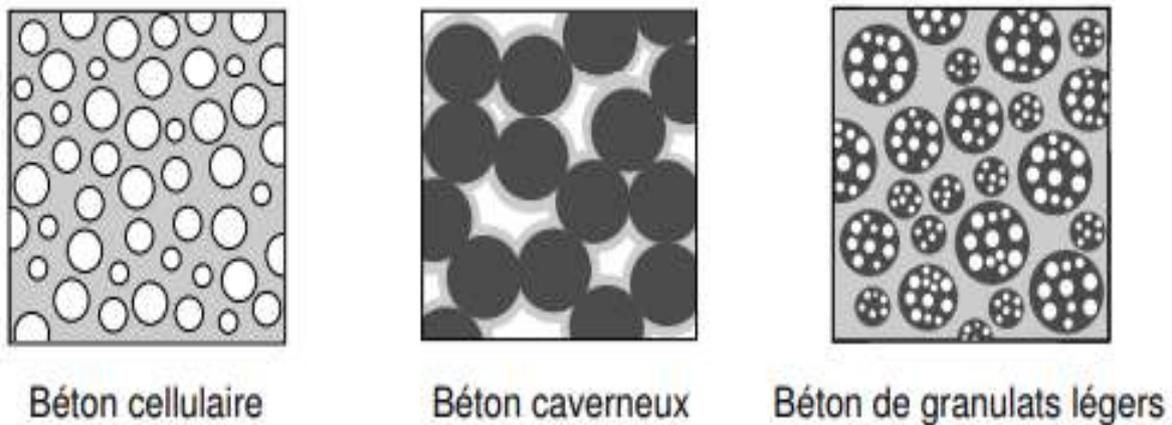


Figure 11. Représentation schématique des différents types de béton léger, [32].

Les bétons légers de structure, utilisés pour la fabrication d'éléments porteurs, sont généralement fabriqués avec des granulats légers manufacturés (argile, schistes et laitiers expansés ou cendres volantes frittées). La résistance à la compression minimale recommandée par l'ACI est alors de 17 MPa à 28 jours. Les bétons légers de faible densité sont fabriqués avec des granulats ultra légers et très poreux (vermiculite exfoliée, perlite expansée) ou avec une matrice cellulaire. Dans ce dernier cas, l'incorporation de bulles d'air peut être faite par génération de gaz dans le matériau à l'état plastique ou par entraînement d'air au cours du malaxage. Ces bétons sont de très bons isolants thermiques, mais ils doivent bien souvent être traités à l'autoclave pour atteindre une résistance suffisante. D'autres granulats non absorbants et plus résistants sont aussi disponibles (verre et polystyrène expansés). Les bétons de résistance modérée sont dotés de propriétés intermédiaires. Ils peuvent être fabriqués avec des granulats concassés naturels, comme la pierre ponce, les tufs et autres roches d'origine volcanique, ou avec un mortier aéré. La pierre ponce fut par ailleurs le premier granulats légers à être utilisé, notamment pour la construction du dôme du Panthéon et du Colisée à Rome. [34]

3. Les avantages des bétons légers par rapport aux bétons ordinaires

Selon CIM béton (2000), le béton léger, par sa légèreté, réduit le poids mort des bâtiments. Les pièces de bétons légers sont donc plus légères, ce qui réduit considérablement la dimension, donc le poids, des fondations (NEVILLE, 2000). De plus, on note une augmentation de la productivité sur le chantier en raison du faible poids du matériau (NEVILLE, 2000). Etant donné le plus faible volume de béton utilisé, il est aussi possible d'économiser sur les quantités de ciment par rapport au béton ordinaire. [28]

Les auteurs (HART 2001, NEVILLE 2000 et PICON 1997) notent les excellentes qualités de finition d'une pièce en béton léger, en raison, surtout de sa fabrication en usine. Les pièces de béton léger sont aussi plus faciles à manipuler et déplacer, en raison de leur relative légèreté. [28]

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

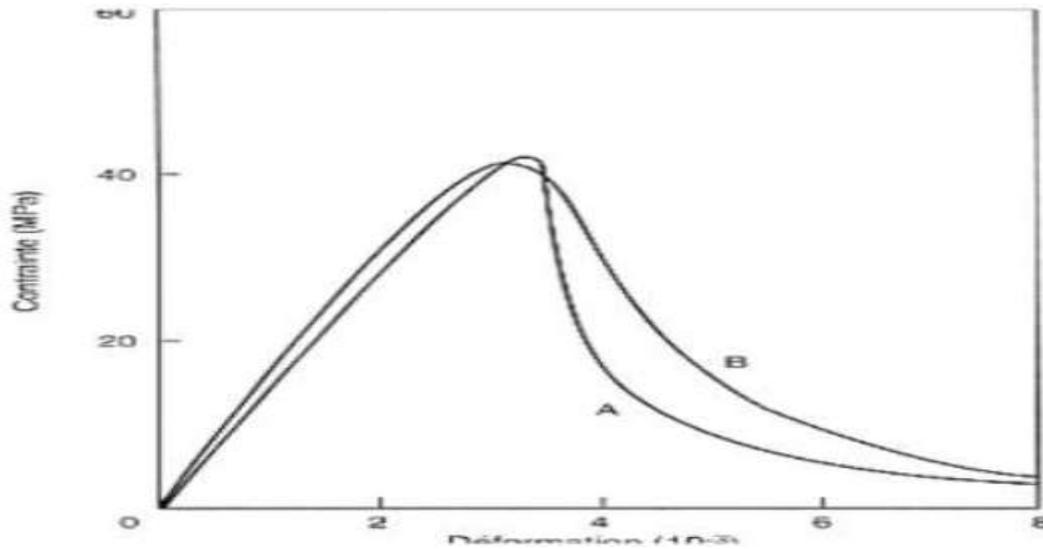


Figure 12. Courbes contrainte /déformation de béton léger confectionnés avec de l'argile expansée : (A) granulats fins et grossiers légers ; (B) granulats fins ordinaires [28].

4. Propriétés physiques des bétons à base de granulats légers :

4.1. Interaction des granulats avec la matrice cimentaire :

La qualité microstructurale des interfaces pâte-granulats légers est généralement supérieure à celle des bétons de granulats rigides. Des mécanismes d'interaction physique, chimique et mécanique ont été identifiés, sans compter l'influence du faible module élastique des granulats sur la microfissuration des interfaces.

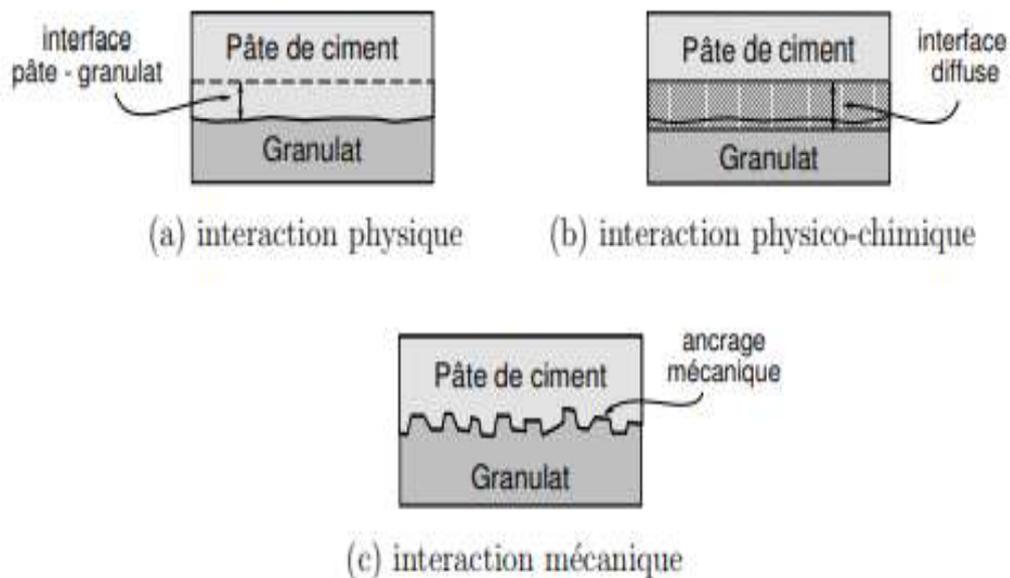


Figure 13. Interface pâte-granulats et mécanismes d'interaction identifiés. [34]

Les granulats légers préformés sont recouvert d'une mince couche plus ou moins rigide qui isole la structure poreuse des granulats. Lorsque cette couche est très dense, ce qui peut être le cas d'un granulat semi-léger, la microstructure des interfaces est alors semblable à celle observée dans les bétons de granulats rigides, c'est-à-dire qu'elle est plus poreuse et qu'elle peut contenir de larges cristaux de portlandite et des aiguilles d'ettringite . Si la couche protectrice des granulats est moins rigide, ou si les granulats sont concassés, on observe alors que la microstructure de l'interface est plus dense et plus homogène. Cette densification de la matrice est associée au processus physique d'absorption d'eau des granulats qui diminue localement le rapport eau/ciment de la matrice cimentaire (figure 3, [35], [36]). L'absorption de l'eau de gâchage dépend toutefois du degré de saturation initial des granulats.

Une très faible activité pouzzolanique semble possible entre les granulats légers (argile expansés et cendres volantes frittées) et la matrice cimentaire. [37], [39]). [43] observent que cette interaction chimique peut contribuer à augmenter la résistance à long terme des bétons avec granulats de cendres volantes frittées (figure 3).

Enfin, la pâte de ciment peut venir se loger entre les rugosités et les pores à la surface des granulats légers. Cet ancrage mécanique, qui améliore l'adhérence des granulats à la matrice cimentaire, dépend de la texture des granulats, de la taille des grains de ciment et de la viscosité de la matrice (figure 3). L'absence de portlandite améliore également la résistance de l'interface. [40]

4.2. Maniabilité et mûrissement des bétons légers

La capacité d'absorption élevée des granulats légers a un impact significatif sur la maniabilité, la résistance et le mûrissement du béton, et qu'il dépend de l'état des granulats utilisés saturé en surface ou bien sec. Pour les granulats saturés séchés en surface, ils n'affectent pratiquement pas sur maniabilité. Alors l'eau absorbée n'est pas à prendre en compte dans le rapport eau/ciment du béton. par ailleurs, lorsque l'hydratation du ciment fait chuter l'humidité relative dans les pores capillaires de la pâte de ciment durci, l'eau présente dans les granulats migre vers ces capillaires, rendant possible une hydratation supplémentaire. Ce que fait que les bétons de granulats léger sont moins sensibles à un mûrissement humide incorrect qu'un béton ordinaire.

Par contre dans le cas de granulats utilisés secs, l'absorption d'eau des granulats diminue la maniabilité. De plus, si le béton est vibré avant que l'absorption par les granulats légers secs ne soit terminée, des vides dus à la dessiccation se développent et, à moins que le béton ne soit revibré, sa résistance sera moins élevée [41]

4.3. Porosité :

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

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

La matrice de liant contient également des vides d'air qui apparaissent au moment de la prise des hydrates et du séchage du matériau. On parle d'air intra-liant qui permet de définir la porosité intrinsèque du liant ϕ_1 , la taille caractéristique des pores présents entre les hydrates de $Ca(OH)_2$ ou de C-S-H, varie entre $0.01 \mu m$ et $5 \mu m$ et la taille des pores générés par un entraîneur d'air varient entre $5 \mu m$ et $1 mm$ [41]. L'air intra-liant sera également considéré comme de l'air microscopique.

$$\phi_l = \frac{V_{vides}}{V_{liant}}$$

Avec :

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

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

Enfin, l'arrangement plus ou moins compact des différents constituants entre eux (empilement de granulats et du liant) crée des vides supplémentaires, à l'origine de la porosité mésoscopique du matériau [42]

$$\phi_{meso} = \frac{V_{vides}}{V_t}$$

Avec V_{vides} : Volume des vides contenus dans le matériau autres que l'air intra-liant et intra-particule (m^3)

V_t : Volume total occupé par le matériau (m^3)

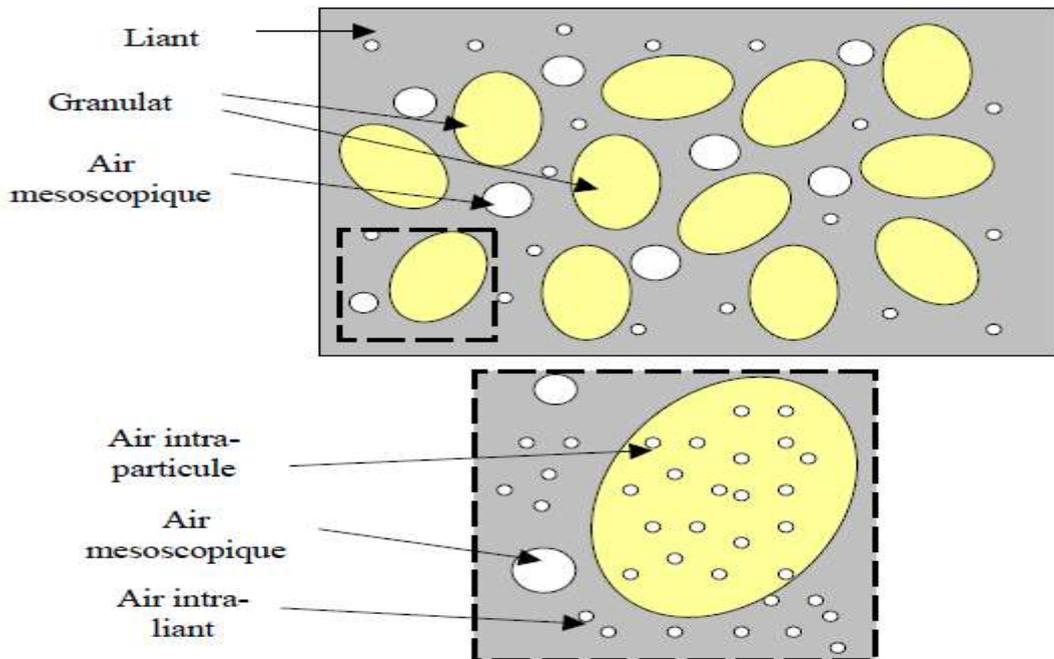


Figure 14. Porosité du béton. [42]

4.4. Absorption d'eau :

L'absorption est un phénomène physique par lequel un liquide migre de l'extérieur vers l'intérieur d'un milieu poreux grâce à un phénomène de remontées capillaires. L'absorption entraîne un gain de masse du matériau. Cependant, l'absorption n'est possible que si les capillaires du réseau poreux communiquent pour permettre le transfert de l'eau : on parle alors de porosité ouverte ou connectée. Lorsque le matériau contient des pores emprisonnés comme dans le cas du béton cellulaire, on parle de pores occlus. Ces pores ne participent pas au phénomène d'absorption. Une étude expérimentale menée par VAQUIER [43] a mis en évidence le rôle de la microstructure dans l'absorption en comparant le type et la distribution par taille des pores de quatre granulats légers et en analysant les conséquences sur l'absorption, voir Tableau 6.

Tableau 6. Porosité ouverte des granulats et proportion capillaire de diamètre >2 μm . [43]

	Porosité ouverte (%)	% pores diamètre >2 μm
Ponce	55,0	68,0
Argile expansée	53,9	11,7
Schiste expansé	37,0	34,7
Cendre frittée	37,0	17,6

Il constate que la plus grande partie de l'eau est absorbée en quelques minutes et que la quantité d'eau absorbée n'est pas corrélée à la porosité ouverte mais à la porosité ouverte de diamètre supérieur à 2 microns. Ceci est confirmé par la comparaison entre le volume de liquide maximal absorbé par les granulats et le volume total des capillaires de diamètre supérieur à 2 microns qui sont quasiment identiques.

4.5. La masse volumique de bétons légers :

Un béton léger a une densité inférieure aux bétons « classiques », il est donc moins résistant mais plus isolant et permet un gain de poids selon l'ouvrage.

Sa masse volumique après séchage est inférieure à 2 000 kg/m^3 (béton de granulats légers, béton cellulaire, béton caverneux, etc.). Par rapport à un béton de poids normal, un béton léger a généralement une plus grande déformabilité mais une meilleure résistance thermique. Il est utilisé en remplissage, pour des éléments porteurs et isolants, en réhabilitation... [44]

D'après ARNOULD et VIRLOGEUX la prise de poids d'un béton léger immergé ne dépasse pas 40 kg/m^3 et est de 30 kg/m^3 pour un béton traditionnel. Les auteurs expliquent essentiellement ce gain de poids par le remplissage des vides du mortier, et non par la migration d'eau vers les granulats légers, les pores de surface étant au moins en grande partie bouchés par le mortier, au moment du malaxage et en début de prise, du fait des échanges d'eau entre le mortier et les granulats légers [43].

5. Propriétés mécaniques des bétons de granulats légers :

Nous nous intéressons maintenant aux propriétés mécaniques des bétons à base de granulats légers et pour plus préciser, à leur résistance à la compression et leur module d'Young et d'examiner les facteurs influençant ces propriétés à partir des travaux expérimentaux de la littérature.

5.1. Résistance à la comprissions des bétons légers :

Avec des granulats légers et une formulation de béton appropriée, il est possible d'obtenir des résistances à la compression comparables à celles obtenues avec du béton traditionnel. L'évolution des connaissances et des technologies du béton ont permis au fil des ans d'améliorer les propriétés des bétons, dont celles des bétons légers. Par exemple, l'utilisation d'ajouts minéraux (fumée de silice, cendres volantes, laitiers) et d'adjuvants (agents entraîneurs d'air, AEA, super plastifiants, SP, agents réducteurs d'eau, WR et accélérateurs de prise) ont donné la possibilité notamment de diminuer le rapport E/L tout en conservant une bonne maniabilité. Des résistances en compression de 100 MPa ont même été obtenues et sont présentées voir la figure 15.

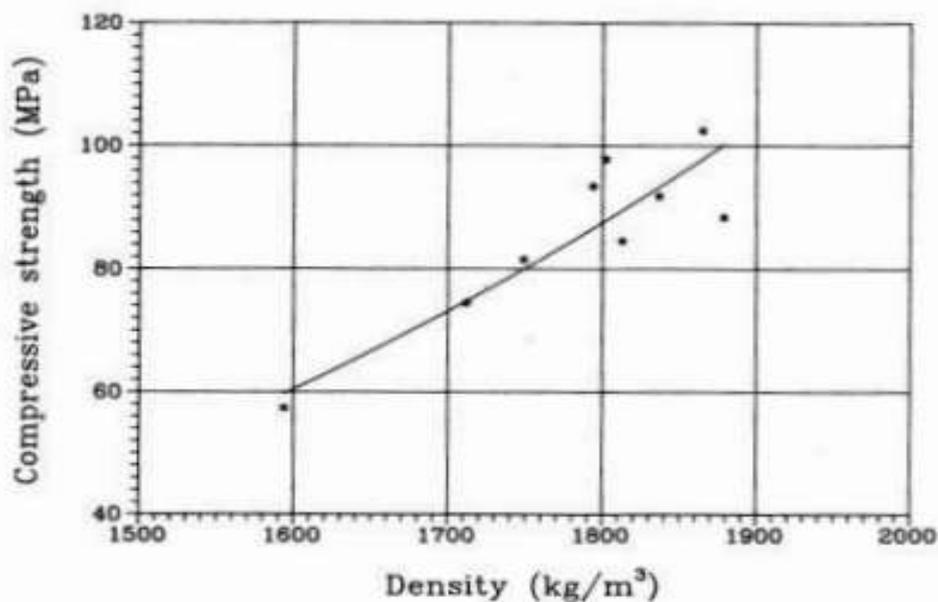


Figure 15. Relation entre la résistance en compression à 28j et la densité du béton frais d'un mélange avec des granulats légers [45]

De façon générale. Pour un béton de même résistance, le dosage en ciment doit être plus élevé dans un béton léger que dans un béton de densité normale. Le tableau 3 illustre cette remarque.

Tableau 7. Comparaison des résistances de bétons légers et classiques en fonction de leur dosage en ciment. [50]

Résistance moyenne à la compression sur cylindre normalisé (MPa)	Dosage en ciment	
	Avec granulats fins légers (kg/m ³)	Avec granulats fins de densité normale (kg/m ³)
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

Dans le cas du béton léger, les granulats légers sont, contrairement au béton traditionnel, en général moins résistants que le mortier. Ils constituent le point faible du béton. Par contre, grâce à leur surface poreuse et aux liaisons qui en résultent, il y a une très bonne adhérence entre le mortier et les grains. La rupture se produit donc par cassure des granulats légers, dans des plans qui coupent un grand nombre de granulats.

Différentes données expérimentales extraites des travaux de WILSON et MALHOTRA [54], SAKAR et AL [37], de LARRARAD [55], ZHANG et GJORV [51] et HAQUE et AL [56] sont rassemblés au Tableau 8, concernent la résistance en compression, le dosage en ciment et la masse volumique du béton frais.

Tableau 8. Données expérimentales sur la résistance et le module d'Young de bétons légers, leur dosage en ciment, leur masse volumique pour différent ciment [37], [51], [54], [55] et [56]

Ref.grav.		Nature des granulats	Dosage en ciment (kg/m ³)	Densité du béton séché à l'étuve	Résistance moyenne à la compression (28j) (MPa)	Module d'Young (28j) (GPa)
[54]	R635 D	Schiste	635	1.97*	56.6	--
	R500 A		500	1.95*	44.9	25.5
	R500 B		500	1.94*	44.8	--
	R500 C		500	1.95*	44.4	--
	R 500 D		500	1.94*	48.2	--
	T500 A		500	1.92*	60.8	26.1
	T 500 B		500	1.92*	60.3	--
	T500 C		500	1.91*	57.2	--
	T500 D		500	1.92*	60.7	--
	R400 A		400	1.92*	40.4	25.8
	R400 B		400	1.91*	41.5	--
	R400 D		400	1.90*	40.4	--
	T 400 A		400	1.92*	54.6	27.0
	T400 B		400	1.95*	57.4	--
	T 400 D		400	1.90*	55.7	--
	R 300 A		300	1.94*	33.6	23.8
	R 300 B		300	1.90*	30.2	--
	R300 C		300	1.89*	33.3	--
	R 300 D		300	1.89*	34.2	--
	T300 A		300	1.87*	46.4	26.2

Chapitre II : propriété physiques et mécaniques des bétons a base de granulats légers

	T300 B		300	1.91*	50.3	--
	T300 C		300	1.89*	49.7	--
	T 300 D		300	1.91*	48.3	--
[37]	Swedish Leca	Argile	400	1.54	26.2	--
	Swedish Leca		444	1.54	32.9	--
	Swedish Leca		444	1.62	36.4	--
	Liapor 5		384	1.63	34.8	--
	Liapor 5		259	1.71	38.1	--
	Liapor 5		337	1.66	35.1	--
	Liapor 6		342	1.64	42.3	--
	Liapor 6		385	1.62	35.6	--
	Liapor 8		445	1.62	40.6	--
[55]	Argi 16	Argile	400	1.53	30	15.6
	Isol S	Argile	400	1.67	31	19.2
	Leca	Argile	400	1.57	31	15.7
	Surex 675	Schiste	400	1.67	33	21
	Galex	Laitier	400	1.88	37.9	25.8
	LWC 1 Crush	--	474	1.84	63.2	23
	LWC2 pellet	--	474	1.82	63.3	22.7
	HSLWC Pel	--	502	1.99	73	27.6
	Liapor	Argile	385	1.88	60	25.7
	Liapor	Argile	385	1.90	62	24.8
	Javron	--	400	1.74	44	19.7
	G/S-0.2	--	400	1.78	44	19.9
	G/S+0.2	--	400	1.72	41	19.7
	EAU-	--	400	1.75	42	20.9

Chapitre II : propriété physiques et mécaniques des bétons a base de granulats légers

	EAU+	--	400	1.74	37	18.1
[51]	N°1	Argile	600	1.735	102.4	25.9
	N°2		500	1.690	91.8	24.7
	N°3		400	1.645	93.4	24.3
	N°4		550	1.735	84.5	22.3
	N°5		500	1.635	98.0	24.3
	N°6		500	1.570	74.4	21.6
	N°7		500	1.435	57.3	17.8
	N°8		500	1.625	81.5	22.2
	N°9	Cendre Volante	500	1.710	88.4	24.8
[56]	SLWC35-Full	Cendre volante	280	1.775*	38.0	23.8
	SLWC35-1 SS		280	1.775*	40.0	22.0
	SLWC35-7 SS		280	1.775*	42.5	24.0
	SLWC50-Full		480	1.800*	49.5	26.6
	SLWC50-1 SS		480	1.800*	49.5	27.1
	SLWC50-7 SS		480	1.800*	57.0	28.2

Le graphe de figure 16 présente des données expérimentales sur la résistance et le module d'Young de bétons légers, leur dosage en ciment, leur masse volumique pour différents ciments [37], [51], [54], [55] et [56]. Lorsque le dosage de ciment varie entre 260 et 640 kg/m³ et la densité sèche du béton varie entre 1.44 à 1.99 la résistance à compression à 28 jours se situe entre 20 et 100 GPa.

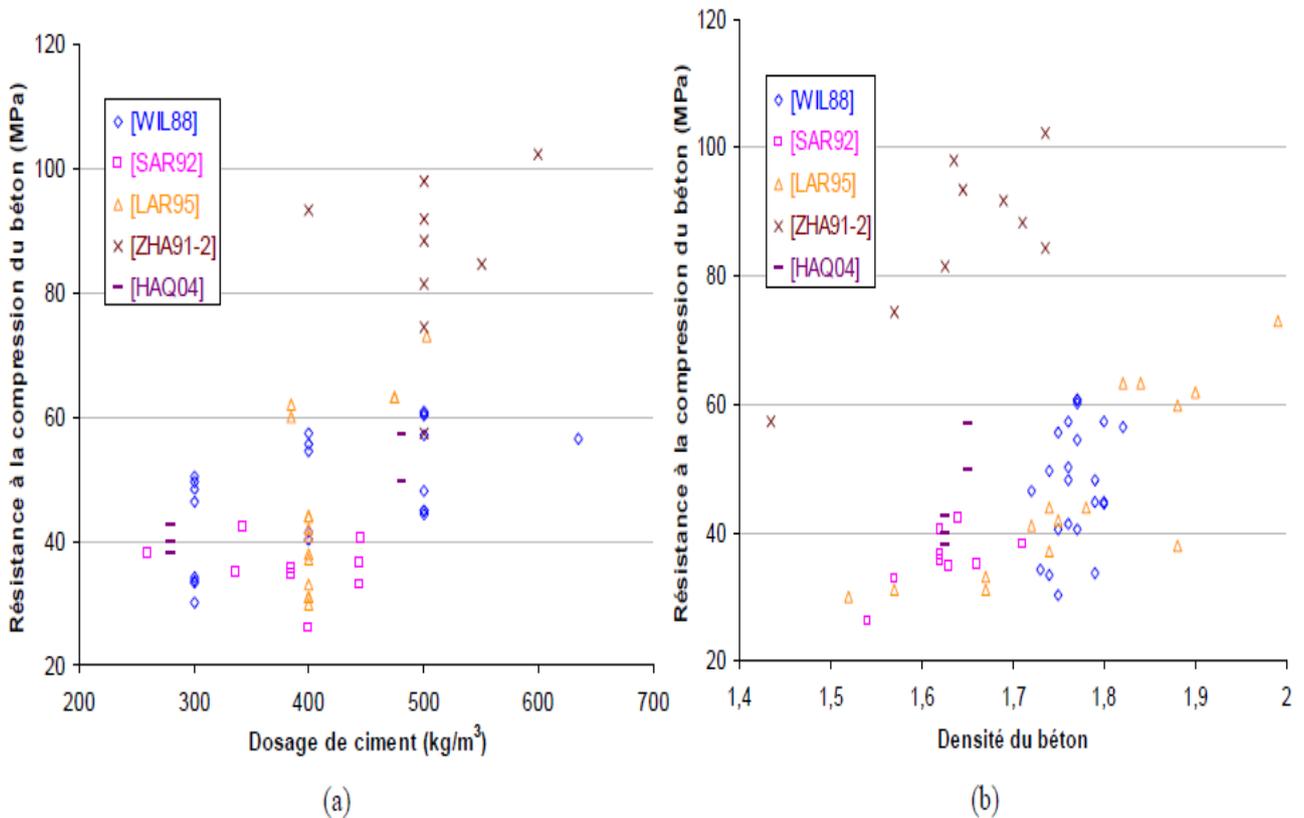


Figure 16. Evolution de la résistance à compression des bétons légers en fonction de leur dosage de ciment (a), et de leur densité (b). [37], [51], [54], [55], [56].

L'influence du rapport volumique Granulats/Sable (G/S) sur la résistance à la compression de bétons légers est également notée. Lorsque le rapport du volume absolu de granulats légers G au volume absolu de sable naturel S augmente, la masse volumique du béton diminue, et la résistance à la compression diminue aussi. Pour les bétons légers structuraux, le rapport volumique G/S est de l'ordre de 1,5 à 1,8, il peut quelquefois atteindre 1,90, mais cela conduit alors à des bétons relativement fragiles. [43]

6. Propriétés élastiques des bétons légers :

Nous nous intéressons maintenant aux propriétés élastiques des bétons légers. Le module d'Young d'un béton léger est évidemment inférieur à celui de béton traditionnel en raison de sa faible masse volumique. Généralement, le module d'Young d'un béton léger est considéré comme valant 1/2 à 3/4 de celui d'un béton traditionnel de même résistance [46]. Une plus faible rigidité peut-être parfois souhaitable pour les structures soumises à une sollicitation dynamique ou pour des structures en coques. Un faible module d'Young néanmoins être à l'origine de désordre dans les structures en béton précontraint suite à une relaxation des câbles de précontrainte et à la chute de tension qui en découle. [34]

6.1. Différents facteurs influençant les propriétés élastiques :

Le béton, léger a un module d'Young moins élevé qu'un béton classique car les modules des granulats légers sont plus faibles que les modules des granulats de densité normale. selon les essais de Euro Light CON [47] dans lesquels des granulats normaux sont remplacés par des granulats léger (d'argile expansée) dans des proportions en volume de 20%,40%,60%,80%,100%,le module d'Young du béton diminue graduellement de 22400 MPa à 17300 MPa . MORIN [48] et CHI et AL. [49] constatent de même que l'augmentation du pourcentage des granulats légers dans le béton abaisse le module d'Young du béton. Par ailleurs, ils observent que le module d'Young du béton peut être amélioré par une diminution du rapport d'eau sur ciment, et que les caractéristiques des granulats légers ont une influence notable sur les modules du béton pour des fractions volumiques de granulats supérieurs à 20% a l'inverse, l'ACI remarque que la variation de granulométrie des granulats légers ,et donc de leur densité a peu d'effet sur le module d'Young si les volumes relatif de la pâte et des granulats restent constants [46].

Les propriétés élastiques des granulats ont une influence prépondérante sur le module d'Young du béton. Comme les propriétés élastiques du granulat sont liées à leur indice de vides et donc à leur densité, le module d'Young du béton léger dépend non seulement de la résistance en compression, mais aussi de la masse volumique du béton [51].

6.2. Prédication du module d'Young des bétons légers à partir de relations empiriques :

Les normes proposent différentes relations empiriques pour évaluer les modules élastiques des bétons légers, en fonction de leur masse volumique et de leur résistance à la compression. Le module d'Young du granulat étant rarement connu, les formules tiennent compte du module au moyen d'un coefficient fonction de la masse volumique du béton. Il n y a pas consensus sur ces relations.

Ainsi la relation de l'Eurocode EN 1922-1-1 préconise :

$$E_c = 22000 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3} \times \left(\frac{\rho_{bs}}{2200} \right)^2$$

Où E_c est le module d'Young du béton en MPa (module sécant entre $\sigma_c=0$ et $0.4 f_{cm}$, et ρ_{bs} la masse volumique sèche du béton en kg /m^3 .

La norme ACI propose la relation ci-dessous [46] :

$$E_c = 0.043 \rho_{bs}^{1.5} \sqrt{f_{ck}}$$

Cette dernière équation est considérée comme valable pour des valeurs de masse volumique comprises entre 1440 et 2480 kg/m^3 , et des valeurs de résistance à la compression comprise entre 21 et 35 MPa. Le module d'Young réel peut s'écarter jusqu' à 20% de la valeur calculée.

ZHANG et GJORV citent deux autres relations [51] :

La première, issue du règlement norvégien, est valable pour des bétons avec des contraintes à rupture supérieures à 85 MPa :

$$E_c = 9500 f_{cck}^{0,3} \times \left(\frac{\rho_{bs}}{2400}\right)^{1,5}$$

Où f_{cck} est la résistance caractéristique à la compression d'un cylindre de Ø100× 200 mm ($f_{ck}=0.9 f_{cck}$) en MPa.

La seconde relation, issue des travaux de SLATE et AL. [52], est valable pour des valeurs de résistance à la compression comprises entre 21 to 65 MPa et s'écrit :

$$E_c = (3320\sqrt{f_{ck}} + 6895) \times \left(\frac{\rho_{bs}}{2320}\right)^{1,5}$$

Des chercheurs proposent également des relations différentes par les modules d'Young dynamique ou statique et la vitesse ultrasonique d'impulsion des bétons entre le module d'Young et la résistance à la compression [53].

Tableau 9. Estimation du module d'Young d'un béton léger ($\rho_{bs}=1700 \text{ kg/m}^3$, $f_c= 30 \text{ MPa}$) par les différentes formules empiriques.

Ref. formule	EN 1992-1-1	[46]	[51]	[52]
E_c estimé(GPa)	18,3	14,1	14,8	14,1

Les modules d'Young de différents bétons légers obtenus expérimentalement par les différents auteurs donnés au tableau 5 sont également présentés sous forme de courbe en fonction de leur résistance à la compression à la Figure 6 .pour une résistance à compression à 28j variant entre 30-100 MPa, le module d'Young se situe entre 15-28GPa.

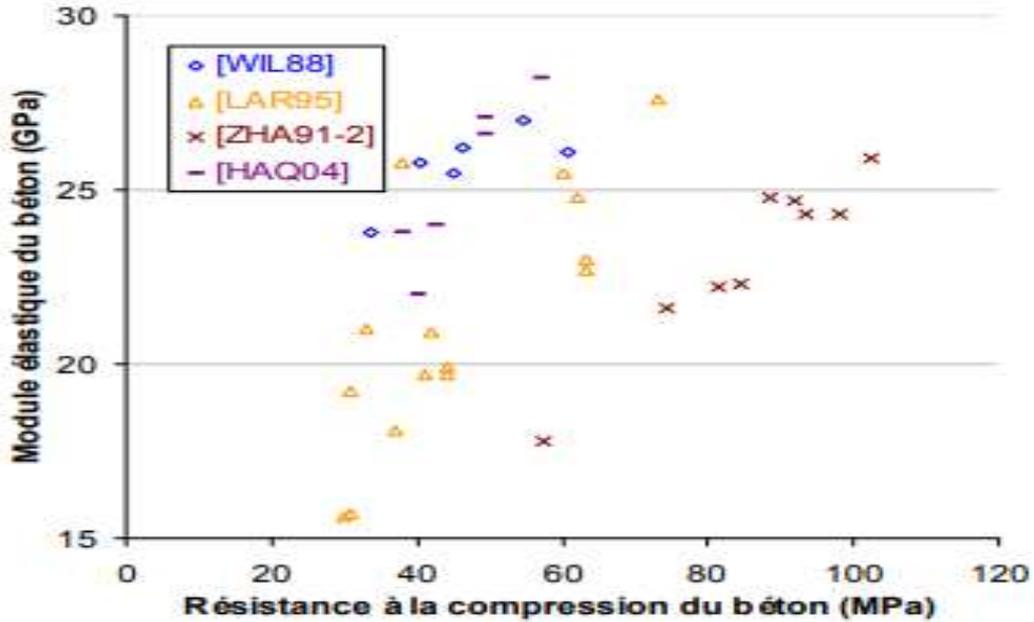


Figure 17. Évolution des modules d'Young de bétons légers en fonction de leur résistance à compression [51], [54], [55] et [56]

Ces valeurs (Figure17) sont confrontées aux estimations empiriques décrites précédemment. On constate qu'en général les formules en vigueur sous-estiment les modules d'Young des bétons légers et qu'il existe un écart important entre les valeurs estimées et les valeurs calculées.

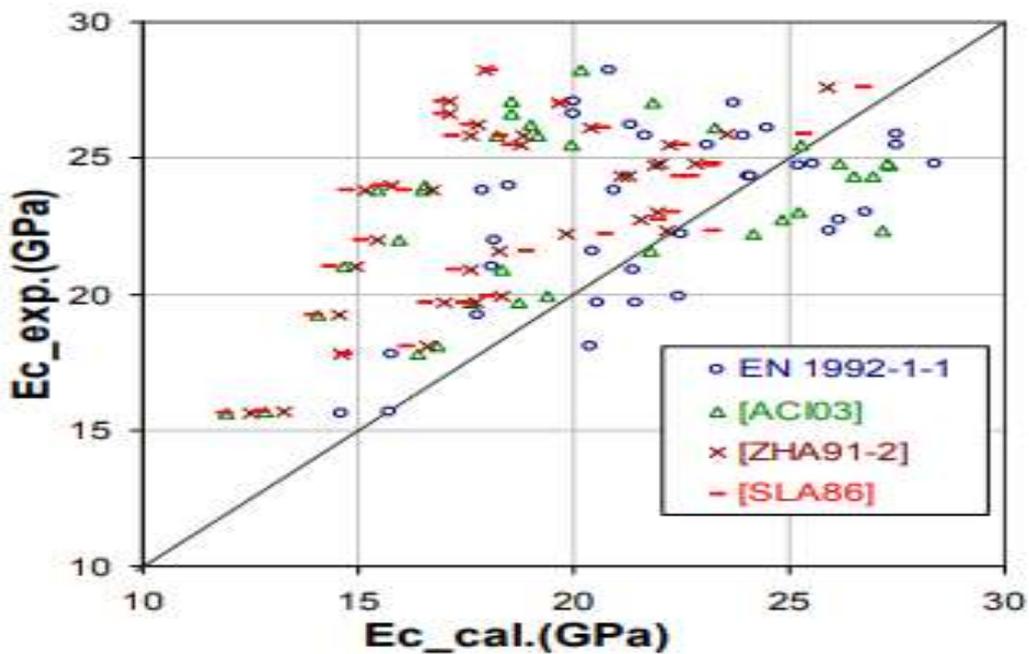


Figure 18. Confrontation des modules d'Young de bétons légers obtenus par les formules empiriques et les résultats expérimentaux de [51], [54], [55] et [56]

7. Domaines d'utilisation :

Les bétons légers peuvent être utilisés dans les structures selon leurs masses volumiques apparentes comme suit :

-Des bétons de remplissage, leur masse volumique apparente est comprise entre 300 et 1000 kg/m³, leurs résistances en compression sont souvent faibles et leurs caractéristiques thermiques sont bonnes.

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

-Des bétons de structure, leur masse volumique est comprise entre 1400 et 1800 kg/m³. Ils sont destinés à la constitution des structures grâce à leurs résistances mécaniques qui peuvent être du même ordre que celles des bétons ordinaires. Leur pouvoir isolant est relativement faible. [30]

Il peut être utilisé aussi pour la rénovation de plancher en bois ou en béton et le ragréage de sols et remblai.

8. Conclusion :

Quatre principaux facteurs sont à l'origine de l'intérêt que l'on porte aux matériaux de constructions allégés:

- L'épuisement des matériaux de construction traditionnels;
- Le développement considérable du marché des logements;
- La nécessité d'économiser l'énergie, tout en assurant le confort thermique dans l'habitat,
- Une réduction en poids peut assurer une économie considérable en argent et en main d'œuvre.

Les différentes propriétés des bétons légers ont été largement étudiées. Cette étude a permis de mettre en évidence l'influence notable des granulats légers sur les performances mécanique du béton léger, à l'inverse des granulats de densité normale. Cette influence est apparue néanmoins complexe à caractériser, d'une part par la difficulté de mesurer de façon adéquate la résistance et le module d'Young des granulats et d'autre part par les processus physiques, chimiques et mécaniques entrant en jeu à l'interface pâte – granulats et qui influent sur le comportement intrinsèque du granulat.

Chapitre III :
Matériaux et
Méthodes d'essais

1. Introduction :

La caractérisation des matériaux utilisés dans la composition d'un béton joue un rôle très important sur ses propriétés et ses performances ultérieures. En effet, les propriétés essentielles du béton sont largement influencées par les caractéristiques de ses constituants.

De ce fait, la normalisation des modes d'essais et d'identification des composants d'un béton, selon les normes en vigueur, devient une condition nécessaire pour l'obtention d'un béton avec des résultats expérimentaux comparables avec ceux donnés dans la littérature.

Dans ce chapitre, on présente les différents matériaux à utiliser dans la confection des bétons à étudier ainsi que les essais à effectuer selon les normes en vigueur.

Le choix des matériaux s'est porté, tout d'abord, sur leur disponibilité dans la région d'Aine Témouchent. Les matériaux utilisés sont :

- 1. Le sable de mère
- 2. Deux fractions de granulats calcaires (2/5, 3/8)
- 3. Le ciment
- 4. La pouzzolane
- 5. Adjuvant super plastifiant
- 6. Eau de gâchage

2. Matériaux utilisés :

Pour des considérations pratiques, on a choisi d'employer des matériaux disponibles dans la région d'Aine Témouchent. Ce choix a permis de garantir la même provenance des matériaux et d'assurer un contrôle régulier pendant la période d'essai.

2.1. Ciment :

Pour la confection des éprouvettes de dimension $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$ on a utilisé le ciment de la cimenterie de BENI SAF type CEMII 42.5. Un ensemble d'essais normalisés mécaniques, physiques, chimiques et minéralogiques ont été effectués au niveau du laboratoire de la cimenterie de BENI SAF et au laboratoire de génie civil d'Ain Témouchent pour permettre l'identification de ce ciment selon la norme NA 445.



Figure 19.le sac de ciment.

2.1.1. Les caractéristiques physiques :

Les principales caractéristiques des différents ciments sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau 10.Récapitulatif des résultats des essais sur ciments.

Type ciments		CPI CEM II / A 42.5
Ciment anhydre	Masse volumique apparente (g/cm)	1.09
	Masse volumique absolue (g/cm)	3.11
	Refus au tamis de 0.1 mm (%)	2.57
	Surface spécifique Blaine (cm ² /g) NF EN 196-5	38.5
Pâte de ciment	Consistance normalisée (%) NF EN 196-3	27
	Début de prise NF EN 196-3	2h20min
	Fin de prise	3h40min

Chapitre III : Matériaux utilisé et méthodes d'essais

2.2.2. Analyse chimique sur ciment :

Ces analyses ont été effectuées par le laboratoire de la cimenterie de BENI SAF, Conformément à la norme NA P 15 472. dont les résultats sont groupés dans le tableau 2 :

Tableau 11.Composition chimique de ciments [laboratoire de CICA].

Elément (%)	CPJ CEM II /A 42.5
SiO ₂	20.39
CaO	4.91
Al ₂ O ₃	3.14
Fe ₂ O ₃	62.00
MgO	1.13
SO ₃	2.57
Perte au feu	1.84
Totale	95.98
Insolubles (SiO ₂ non combinée)	0.50
Insolubles (CaO ₂ libre)	1.63

2.2.3. Analyse minéralogique des ciments :

Selon les formules de composition de Bogue, on a peu déterminé les constituants minéralogiques du clinker Portland analysé, ce qui a donné les résultats montrés par le tableau suivant :

Tableau 12.Composition minéralogique de ciment.

Constituant	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
CPJ CEM II /A	62.00	16.13	7.78	11.26

On constate clairement que les silicates bi-calciques et tri-calciques sont en quantités prépondérantes dans les ciments CPJ CEM II/A 42.5, ces éléments pourraient provoques des résistances importantes à court terme et développer de bonnes résistances mécaniques à long terme.

2.2. Sable :

Le sable utilisé dans la fabrication des bétons hydraulique étudiés est un sable naturel 0/4 (SN) provient du site de Terga, sa nature minéralogique est siliceuse notamment dans ses fractions les plus fines. Ce sable est propre avec des grains généralement isométriques et arrondis. Il est séché et criblé offrant ainsi toutes les garanties de qualité et de régularité.

2.3. Gravier ordinaire et gravier pouzzolanique :

Pour les besoins de notre étude, on a utilisé deux types de granulats, le premier est un gravier concassé (Photo 3.2) et l'autre est d'origine pouzzolanique (Photo 3.3)



Figure 20. Gravier pouzzolane et Gravier ordinaire.

Pour la confection du béton ordinaire, on a utilisé un gravier concassé (GGO) provenant de la carrière d'EL MALEH

La pouzzolane naturelle utilisée est une lave rougeâtre, extraite du gisement de Bouhamidi de la région de Béni-Saf à l'Ouest de l'Algérie.

Les granulats sont obtenus par concassage de la pouzzolane à l'état naturel puis criblés et tamisés de manière à obtenir les classes granulaires (3/8mm et 8/16mm).

2.3.1. Analyse chimique :

Tableau 13. Analyse chimique de la pouzzolane.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O ₃	K ₂ O	Cl	P.P
46.83	17.45	8.36	9.38	3.88	0.36	4.32	1.40	0.33	4.79

2.3.2. Analyse minéralogique :

Tableau 14. L'analyse minéralogique de l'adjuvant

Anorthite	(CAO, Al ₂ O ₃ , SiO ₂)	38%
Pyroxène	(Mg, Fe, 2SiO ₆)	61%
Verre volcanique		15%
Analcime	(6Mg AlSi ₆) (OH) ₈	05%
Hématite +biotite	(Fe ₂ O ₃) + (2K (Fe Mg) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂)	07%
Autre minéraux (basalte, calcite, argile.....)		06%

2.4. Adjuvant :

Les adjuvants sont des produits solubles dans l'eau qui incorporés aux bétons à des doses qui doivent être inférieures ou égales à 5% du poids de ciment permet d'améliorer certaines de ses propriétés.

Dans notre étude on a utilisé le Super plastifiant Haut réducteur d'eau, permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. En plus de sa fonction principale de super plastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton. Il se caractérise par :

- Forme.....Liquide
- Couleur.....Marron
- PH.....8,2
- Densité..... 1,20 ± 0,01
- Teneur en chlore.....< 1g/L

Grâce à ses propriétés l'adjuvant permet :

Sur béton frais :

- d'améliorer la fluidité
- d'augmenter la maniabilité
- de réduire l'eau de gâchage
- d'éviter la ségrégation

Chapitre III : Matériaux utilisés et méthodes d'essais

- de faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques même à jeune âge
- de diminuer la porosité
- d'augmenter la durabilité
- de diminuer le retrait

2.5. L'eau de gâchage :

L'eau utilisée pour les différentes gâchées de béton est issue directement du robinet. La masse volumique prise en compte pour les calculs de formulation est la valeur conventionnelle de 1000 kg/m³. Les propriétés chimiques de cette eau n'ont pas fait l'objet de la présente étude. Elle est supposée potable et ne contenir aucune impureté nuisible (matières organiques, alcalis...) conformément à la norme NF P 18-303.

3. Essais effectués dans laboratoire :

Une série d'essais d'identification a été effectuée sur le matériau granulat utilisé, ciment sable gravillon et pouzzolane, Ces essais vont nous renseigner sur la caractéristique mécanique et physique du granulat.

3.1. Essais sur le Ciment :

On a utilisé le ciment de la cimenterie de BENI SAF type CPJ CEM II/A 42.5.

3.1.1. La masse volumique des liants :

- *La masse volumique apparente :*

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

Essai

-Placer l'entonnoir au dessus de la mesure de 1 litre.

- Fermer l'opercule.

-Verser environ 200g de liant sur la passoire et la faire descendre dans l'entonnoir à l'aide de la spatule.

-Ouvrir l'opercule, le liant tombe dans la mesure. Refermer l'opercule.

- Recommencer avec de nouvelles quantités du liant, jusqu'à ce que le bol déborde.

-Araser à la règle et peser le contenu. Soit M.

Chapitre III : Matériaux utilisés et méthodes d'essais

-La masse volumique apparente est: ($V = 1$ litre)

$$\rho_{app} = m \div V$$

$$\rho_{app} = 1113.8 \text{ g/l}$$

- La masse volumique absolue ;

Cet essai effectuer selon la norme NF EN 196-6

Les matériaux utilisés :

-Densitomètre Le Chatelier de 250 cm³ de volume.

-Un liquide qui ne doit pas être réactif avec le ciment (chaux), du toluène par exemple.

- Une balance de précision



Figure 21. Essai de la masse absolue du liant.

Essais

- Peser le pycnomètre vide m_0
- peser le pycnomètre remplie de toluène jusqu'au trait repère soit m_1
- éliminer l'air et remplir de toluène au trait repère peser m_3
- masse du toluène déplacé correspond au volume du corps :

$$mT = m_1 + m_2 - m_3$$

$$mT = 43 + 10 - 50.53$$

$$mT = 2.47$$

-volume de toluène déplacé :

$$VT = MT \div \rho_T$$

(ρ_T : masse spécifique du toluène).

$$VT = 2.85 \div 0.77$$

$$VT = 3.20$$

-masse spécifique de lechantillon :

$$PC = m2 \div VT$$

$$PC = 10 \div 3.20 = 3.12 \text{ g/ml}$$

3.2. Les essais sur Le sable ;

3.2.1. La masse volumique des sables :

Cet essai est normalisé selon la norme NF P 18-555

La masse volumique absolue et apparente des granulats. Elles sont exprimées en kg/m^3 , la masse volumique absolue est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains.

La masse volumique apparente est la masse du matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides.

- *La masse volumique apparente :*

Cette masse volumique intègre les grains de l'agrégat ainsi que les vides compris entre les grains

Essais

-Mettre une quantité suffisante de sable dans l'appareil P.DETE

-Placer le récipient dessous l'ouverture de cône

-Laisser tomber ce sable, jusqu'à la saturation du récipient.

- Araser à la règle, et peser le contenu

-La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

$$Mvapp = (M2 - M1) / V1$$

M1 : la masse de récipient vide

. M2 : la masse de récipient + le sable.

V1: le volume de récipient

$$Mvapp = (2986 - 1504) / 1000 = 1,482 \text{ g/cm}^3$$

- La masse volumique absolue :

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolue de matière plain (volume de matière seule, pore à l'intérieure des grains exclues), après passage à l'étuve à 105°C.

Chapitre III : Matériaux utilisé et méthodes d'essais

Essais

Peser une fiole avec une quantité d'eau V1.

Pesés 300 g de sable M, et l'introduire dans la fiole (éliminer les bulles d'air)

Lire le nouveau poids V2.

Le volume absolu est :

$$V_{abs} = V2 - V1$$

La masse volumique absolue est :

$$M_{vabs} = M / vabs$$

$$M_{vabs} = 300 / (923.5 - 809) = 2.620 \text{ g/m}^3$$

3.2.2. Equivalent de sable :

Cet essai effectué selon la norme 18-597

Le sable est un élément très essentiel qui joue un rôle très important dans la composition de béton. Donc il faut être très vigilant dans le choix du sable qui a des meilleures caractéristiques qui donnent un béton solide homogène.

Cet essai, est utilisés de manière courante pour évalué la propreté des sables utilisés pour la composition du béton. L'essai consiste à sépare les particules fines continue dans le sable, une procédure normalisés permet de définir un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté du sable.

Essais

Pesés 150 g de sable

Tamiser dans le tamis 5 (floculat)

Equivalent de sable est donné par :

$$Esv = h2' / h1 \times 100$$

$$Esp = h2 / h1 \times 100$$

$$Esv = 10.50 \div 13 \times 100 = 80.76$$

$$Esp = 11.30 \div 15 \times 100 = 75.33$$

ESP : équivalent de sable mesuré ou piston

Esv : équivalent de sable mesuré visuellement

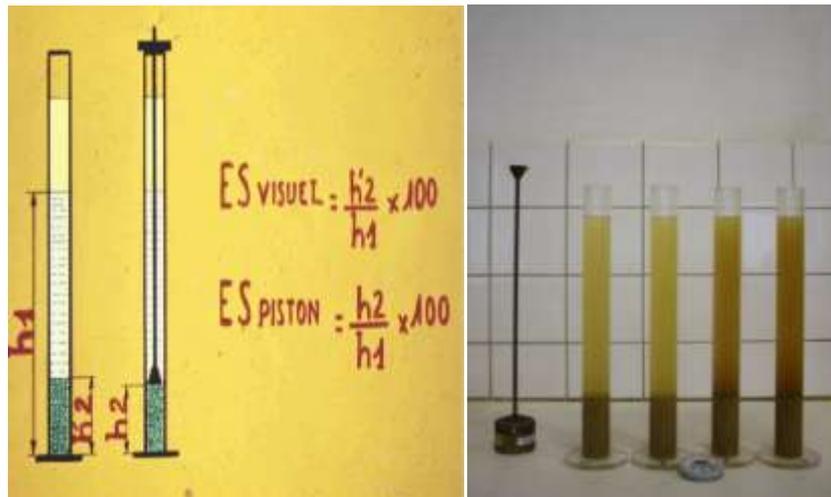


Figure 22. Equivalent sable.

h_1 : hauteur de sable propre et élément fins

h_2 : hauteur de sable propre seulement

h_2' : hauteur du sable propre seulement au piston

Les résultats de L'équivalent sable obtenus pour le sable, sent récapitulés sur le tableau suivant :

Tableau 15. Résultat d'équivalent sable.

Type de sable	ESV (%)	ESP (%)	Nature et qualité de sable
Sable de mer	80.76	75.33	Selon la norme NF P18 541, on a sable propre à faible pourcentage de fine

3.2.3. Coefficient d'absorption :

Cet essai est normalisé essai selon la norme NFP18-55

Le coefficient d'absorption est définir comme le rapport d'augmentation de la masse d'un échantillon imbibé par l'eau, à la masse de cet échantillon. Elle est définir par la relation suivant :

$$Ab (\%) = (Ma - Ms) / Ms \times 100$$

M_s : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105°C .

M_h : masse de l'échantillon imbibé par Léau.

Les résultats de Le coefficient d'absorption obtenus pour le sable, sent récapitulés sur le tableau suivant :

Tableau 16. Les coefficients d'absorption des sables.

	Ma	Ms	Ab (%)
Sable	300	209	43.54

3.2.4. L'analyse granulométrique :

Cet essai selon la norme NF 18-560

On appelle granulats un ensemble de grains minéraux, de dimensions comprises entre 0 et 125 mm, de provenance naturelle ou artificielle.

L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulats dont les dimensions sont comprises entre 0,063 et 125 mm.

On appelle :

- REFUS sur un tamis : la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis.
- TAMISAT (ou passant) : la quantité de matériau qui passe à travers le tamis.

Les Matériel utilisé:

- Les dimensions de mailles et le nombre de tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue.
- La norme actuelle (EN 933-2) préconise, pour l'analyse granulométrique, la série de tamis suivante en (mm): 5, 2.5, 1.25, 0.63, 0.315, 0.16, 0.08.



Figure 23. la série de tamis.

Essais

- Peser le refus du tamis ayant la plus grande maille : soit R_1 la masse de ce refus.
- Poursuivre la même opération avec tous les tamis de la colonne pour obtenir les masses des différents refus cumulés ...
- Les masses des différents refus cumulés R_i sont rapportées à la masse totale de l'échantillon m_1 .
- Les pourcentages de refus cumulés ainsi obtenus, sont inscrits sur la feuille d'essai. Le pourcentage des tamisats cumulés sera déduit.
- Les résultats de l'analyse granulométrique obtenus pour le sable, sont récapitulés sur le tableau suivant :

Tableau 17. L'analyse granulométrique de sable.

Tamis (mm)	Refus Cumulé (g)	Refus Cumulé (%)	Tamisât (%)
5	12.36	1.24	99
2.5	95.24	9.52	90
1.25	118.21	11.82	88
0.63	221.50	22.15	78
0.315	693.72	69.37	31
0.16	937.20	93.72	6
0.08	998.48	99.84	00

3.2.5. Module de finesse :

Cet essai est normalisé selon la norme NF P 18-304

Le module de finesse d'un sable est égal ou centième de la somme des refus exprimés en pourcentage pondérale sur les différents tamis sauf le tamis (008)

Il est donné par la relation suivante:

$$Mf = \sum R_i \div 100$$

Avec : R_i : refus cumulé en (%).

$$Mf = 1.24 + 9.52 + 11.22 + 13.15 + 69.37 + 99.84 \div 100$$

$$Mf = 2.07$$

Donc : notre sable est un sable préférentiel.

3.3. Le gravier ordinaire :

3.3.1. Les masses volumiques apparentes et absolues :

Cet essai est normalisé selon la norme NF EN 1262

En va déterminer les masses volumiques apparentes des graviers conformément à la norme NF EN 12620. La masse volumique apparente est comprise entre 1190 kg/m³ et 1600 kg/m³ et la masse volumique absolue est notamment élevée et est comprise entre 2550 kg/m³ et 2620 kg/m³.

- *Les masses volumiques absolues :*

-Choisir un échantillon de masse M

-Peser le pycnomètre déterminer sa masse P

-Remplir le pycnomètre jusqu'au repère et peser l'ensemble soit P2

-Mettre l'échantillon dans le pycnomètre vide et déterminer sa masse P3

-Ajouter de l'eau dans le pycnomètre jusqu'au repère et peser l'ensemble soit P4

-La relation de la masse volumique absolue du granulat est :

$$\rho_{abs} = (P3 - P1) \div (P2 - P1) - (P4 - P3)$$

Pour la classe 3/8 :

$$\rho_{abs} = (604.50 - 104.50) \div (1104.50 - 104.50) - (1416 - 604.50) = 2.652$$

Pour la classe 2/5 :

$$\rho_{abs} = (604.50 - 104.50) \div (1104.50 - 104.50) - (1414.60 - 604.50) = 2.632$$

- *Les masses volumiques apparentes :*

Volume de réceptions vide V=1000

La masse de réceptions vide P1

La masse de réceptions avec le matériau

La masse volumique apparente est donnée par la relation suivante : $\rho_{app} = P2 - P1 \div V$

Pour la classe 3/8 :

$$\rho_{app} = 2954 - 1504 \div 1000 = 1.45 \text{ t/m}^3$$

Pour la classe 2/5 :

$$\rho_{app} = 2904 - 1504 \div 1000 = 1.40 \text{ t/m}^3$$

Chapitre III : Matériaux utilisé et méthodes d'essais

Les résultats des masses volumiques obtenus pour les différents graviers, sont récapitulés sur le tableau suivant :

Tableau 18. Les masses volumiques des graviers.

Classe de Gravies	Mvapp (kg/m ³)	Mvabs (kg/m ³)
3/8	1450	2658
2/5	1400	2632

3.3.2. Coefficient d'absorption :

Cet essai est normalisé selon la norme NFP18-555

Le coefficient d'absorption est défini comme le rapport d'augmentation de la masse d'un échantillon imbibé par l'eau, à la masse de cet échantillon. Elle est définie par la relation suivante :

$$Ab(\%) = (Ma - Ms) / Ms \times 100$$

Ms : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105°C.

Mh : masse de l'échantillon imbibé par l'eau.

Les résultats du coefficient d'absorption obtenus pour les différents graviers, sont récapitulés sur le tableau suivant :

Tableau 19. Les coefficients d'absorption des graviers.

La classe de Gravies	Ma	Ms	Ab (%)
3/8	300	298.95	0.35
2/5	300	298.22	0.59

3.3.3. La teneur en eau :

La teneur en eau d'un granulats est le pourcentage d'eau en (en masse) par rapport au matériau sec elle est définie par la relation suivante :

$$W(\%) = (Mh - Ms) / Ms \times 100$$

Ms : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105°C.

Mh : masse de l'échantillon humide.

Les résultats du coefficient d'absorption obtenus pour la différente classe graviers, sont récapitulés sur le tableau suivant :

Tableau 20. La teneur en eau des graviers.

La classe de Gravies	Mh	Ms	W (%)
3/8	500	499.40	0.12
2/5	500	407.09	22.79

3.3.4. Los Angeles :

Cet essai est normalisé selon la norme NFP18-555

Consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à **1,6 mm** produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés dans la machine Los Angeles.



Figure 24. La machine de Los Angeles.

Et pour but de déterminer la résistance à la fragmentation par choc et la résistance obtenue par frottement des granulats.

Essai

Tamiser le 3/8 à travers les deux tamis 6.3 et 4 l'un sur l'autre

On prend +5000g de refus de tamis 4

On le lave et on sèche dans l'étuve de séchage (24h, 105°C).

On prend seulement 5000g de gravier et on le met avec 7 boules à l'intérieur du cylindre de la machine de Los Angeles M_0

Mettre la machine en marche à 500 tours à une vitesse de rotation comprise entre 31 et 33 tours/min.

Récupérer le gravier et les boules après l'essai.

Tamiser le matériau sur le tamis 1.6 mm.

Chapitre III : Matériaux utilisés et méthodes d'essais

Laver les granulats restant au tamis 1.6 mm.

Étuver le refus à 105°C.

Peser le refus en gramme près M1

La résistance à la fragmentation aux chocs exprimés par le coefficient Los Angeles L_A :

$$LA = (M_0 - M_1) / M_1 \times 100$$

$$LA = (500 - 401.25) / 401.25 \times 100 = 24.61$$

Les résultats de Le coefficient d'absorption obtenus pour les différentes classe graviers, sont récapitulés sur le tableau suivant :

Tableau 21. Les résultats de los Angeles.

Coefficient Los Angeles L_A	Nature de graviers
24.61	Dur

3.3.5. Analyse granulométrique :

Cet essai est normalisé selon la norme NF P18 560

Les résultats de l'analyse granulométrique obtenus pour les différentes classe (3/8 et 2/5) des graviers, sont récapitulés sur le tableau suivant :

$$M = 2000g \quad M_s = 1985.03g$$

Tableau 22. Analyse granulométrique du gravier de classe 3/8.

Tamis	Refus cumulé	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
8	00	00	100
6.3	185.60	9.35	91
5	872.74	43.97	56
2.5	1370.49	69.04	31
1.25	1967.31	99.88	01
0.63	1982.15	99.86	00
Fond	02		

M=2000g Ms=1989.95

Tableau 23. Analyse granulométrique du gravier de classe 2/5.

Tamis	Refus cumulé	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
6.3	00	00	100
5	85	4.27	96
2.5	1611	80.96	19
1.25	1931	97.03	3
0.63	1988	99.90	00
Fond	01		

3.4. Le gravier pouzzolanique :

3.4.1. Les masses volumiques apparentes et absolues :

Les résultats de la masse volumique obtenus pour les différentes classe des pouzzolanes, sent récapitulés sur le tableau suivant :

Tableau 24. Masse volumique abs de la pouzzolane.

Classe	MV abs (3/8)	MV abs (2/5)
1 ^{er} essai	1995	1915
2 ^{eme} essai	2000	1870
3 ^{eme} essai	2010	1920
MV abs Moy (kg/m ³)	2001	1901

Les masses volumiques absolues pour chaque classe granulaire sont :

Mvabs (3/8) =2000 kg/m³

Mvabs (2/5) =1900 kg/m³

Les résultats de la masse volumique apparente obtenus pour les différentes classe des pouzzolanes, sent récapitulés sur le tableau suivant :

Tableau 25.Masse volumique apparente de la pouzzolane.

Classe	(2/5)	3/8
MV app (kg/m ³)	1155	1190

Les masses volumiques apparentes pour chaque classe granulaire sont :

$$Mv_{app} (3/8) = 1190 \text{ kg/m}^3$$

$$Mv_{app} (2/5) = 1155 \text{ kg/m}^3$$

3.4.2. Absorption du granulat :

Cet essai est normalisé selon la norme NFP18-555

Les résultats de l'absorption du granulat obtenus pour les différentes classe des pouzzolanes, sont récapitulés sur le tableau suivant :

Tableau 26.coefficient d'absorption de la pouzzolane.

Classe	2/5	3/8
Ms (kg)	0.1888	0.1906
Mi (kg)	0.222	0.2174
Ab	17.59%	14.06%

3.4.3. L'analyse granulométrique

Pour cette pouzzolane nous allons procéder à une analyse granulométrique sur des échantillons de pouzzolanes de classes différentes :(3/8), (2/5).

Les résultats de l'analyse granulométrique obtenus pour les différentes classe des pouzzolanes, sont récapitulés sur le tableau suivant :

$$M = 2000$$

$$M_s = 1988.50$$

Tableau 27. Analyse granulométrique de la pouzzolane de classe 3/8.

Tamis (mm)	Refus cumulé (g)	Refus cumule (%)	Tamisât (%)
10	00	00	100
8	20.10	1.01	99

Chapitre III : Matériaux utilisé et méthodes d'essais

6.3	190.50	9.58	90
5	895.40	45.03	55
2.5	1405.10	70.66	29

M=2000g

Tableau 28. Analyse granulométrique de la pouzzolane de classe 2/5.

Tamis (mm)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât (%)
6.3	00	00	100
5	23	1.16	99
2.5	1500	75.38	25
1.25	1938	97.39	03
0.63	1989	99.95	00
Fond	0.5		

4. Formulations des bétons en fonction du dosage de ciment sans adjuvant :

Le dosage de ciment joue un rôle très important dans la valeur finale de la résistance à la compression des bétons. Ce qui va permettre d'analyser de près l'effet du dosage en ciment sur la résistance des bétons à base de granulats pouzzolanique, ainsi sur leurs masses volumiques. Pour cela nous avons préparé une composition une fois avec granulats pouzzolaniques et d'autre fois avec le gravie en variant le dosage de ciment.

On présente dans les tableaux ci-dessous les formules du béton à base des granulats de la pouzzolane et béton à base des granulats ordinaire (béton témoin) avec les deux dosages du ciment

Tableau 29. La formule de béton à base de granulats pouzzolane.

composition	Ciment (kg)	Sables (kg)	Granulats pouzzolane 2/5 (kg)	Granulats pouzzolane 3/8 (kg)	Eau (L)	E/C
Pour 1 m ³	350	535	248	423	210	0.6

Chapitre III : Matériaux utilisé et méthodes d'essais

Pour 16 moules (7×7×7)	2,8	4,28	1,98	3,38	1,68	0,6
------------------------	-----	------	------	------	------	-----

Tableau 30. La formule de béton ordinaire.

composition	Ciment (kg)	Sables (kg)	Gravier 2/5 (kg)	Gravier 3/8 (kg)	Eau (L)	E/C
Pour 1 m ³	350	567	369	596	168	0.48
Pour 16 moules (7×7×7)	2,8	4,54	2,95	4,77	1,34	0,48

Tableau 31. La formule de béton à base de granulats de la pouzzolane.

composition	Ciment (kg)	Sables (kg)	Granulats pouzzolane 2/5 (kg)	Granulats pouzzolane 3/8 (kg)	Eau (L)	E/C
Pour 1 m ³	400	535	248	423	240	0.6
Pour 16 moules (7×7×7)	2,8	4,28	1,98	3,38	1,92	0,6

Tableau 32. La formule de béton ordinaire.

composition	Ciment (kg)	Sables (kg)	Gravier 2/5 (kg)	Gravier 3/8 (kg)	Eau (L)	E/C
Pour 1 m ³	400	567	369	596	192	0.48
Pour 16 moules (7×7×7)	2,8	4,54	2,95	4,77	1,54	0,48

5. Formulations des bétons en fonction du dosage de ciment avec adjuvant :

Après avoirs préparer certains compositions, il est devenu intéressent de connaitre quelles sont les améliorations qui peuvent être apporté par l'utilisation d'un super-plastifiants pour haute résistance mécanique.

On utilise 1.5 % de l'adjuvant super-plastifiants pour les deux types de bétons

Tableau 33. La formule de béton à base de granulats pouzzolane.

composition	Ciment (kg)	Sables (kg)	Granulats pouzzolane 2/5 (kg)	Granulats pouzzolane 3/8 (kg)	Eau (L)	E/C	Adjuvant (kg)
Pour 1 m ³	350	535	248	423	1 35	0.38	1.5%
Pour 16 moules (7×7×7)	2,8	4,28	1,98	3,38	1,40	0,5	0.048

Tableau 34. Formulation du béton ordinaire.

composition	Ciment (kg)	Sables (kg)	Gravier 2/5 (kg)	Gravier 3/8 (kg)	Eau (L)	E/C	Adjuvant (kg)
Pour 1 m ³	350	567	369	596	135	0.38	1.5%
Pour 16 moules (7×7×7)	2,8	4,54	2,95	4,77	1,12	0,38	0.048

Tableau 35. La formulation du béton à base des granulats de la pouzzolane.

composition	Ciment (kg)	Sables (kg)	Granulats pouzzolane 2/5 (kg)	Granulats pouzzolane 3/8 (kg)	Eau (L)	E/C	Adjuvant (kg)
Pour 1 m ³	400	535	248	423	155	0.38	1.5%
Pour 16 moules (7×7×7)	2,8	4,28	1,98	3,38	1,60	0,38	0.048

Tableau 36. La formule de béton ordinaire.

composition	Ciment (kg)	Sables (kg)	Gravier 2/5 (kg)	Gravier 3/8 (kg)	Eau (L)	E/C	Adjuvant (kg)
Pour 1 m ³	400	567	369	569	155	0.38	1.5%
Pour 16 moules (7×7×7)	2,8	4,54	2,95	4,77	1,28	0,38	0.048

6. Étape de confection du béton :

Dans cette partie on explique le mode de travail de notre étude, pour un mètre cube de béton, on doit transférer les quantités pour un volume d'éprouvette de 7×7×7 cm³.



Figure 25. Moule de 7×7×7 cm³.

6.1. Préparation des mélanges :

Les bétons réalisés ont été confectionnés conformément à la norme NA 431 en vigueur, et une fois le malaxage manuel est terminé.



Figure 26. Préparation de mélange.

Mise en place du béton dans les moules :

Le choix du mode de mise en place dépend de la consistance du béton mesurée par l'essai d'affaissement conformément à la norme NA 431.

6.2.1. Le cône d'Abrams :

Le cône d'Abrams est un outil de mesure normalisé (NFP 18-451). Il détermine le taux d'affaissement du béton frais et donc sa consistance. La hauteur de l'affaissement du béton est mesurée en cm. La mesure de l'affaissement permet de vérifier si l'ouvrabilité du béton est conforme à celle souhaitée. Le dosage en eau du béton peut être ajusté selon le résultat de l'essai.

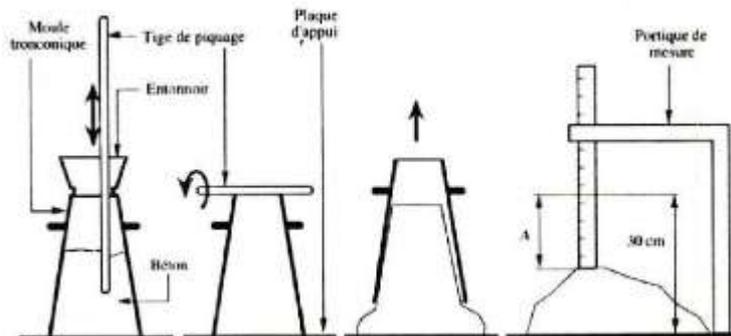


Figure 27. Le cône d'Abrams.

Les étapes

- Le cône doit être légèrement huilé. Il est rempli de béton, en trois couches.
- Chaque couche est piquée par 25 coups de façon répartie avec une tige de piquage.
- L'affaissement du béton est mesuré à l'aide du réglé sur portique.



Figure 28. L'essai d'affaissement du béton frais.

L'affaissement mesuré est inférieur ou égal 8cm alors c'est un béton plastique, nous avons procédé à la mise en place du béton dans la mole cubique de $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$ en trois couches d'égale importance par aiguille vibrante, conformément à la norme NF P 18-422, et accompagnons l'introduction d'un mouvement de répartition par la table vibrant prend 10 seconds.



Figure 29. La mise en place du béton.

Enfin, nous procédons à l'arasement de la surface supérieure de l'éprouvette à l'aide d'une règle d'arasement, conformément à la norme NF P 18-404.

6.2.2. La conservation des éprouvettes avant démoulage:

L'arasement terminé, les éprouvettes sont conservées, sans être déplacées pendant 24 heures \pm 1 heure, au sein de notre laboratoire à la température d'environ $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ et chacune d'entre-elle est numérotée (température de laboratoire).

6.2.3. Conservation après démoulage :

Le démoulage des éprouvettes s'est effectué avec le plus grand soin pour ne pas épaufrer les arrêtes.



Figure 30. Le démoulage des éprouvettes.

Après le démoulage, les éprouvettes ont été conservées à la même température, sous l'eau pendant 3 jours, 7 et 28, pour nous permettre la résistance à la compression à 3 jours, 7, et à 28 jours.



Figure 31. Conservation des éprouvettes dans un bain d'eau de 20C°.

7. La perte de masse :

Avant de conserver les éprouvettes dans un bain d'eau en pesant toutes les éprouvettes avant chaque écrasement on pèse à nouveau les éprouvettes.

La perte de masse d'éprouvette est mesurée comme suit :

$$\text{La perte de masse (\%)} = [(M1 - M2)/M1] \times 100$$

M1 : la masse supérieure

M2 : la masse inférieure

8. La résistance à la compression :

La résistance à la compression du béton est généralement considérée comme sa plus importante propriété bien que, dans de nombreux cas pratiques. Néanmoins, la résistance à la compression

Chapitre III : Matériaux utilisés et méthodes d'essais

projetée généralement une image globale de la qualité d'un béton puisqu'elle est directement reliée à la structure de la pâte de ciment hydraté.

8.2. La conduite de l'essai :

L'essai pour la détermination de la résistance à la compression des éprouvettes, est exécuté conformément aux prescriptions de la norme NA 427. La contrainte de rupture est donnée directement par la machine d'essai avec une précision de 250 KN.



Figure 32. Machine d'essais de la compression.

L'éprouvette est placée, face d'écrasement vers le haut et centrée (l'erreur de centrage doit être inférieure à 0.06)

8.3. La mise en charge

Le contact de l'éprouvette au plateau supérieur comportant la rotule doit être uniforme. La machine de compression doit subir une charge de manière continue et uniforme sans chocs de sorte que l'on provoque un accroissement uniforme de contrainte de (250 KN) jusqu'à la rupture de l'éprouvette.



Figure 33. La rupture de l'éprouvette.

9. Conclusion :

Nous avons montré dans ce chapitre une caractérisation sur les matériaux utilisées dans notre projet, ainsi que les procédures expérimentales qui vont nous permettre d'analyser nos résultats afin d'évaluer l'influence de granulat du béton sur sa résistance à la compression.

Dans le prochain chapitre on va présenter les résultats des les essais de la perte de massa et la résistance à la compression.

Chapitre IV :

Résultats et

Interprétations

1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons présenter les courbes granulaires obtenues par les matériaux et les résultats des essais réalisés sur des éprouvettes en béton léger à base des granulats pouzzolanique, l'essai consiste à mesurer la perte de masses et mesurer la résistance à la compression après avoir été conservés dans l'eau saturée en chaux pendant 3, 7, 28 et 60 jours.

A l'exception des granulats légers, les constituants et les méthodes de formulation utilisées sont les mêmes que pour les bétons de granulats rigides. Une attention particulière doit cependant être portée à l'absorption des granulats.

2. La courbe des masses volumiques :

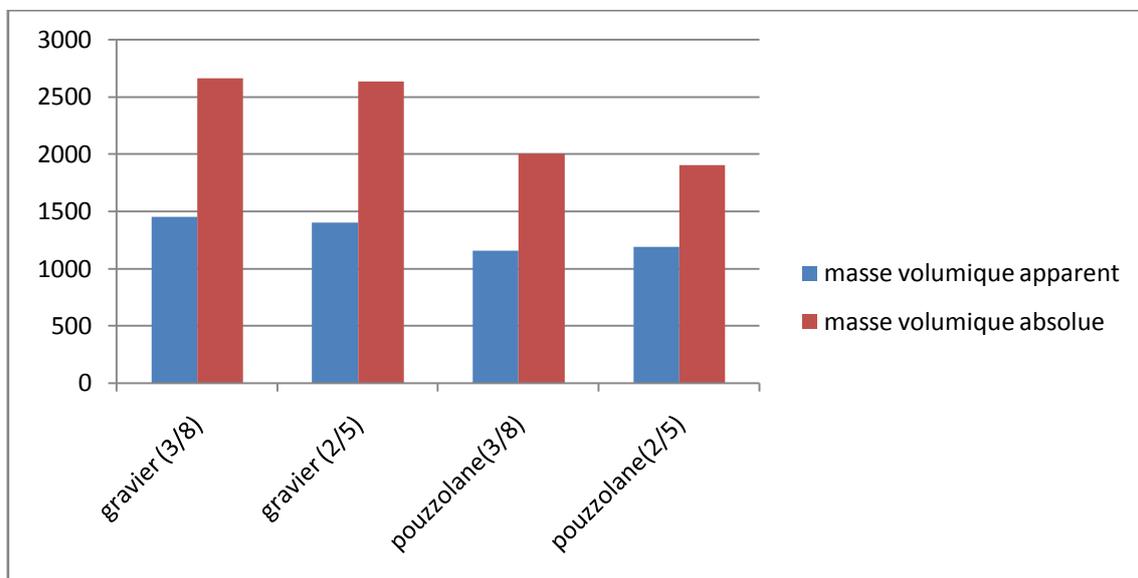


Figure 34. Évaluation des masses volumiques.

On remarque que la masse volumique absolue des granulats de pouzzolane est inférieure à ce lui de gravier, mais la masse volumique apparent des granulats presque égaux.

3. Les courbes granulométriques :

Les résultats obtenus par le tamisage des granulats dans le chapitre précédent, sont représentés sous forme d'un tracé (courbe granulométrique) sur un diagramme granulométrique comportant en abscisse le diamètre du tamis (mm) et en ordonnée le pourcentage des tamisât.

3.1. La granulométrie de sable :

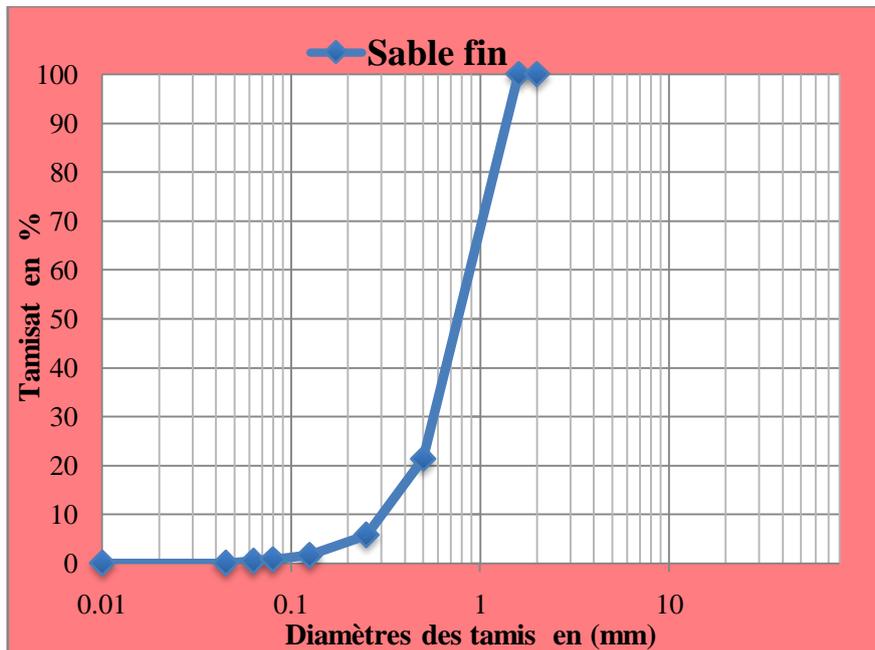


Figure 35. Granulométrie de sable

D'après la courbe granulométrique de la figure 35, on remarque qu'elle a un tracé continué, uniforme et étalé, qui nous confirme que le sable présente une bonne granulométrie bien gradué, et qu'elle se situe dans le fuseau recommandé par la norme NFP 18-560.

3.2. Les courbes granulométriques des granulats :

3.2.1. La granulométrie de gravie classe (2/5) :

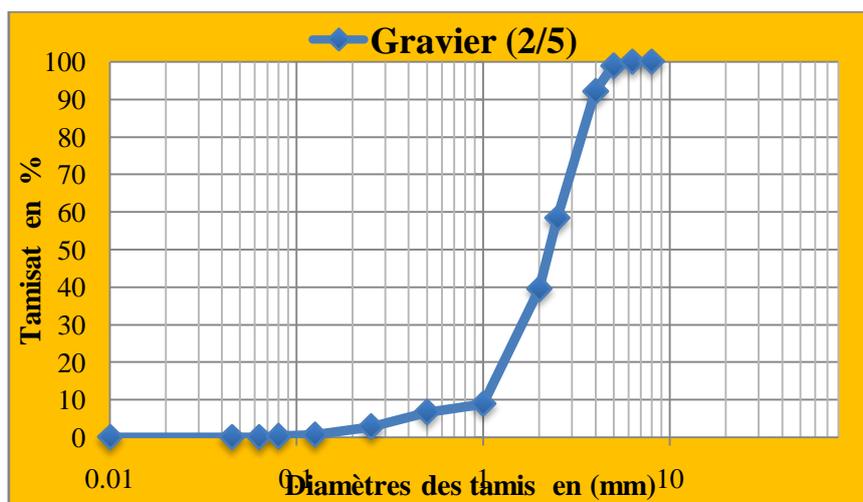


Figure 36. Granulométrie de gravie (2/5).

Chapitre IV : Résultats et Interprétations

La figure 36 nous montre que la courbe de gravier 2/5 est continue c.à.d. elle ne présente pas de discontinuité dans la répartition granulaire, comme elle est uniforme et qu'elle se situe à l'intérieure du fuseau de référence, qui nous assure la bonne répartition des granulats.

3.2.2. La granulométrie de gravie classe (3/8) :

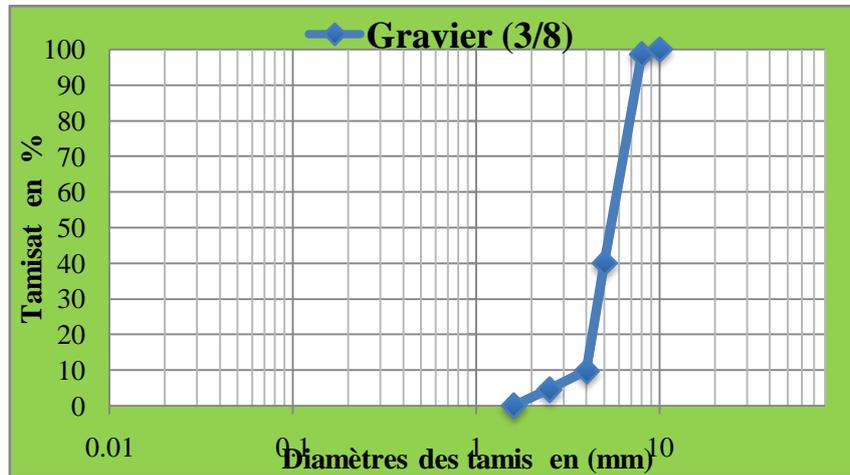


Figure 37. Granulométrie de gravie (3/8)

D'après la figure 37, On remarque que le gravier de classe 3/8 est bien séré dans le fuseau qui nous montre la bonne distribution de différentes dimensions des granulats.

3.2.3. La granulométrie de granulats pouzzolanique (2/5):

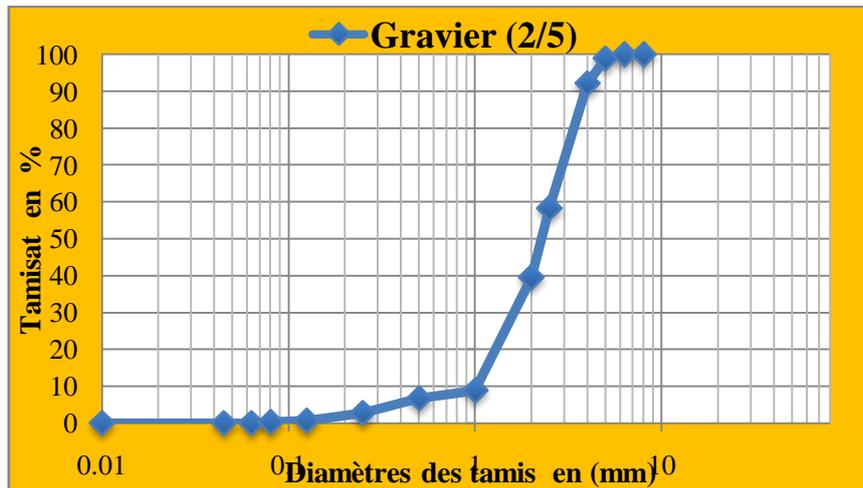


Figure 38. Granulométrie de la pouzzolane

La figure 38 nous montre que la courbe de gravier 2/5 est continue c.à.d. elle ne présente pas de discontinuité dans la répartition granulaire, comme elle est uniforme et qu'elle se situe à l'intérieure du fuseau de référence, qui nous assure la bonne répartition des granulats de pouzzolane.

3.2.4. La granulométrie de granulats pouzzolanique (3/8) :

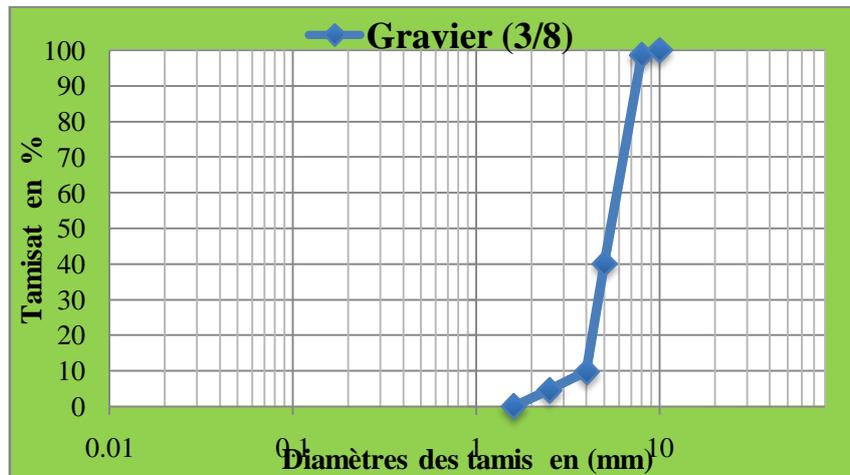


Figure 39. Granulométrie de la pouzzolane

D'après la figure 37, On remarque que le gravier de classe 3/8 est bien séré dans le fuseau qui nous montre la bonne distribution de différentes dimensions des granulats de pouzzolane.

4. Résultats de la perte et le gain de masse :

La codification de différent béton utilisé :

Tableau 37. Codification de béton utilisé.

BP350	Béton de granulats pouzzolanique dosage de ciment 350 kg
BO350	Béton de granulats ordinaire dosage de ciment 350kg
BP400	Béton de granulats pouzzolanique dosage de ciment 400 kg
BO400	Béton de granulats ordinaire dosage de ciment 400kg
BPA350	Béton de granulats pouzzolanique dosage de ciment 350 kg adjuvanté
BOA350	Béton de granulats ordinaire dosage de ciment 350kg adjuvanté
BPA400	Béton de granulats pouzzolanique dosage de ciment 400 kg adjuvanté
BOA400	Béton de granulats ordinaire dosage de ciment 400kg adjuvanté

4.1. Résultat de la perte et le gain des masses du béton en fonction de ciment sans adjuvant :

Chapitre IV : Résultats et Interprétations

Tableau 38. La perte et le gain de masse des bétons à 3j.

Les compositions de béton	La masse initiale (g)	La masse après 3j (g)	Différence de masse (%)
BP350	686,3	689,2	+0,450
BO350	711,7	710,4	-0,21
BP400	783,8	785,4	+0,20
BO400	832,3	828,9	-0,28

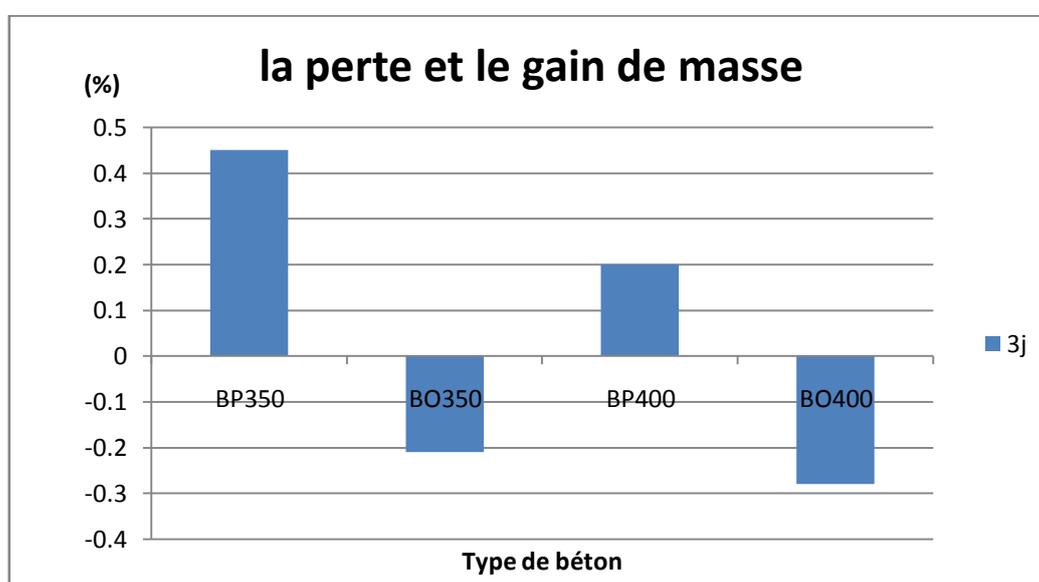


Figure 40 . Evaluation la perte et le gain de masse des bétons à 3j.

A l'âge de 3 jours on constate un gain de masse pour les bétons pouzzolanique et une perte de masse pour les bétons ordinaire est du a la formation des produit d'hydratation et pour le gain de masse il est du à l'absorption des granulats pouzzolaniques.

Tableau 39 . La perte et le gain de masse des bétons à 7j.

Les compositions de béton	La masse initiale (g)	La masse après 7j (g)	Différence de masse (%)
BP350	696,4	698,3	+0,47
BO350	732,6	730,6	-0,25
BP400	792,9	795,3	+0,21
BO400	842,1	840,5	-0,29

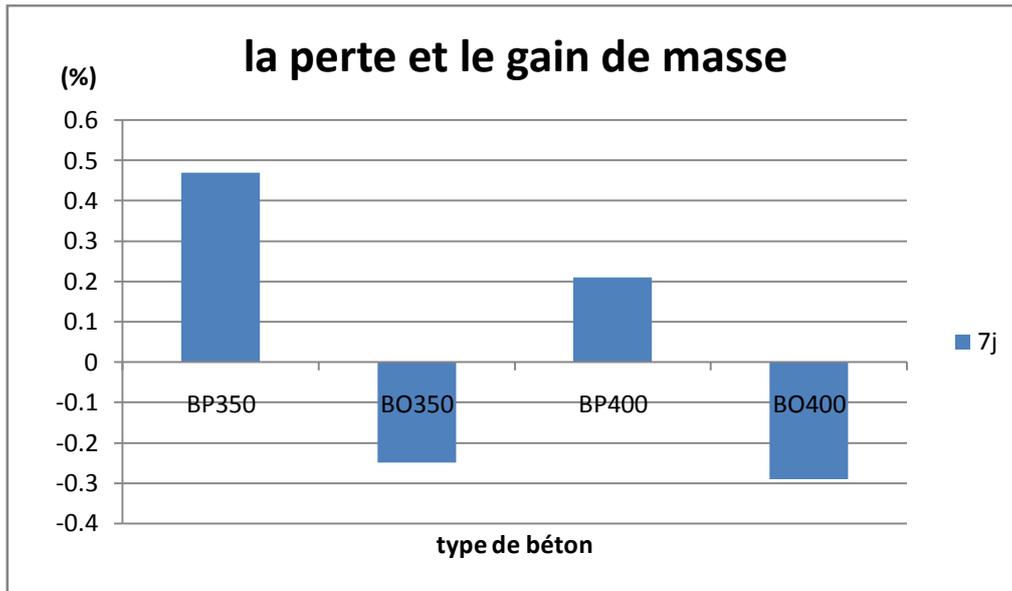


Figure 41. Evaluation la perte et le gain de masse des bétons à 7j.

Les mêmes résultats sont obtenue à l'âge de 7 jours on a toujours ce gain de masse pour les bétons pouzzolaniques et une perte de masse pour les bétons ordinaire.

Tableau 40. La perte et le gain de masse de béton à 28j.

Les compositions de béton	La masse initiale (g)	La masse après 28j (g)	Différence de masse (%)
BP350	688,4	690,4	+0,59
BO350	721,5	720,3	-0,29
BP400	784,6	787,2	+0,24
BO400	842,2	840,6	-0,33

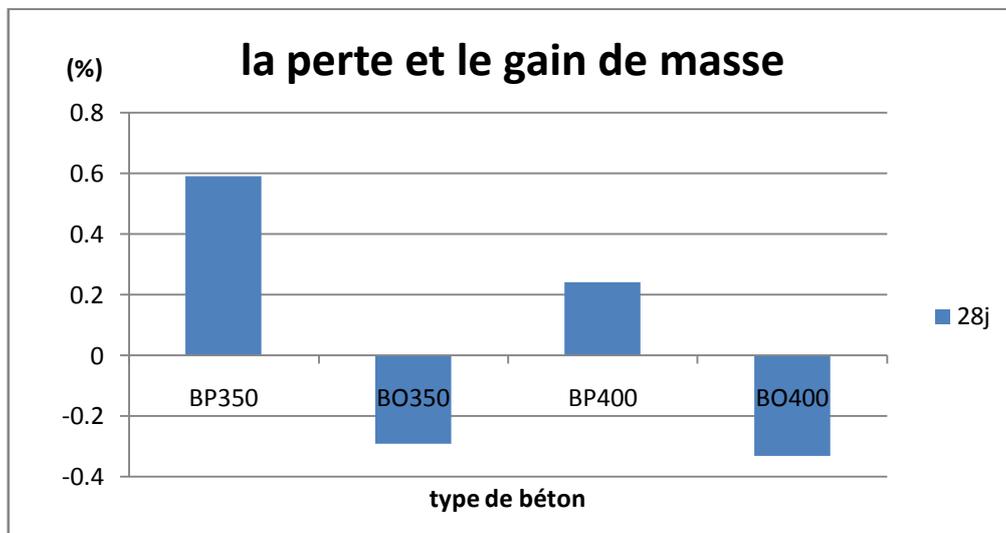


Figure 42. Evaluation la perte et le gain de masse des bétons à 28j.

Chapitre IV : Résultats et Interprétations

Pour les bétons pouzzolaniques on remarque que le gain de masse est stabilisé cela est dus à la saturation des granulats pouzzolaniques sachant que ces dernier sont d'une structures alvéolaires qui facilite la pénétration de l'eau ce résultat est confirmé par l'essai d'absorption. Tandis que pour les bétons ordinaire on a aussi une stabilité de la perte de masse car a cet âge la consommation des produit d'hydratation est presque total au delà de cette âge one ne remarque qu'une légers perte de masse.

Tableau 41. La perte et le gain de masse des bétons à 60j.

Les compositions de béton	La masse initiale (g)	La masse après 60j (g)	Le différent de masse (%)
BP350	676,3	679,2	+0,60
BO350	723,7	720,3	-0,30
BP400	779,8	783,4	+0,24
BO400	843,3	838,2	-0,33

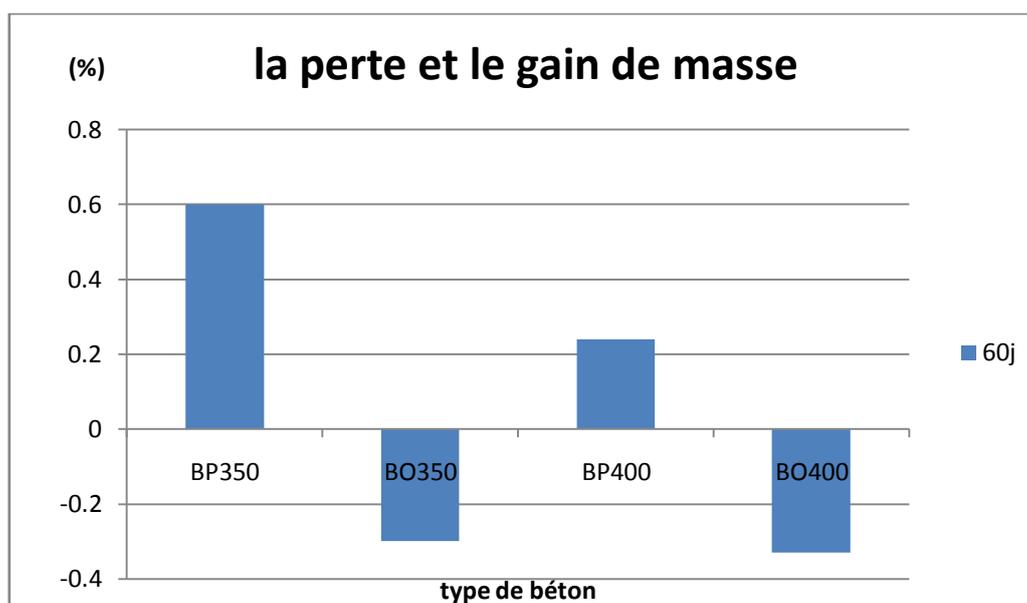


Figure 43. Evaluation du différent de masse des bétons à 60j.

Sur la figure 43 on remarque le même comportement qu'à l'âge 28 jours sachant qu'au delà de 28 jours on a la silice qui est présente dans la pouzzolane qui commence à réagir avec la portlandite présente dans le béton ce qui donne ces valeur de gain de masse, pour les béton ordinaire on a toujours une perte de masse. On remarque que la perte de masse pour le béton dosé à 400 est plus importante que celle 350 cela est tout a fait juste sachant que le phénomène d'hydratation est plus important lorsque le dosage est plus élevé.

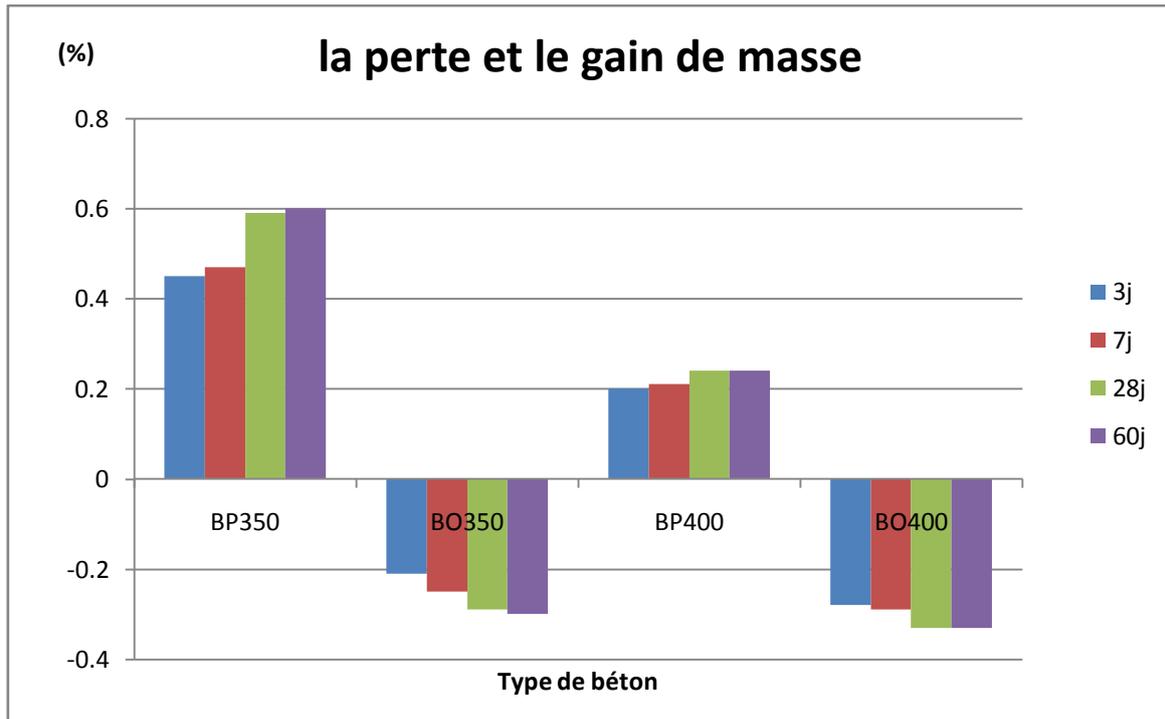


Figure 44. Evaluation la perte et le gain de masse des bétons en fonction de temps.

D'après les résultats des tableaux précédents, on remarque que l'évolution croissante de la masse des bétons à base de granulats pouzzolanique en fonction de temps causée par le gain en masse des éprouvettes conservées dans l'eau. On note que les courbes ont presque les mêmes allures.

Par contre on remarque l'évolution décroissante de la masse de béton à basse de granulats ordinaire en fonction de temps causée par le retrait

On voit aussi l'augmentation de la masse en fonction du dosage en ciment à cause de l'augmentation du pourcentage des éléments fins apportés par le ciment.

Chapitre IV : Résultats et Interprétations

4.2. Résultats de la perte et le gain de masse de bétons en fonction de ciment avec adjuvant.

Résultat de la perte des masses en fonction de dosage de ciment avec adjuvant dans les tableaux suivant.

Tableau 42. La perte et le gain de masse de béton adjuvante à 3j.

Les compositions de béton	La masse initiale (g)	La masse après 3j (g)	Le différent de masse (%)
BPA350	689,3	692,4	+0,450
BOA350	785,6	783,9	-0,21
BPA400	783,7	785,3	+0,20
BOA400	887,9	885,4	-0,28

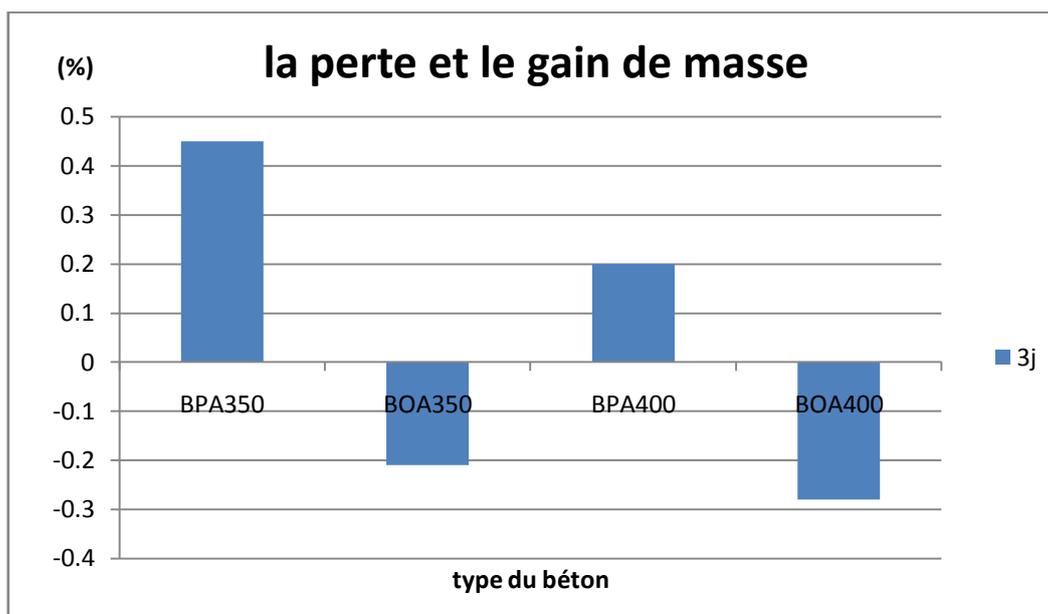


Figure 45. Evaluation la perte et le gain de masse de béton adjuvante à 3j.

Sur la figure 45 on constate deux comportements un gain de masse pour le béton pouzzolanique et une perte de masse pour le béton ordinaire.

Chapitre IV : Résultats et Interprétations

Tableau 43. La perte et le gain de masse de béton adjuvante à 7j.

Les compositions de béton	La masse initiale (g)	La masse après 7j (g)	Le différent a de masse (%)
BPA350	699,4	702,7	+0,47
BOA350	784,4	782,4	-0,25
BPA400	773,6	775,3	+0,21
BOA400	897,7	895,1	-0,29

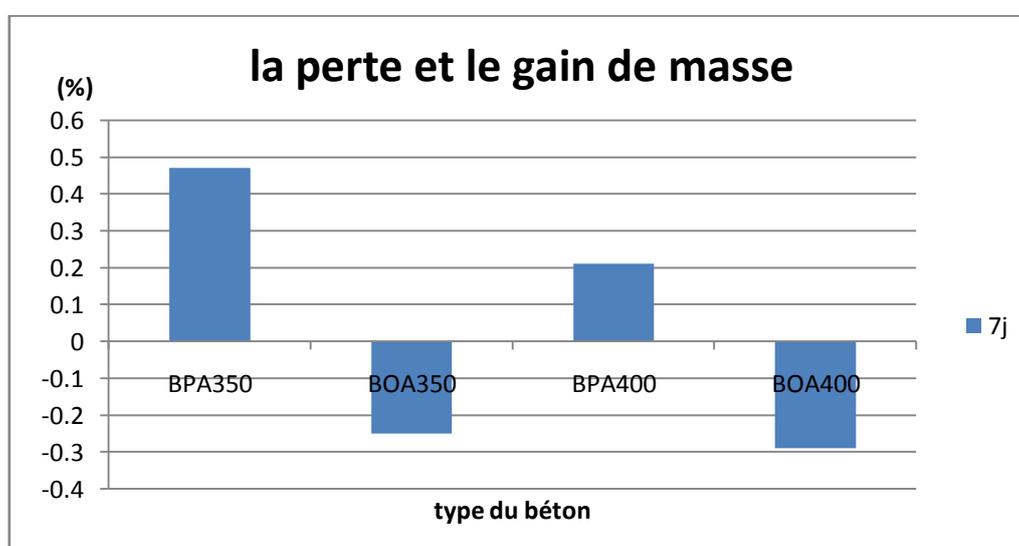


Figure 46. Evaluation la perte et le gain de masse de béton adjuvante à 7j.

Sur la figure 46 on remarque le même comportement qu'à l'âge 3j

Tableau 44. La perte et le gain de masse de béton adjuvanté à 28j.

Les compositions de béton	La masse initiale (g)	La masse après 28j (g)	Le différent de masse (%)
BPA350	688,2	692,3	+0,59
BOA350	775,4	773,1	-0,29
BPA400	793,7	795,6	+0,24
BOA400	887,2	884,3	-0,33

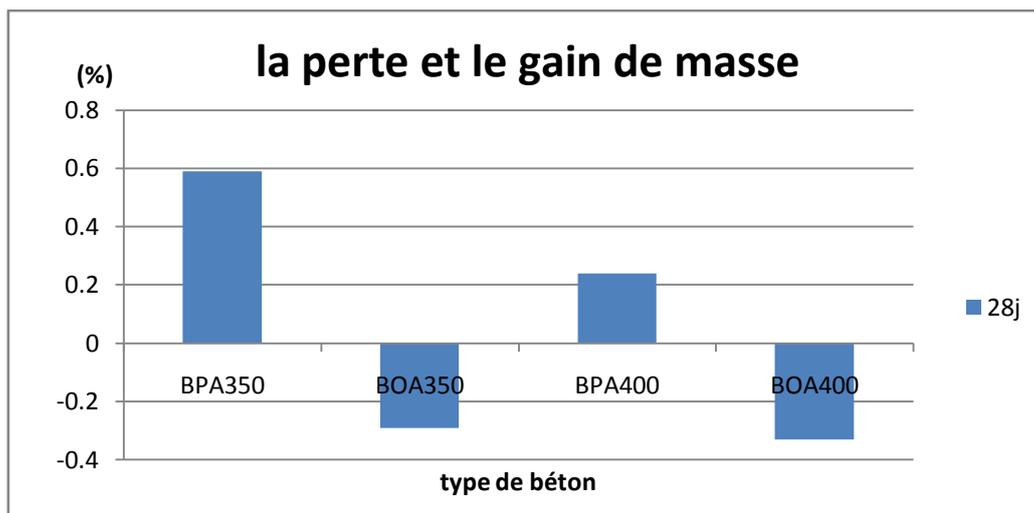


Figure 47. Evaluation la perte et le gain de masse de béton adjuvanté à 28j.

Tableau 45. La perte et le gain de masse de béton adjuvanté à 60j.

Les compositions de béton	La masse initiale (g)	La masse après 60j (g)	Le différent de masse (%)
BPA350	679,5	675,4	+0,60
BOA350	795,6	797,9	-0,30
BPA400	792,7	790,8	+0,24
BOA400	894,9	897,9	-0,33

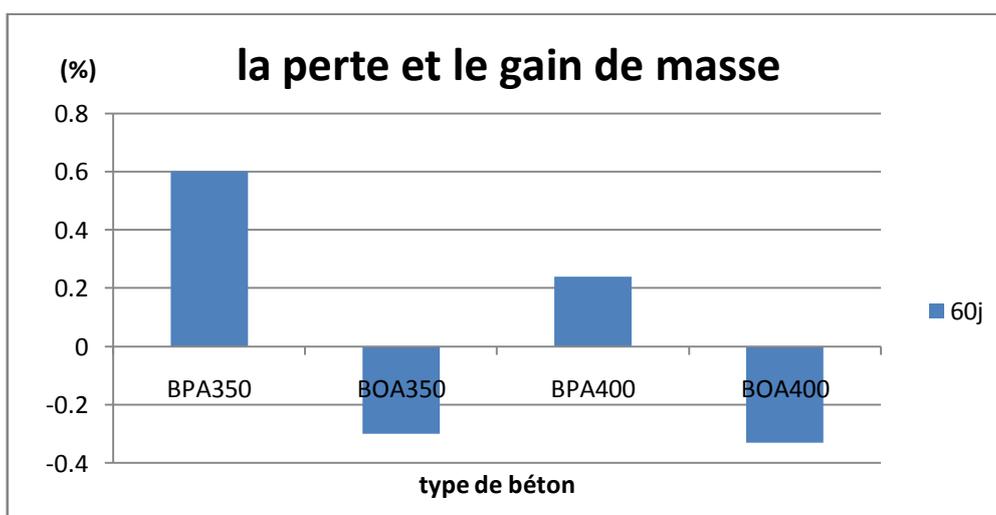


Figure 48. Evaluation la perte et le gain de masse de béton adjuvanté à 60j.

Chapitre IV : Résultats et Interprétations

On remarque dans les bétons avec adjuvant aux les mêmes comportements que les bétons sans adjuvant

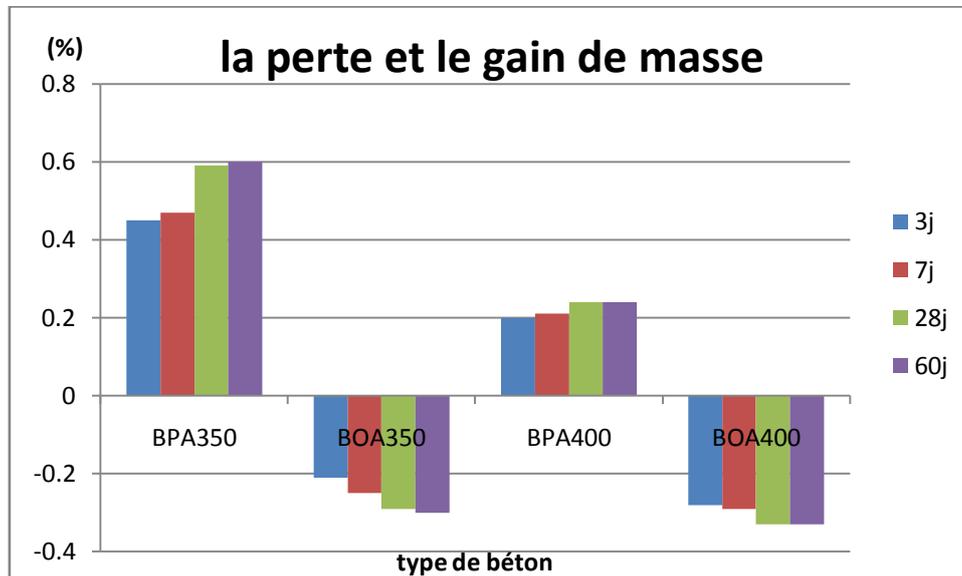


Figure 49. Evaluation de la perte et le gain de masse de béton adjuvé en fonction de temps.

D'après les tableaux précédents, on peut noter les mêmes observations que celles mentionnées au paragraphe précédent. De plus, l'augmentation de la masse en fonction de l'ajout d'adjuvant à l'âge de 28 jours.

L'étude de la masse des bétons nous a permis de déduire que les bétons à base des granulats pouzzolanique ont une densité inférieure à celle des bétons à base des granulats ordinaire, on raison que les granulats pouzzolanique est plus léger que le gravier.

L'utilisation d'un seul mode de conservation des éprouvettes qui est l'immersion totale dans l'eau, donne la même variation des masses des différents bétons à travers le temps.

5. Résultat de la résistance mécanique à la compression :

On présente dans les tableaux et les figures ci-dessous les différents résultats obtenus de la résistance à la compression (R_c) des deux types de béton ordinaire et béton à base de granulats léger en variant dans le dosage de ciment

5.1. Résultat de la résistance mécanique à la compression de béton sans adjuvant

La mesure de la résistance à la compression de béton à base des granulats pouzzolanique de dosage de ciment 350 kg après 3, 7, 28 jours

Chapitre IV : Résultats et Interprétations

Tableau 46. Résistance à la compression de béton léger dosage 350 kg.

Age	3 jours	7 jours	28 jours	60 jours
La résistance à la compression en MPa	9,10	14,40	20,50	21,00

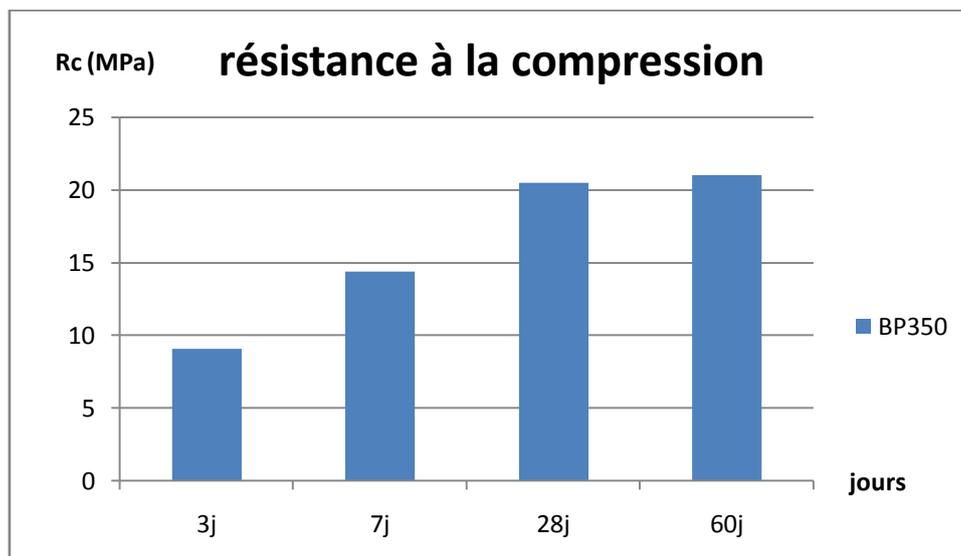


Figure 50: Evolution de la résistance à la compression de béton léger en fonction de temps.

Sur la figure 50 qui montre les résultats obtenus suite à l'essai de compression aux différents âges on constate qu'on a une évolution de la résistance pour le béton dosé 350 kg/m³ ; on remarque aussi que pour un béton léger il affiche de bonnes résistances.

Tableau 47. Résistance à la compression de béton ordinaire dosage 350 kg.

Age	3 jours	7 jours	28 jours	60 jours
La résistance à la compression en MPa	10,30	16,20	25,50	26,30

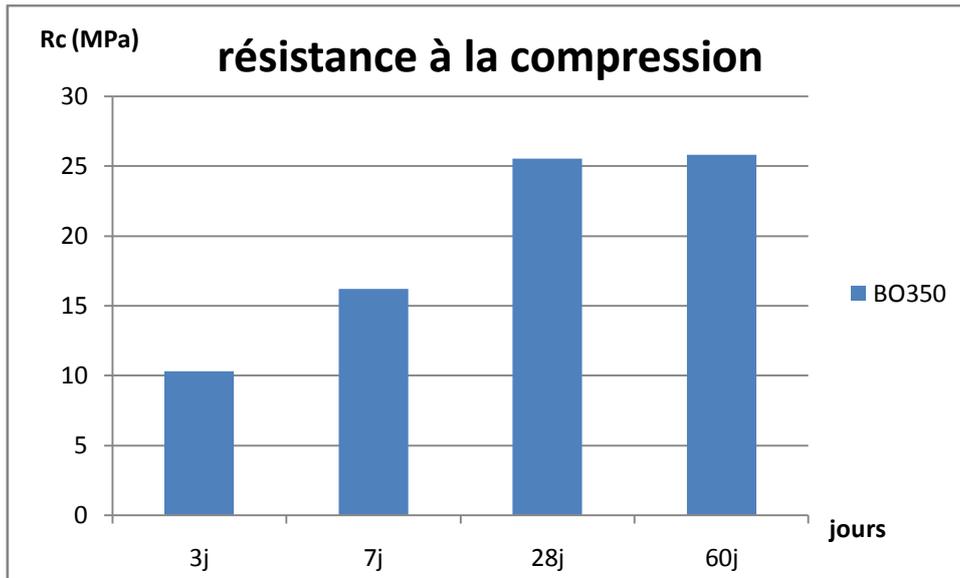


Figure 51. Evolution de la résistance à la compression du béton ordinaire en fonction de temps.

La mesure de la résistance à la compression de béton à base des granulats ordinaire de dosage de ciment 350 kg après 3, 7, 28 jours

Tableau 48. Résistance à la compression de béton léger dosage 400 kg.

Age	3 jours	7 jours	28 jours	60 jours
La résistance à la compression en MPa	11,20	18,50	23,80	24,40

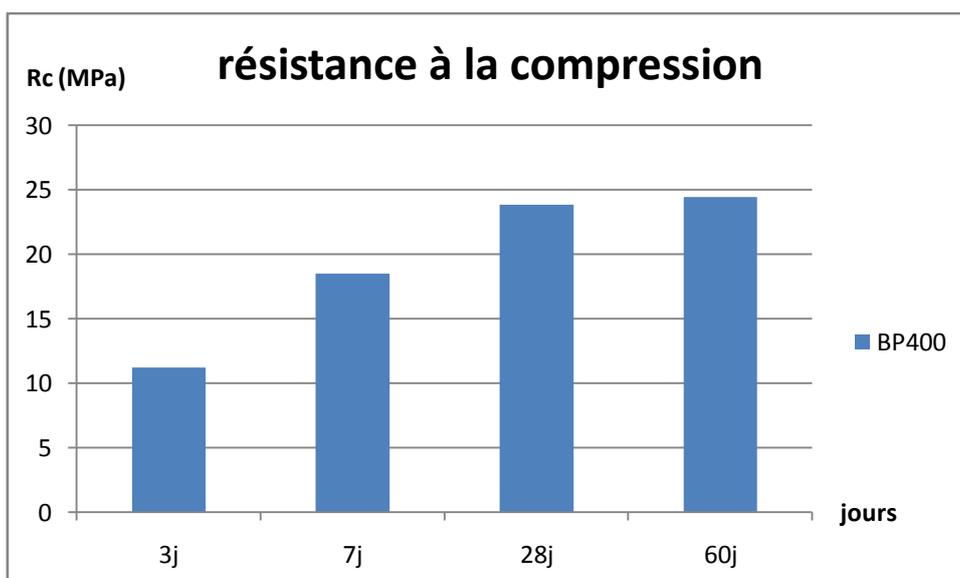


Figure 52. Evolution de la résistance à la compression de béton léger en fonction de temps

Chapitre IV : Résultats et Interprétations

La mesure de la résistance à la compression de béton à base des granulats pouzzolanique de dosage de ciment 400 kg après 3, 7, 28 jours à donnés des bonnes résultats qui nous permette de classer ce béton léger dans la catégorie des bétons structurelle avec une résistance de plus de 25MPa sachant que la norme Algérienne exige une résistance de min 25MPa pour un béton de structure.

Tableau 49. Résistance à la compression de béton ordinaire dosage 400 kg.

Age	3 jours	7 jours	28 jours	60 jours
La résistance à la compression en MPa	11,90	17,10	26,80	27,30

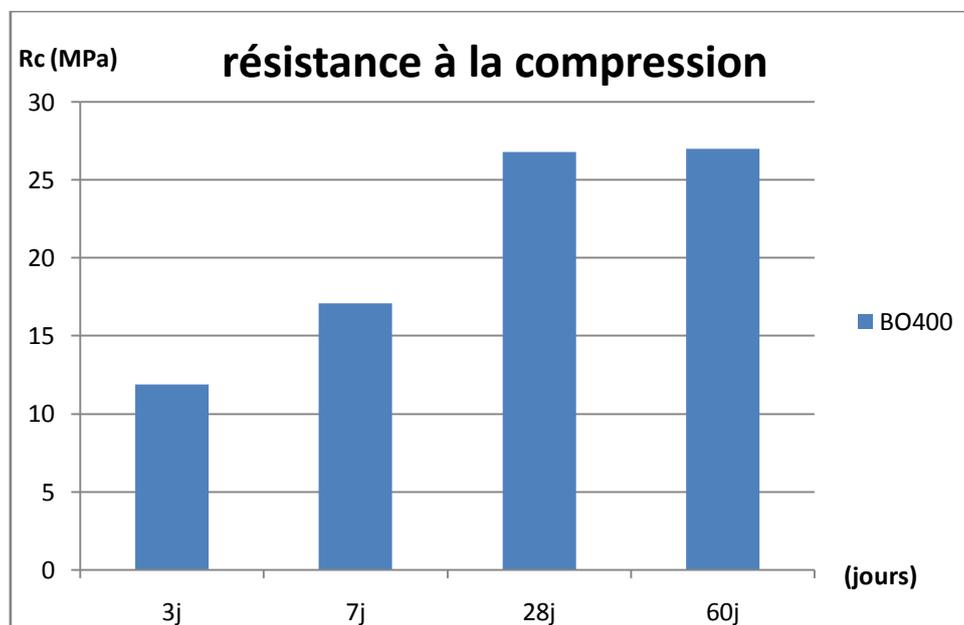


Figure 53. Evolution de la résistance à la compression de béton ordinaire en fonction de temps.

Il est évident que, la résistance mécanique croit en même temps que le dosage en ciment, d'ailleurs ceci est montré dans les tableaux et les figures, qui illustrent l'évolution de la résistance à la compression au cours du temps pour différents dosage en ciment.

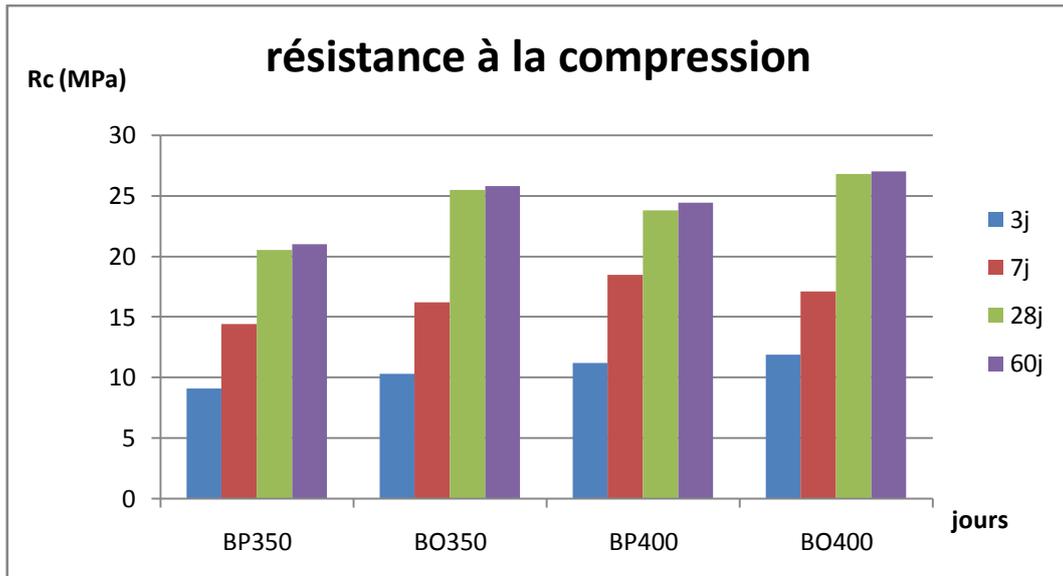


Figure 54. Evaluation de la résistance à la compression de béton en fonction de temps.

5.2. Résultat de la résistance à la compression de béton avec adjuvant :

La mesure de la résistance à la compression de béton à base des granulats pouzzolanique et béton ordinaire en fonction de dosage de ciment avec adjuvant après 3, 7, 28 jours

Tableau 50. Résistance à la compression de béton léger dosage 350 kg adjuvanté.

Age	3 jours	7 jours	28 jours	60 jours
La résistance à la compression en MPa	10,80	15,90	21,60	22,40

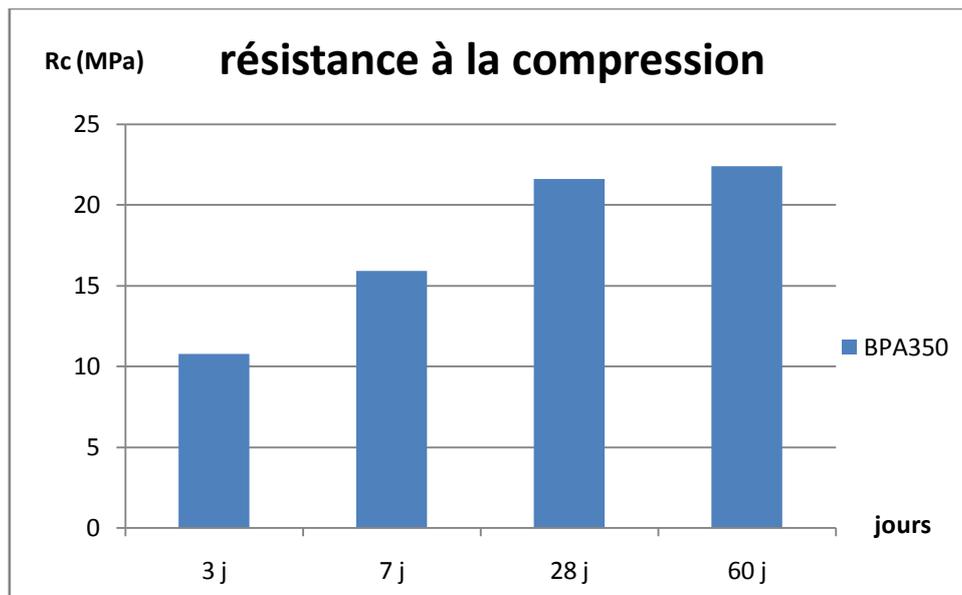


Figure 55. Evolution de la résistance à la compression de béton léger en fonction de temps.

Chapitre IV : Résultats et Interprétations

Tableau 51. Résistance à la compression de béton ordinaire dosage 350 kg adjuvante.

Age	3 jours	7 jours	28 jours	60 jours
La résistance à la compression en MPa	11,00	17,50	26,80	27,30

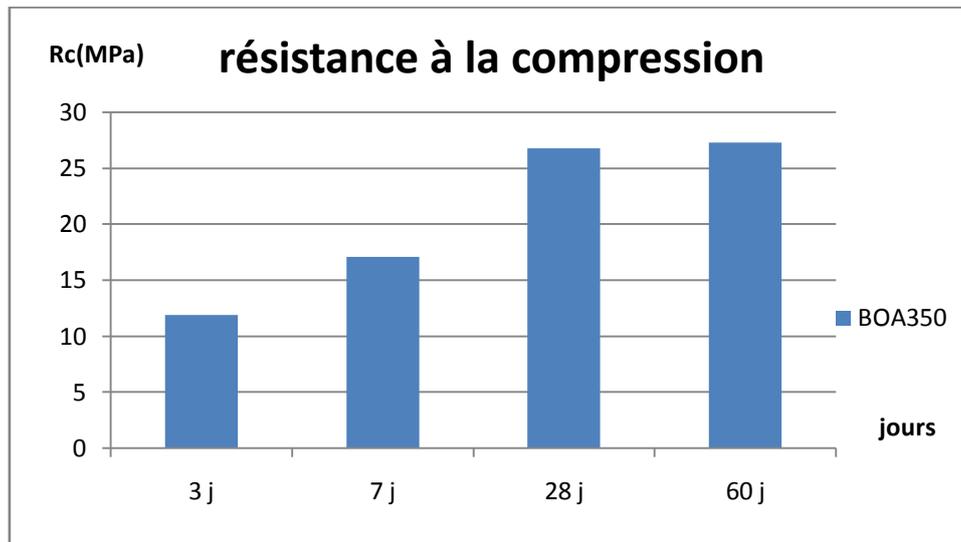


Figure 56. Evolution de la résistance à la compression de béton ordinaire en fonction de temps.

Tableau 52. Résistance à la compression de béton léger dosage 400 kg adjuvante.

Age	3 jours	7 jours	28 jours	60 jours
La résistance à la compression en MPa	12,10	19,60	25,10	26,60

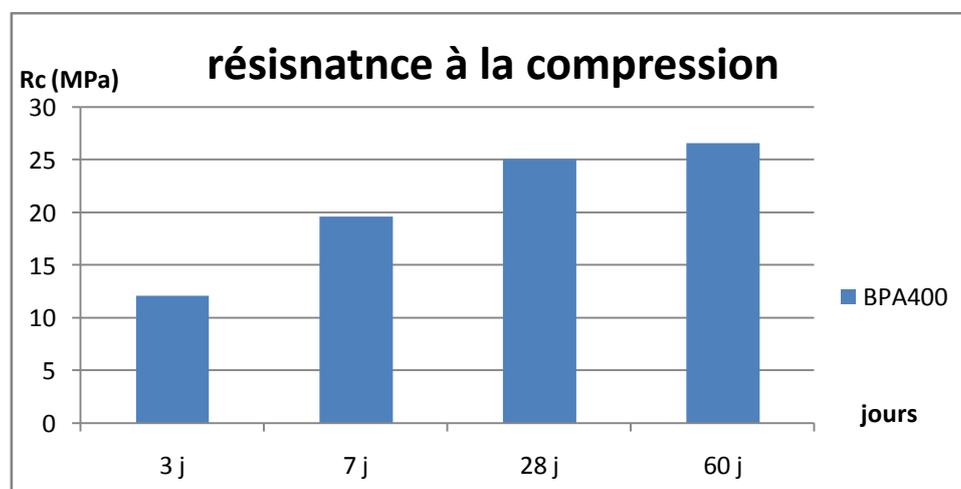


Figure 57. Evolution de la résistance à la compression de béton léger en fonction de temps.

Chapitre IV : Résultats et Interprétations

Tableau 53. Résistance à la compression de béton ordinaire dosage 400 kg adjuvant

Age	3 jours	7 jours	28 jours	60 jours
La résistance à la compression en MPa	12,10	18,80	28,10	28,50

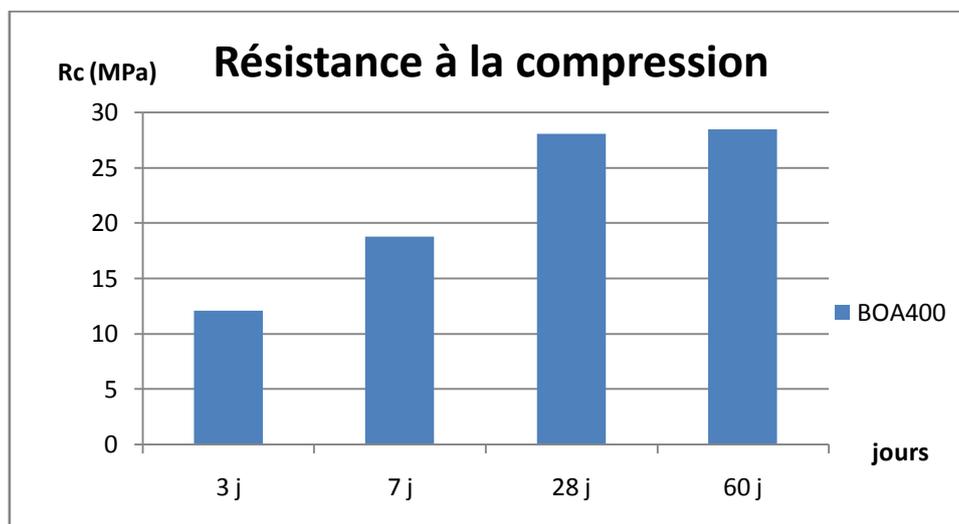


Figure 58. Evolution de la résistance à la compression de béton ordinaire en fonction de temps.

Pour mieux saisir le sens de l'évolution relative de la résistance à la compression des différents bétons à base de granulats pouzzolane, et permettre la comparaison avec le béton témoin, nous présentons cette évolution sous forme d'histogramme donné par les figures précédentes. On remarque d'après cette figure que les performances mécaniques se développent dans les premiers jours de l'hydratation, plus rapidement pour le béton témoin que pour les bétons à base de granulats pouzzolane. À 60 jours, on distingue que les résistances de tous les bétons à base de granulats pouzzolane évoluent nettement plus vite que celle du béton de ordinaire

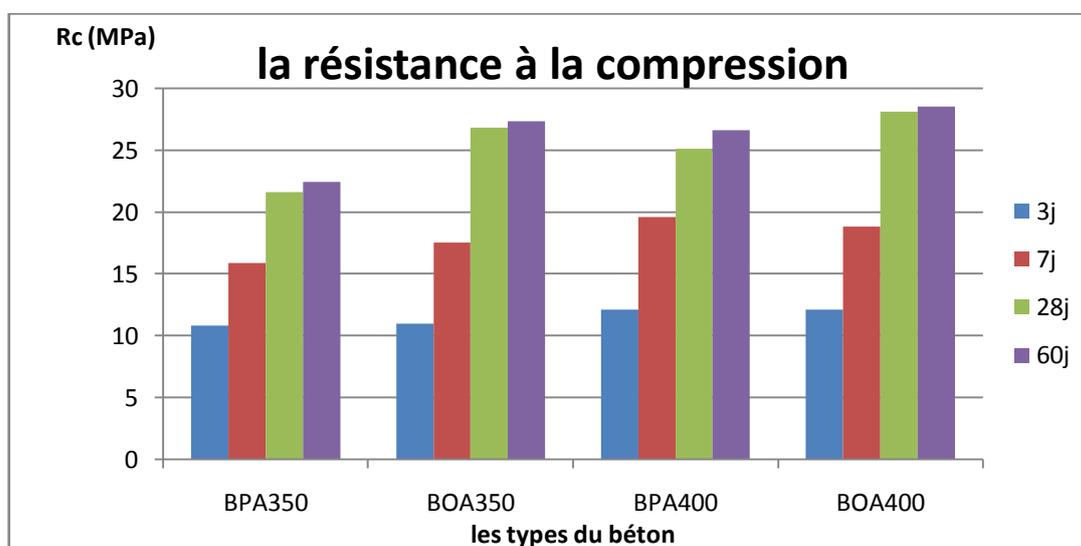


Figure 59. Evaluation de résistance à la compression du béton adjuvantes en fonction de temps.

Chapitre IV : Résultats et Interprétations

Pour comprendre l'évolution relative de la résistance à la compression des différents bétons à base de granulats de pouzzolane, et pour permettre une comparaison avec le béton témoin, nous présentons ce développement sous la forme d'un diagramme donné par la figure précédente. Sous cette forme, les performances mécaniques se développent dans les premiers jours de l'hydratation, et plus rapidement pour le béton témoin que sur les granulés de pouzzolane. En 60 jours, il est possible de distinguer les résistances de tous les bétons à la base de granulés de pouzzolane.

Lors des essais de compression des fissures suivant des lignes verticales étaient apparues de haut vers le bas.



Figure 60. La rupture de béton de pouzzolane.

Lors de la rupture des bétons de pouzzolane, on observe que la surface de fracturation passe à travers les granulats, contrairement à ce que l'on observe pour les bétons classiques où les fractures contournent en général les granulats. Les caractéristiques mécaniques et physiques de la pouzzolane interviennent donc notablement dans les performances du béton (la résistance et la masse volumique).

6. Conclusion :

Dans ce chapitre on a présentés les résultats de nôtres essais expérimentaux, on rappelle l'essai de perte de masses et mesure de la résistance à la compression sur des éprouvettes de béton léger à base des granulats pouzzolanique et béton ordinaire sans et avec adjuvant, pour objet de comparer entre le béton léger et béton ordinaire et d'évaluer leur résistance à la compression.

En conclue que la résistance aux compressions des bétons à base des granulats pouzzolane est plus faible de celle des bétons à base des granulats ordinaire, en raison des faibles résistances des granulats poreux. L'augmentation du dosage en ciment conduit à une croissance de la résistance mécanique des bétons. L'ajout d'adjuvant apport des améliorations au niveau de la résistance mécanique.

Conclusion

Générale

Conclusion général :

L'étude expérimentale a montré l'effet de la fraction de granulat sur la résistance. Des comparaisons entre différents groupes montrent que les différences dans les propriétés mécaniques des mélanges sont également dues au pourcentage de grains dans différents mélanges.

L'intégration de matériaux à base de pouzzolane dans les matériaux de construction locaux présente un intérêt économique et environnemental.

Afin d'utiliser des matériaux dans la construction de bâtiments, il est nécessaire de s'assurer qu'ils ont des propriétés mécaniques suffisantes.

L'étude présentée dans ce travail se concentre sur les propriétés physiques et mécaniques de la pouzzolane naturelle. Cette pouzzolane est ensuite utilisée dans la fabrication de divers bétons en étudiant son effet sur les propriétés mécaniques (résistance à la compression).

Cette étude nécessite l'utilisation de plusieurs protocoles expérimentaux spécifiques, tels que ceux utilisés pour déterminer les classes granulaires, ce qui nous a pris beaucoup de temps pour obtenir les meilleures conditions dans les classes granulaires requises.

La pouzzolane utilisée dans cette étude provient de la carrière de Buhamidi à Bani Saf. La densité des différentes qualités de pouzzolane est inférieure à la densité de gravier utilisée dans la fabrication du béton ordinaire.

Dans le 1er chapitre on a fait une recherche sur les granulats légers et leurs résistances physiques et mécaniques, on a conclu que les granulats légers ont une grande capacité d'absorption d'eau et une bonne isolation thermique, mais une faible densité et une faible résistance à la compression et à la flexion.

Dans le 2eme chapitre on a étudié les propriétés physiques et mécaniques de béton léger et on a remarqué leur masse volumique inférieure et sa faible résistances mécaniques

Dans le 3eme chapitre on a basé sur les granulats pouzzolane et leurs résistances physiques et mécaniques

Les granulats de la pouzzolane très poreux et sa masse volumique moins important que la masse des granulats ordinaire.

Dans le 4eme chapitre on a exprimé les résultats de perte et de gain en masse et résultats des essais à la résistance à la compression sur les bétons à base des granulats pouzzolane et le comparer avec les bétons à base de granulats ordinaire.

On a remarqué que la masse de béton à base des granulats pouzzolane a augmenté en fonction de temps par contre la masse de béton ordinaire a diminué en fonction de temps.

L'activité pouzzolanique augmente avec l'âge et ne peut être efficace qu'à partir de 28 jours. Ceci montre que l'activité des pouzzolanes naturelles est très lente. Cet effet a été vérifié par une augmentation de résistance en fonction du temps.

La masse de béton à base des granulats pouzzolane augmente en fonction de temps, ce phénomène est dû à cause de l'absorption d'eau des granulats légers. Mais la diminution de masse de béton ordinaire est due à cause de retrait de béton.

On conclut que la résistance mécanique du béton à base des granulats pouzzolane est plus faible que celle du béton ordinaire.

Références

bibliographiques

[1] SOTEHI. N, Caractéristiques Thermiques des Parois des Bâtiments et Amélioration de L'isolation, mémoire de thèse, université Constantine, 2010.

[2] R.ABDESSELAM, Cours béton spéciaux, univ ain-toumechant .

[3]http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/documents/Mementos_RMI/memento_ponces-pouzzosrr-36447-fr.pdf

[4] BRGM(1996)- La diatomite dans le département du cantal : synthèse des données relatives au site de nouvialle et à l'existence de gisements régionaux potentiels. Rapport BRGM R 39022- 23 pages, 2 figures.

[5]LAUKAITIS.A, ZURAUSKAS. R, KERIENE.J, The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties, Cement and Concrete Composites, 27, P41-47, 2005.

[6]<http://www.gramme.be/unite9/pmwikiOLD/index.php?n=BETON0607.LesBetonsLegersAGranulatsNaturelsEtArtificiels>

[7] SWAMY. R. N, and LAMBERT. G. H, (1981), The Microstructure of lytag aggregate , The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 3(4), 273-282.

[8]<http://dspace.univchlef.dz:8080/jspui/bitstream/handle/123456789/718/Toufik%20BOUBEKEUR%20magister.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[9] M.CONTANT, Confection de bétons légers la fabrication d'éléments architecturaux. Projet d'application présenté à L'école de technologie supérieure. Ecole de technologie supérieure L'université du Québec Edition. Montréal 14 Avril 2000.

[10] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/techniques-du-batiment-connaître-les-matériaux-de-la-construction-43804210/les-betons-speciaux-tba1022/les-betons-de-schiste-expande-sl10054888.html>

[11] ERNER.A, HENRY.J.F, BILLON.N, Mechanical dissipation during plus assisted thermoforming of polystyrene as measured by infrared thermography, ESAFORM. 2004. Conf. Proc, Trondheim, Norway(2004).

[12] VAQUIER. A, Influence de la cinétique de remplissage et de vidange des pores des granulats légers sur les propriétés des bétons, mémoire de thèse, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1976.

[13] V. M. MALHOTRA, Matériaux complémentaires en cimentation pour le béton, Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie (CANMET), Ottawa, 1989.

[14] M. ARNOULD, Matières premières pour la fabrication de granulats légers, M. Arnould and M. Virlogeux , editors, Granulats et bétons légers ; Bilan de dix ans de recherche, 3-24, Paris, 1986, presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

- [15] S.L.SARKAR, S. CHANDRA, L. BERNTSSON, Interdependence of microstructure and strength of structural lightweight aggregate concrete, *Cement and Concrete Composites*, 14:239-248,1992.
- [16] M.H.ZHANG, O. E. GJORV, Pozzolanic reactivity of lightweight aggregates *Cement and Concrete Research*, 20(6):884-890, 1990.
- [17] ZHUTOVSKY. S, KOVLER. K, BENTUR.A, Influence of cement paste matrix properties on the autogenous curing of high-performance concrete *Cement and Concrete Composites*, 26,P499-507, 2004.
- [18] ZHANG. M. H, GJORV. O. E, Mechanical properties of high-strength lightweight concrete, *ACI Materials Journal*, 88, P150-158, 1991.
- [19] R. N. SWAMY, G. H. LAMBERT, The microstructure of lytag aggregate, *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 3(4); 273-282, November 1981;
- [20] M.-H. ZHANG, O. E. GJORV, Characteristics of lightweight aggregates for high strength concrete, *ACI materials Journal*, 88(2):150-158, 1990.
- [21] M. VIRLOGEUX, Généralités sur les caractères des bétons légers, M. Arnould and M. Virlogeux, editors, *granulats et bétons légers ; bilan de 10 ans de recherche*, pages 111-246, Paris, 1986, presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [22] MULLER ROCHHOLZ .j “determination of the elastic properties of lightweight aggregate by ultrasonic plus velocity measurement. *The International Journal of lightweight concrete* 1.p87-90.1979.
- [23] CEB-FIB, *Lightweight Aggregate Concrete*, The Construction press, 1977.
- [24] CEB-FIP, *Béton de granulats léger*, *Annales de l'ITBTP*, janvier-mai et décembre 1980.
- [25] ARNOULD. M, VIRLOGEUX. M, *Granulats et bétons légers*. Presses d'ENPC, 1986.
- [26] Y. ASAI, Y. ITOH, S. KANTE, M. SAKAI, H. SAEKI, Study on the characteristics of high-strength lightweight concrete for icy waters, *Proceeding of the 4th International Offshore and Polar Engineering Conference*, volume 4, pages 363-368, Osaka, Japan, April 1994.
- [27] S. LINSEL, H. GARRECHT, H.S. MULLER, Production and properties of high-performance lightweight concrete, *Proceeding of the 5th International symposium on Utilization of high strength / High Performance Concrete*, pages 1210-1218, Sand fjord, Norway, June 1999.
- [28] ADEL. A, KEDDOU. A, *Etude de la durabilité d'un béton léger renforcé par des fibres*, mémoire centre universitaire Ain-Temouchent, 2016.
- [29] Adam. M, Neville : *Propriétés des bétons*. Traduit par le CRIB Edition Eyrolles, Paris (2000).

- [30] RILEM : Commission des bétons légers. Terminologie et définition. Matériaux et construction N° 13(1970), pp60-69
- [31] American Concrete Institute : Guide pour le béton de structure à base des granulats légers Traduction du CATED.SDT BTP (1970)
- [32] A. SHORT, W. KINNIBURGH, Lightweight Concrete, CR Books Ltd, 1968.
- [33] ACI 213R-87, Guide for structural lightweight aggregate concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part I: Materials and general Properties of Concrete, Detroit, Michigan, 1994.
- [34] MELANIE. S, Compatibilité élastique, comportement mécanique et optimisation des bétons de granulats légers, thèse doctorale, université Laval Québec, 2003.
- [35] G.FAGERLUND, First resistance of concrete with porous aggregate, Report of cement and concrete institute in Sweden, 1978.
- [36] M.-H. ZHANG, O. E. GJORV, Microstructure of interfacial zone between lightweight aggregate and cement paste, Cement and Concrete Research, 20(4):610-1990.
- [37] SARKAR. S. L, CHANDRA. S, BERMSSON. L, Interdependence of microstructure and strength of structural lightweight aggregate concrete, Cement and Concrete Composites, 14, P239-248, 1992.
- [38] YANG. K, Caractérisation du comportement mécanique des bétons de granulats légers : expérience et modélisation, thèse doctorale, Université de Cergy-Pontoise, 2008.
- [39] R. WASSERMAN, A. BENTUR, Interfacial interactions in lightweight concrete for structural applications, The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 10(2): 79-90,1996.
- [40] M.-H. ZHANG, O. E. GJORV, Penetration of cement paste into lightweight aggregate, Cement and Concrete Research, 22(1): 47-55, 1992.
- [41] GAGNE. R, Durabilité et réparation du béton, (chapitre 2). Cours Maitrise de Génie civil, Sherbrooke, université de Sherbrooke, Canada, 2004, 34p.
- [42] VERONIQUE. C, Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique, thèse doctorale, université lyon, 2005.
- [43] ARNOULD.M, VIRLOGEUX.M, granulats et bétons légers, presses de ENPC, 1986.
- [44] <http://www.betonsfeidt.lu/betons/produits/betons-speciaux/beton-leger>
- [45] [file:///C:/Users/spacenet/Downloads/27826%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/spacenet/Downloads/27826%20(2).pdf)
- [46] ACI213R-03, guide for structural lightweight-aggregate concrete, Reported by ACI Committee 213, American Concrete Institute, 2003.

- [47] EuroLightCon, Mechanical properties of lightweight aggregate concrete document BE96-394/R23, European Union-Brite EuRam III, June 2000.
- [48] MORIN. D, Sur les bétons légers et leur comportement mécanique sous des sollicitations biaxiales, Mémoire de thèse, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1976.
- [49] CHI. J. M, HUANG. R, YANG. C. C, CHANG. J. J, Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete, Cement and Concrete Composites, 25, P4197-205, 2003.
- [50] Neville. A.M. propriétés des bétons. Eyrolles 2000.
- [51] ZHANG. M. H, GJORV. O. E, Pozzolanic of lightweight aggregates, Cement and Concrete Research, 20, P884-890; 1990.
- [52] SLATE.F. O, NILSON. A. H, MARTINEZ. S, Mechanical properties of high-strength lightweight concrete, ACI Journal, proceedings 88, P606-613, 1986.
- [53] CHANG. T. P, LIN. C, CHANG. W. T, HSIAO. J. F, Engrineernig Cement and Concrete Composites, 28, P57-68, 2006.
- [54] WILSON. H. S, MALHOTRA. V. M, Development of high strength lightweight concrete for structural applications, International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 10, P79-90,1988.
- [55] De LARRARD. F, Une approche de la formulation des bétons légers de structure, bulletin de liaison LCPC, 195, janv-fév , P39-47, 1995.
- [56] HAQUE .M. N, AL-KHALAT. H, KAYALI. O, Strength and durability of lightwieght concrete, Cement and Concrete Composites, 26, P307-314, 2004.
- [57] https://bu.univ-ouargla.dz/SAITI_ISSAM.pdf?idthese=4937
- [58] ZHANG. M. H, GJORV. O. E, Characteristics of lightweight aggregates of high-strength concrete, ACI Materials Journal, 88, P240-247, 1991.