



Mémoire de fin d'études

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE : MASTER

Filière : Génie Civil
Option : Matériaux

THÈME :

Effet des ajouts minéraux actifs sur les propriétés rhéologiques et mécaniques
des bétons à base des granulats de la région de Bordj Bou Arreridj

Préparé par : CHENNOUF Azeddine

Soutenu le : 16/06/2015

Devant le jury :

Encadreur : LOUMACHI Lazhar

Président : LOGZIT Nacer

Examinateur : NOUI Amar

Examinateur : BOUGLADA Mohamed Salah

Examinateur : ABEDMEZIANE Nabil

Année Universitaire : 2014/2015

Remerciement :

Au terme de ce travail, je tiens à remercier en premier lieu DIEU Miséricordieux qui m'a donné la volonté et la patience pour achever ce mémoire.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Monsieur LOUMACHI Lazhar, encadreur de mémoire pour m'avoir guidée tout au long de ce travail, et la proposition de ce sujet de recherche Je le remercie vivement pour sa disponibilité, pour ces conseils avisés et son aide précieuse pour la rédaction de ce mémoire. Sa grande patience, tous les encouragements qu'il n'a cessé de me prodiguer, pour la confiance qu'ils ma accordée. Je le remercie pour l'aide qu'il a su m'apporter.

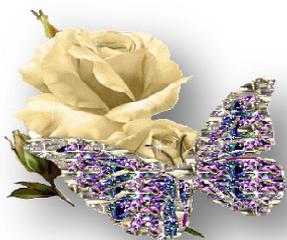
Mes remerciement vont ensuite aux membres de jury : LOGZIT Nacer, chef département de génie civil pour avoir accepté de présider le jury de ma thèse.

Je remercie aussi NOUI Amar, BOUGLADA Mohamed Salah, et ABEDMEZIANE Nabil, qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'être mes examinateurs. Leurs idées me seront sans nul doute très utiles pour la suite de cette recherche. Et tous les enseignements de génie civil.

Je remercie aussi tous les responsables du laboratoire de génie civil : Farid, Zoubir, et Fatiha, et aussi l'administration de génie civil, et les étudiants de doctorat : BELGUENDOUZE Antar, KESSAL Oussama, BELOUADAH Antar, MAAFI Nabil, et MECHERI Mohamed Cherif.

Je tiens à remercier l'ensemble du personnel de laboratoire de la cimenterie d'AIN KEBIRA, et fonctionnaire de la commune de khelil comme mes amis au travail.

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin afin que ce travail soit achevé.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mon encadreur : Loumachi Lazhar.

A mon parent : Larbi.

A mon mère et invocation telle pardon et pitié : Saadia.

A mon belle mère : Lalahoum.

A mes frères : Lakhmissi, Abbelhafid, Brahim, Said.

A mes sœurs : Ghania, Saida, Rabia, Faïma, Wahiba.

A tout ma famille : CHENNOUF.

A tous les étudiants de master 2 (2015) génie civil surtout : Abbas, Khaled, Hichem, Fahem, Abdelmadjid, Abdelkhader, Hichem, Fouad, Said, Naim, Brahim, et les fils.

A mes amis : Housseem, Amer, Adel, Abdelhalim, Rabah, Kheireddine, Hichem.

A mes amis au travail : les fonctionnaires de la commune de khelil.

CHENNOUF Azeddine

Résumé

L'utilisation des ajouts minéraux dans les industries de ciment, et de béton présente des avantages fonctionnels ou d'ingénierie, des avantages économiques, et des avantages écologiques. Les avantages de l'utilisation des ajouts minéraux viennent de leurs effets sur la micro et la macrostructure du béton frais et durci, conduisant à des changements dans ses propriétés rhéologiques et mécaniques. Ces changements résultent essentiellement de trois effets : un effet purement physique, s'agissant de l'effet filler, relatif aux modifications induites par la présence des particules fines d'ajouts minéraux dans le squelette solide des mélanges de bétons ; un effet physico-chimique et microstructural engendré par la présence des particules d'ajouts minéraux dans la matrice cimentaire modifiant le processus d'hydratation du ciment et la structuration des produits hydratés ; et un effet chimique engendré par la réactivité chimique en milieu cimentaire de ces ajouts minéraux, lié à leur caractère hydraulique latent ou pouzzolanique.

Ce travail a pour but d'évaluer expérimentalement l'effet des ajouts minéraux (calcaire, pouzzolane et laitier) sur les propriétés du béton frais et durci.

Les bétons étudiés sont formulés par : la méthode de SCRAMTAIEV Ils sont confectionnés avec des teneurs constantes en ciment. Les pourcentages d'ajouts minéraux sont de 10, 15 et 20 % par masse du ciment, et leur introduction dans le béton se fait lors du malaxage.

Les résultats obtenus ont permis de tirer des conclusions sur le comportement des bétons incorporant des ajouts minéraux.

Mot clés :

Béton, ajouts minéraux actifs, composition, économie, performance, résistance mécanique, caractéristiques physico-mécaniques, rhéologie, durabilité, déformabilité.

Abstract

Abstract

The use of mineral additives in cement and concrete has functional benefits or engineering industries, economic benefits, and environmental benefits. The advantages of the use of mineral additives are their effects on micro and macro-structure of the fresh and hardened concrete, leading to changes in its rheological and mechanical properties. These changes result mainly from three effects: a purely physical effect, with regard to the filler effect on changes induced by the presence of fine particles of mineral additives in the solid skeleton of concrete mixtures; physico-chemical and microstructural effects caused by the presence of mineral additions in the cement matrix particles modifying the process of cement hydration and structure of hydrated products; and a chemical effect generated by the chemical reactivity in the midst of these cementitious mineral additives, related to their latent hydraulic or pozzolanic character.

This work aims to experimentally evaluate the effect of mineral additives (limestone, pozzolan, and slag) on the properties of fresh and hardened concrete.

The studied concretes are formulated by the method of SCRAMTAIEV they are made with constant amounts of cement. The percentage of mineral additives are 10, 15 and 20 % by weight of the cement and they are introduced into the concrete occurs during mixing.

The results obtained allowed to draw conclusions on the behavior of concretes incorporating mineral additives.

Key Word :

Concrete, active mineral additives, composition, economics, performance, mechanical strength, physico-mechanical characteristics, rheology, durability, deformability.

ملخص

استخدام المضافات المعدنية في الإسمنت و الخرسانة له فوائد وظيفية أو الصناعات الهندسية، والفوائد الاقتصادية و الفوائد البيئية. مزايا استخدام المضافات المعدنية هي آثارها على الجزئي والكلي هي كل من الخرسانة الطازجة و المتصلدة، مما يؤدي إلى تغييرات في الريولوجية و الخواص الميكانيكية. هذه التغييرات ينتج أساسا من ثلاثة آثار: تأثير مادي بحت، فيما يتعلق تأثير حشو على التغييرات الناجمة عن وجود جسيمات دقيقة من المضافات المعدنية في الهيكل العظمي صلبة من الخلطات الخرسانية . الآثار المجهرية التي يسببها وجود الإضافات المعدنية في الجسيمات مصفوفة الاسمنت عدل عملية ترطيب الاسمنت ،وهيكل المنتجات المائية الفيزيائية و الكيميائية. و تأثير المواد الكيميائية الناتجة عن التفاعلات الكيميائية في خضم هذه المضافات المعدنية الإسمنتية، المتعلقة الكامنة طابعها الهيدروليكي أو البوزولانية. يهدف هذا العمل لتقييم التجربة تأثير المضافات المعدنية (الحجر الجيري، البوزلان، والخبث) على خواص الخرسانة الطازجة و المتصلدة.

يتم وضعها في الخرسانة التي درسها طريقة SCRAMTAIEV وهي مصنوعة مع كميات ثابتة من الإسمنت. نسبة المضافات المعدنية هي 10 و 15 و 20٪ وزنا من الإسمنت، والذي يتم عرضه من داخل الخرسانة يحدث أثناء الخلط.

النتائج المتحصل عليها سمحت لاستخلاص النتائج على سلوك الخرسانة دمج المضافات المعدنية.

الكلمات المفتاحية :

الخرسانة، المضافات المعدنية النشطة والتكوين ، الاقتصاد، الأداء، القوة الميكانيكية، الخصائص الفيزيائية الميكانيكية، الريولوجيا، قوة التحمل، التشوه.

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Résumé

Abstract

ملخص

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des photos

Liste des symboles et abréviations

Introduction générale.....1

Chapitre I : Les constituants de béton

I.1 Introduction.....4

I.2 Définition du béton.....4

 I.2.1 Classification des bétons.....5

 I.2.1.1 Selon la classe de consistance.....5

 I.2.1.2 Selon la masse volumique.....5

 I.2.1.3 Selon la résistance caractéristique à la compression.....5

I.3 Les ajouts minéraux.....6

 I.3.1 Classification des ajouts minéraux dans le ciment Portland.....7

 I.3.2 Principaux ajouts minéraux inertes.....8

 I.3.3 Principaux ajouts minéraux actifs.....9

 I.3.4 Intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux lors de la fabrication des ciments.....10

 I.3.5 Les inconvénients d'utilisation des ajouts minéraux.....10

 I.3.6 Rôle de l'ajout cimentaire.....11

I.4 Les granulats.....13

 I.4.1 Généralités.....13

 I.4.2 Types des granulats.....13

 I.4.2.1 Les granulats des carrières.....13

 I.4.2.2 Les granulats alluvionnaires.....14

 I.4.3 Les caractéristiques des granulats.....14

 I.4.3.1 Les caractéristiques géométriques.....14

I.5 Le sable.....16

 I.5.1 Classification de sable.....16

Sommaire

I.5.1.1 suivant leurs prévenances.....	16
I.5.1.2 suivant leurs grosseurs.....	16
I.5.2 Rôle de sable dans le béton.....	16
I.6 Le ciment.....	17
I.6.1 Processus de fabrication du ciment.....	17
I.6.2 Hydratation du ciment.....	18
I.6.3 Classification des ciments.....	21
I.6.3.1 Classification des ciments en fonction de leur composition.....	21
I.6.3.2 Classification des ciments en fonction de leur résistance normale.....	21
I.6.3.3 Classification des ciments suivant le type d'environnement.....	22
I.7 L'eau.....	23
I.7.1 Classification des types d'eau.....	23
I.8 Les méthodes de composition des bétons.....	24
I.8.1 La méthode de Bolomey.....	24
I.8.2 La méthode d'Abrams.....	25
I.8.3 La méthode de Faury.....	25
I.8.4 La méthode de Valette.....	25
I.8.5 La méthode de Joisel.....	26
I.9 Propriétés principales des bétons.....	26
I.9.1 Propriétés Physiques.....	26
I.9.1.1 Ouvrabilité.....	26
I.9.1.2 Le Retrait.....	26
I.9.1.3 La compacité et la porosité.....	27
I.9.1.4 Perméabilité et diffusivité.....	27
I.9.2 Propriétés mécaniques.....	28
I.9.2.1 Résistance mécanique.....	28
I.9.2.2 Résistance à la compression.....	28
I.9.2.3 Résistance à la traction.....	28
I.9.3 Durabilité.....	28
I.10 Conclusion.....	29
Chapitre II : Influence des constituants sur la qualité de béton	
II.1 Introduction.....	30
II.2 Influence des ajouts minéraux sur le béton.....	30
II.2.1 A l'état frais.....	30

Sommaire

II.2.1.1 Demande en eau.....	30
II.2.1.2 Ouvrabilité.....	31
II.2.1.3 Ségrégation et ressuage.....	31
II.2.1.4 Chaleur d'hydratation.....	31
II.2.1.5 Temps de prise.....	32
II.2.1.6 Retrait plastique.....	32
II.2.2 A l'état durci.....	32
II.2.2.1 La résistance.....	32
II.2.2.1.1 Résistance à l'impact et à l'abrasion.....	32
II.2.2.1.2 Résistance aux cycles de gel-dégel.....	33
II.2.2.1.3 Résistance aux agents de déverglaçage.....	33
II.2.2.1.4 Résistance aux attaques chimiques.....	33
II.2.2.1.5 Résistance à l'attaque des sulfates.....	33
II.2.2.1.6 Résistance à la désagrégation.....	33
II.2.3 Les mortiers durcis.....	35
II.2.3.1 Résistances mécaniques.....	35
II.2.3.2 Résistances en flexion et en compression.....	36
II.2.4 Influence de calcaire sur les propriétés des bétons durcis.....	36
II.2.4.1 Résistance à la compression.....	36
II.2.4.2 Discussion du résultat.....	37
II.3 Influence des granulats.....	38
II.3.1 Influence des caractéristiques des granulats sur les propriétés des bétons à l'état frais.....	38
II.3.1.1 Influence de la masse volumique des granulats.....	38
II.3.1.2 Influence de la dimension des granulats.....	39
II.3.1.3 Influence sur l'ouvrabilité.....	39
II.3.2 Influence des caractéristiques des granulats sur les propriétés des bétons à l'état durcis.....	40
II.3.2.1 Résistance à la compression.....	40
II.3.2.1.1 La conservation des éprouvettes.....	40
II.3.2.1.2 La propreté des granulats.....	41
II.3.2.1.3 L'air entraîné.....	41
II.3.2.1.4 Autres paramètres.....	42
II.4 Influence de ciment.....	43

Sommaire

II.4.1 Influence du dosage en ciment.....	43
II.4.2 Influence du type de ciment.....	44
II.4.3 Influence de la composition minéralogique du ciment sur la résistance mécanique..	44
II.4.4 Influence de la finesse de mouture du ciment sur la résistance mécanique.....	45
II.4.5 Influence du rapport eau/ciment.....	45
II.5 Influence de l'eau.....	46
II.5.1 Un plus quantité de l'eau.....	46
II.5.2 Qualité de l'eau.....	46
II.5.3 Dosage en eau de gâchage.....	47
II.6 Conclusion.....	47
Chapitre III : Les méthodes de formulations et la partie expérimentale	
III.1 Introduction.....	48
III.2 Matériaux utilisés.....	48
III.3 Caractéristiques des matériaux.....	49
III.3.1 Les ajouts minéraux actifs.....	49
III.3.1.1 Pouzzolane.....	49
III.3.1.2 Laitier.....	50
III.3.1.3 Calcaire.....	51
III.4 Caractéristiques des graviers.....	51
III.4.1 Les analyses chimiques et minéralogiques des trois graviers des régions.....	52
III.4.2 Analyse granulométrique du gravier concassé.....	54
III.4.3 Masse volumique.....	64
III.4.3.1 La masse volumique apparente.....	64
III.4.3.2 La masse volumique absolue ou spécifique.....	66
III.4.4 La porosité.....	68
III.4.5 La compacité.....	68
III.4.6 L'indice des vides.....	68
III.4.7 La résistance à la fragmentation par chocs (Essai Los Angeles).....	69
III.4.8 Degré d'absorption d'eau.....	72
III.5 Sable.....	73
III.5.1 Analyse granulométrique.....	74
III.5.2 Propreté «équivalent de sable».....	77
III.5.3 Caractéristiques physiques du sable.....	79
III.5.3.1 Masse volumique apparent.....	80

Sommaire

III.5.3.2 La masse volumique absolue ou spécifique.....	80
III.6 Ciment.....	83
III.6.1 Caractéristiques de ciment.....	83
III.6.1.1 Caractéristiques chimiques.....	83
III.6.1.2 Caractéristiques physiques.....	84
III.6.1.3 Caractéristiques mécaniques.....	84
III.6.2 Masse volumique apparente.....	85
III.6.3 Masse volumique absolue.....	86
III.7 L'eau de gâchage.....	86
III.8 Composition du béton	87
III.8.1 Méthode de SCRAMTAIEV.....	87
III.8.1.1 Présentation de la méthode SCRAMTAIEV.....	88
III.8.1.2 Calcul de la composition du béton	90
III.9 Matériels et essais.....	93
III.9.1 Béton à l'état frais.....	93
III.9.1.1 Malaxage.....	93
III.9.1.2 Affaissement au cône d'Abrams.....	94
III.9.1.3 Vibration.....	95
III.9.2 Béton à l'état durci.....	95
III.9.2.1 Durcissement du béton	95
III.9.2.2 Mode de conservation de béton	95
III.9.2.3 Résistance à la compression	96
III.10 Conclusion.....	97

Chapitre IV: Résultats et interprétation

IV.1 Introduction.....	98
IV.2 Programme de recherche.....	98
IV.3 Les essais effectués sur le béton.....	98
IV.3.1 A l'état frais.....	98
IV.3.1.1 Mesure de l'affaissement	98
IV.3.1.2 Masse volumique à l'état frais.....	98
IV.3.2 A l'état durci.....	99
IV.3.1.2.1 Masse volumique à l'état durci.....	99
IV.3.1.2.2 Essai de compression.....	99
IV.4 Résistance à la compression à 7 jours.....	99

Sommaire

IV.5 Résistance à la compression à 28 jours.....	105
IV.6 Résistance à la compression à 60 jours.....	114
IV.7 Conclusion.....	122
Conclusion générale.....	123
Référence bibliographiques	

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre I : Les constituants de béton

Tableau I.1 : Classes de consistance.....	5
Tableau I.2 : Classes de résistance du béton.....	6
Tableau I.3 : Classification des ajouts minéraux selon leur réactivité.....	7
Tableau I.4 : Exigences sur les caractéristiques physiques et chimiques du ciment.....	20
Tableau I.5 : Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe.....	22

Chapitre II : Influence des constituants sur la qualité de béton

Tableau II.1 : Effets principaux des ajouts les plus utilisés.....	34
Tableau II.2 : Résistances mécaniques des mortiers.....	35
Tableau II.3 : Influence de la propreté des granulats sur la résistance des bétons.....	41

Chapitre III : Les méthodes de formulations et la partie expérimentale

Tableau III.1 : L'analyse chimique et minéralogique de Pouzzolane.....	49
Tableau III.2 : L'analyse chimique et minéralogique de laitier.....	50
Tableau III.3 : L'analyse chimique et minéralogique de Calcaire.....	51
Tableau III.4 : L'analyse chimique et minéralogique du gravier de la région 1.....	52
Tableau III.5 : L'analyse chimique et minéralogique du gravier de la région 2.....	53
Tableau III.6 : L'analyse chimique du gravier de la région 3.....	53
Tableau III.7 : L'analyse granulométrique du gravier concassé (08/15) de la région 1.....	55
Tableau III.8 : L'analyse granulométrique du gravier concassé (15/25) de la région 1.....	56
Tableau III.9 : L'analyse granulométrique du gravier concassé (08/15) de la région 2.....	58
Tableau III.10 : L'analyse granulométrique du gravier concassé (15/25) de la région 2.....	59
Tableau III.11 : L'analyse granulométrique du gravier concassé (08/15) de la région 3.....	61
Tableau III.12 : L'analyse granulométrique de gravier concassé (15/25) de la région 3.....	62
Tableau III.13 : La masse volumique apparente (γ) des graviers concassés (08/15), (15/25) de la région 1.....	65
Tableau III.14 : La masse volumique apparente(γ) des graviers concassés (08/15), (15/25) de la région 2.....	65
Tableau III.15 : La masse volumique apparente(γ) des graviers concassés (08/15), (15/25) de la région 3.....	66
Tableau III.16 : La masse volumique absolue des graviers concassés (08/15), (15/25) de la région 1.....	67
Tableau III.17 : La masse volumique absolue des graviers concassés (08/15), (15/25) de la région 2.....	67

Liste des tableaux

Tableau III.18 : La masse volumique absolue des graviers concassés (08/15), (15/25) de la région 3.....	67
Tableau III.19 : Porosité, compacité et indice des vides des graviers concassés de la région 1.....	68
Tableau III.20 : Porosité, compacité et indice des vides des graviers concassés de la région 2.....	69
Tableau III.21 : Porosité, compacité et indice des vides des graviers concassés de la région 3.....	69
Tableau III.22 : Adaptation des charges des boulets correspondant à la classe granulair choisie.....	70
Tableau III.23 : Estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient L_A	71
Tableau III.24 : Résultats d'essai de Los Angeles des graviers (8/15), (15/25) des trois régions.....	71
Tableau III.25 : Degré d'absorption d'eau des agrégats (08/15), (15/25) de la région 1.....	72
Tableau III.26 : Degré d'absorption d'eau des agrégats (08/15) et (15/25) de la région 2....	72
Tableau III.27 : Degré d'absorption d'eau des agrégats (08/15), (15/25) de la région 3.....	72
Tableau III.28 : Les pourcentages des éléments majeurs et mineurs.....	73
Tableau III.29 : Les pourcentages des éléments traces.....	73
Tableau III.30 : Analyse granulométrique du sable de Boussaâda.....	75
Tableau III.31 : Classification des sables en fonction du module de finesse.....	77
Tableau III.32 : Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable E_{sv} et E_{sp}	79
Tableau III.33 : Résultat d'essais d'équivalent de sable de Boussaâda.....	79
Tableau III.34 : Masse volumique apparente du sable de Boussaâda.....	80
Tableau III.35 : Masse volumique absolue du sable de Boussaâda.....	81
Tableau III.36 : Caractéristiques physiques du sable de dune (OUED MAITHER).....	82
Tableau III.37 : Analyse chimique du ciment utilisé.....	83
Tableau III.38 : Composition minéralogique du clinker.....	84
Tableau III.39 : Propriétés physiques du ciment utilisé.....	84
Tableau III.40 : Propriétés mécaniques du ciment utilisé.....	84
Tableau III.41 : Masse volumique apparente du ciment CRS.....	85
Tableau III.42 : Analyse chimique de l'eau utilisée pour le gâchage.....	86
Tableau III.43 : Les valeurs des coefficients A et A' en fonction du liant et agrégat.....	88
Tableau III.44 : Quantité d'eau nécessaire à la préparation du béton.....	89

Liste des tableaux

Tableau III.45 : Valeurs du coefficient (α) en fonction du E/C et dosage en ciment.....	90
Tableau III.46 : Dépense en matériaux de classe 42.5 de béton à granularité continue pour 1m^3	92
Tableau III.47 : Dépense en matériaux de classe 42.5 de béton à granularité continue pour 1m^3 (après majoration 20%).....	93
Tableau III.48 : Dépense en matériaux de classe 42.5 de béton à granularité continue pour 1 éprouvette (10X10X10) cm^3	93
Tableau III.49 : Dépense en pourcentages des ajoutes minéraux actif (pouzzolane, laitier, calcaire) dans une éprouvette (10X10X10) cm^3	93

Chapitre IV : Résultats et interprétation

Tableau IV.1 : L'évolution de la masse volumique et la résistance de la compression à 7 jours des trois régions des différents types de béton ordinaire.....	99
Tableau IV.2 : L'évolution de la masse volumique et la résistance de la compression à 7 jours des trois régions à différents pourcentages (10 %, 15%, 20%) de pouzzolane.....	100
Tableau IV.3 : L'évolution de la masse volumique et la résistance de la compression à 7 jours des trois régions à différents pourcentages (10 %, 15%, 20%) de calcaire.....	101
Tableau IV.4 : L'évolution de la masse volumique et la résistance de la compression à 28 jours des trois régions des différents types de béton ordinaire.....	105
Tableau IV.5 : L'évolution de la masse volumique et la résistance de la compression à 28 jours des trois régions à différents pourcentages (10 %, 15%, 20%) de pouzzolane.....	106
Tableau IV.6 : L'évolution de la masse volumique et la résistance de la compression à 28 jours des trois régions à différents pourcentages (10 %, 15%, 20%) de laitier.....	107
Tableau IV.7 : L'évolution de la masse volumique et la résistance de la compression à 28 jours des trois régions à différents pourcentages (10 %, 15%, 20%) de calcaire.....	108
Tableau IV.8 : L'évolution de la masse volumique et la résistance de la compression à 60 jours des trois régions des différents types de béton ordinaire.....	114
Tableau IV.9 : L'évolution de la masse volumique et la résistance de la compression à 60 jours des trois régions à différents pourcentages (10 %, 15%, 20%) de pouzzolane.....	115
Tableau IV.10 : L'évolution de la masse volumique et la résistance de la compression à 60 jours des trois régions à différents pourcentages (10 %, 15%, 20%) de laitier.....	116
Tableau IV.11 : L'évolution de la masse volumique et la résistance de la compression à 60 jours des trois régions à différents pourcentages (10 %, 15%, 20%) de calcaire.....	117

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I : Les constituants de béton

Figure I.1 : Constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire.....	4
Figure I.2 : Hydratation d'un ciment sans et avec ajout cimentaire.....	6
Figure I.3 : Différentes types des ajouts minéraux.....	12
Figure I.4 : Forme d'un granulat.....	15
Figure I.5 : Les étapes de fabrication des ciments.....	18

Chapitre II : Influence des constituants sur la qualité de béton

Figure II.1 : Évolution des résistances en flexion en fonction de l'âge et de la teneur de pouzzolane.....	35
Figure II.2 : Évolution des résistances en compression en fonction de l'âge et de la teneur de pouzzolane.....	35
Figure II.3 : Variation de la résistance à la compression des bétons ordinaires en fonction du taux de calcaire.....	37
Figure II.4 : Variation de la résistance à la compression des bétons recyclés en fonction du taux de calcaire.....	37
Figure II.5 : Recherche de la proportion gravillon/sable pour laquelle le temps d'écoulement du béton est minimal.....	40
Figure II.6 : Réduction de la résistance à la compression à vingt-huit jours due à une dessiccation des éprouvettes pendant les premiers jours de conservation.....	40
Figure II.7 : Influence du dosage en ciment sur la résistance à la compression à court terme du béton.....	43
Figure II.8 : Influence du type de ciment sur la résistance à la compression à court terme.....	44
Figure II.9 : Relation entre la résistance à la compression à 7 jours et le rapport E/C d'un béton confectionné avec un ciment portland à durcissement rapide.....	46
Figure II.10 : Influence du dosage d'eau sur la rhéologie.....	47

Chapitre III : Les méthodes de formulations et la partie expérimentale

Figure III.1 : Courbe granulométrique du gravier concassé (08/15) de la région1	57
Figure III.2 : Courbe granulométrique du gravier concassé (15/25) de la région 1	57
figure III.3 : Courbe granulométrique du gravier concassé (08/15) de la région 2.....	60
Figure III.4 : Courbe granulométrique du gravier concassé (15/25) de la région 2.....	60
Figure III.5 : Courbe granulométrique du gravier concassé (08/15) de la région 3.....	63

Liste des figures

Figure III.6 : Courbe granulométrique du gravier concassé (15/25) de la région 3.....	63
Figure III.7 : Courbe granulométrique du sable de Boussaâda.....	76
Figure III.8 : Essai d'équivalent de sable.....	78

Chapitre IV : Résultats et interprétation

Figure IV.1 : La variation de la masse volumique à l'état frais des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de pouzzolane à 7 jours.....	102
Figure IV.2 : La variation de la masse volumique à l'état durci des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de pouzzolane à 7 jours.....	102
Figure IV.3 : La variation de la masse volumique à l'état frais des trois régions à différentes pourcentage (10 %, 15%, 20%) de calcaire à 7 jours.....	103
Figure IV.4 : La variation de la masse volumique à l'état durci des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de calcaire à 7 jours.....	103
Figure IV.5 : L'évolution de la résistance des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de pouzzolane à 7 jours.....	104
Figure IV.6 : L'évolution de la résistance des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de calcaire à 7 jours.....	104
Figure IV.7 : La variation de la masse volumique à l'état frais des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de pouzzolane à 28 jours.....	109
Figure IV.8 : La variation de la masse volumique à l'état durci des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de pouzzolane à 28 jours.....	109
Figure IV.9 : La variation de la masse volumique à l'état frais des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de laitier à 28 jours.....	110
Figure IV.10 : La variation de la masse volumique à l'état durci des trois régions à différentes pourcentage (10 %, 15%, 20%) de laitier à 28 jours.....	110
Figure IV.11 : La variation de la masse volumique à l'état frais des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de calcaire à 28 jours.....	111
Figure IV.12 : La variation de la masse volumique à l'état durci des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de calcaire à 28 jours.....	111
Figure IV.13 : L'évolution de la résistance des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de pouzzolane à 28 jours.....	112
Figure IV.14 : L'évolution de la résistance des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de laitier à 28 jours.....	112
Figure IV.15 : L'évolution de la résistance des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de calcaire à 28 jours.....	113

Liste des figures

Figure IV.16 : La variation de la masse volumique à l'état frais des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de pouzzolane à 60 jours.....	118
Figure IV.17 : La variation de la masse volumique à l'état durci des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de pouzzolane à 60 jours.....	118
Figure IV.18 : La variation de la masse volumique à l'état frais des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de laitier à 60 jours.....	119
Figure IV.19 : La variation de la masse volumique à l'état durci des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de laitier à 60 jours.....	119
Figure IV.20 : La variation de la masse volumique à l'état frais des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de calcaire à 60 jours.....	120
Figure IV.21 : La variation de la masse volumique à l'état durci des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de calcaire à 60 jours.....	120
Figure IV.22 : L'évolution de la résistance des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de pouzzolane à 60 jours.....	121
Figure IV.23 : L'évolution de la résistance des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de laitier à 60 jours.....	121
Figure IV.24 : L'évolution de la résistance des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de calcaire à 60 jours.....	121

Liste des photos

Liste des photos

Chapitre I : Les constituants de béton

Photo I.1 : Ajouts minéraux (pouzzolane, laitier, calcaire).....7

Chapitre III : Les méthodes de formulations et la partie expérimentale

Photo III.1 : Appareille de Los Angeles.....70

Photo III.2 : L'échantillon et les boules avant l'essai.....70

Photo III.3 : Tamiseuse électrique.....75

Photo III.4 : Ciment utilisé CEMI/42,5.....83

Photo III.5 : Béton à l'état frais.....94

Photo III.6 : Malaxeur.....94

Photo III.7 : Mesure de l'affaissement.....94

Photo III.8 : Bac de conservation.....96

Photo III.9 : Presse hydraulique capacité 3000 KN.....97

Liste des symboles et abréviations

Liste des symboles et abréviations

C : Dosage en ciment du béton.	C ₃ S : Silicate tricalcique (3CaO.SiO ₂).
Es : Equivalent de sable.	C ₂ S : Silicate bicalcique (2CaO.SiO ₂).
E _{Sv} : Equivalent de sable visuel.	C ₃ A : Aluminate tricalcique (3CaO.Al ₂ O ₃).
E _{Sp} : Equivalent de sable au piston.	C S : Anhydrite (CaSO ₄).
Ms : Masse des grains solides, masse à l'état sec.	CSH : Gypse (CaSO ₄ .2H ₂ O).
M _h : Masse à l'état humide après imbibition.	C-S-H : Silicates de calcium hydratés.
Mf : Module de finesse du sable.	CH : Hydroxyde de calcium (portlandite) (Ca(OH) ₂).
PF : Perte au feu.	C ₄ AF : Aluminoferrite tétracalcique (4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃).
RI : Résidu insoluble (non combinée).	P ₂ O ₅ : Pentoxyde de phosphore.
Z : Pouzzolane naturelle.	TiO ₂ : Dioxyde de titane.
L : Calcaire.	CaCO ₃ : Carbonate de calcium.
D : Laitier granulé de haut fourneau.	Fe ₂ O ₃ : Oxyde fer.
R _f : Résistance à la flexion.	
R _c : Résistance à la compression.	
γ : Masse volumique absolue.	
ρ : Masse volumique apparent.	
P _c (%) : Porosité.	
C _c (%) : Compacité.	
e _c (%) : Indice des vides.	
A (%) : Degré d'absorption.	
R _c : Classe de ciment.	
R _b : Classe du béton.	
A, A' : Coefficients de la qualité des granulats et des liants.	
A : Coefficient d'écartement.	
CaO : Oxyde de calcium.	
SiO ₂ : Oxyde de silicium.	
Al ₂ O ₃ : Oxyde d'alumine.	
MgO : Oxyde de magnésie.	
K ₂ O : Na ₂ O : Les Oxydes alcalins.	
SO ₃ : L'anhydride sulfurique.	
Na ₂ O : Oxyde de sodium.	
Cl : Clore.	

Introduction générale

Les ressources en ajouts minéraux les plus utilisés en Algérie : le laitier, la pouzzolane et le calcaire, l'usine d'El-Hadjar produit environ un demi-million de tonnes (500.000 tonnes) de laitier de haut fourneau annuellement mais seulement 20 % du laitier est utilisé. (Bougara, Khatib & Khellafi, 2009).

La pouzzolane utilisée essentiellement dans la fabrication des ciments est produite par le secteur public à partir de trois (03) gisements, tous localisés sur le territoire de la wilaya d'Ain Témouchent et exploités par :

- 1) La Société de Pouzzolane et des Matériaux de Construction (SPMC), filiale du groupe FERPHOS, qui exploite les gisements de Rokbet El Hassi, et de Kelkoul.
- 2) Et la Société des Ciments de Beni Saf (S.CI.BS), rattachée au groupe ERCO relevant du groupe GICA, qui exploite le gisement de pouzzolane de Ghar Ben Baricou, commune d'Ain Kihel (wilaya d'Ain Témouchent) pour ses propres besoins.

La production de la pouzzolane pour l'année 2009 a atteint 328 015 tonnes en baisse de -33.1% par rapport à l'année 2008. Ce recul est dû principalement à la baisse de la production, de -41.7% par rapport à l'année 2008, constatée au niveau du gisement Kelkoul, commune de Béni Saf (wilaya d'Ain Témouchent) exploité par la Société de Pouzzolane et des Matériaux de Construction (SPMC).

Quant au calcaire destiné à la fabrication des ciments, sa production est assurée à partir de 15 carrières localisées dans 13 wilayas du pays : 12 relèvent du secteur public et sont réparties à travers 12 wilayas (Tébessa, Skikda, Batna, Constantine, Sétif, Bouira, Alger, Blida, Chlef, Mascara, Saida et Ain Témouchent), et 3 relèvent du secteur privé, localisées dans 2 wilayas (M'sila et Mascara).

Au 31/12/2009, les titres miniers (recherche, exploitation) dédiés aux calcaires sont au nombre de 1 362 (154 : recherche, 1 208 : exploitation) et représentent 60.1% du total des Titres Miniers (TM) en vigueur.

Donc :

- ❖ Avec la grande demande de ciment en Algérie, ainsi que «la spéculation» qui touche le marché du ciment.
- ❖ Les grandes émissions de CO₂ liées à la fabrication du ciment.
- ❖ Et étant donné que la proportion d'ajouts minéraux introduits dans les ciments composés CPJ produits par les cimenteries Algériennes ne dépasse pas les 20%.

Il est primordial de trouver différentes façons de répondre à la grande demande du ciment et ainsi du béton tout en respectant les exigences environnementales et en réduisant les coûts de production.

En Amérique du nord, dans plusieurs pays européens (Angleterre, Irlande, ...), ainsi que dans d'autres pays du monde est utilisée une technique alternative qui permet de faire bénéficier la production de béton des atouts des ajouts minéraux sans passer par une "étape ciment" : l'introduction directe, dans la bétonnière, des ajouts minéraux broyés aux côtés du ciment Portland ou du Ciment Composé. Cette technique qui n'est pas très connue en Algérie, permet de produire des bétons avec des proportions variées d'ajouts minéraux, "gâchée par gâchée", permettant de satisfaire un nombre quasi infini d'usages spécifiques, les coûts de production du béton, et l'utilisation de déchets industriels comme le laitier de haut fourneau.

La maîtrise de cette technique passe inévitablement par la connaissance de l'effet des ajouts minéraux lors de leur introduction directe dans le mélange de béton sur les différentes propriétés : rhéologiques, mécaniques et de durabilité.

Objectifs

L'observation des changements amenés par l'incorporation des ajouts minéraux dans le béton peut être faite par, la mesure de la rhéologie du béton frais, la mesure de la variation des résistances mécaniques du béton durci, etc. ..., et cela en fonction de l'âge et des paramètres de formulation (dosage en ciment, en ajouts minéraux, en eau, en granulats,...).

L'objectif de ce travail est d'évaluer expérimentalement l'effet des ajouts minéraux sur les propriétés du béton frais et durci (rhéologie, résistances mécaniques, durabilité). Dans ce contexte trois ajouts minéraux sont utilisés : un ajout hydraulique latent, un ajout pouzzolanique et un ajout inerte, à savoir, du laitier de haut fourneau granulé broyé, de la pouzzolane naturelle et du calcaire. L'introduction des ajouts minéraux dans les mélanges de béton, est faite lors du malaxage des constituants du béton, c'est-à-dire sans passer par l'étape ciment.

Structure du mémoire

Ce mémoire est constitué de quatre chapitres, d'une introduction générale et d'une conclusion.

Le Chapitre 1

Présente une revue de la littérature sur les ajouts minéraux et étudie principalement les propriétés physiques et chimiques de trois ajouts minéraux : le laitier de haut fourneau, la pouzzolane naturelle et le calcaire ; leurs effets physiques et chimiques ; ainsi que les

propriétés résultant de l'effet de leur incorporation, individuelle, dans les pâtes de ciment, les mortiers et les bétons.

Le Chapitre 2

Dans ce chapitre on étudie les différents matériaux qui réagissent pour former le béton et l'influence de cette sur le béton.

La qualité du béton est intimement liée à celle de ses constituants et particulièrement les granulats puisqu'ils occupent les trois quarts de son volume, il n'est pas étonnant que la qualité de ces derniers revête une grande importance. Non seulement les granulats peuvent limiter la résistance du béton, mais, selon leurs propriétés, ils peuvent affecter la durabilité et les performances structurales du béton.

Le Chapitre 3

Présente les données expérimentales sur les matériaux utilisés dans le cadre de ce travail, le programme des essais réalisés, les méthodes de formulation et explique brièvement les essais sur béton frais et béton durci.

Le Chapitre 4

Présente les résultats et la discussion des résultats des essais effectués sur les bétons avec ajouts minéraux.

Chapitre I :

Les constituants de béton

I.1 Introduction :

Le béton est un matériau hétérogène constitué d'une matrice cimentaire, fabriqué à partir d'eau et de ciment, et des granulats. Il crée un réseau poreux dans lequel les mouvements d'eau et les transferts de gaz sont possible. Ainsi, les capacités de transfert du matériau sont fonction des propriétés microstructurales (porosité, distribution, tortuosité...) [1].

Dans notre étude, les principales différences des bétons étudiés sont le rapport E/C et la nature du ciment. Plus le rapport E/C est grand, plus un volume poreux est important dans la microstructure. Un ciment contenant des additions des types laitiers, cendres volantes ou fumées des silices conduit à une porosité plus fine à cause du développement de réaction pouzzolaniques des additions [1].

Différents ajouts minéraux sont actuellement utilisés dans le béton. Ils sont utilisés en addition ou en substitution d'une partie du ciment comme matières cimentaires supplémentaires. Leur usage fournit au béton une matrice plus dense qui sera plus résistante aux produits agressifs tels que les sulfates, les chlorures et les autres agressifs. La finesse des ajouts minéraux, leur composition chimique, leur structure (vitreuse ou cristalline) et leur solubilité en milieu alcalin gouvernent leurs propriétés cimentaires dans le béton. Leur contenu en phase amorphe est un facteur clé dans la réactivité des ajouts minéraux [3].

I.2 Définition du béton :

Le béton a été depuis longtemps le matériau le plus utilisée dans la construction. Il demeurera sans aucun doute le matériau le plus employé, au cours des prochaines décennies, dans la construction de divers ouvrages [2].

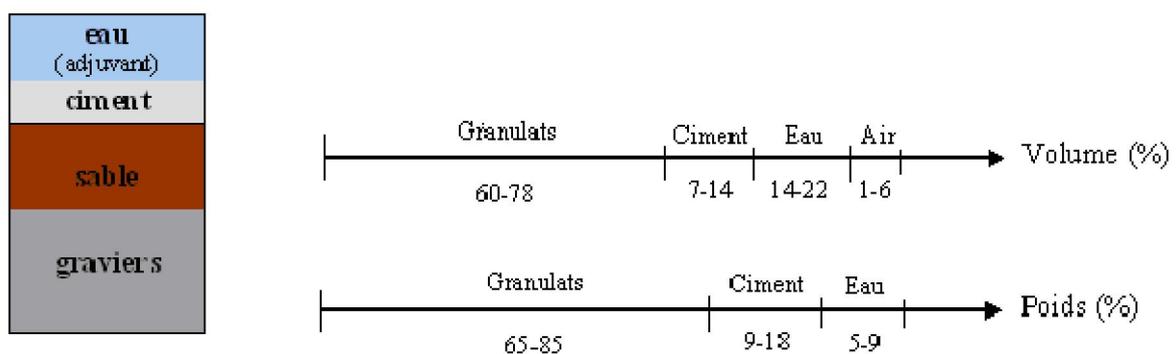


Figure I.1 : Constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire.

I.2.1 Classification des bétons :

I.2.1.1 Selon la classe de consistance :

Il existe 5 classes de consistance des bétons (S1 à S5). La mesure de l'affaissement est réalisée à l'aide du cône d'Abrams (Slump test) [2].

Tableau I .1 : Classes de consistance [3].

Classe de consistance	S1	S2	S3	S4	S5
Affaissement (mm)	10-40	50-90	100-150	160-210	>220

Les consistances peuvent également être spécifiées par d'autres essais, temps VEBE, indice de serrage ou diamètre d'étalement.

I.2.1.2 Selon la masse volumique :

En général le béton peut être classé en quatre groupes, selon la masse volumique [4] :

- ✓ Béton très lourd : $\rho > 2500 \text{ Kg/m}^3$.
- ✓ Béton lourd (béton courant) : ρ entre : 1800 - 2500 Kg/m^3 .
- ✓ Béton léger : ρ entre : 500 - 1800 Kg/m^3 .
- ✓ Béton très léger : $\rho < 500 \text{ Kg/m}^3$.

Le béton courant peut aussi être classé en fonction de la nature des liants :

- ✓ Béton de ciment (le ciment).
- ✓ Béton silicate (la chaux).
- ✓ Béton de gypse (le gypse).
- ✓ Béton asphalte.

I.2.1.3 Selon la résistance caractéristique à la compression :

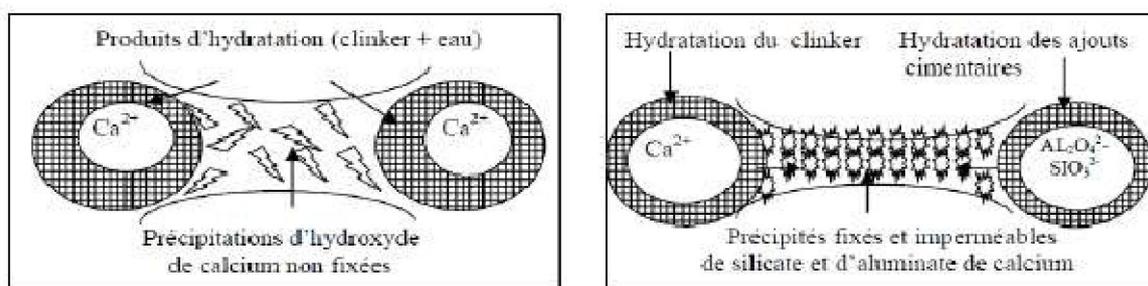
La norme EN 206 classe les bétons en fonction de leur résistance caractéristique à la compression conformément au tableau (I.2), Dans ce tableau f_{ckcyl} est la résistance caractéristique mesurée sur cylindres (c'est cette résistance qui correspond à la résistance caractéristique à laquelle il est fait référence dans l'Euro code 2), f_{ck} cube est la résistance caractéristique mesurée sur cubes. Les valeurs soulignées sont les valeurs recommandées [5].

Tableau I.2 : Classes de résistance du béton [3].

Classe de résistance à la compression	Résistance caractéristique minimale sur cylindres (Mpa)	Résistance caractéristique minimale sur cubes (Mpa)
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37
C 35/45	35	45
C 40/50	40	50
C 45/55	45	55
C 50/60	50	60

I.3 Les ajouts minéraux :

D'après leur composition, les ajouts minéraux contiennent principalement de la silice amorphe qui réagit activement avec l'hydroxyde de calcium qui se forme lors de l'hydratation des minéraux faisant partie du clinker. Le rapport entre le clinker et l'adjuvant hydraulique (ajout minéral) est établi en fonction de l'activité de l'adjuvant et de la composition minéralogique du clinker [6].



(a) Hydratation d'un ciment sans ajout cimentaire. (b) Hydratation d'un ciment avec ajout cimentaire.

Figure I.2 : Hydratation d'un ciment sans et avec ajout cimentaire [6].

I.3.1. Classification des ajouts minéraux dans le ciment Portland :

Ces matériaux proviennent principalement des sous-produits de l'industrie métallurgique, des centrales thermiques à charbon, de la nature et sont classés selon la norme NF EN 197 1 en ajouts minéraux inertes et actifs [6].



Photo I.1 : Ajouts minéraux (pouzzolane, laitier, calcaire).

Tableau I.3 : Classification des ajouts minéraux selon leur réactivité.

Type	Réactivité	Matériau
Hydraulique	Fortement réactif	Ciments spéciaux-chaux hydraulique
Hydraulique Latent		Laitier granulé-cendres volantes riche en calcium (calciques)
Pouzzolanique	Fortement réactif	Fumée de silice
	Moyennement Réactif	Cendres volantes pauvre en calcium, pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcanique, terres a diatomées)
	Faiblement réactif	Scories cristallines
Inerte	Non réactif	Fillers (farine calcaire,...) fibres, pigments colorants, matières expansives, dispersions synthétique

I.3.2 Principaux ajouts minéraux inertes :

Ce sont des matériaux quasiment inertes, naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés et qui par leur composition granulométrique, améliorent les propriétés physiques du ciment Portland : ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau. Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires et les schistes calcinés [6].

❖ **Fillers Calcaires :**

Les fillers calcaires sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles (calcaires, basalte, bentonite, etc.) présentant une teneur en carbonate de calcium CaCO_3 supérieure à 75%. Ces produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométries contrôlées et dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns [6]. Les fillers se différencient les uns des autres par :

- ✓ Leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défaut de structure, les impuretés qu'ils contiennent.
- ✓ leur finesse, la forme des grains, leur état de surface.
- ✓ leur dureté, leur porosité.

Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine.

❖ **Schistes calcinés :**

Les schistes acquièrent des propriétés hydrauliques et pouzzolaniques lorsqu'ils sont thermiquement activés. C'est en particulier le cas des schistes houillers brûlés dans les chaudières [6].

❖ **Sable de dune :**

Le sable est un produit de la désagrégation lente des roches sous l'action des agents d'érosion tels que l'air, la pluie...etc. Ce matériau se trouve en grande quantité dans les régions sahariennes. Le sable de dune était utilisé depuis longtemps dans l'exécution des travaux de remblais, de fondations et les travaux routiers.

Le sable de dunes est un matériau d'une grande disponibilité en Algérie. Ce matériau est pratiquement non exploité, malgré les éventuelles caractéristiques qu'il peut présenter. L'introduction de ce nouveau matériau dans la construction, peut soulager d'avantage le domaine d'habitat, et contribuer au développement des régions du sud algérien, très riches en sable de dune [6].

I.3.3 Principaux ajouts minéraux actifs :

❖ Le laitier granulé de haut fourneau :

Le laitier granulé est obtenu par refroidissement rapide de scorie fondue provenant de la fusion du minéral de fer dans un haut fourneau. Il doit présenter des propriétés hydrauliques latentes (c'est-à-dire qui se manifestent lorsqu'il a subi une activation convenable) pour convenir à son emploi comme constituant du ciment [6].

Le laitier peut être mélangé avec du ciment après avoir été séparé ou après avoir été corroyé avec le clinker. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le ciment Portland et craint donc d'avantage la dessiccation.

Par contre il résiste normalement mieux à l'action destructrice des sulfates, à la dissolution de chaux par les eaux pures ainsi que par celles contenant du gaz carbonique.

La réactivité du laitier peut être augmentée des trois façons :

- ✓ Broyage poussé.
- ✓ Chaleur (étuvage, autoclavage).
- ✓ Produits chimiques (la chaux, la soude (Na OH) ou des sels de soude.

❖ La pouzzolane naturelle ou artificielle :

Les pouzzolanes naturelles sont des produits essentiellement composés de silice, d'alumine et d'oxyde de fer, présentant soit naturellement (lorsqu'elles sont d'origine volcanique) soit après activation thermique des propriétés pouzzolaniques [6].

✓ Pouzzolane naturelle :

Est un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant naturellement des propriétés pouzzolaniques. Elle peut être d'origine volcanique : verre volcanique, ponce, rhyolite, tufs, zéolite ou d'origine sédimentaire : terre à diatomées, diatomites.

✓ Pouzzolane artificielle :

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Les roches traitées thermiquement : argiles, schistes, latérite, bauxite.

❖ La fumée de silice :

Les fumées de silice sont des particules très fines (environ 1 μm) présentant une très forte teneur en silice amorphe. Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans les fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliage Ferro silicium [6].

❖ Les cendres volantes siliceuses ou calciques :

Les cendres volantes sont des particules pulvérulentes obtenues par dépoussiérage électrostatique ou mécanique des gaz de chaudières alimentés au charbon pulvérisé. Présente les différents types de ciment courant en fonction des pourcentages massiques d'ajouts utilisés suivant la norme NF EN 197 1 [6].

I.3.4 Intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux lors de la fabrication des ciments

Portland :

L'utilisation d'ajouts minéraux dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques [6].

❖ Intérêt du point de vue technique :

L'incorporation des particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée (sauf pour les matériaux de très grande surface active, comme les fumées de silice). Les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance mécanique, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques. Enfin, parce qu'ils permettent une faible chaleur d'hydratation des ciments composés, les ajouts minéraux améliorent la résistance à la fissuration [6].

❖ Intérêt du point de vue économique :

Le ciment Portland est le composant le plus onéreux au cours de la production du béton, puisqu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plus part des ajouts susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou le béton sont des sous-produits, et à ce titre, nécessite relativement moins d'énergie, sinon aucune, et sont moins coûteux que le ciment Portland [6].

❖ Intérêt du point de vue environnemental :

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO_2). En effet, la substitution d'une fraction de clinker permet d'obtenir des ciments aux propriétés mécaniques exploitables, ce qui permet une diminution de rejets de CO_2 . Le taux de substitution de clinker est du même ordre que la diminution de rejet de CO_2 [6].

I.3.5 Les inconvénients d'utilisation des ajouts minéraux :

- ✓ Retard de prise.
- ✓ Résistance à la compression à jeune âge plus faible.
- ✓ Mûrissement plus long.
- ✓ Résistance à l'écaillage controversée.
- ✓ Le broyage et le transport plus cher [7].

I.3.6 Rôle de l'ajout cimentaire :

❖ Rôle de la granulométrie de l'ajout :

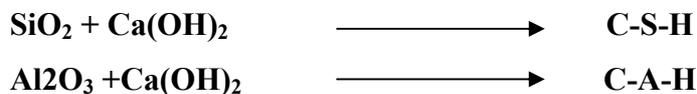
Les ajouts cimentaires finement broyés comblent les interstices granulaires inaccessibles aux grains de ciment et rendent le mélange plus fluide ce qui permet de diminuer la quantité d'eau [7].

❖ Rôle pouzzolanique des ajouts cimentaire :

L'hydratation du ciment portland libère une grande quantité de chaux à la suite de la réaction de l'hydratation du C_3S et C_2S (30% de la masse du ciment). Cette chaux contribue peu à la résistance de la pâte cimentaire hydratée. Elle peut même être responsable de problèmes de durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par de l'eau ; ce lessivage augmente alors la porosité dans le bétonné qui augmente la perméabilité de lessivage.

Les ajouts cimentaires (actifs) réagissent avec cette chaux libérée par l'hydratation du ciment pour donner des C-S-H, véritable liant contribuant à l'augmentation des résistances mécaniques du matériau. L'idéal est d'avoir une ultrafine à grande cinétique de réaction, avec des grains lisses (à défloculation facile) et à très forte activité pouzzolanique [7].

Les réactions pouzzolaniques sont les suivantes :



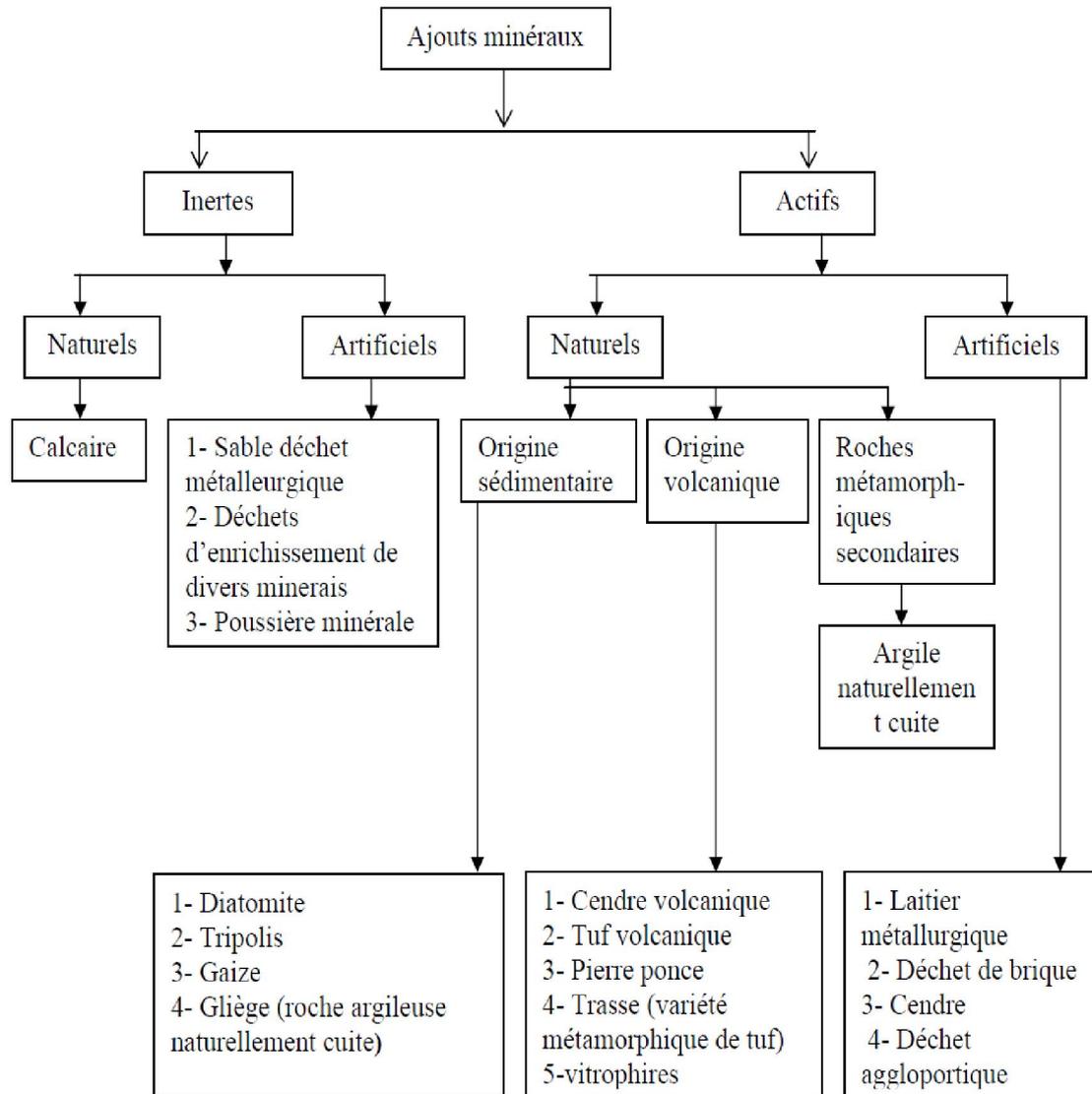


Figure I.3 : Différentes types des ajouts minéraux.

I.4 Les granulats :

Le terme agrégat, utilisé pour désigner les granulats, est donc impropre. En effet, un assemblage hétérogène des substances ou éléments qui adhèrent solidement entre eux (le mortier ou le béton par exemple).

Le terme granulat, au singulier, désigne un ensemble de grains d'un même type, quel que soit le critère de classification utilisé. Le terme granulat, au pluriel, sera utilisé pour désigner un mélange de grains de divers types, caractéristiques propres à chaque usage. Les granulats constituent le squelette du béton et ils représentent, dans les cas usuels, environ 80% du poids total du béton.

I.4.1 Généralités :

Les quatre opérations nécessaires à la production des granulats sont :

- ✓ l'extraction de la matière première.
- ✓ le concassage.
- ✓ le criblage.
- ✓ le stockage avant expédition.

Parfois, une opération complète, remplace un de ces quatre traitements, par exemple ; la cuisson des nodules d'argile de schiste expansé prend place entre le concassage et le criblage et lorsque les nodules sont moulés, le concassage est supprimé.

Le concassage est une opération primordiale dans le cas des granulats de carrière ; intéressant généralement que les classes granulaires.

Il faut donc distinguer les sources pour décrire les particularités de la fabrication, mais on se bornera aux principes généraux car l'équipement nécessaire est extrêmement divers suivant le site, la nature des matériaux, les qualités à produire, les conditions économiques [8].

I.4.2 Types des granulats :

I.4.2.1 Les granulats des carrières :

Ils sont produits à partir de bancs rocheux. Pour le carrier, la connaissance approfondie des bancs de son gisement est évidemment primordial puisque les caractéristiques des granulats produits dépendent de la roche et de la structure des bancs, par exemple, si un banc calcaire dur est très fissuré, étant rempli d'argile, le sable de concassage contiendra beaucoup de fines argileuses.

L'extraction se fait par abattage à l'explosif après que la découverte (terre végétale et roche altérée surplombant le front de taille) ait été éliminée au buteur, l'abattage doit se faire selon les règles de l'art, l'usage de l'explosif étant très réglementé pour des raisons de sécurité et de nuisances à l'égard de la collectivité [8].

I.4.2.2 Les granulats alluvionnaires :

L'extraction se fait classiquement par une pelle mécanique en site terrestre et par dragage en site aquatique.

Ce sont essentiellement les conditions économiques de l'installation et du marché qui déterminent le choix du matériel à utiliser.

Contrairement au cas de l'exploitation en carrière, le concassage est une opération auxiliaire puisqu'on concasse les classes granulaires non demandées pour augmenter la production des classes déficitaires, le matériel de concassage est donc choisi en conséquence [8].

I.4.3 Les caractéristiques des granulats :

I.4.3.1 Les caractéristiques géométriques :

❖ Granulométrie :

La granulométrie permet de déterminer l'échelonnement des dimensions des grains contenus dans un granulat.

Elle consiste à tamiser le granulat sur une série de tamis à mailles carrées, de dimensions d'ouverture décroissantes et à peser le refus sur chaque tamis. Les ouvertures carrées des tamis sont normalisées et s'échelonnent de 0,08 mm à 80 mm.

La courbe granulométrique exprime les pourcentages cumulés, en poids, de grains passant dans les tamis successifs.

Les courbes granulométriques des différents granulats peuvent être déterminées par l'essai de l'analyse granulométrique [NF P 18-560] [8].

❖ Classes granulaires :

On trie les granulats par dimension au moyen de tamis (mailles carrées) et de passoires (trous circulaires) et on désigne une classe de granulats par un ou deux chiffres. Si un seul chiffre est donné, c'est celui du diamètre maximum D exprimé en mm; si l'on donne deux chiffres, le premier désigne le diamètre minimum d , des grains et le deuxième le diamètre maximum D .

Un granulat est caractérisé du point de vue granulaire par sa classe d/D . Lorsque d est inférieur à 2 mm, le granulat est désigné $0/D$.

Il existe cinq classes granulaires principales caractérisées par les dimensions extrêmes d et D des granulats rencontrés (Norme NFP18-101) :

- ✓ Les fines $0/D$ avec $D \leq 0,08$ mm.
- ✓ Les sables $0/D$ avec $D \leq 6,3$ mm.
- ✓ Les gravillons d/D avec $d \geq 2$ mm et $D \leq 31,5$ mm.
- ✓ Les cailloux d/D avec $d \geq 20$ mm et $D \leq 80$ mm.

✓ Les graves d/D avec $d \geq 6,3$ mm et $D \leq 80$ mm [8].

❖ Module de finesse :

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il ya trop des grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF). Celui-ci correspond à la somme de pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis de modules 23, 26, 29, 32, 35, 38. Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables à bétons [8].

❖ Forme des granulats :

La forme d'un granulat est définie par trois grandeurs géométriques :

- ✓ La longueur L , distance maximale de deux plans parallèles tangents aux extrémités du granulat.
- ✓ L'épaisseur E , distance minimale de deux plans parallèles tangents au granulat.
- ✓ La grosseur G , dimension de la maille carrée minimale du tamis qui laisse passer le granulat [8].

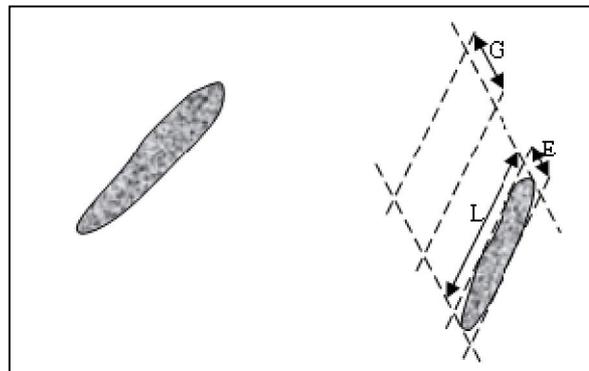


Figure I.4 : Forme d'un granulat [8].

❖ Coefficient d'aplatissement :

Coefficient d'aplatissement caractérise la forme du granulat à partir de sa plus grande dimension et de son épaisseur. Il est déterminé par un double tamisage d'abord au travers de la série des tamis à mailles carrée utilisée pour l'étude de la granulométrie. Puis par un second tamisage des refus retenus sur les différents tamis sur une série de grilles à fentes parallèles, le rapport entre les dimensions des tamis et des grilles étant de 1,58.

La norme [NF P 18-561] définit les modalités de sa mesure [8].

I.5 Le sable :

On appelle sable, les matériaux de petites dimension issues de désagrégation des roches le sable est l'élément qui assure au béton au mortier, selon ses qualités, une influence prépondérante : il participe à la résistance, il donne la cohésion du mélange. Il provient des roches, ils sont chimiquement inertes [9].

I.5.1 Classification de sable :

I.5.1.1 suivant leurs provenances :

➤ **Sable de rivière :**

Ils sont extraits par dragage du lit des cours d'eau (matériaux siliceux). Il est bon parce qu'il est bien lavé mais sa forme ronde facilite les mouvements et diminue son adhérence aux mortiers et béton. Le sable gypseux est à éliminer [9].

➤ **Sable de mer :**

Il provient de la désagrégation des roches sous-marines ou des falaises sous l'action des mouvements des eaux. Il est pur et excellent s'il n'est pas trop fin, il est chargé de sel. Avant l'utilisation on doit le laver à l'eau douce pour le purifier ou le laisser exposé aux intempéries pendant un certain temps ; afin de le débarrasser au maximum des sels marins qu'il contient. Ces sels sont susceptibles de réagir en présence des liants (ciment) [9].

➤ **Sable de dune :**

Ce sable est de qualité très médiocre pour la construction, car il est constitué d'éléments très fins (faible résistance mécanique de béton). Il provient d'éléments de désagrégation des roches transportées par le vent [9].

➤ **Sables de carrière :**

Il doit être lavé avant usage pour éliminer les matières terreuses. Il contient souvent de l'argile qui enrobe les grains de sable en l'empêchant d'adhérer aux liants. Le sable quartzueux exempt de matières terreuses ou argileuses est excellent pour la confection du béton et mortier [9].

I.5.1.2 suivant leurs grosseurs :

- sable fin 0.08 à 0.315 mm
- sable moyen 0.315 à 2.00 mm
- sable gros 2.00 à 5.00 mm [9].

I.5.2 Rôle de sable dans le béton :

La qualité du sable influe considérablement sur la qualité des bétons, le sable joue un rôle important dans la formation de la structure de béton avec le ciment et l'eau, il remplit tous les vides entre les grains du gravier dans le béton [9].

I.6 Le ciment :

Le ciment est un «liant hydraulique». Par «liant», il est sous-entendu une matière susceptible d'en agglomérer d'autres. Le qualificatif « hydraulique » précise, d'une part, que ce liant durcit par gâchage à l'eau, sans addition d'un autre corps réactif et, d'autre part, qu'il durcit, non seulement dans l'air, mais également dans l'eau. Notons au passage qu'un liant « pouzzolanique » à besoin d'une activation pour acquérir ce caractère d'hydraulicité. La substance qui va jouer le rôle d'activant est le plus souvent de la chaux (chaux ajoutée ou libérée par la réaction de prise d'un liant hydraulique). Mélangé à certains sols ou granulats, et en présence d'eau, le ciment crée progressivement une cohésion croissante au sein du mélange qui se traduit par l'obtention de matériaux rigides et durs à performances mécaniques élevées, compatibles avec les exigences souhaitées d'un matériau de construction [10].

I.6.1 Processus de fabrication du ciment :

En principe, la fabrication du ciment Portland est simple. Elle est faite à partir des matières premières abondantes. Des matières premières mélangées, habituellement calcaire et argile, sont chauffées dans un four de 1400 à 1600 C°, la température à laquelle ces matériaux agissent l'un sur l'autre chimiquement pour former les composants du ciment Portland. Une attention considérable est prêtée aux diverses étapes du traitement pour maintenir le bon contrôle de qualité. Ce traitement exige 60 à 80 opérations séparées et continues, l'utilisation de beaucoup de machines lourdes et d'équipement, et la consommation des grands nombres de carburant et d'énergie électrique [10].

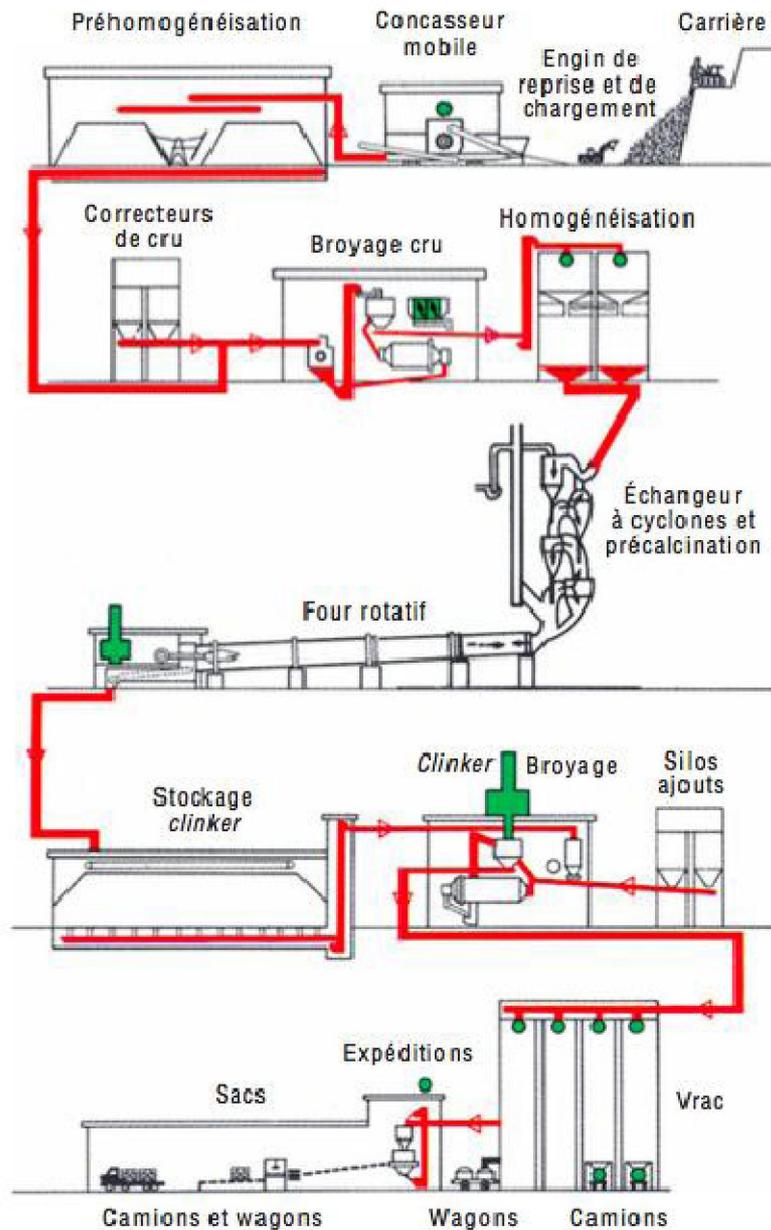


Figure I.5 : Les étapes de fabrication des ciments [10].

I.6.2 Hydratation du ciment :

Le ciment Portland contient quatre constituants principaux :

- ✓ le silicate bicalcique $2\text{CaO}, \text{SiO}_2$ (ou C_2S).
- ✓ le silicate tricalcique $3\text{CaO}, \text{SiO}_2$ (ou, par abréviation, C_3S).
- ✓ l'aluminate tricalcique $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$ (ou C_3A).
- ✓ l'alumino-ferrite tétracalcique $4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$ (ou C_4AF).

L'hydratation du ciment Portland représente la réaction qui se fait entre les phases d'aluminate et les silicates de calcium anhydres avec de l'eau pour former des phases hydratées. Ces hydrates solides occupent plus d'espace que les particules anhydres et le résultat est une masse renfermée rigide dont la porosité est une fonction du rapport de l'eau au ciment (E/C) dans le mélange original. Si le mélange a la plasticité suffisante pour se rendre compacte entièrement, du fait que le rapport E/C sera faible, la résistance à la compression de la pâte du ciment hydraté, du mortier ou du béton sera élevée et ainsi que la résistance à la pénétration par des substances venant du milieu extérieur sera élevée.

Par hydratation, les silicates tricalcique C_3S et bicalcique C_2S donnent du silicate monocalcique hydraté CSH, ainsi que de la chaux libre hydratée CH dite « portlandite », formant un gel micro- cristallin à l'origine du phénomène dit "de prise", les équations suivantes récapitulent approximativement Les réactions d'hydratation :



Ce sont les cristaux de silicate monocalcique hydratés qui, en se fixant entre eux et aux constituants du matériau où ils ont pris naissance, confèrent à ce dernier sa résistance. C'est le développement et la multiplication de ces microcristaux dans le temps qui expliquent l'augmentation des résistances mécaniques. Le matériau durci est une véritable « roche artificielle » qui évolue dans le temps et en fonction des conditions extérieures **[10]**.

Tableau I.4 : Exigences sur les caractéristiques physiques et chimiques du ciment selon la norme NF P 15 301[10].

Type	Notation composition (en % en masse)				
	Dénomination	Symbole (2)	Clinker	Constituants	Constituants
				principaux	secondaires
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95 - 100	0	0 - 5
CEM II	Ciment Portland au laitier	CEM II/A - S	80 - 94	6 - 20	0 - 5
		CEM II/B - S	65 - 79	21 - 35	0 - 5
	Ciment Portland à la fumée de silice (3)	CEM II/A - D ₁	90 - 94	6 - 10	0 - 5
	Ciment Portland à la pozzolane	CEM II/A - P	80 - 94	6 - 20	0 - 5
		CEM II/B - P	65 - 79	21 - 35	0 - 5
		CEM II/A - Q	80 - 94	6 - 20	0 - 5
		CEM II/B - Q	65 - 79	21 - 35	0 - 5
	Ciment Portland aux cendres volantes	CEM II/A - V	80 - 94	6 - 20	0 - 5
		CEM II/B - V	65 - 79	21 - 35	0 - 5
		CEM II/A - W	80 - 94	6 - 20	0 - 5
		CEM II/B - W	65 - 79	21 - 35	0 - 5
	Ciment Portland au schiste calciné	CEM II/A - T'	80 - 94	6 - 20	0 - 5
		CEM II/B - T'	65 - 79	21 - 35	0 - 5
	Ciment Portland au calcaire	CEM II/A - L	80 - 94	6 - 20	0 - 5
		CEM II/B - L	65 - 79	21 - 35	0 - 5
		CEM II/A - LL	80 - 94	6 - 20	0 - 5
		CEM II/B - LL	65 - 79	21 - 35	0 - 5
	Ciment Portland composé (4) (5)	CEM II/A - M	80 - 94	6 - 20	0 - 5
CEM II/B - M		65 - 79	21 - 35	0 - 5	
CEM III	ciment de haut fourneau (6)	CEM III/A	35 - 64	36 - 65	0 - 5
		CEM III/B	20 - 34	66 - 80	0 - 5
		CEM III/C	5 - 19	81 - 95	0 - 5
CEM IV	Ciment pouzzolaniques (5) (7)	CEM IV/A	65 - 90	11 - 35	0 - 5
		CEM IV/B	45 - 64	36 - 55	0 - 5
CEM V	Ciment composé (5)	CEM V/A	40 - 64	36 - 60	0 - 5
		CEM V/B	20 - 39	61 - 80	0 - 5

I.6.3 Classification des ciments :

I.6.3.1 Classification des ciments en fonction de leur composition :

Les ciments constitués de clinker et des constitués secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P15-301 et ENV 197-1. Ils sont numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse) [11] :

CEM I : Le ciment portland (CPA-dans la notation française).

CEM II : Le ciment portland composé (CPJ).

CEM III : Le ciment de haut fourneau (CHF).

CEM IV : Le ciment pouzzolanique (CPZ).

CEM V : Le ciment au laitier et aux cendres (CLC).

La proportion (en masse) des différents constituants est indiquée dans le tableau suivant. Les constituants marqués d'une étoile(*) sont considérés comme constituants secondaires pour le types de ciment concerné, leur total ne doit pas dépasser 5%. (Les fillers sont considérés comme des constituants secondaires) [11].

I.6.3.2 Classification des ciments en fonction de leur résistance normale :

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours, des sous classes (R) sont associés à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées. Ces classes sont notées, classe 32.5, classe 42.5, classe 52.5, elles doivent respecter les spécification et valeurs garanties du tableau suivant [11].

Tableau I.5 : Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe [11].

Classe	Classe à la compression (Mpa) EN 196-1				Retrait à 28 j	Début de prise	Stabilité
	Au jeune âge		à 28 jours		P 15-433	EN 196-3	EN 196-3
	2 jours	7 jours	mini	maxi	($\mu\text{m} / \text{m}$)	(min)	(min)
32.5	-	(17.5)	≥ 32.5 (30)	≤ 52.5	≤ 800	≥ 90	≤ 10
32.5 R	≥ 13.5 (12)	-	≥ 32.5 (30)	≤ 52.5	≤ 1000	≥ 90	≤ 10
42.5	≥ 12.5 (10)	-	≥ 42.5 (40)	≤ 62.5	≤ 1000	≥ 60	≤ 10
42.5R	≥ 20 (18)	-	≥ 42.5 (40)	≤ 62.5	≤ 1000	≥ 60	≤ 10
52.5	≥ 20 (18)	-	≥ 52.5 (50)	-	-	≥ 60	≤ 10
52.5 R	≥ 30 (28)	-	≥ 52.5 (50)	-	-	≥ 60	≤ 10

I.6.3.3 Classification des ciments suivant le type d'environnement :

Certains ciments ont des propriétés supplémentaires leur permettant de s'adapter à des environnements spéciaux de type :

- **Ciment PM (NF P 15-317) :** Résistant à l'eau de mer est un ciment courant possédant des caractéristiques physiques et chimiques complémentaires (teneur limitée en aluminat tricalcique) qui lui donne une résistance accrue à l'agression des ions sulfate en présence d'ions chlorure, au cours de la prise et ultérieurement [12].
- **Ciment ES (XP P 15-319) :** Résistant aux eaux sulfatées est un ciment courant présentant des teneurs limitées en aluminat tricalcique (C_3A) afin d'avoir une résistance accrue à l'agression des ions sulfate au cours de la prise et ultérieurement [13].

- **Ciment CP (NF P 15-318) :** pour béton précontrainte, on distingue deux types de ciment qui diffèrent par leur teneur en ions sulfure SO_4^{-2} [14]:
- ✓ **Ciments de la classe CP1 :** contenant moins de 0.7 % d'ions sulfure recommandé pour la précontrainte par post-tension.
- ✓ **Ciments de la classe CP2 :** contenant moins de 0.2 % d'ions sulfure recommandé pour la précontrainte par prés-tension.

Il existe par ailleurs des ciments spéciaux répondant à des conditions spécifiques (durcissement très rapide, résistance aux fortes chaleurs ou aux agressions chimiques), c'est le cas du ciment alumineux fondu, très résistant aux milieux acides.

I.7 L'eau :

L'eau distribuée par les services publics sert de référence pour la formulation du béton car elle répond en général aux prescriptions de la norme (NF EN 1008). Cette eau ne doit pas présenter un excès d'impuretés (NF EN 1008, 2003) qui peuvent détériorer les propriétés des bétons (résistance, propriétés esthétiques, corrosion des armatures, etc.).

Une partie de l'eau ajoutée au béton est mobilisée par les granulats (absorption, adsorption), alors qu'une deuxième partie est consommée par l'hydratation, et une troisième partie reste libre dans la matrice du béton. Cette dernière est principalement responsable de la fluidité du béton, en agissant sur la concentration en solides de la suspension entre les granulats [15].

L'augmentation du dosage en eau entraînera une augmentation de la fluidité de la pâte de ciment en diminuant la concentration en solides, ceci est traduit par une diminution du seuil de cisaillement et de la viscosité.

I.7.1 Classification des types d'eau :

En général, l'aptitude à l'emploi de l'eau pour la production de béton dépend de son origine. Les types suivants peuvent être distingués :

a. Eau potable :

Cette eau est considérée comme appropriée pour la fabrication du béton et ne nécessite aucun essai [16].

Dans notre travail, en va utiliser l'eau potable disponible au niveau de notre université.

b. Eaux d'origine souterraine :

Ces eaux peuvent être appropriées, mais doivent être soumises à des essais [16].

c. Eaux naturelles de surface et eaux de rejet industrielles :

Ces eaux peuvent être appropriées, mais doivent être soumises à des essais [16].

d. Eau de mer et eaux saumâtres :

Ces eaux peuvent être utilisées pour la production de béton non armé, mais ne conviennent pas en général à la production de béton armé ou précontraint [16].

e. Eaux usées :

Ces eaux ne conviennent pas pour la fabrication du béton [16].

I.8 Les méthodes de composition des bétons :

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage ou de la partie d'ouvrage en cause [17]. Cette composition à donner à un béton dépend des qualités que l'on désire, des besoins à satisfaire et des moyens dont on dispose pour le réaliser. Les méthodes proposées sont nombreuses et il n'est pas possible de les citer toutes; elles aboutissent à des dosages « volumétriques » ou de préférence « pondéraux », le passage de l'un à l'autre pouvant toujours se faire, si nécessaire, par la connaissance de la densité apparente des granulats en vrac [17]. Ces méthodes sont dites à « granularité continue » et d'autres à « granularité discontinue »; la première permet d'obtenir des bétons plus plastiques et de bonne ouvrabilité, par contre la seconde conduit à des bétons à maximum de gros éléments et minimum de sable présentant en général des résistances en compression un peu supérieure mais parfois au détriment de l'ouvrabilité. Cependant, on peut estimer que pratiquement la plupart des bétons actuellement utilisés sont à granularité continue [17]. De nombreux spécialistes se sont penchés sur cette question. Mais quelques méthodes sont plus utilisées, parmi elles nous pouvons citer :

- ✓ La méthode de Bolomey.
- ✓ La méthode d'Abrams.
- ✓ La méthode de Faury.
- ✓ La méthode de Valette.
- ✓ La méthode de Joisel.
- ✓ La méthode de Dreux-Gorisse.

I.8.1 La méthode de Bolomey :

A partir d'une formule appropriée, [18]. Fait introduire le plus petit et le plus gros diamètre d et D des granulats et un coefficient qui représente le pourcentage d'éléments fins contenus dans le mélange sec et qui dépend de la consistance souhaitée du béton ainsi que la nature des granulats. On se réfère donc aux courbes granulométriques des constituants secs et on s'efforce de réaliser avec les granulats dont on dispose une composition granulaire totale

(ciment compris), dont la courbe soit aussi proche que possible de la courbe de référence théorique. La formule de base est la suivante :

$$P = A + (100-A) \sqrt{d}/D$$

Avec

P : pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d.

D : diamètre du plus gros grain.

A : coefficient qui varie de 8 à 16, sa valeur étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort.

I.8.2 La méthode d'Abrams :

Abrams proposa une règle de mélange basée sur l'obtention d'un certain module de finesse global pour le mélange de granulats à partir de la connaissance des modules de finesse des granulats à employer [17]. Autrement dit elle permet de calculer les pourcentages relatifs des granulats de module de finesse M_{f1} et M_{f2} pour obtenir un module M_f choisi pour le mélange. Ce dernier est choisi de manière que les vides dans ce mélange, soient, en principe réduits au minimum. Ce module dépend évidemment de nombreux paramètres tels que: forme, nature et dimension des granulats, dosage en ciment, résistance et plasticité désirée.etc [17].

I.8.3 La méthode de Faury :

C'est en 1942 que Faury proposa une nouvelle loi de granulation du type «continu ». Il s'inspirait de la théorie de Caquot relative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un usage moyen. La loi de granulation qui en découle est une fonction de $5\sqrt{d}^5$; c'est pourquoi Faury adopta une échelle des abscisses graduée en $5\sqrt{d}$. La courbe granulométrique idéale conduit à la compacité maximale est alors théoriquement une droite; cependant Faury a distingué les grains fins moyens ($D/2$) des gros grains ($>D/2$) et la pente de la droite de référence n'est pas la même pour chacune de ces deux catégories [17].

I.8.4 La méthode de Valette :

Son principe repose sur le calcul du dosage de sable et ciment devant donner un mortier plein à minimum de ciment; ce dosage s'obtient en mesurant les vides du sable mouillé et en calculant le dosage en ciment permettant de remplir le volume des vides du sable par un volume égal de pâte pure de ciment [17]. On ajoute ensuite le maximum de gravier mouillé compatible avec une ouvrabilité permettant un moulage correct et une mise en œuvre facile dans les conditions du chantier. On obtient alors le béton plein à minimum de sable et le moins dosé (en ciment) [17].

I.8.5 La méthode de Joisel :

Comme celle de Faury, cette méthode s'inspire de la théorie de Caquot mais en la généralisant. Joisel considère que la loi de granulation conduisant à la compacité maximale est en fonction de $m\sqrt{d}$, om est fonction de la compacité avec laquelle se serre un granulat de dimension uniforme selon les moyens de serrage; m peut alors varier de 3 à 10 [17].

I.9 Propriétés principales des bétons :

I.9.1 Propriétés Physiques :

I.9.1.1 Ouvrabilité :

L'ouvrabilité est une qualité essentielle du béton ; elle peut se définir comme la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage : une bonne ouvrabilité comporte une marge de sécurité permettant sans conséquence fâcheuses. Une certaine et nécessaire latitude par rapport aux bonnes et plus ou moins rigoureuses règles à appliquer pour une exécution optimale. L'ouvrabilité dépend, en effet, la plupart des qualités de l'ouvrage : compacité et résistance réelle du béton dans l'ouvrage lui-même, enrobage et adhérence des armatures, cohésion du béton entraînant un moindre risque de ségrégation, parements de belle apparence, étanchéité. C'est pourquoi l'ouvrabilité doit être considérée par le laboratoire chargé de l'étude d'un béton, comme une qualité aussi importante que la résistance.

Elle est influencée par la granulométrie et la forme des granulats, par le dosage en ciment et en eau, par l'emploi éventuel d'adjuvants. Les essais de mesure de consistance du béton les plus courants sont l'essai d'affaissement au cône d'Abrams [norme NF P 18-451], l'essai d'étalement à la table à secousses et maniabilimètre L.C.P.C. Mais les essais vébé et indice de serrage ne s'appliquent qu'à des bétons très fermes [4].

I.9.1.2 Le Retrait :

Est une diminution dimensionnelle du béton en l'absence de chargement, dû à l'élimination d'une partie de l'eau de gâchage et aux réactions d'hydratation des grains de ciment. Le siège du retrait se situe dans la pâte du ciment, selon les circonstances, peuvent se développer dans un béton.

Le durcissement sous l'eau diminue beaucoup les effets de retrait. C'est pourquoi il convient de tenir les pièces humides en les arrosant pendant leur durcissement (cure du béton) à une époque où le béton très jeune n'a encore qu'une faible résistance en traction et se fissurerait facilement sous l'effet du retrait.

Généralement le retrait est différent selon la région par exemple :

Région très humides : $\Delta L/L = 1.5 \times 10^{-4}$ à 2×10^{-4} (mm/m).

Région très sèches (Sahara) : $\Delta L/L = 5 \times 10^{-4}$ (mm/m).

Il y a cinq types de retrait : Le retrait plastique, le retrait de séchage, le retrait endogène, le retrait thermique et le retrait de carbonatation [4].

I.9.1.3 La compacité et la porosité :

Sont des caractéristiques physiques essentielles du béton, conditionnent plusieurs propriétés de ce dernier telles que sa perméabilité, ses résistances mécaniques, son module d'élasticité et surtout sa durabilité.

Plus la porosité diminue, plus la compacité augmente, plus la perméabilité diminue, et plus les propriétés mécaniques augmentent.

La porosité du béton est constituée de plusieurs familles de vide, qu'on peut classer en fonction de leurs dimensions, leurs géométries et de leur rôle dans le transport de matière :

Les dimensions sont comprises entre quelques mm et quelques dizaines d'Armstrong. Les plus petits vides du béton sont donc 1 million de fois plus petits que les plus gros.

Par ordre décroissant de diamètre on retrouve :

- ✓ **Les vides d'air ou pores** (diamètre > 1 mm), ces vides ne sont généralement pas remplis d'eau.
- ✓ **Les bulles d'air entraînées** ($10\mu < \text{diamètre} < 1\text{mm}$).
- ✓ **Les pores capillaires** ($0.01\mu\text{m} < \text{diamètre} < 5\mu\text{m}$), si le béton est constamment conservé à l'humidité, on peut considérer que les pores capillaires sont pratiquement remplis d'eau. Par contre, si le béton est soumis au séchage, les pores capillaires commencent à se vider graduellement en commençant par les plus gros.
- ✓ **Les pores des gels** (diamètre < 40 Å), contiennent de l'eau qui est en partie adsorbée à la surface des feuillettes de C-S-H. cette eau est relativement stable est difficile de l'extraire par séchage [19].

I.9.1.4 Perméabilité et diffusivité :

La perméabilité est l'aptitude d'un matériau à se laisser pénétrer et traverser par un fluide (eau, air, ou un autre gaz ...). Elle est directement liée aux caractéristique du réseau poreux (forme, dimension, distribution, sinuosité, etc.), la perméabilité des matériaux cimentaires varie avec la progression de l'hydratation [20].

La diffusion est relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration, elle ne dépend pas de la taille des pores mais de leur interconnexion, les mécanisme et les lois qui régissent la perméabilité et la diffusivité sont

différents mais les moyens d'action les limitant sont les même c-à-d, limiter le volume occupé par l'eau et la connectivité du réseau capillaire, car le béton est d'autant plus durable qu'il résiste à la pénétration des agents agressifs extérieurs [21].

I.9.2 Propriétés mécaniques :

I.9.2.1 Résistance mécanique :

La résistance mécanique d'un béton dépend de plusieurs paramètres à savoir :

- ✓ La nature et la qualité des constituants (ciment, granulats, eau, adjuvant).
- ✓ Les conditions de mise en œuvre de ces constituants.
- ✓ Les conditions thermo hygrométriques ambiantes de conservation.

I.9.2.2 Résistance à la compression :

La résistance en compression simple du béton est le paramètre fondamental du comportement pour l'ingénieur de bureau d'études. Est la propriété la plus utilisée dans le dimensionnement et la conception des ouvrages en béton armé.

Tout d'abord, l'ingénieur de bureau d'études s'intéresse à une valeur caractéristique le plus souvent à 28 jours. Cette durée ne signifie pas que les réactions d'hydratation du ciment sont terminées. C'est, en fait, un compromis entre un délai trop long pour le contrôle et l'obtention d'une valeur représentative de la résistance finale que l'on peut considérer comme acquise après plusieurs mois de réactions d'hydratation [22].

I.9.2.3 Résistance à la traction :

La mesure de la résistance en traction est beaucoup plus rare que celle de la résistance en compression. Ceci essentiellement parce que, dans les règlements actuels, le béton tendu est généralement négligé (en béton armé et précontraint, mais pas dans les chaussées, par exemple). De plus, cette résistance en traction étant faible, une estimation à partir de la résistance en compression est souvent suffisante [22].

I.9.3 Durabilité :

Un béton durable est un béton capable de résister à un degré satisfait aux attaques chimiques et à tout processus de détérioration. Il conserve sa forme originale et sa qualité quand il est exposé à son environnement. La durabilité du béton dépend des facteurs qu'il n'est pas toujours aisé d'isoler : condition de mise en œuvre, compositions des différents constituants (ciment, granulats, eau, adjuvants), âge du béton, conditions climatiques et le milieu dans lequel le béton est exploité.

Les facteurs influençant la durabilité peuvent être internes aux bétons comme la porosité, perméabilité et diffusivité, la fissuration, les ions chlore (présent dans certains accélérateurs et eau de gâchage), réaction alcalis granulats, les ions sulfates (dans certains granulats calcaires),

ou externes (cycle de gel dégel, l'action des sels de déverglaçage...), les ambiances chimiquement agressives notamment le dioxyde de carbone, les eaux souterraines, l'eau de mer, les acides ...etc.

I.10 Conclusion :

Toute formulation d'un matériau composite (pâtes de ciment, mortiers ou bétons), passe par la compréhension de l'influence de chacun de ses constituants sur ses propriétés rhéologiques du mélange. Aussi, le rôle d'un constituant dans le mélange va dépendre essentiellement de son état (fluide, solide) et de sa nature minéralogique, chimique, et morphologique.

Pour ce qui est des constituants du béton, une gamme des ciments courants, écologiques, durables et économiques sont produits par réduction de la teneur en clinker et l'incorporation des différents types d'ajout minéraux, par ailleurs, cette gamme des ciments permet de choisir le ciment en fonction de la résistance caractéristique garantie, et celle nécessaire au décoffrage du béton, de l'environnement de l'ouvrage. Pour le gâchage du béton, l'eau potable est toujours utilisable, mais, si on doit utiliser une autre eau la norme NF EN 1008 précise les conditions d'utilisation d'une eau de gâchage. Les granulats doivent répondre à certaines exigences sur leur nature, leur taille et leur forme, ils ne doivent pas contenir d'éléments nocifs préjudiciables à la qualité du béton. Des adjuvants peuvent être ajoutés au béton pour améliorer certains de ces propriétés, cependant les accélérateurs de prise à forte teneur en chlorure sont à éviter.

Chapitre II :
**Influence des constituants
sur la qualité de béton**

II.1 Introduction :

Les caractéristique des matériaux, sont influée sur la qualité du béton quelque soit sur les propriétés à l'état frais ou durci, cette caractérisation de la substance de cette matériaux améliorer plusieurs propriétés du béton, dans ce chapitre on étudiée les différentes matériaux qui réagit pour former le béton et ces influence de cette sur le béton.

La qualité du béton est intimement liée à celle de ses constituants et particulièrement les granulats puisqu'ils occupent les trois quarts de son volume, il n'est pas étonnant que la qualité de ces derniers revête une grande importance. Non seulement les granulats peuvent limiter la résistance du béton, mais, selon leurs propriétés, ils peuvent affecter la durabilité et les performances structurales du béton. Les granulats sont donc, un constituant essentiel des bétons qui conditionne à la fois leurs caractéristiques et leur coût. Leur élaboration relève des industries extractives. En fait, on ne peut confectionner un béton résistant avec des granulats dont les propriétés sont médiocres.

II.2 Influence des ajouts minéraux sur le béton :

La plupart des additions minérales sont des sous-produits provenant de l'industrie et leur coût est souvent égal au coût du transport et de manipulation (broyage par exemple).

En général, les additions minérales influencent fortement les propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais et à l'état durci. Certaines permettent d'améliorer les propriétés mécaniques (ca dépend de l'addition et de l'âge du matériau) et d'autres la durabilité des matériaux cimentaires. En raison de leurs petites dimensions, les particules en poudre se glissent entre les grains plus gros (sable par exemple), contribuant ainsi à avoir un squelette solide plus compact et réduisant l'espace libre pour l'eau [23].

II.2.1 A l'état frais :

II.2.1.1 Demande en eau :

Les mélanges de béton contenant des cendres volantes nécessitent généralement, à affaissement égal, moins d'eau que le béton ne contenant que du ciment portland (environ 1 % à 10 % de moins que le dosage normal). Des dosages plus élevés peuvent mener à de plus grandes réductions d'eau [23].

Toutefois, certaines cendres volantes peuvent engendrer une augmentation de la demande en eau, pouvant atteindre 5 %, [Gebler et Klieger 1986]. Les cendres volantes réduisent la demande en eau de la même manière que les agents réducteurs d'eau liquides [Helmuth 1987]. Le laitier broyé diminue généralement la demande en eau de 1 % à 10 %, selon le dosage. En l'absence de réducteur d'eau ou de superplastifiant, la demande en eau du béton

contenant de la fumée de silice augmente avec l'augmentation de la quantité de fumée de silice [23].

Certains bétons maigres peuvent ne pas exiger une plus grande demande en eau lorsqu'une petite quantité (moins de 5 %) de fumée de silice est utilisée.

L'argile calcinée, le schiste calciné et le métakaolin utilisés à des dosages normaux ont généralement peu d'effet sur la demande en eau. Cependant, les autres pouzzolanes naturelles peuvent augmenter ou diminuer de façon significative la demande en eau [23].

II.2.1.2 Ouvrabilité :

La cendre volante, le laitier et l'argile calcinée et le schiste calciné améliorent généralement l'ouvrabilité des bétons d'affaissement semblable. Les fumées de silice peuvent contribuer à rendre le mélange collant et un ajustement du mélange, y compris l'utilisation d'un agent réducteur d'eau, peut être nécessaire pour maintenir la maniabilité, pour permettre une bonne consolidation et pour obtenir une meilleure finition [23].

II.2.1.3 Ségrégation et ressuage :

Les bétons utilisant des cendres volantes présentent en général moins de ségrégation et de ressuage que les bétons qui n'en contiennent pas. Ceci en rend l'emploi particulièrement avantageux dans les bétons fabriqués avec des granulats déficients en particules fines.

Le ressuage plus faible est principalement dû à la demande en eau plus faible des bétons avec cendres volantes. [Gebler et Klieger, 1986] ont montré qu'il existe une corrélation entre la diminution du ressuage du béton et la demande en eau plus faible des mortiers avec cendres volantes [23].

Les bétons faisant appel à des laitiers granulés broyés de finesse égale à celle du ciment tendent à ressuer davantage que les bétons qui n'en contiennent pas, mais cela ne semble pas avoir d'effet défavorable sur la ségrégation. Les laitiers broyés plus fins que le ciment réduisent le ressuage [23].

Les fumées de silice sont très efficaces pour réduire le ressuage et la ségrégation. Il est donc possible d'avoir recours à des affaissements plus élevés.

L'argile et le schiste calcinés ainsi que le métakaolin ont peu d'effet sur le ressuage [23].

II.2.1.4 Chaleur d'hydratation :

Les cendres volantes, les pouzzolanes naturelles et le laitier broyé réduisent la quantité de chaleur qui s'accumule dans une structure de béton en raison de leur chaleur d'hydratation moins élevée que celle du ciment portland, la chaleur d'hydratation de certaines pouzzolanes correspond à seulement 40 % de celle du ciment. Ceci est particulièrement avantageux dans le

cas du béton employé dans les structures massives. Les fumées de silice peuvent réduire ou non la chaleur d'hydratation [23].

II.2.1.5 Temps de prise :

L'utilisation des cendres volantes et de laitier de haut fourneau granulé broyé allonge généralement le délai de prise du béton. Le degré de retard de la prise dépend des facteurs tels que la quantité de ciment portland et d'eau requise, le type et la réactivité du laitier, le dosage en pouzzolane et la température du béton. Un retard de la prise peut s'avérer avantageux durant la saison chaude, puisqu'il laisse plus de temps pour la mise en place et à la finition du béton. Cependant, durant la saison froide, certains matériaux peuvent engendrer un important retard de prise pouvant retarder très significativement les opérations de finition. On peut avoir recours à des accélérateurs de prise pour diminuer le temps de prise. L'argile et le schiste calciné ont peu d'effet sur le temps de prise [23].

II.2.1.6 Retrait plastique :

Du fait de ses faibles caractéristiques de ressuage, le béton qui contient de la fumée de silice peut développer d'avantage de fissures de retrait plastique. On évite ce problème en veillant à bien protéger le béton du dessèchement durant et après la fabrication. Les pouzzolanes et le laitier ont en général peu d'effet sur la fissuration causée par le retrait plastique. Les ajouts cimentaires qui augmentent de façon significative le temps de prise peuvent augmenter le risque de fissuration causée par le retrait plastique [23].

II.2.2 A l'état durci :

II.2.2.1 La résistance :

Les cendres volantes, le laitier de haut fourneau granulé broyé, l'argile calcinée, le métakaolin, le schiste calciné, et la fumée de silice contribuent au gain de résistance du béton. Cependant, pour les bétons contenant des ajouts cimentaires, le taux d'accroissement de la résistance en compression en fonction du temps sera souvent différent de celui des bétons qui ne contiennent que du ciment portland. Les résistances en traction-flexion, sont modifiées de la même manière que la résistance en compression [23].

II.2.2.1.1 Résistance à l'impact et à l'abrasion :

La résistance à l'impact et la résistance à l'abrasion du béton sont liées à la résistance à la compression et au type de granulat. Les ajouts cimentaires ne modifient généralement pas ces propriétés en dehors de leur influence sur la résistance. Les bétons contenant de la cendre volante sont tout aussi résistants à l'abrasion que les bétons fabriqués à partir de ciment portland sans ajout de cendre volante [23].

II.2.2.1.2 Résistance aux cycles de gel-dégel :

Il est primordial pour le développement de la résistance à la détérioration par les cycles de gel-dégel qu'un béton possède une résistance et une teneur en air entraîné suffisantes. Pour qu'un béton contenant des ajouts cimentaires présente la même résistance aux cycles de gel-dégel qu'un béton dont le seul liant est du ciment portland, quatre conditions doivent être respectées :

1. Les deux bétons doivent avoir la même résistance en compression.
2. Les deux bétons doivent avoir une teneur suffisante en air entraîné et un réseau approprié de bulles d'air.
3. Les deux bétons doivent être mûris convenablement.
4. Les deux bétons doivent être séchés à l'air pendant un mois avant d'être exposés au gel avec saturation [23].

II.2.2.1.3 Résistance aux agents de déverglaçage :

Plusieurs décennies d'expérience en chantier ont démontré que les bétons à air entraîné contenant un dosage normal en cendre volante, laitier, fumée de silice, argile calcinée ou schiste calciné résistent à l'écaillage pouvant résulter de l'application de sels de déglçage dans un environnement de gel-dégel. Des essais en laboratoire indiquent aussi que la résistance à l'écaillage de bétons fabriqués sans ajouts cimentaires est souvent égale à celle de bétons contenant des ajouts cimentaires [23].

II.2.2.1.4 Résistance aux attaques chimiques :

Les ajouts cimentaires réduisent généralement les attaques chimiques en réduisant la perméabilité du béton. Bien que plusieurs de ces matériaux puissent améliorer la résistance aux attaques chimiques, ils ne protègent pas complètement le béton contre celles-ci. Les bétons soumis à une attaque chimique sévère doivent être protégés grâce à un système de protection. [Kherkhoff, 2001] décrit des méthodes et des matériaux permettant de protéger les bétons contre les agressions chimiques [23].

II.2.2.1.5 Résistance à l'attaque des sulfates :

A dosage et sélection des matériaux appropriés, la fumée de silice, les cendres volantes, le schiste calciné, et le laitier broyé améliorent généralement la résistance du béton à l'agression des sulfates ou de l'eau de mer, principalement en réduisant la quantité d'éléments réactifs (comme le calcium) nécessaires aux réactions expansives des sulfates [23].

II.2.2.1.6 Résistance à la désagrégation :

Lorsqu'ils sont utilisés à dosages normaux, les cendres volantes, le laitier, la fumée de silice et les pouzzolanes naturelles n'affectent pas la résistance à la désagrégation du béton.

Chapitre II : Influence des constituants sur la qualité de béton

L'intégrité du béton est assurée par des exigences relatives à la qualité des matériaux, telles que les limites d'expansion à autoclave. Les dosages utilisés dans le béton ne doivent pas être supérieurs aux dosages jugés sécuritaires lors de l'essai à l'autoclave [23].

Tableau II.1 : Effets principaux des ajouts les plus utilisés.

Constituant ajouté		Effets principaux du constituant ajouté au clinker
S	Laitier granulé de haut fourneau	<ul style="list-style-type: none">- Diminue la réactivité à court terme.- Diminue les retraits.- Montée en résistance moins rapide.- Adapté aux ouvrages en contact avec les sols.
Z	Pouzzolane naturelle	<ul style="list-style-type: none">- Diminue la réactivité à court terme et ses effets.- Complète l'hydratation en consommant la portlandite.
Q	Pouzzolane calcinée	<ul style="list-style-type: none">- Diminue la réactivité à court terme et ses effets.- Complète l'hydratation en consommant la portlandite.
V	Cendre volante siliceuse	<ul style="list-style-type: none">- Apporte une résistance complémentaire à long terme.- Améliore la durabilité en diminuant la perméabilité.- Améliore l'ouvrabilité. Teinte en noir le béton.
W	Cendre volante calcique	<ul style="list-style-type: none">- Améliore l'ouvrabilité. Teinte en noir le béton.
T	Schiste calciné	<ul style="list-style-type: none">- Diminue la réactivité à court terme et ses effets.- Complète l'hydratation en consommant la portlandite.
L et LL	Calcaire broyé	<ul style="list-style-type: none">- Accélère l'hydratation à très court terme (2 à 7 jours).- Complète le squelette granulaire.
M	Mélange de constituant	<ul style="list-style-type: none">- Associe les effets des différents constituants.- Diminue le prix de ciment. Couleur et propriétés variables.

II.2.3 Les mortiers durcis :

II.2.3.1 Résistances mécaniques :

Les résultats obtenus pour les résistances en compression et les résistances en flexion des mortiers à base de pouzzolane naturelle sont consignés dans le tableau suivant. Leurs représentations graphiques, sont respectivement, sur les figures suivantes [24].

✓ Matériaux utilisés :

Ciment : CPA CEM I 42.5 ES NA 443.

Sable : sable normalisées.

Eaux : eaux naturel.

Tableau II.2 : Résistances mécaniques des mortiers [24].

Désignation	Résistance en flexion R_f (Mpa)			Résistance en compression R_c (Mpa)		
	3 mois	6 mois	9 mois	3 mois	6 mois	9 mois
CEMI	7.37	7.85	8.20	42.00	43.75	44.37
PZN20	7.85	7.96	8.07	41.00	41.00	43.33
PZN30	7.58	7.78	8.00	38.12	38.12	39.79
PZN35	7.08	7.40	7.81	36.87	36.87	37.50
PZN40	6.30	6.91	7.61	28.12	28.12	31.46
PZN50	6.10	6.58	7.14	25.60	27.10	28.00

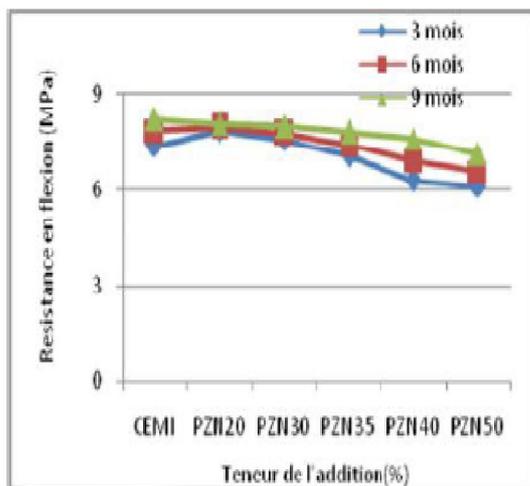


Figure II.1 : Évolution des résistances en flexion en fonction de l'âge et de la teneur de pouzzolane [24].

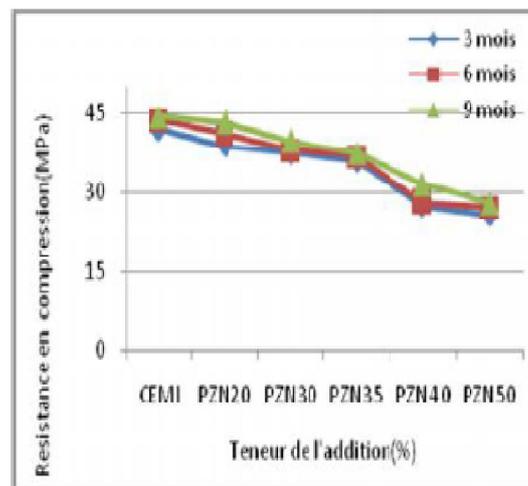


Figure II.2 : Évolution des résistances en compression en fonction de l'âge et de la teneur de pouzzolane [24].

II.2.3.2 Résistances en flexion et en compression :

Les résultats de résistance en flexion et en compression des mortiers en fonction de la teneur de la pouzzolane naturelle, aux différents âges sont rapportés sur les figures 1, 2.

La figure II.1 : montre l'effet positif de la pouzzolane naturelle sur la résistance en flexion des mortiers. Notons que les résistances en flexion des mortiers contenant 20%, 30%, 35%, 40% et 50%, se rejoignent avec le mortier de référence à 9 mois d'observation [24].

La figure II.2 : montre que la résistance en compression des mortiers contenant la pouzzolane naturelle augmente en fonction de l'âge pour toutes les teneurs de l'ajout. Notons que la teneur de 20% de pouzzolane naturelle constitue l'optimum de résistance pour toutes les échéances (3, 6 et 9 mois). L'augmentation de la résistance des mortiers contenant la pouzzolane naturelle est attribuée à la pouzzolane qui consomme la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ lors de l'hydratation du ciment CEM I, pour donner naissance à d'autres hydrates C-S-H de deuxième génération qui améliorent le remplissage des pores engendrés par la réaction pouzzolanique [24].

II.2.4 Influence de calcaire sur les propriétés des bétons durcis :

II.2.4.1 Résistance à la compression :

Les résultats des essais de la résistance à la compression effectués sur les bétons recyclés et ordinaires contenant différents pourcentages de calcaire en fonction de l'âge sont représentés graphiquement dans les figures suivantes [25].

✓ **Matériaux utilisés :**

Sable : sable naturel.

Ciment : CPJ 42,5 (MATINE).

Gravier : la fraction 3/8, fraction 8/15 (gravier naturel et gravier recyclé).

Adjuvant : médaflow 30.

Eaux : eaux naturel.

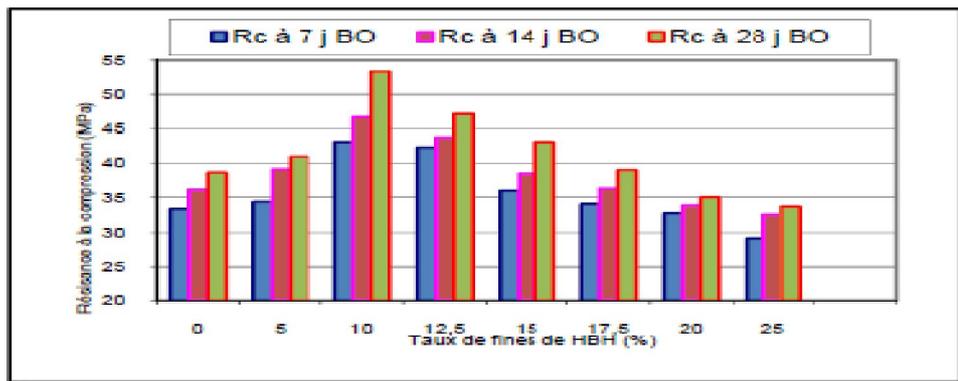


Figure II.3 : Variation de la résistance à la compression des bétons ordinaires en fonction du taux de calcaire [25].

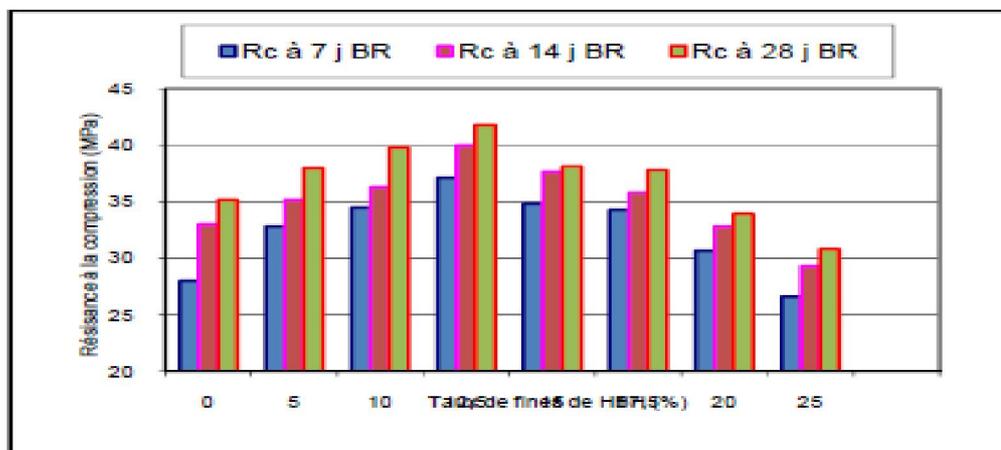


Figure II.4 : Variation de la résistance à la compression des bétons recyclés en fonction du taux de calcaire [25].

II.2.4.2 Discussion du résultat :

A partir des résultats obtenus, nous remarquons pour tous les bétons une augmentation évolutive de la résistance à la compression avec l'âge du béton et ne présentant aucune chute. Ainsi, on observe que les bétons étudiés présentent des résistances en compression acceptables aux jeunes âges et ils présentent des performances mécaniques satisfaisantes en compression [25].

D'après la figure précédente, on constate que l'évolution de la résistance en compression en incorporant divers taux de calcaire présente la même allure quel que soit l'âge des éprouvettes à 7, 14 et 28 jours des différents types de bétons testés (recyclés ou ordinaires) [25].

Les performances mécaniques se développent dans les premiers jours de l'hydratation, plus rapidement pour les bétons témoins que pour les bétons étudiés avec les additions de calcaire.

Au jeune âge, les résistances mécaniques sont d'autant plus faibles que le taux de calcaire est élevé. On remarque aussi que l'ajout de calcaire de 5% et 10% pour le béton ordinaire et 5%, 10% et 12,5% pour le béton recyclé améliore la résistance à la compression des bétons étudiés à moyen et à long terme par rapport à un béton témoin (BR 0%, BO 0%) [25].

En suite, on note après 10% et particulièrement à 12.5 et 15% de fines calcaires, une chute de résistance à la compression de béton ordinaire qui toutefois, reste supérieure à celle de béton ordinaire témoin (BO 0%) Par contre, la résistance à la compression de béton recyclé BR 15%, rejoint de près celle du béton témoin BR 0%. Au-delà de ce pourcentage d'ajout de calcaire, il y a une diminution de la résistance de béton recyclé par rapport à celle de béton recyclé sans calcaire. Ainsi, on remarque que l'ajout de calcaire au delà de 15% pour le béton ordinaire, la résistance obtenue est toujours plus faible à celle du béton ordinaire sans calcaire [25].

II.3 Influence des granulats :

II.3.1 Influence des caractéristiques des granulats sur les propriétés des bétons à l'état frais :

Les caractéristiques des granulats ont une grande influence sur celles des bétons: soit il y a une influence directe sur une propriété particulière du béton, soit il y a une influence sur le rapport E/C nécessaire pour obtenir la maniabilité voulue, avec toutes les conséquences qui en résultent sur la résistance et la durabilité. Pour réduire les coûts on cherche, autant que possible, à utiliser les granulats disponibles localement; dans quelques cas, cependant, le choix peut être orienté par le ou les objectifs techniques comme la maniabilité, l'aspect des parements, les résistances, la durabilité.

II.3.1.1 Influence de la masse volumique des granulats :

Des études expérimentales effectuées par Barrioulet M. et Lergand C [26]. S'intéressent à la variation du débit d'écoulement Q en fonction de la concentration en granulats de mélanges composés de pâtes interstitielles de même composition ($\gamma^* = 0,570$) d'où :

$$\gamma = \frac{\text{volume de la phase solide}}{\text{volume de la phase solide} + \text{volume de la phase liquide}}$$

Et de granulats de même caractéristiques dimensionnelle (d =10 mm). Pour une concentration en granulats donnée, on constate une variation quasi linéaire du débit du mélange en fonction de la masse volumique des granulats, que cette dernière soit d'ailleurs supérieure ou inférieure à la masse volumique de la pâte.

II.3.1.2 Influence de la dimension des granulats :

Même si les paramètres caractéristiques des granulats sont fixés, leur dimension influe sur l'écoulement.

Lorsque celle-ci (la dimension) augmente de 5 à 15 mm, on constate une décroissance linéaire du débit pour des mélanges constitués de billes de verre, cette variation est aussi constatée pour des mélanges formulés de granulats de calcite de dimension moyenne allant de 5 à 12 mm environ. Il semble logique que cette influence de la dimension est liée au nombre de granulats se trouvant dans le mélange [26]. L'augmentation du nombre de grains, à concentration constante, entraînant une amélioration de l'écoulement.

Il convient de noter que lorsque la dimension des granulats devient inférieure à 5 mm la loi de la variation est inversée : le débit décroît lorsque la dimension des grains diminue.

II.3.1.3 Influence sur l'ouvrabilité :

Les courbes A, B, C correspondent à différents bétons. Elles montrent toutes un temps d'écoulement minimal pour un rapport (gravillon /sable) voisin de 1,8. Mais, selon les courbes, l'optimum est plus ou moins plat. La courbe A illustre un mélange très « pointu » où l'incidence du rapport G/S est primordiale sur la maniabilité du béton. Dans ce cas, il faut impérativement se tenir à la valeur de 1,8 (en ajoutant cependant quelques dizaines de kilogrammes de sable si le ferrailage est très dense). La courbe B montre un mélange moins « pointu » dont l'optimum se situe autour de 1,75. C'est, par exemple, le cas d'un sable fin (module de finesse autour de 2,30). Enfin, la courbe C indique un mélange, donc l'incidence du rapport G/S est pratiquement nulle, d'autant qu'à ces valeurs de temps d'écoulement au maniabilimètre LCL de 14 à 16 secondes la précision de la mesure est de ± 1 s. Cette courbe pourrait être, par exemple, celle d'un mélange contenant 6 à 8 % de fumée de silice [27] et [28].

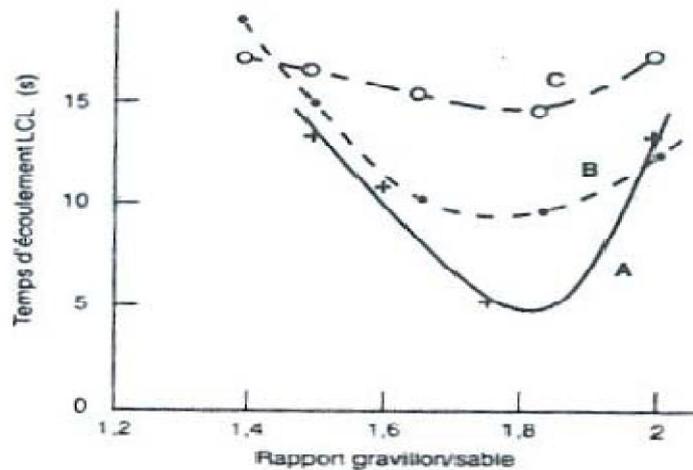


Figure II.5 : Recherche de la proportion gravillon/sable pour laquelle le temps d'écoulement du béton est minimal [27] et [28].

II.3.2 Influence des caractéristiques des granulats sur les propriétés des bétons à l'état durcis :

II.3.2.1 Résistance à la compression :

II.3.2.1.1 La conservation des éprouvettes :

La norme NF P 18-404 [F] spécifie que l'éprouvette doit constamment être protégée contre la dessiccation de son eau interne, dès la fin du moulage et pendant le transport. Ces précautions sont indispensables: une dessiccation précoce pendant les cinq premiers jours fait chuter la résistance de 10%. La résistance d'un béton exposé pendant sept jours à une humidité relative de 50% peut être réduite de 25% par rapport à celle d'un béton témoin protégé contre la dessiccation de son eau interne [29].

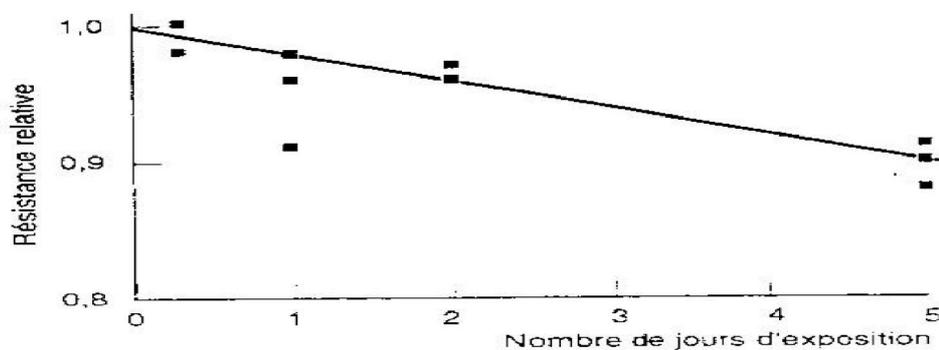


Figure II.6 : Réduction de la résistance à la compression à vingt-huit jours due à une dessiccation des éprouvettes pendant les premiers jours de conservation [29].

II.3.2.1.2 La propreté des granulats :

La variation de la propreté des granulats, par interruption momentanée du lavage par exemple, peut s'accompagner d'une diminution de la résistance de l'ordre de 10 à 15%.

Tableau II.3 : Influence de la propreté des granulats sur la résistance des bétons [29].

ciment	Origine et état du granulat	F _{c28} (Mpa)	F _{c28} (%)
CPA-CEM I 42.5	Lavé	33.9	100
	Non lave	29.9	88
CPJ-CEM II 32.5	A		
	Lavé	35.2	100
	Non lave	29.3	83
CPA-CEM I 42.5	Lavé	34.7	100
	Non lave	31.3	90
CPJ-CEM II 32.5	A		
	Lavé	36.0	100
	Non lave	31.6	87

Le fait qu'un lavage insuffisant des granulats puisse provoqué une baisse de résistance n'est pas en contradiction avec l'existence d'une valeur optimale de l'équivalent de sable, autour de 0,75. Ce n'est pas la présence des éléments fins qui sont néfastes mais, entre autres causes, leur collage sur la surface des gravillons qui peut empêcher une bonne adhérence [29].

II.3.2.1.3 L'air entraîné :

La présence d'air entraîné, recherchée pour la tenue du béton au gel et aux sels fondants, doit être prise en compte, au moment de la formulation du béton, pour l'obtention de la résistance garantie. Mais un surcroît d'air peut aussi résulter d'un effet secondaire d'un adjuvant, un plastifiant par exemple. On retiendra que 1% d'air a exactement le même effet sur la résistance à la compression que dix litres d'eau, soit une baisse de 4 à 6 % [29].

A l'inverse, la présence de carbone ou autres matières organiques dans une addition peut réduire la teneur en air occlus et augmenter artificiellement la résistance à la compression [29].

II.3.2.1.4 Autres paramètres :

D'autres causes peuvent se rencontrer, une chute de la résistance à la compression du béton due à l'utilisation de granulats très chauds (70 °C, cas d'un tas exposé au soleil): une baisse de la résistance de 10 à 15% a été observée, attribuable, d'une part, à l'augmentation du dosage en eau nécessaire pour obtenir une consistance plastique (dix à douze litres d'eau en plus) et, d'autre part, à un affaissement de la liaison gravillon -mortier [29].

✓ **Résistance à la traction, à la flexion et aux chocs :**

Le béton se rompt toujours en traction (même si, à l'échelle de l'éprouvette, il est sollicité en compression). La principale différence, sur laquelle on peut chercher à agir, est le mode de propagation de la fissure qui, en compression simple, est naturellement stable et, en traction simple, naturellement instable (la fissure, à peine initiée, s'emballe et traverse la pièce). Le principe consiste donc à rendre la propagation de la fissure plus difficile [29].

C'est l'un des rôles de l'armature dans le béton armé. L'emploi de fibres métalliques augmente sensiblement la résistance aux chocs. En revanche, l'augmentation des résistances à la compression ou à la traction est négligeable pour les bétons courants, à cause du déchaussement des fibres. Pour qu'une augmentation de la résistance soit significative, il faut une meilleure adhérence et, pour cela, une pâte de ciment elle-même plus compacte et plus résistante.

✓ **Module d'élasticité (E) :**

Le module d'élasticité du béton dépend fortement de la valeur du module d'élasticité des granulats, qui occupent 70% du volume. En choisissant les granulats, on peut donc faire varier significativement la valeur du module d'élasticité du béton à résistance à la compression constante: la réduire, par exemple, en utilisant des granulats légers [29].

✓ **Retrait et fluage :**

Le retrait et le fluage du béton ont principalement leur origine dans la pâte de ciment. En général, ces propriétés sont prises en considération pour les bétons de génie civil contenant de 350 à 400 kg de ciment par mètre cube. Sur ces bétons, il est possible de réduire la valeur du fluage ou du retrait en diminuant la quantité de la pâte de ciment, ce qui revient à augmenter la proportion des granulats [29].

Cela peut être fait, à résistance à la compression constante, si la porosité de la pâte de ciment reste la même. En pratique, il est nécessaire d'utiliser un plastifiant ou même un super plastifiant: cet adjuvant peut alors avoir un effet propre sur le fluage et le retrait, effet qui doit être étudié expérimentalement [29].

✓ Coefficient de dilatation thermique :

Le coefficient de dilatation thermique du béton dépend principalement de celui des granulats (sable et gravillon) qui occupent environ 70% de son volume. Or, ce dernier peut varier de 6.10^{-6} (granulats calcaires) à 13.10^{-6} (granulats siliceux) [29].

II.4 Influence de ciment :

II.4.1 Influence du dosage en ciment :

Pour une même ouvrabilité, une augmentation du dosage en ciment du béton aura pour conséquence de diminuer le rapport E/C de ce béton, ce qui se traduira nécessairement par une augmentation de la résistance à court terme. La figure suivante illustre l'influence du dosage en ciment sur les résistances à court terme et sur le rapport E/C du béton. En effet, pour obtenir le même affaissement (7cm), le béton dosé à 377 kg/m^3 de ciment a demandé 192 l/m^3 d'eau, soit un rapport E/C de 0,51, alors qu'il a fallu 186 l/m^3 d'eau pour le béton dosé à 347 kg/m^3 de ciment, soit un rapport E/C de 0,54. En se référant à la figure II.7, il est alors possible d'expliquer les résultats présentés par la figure II.7 qui montrent clairement l'accroissement des résistances d'un béton avec l'augmentation de son dosage en ciment [30].

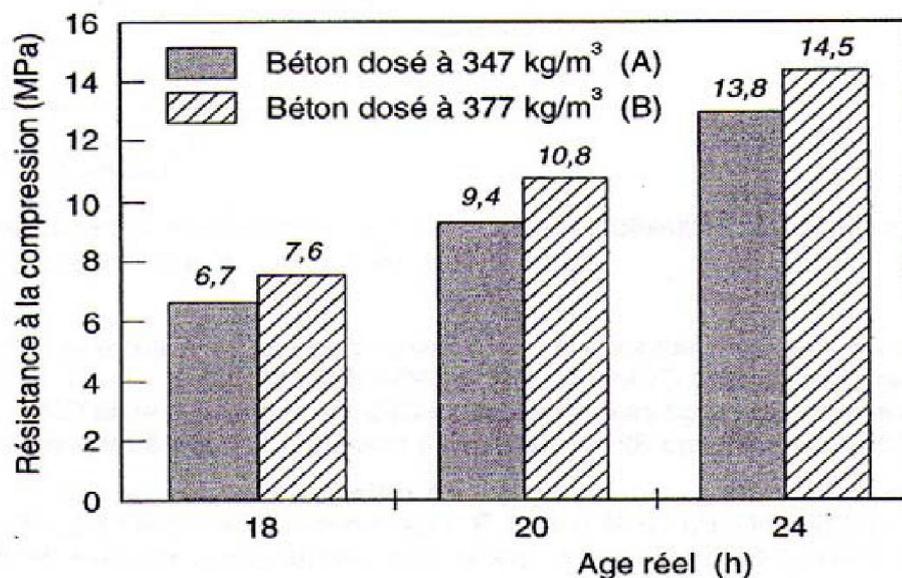


Figure II.7 : Influence du dosage en ciment sur la résistance à la compression à court terme du béton [30].

Les bétons ont été gâchés avec 347 kg/m^3 (A) et 377 kg/m^3 (B) de CPJ-CEM II 42,5 R et les résistances ont été mesurées sur des éprouvettes $11 \times 22 \text{ cm}$ confectionnées dans des moules en carton [30].

II.4.2 Influence du type de ciment :

La démarche de formulation d'un béton passe par le choix du type de ciment. L'influence de ce paramètre sur la résistance à court terme est présentée sur la figure suivante. Cette figure montre que le choix d'un ciment CPA-CEM I 52,5 R développera, à dosage identique dans le béton, des résistances à court terme considérablement supérieures à celles d'un ciment CPJ-CEM II 32,5 R, c'est-à-dire que, plus la classe de résistance est élevée, plus les résistances sont élevées, à toutes les échéances. De même, un CPA-CEM I 52,5 R développe des résistances à court terme beaucoup plus rapidement qu'un CPA-CEM I 52,5, tout en présentant à 28 jours des résistances équivalentes [30].

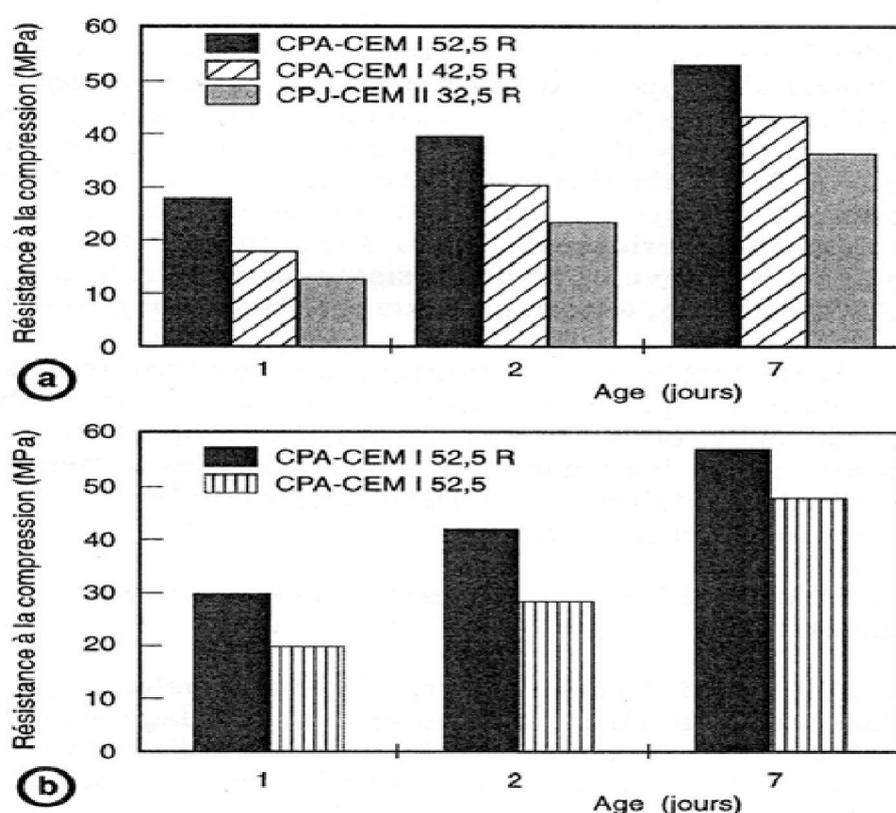


Figure II.8 : Influence du type de ciment sur la résistance à la compression à court terme [30].

II.4.3 Influence de la composition minéralogique du ciment sur la résistance mécanique :

C'est l'hydratation des silicates de calcium qui participent le plus au développement de la résistance mécanique en produisant les silicates de calcium hydratés. Le silicate tricalcique sa résistance mécanique à 7 jours est à peu près égale à 70% de la résistance à 28 j, ensuite l'évolution de la résistance de C_3S ralentit sensiblement. Le C_2S acquiert une résistance insignifiante, avant 28 j, environ 15% de celle de C_3S , mais après 28 j le silicate bicalcique

commence à se consolider rapidement et sa résistance peut même dépasser celle de C_3S . L'aluminate tricalcique est peu résistant, cependant sa présence accélère sensiblement le début du durcissement. Donc pour obtenir un béton de haute résistance à court terme, on utilise un ciment à haute teneur en C_3S .

II.4.4 Influence de la finesse de mouture du ciment sur la résistance mécanique :

La finesse de mouture augmente le degré d'hydratation du ciment ainsi que sa résistance, l'augmentation de la surface spécifique d'un ciment de $1000 \text{ cm}^2/\text{g}$ augmente son activité chimique de 20% à 25%.

II.4.5 Influence du rapport eau/ciment :

Le rapport eau/ciment (E/C) d'un matériau à matrice cimentaire comme le mortier et le béton peut représenter en première approximation la qualité de la matrice cimentaire. Nous présentons dans cette section des résultats, issus de la littérature, d'essais de compression simple, réalisés sur mortiers (ou bétons) avec différents rapports E/C.

La figure II.9 : montre que la courbe représentant la résistance en fonction du rapport E/C a approximativement la forme d'une hyperbole. Cette relation est valable pour n'importe quel béton quels que soient le type de granulats et l'âge. La résistance est d'autant plus élevée que le rapport E/C diminue. Une des propriétés géométriques d'une hyperbole ($y=k/x$) est que la relation existant entre y et $1/x$ est linéaire. La relation entre la résistance et le rapport C/E est donc approximativement linéaire pour des valeurs du rapport C/E compris entre environ 1,2 et 2,5. Cette relation linéaire, tout d'abord suggérée par [Neville, 1959], a été confirmée par [Alexander et Ivanusec (1982) et par Kakizaki et col, 1992]. Cette relation est plus facile à utiliser que la courbe représentant le rapport eau/ciment, particulièrement lorsqu'une interpolation est nécessaire. La figure suivante présente en fonction du rapport ciment/eau en fonction de la résistance. Les valeurs indiquées sont applicables uniquement pour un ciment donné, la relation entre la résistance et rapport ciment/eau doit donc être déterminée pour tout autre cas pratique [31].

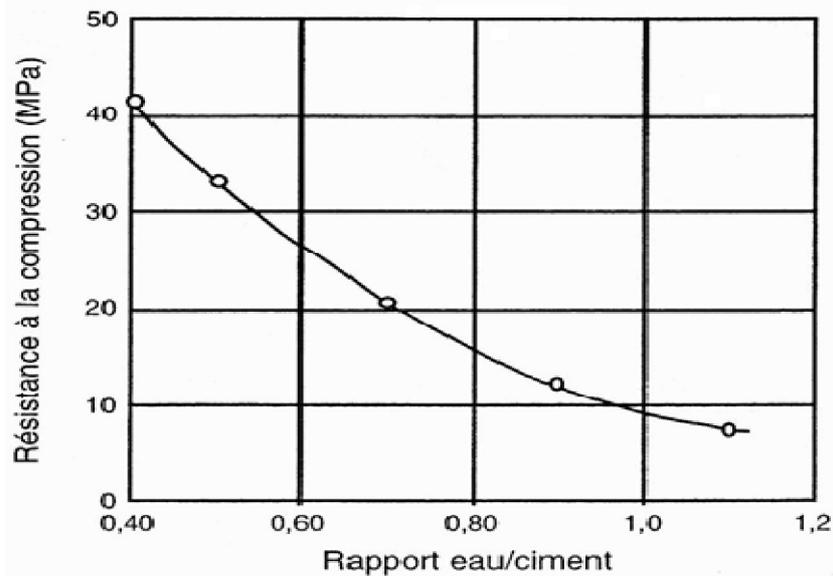


Figure II.9 : Relation entre la résistance à la compression à 7 jours et le rapport E/C d'un béton confectionné avec un ciment portland à durcissement rapide [31].

II.5 Influence de l'eau :

L'eau de gâchage est la quantité d'eau totale ajoutée au mélange sec de béton. Elle est nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier.

II.5.1 Un plus quantité de l'eau :

Un excès d'eau diminue les résistances et la durabilité du béton. L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau de gâchage peut avoir plusieurs origines, mais seule l'eau potable est présumée conforme aux exigences de la norme [EN 1008]. Le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé. Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme EN 1008 [32].

II.5.2 Qualité de l'eau :

En général toutes les eaux conviennent si elles ne contiennent pas d'éléments nocifs qui influenceraient défavorablement le durcissement (matières organiques telles que huiles, graisses, sucres...) ou la corrosion des armatures (acides humiques, eaux de mer...). L'eau potable du réseau de distribution convient très bien mais l'eau puisée en eau courante ou dans la nappe phréatique peut en général convenir.

On évitera toujours l'approvisionnement en eaux stagnantes [33].

II.5.3 Dosage en eau de gâchage :

Le dosage en eau est un facteur très important de la composition du béton. On pressent bien l'influence qu'il a sur la porosité du béton par les vides créés, lorsque l'eau s'élimine pour différentes raisons (évaporation, combinaison chimique, absorption par les granulats).

Par exemple, avec un E/C, couramment utilisé, de 0,5, on estime que la moitié de l'eau de gâchage sert à l'hydratation du ciment, l'autre moitié est une eau de mouillage interstitielle qui contribue à la plasticité du béton requise pour sa mise en œuvre. Ce schéma est modifié par l'emploi croissant d'adjuvants contribuant à améliorer la plasticité sans nécessiter une présence d'eau en excès, nuisible aux caractéristiques finales du béton durci.

Toutes ces raisons soulignent la difficulté de la détermination du dosage en eau, qu'on a tendance à approcher, par exemple en le déduisant de l'expression C/E précédemment adoptée et en l'affinant grâce à des essais pratiqués dans les conditions du chantier, qui ont le mérite d'intégrer des paramètres difficiles à quantifier [34].

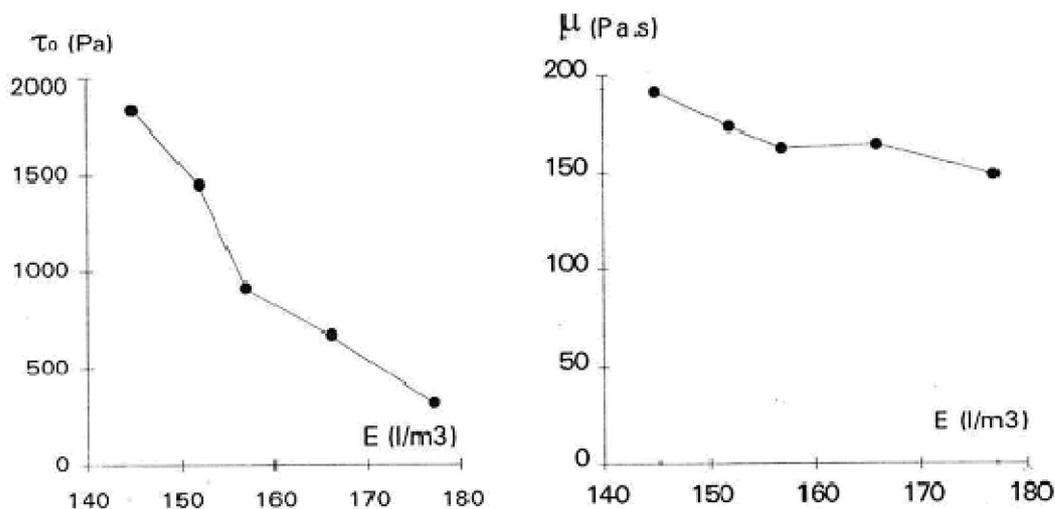


Figure II.10 : Influence du dosage d'eau sur la rhéologie [35].

II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre on a étudié les constituants et cette influence sur le béton, l'influence d'une addition minérale sur le comportement mécanique d'un béton dans lequel elle est introduite ne peut pas être définie d'une façon réaliste par un seul paramètre, en ignorant les propriétés physico-chimiques de l'addition, de ciment et les différents autres paramètres tels que l'âge, le taux de substitution et le type de ciment utilisé ainsi que les conditions de cure, ainsi que les propriétés des granulats qui influent sur le béton.

Chapitre III :

Les méthodes de formulations et la partie expérimentale

III.1 Introduction :

Le travail présenté dans ce chapitre a pour objectif de caractériser les différents matériaux et matériels utilisés, et déterminer les caractéristiques qui nous permettront de procéder aux formulations du béton, on expose les calculs de formulation de notre béton, et les ajouts minéraux actifs (pouzzolane, laitier, calcaire) dans un béton utilisé dans cette étude.

III.2 Matériaux utilisés :

Nous avons utilisé les matériaux locaux, leurs caractéristiques sont étudiées expérimentalement au laboratoire de génie civil à l'université de Mohamed EL Bachir el Ibrahimy de Bordj Bou Arreridj, et le laboratoire de la cimenterie d'AIN KEBIRA pour les ajouts minéraux actifs (pouzzolane, laitier, calcaire).

Effet des ajouts minéraux actifs sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons à base des granulats de la région de Bordj Bou Arreridj (BBA).

Qu'il soit le béton frais ou durci nous avons choisi d'utiliser trois types des ajouts et trois types des graviers.

III.3 Caractéristiques des matériaux :

III.3.1 Les ajouts minéraux actifs : pouzzolane, laitier, calcaire.

III.3.1.1 Pouzzolane :

La source de la wilaya d'Ain t'émouchent, et la surface spécifique Blaine (SSB)=4417 cm²/g.

Tableau III.1: L'analyse chimique et minéralogique de Pouzzolane [36].

Composition	Constituée	Pourcentage
Chimique	SiO ₂	39.72 %
	Al ₂ O ₃	15.76 %
	Fe ₂ O ₃	12.44 %
	CaO	14.96 %
	MgO	2.31 %
	SO ₃	0.36 %
	K ₂ O	1.495 %
	Cl	0.008 %
	Paf	12.95 %
Minéralogique	LSF	33.01
	AF	106.68
	MS	3.01

III.3.1.2 Laitier :

La source de la wilaya d'Annaba, et la surface spécifique Blaine (SSB)=4096 cm²/g.

Tableau III.2 : L'analyse chimique et minéralogique de laitier [36].

Composition	Constituée	Pourcentage
Chimique	SiO ₂	30.13 %
	Al ₂ O ₃	9.91 %
	Fe ₂ O ₃	0.09 %
	CaO	31.73 %
	MgO	1.36 %
	SO ₃	1.12 %
	K ₂ O	1.08 %
	Cl	0.016 %
	Paf	24.55 %
Minéralogique	LSF	33.01
	AF	106.8
	MS	3.01

III.3.1.3 Calcaire :

La source de la wilaya de Sétif (Ain khébir), et la Surface spécifique Blaine (SSB)=5781 cm²/g.

Tableau III.3 : L'analyse chimique et minéralogique de Calcaire [36].

Composition	Constituée	Pourcentage
Chimique	SiO ₂	9.91 %
	Al ₂ O ₃	0.92 %
	Fe ₂ O ₃	0.47 %
	CaO	48.15 %
	MgO	0.74 %
	SO ₃	0.50 %
	K ₂ O	0.000 %
	Cl	0.001 %
	Paf	39.31 %
Minéralogique	LSF	165.30
	AF	1.96
	MS	7.12

III.4 Caractéristiques des graviers :

Dans cette projet de recherche de l'étude, on choisit trois sources de matériaux (granulat) de la région de Bordj Bou Arreridj (BBA), dans un cette recherche on choisit deux fraction dans une source de la région (08/15, et 15/25).

Dans une cette projet, on a jugé important d'utiliser :

- ✓ Pour les graviers :
 - Gravier de la carrière de BEL-LAIMOR (ALTRAPCO).....**région 1.**
 - Gravier de la carrière de EL-EUCH (ELWIAME).....**région 2.**
 - Gravier de la carrière de EL-M'HIR (COSIDER).....**région 3.**

III.4.1 Les analyses chimiques et minéralogiques des trois graviers des régions :**Tableau III.4 : L'analyse chimique et minéralogique du gravier de la région 1 [37].**

Composition	Constituée	Pourcentage
Chimique	SiO ₂	7.2 %
	Al ₂ O ₃	1.29 %
	Fe ₂ O ₃	1.24 %
	CaO	47.43 %
	MgO	1.73 %
	SO ₃	1.01 %
	K ₂ O	0.23 %
	Na ₂ O	0.58 %
	P ₂ O ₅	0.43 %
	TiO ₂	0.07 %
	PF	38.79 %
	Ins	8.48 %
Minéralogique	calcite	81
	Quartz	10
	Dolomite	4
	Oxydes	1 à 2
	Glauconie	3
	Zircon	< 1
	Argile	< 1

Tableau III.5 : L'analyse chimique et minéralogique du gravier de la région 2 [37].

Composition	Constituée	Pourcentage
Chimique	Insolubles	7.66 %
	Carbonates (CaCO ₃)	88.03 %
	PF	40.21 %
	Oxyde de fer d'alumine (R ₂ O ₃)	1.75 %
	Sulfates (CaSO ₄ ,2H ₂ O)	Traces
	Anhydride carbonique (CO ₂)	38.73 %
	NaCl	0.47 %
	H ₂ O	1.48 %
	Bilan chimique pondéral	99.39 %
Minéralogique	calcite	83.50
	Dolomite	6
	Quartz	4
	Gypse	1
	Minéraux ferrugineux	1.5
	Argile	4

Tableau III.6 : L'analyse chimique du gravier de la région 3 [37].

Composition	Constituée	Pourcentage
Chimique	SiO ₂	0.42 %
	Al ₂ O ₃	0.09 %
	Fe ₂ O ₃	0.26 %
	CaO	33.26 %
	MgO	19.22 %
	MnO	0.03 %
	Na ₂ O	0.05 %
	K ₂ O	0.07 %
	PAF	46.43 %

III.4.2 Analyse granulométrique du gravier concassé : EN 933-5

❖ But de l'essai :

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur, et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains constituant l'échantillon, elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63mm, à l'exclusion des filler [38].

A noter qu'il faut éviter la confusion entre la granulométrie qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité qui concerne la distribution dimensionnelle des grains. De plus, la courbe granulométrique est un élément fondamental de la classification des granulats [38].

❖ Principe de l'essai :

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon. Les masses des différents refus et tamisats sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme de tableau ou graphique.

❖ Critères que doit l'échantillon comblé :

La quantité utilisée doit répondre aux différents impératifs qui sont opposés, d'où il faut une quantité assez grande pour que l'échantillon soit représentatif, au même temps, il faut une quantité assez faible pour que la durée de l'essai soit acceptable et que les tamis ne soient pas saturés et donc inopérants. Pratiquement, la masse utilisée répond au critère suivant :

$$M \geq 0.2 D_{\max}$$

D_{\max} : diamètre maximal du gros granulat en (mm).

M : la masse de l'échantillon en (kg) [39].

L'opération du tamisage du gravier se fait au moyen d'une tamiseuse ou on place la série des tamis sur le cycle inférieur du cadre de l'appareil en suite l'ensemble est serré aux montants par la couronne supérieure, à l'aide de deux jeux de ressort et vis de blocage.

La vibration se fait 03 fois durant 07 minutes à chaque fois. Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux suivants :

Tableau III.7 : L'analyse granulométrique du gravier concassé (08/15) de la région 1.

Fraction et masse	Ouverture du tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus partiel (g) (moyen)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât cumulé (%)
(08/15) 3000 g	16	0	22.16	22.16	0.73	99.27
		20				
		46.5				
	12.5	753.5	785.5	807.66	26.92	73.08
		720.5				
		882.5				
	10	1050.5	1003.66	1811.32	60.37	39.63
		1000.5				
		960				
	8	650	663	2474.32	82.47	17.53
		688.5				
		650.5				
	6.3	481	452.16	2926.48	97.54	2.46
		455.5				
		420				
	5	38.5	37.5	2963.98	98.79	1.21
		45.5				
		28.5				
	fond	25.5	19.83	2983.81	99.46	0.54
		23.5				
		10.5				

Tableau III.8 : L'analyse granulométrique du gravier concassé (15/25) de la région 1.

Fraction et masse	Ouverture du tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus partiel (g) (moyen)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât cumulé (%)
(15/25) 5000 g	25	86	75.83	75.83	1.51	98.49
		38				
		103.5				
	20	1333.5	1343	1418.83	28.38	71.62
		1554.5				
		1141				
	16	2455	2466.16	3884.99	77.69	22.31
		2222.5				
		2721				
	12.5	1081.5	1031.16	4916.49	98.32	1.68
		1087				
		925				
	10	32.5	64.16	4980.65	99.61	0.39
		82.5				
		77.5				
	8	1	6	4986.65	99.73	0.27
		5.5				
		11.5				
	fond	6	8.53	4995.18	99.90	0.1
		6				
		13.6				

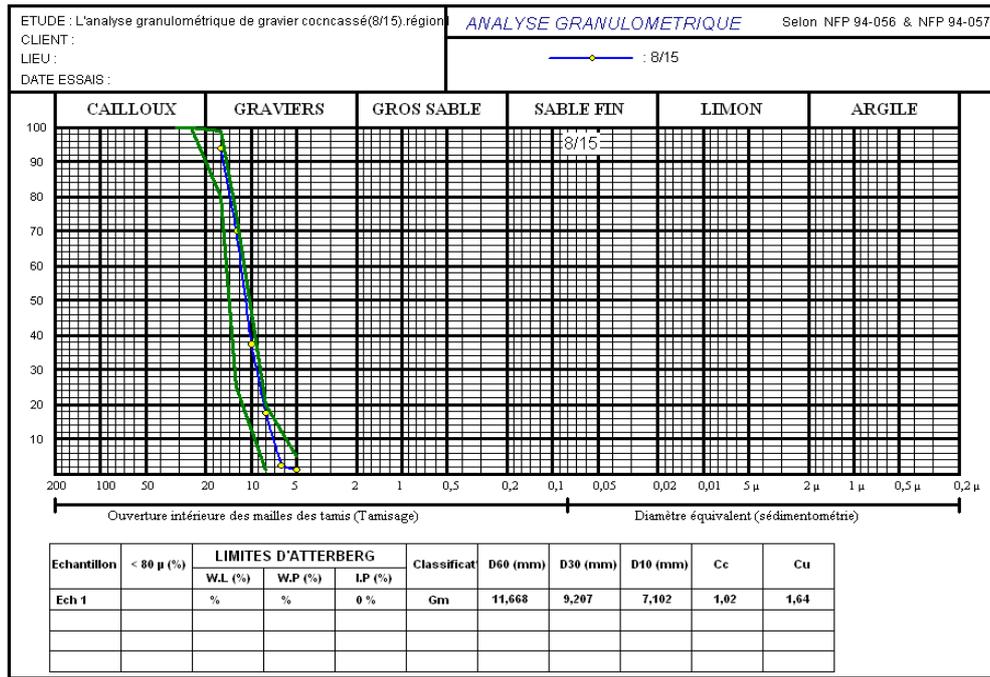


Figure III.1 : Courbe granulométrique du gravier concassé (08/15) de la région 1.

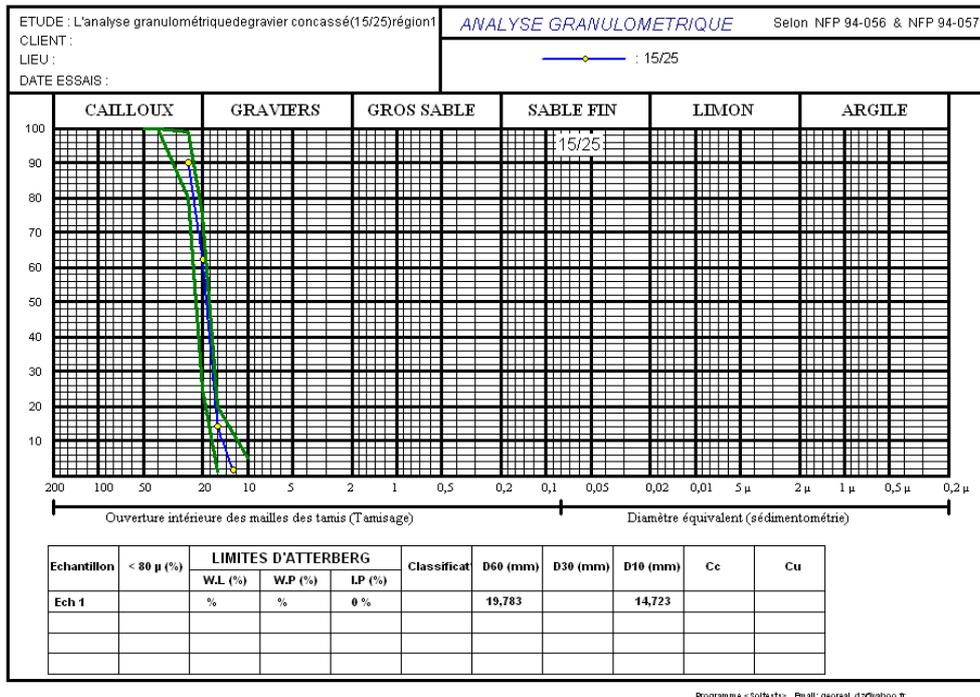


Figure III.2 : Courbe granulométrique du gravier concassé (15/25) de la région 1.

Tableau III.9 : L'analyse granulométrique du gravier concassé (08/15) de la région 2.

Fraction et masse	Ouverture du tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus partiel (g) (moyen)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât cumulé (%)
(08/15) 3000 g	16	159.5	167.16	167.16	5.57	94.43
		205				
		137				
	12.5	1264.5	1248	1415.16	47.17	52.83
		1414				
		1065.5				
	10	876.5	889.83	2304.99	76.83	23.15
		913.5				
		879.5				
	8	491	492.5	2797.49	93.24	6.76
		342.5				
		644				
	6.3	175.5	169.66	2967.15	98.9	1.1
		103				
		230.5				
	5	18	16	2983.15	99.43	0.57
		3				
		27				
	fond	15	14.83	2997.98	99.93	0.07
		15				
		14.5				

Tableau III.10 : L'analyse granulométrique du gravier concassé (15/25) de la région 2.

Fraction et masse	Ouverture du tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus partiel (g) (moyen)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât cumulé (%)
(15/25) 5000 g	25	105.5	83.5	83.5	1.67	98.33
		75.5				
		69.5				
	20	1300	1345.5	1429	28.58	71.42
		1402				
		1334.5				
	16	2900.5	2823.5	4252.5	85.05	14.95
		2820.5				
		2749.5				
	12.5	575	689	4941.5	98.83	1.17
		672				
		820				
	10	17	15.66	4957.16	99.14	0.86
		16				
		14				
	8	0	2	4959.16	99.18	0.82
		3				
		3				
	fond	10.5	9.33	4968.49	99.36	0.64
		9.5				
		08				

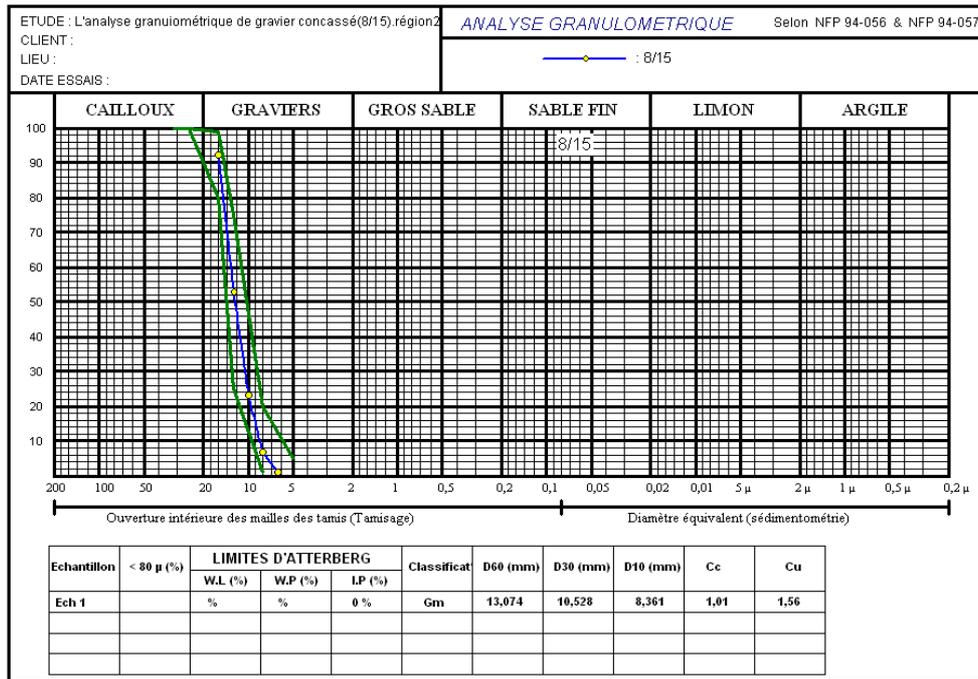


figure III.3 : Courbe granulométrique du gravier concassé (08/15) de la région 2.

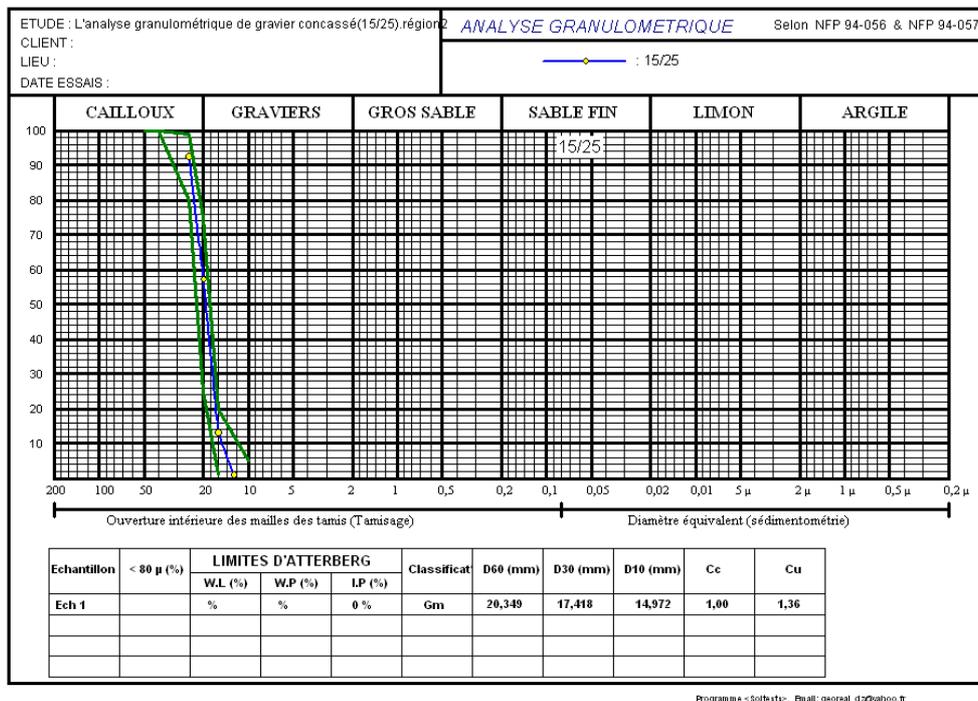


Figure III.4 : Courbe granulométrique du gravier concassé (15/25) de la région 2.

Tableau III.11 : L'analyse granulométrique du gravier concassé (08/15) de la région 3.

Fraction et masse	Ouverture du tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus partiel (g) (moyen)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât cumulé (%)
(08/15) 3000 g	16	129	88.83	88.83	2.96	97.04
		113				
		24.5				
	12.5	1630.5	1530.16	1618.99	53.96	46.04
		1763				
		1197				
	10	691.5	798.5	2417.49	80.58	19.42
		720.5				
		983.5				
	8	465	452.16	2869	95.63	4.37
		348.5				
		543				
	6.3	73.5	118.16	2987.81	99.59	0.41
		50				
		231				
	5	1.5	3.66	2991.47	99.71	0.29
		1				
		8.5				
	fond	1	2.66	2994.13	99.80	0.2
		1.5				
		5.5				

Tableau III.12 : L'analyse granulométrique du gravier concassé (15/25) de la région 3.

Fraction et masse	Ouverture du tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus partiel (g) (moyen)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	tamisât cumulé (%)
(15/25) 5000 g	25	80.5	149.16	149.16	2.98	97.02
		108.5				
		258.5				
	20	2056	2215.33	2364.49	47.28	52.72
		2048				
		2542				
	16	2214.5	1859.16	4223.65	84.47	15.53
		1855.5				
		1507.5				
	12.5	559	635.66	4859.31	97.18	2.82
		859				
		489				
	10	20	20.66	4879.97	97.59	2.41
		38				
		4				
	8	2	3.66	4883.63	97.67	2.33
		8				
		1				
	fond	26.5	32.5	4916.13	98.32	1.68
		33.5				
		37.5				

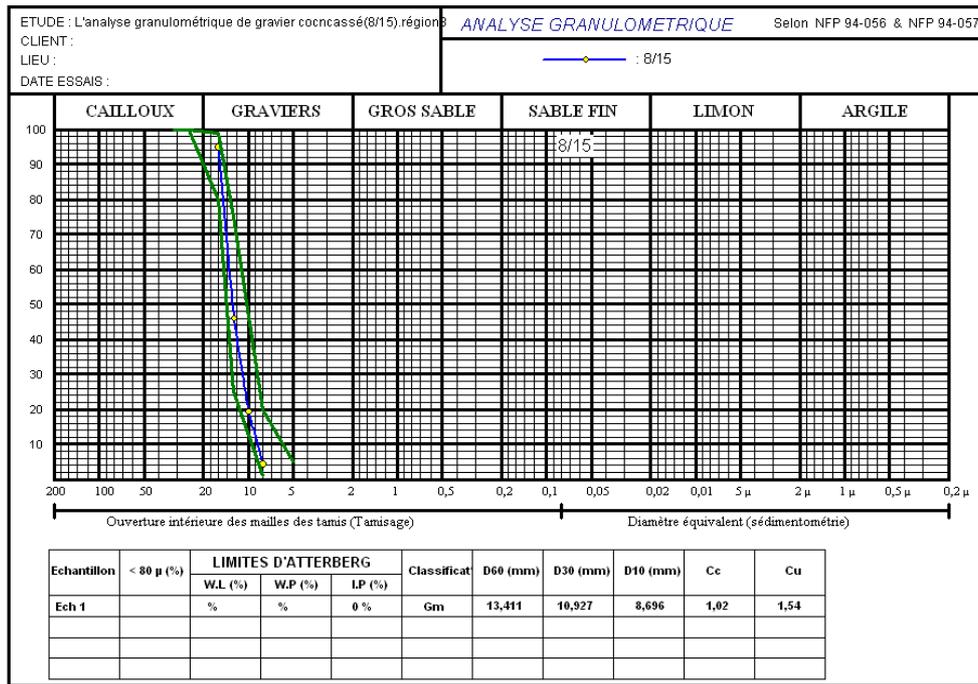


Figure III.5 : Courbe granulométrique du gravier concassé (08/15) de la région 3.

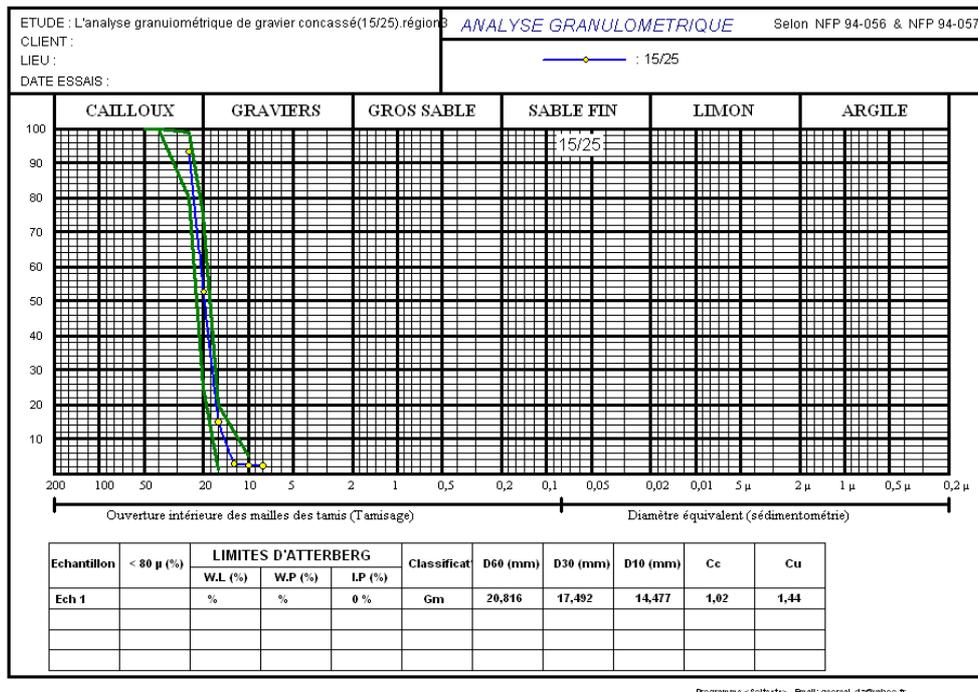


Figure III.6 : Courbe granulométrique du gravier concassé (15/25) de la région 3.

III.4.3 Masse volumique :

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité de volume de ce corps. Comme il existe le volume absolu, on distinguera :

a- La masse volumique apparente (γ) :

C'est le quotient de la masse séchée de l'échantillon par le volume occupé par la matière solide du corps et les vides contenus dans les grains (volume apparent).

b- La masse volumique absolue ou spécifique (ρ) :

C'est le quotient de la masse sèche de l'échantillon par le volume de sa matière (volume absolu ou volume réel).

Les masses volumiques s'expriment en fonction des unités courantes des masses et des volumes : t/m^3 , kg/dm^3 , g/cm^3 .

Il ne faut pas confondre entre la masse volumique et la densité:

Une densité est le quotient entre la masse d'un certain volume d'un matériau et la masse du même volume d'eau à 4 °C, c'est - à - dire une grandeur sans unité.

III.4.3.1 La masse volumique apparente (γ) : EN 1097-6

❖ Principe :

Il s'agit de remplir une mesure de 1 litre ou plus (2 litres, 5 litres) avec le matériau et de déterminer la masse du contenu.

Le mode de remplissage de la mesure a une influence très importante sur les résultats, il faudra réaliser les essais avec du matériel aussi simple que possible, et très soigneusement.

❖ Mode opératoire :

- ✓ Peser le récipient à vide et noter M_1 ,
- ✓ Prendre le matériau dans les 2 mains formant entonnoir,
- ✓ Placer les 2 mains à 10 cm environ au-dessus de la mesure et laisser tomber le matériau ni trop vite, ni trop lentement,
 - ✓ Verser ainsi le matériau au centre de la mesure jusqu'à ce qu'il déborde autour en formant un cône,
 - ✓ Araser à la règle,
 - ✓ Peser le contenu et noter M_2 .
 - ✓ L'opération se fait 03 fois et en prendre la moyenne.

Il résulte que : $\gamma = (M_2 - M_1)/V$

M_1 : masse du récipient vide.

M_2 : masse du récipient et gravier.

V : volume de récipient [40].

Chapitre III : Les méthodes de formulations et la partie expérimentale

Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux suivants :

Tableau III.13 : La masse volumique apparente (γ) des graviers concassés (08/15), (15/25) de la région 1.

Gravier	M2 (kg)	M1 (kg)	V (l)	γ (kg/l)	γ_{moy} (kg/l)
(08/15)	7.768	0.836	4.8	1.444	1.475
	7.840			1.558	
	7.678			1.425	
(15/25)	7.473	0.836	4.8	1.382	1.380
	7.466			1.381	
	7.459			1.379	

Tableau III.14 : La masse volumique apparente (γ) des graviers concassés (08/15), (15/25) de la région 2.

Gravier	M2 (kg)	M1 (kg)	V (l)	γ (kg/l)	γ_{moy} (kg/l)
(08/15)	7.770	0.836	4.8	1.444	1.446
	7.763			1.443	
	7.803			1.451	
(15/25)	7.665	0.836	4.8	1.422	1.414
	7.666			1.442	
	7.555			1.399	

Tableau III.15 : La masse volumique apparente (γ) des graviers concassés (08/15), (15/25) de la région 3.

Gravier	M2 (kg)	M1 (kg)	V (l)	γ (kg/l)	γ_{moy} (kg/l)
(08/15)	7.591	0.836	4.8	1.407	1.426
	7.694			1.428	
	7.776			1.445	
(15/25)	7.701	0.836	4.8	1.430	1.440
	7.805			1.451	
	7.750			1.440	

III.4.3.2 La masse volumique absolue ou spécifique (ρ) : EN 1097-6

❖ Principe :

Le volume absolu ou réel d'un corps est généralement déterminé en mesurant le volume d'un liquide que déplace l'introduction de ce corps.

Le liquide employé est, aussi souvent que possible, l'eau, sauf pour les corps réagissant avec l'eau qui conduisent à utiliser un autre liquide (Benzène en principe).

De nombreuses méthodes permettent de déterminer les masses et volumes des matériaux à étudier, dans notre étude en va utiliser la méthode de l'éprouvette graduée.

❖ Mode opératoire :

- ✓ Mettre dans une éprouvette graduée en verre un volume d'eau V_1 (300 ml).
- ✓ Peser une masse du corps (200 g) et l'introduire dans l'éprouvette.
- ✓ Bien éliminer les bulles d'air.
- ✓ Lire le nouveau volume V_2 .
- ✓ Le volume absolu ou réel est : $V = V_2 - V_1$
- ✓ La masse volumique réelle est [40] : $\rho = M / (V_2 - V_1)$

L'opération se fait 03 fois et en prendre la moyenne. Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux suivants :

Tableau III.16 : La masse volumique absolue des graviers concassés (08/15), (15/25) de la région 1.

Gravier	M (g)	V1 (ml)	V2 (ml)	ρ (g/ml)	ρ_{moy} (g/ml)
(08/15)	300	400	518	2.542	2.528
			520	2.500	
			518	2.542	
(15/25)	300	400	519	2.521	2.572
			518	2.542	
			513	2.654	

Tableau III.17 : La masse volumique absolue des graviers concassés (08/15), (15/25) de la région 2.

Gravier	M (g)	V1 (ml)	V2 (ml)	ρ (g/ml)	ρ_{moy} (g/ml)
(08/15)	300	400	515	2.608	2.608
			516	2.586	
			514	2.631	
(15/25)	300	400	520	2.500	2.521
			518	2.542	
			519	2.521	

Tableau III.18 : La masse volumique absolue des graviers concassés (08/15), (15/25) de la région 3.

Gravier	M (g)	V1 (ml)	V2 (ml)	ρ (g/ml)	ρ_{moy} (g/ml)
(08/15)	300	400	515	2.608	2.609
			512	2.678	
			518	2.542	
(15/25)	300	400	518	2.542	2.507
			519	2.521	
			522	2.459	

III.4.4 La porosité : EN 1097-6

La porosité d'un matériau est le rapport du volume des vides au volume total, elle représente donc le degré de remplissage de son volume occupé par les vides.

Cette propriété ou notion de porosité est importante car elle influe sur certain Caractéristique fondamentale tel que :

- ✓ Résistance mécanique élevée, donc P faible.
- ✓ Capacité d'absorption d'eau (w) ; Prélevée donc (w) grand.

La porosité est donnée par la relation suivante :

$$P (\%) = [1 - (\gamma/\rho)].100\%$$

- a) à l'état lâche : $P_L = [1 - (\gamma_L/\rho_s)].100\%$
- b) à l'état compact : $P_c = [1 - (\gamma_c/\rho_c)].100\%$ [41].

III.4.5 La compacité : EN 1097-6

La compacité d'un matériau est une proportion de son volume réellement occupé par la matière solide qui le constitue, c'est le rapport du volume absolu des grains au volume apparent du matériau : $C = 1 - P$

- a) à l'état lâche : $P_L = 1 - P_L$
- b) à l'état compact : $P_c = 1 - P_c$ [41].

III.4.6 L'indice des vides : EN 1097-6

C'est le rapport de volume de vide sur le volume de solide : $e (\%) = \frac{V_v}{V_s}$

aussi : $e (\%) = \frac{1 - C}{C}$

- a) à l'état lâche : $E_L = P_L / (1 - P_L)$
- b) à l'état compact : $E_c = P_c / (1 - P_c)$ [41].

Tableau III.19 : Porosité, compacité et indice des vides des graviers concassés (08/15), (15/25) de la région 1.

Gravier	Porosité P (%)	Compacité C (%)	Indice des vides e (%)
(08/15)	41.653	58.347	71.388
(15/25)	46.345	53.655	86.375

Tableau III.20 : Porosité, compacité et indice des vides des graviers concassés (08/15), (15/25) de la région 2.

Gravier	Porosité P (%)	Compacité C (%)	Indice des vides e (%)
(08/15)	44.555	55.445	80.358
(15/25)	43.911	56.089	78.288

Tableau III.21 : Porosité, compacité et indice des vides des graviers concassés (08/15), (15/25) de la région 3.

Gravier	Porosité P (%)	Compacité C (%)	Indice des vides e (%)
(08/15)	45.343	54.657	82.959
(15/25)	42.560	57.440	74.094

III.4.7 La résistance à la fragmentation par chocs (Essai Los Angeles) : EN 1097- 2

❖ **But de l'essai :**

Estimer la résistance à la fragmentation par chocs ou bien la dureté des agrégats [42].

❖ **Principe de l'essai :**

Faire rouler dans un tambour rotatif un échantillon de granulats mélangé à des boules d'acier. A la fin, on évalue la quantité de matériau retenu sur le tamis de 1.6 mm [42].

Il se pratique sur une des six classes granulaires qui sont : (4/6.3) ou (6.3/10) ou (10/14) ou (10/25) ou (16/31.5) ou (25/50).

On place un échantillon de 5 kg de granulat et 7 à 12 boulets d'acier dans un tambour pouvant tourner de son axe, la charge des boules est fixée conformément aux indications du tableau ci-après [42].

Tableau III.22 : Adaptation des charges des boulets correspondant à la classe granulaire choisie [42].

Classes granulaires (mm)	Nombre de boulets	Masse totale de la charge (g)	
4 - 6.3	7	3080	+20
6.3 – 10	9	3960	à
10 – 14	11	4840	-150
10 – 25	11	4840	+20
16 - 31.5	12	5280	à
25 – 50	12	5280	-150



Photo III.1 : Appareille de Los Angeles. **Photo III.2 :** L'échantillon et les boules avant l'essai.

❖ **Mode opératoire :**

- ✓ Après introduire l'échantillon et les boules d'acier avec soin dans le tambour, en faire opérer la machine de Los Angeles.
- ✓ Faire effectuer à la machine 500 rotations avec une cadence régulière comprise entre 30 tr /min à 33 tr/min.
- ✓ Après l'achèvement de l'essai, en recueillir les granulats dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture, juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de matériau.
- ✓ Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1.6 mm.

✓ Laver le refus au tamis de 1.6 mm égoutter et sécher à l'étuve à 105°C, jusqu'à masse constante.

✓ Peser ce refus une fois sécher. Soit **P** le résultat de la pesée avec :

$$P = 5000 - \text{refus}$$

Le coefficient de Los Angeles L_A est donné par la relation suivante :

$$L_A = 100 (P/5000)$$

P : est le passant à 1.6mm.

Le tableau suivant donne l'estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient L_A :

Tableau III.23 : Estimation de la dureté des agrégats en fonction du coefficient L_A [42].

Coefficient L_A (%)	Estimation de la dureté des agrégats
< 20	Très dure
20 à 25	Dure
25 à 30	Assez dure
30 à 40	Mis dure
40 à 50	Tendre
>50	Très tendre

Les résultats obtenus sont inscrire dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.24 : Résultats d'essai de Los Angeles des graviers (08/15), (15/25) des trois régions [42].

Fraction	L_A (%)
Région 1	17,46
Région 2	23,04
Région 3	20,48

Les valeurs de la résistance à la fragmentation montrent que le gravier testé est dure et reconnue apte pour la confection du béton.

III.4.8 Degré d'absorption d'eau : EN 1097-6

Le coefficient A mesure la capacité d'absorption d'eau d'un granulat. Plus il est élevé, plus le matériau est absorbant, on en tient compte dans la formulation, Elle est exprimée en (%) et définit par la formule.

$$A (\%) = [(M_H - M_S)/M_S].100$$

M_H : La masse du matériau saturé d'eau en (g).

M_S : La masse du matériau sec en (g) [43].

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau III.25 : Degré d'absorption d'eau des agrégats (08/15), (15/25) de la région 1.

Fraction	M_H (g)	M_S (g)	A (%)
(08/15)	1000	981	1.93
(15/25)	1000	989	1.11

Tableau III.26 : Degré d'absorption d'eau des agrégats (08/15) et (15/25) de la région 2.

Fraction	M_H (g)	M_S (g)	A (%)
(08/15)	1000	993	0.70
(15/25)	1000	996	0.40

Tableau III.27 : Degré d'absorption d'eau des agrégats (08/15), (15/25) de la région 3.

Fraction	M_H (g)	M_S (g)	A (%)
(08/15)	1000	994	0.60
(15/25)	1000	994	0.60

III.5 Sable :

Le sable utilisé dans nos travaux est un sable de dune couramment utilisé pour la construction aux hauts plateaux et au Sud de l'Algérie. Ce sable est prélevé dans une zone située au sud de M'sila (OUED MAITHER). Le diamètre des plus gros éléments de ce sable est de l'ordre de 0.75mm. Il est maximal aux endroits les plus proches de la roche mère et diminue de plus en plus quand on s'en éloigne. Les particules deviennent aussi de plus en plus arrondies. Le diamètre des éléments les plus fins est de l'ordre de 0.03mm [44].

❖ Analyse chimique :

Le sable de dune est un sable dont sa composition chimique est très simple : plus de 95 % de silice (quartz), de 1 à 2% de calcaire et des traces de différents oxydes.

L'analyse de la composition de sable en éléments chimiques simple a été effectuée au laboratoire matériaux et durabilité des Constructions (LMDC) à l'INSA de Toulouse (France). Le sable a été examiné à l'état naturel. La répartition en oxydes de la masse de sable examiné est donnée par Les Tableaux (III.28) et (III.29) [44].

Tableau III.28 : Les pourcentages des éléments majeurs et mineurs [44].

% ELEMENTS MAJEURS ET MINEURS								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P.F
90.46	1.38	1.92	1.63	0.39	0.2	0.00	0.22	2.56

Tableau III.29 : Les pourcentages des éléments traces [44].

% ELEMENTS TRACES								
ZrO ₂	Sr O	RbO	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P.F
0.030	0.009	1.92	1.63	0.39	0.2	0.00	0.22	2.56

Les grains de ce sable qui sont essentiellement quartzeux sont teintés de rouge. La teinte est Due à une mince pellicule Ferri argileuse qui entoure les grains. Ce sable aussi se dessèche et perd facilement sa cohésion en surface [44].

III.5.1 Analyse granulométrique : EN 933-1

❖ But de l'essai :

- ✓ Déterminer la répartition des grains de sol suivant leur dimension dans un échantillon [45].
- ✓ Représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension [45].
- ✓ Permettre la détermination des grosseurs ainsi les pourcentages respectifs des différents grains constituant l'échantillon.

❖ Principe de l'essai :

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboités un sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis [45].

❖ Appareillage :

- ✓ Une série de tamis normalisés (0.08 – 0.16 – 0.315 – 0.63 – 1.25 – 2.5 – 5) mm avec couvercle et fond pesés préalablement.
- ✓ Une balance.
- ✓ Un tamiseur mécanique [45].

❖ Description de l'essai :

- ✓ Le sable est préalablement étuvé à une température maximale de 105 C⁰.
- ✓ On emboîte les tamis les uns sur les autres, dans un ordre croissant du bas de la colonne vers le haut. En partie inférieure, on dispose un fond étanche qui permettra de récupérer les fillers. Un couvercle sera disposé en haut de la colonne afin d'interdire toutes de matériau pendant le tamisage.
- ✓ On met la série dans une tamiseuse mécanique, on verse lentement notre échantillon dans le tamis supérieur et on met notre tamiseur en marche pendant 5 minutes.
- ✓ Après l'arrêt de la tamiseuse mécanique on pèse le refus de chaque tamis.
- ✓ L'erreur ne doit pas dépasser 2% [45].

Les résultats de l'analyse granulométrique du sable de BOUSAADA sont regroupés dans le tableau (III.30) ci-dessous :

Tableau III.30 : Analyse granulométrique du sable de Boussaâda.

Fraction et masse	Diamètre des Tamis (mm)	Refus élémentaire (g)	Refus élémentaire (g) (moyen)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
Sable (0/5) 2000 g	5	91	92.33	92.33	4.61	95.39
		94				
		92				
	2.5	247	253	345.33	17.26	82.74
		247				
		265				
	1.25	100	102.66	447.99	22.39	77.61
		103				
		105				
	0.63	100	103.66	551.65	27.58	72.42
		106				
		105				
	0.315	317	321	872.65	43.63	56.37
		323				
		323				
	0.16	773	764.33	1636.98	81.84	16.16
		771				
		749				
	0.08	326	324.66	1961.64	98.08	1.92
		327				
		321				
fond	40	37.33	1998.97	99.94	0.06	
	34					
	38					



Photo III.3 : Tamiseuse électrique.



Laboratoire des études géotechniques de sol

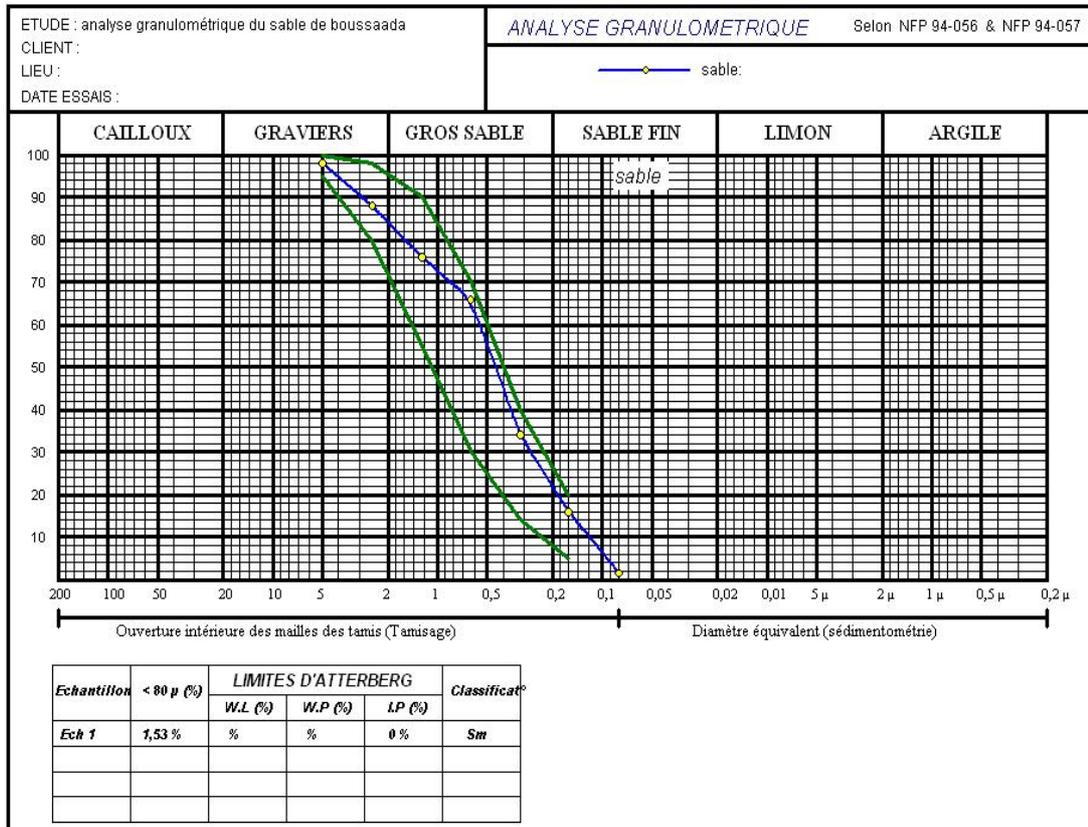


Figure III.7 : Courbe granulométrique de Boussaâda.

❖ **Module de finesse :**

Le module de finesse est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0.16-0.315-0.63-1.25-2.5-5 mm.

$MF = 1/100$ (refus cumulés en pourcentage des tamis {0.16-0.315-0.63-1.25-2.5-5}).

$$MF = 1/100 \sum (4.61 + 17.26 + 22.39 + 27.58 + 43.63 + 81.84)$$

$$MF = 1.97$$

Le module de finesse donne une estimation sur la qualité du sable d'où, on trouve que la norme française donne la classification suivante :

Tableau III.31 : Classification des sables en fonction du module de finesse.

Qualité du sable	Module de finesse
Gros	>2.5
Moyen	2 à 2.5
Fin	1.5 à 2
Très fin	1 à 1.5

En a obtenue pour notre sable testé un module de finesse $MF=1.97$, ce qui nous donne une indication sur la grosseur du sable. Donc le sable est un sable fin.

Le sable testé est un sable fin : $1.5 < MF < 2$.

III.5.2 Propreté «équivalent de sable» : EN 933-8

❖ But de l'essai :

L'essai permettant de mesure la propreté d'un sable, est effectuée sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrée de 5 mm.

Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent.

❖ Mode opératoire :

- ✓ Remplir l'éprouvette d'une solution la vente jusqu'au première repère.
- ✓ A l'aide d'un entonnoir, verser l'échantillon de sable de $120 \pm 1g$ dans l'éprouvette et taper fortement a plusieurs reprises avec la paume de la main a fin de libérer les bulles d'air et favorise le mouillage de l'échantillon.
- ✓ Laisser reposer pendant 10 min.
- ✓ Boucher l'éprouvette à l'aide d'un bouchon en caoutchouc et lui imprimer 90 cycles de 20 cm de secousses horizontal en en 30s à la main de l'agitateur mécanique.
- ✓ Retirer le bouchon de l'éprouvette, le rincer avec solution la vent au-dessus l'éprouvette et rincer ensuite les parois de celle –ci.
- ✓ faire descendre le tube laveur dans l'éprouvette le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette tout en imprimant au tube un léger piquage.
- ✓ Après 20 min de dépôt, lire la hauteur h_1 , de niveau supérieure de flocculat jusqu'à au fond de l'éprouvette à l'aide d'une règle.

- ✓ Mesuré également avec la règle la hauteur h_2 compris entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire du fond de l'éprouvette.

$$E_{sv} = (h_2/h_1) 100\%$$

Avec : h_1 : hauteur du sable plus floculat.

h_2 : hauteur du sable.

- ✓ Introduire le piston dans l'éprouvette et la laisser descendre doucement jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment.

$$E_{sp} = (h'_2/h_1) 100\%$$

Avec : h_1 : hauteur du sable plus floculat.

h'_2 : hauteur du sable.

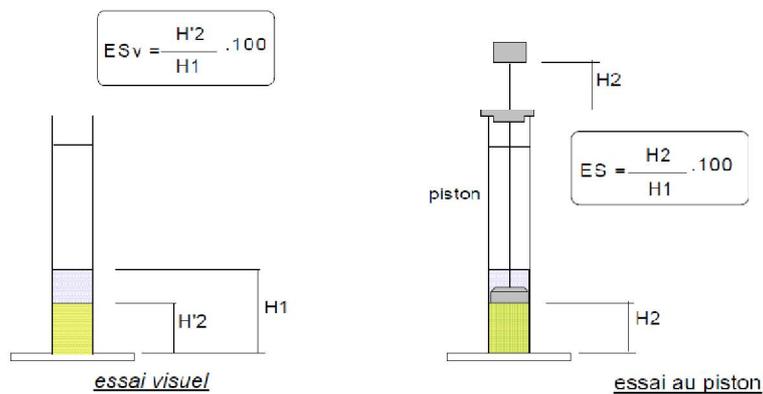


Figure III.8 : Essai d'équivalent de sable.

❖ **Interprétation des résultats :**

Tableau III.32 : Qualité du sable en fonction des valeurs d'équivalent de sable E_{sv} et E_{sp} [46].

E_{sv}	E_{sp}	Nature et qualité de sable
$E_s < 65$	$E_s > 60$	Sable argileuse : risque de retrait au de gonflement à rejeter des bitons de qualité.
$65 < E_s < 75$	$65 < E_s < 80$	Sable légèrement argileux : de propriétés admissible convient parfaitement pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait.
$75 < E_s < 85$	$70 < E_s < 80$	Sable propre : à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité
$E_s \geq 85$	$E_s \leq 85$	Sable très propre : l'absence totale de fines argileuse risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

En répète l'essai trois (03) fois, les résultats sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.33 : Résultat d'essais d'équivalent de sable de Boussaâda.

Hauteur (mm)	h_1 (cm)	h_2 (cm)	E_{vs} (%)	E_{vsmoy} (%)	h'_2 (cm)	E_{sp} (%)	E_{spmoy} (%)
Echantillon (1)	16	8.7	54.37	61.18	8.1	50.62	52.06
Echantillon (2)	12.1	8.9	73.55		6.5	53.71	
Echantillon (3)	16	8.9	55.62		8.3	51.87	

Le sable testé donne les résultats suivant :

$E_{sv} = 61.18$ (%) } donc **sable argileuse** : risque de retrait au de gonflement à rejeter
 $E_{sp} = 52.06$ (%) } des bitons de qualité.

III.5.3 Caractéristiques physiques du sable :

Il est nécessaire de déterminer toutes les caractéristiques physiques pour le sable de dune (sable de Boussaâda), Pour cela, une série des essais a été effectuée afin de bien caractériser notre sable.

III.5.3.1 Masse volumique apparent : EN 1097-6

❖ Masse volumique apparente :

- ✓ On détermine la masse volumique apparente du sable à l'aide d'un entonnoir standardisé un récipient de capacité 1 l.
- ✓ On remplit l'entonnoir avec du sable sec.
- ✓ On pèse le récipient sous l'entonnoir à une distance de 10 à 15 cm et on le remplit avec du sable.
- ✓ On nivelle la surface du sable et on pèse le tout soit M_2 ce poids.

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

$$\gamma_L = (M_2 - M_1) / V_r$$

M_1 : Masse du récipient vide.

M_2 : Masse du récipient plus le sable.

V_r : Volume du récipient ($V_r = 1l$).

Tableau III.34 : Masse volumique apparente du sable de Boussaâda (0/5).

Essai	Volume de récipient (l)	Poids de récipient vide (kg)	Poids de ré +sa (kg)	γ (kg/l)	γ_{moy} (kg/l)
1	1	0.079	1.666	1.587	1.588
2			1.668	1.589	
3			1.667	1.588	

III.5.3.2 La masse volumique absolue ou spécifique (ρ) : EN 1097-6

❖ Principe :

Le volume absolu ou réel d'un corps est généralement déterminé en mesurant le volume d'un liquide que déplace l'introduction de ce corps.

Le liquide employé est, aussi souvent que possible, l'eau, sauf pour les corps réagissant avec l'eau qui conduisent à utiliser un autre liquide (Benzène en principe).

De nombreuses méthodes permettent de déterminer les masses et volumes des matériaux à étudier, dans notre étude on va utiliser la méthode de l'éprouvette graduée.

❖ **Mode opératoire :**

- ✓ Mettre dans une éprouvette graduée en verre un volume d'eau V_1 (300 ml).
- ✓ Peser une masse M du corps (300 g) et l'introduire dans l'éprouvette.
- ✓ Bien éliminer les bulles d'air.
- ✓ Lire le nouveau volume V_2 .
- ✓ Le volume absolu ou réel est : $V = V_2 - V_1$
- ✓ La masse volumique réelle est : $\rho = M / (V_2 - V_1)$

L'opération se fait 03 fois et en prendre la moyenne. Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux suivants :

Tableau III.35 : Masse volumique absolue du sable de Boussaâda (0/5).

Essai	M (g)	V1 (ml)	V2 (ml)	ρ (g/ml)	ρ_{moy} (g/ml)
1	300	300	419	2.521	2.521
2	300	300	419	2.521	
3	300	300	419	2.521	

Tableau III.36 : Caractéristiques physiques du sable de dune (OUED MAITHER).

Propriété	Valeurs	Commentaire
Provenance	OUED MAITHER (BOUSAADA)	Ce site se trouve dans un lieu accessible pour tous les utilisateurs.
Classe	0/5	Le sable est tamisé in situ.
Nature minéralogique	Siliceux	La silice représente plus de 90% d'après l'analyse chimique.
Masse volumique apparente	1.558	Un sable convient d'être utilisé un béton ordinaire.
Masse volumique absolue	2.514	Une sable performance pour l'utilisation ordinaire.
Masse volumique à l'état lâche	1.558	Un sable convient d'être utilisé un béton ordinaire.
Masse volumique à l'état compacte	1.574	Un sable convient d'être utilisé un béton ordinaire.
Compacité à l'état lâche	61.98%	Un sable convient d'être utilisé un béton ordinaire.
Compacité à l'état compacte	62.61%	Un sable convient d'être utilisé un béton ordinaire.
Porosité a l'état lâche	38.02%	Le sable est peu poreux
Porosité à l'état compact	37.39%	Un sable convient d'être utilisé un béton ordinaire.
Indice des vides à l'état lâche	33.65%	Un sable convient d'être utilisé un béton ordinaire.
Indice des vides à l'état compact	59.72%	Un sable convient d'être utilisé un béton ordinaire.
Degrés d'absorption	17.65%	Un sable convient d'être utilisé un béton ordinaire.

III.6 Ciment :

III.6.1 Caractéristiques de ciment:

Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment CEMI 42.5, c'est un ciment pour les travaux dans les milieux fortement agressifs [47]. Fabriqué à la cimenterie d'AIN KEBIRA. Nous avons opté pour ce type de ciment car il est à base de 95(%) de clinker, cela nous permet de réaliser des ajouts (pouzzolane, laitier et calcaire) et étudier leur effet sur les propriétés d'un béton à base du granulat. Tous les résultats mentionnés ci-après sont tirés à partir de la fiche technique du ciment donné par la cimenterie d'AIN KHEBIRA.



Photo III.4 : Ciment utilisé CEMI/42,5.

III.6.1.1 Caractéristiques chimiques :

Tableau III.37 : Analyse chimique du ciment utilisé [47].

Eléments	Mesures
SiO ₂ -T (NA 233)	21.79 %
Al ₂ O ₃	4.29 %
Fe ₂ O ₃	5.00 %
CaO-T	64.37 %
SO ₃ (NA 237)	2.11 %
K ₂ O	0.24 %
Na ₂ O	/
Cl (NA 5038)	/
P.A.F. (NA 237)	0.87 %
CaO libre	0.61 %
R .Insoluble (NA 236)	0.86 %

Tableau III.38 : Composition minéralogique du clinker [47].

Eléments	Mesures
C ₃ S	63.26 %
C ₂ S	14.43 %
C ₃ A	2.49 %
C ₄ AF	15.9 %

III.6.1.2 Caractéristiques physiques :

Tableau III.39 : Propriétés physiques du ciment utilisé [47].

Essais physiques		Garantie NA 443	Mesures
P.S	(g/cm ³)		3.16
SSB (NA 231)	cm ² /g		3388
Temps de prise min (NA 230)	Début	≥ 60	206
	Fin		307
Expansion mm (NA 232)	A. Chaud	≤ 10	0.80
Refus %	90 μ		4.82
Consistance normale (NA 229)	%		24.35
Retrait à 28 j (NA 440)	μm/m	≤ 100	/

III.6.1.3 Caractéristiques mécaniques :

Tableau III.40 : Propriétés mécaniques du ciment utilisé [47].

Propriété	jours	Limite	Mesures
Résistance à la flexion (MPa)	2 jours		3.6
	7 jours		6.3
	28 jours		8.3
Résistance à la compression (MPa)	2 jours	Li ≥ 12.5	16.4
	7 jours		36.2
	28 jours	Li ≥ 12.5	55.2

III.6.2 Masse volumique apparente :

❖ Principe de l'essai :

Remplir une mesure de volume connu $V=1\text{m}^3$ et déterminer la masse du continu.

❖ Matériels utilisés :

- ✓ Entonnoir porté par un trépied mini d'un passoir et d'un opercule mobile.
- ✓ Balance de précision.
- ✓ Une mesure de 1l ($1\text{l} = 1000\text{ cm}^3$).
- ✓ Une règle arasée.

❖ Mode opératoire :

- ✓ Placer l'entonnoir au-dessus de la mesure de 1 litre.
- ✓ Fermer l'opercule.
- ✓ Verser environ 200g de liant sur le passoir et le faire descendre dans l'entonnoir à l'aide de la spatule.
- ✓ Ouvrir l'opercule, le liant tombe dans la mesure.
- ✓ Renferme l'opercule.
- ✓ Recommencer de nouvelles quantités du liant, jusqu'à ce que le bol déborde.
- ✓ La masse volumique apparente est : $\rho = \frac{M2-M1}{V}$, $V=1\text{ litre}$.

M2 : Masse de récipient remplie du liant.

M1 : Masse de récipient vide [48].

Tableau III.41 : Masse volumique apparente du ciment CRS.

Essai	Volume de récipient (l)	Poids de récipient vide (kg)	Poids de ré +cim (kg)	γ (kg/l)	γ_{moy} (kg/l)
1	1	0.065	1.308	1.243	1.236
2			1.268	1.230	
3			1.300	1.235	

III.6.3 Masse volumique absolue : NF EN 196-6

❖ Objectif de l'essai :

Il s'agit de mesurer la masse volumique absolue de ciment anhydre qui varient en fonction de la composition du ciment, tout en restant entre 3.0 et 3.2 g/cm³.

❖ Principe de mesure avec le densitomètre Le Chatelier (Voluménomètre)

Il consiste de mesurer le déplacement du niveau de liquide lorsqu'on y introduit la poudre dont on recherche la masse volumique absolue.

❖ Equipement nécessaire :

- ✓ Densimètre Le Chatelier (Voluménomètre) de 250 cm³ de volume.
- ✓ Un liquide qui ne doit pas être réactifs avec le ciment (toluène).
- ✓ Thermomètre.

❖ Conduite de l'essai :

- ✓ Remplir le Voluménomètre jusqu'au niveau zéro.
- ✓ Immerger le Voluménomètre dans un récipient contenant de l'eau à 20 °C.
- ✓ Peser une masse de 64 g de ciment.
- ✓ Verser le ciment très lentement en ¼ heure [48].

$$N_0 = 0 \text{ cm}^3.$$

$$N_1 = 20.5 \text{ cm}^3.$$

$$\rho_c = 64 / (N_1 - N_0) \text{ g/cm}^3.$$

$$\rho_c = 64 / 20.5 = 3.12 \text{ g/cm}^3.$$

III.7 L'eau de gâchage : EN 1008

Nous avons utilisés pour le gâchage de notre béton l'eau de robinet disponible au niveau de notre université, d'où ces caractéristiques physico-chimiques sont les suivants :

Tableau III.42 : Analyse chimique de l'eau utilisée pour le gâchage [49].

Paramètre	Quantité	Commentaire
pH	8.18	Acceptable pour le gâchage.
Conductivité	1250 µs/cm
Taux de (Cl ⁻)	0.24 mg/l	0.05 à 0.50
Taux de (NO ₂ ⁻)	0,15 mg/l	> à la concentration max (0.1)
Taux de (NO ₃ ⁻)	1,8 mg/l	< à la concentration max (50)
Résidu sec	100 mg/l	Traces non nuisible.

L'analyse chimique de l'eau de gâchage a été réalisée au laboratoire de la chimie université de Mohamed El Bachir EL Ibrahimy Bordj Bou Arreridj.

Les résultats obtenus à montrer que l'eau testée est apte pour la confection du béton.

III.8 Composition du béton :

Le calcul de la composition du béton à pour but de déterminer le dosage en ciment, granulats (fins et gros) et en eau pour un dosage de 1 m^3 de béton frais, afin d'obtenir un mélange homogène et d'une capacité élevée, ainsi qu'une résistance mécanique volume (exigée).

Il existe plusieurs méthodes de détermination la composition du béton proposé et applique dans les différents pays du monde, permis ces méthodes on peut citer :

- ✓ Méthode de BOLOMEY (méthode à granularité continue).
- ✓ Méthode de FAURY.
- ✓ Méthode de JOISEL.
- ✓ Méthode de VALETTE.
- ✓ Méthode de DREUX GORISSE.
- ✓ Méthode des volumes absolus.
- ✓ Méthode générale du CES (centre d'essai des structures).

Dans notre projet la méthode des volumes absolus élaborée par le professeur B.G SCRAMTAIEV, a été adapté pour formule notre béton.

Cette méthode repose sur le fait qu'un béton lourd dame a l'état frais se rapproche de la compacité absolue, ce qui signifie que la somme du volume absolu des matériaux d'origine dans 1m^3 est égale au volume de la composition du béton donnée.

III.8.1 Méthode de SCRAMTAIEV :

La somme de tous les matériaux composants pour un dosage de 1m^3 de béton frais est à 1000 litres.

Pour confectionner un béton, il faut connaître les méthodes de calcul en vigueur (calcul des dépenses en matières premières) et leur mis en œuvre.

On choisit alors les composants du béton d'une façon convenable dans des proportions bien définies.

Les données de base servant pour le calcul de la composition du béton sont :

- ❖ La classe de résistance requise du béton (R_b).
- ❖ Le degré de fluidité ou de consistance du béton.
- ❖ Les caractéristiques des matériaux d'origine :

1. Activité du ciment (R_c).
2. Masse spécifique (absolus) du ciment.
3. Masse spécifique (absolus) et masses volumique (apparentes) du sable, ou gravier.
4. La porosité de pierres concassées ou du gravier.

La composition du béton c.-à-d. la dépense (quantité) de ciment, eau, de sable et de pierres concassées ou de gravier est établie approximativement par calcul, ensuite elle est précisée par la méthode d'essai de dosages expérimentaux de mélange de béton.

Les principes étapes de calcul de la composition du béton sont :

1. On définit le rapport (C/E) qui assure l'obtention d'un béton de résistance requise.
2. On détermine la dépense en eau (E).
3. On fait le calcul de la quantité de ciment (C), ensuite des pierres concassées (PC) ou de gravier(G) et de sable(S).

III.8.1.1 Présentation de la méthode SCRAMTAIEV :

a. Définition du rapport (ciment/eau) :

Le professeur SCRAMTAIEV a établi les relations suivantes, qui donnent la valeur de la résistance du béton (R_b) en fonction du rapport C/E et des qualités du liant et des granulats.

a) Pour un béton P et TP : $C/E \leq 2.5$ on a : $R_b = A \cdot R_c \cdot [(C/E) - 0.5]$

$$\implies C/E = R_b / (A \cdot R_c) + 0.5$$

b) Pour un béton F et TF : $C/E > 2.5$ on a : $R_b = A' \cdot R_c \cdot [(C/E) + 0.5]$

$$\implies C/E = R_b / (A' \cdot R_c) - 0.5$$

Avec :

R_b : Classe de ciment.

R_c : Activité du ciment.

A, A' : Coefficients admis d'après le tableau selon les propriétés et la qualité des matériaux utilisés.

C/E : Rapport du poids de ciment au poids de l'eau dans l'unité de volume du mélange.

Tableau III.43 : Les valeurs des coefficients A et A' en fonction du liant et agrégat.

Granulats et liants	A	A'
De qualité supérieure	0.65	0.43
De qualité ordinaire	0.60	0.40
De qualité inférieure	0.55	0.37

La formule (a) correspond aux bétons ordinaires plastiques.

La formule (b) correspond aux bétons plutôt secs de haute résistance mécanique.

b. Détermination de la dépense en eau :

Elle est établie approximativement d'après le tableau, qui tient compte de la qualité des matériaux utilisés :

Tableau III.44 : Quantité d'eau nécessaire à la préparation du béton.

La quantité d'eau l/m ³ en fonction du diamètre du plus gros grain d'agrégat				Propriétés des bétons frais	
70	40	20	10	Maniabilité (sec)	Affaissement (cm)
115	120	130	145	200-150	0
120	125	135	150	120-90	0
125	130	145	160	80-60	0
130	135	150	165	50-30	0
140	145	160	175	30-15	0
145	155	170	185	-	2-1
160	165	180	195	-	4-3
165	170	185	200	-	6-5
170	175	190	205	-	8-7
175	185	200	215	-	10-9

c) Détermination de la dépense en ciment :

$$C = [C/E].E$$

d) Détermination de la dépense en gravier :

La détermination du dosage en agrégat doit remplir les deux conditions suivant :

- 1- La somme des volumes absolue de tous les composants du béton est égale à 1 m³ du mélange de béton damé.
- 2- La porosité des agrégats doit égale a zéro.

$$(C/\rho_c) + (E/\rho_e) + (S/\rho_s) + (G/\rho_g) = 1000$$

Ou:

C, E, S et G : dépenses en ciment, eau, sable et pierres concassées (gravier) en (Kg/m³).

ρ_c, ρ_e, ρ_s et ρ_g : masse spécifique ou masses volumique absolue de granulats avec un certain écartement des grains :

$$(C/\rho_c) + (E/\rho_e) + E = [(Pg \times \alpha \times G/\gamma_g)]$$

Avec :

Pg : porosité des pierres concassées.

γ_g : masse volumique ou masse volumique apparente des pierres concassées en (Kg/l).

α : coefficient d'écartement des grains des pierres concassées, donné par le tableau.

Tableau III.45 : Valeurs du coefficient (α) en fonction du E/C et dosage en ciment.

Dosage en ciment (Kg/m ³)	E/C = 0.40	E/C = 0.50	E/C = 0.60	E/C = 0.70	E/C = 0.80
250	-	-	1.26	1.32	1.38
300	-	1.30	1.36	1.42	-
350	1.32	1.38	1.44	-	-
400	1.40	1.46	-	-	-
500	1.52	1.56	-	-	-
600	1.56	-	-	-	-

En résolvant simultanément les deux équations, on trouve l'expression qui permet de déterminer la qualité nécessaire de pierres concassées :

$$G = 1000 / [V_{pc} * (\alpha / \gamma_{vol.oc}) + (1 / \rho_{pc})]$$

Avec :

$$V_{pc} = (1 - (\gamma / \rho))$$

e. détermination de la dépense en sable :

Après avoir déterminé la dépense en pierres concassées, on fait le calcul de la dépense en sable (Kg/m³).

$$S = [1000 - [(C / \rho_c) + E + (Pc / \rho_{pc})]] \cdot \rho_s$$

III.8.1.2 Calcule de la composition du béton :

En a choisie pour notre étude la confection de 01 classe de béton, de 35 MPa, notre objectif dernier cette gamme de béton est de rencontré est ce que la classe possible de béton existé dans les ouvrages réalisés réellement.

En va utiliser dans la classe du béton une granularité continue, et voir l'influence de la granularité sur les résultats d'auscultation.

En va présenter en détail la formulation 1m³ de béton de classe 35 MPa, en va le regroupé dans un tableau global.

a. Définition du rapport C/E :

$$\left. \begin{array}{l} R_c = 425 \text{ bars} \\ R_b = 350 \text{ bars} \\ A = 0,60 \end{array} \right\} C/E = 350 / (0,60 \times 425) + 0,5 \Rightarrow C/E = 1.87$$

b. Détermination de la dépense en eau :

Pour : D = 20mm
 Aff = (5 à 6) cm } D'après le tableau (III.44) en fait l'interpolation et il nous résulte que :

E = 185 L

- ◆ CRS plus de (10 à 15) l
- ◆ Sable fine (+10 l)

Donc : **E = 210 L**

c. Détermination de la dépense en ciment :

$$C = [(C/E) \cdot E] = 1,87 \times 210 = 392.17 \text{ Kg/m}^3$$

C = 392.17Kg/m³

E/C = 0.53

d. Détermination de la dépense en gravier :

✓ **Pierres concassées (gravier) :**

$D_{\max} = 25\text{mm}$

$\gamma_{pc} = 1.42 \text{ kg/l}$ } Région 1

$\rho_{pc} = 2.54 \text{ kg/ml}$

$\gamma_{pc} = 1.42 \text{ kg/l}$ } Région 2

$\rho_{pc} = 2.56 \text{ kg/ml}$

$\gamma_{pc} = 1.43 \text{ kg/l}$ } Région 3

$\rho_{pc} = 2.55 \text{ kg/ml}$

$$G = 1000 / [V_{pc} (\alpha / \gamma_{vol.oc}) + (1 / \rho_{pc})]$$

V = porosité = P

$$P = (1 - (\gamma_{pc} / \rho_{pc}))$$

$P = (1 - (1.42 / 2.54)) = 0.44 \text{ région01}$

$P = (1 - (1.42 / 2.56)) = 0.44 \text{ région02}$

$P = (1 - (1.43 / 2.55)) = 0.44 \text{ région03}$

Donc **p = 0.44** pour tous les régions.

α : coefficient d'écartement (d'éloignement) entre les grains (1.2 à 1.4).

$\alpha = 1,4$

$$G = 1000 / [0.44 * (1.40 / 1.42) + (1 / 2.54)]$$

G = 1208.45 Kg/m³

$$35\% \text{ de } 8/15 = 422.95 \text{ Kg/m}^3$$

$$65\% \text{ de } 15/25 = 785.49 \text{ Kg/m}^3$$

e. Détermination de la dépense en sable :

✓ **Sable de Boussaâda :**

$$\gamma_s = 1.58 \text{ kg/l}$$

$$\rho_s = 2.52 \text{ g/ml}$$

✓ **Ciment :**

$$\rho_c = 3.16 \text{ g/cm}^3$$

$$S = [1000 - (C/\rho_c) + (E/\rho_e) + (G/\rho_g)]. \rho_s$$

$$S = [1000 - (392.7/3,16) + (210/1) + (1208.45/2.54)] * 2.52$$

$$S = 478.69 \text{ Kg/m}^3$$

❖ **Volume du gâché pour 1 éprouvette cubique (10X10X10) cm³:**

♦ Pour une éprouvette :

$$V = L \times L \times H = 10 \times 10 \times 10 = 1000 \text{ cm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$$

Tableau III.46 : Dépense en matériaux de classe 42.5 de béton à granularité continue pour 1m³.

Matériaux Classe	Ciment (kg/m ³)	L'eau (l/m ³)	Gravier (kg/m ³)		Sable (kg/m ³)
			G (8/15)	G (15/25)	
C _{c42.5}	392.7	210	422.95	785.49	478.69

- ✓ En a effectué une majoration en volume de 20% sur les dépenses des différents constituants, les résultats sont regroupés dans le tableau.

Pour les bétons à granularité discontinue, les pourcentages des fractions granulaires (8/15) et (15/25) sont 35% et 65% respectivement conformément aux travaux réalisés précédemment, et pour le plaisir de continuer et confirmer le travail.

❖ **Volume du gâché pour 1m³ pour les bétons à granularité continue :**

Pour les bétons à granularité continue les résultats sont regroupés dans le tableau, les pourcentages des différents fractions de gravier (8/15) et (15/25) sont calculer par la méthode de Dreux-Gorisse, le processus de détermination est schématisé dans la courbe suivante :

Tableau III.47 : Dépense en matériaux de classe 42.5 de béton à granularité continue pour 1m^3 (après majoration 20%).

Matériaux Classe	Ciment (kg/m^3)	L'eau (l/m^3)	Gravier (kg/m^3)		Sable (kg/m^3)
			G (8/15)	G (15/25)	
C _{c42.5}	471.24	252	507.54	942.58	574.42

Tableau III.48 : Dépense en matériaux de classe 42.5 de béton à granularité continue pour 1 éprouvette (10X10X10) cm^3 .

Matériaux Classe	Ciment (kg)	L'eau (l)	Gravier (kg)		Sable (kg)
			G (8/15)	G (15/25)	
C _{c42.5}	0.471	0.252	0.507	0.942	0.574

Les ajouts : pouzzolane, laitier, calcaire.

Les pourcentages : 10%, 15%, 20%, dans la quantité du ciment.

Tableau III.49 : Dépense en pourcentages des ajouts minéraux actif (pouzzolane, laitier, calcaire) dans une éprouvette (10X10X10) cm^3 .

Ajoutes	10%	15%	20%
Quantité (kg)	0.047	0.071	0.095

III.9 Matériels et essais:

III.9.1 Béton à l'état frais :

On sait que le béton est le matériau obtenu par solidarisation par un liant de ciment, un squelette granulaire composé d'un ou plusieurs sables et d'un ou plusieurs graviers.

La norme (EN 12390-2) distingue les essais d'études, des essais de convenance et de contrôle, les essais d'études sont exécutés sur un béton réalisé en laboratoire, les essais de convenances ou de contrôles sont exécutés sur un béton gâché dans la bétonnière ou le malaxeur utilisé sur le chantier [50].

III.9.1.1 Malaxage: EN 12390-2

Les constituants sont introduits dans le malaxeur à l'ordre suivant :

- ✓ Gros éléments.
- ✓ Liant.
- ✓ Sable.
- ✓ Après un malaxage à sec de l'ordre de 1 min.

- ✓ Ajouter l'eau de gâchage et poursuivre le malaxage pendant 2 min.
- ✓ Mesurer l'affaissement à chaque fois par cône d'Abrams jusqu'à la valeur désiré.



Photo III.5 : Béton à l'état frais.



Photo III.6 : Malaxeur.

III.9.1.2 Affaissement au cône d'Abrams : SLUMP test EN 12350-2

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est très simple à mettre en œuvre, il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40 mm. Il réalise à l'ordre suivant :

- ✓ Introduire le béton dans le moule légèrement humidifié et huilé en trois couches d'égales.
- ✓ Piquer chaque couche 25 coups avec une tige de $\phi = 16\text{mm}$.
- ✓ Araser en roulant la tige de piquage sur le bord supérieur de moule.
- ✓ Démouler le cône et mesurer l'affaissement à l'aide d'un portique et arrondi au centimètre [50].



Photo III.7 : Mesure de l'affaissement.

III.9.1.3 Vibration :

La vibration est la méthode de compactage la plus répandue, le degré de compactage d'un béton frais par vibration dépend de la fréquence et de l'amplitude des oscillations, ainsi que de la durée de vibration.

- ✓ Remplir les moules cubiques **(10x10x10) cm³**.
- ✓ On faire la vibration sur la table vibrante pendant **20s**.
- ✓ Peser 3 moules avant et après leur remplissage et la vibration pour déterminer la masse volumique de béton à l'état frais.
- ✓ Les éprouvettes sont maintenues a l'air libre au laboratoire pendant **24h** puis décoffrées et marquer par peinture et conserver dans l'eau [51].

III.9.2 Béton à l'état durci :

Le béton est considéré comme un solide monolithique après achèvement de la prise c'est un matériau perpétuelle évolution ceci pour plusieurs raison parmi les quelles:

- ✓ La poursuite des réactions d'hydratation du ciment pendant plusieurs années notamment, la cohésion et les dimensions du matériau.
- ✓ Les variations du milieu ambiant engendrent des changements lents dans la structure du béton durci [52].

III.9.2.1 Durcissement du béton :

Le durcissement d'un béton avec le temps est essentiellement à l'hydratation progression du ciment.

Il bien connu que la progression des résistances mécaniques d'un béton se fait de plus en plus lentement lorsque le passe ceci peut expliquer par le fait que la vitesse d'hydratation des grains de ciment décrois elle-même avec le temps.

III.9.2.2 Mode de conservation de béton :

Le degré d'humide du milieu de conservation a une influence importante sur la résistance du béton [53].

Notre béton est conserve dans l'eau à une température de 20°C.



Photo III.8 : Bac de conservation.

III.9.2.3 Résistance à la compression : EN 12390-3

❖ Objectif de l'essai :

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression du béton de l'éprouvette [51].

❖ Principe de l'essai :

L'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture, la contrainte de rupture à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette [50].

A) Description de l'appareil :

La presse utilisée répond aux normes NF P18-411 et NF P18-412, elle comporte deux parties :

▪ Première partie :

- ✓ Unité de commande constituée de :
- ✓ Un cadran pour valeur maximale de charge.
- ✓ Commande de réglage de la vitesse.

▪ Deuxième partie :

- ✓ Clapet de charge-décharge.
- ✓ La presse où met l'éprouvette d'essai.

B) Déroulement des essais :

On met l'éprouvette entre les plateaux de la presse, on charge avec une vitesse de 7 à 10 MPa /s, le plateau remonte jusqu'à ce qu'il ne reste entre la face d'éprouvette et le plateau supérieur quelques mm, on réduit la vitesse jusqu'à $(0,5 \pm 0,2 \text{ MPa /s})$ après rupture.

Après rupture on décharge et on note la charge maximale correspondante à la rupture P.

La résistance à la compression R_c du béton est déterminée par la formule suivant :

$$R_c = P/S.$$

Avec :

R_c : La résistance à la compression.

P : La charge de la rupture en (KN).

S : La section d'éprouvette en (cm^2).



Photo III.9 : Presse hydraulique capacité 3000 KN.

III.10 Conclusion :

Dans ce chapitre on étudiée les différentes composantes chimiques, physiques, et mécaniques des matériaux on utilisée dans un cette recherche, Les courbes granulométriques de toutes les classes des granulats (gravier) et sable sont présentées, et les propriétés des ajouts minéraux actif (pouzzolane, laitier, calcaire), et les composant du béton, ainsi les essais sur le béton frais et durci.

Chapitre IV :

Résultats et interprétation

IV.1 Introduction :

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats sous forme des tableaux et sous forme des graphes ou tout les propriétés du béton qui confectionnés à base des différents ajouts (pouzzolane, laitier, calcaire) à différentes pourcentages, qui étudiée dans une cette recherche et mentionnées précédemment seront analysés et interpréter.

IV.2 Programme de recherche :

Le programme expérimental réalisé consiste à la mesure de la résistance à la compression à 7, 28 et 60 jours sur différents mélanges des bétons. On s'est intéressé principalement à trois types, et les comparaisons avec le béton témoin (BO) dans lesquels on ajoute partiellement le béton par des quantités optimisées d'ajouts : 10%, 15% et 20% de pouzzolane, laitier, calcaire. (Le béton sera réalisé pour les trois régions de bordj Bou Arreridj).

Pour la réalisation de notre programme expérimentale nous avons utilisé les matériaux suivants:

1. Un Ciment Portland Artificiel (CPA-CEM I-42.5-ES NA443) provenant de la cimenterie d'AIN KEBIRA (wilaya de Sétif).
2. Les ajouts minéraux (Pouzzolane naturelle de Béni-saf (AIN TEMOUCHENT), laitier (wilaya Annaba, calcaire (AIN KEBIRA(Sétif)).
3. Eau de robinet.
5. Les granulats concassés de la région de Bordj Bou Arreridj, gravier (Blaimour (Région 1) 08/15,15/25), (Euch (Région 2) 08/15,15/25), (M'hir (Région 3) 08/15,15/25).
6. Un sable naturel de rivière de Boussaâda (0/5), wilaya de M'sila.
7. Affaissement entre (5 – 6) cm.

IV.3 Les essais effectués sur le béton :

IV.3.1 A l'état frais (propriétés rhéologique) :

IV.3.1.1 Mesure de l'affaissement (NF P 18-415) :

Le contrôle de l'ouvrabilité est effectué par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams (Slump test), qui est l'essai le plus utilisé à cause de sa facilité et sa reproductivité sur chantier. Cet essai est utilisé pour contrôler le pourcentage d'eau dans le béton confectionné.

IV.3.1.2 Masse volumique à l'état frais :

Cet essai consiste à remplir une éprouvette de volume v (litre) et de masse m (kg) d'un échantillon de béton frais en deux couches tassées par vibration de 30 secondes par couche, et araser et lisser la surface du béton à l'aide d'une truelle, et peser le récipient.

La masse volumique du béton frais sera alors :

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{m_t - m}{v}$$

mt : masse du moule rempli du béton compacte.

m : masse du moule vide.

v : le volume du l'éprouvette cubique.

IV.3.2 A l'état durci :

IV.3.1.2.1 Masse volumique à l'état durci (propriétés physique) :

Cet essai consiste à mesuré le poids du l'éprouvette (m) sur le volume de cette (v).

$$\rho_{dur} = m / v$$

m : masse du l'éprouvette de béton.

v : le volume du l'éprouvette cubique.

IV.3.1.2.2 Essai de compression (NF P 18-406) (propriétés mécanique):

L'essai de compression est l'essai le plus couramment pratiqué. Il s'effectue sur des éprouvettes cylindriques des différentes dimensions ou sur des cubes. La résistance à la compression est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_c = p / s$$

σ_c : Contrainte de rupture.

P : Charge de rupture.

S : Section de l'éprouvette.

IV.4 Résistance à la compression à 7 jours :

Tableau IV.1 : L'évolution de la masse volumique et la résistance de la compression à 7 jours des trois régions des différents types de béton ordinaire.

Type de béton	Type de région	ρ (kg/m ³) à l'état frais	ρ_{moy} (kg/m ³)	ρ (kg/m ³) à l'état durci	ρ_{moy} (kg/m ³)	Aff (cm)	R _C (Mpa)	R _{Cmoy} (Mpa)	
Béton ordinaire	Région 1	2464	2520.5	2414.5	2304.5	6	15.73	16.08	
		2577		2465			16.43		
	Région 2	2530	2493.5	2456	2431.25	5.8	17.09	18.47	
		2457		2406.5			19.85		
	Région 3	Région 3	2492	2467	2407.5	2394.5	5.9	12.93	13.09
			2442		2381.5			13.25	

Tableau IV.2 : L'évolution de la masse volumique et la résistance de la compression à 7 jours des trois régions à différents pourcentages (10 %, 15%, 20%) de pouzzolane.

Pourcentage d'ajout	Type de région	ρ (kg/m ³) à l'état frais	ρ_{moy} (kg/m ³)	ρ (kg/m ³) à l'état durci	ρ_{moy} (kg/m ³)	Aff (cm)	R _C (Mpa)	R _{Cmoy} (Mpa)
(10 %) pouzzolane	Région 1	2615	2573	2451	2437	6	16.62	16.94
		2531		2423			17.26	
	Région 2	2455	2447	2436	2436	6	24.18	22.73
		2439		2436			21.29	
	Région 03	2492	2464	2445	2405	5.9	25.13	24.23
		2416		2365			23.33	
(15 %) pouzzolane	Région 1	2604	2541	2453	2439.5	6	22.92	21.6
		2478		2426			20.28	
	Région 2	2465	2465.5	2418	2425	5.9	21.44	21.35
		2466		2432			21.26	
	Région 3	2477	2485.5	2430	2431	5.8	19.05	19.90
		2494		2432			20.76	
(20 %) pouzzolane	Région 1	2524	2492.5	2398	2412	5.7	20.30	20.94
		2461		2426			21.58	
	Région 2	2461	2449.5	2433	2421.5	6	19.73	21.34
		2438		2410			22.95	
	Région 3	2445	2464.5	2393	2414.5	5.6	18.12	18.59
		2484		2436			19.06	

Tableau IV.3 : L'évolution de la masse volumique et la résistance de la compression à 7 jours des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de calcaire.

Pourcentage d'ajout	Type de région	ρ (kg/m ³) à l'état frais	ρ_{moy} (kg/m ³)	ρ (kg/m ³) à l'état durci	ρ_{moy} (kg/m ³)	Aff (cm)	R _C (Mpa)	R _{Cmoy} (Mpa)
(10 %) calcaire	Région 1	2605	2493.5	2423	2346	6	12.59	12.77
		2382		2269			12.95	
	Région 2	2439	2450.5	2411	2405	5.8	14.27	15
		2462		2399			15.73	
	Région 3	2475	2483	2429	2436	5.2	18.04	18.20
		2491		2443			18.37	
(15 %) calcaire	Région 1	2464	2443	2398	2386	5.9	18.12	17.1
		2422		2374			16.08	
	Région 2	2419	2438.5	2392	2405.5	5.8	16.33	17.11
		2458		2419			17.90	
	Région 3	2392	2422	2351	2352.5	5.1	16.60	15.57
		2452		2390			14.55	
(20 %) calcaire	Région 1	2459	2469	2414	2417.5	5.8	23.73	24.98
		2479		2421			26.24	
	Région 2	2469	2466	2436	2434	5.5	25.51	25.73
		2463		2432			25.95	
	Région 3	2471	2473	2435	2430	5	21.64	21.84
		2475		2425			22	

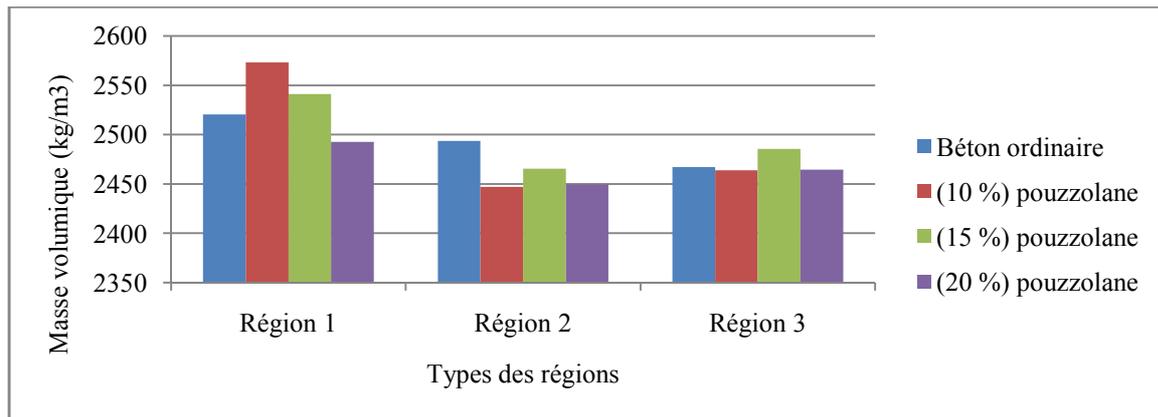


Figure IV.1 : La variation de la masse volumique à l'état frais des trois régions à différents pourcentages (10 %, 15%, 20%) de pouzzolane à 7 jours.

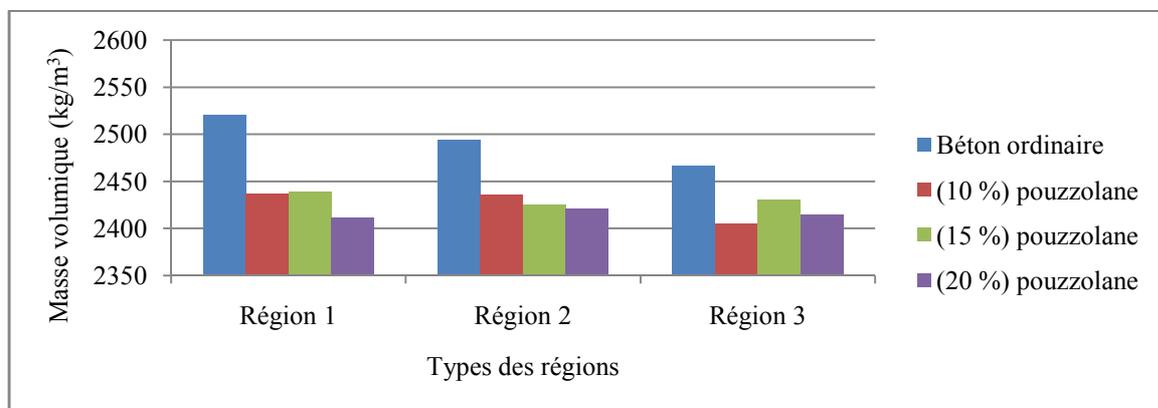


Figure IV.2 : La variation de la masse volumique à l'état durci des trois régions à différents pourcentages (10 %, 15%, 20%) de pouzzolane à 7 jours.

❖ Analyse et interprétation des résultats :

Figure IV.1 : Présente La variation de la masse volumique à l'état frais à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de pouzzolane à 7 jours en fonction des différents régions, on peut constater que le béton ordinaire et tous les pourcentages de pouzzolane donne une masse volumique à l'état frais plus grande dans la région 1 par rapport à les régions 2 et 3, cette l'augmentation de la région 1 est due au caractéristiques du gravier utilisé, et cette l'ajout peut être justifier par l'effet positif sur le gravier de la région 1.

Figure IV.2 : Présente La variation de la masse volumique à l'état durci à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de pouzzolane à 7 jours en fonction des différents régions, on peut remarquer que la masse volumique de la région 1 du béton ordinaire et à (10 %) pouzzolane, est grande, puis les régions 2 et 3, est à (15 %) pouzzolane on observe une augmentation de la région 3 puis les régions 1 et 2, et à (20 %) pouzzolane on résulte que la région 2 est croit de cette valeur par rapport les régions 3 et 1.

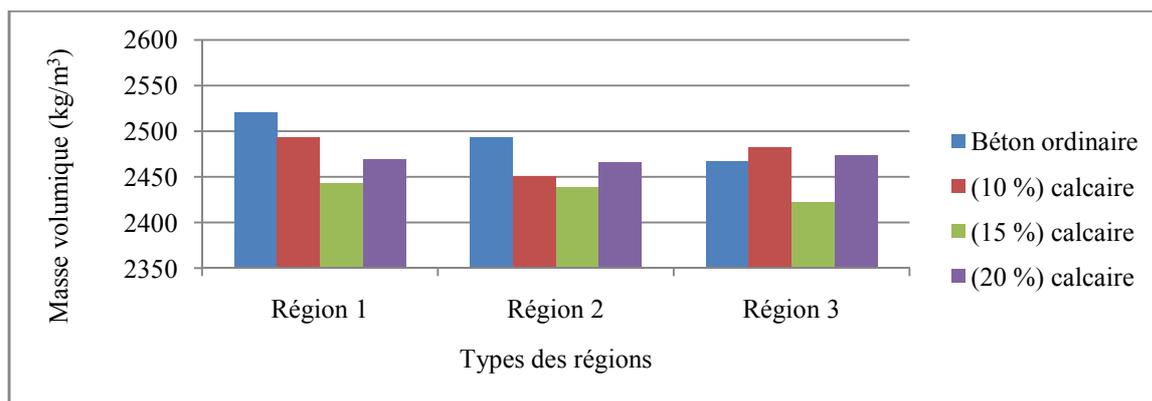


Figure IV.3 : La variation de la masse volumique à l'état frais des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de calcaire à 7 jours.

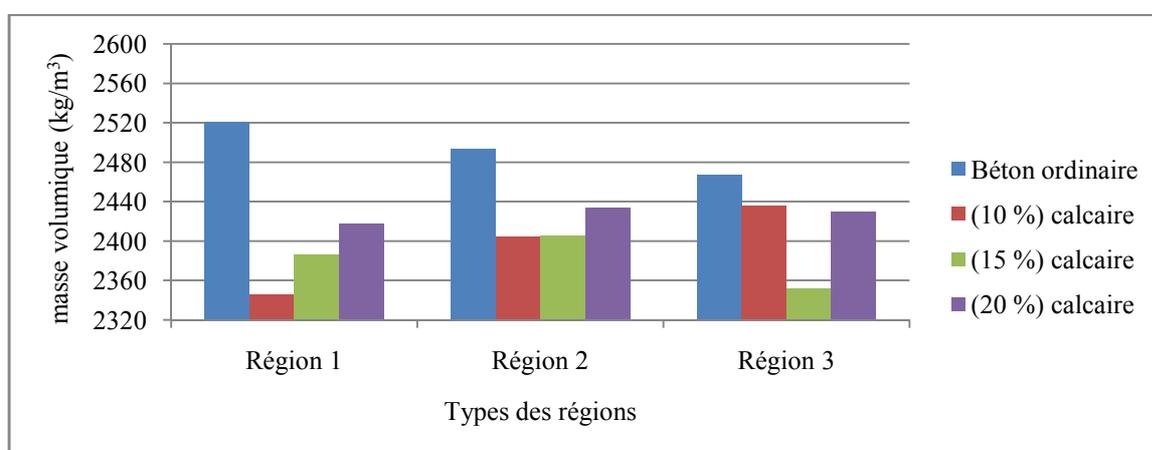


Figure IV.4 : La variation de la masse volumique à l'état durci des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de calcaire à 7 jours.

❖ Analyse et interprétation des résultats :

Figure IV.3 : Présente La variation de la masse volumique à l'état frais à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de calcaire à 7 jours en fonction des différents régions, on peut constater que la masse volumique de région 1 du béton ordinaire est plus augmentée que les régions 2 et 3, puis la croissance de (10 %) de calcaire de les régions 1 et 3, et la région 2, et à (15%) de la calcaire la région 1 est plus grande que les régions 2 et 3, et à (20%) de la calcaire, la région 3 est plus croissance que la région 1, puis la région 2, cette caractérisation de l'augmentation de la croissance de calcaire dans une tous les région est justifier par l'effet directe du gravier.

Figure IV.4 : Présente La variation de la masse volumique à l'état durci à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de calcaire à 7 jours en fonction des différents régions, on peut remarquer que la masse volumique du béton ordinaire de la région1 est plus croissant que la région 2, puis la région 3, et à (10 %) de calcaire, la région 3 est plus grande que les régions 2

et 1, et à (15 %) de calcaire, la région 2 est croit par rapport la région 1, puis la région 2, et à (20 %) de calcaire, la région 2 est plus augmente légèrement que les régions 3 et 1, cette influence de calcaire sur les régions est dépend sur la qualité du gravier.

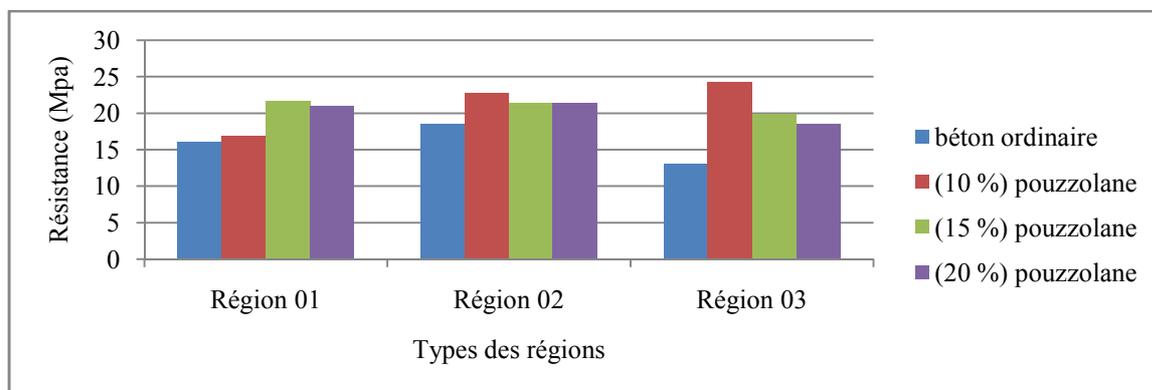


Figure IV.5 : L'évolution de la résistance des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de pouzzolane à 7 jours.

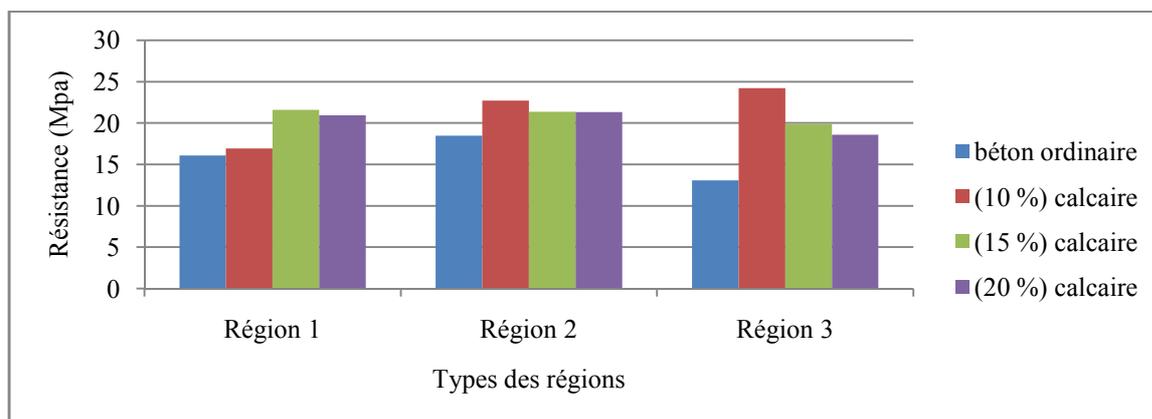


Figure IV.6 : L'évolution de la résistance des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de calcaire à 7 jours.

❖ Analyse et interprétation des résultats :

Figure IV.5 : Présente l'évolution de la résistance en fonction des différents régions, de pouzzolane à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) à 7 jours, nous avons constaté qu'il ya une augmentation de la résistance du béton ordinaire de la région 2, puis les régions 1 et 3, et à (10 %) de pouzzolane la plus grande valeur c'est la région 3, et les région 2 et 1, et à (15,20 %) de pouzzolane, la région 1 est croit par rapport les régions 2 et 3, on peut conclut que la région 2 c'est la meilleur région pour la résistance qui ajoute la pouzzolane, ce qui fait la région 2 un bon qualité de gravier avec la pouzzolane.

Figure IV.6 : Présente l'évolution de la résistance en fonction des différents régions, de calcaire à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) à 7 jours, on peut remarquer que la région 2 du béton ordinaire est augmente par rapport les régions 1 et 3, et à (10 %) de calcaire

Chapitre IV : Résultats et interprétation

une croissance de la région 3, puis les régions 2 et 1, et à (15 %) de calcaire, les deux région 1 et 2 est simultanément, puis la région 3, et à (20 %) de calcaire, la région 2 est plus grande valeur par rapport les régions 1 et 3, on peut conclut que le meilleur région c'est la région 2.

IV.5 Résistance à la compression à 28 jours :

Tableau IV.4 : L'évolution de la masse volumique et la résistance de la compression à 28 jours des trois régions des différents types de béton ordinaire.

Type de béton	Type de région	ρ (kg/m ³) à l'état frais	ρ_{moy} (kg/m ³)	ρ (kg/m ³) à l'état durci	ρ_{moy} (kg/m ³)	Aff (cm)	R _C (Mpa)	R _{Cmoy} (Mpa)
Béton ordinaire	Région 1	2517	2524.5	2447	2440	6	25.73	26.5
		2532		2433			27.27	
	Région 2	2523	2549	2428	2438.5	5.8	31.46	28.18
		2575		2449			24.90	
	Région 3	2496	2467	2436	2415.5	5.9	36.59	36.43
		2438		2395			36.27	

Tableau IV.5 : L'évolution de la masse volumique et la résistance de la compression à 28 jours des trois régions à différents pourcentages (10 %, 15%, 20%) de pouzzolane.

Pourcentage d'ajout	Type de région	ρ (kg/m ³) à l'état frais	ρ_{moy} (kg/m ³)	ρ (kg/m ³) à l'état durci	ρ_{moy} (kg/m ³)	Aff (cm)	R _C (Mpa)	R _{Cmoy} (Mpa)
(10 %) pouzzolane	Région 1	2500	2494	2418	2406	6	26.15	27.72
		2488		2394			29.30	
	Région 2	2670	2578	2558	2496.75	6	31.41	35.01
		2486		2435.5			38.69	
	Région 3	2382	2559	2360	2437.5	5.9	46.28	42.72
		2736		2515			39.16	
(15 %) pouzzolane	Région 1	2450	2444.5	2399	2387	6	26.79	28.54
		2439		2375			30.29	
	Région 2	2713	2714	2524.5	2553	5.9	29.90	36.92
		2715		2581.5			43.94	
	Région 3	2498	2497.5	2470.5	2474.25	5.8	45.40	48.07
		2497		2478			50.75	
(20 %) pouzzolane	Région 1	2512	2443	2373	2381	5.7	27.92	27.6
		2374		2389			27.28	
	Région 2	2591	2586.5	2496	2502	6	37.81	38.86
		2582		2508			39.91	
	Région 3	2500	2538	2469	2488.25	5.6	48.31	45.48
		2576		2507.5			42.65	

Tableau IV.6 : L'évolution de la masse volumique et la résistance de la compression à 28 jours des trois régions à différents pourcentages (10 %, 15%, 20%) de laitier.

Pourcentage d'ajout	Type de région	ρ (kg/m ³) à l'état frais	ρ_{moy} (kg/m ³)	ρ (kg/m ³) à l'état durci	ρ_{moy} (kg/m ³)	Aff (cm)	R _C (Mpa)	R _{Cmoy} (Mpa)
(10 %) laitier	Région 1	2355	2381	2314	2335.75	5.2	33.59	32.76
		2407		2357.5			31.94	
	Région 2	2461	2480.5	2446.5	2461	5.9	47.08	40.46
		2500		2475.5			33.85	
	Région 3	2712	2605.5	2507.5	2480	5.9	29.40	32.51
		2499		2452.5			35.63	
(15 %) laitier	Région 1	2447	2435.5	2419.5	2410	5.1	39.59	38.85
		2424		2400.5			38.12	
	Région 2	2514	2495	2493.5	2472	6	50	42.8
		2476		2450.5			35.60	
	Région 3	2605	2677.5	2474	2495	5.8	37.18	35.62
		2750		2516			34.07	
(20 %) laitier	Région 1	2587	2564.5	2420	2427.25	5.4	42.35	42.54
		2542		2434.5			42.74	
	Région 2	2453	2452	2443	2443	5.8	53.54	57.42
		2451		2443			61.30	
	Région 3	2484	2579	2426	2503	5.6	34.91	37.87
		2674		2580			40.84	

Tableau IV.7 : L'évolution de la masse volumique et la résistance de la compression à 28 jours des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de calcaire.

Pourcentage d'ajout	Type de région	ρ (kg/m ³) à l'état frais	ρ_{moy} (kg/m ³)	ρ (kg/m ³) à l'état durci	ρ_{moy} (kg/m ³)	Aff (cm)	R _C (Mpa)	R _{Cmoy} (Mpa)
(10 %) calcaire	Région 1	2470	2466.5	2418	2419.25	6	34.63	33.58
		2463		2420.5			32.54	
	Région 2	2422	2462.5	2410	2437.25	5.8	44.02	45.32
		2503		2464.5			46.63	
	Région 3	2457	2469	2418	2413	5.2	27.01	28.98
		2481		2408			30.95	
(15 %) calcaire	Région 1	2467	2467.5	2429	2431	5.9	38.47	36.21
		2468		2433			33.95	
	Région 2	2555	2534	2403.5	2440.75	5.7	45.69	41.35
		2513		2478			37.01	
	Région 3	2435	2456.5	2381	2397.5	5.1	36.02	33.78
		2478		2414			31.54	
(20 %) calcaire	Région 1	2506	2483	2434.5	2432.5	5.8	36.90	39.85
		2460		2430.5			42.80	
	Région 2	2515	2531	2479.5	2481.75	5.5	47.70	46.20
		2547		2484			44.70	
	Région 3	2588	2537	2489	2465.5	5	29	31.91
		2486		2442			34.83	

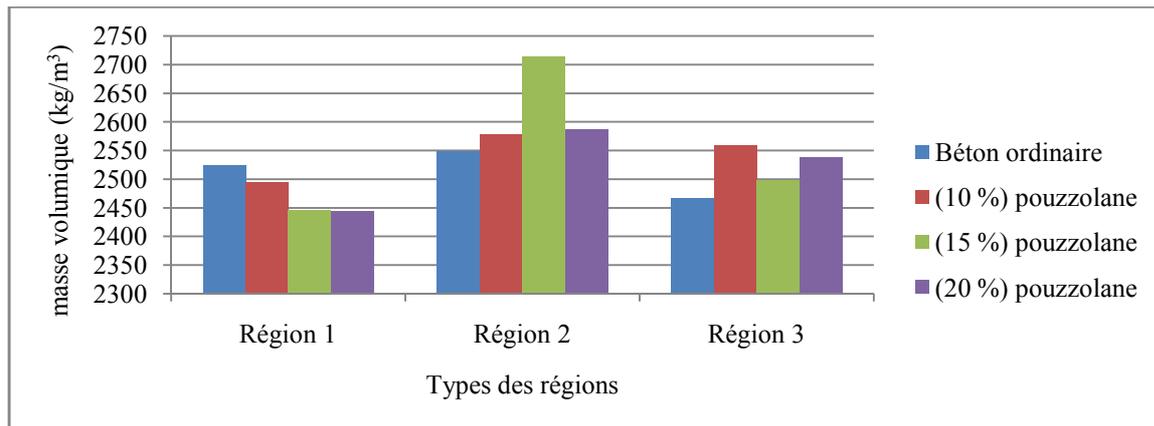


Figure IV.7 : La variation de la masse volumique à l'état frais des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de pouzzolane à 28 jours.

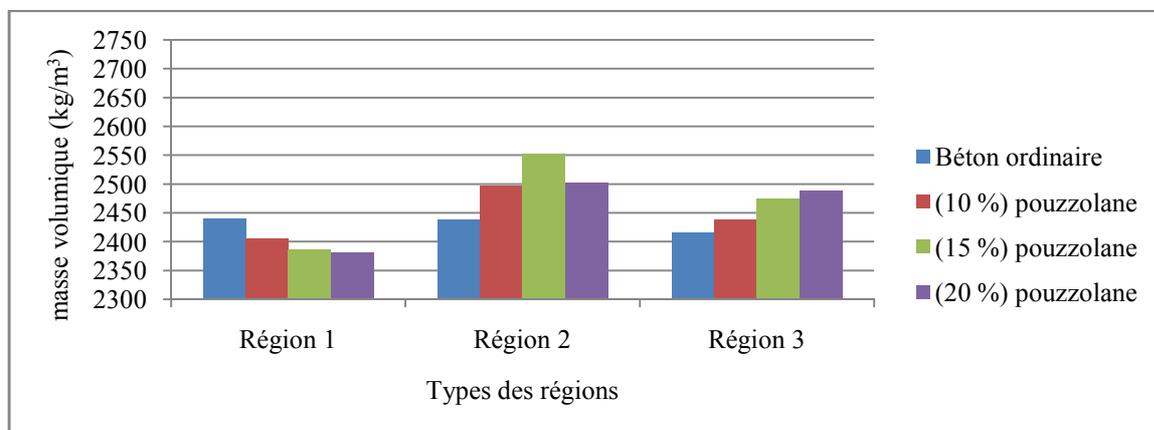


Figure IV.8 : La variation de la masse volumique à l'état durci des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de pouzzolane à 28 jours.

❖ Analyse et interprétation des résultats :

Figure IV.7 : Présente La variation de la masse volumique à l'état frais à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de pouzzolane à 28 jours en fonction des différents régions, on peut constater que la région 2 à une grande masse volumique par rapport les région 3 et 1, ce que fait la pouzzolane est influé sur les granulats de la région 2, cette caractérisation de bonne nature de gravier avec l'ajout elle augmente la masse volumique à tous les pourcentage.

Figure IV.8 : Présente La variation de la masse volumique à l'état durci à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de pouzzolane à 28 jours en fonction des différents régions, on peut constater que la région 2 à une croissance de la masse volumique à tous les pourcentages de l'ajout par rapport au autres régions 3 et 1, cette l'augmentation elle conserve par rapport à la masse volumique, donc la masse volumique de la région 1 est décroissante du béton témoin, et avec tous les pourcentage de l'ajout, et contraire au région 3.

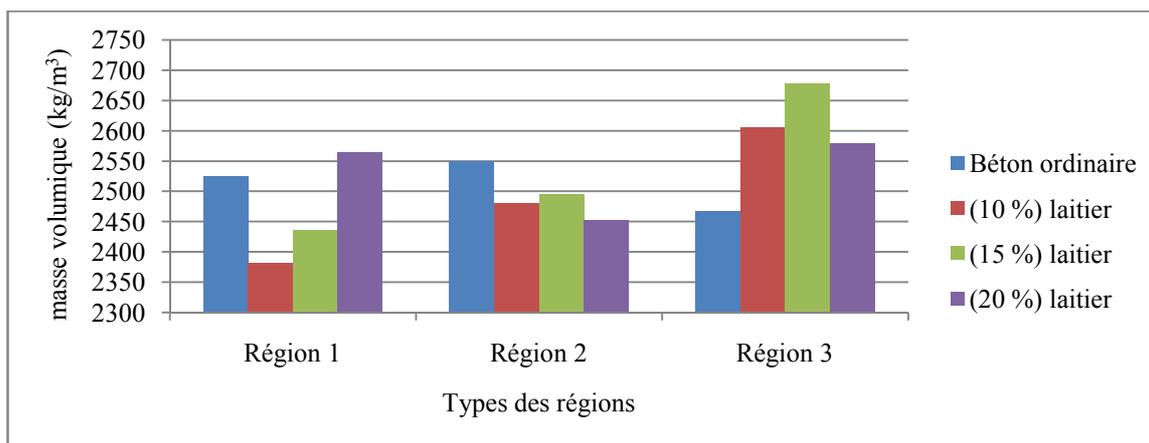


Figure IV.9 : La variation de la masse volumique à l'état frais des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de laitier à 28 jours.

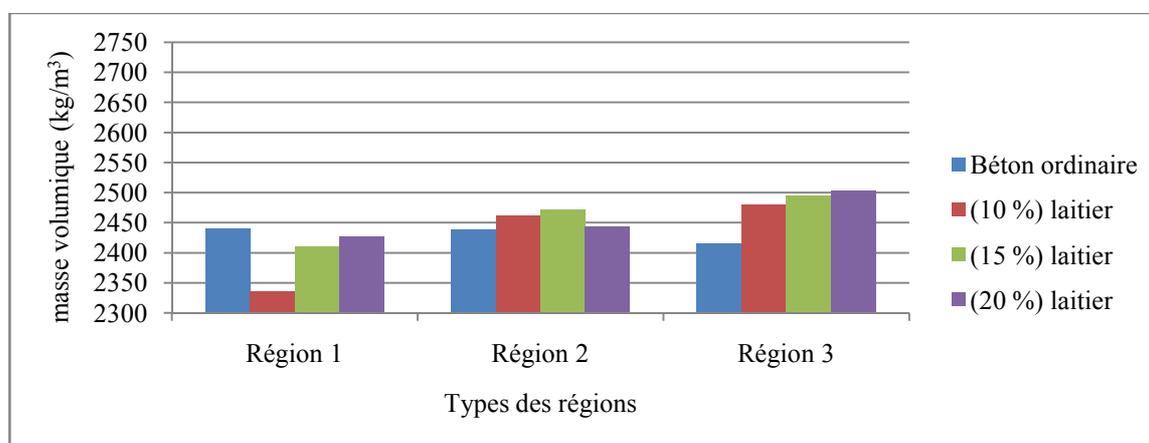


Figure IV.10 : La variation de la masse volumique à l'état durci des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de laitier à 28 jours.

❖ **Analyse et interprétation des résultats :**

Figure IV.9 : Présente La variation de la masse volumique à l'état frais à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de laitier à 28 jours en fonction des différents régions, on peut remarquer que la masse volumique du béton ordinaire de région 2 elle augmente, et on ajoute des pourcentage de laitier (10 %,15%) elle croissante, et à (20%) elle décroissante, cette gros quantité de laitier est influé sur la masse volumique, et la région 1, la masse volumique de béton ordinaire est grande par rapport au pourcentages (10 %,15%) de laitier, et à (20%) elle croissante par rapport au béton témoin, et la région 3, la masse volumique de béton ordinaire est décroissante par rapport aux autres pourcentage de laitier, cette l'augmentation est dépend par la nature de gravier de cette région.

Figure IV.10 : Présente La variation de la masse volumique à l'état durci à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de laitier à 28 jours en fonction des différents régions, on peut remarquer que la région 3 à une grande masse volumique différentes à tous les pourcentages de

laitier elle est croissante au béton ordinaire jusqu'au dernière pourcentage de laitier cette augmentation justifier que laitier est un effet positif sur le gravier de cette région, et la région 1 à avec masse volumique de béton ordinaire est grande par rapport aux autres pourcentages de laitier, et dans la région 2, la masse volumique augmente à 10% et 15% du laitier et diminue à 20%, cette l'augmentation de la masse volumique de béton c'est l'effet positif de laitier sur les granulats.

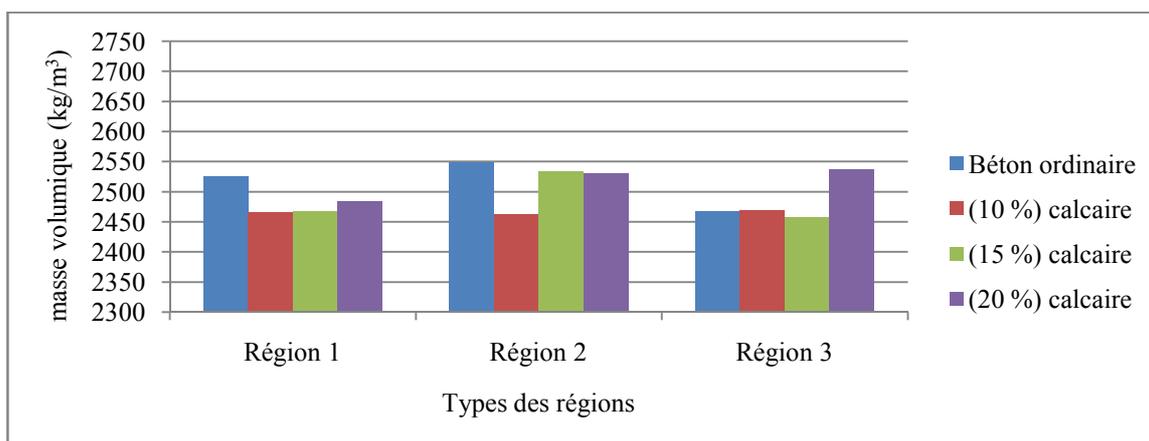


Figure IV.11 : La variation de la masse volumique à l'état frais des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de calcaire à 28 jours.

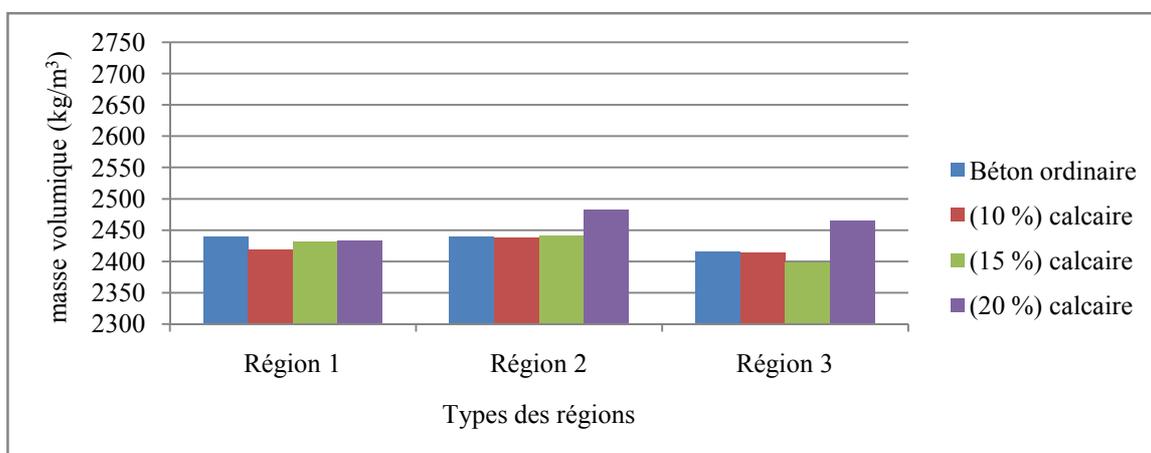


Figure IV.12 : La variation de la masse volumique à l'état durci des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de calcaire à 28 jours.

❖ Analyse et interprétation des résultats :

Figure IV.11 : Présente La variation de la masse volumique à l'état frais à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de calcaire à 28 jours en fonction des différents régions, on peut constater que la région 1 à une masse volumique grande du béton ordinaire, est une masse volumique d'ordre croissant avec les pourcentages du calcaire et les régions 1 et 3 une augmentation avec le pourcentage 15 %, et diminution à 20%.

Figure IV.12 : Présente La variation de la masse volumique à l'état durci à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de calcaire à 28 jours en fonction des différentes régions, on peut constater que la région 1 à un grande masse volumique par rapport aux autres région, et après dans tous les pourcentages une augmentation de la masse volumique, et comme la région 2, et la région 3 la masse volumique.

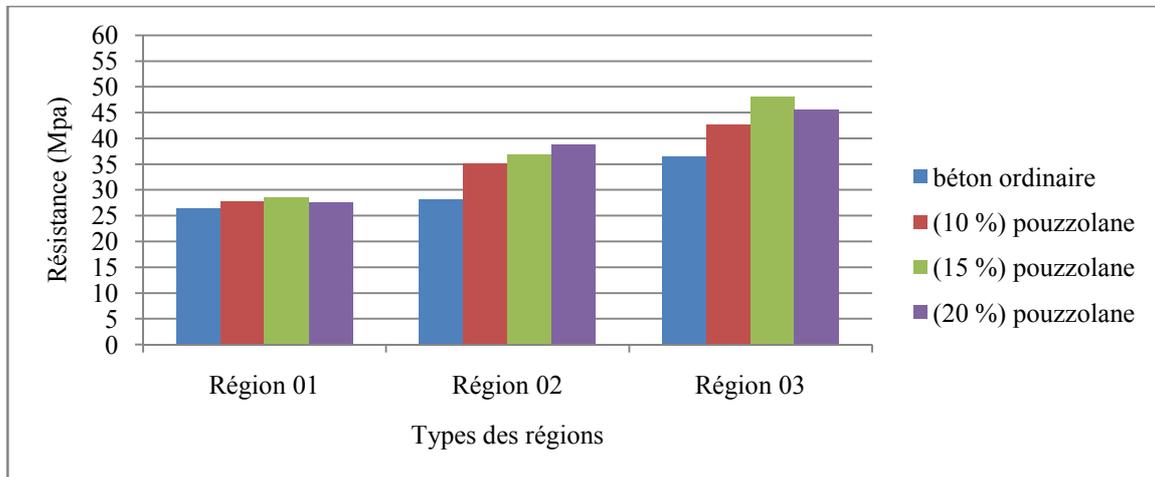


Figure IV.13 : L'évolution de la résistance des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de pouzzolane à 28 jours.

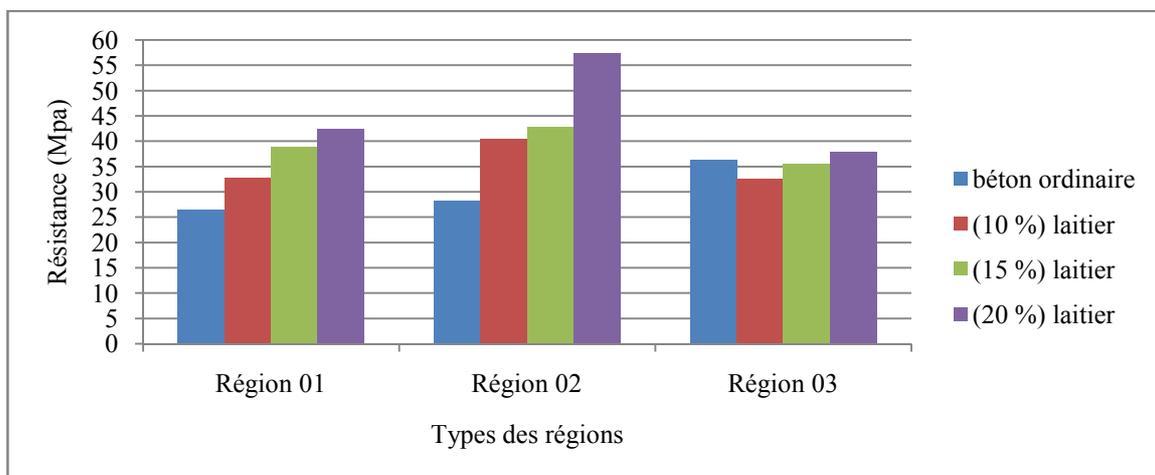


Figure IV.14 : L'évolution de la résistance des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de laitier à 28 jours.

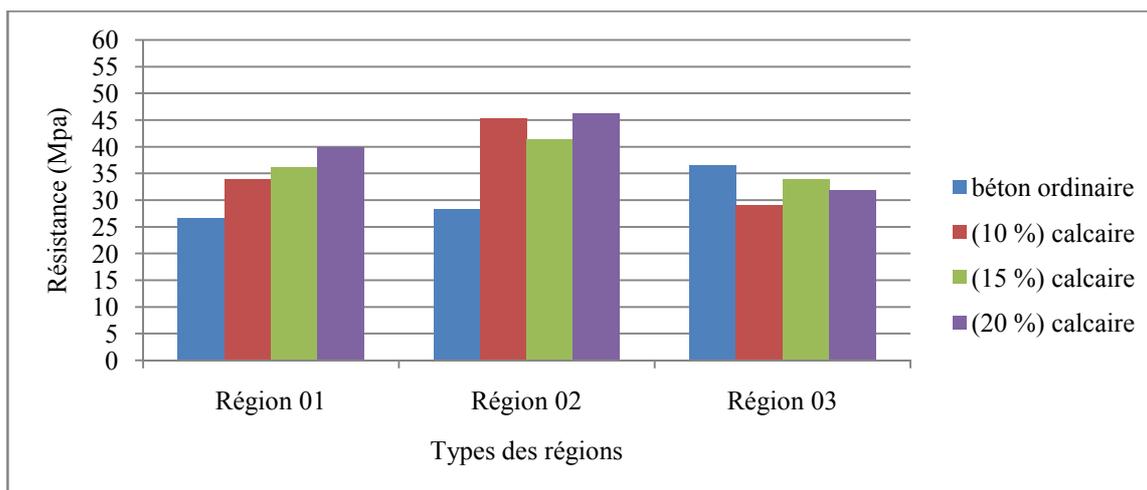


Figure IV.15 : L'évolution de la résistance des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de calcaire à 28 jours.

❖ Analyse et interprétation des résultats :

Figure IV.13 : Présente l'évolution de la résistance en fonction des différents régions, de pouzzolane à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) à 28 jours, nous avons constaté qu'il ya une augmentation de la résistance de béton ordinaire, et à (10 %, 15%) pouzzolane de la région 3 et cette valeur croissante est à (20 %) pouzzolane elle est décroissante, et comme les régions 1 et 2, elle est un croissante absolue de béton ordinaire et les pourcentage de pouzzolane, cette augmentation de la résistance est un effet positif de pouzzolane sur le gravier, et la nature minéralogique des granulats, et on conclut que la région 3 c'est le meilleur région par rapport à les régions 2 et 1 avec laitier.

Figure IV.14 : Présente l'évolution de la résistance en fonction des différents régions, de laitier à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) à 28 jours, nous avons constaté que la région 2 un croissante de tout les pourcentages de laitier, et comme la région 1, et la région 3 dans un béton ordinaire la résistance elle est élevé par rapport (10 %, 15%) de laitier, et un croissante de tous les pourcentage de laitier, cette croissante de la résistance est dépendent par l'effet de laitier sur les granulats, on peut conclut la région 2 est un résistance plus grand que les régions 1 et 3.

Figure IV.15 : Présente l'évolution de la résistance en fonction des différents types régions, de calcaire à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) à 28 jours, nous avons constaté que la résistance de la région 1 elle est croissante, comme la région 2, et la région 3 la résistance de béton ordinaire est plus grande au pourcentage de calcaire, cette l'ajoute elle influé un effet négatif sur le gravier, on peut résulte que la région 2 est le meilleur par rapport au les régions 1 et 3.

IV.6 Résistance à la compression à 60 jours :

Tableau IV.8 : L'évolution de la masse volumique et la résistance de la compression à 60 jours des trois régions des différents types de béton ordinaire.

Type de béton	Type de région	ρ (kg/m ³) à l'état frais	ρ_{moy} (kg/m ³)	ρ (kg/m ³) à l'état durci	ρ_{moy} (kg/m ³)	Aff (cm)	R _C (Mpa)	R _{Cmoy} (Mpa)
Béton ordinaire	Région 1	2621	2577.5	2491	2475.5	6	42.75	41.37
		2534		2460			40	
	Région 2	2568	2541	2464	2451	5.8	41.10	40.16
		2514		2438			39.23	
	Région 3	2520	2479.5	2466	2425	5.9	41.71	40.35
		2439		2384			39	

Tableau IV.9 : L'évolution de la masse volumique et la résistance de la compression à 60 jours des trois régions à différents pourcentages (10 %, 15%, 20%) de pouzzolane.

Pourcentage d'ajout	Type de région	ρ (kg/m ³) à l'état frais	ρ_{moy} (kg/m ³)	ρ (kg/m ³) à l'état durci	ρ_{moy} (kg/m ³)	Aff (cm)	R _C (Mpa)	R _{Cmoy} (Mpa)
(10 %) pouzzolane	Région 1	2401	2450.5	2363	2407.5	6	32.26	32.25
		2500		2452			32.24	
	Région 2	2516	2530	2461	2452.75	6	42.12	45.71
		2544		2444.5			49.31	
	Région 3	2490	2588	2467	2487.25	5.9	51.95	49.33
		2686		2507.5			46.71	
(15 %) pouzzolane	Région 01	2513	2515.5	2470	2447	6	31.09	32.71
		2518		2424			34.33	
	Région 2	2658	2611.5	2547	2513	59	42.55	45.05
		2565		2479			47.55	
	Région 3	2490	2509	2476.5	2484.75	5.8	49.45	49.23
		2528		2493			49.02	
(20 %) pouzzolane	Région 1	2441	2437.5	2417	2409	5.7	34.90	36.46
		2434		2401			38.02	
	Région 2	2452	2504	2430	2465.5	6	47.15	49.69
		2556		2501			52.23	
	Région 3	2545	2512.5	2509	2486.5	5.6	53.67	51.95
		2480		2464			50.23	

Tableau IV.10 : L'évolution de la masse volumique et la résistance de la compression à 60 jours des trois régions à différents pourcentages (10 %, 15%, 20%) de laitier.

Pourcentage d'ajout	Type de région	ρ (kg/m ³) à l'état frais	ρ_{moy} (kg/m ³)	ρ (kg/m ³) à l'état durci	ρ_{moy} (kg/m ³)	Aff (cm)	R _C (Mpa)	R _{Cmoy} (Mpa)
(10 %) laitier	Région 1	2387	2390.5	2352.5	2344.5	5.2	35.20	33.76
		2394		2336.5			32.32	
	Région 2	2482	2492	2445	2457	5.9	54.04	54.82
		2502		2469			55.60	
	Région 3	2598	2500.5	2493.5	2439.5	5.9	49.15	43.62
		2403		2385			38.09	
(15 %) laitier	Région 01	2469	2457.5	2437.5	2425.5	5.1	48.77	46.72
		2446		2413.5			44.68	
	Région 2	2497	2491.5	2464.5	2464	6	56.26	56.31
		2486		2463.5			56.37	
	Région 3	2411	2446.5	2390	2429.5	5.8	56.63	47.47
		2482		2459			38.32	
(20 %) laitier	Région 1	2497	2515	2456.5	2456.25	5.4	46.97	50.12
		2533		2456			53.28	
	Région 2	2466	2512.5	2452	2465.25	5.8	58.95	57.62
		2559		2478.5			56.29	
	Région 3	2544	2620.5	2531	2535	5.6	52.09	47.53
		2697		2539			42.98	

Tableau IV.11 : L'évolution de la masse volumique et la résistance de la compression à 60 jours des trois régions à différents pourcentages (10 %, 15%, 20%) de calcaire.

Pourcentage d'ajout	Type de région	ρ (kg/m ³) à l'état frais	ρ_{moy} (kg/m ³)	ρ (kg/m ³) à l'état durci	ρ_{moy} (kg/m ³)	Aff (cm)	R _C (Mpa)	R _{Cmoy} (Mpa)
(10 %) calcaire	Région 1	2464	2481.5	2420.5	2426	6	44.97	44.21
		2499		2431.5			43.45	
	Région 2	2471	2488	2440	2452.25	5.8	55.05	51.12
		2505		2464.5			47.19	
	Région 3	2416	2425.5	2389	2390.5	5.2	36.88	31.68
		2435		2392			26.48	
(15 %) calcaire	Région 1	2476	2450.5	2401	2405	5.9	45.28	45.74
		2425		2409			46.20	
	Région 2	2511	2487.5	2473.5	2458.75	5.7	50.04	50.54
		2464		2444			51.04	
	Région 3	2411	2442	2376.5	2401	5.1	39.19	36.92
		2473		2425.5			34.65	
(20 %) calcaire	Région 1	2463	2461.5	2420.5	2414	5.8	46.53	48.27
		2460		2407.5			50.01	
	Région 2	2489	2483	2463.5	2459	5.5	51.50	51.98
		2477		2454.5			52.46	
	Région 3	2533	2504.5	2479	2447.75	5	41.59	35.62
		2476		2416.5			29.66	

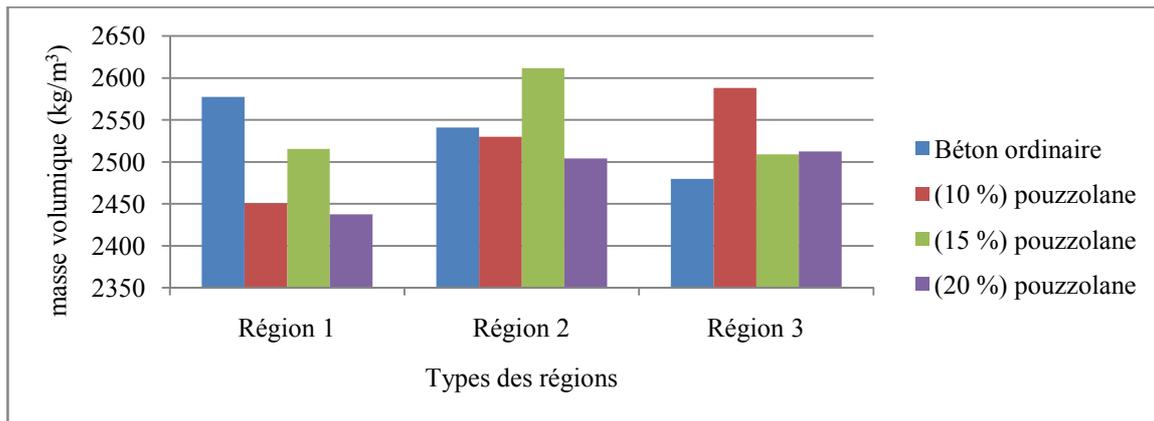


Figure IV.16 : La variation de la masse volumique à l'état frais des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de pouzzolane à 60 jours.

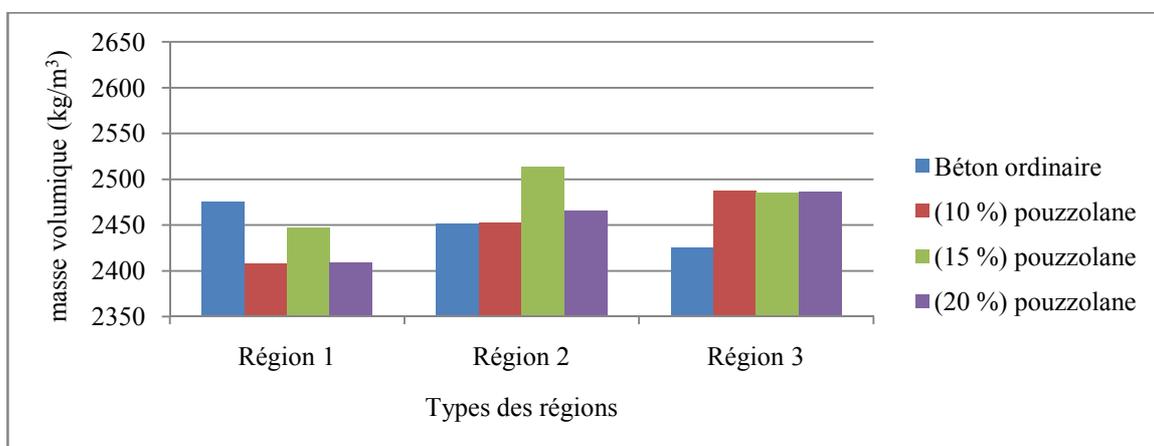


Figure IV.17 : La variation de la masse volumique à l'état durci des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de pouzzolane à 60 jours.

❖ Analyse et interprétation des résultats :

Figure IV.16 : Présente La variation de la masse volumique à l'état frais à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de pouzzolane à 60 jours en fonction des différents régions, on peut remarquer que la masse volumique de la région 2 augmente par rapport au autres région 3 et 1, cette croissance peut être attribuée à la nature des agrégats. Cela montre l'effet positive de pouzzolane qui jouent le rôle des micros agrégats c.à.d. diminue la porosité en remplissant les vides et confèrent au béton une compacité élevée comme l'ont montré plusieurs recherches, et les pourcentages de pouzzolane par fois croissante et décroissante par rapport au béton témoin.

Figure IV.17 : Présente La variation de la masse volumique à l'état durci à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de pouzzolane à 60 jours en fonction des différents régions, on peut remarquer une augmentation de la masse volumique de la région 3 en comparant avec les régions 2 et 1, cela justifier à la porosité des granulates lors du conservation est à l'activité de la pouzzolane.

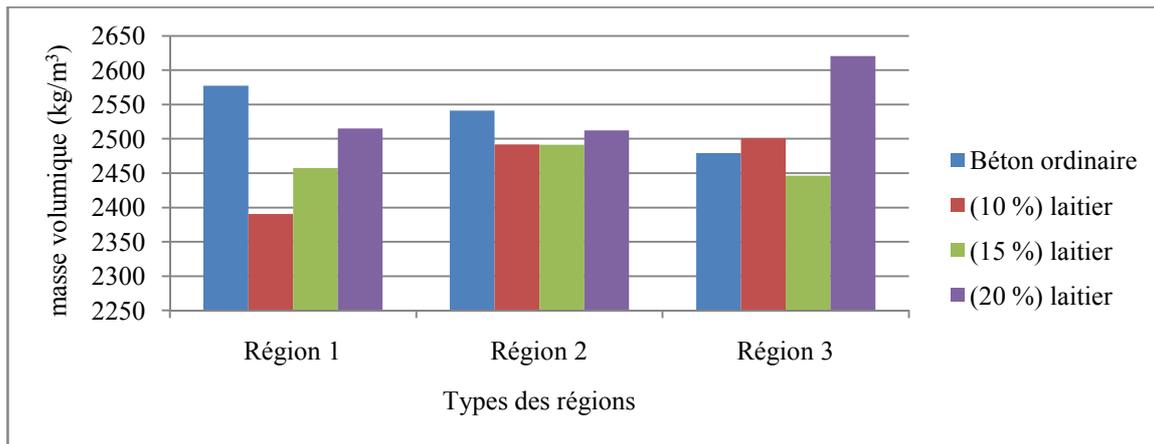


Figure IV.18 : La variation de la masse volumique à l'état frais des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de laitier à 60 jours.

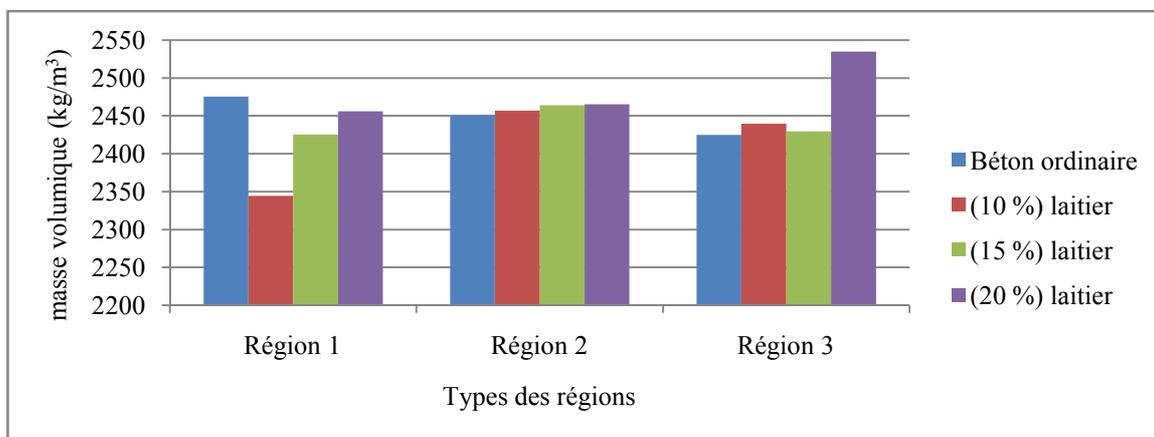


Figure IV.19 : La variation de la masse volumique à l'état durci des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de laitier à 60 jours.

❖ Analyse et interprétation des résultats :

Figure IV.18 : Présente La variation de la masse volumique à l'état frais à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de laitier à 60 jours en fonction des différentes régions, on peut remarquer un développement de la masse volumique de la région 2 par rapport autres régions 3 et 1, cette l'augmentation est du à l'effet positif de laitier sur le gravier de la région 2, et cette valeur de la masse volumique est successive croissante, et cette valeur inferieur à valeur de la masse volumique de béton témoin.

Figure IV.19 : Présente La variation de la masse volumique à l'état durci à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de laitier à 60 jours en fonction des différents régions, on peut remarquer que la région 2 à une grande masse volumique de tous les pourcentages sauf que (20%) de laitier par rapport à la région 3, cette valeur est influé sur le gravier de la région 3 cela une effet direct sur la qualité de granulats, et la région 1 une faible masse volumique de pourcentage de laitier cela un effet négatif sur le gravier.

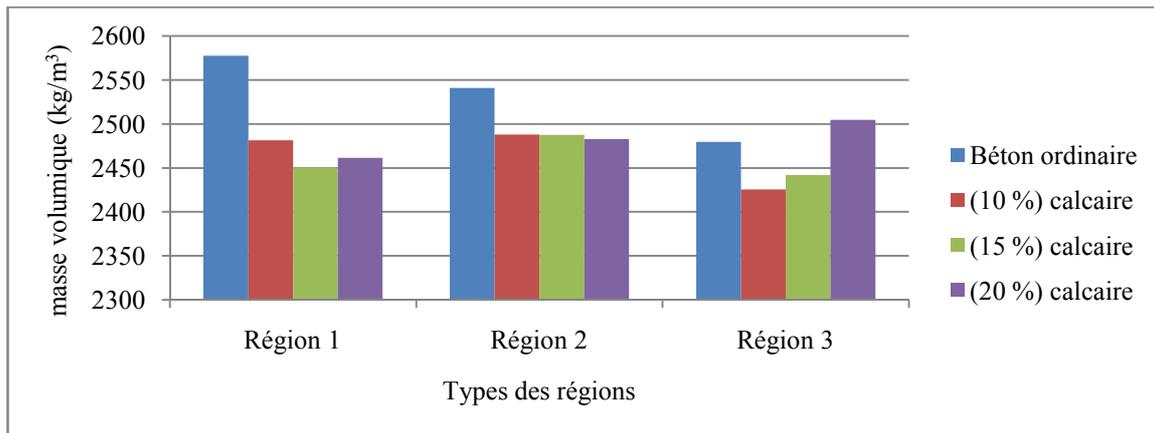


Figure IV.20 : La variation de la masse volumique à l'état frais des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de calcaire à 60 jours.

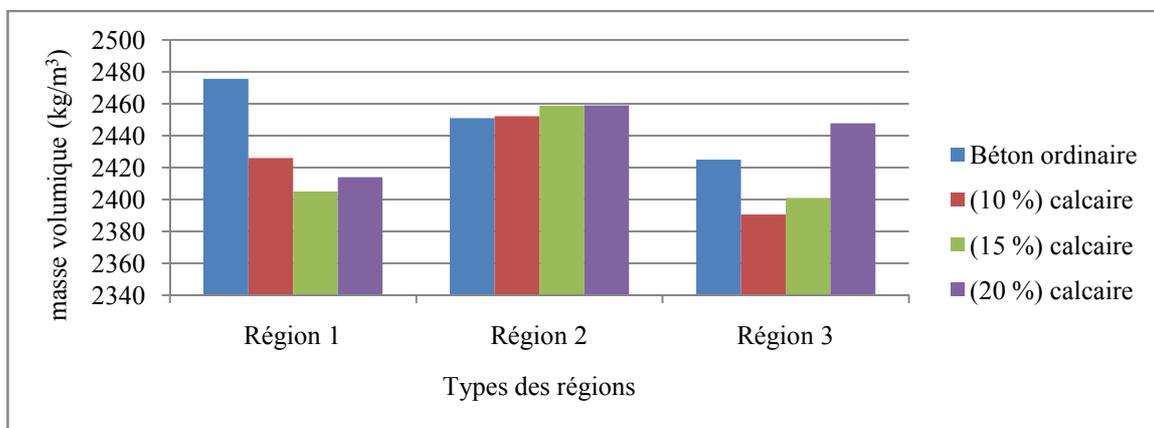


Figure IV.21 : La variation de la masse volumique à l'état durci des trois régions à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de calcaire à 60 jours.

❖ Analyse et interprétation des résultats :

Figure IV.20 : Présente La variation de la masse volumique à l'état frais à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de calcaire à 60 jours en fonction des différents régions, on peut constater une augmentation dans une région 2 par rapport les autres régions 1 et 3, cette résultats elle est décroissante dans béton témoin jusqu'à (20%) de calcaire, cela justifier un effet de l'ajout sur les granulats de cette région, cette réaction de béton avec l'ajout elle décroît que la masse volumique de béton témoin que le béton qui ajouté le calcaire.

Figure IV.21 : Présente La variation de la masse volumique à l'état durci à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) de calcaire à 60 jours en fonction des différents régions, on peut constater que la région 2 à grande masse volumique, cette l'augmentation elle est croissante au béton témoin jusqu'à tous les pourcentages de calcaire, cette l'influence de l'ajout sur les granulats de région elle est positif, et un effet de béton plus compacte sera dire un masse volumique plus grande de tous les pourcentages, quelque soit on ajoute le calcaire.

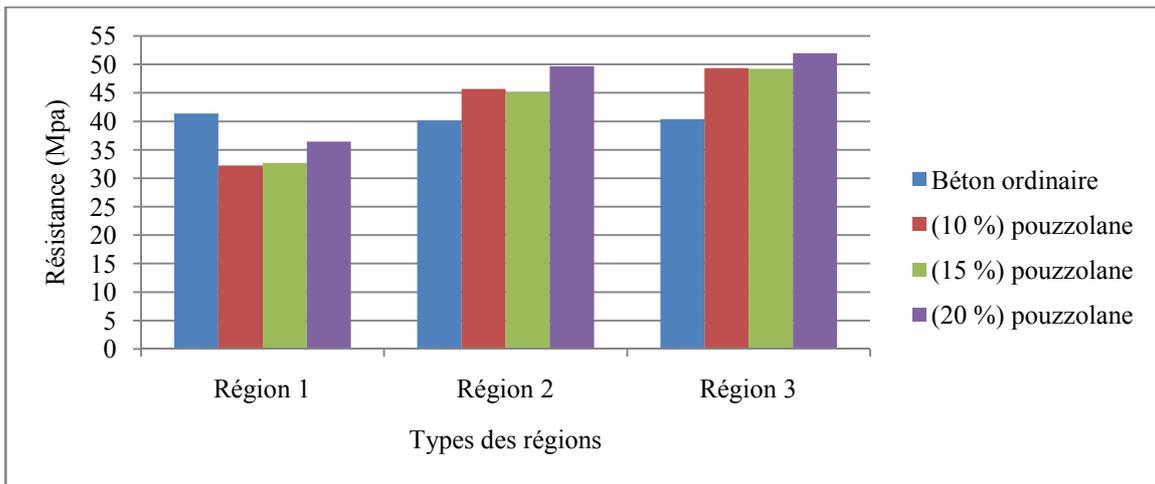


Figure IV.22 : L'évolution de la résistance des trois régions à différents pourcentages (10 %, 15%, 20%) de pouzzolane à 60 jours.

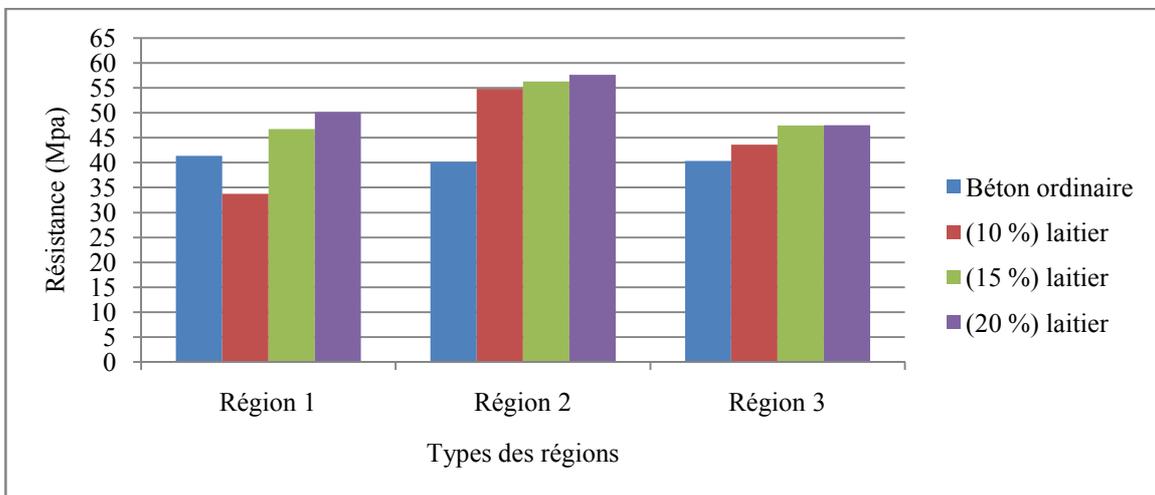


Figure IV.23 : L'évolution de la résistance des trois régions à différents pourcentages (10 %, 15%, 20%) de laitier à 60 jours.

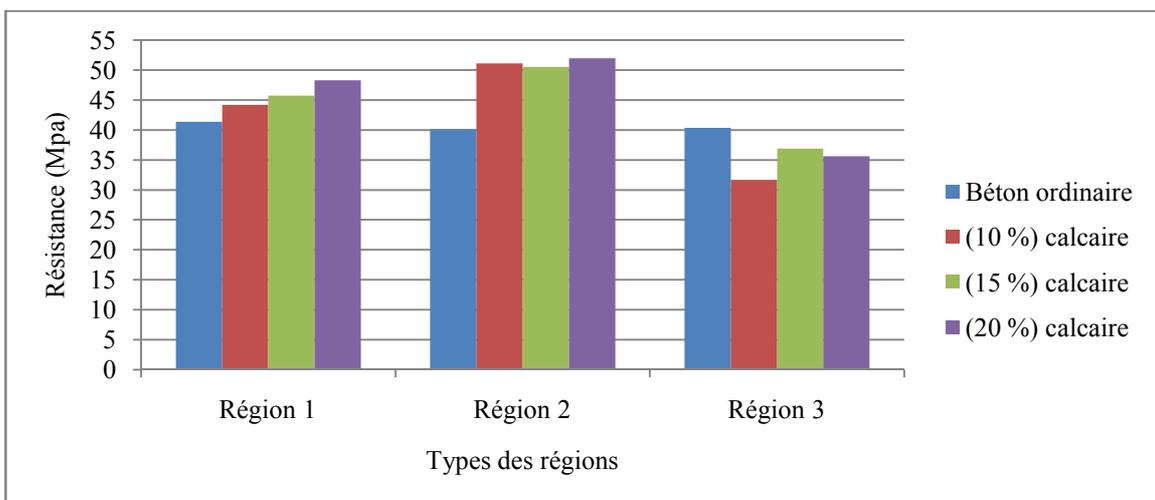


Figure IV.24 : L'évolution de la résistance des trois régions à différents pourcentages (10 %, 15%, 20%) de calcaire à 60 jours.

❖ Analyse et interprétation des résultats :

Figure IV.22 : Présente l'évolution de la résistance en fonction des différents régions, du pouzzolane à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) à 60 jours, nous avons constaté qu'il ya une augmentation de la résistance de la région 3 est supérieure en comparaison aux autres types de béton des régions 2 et 1, et cette valeur de résistance de la région 3 est respectivement croissante, cette action de pouzzolane c'est positif se manifeste qu'à long terme, cela se traduit par l'activité de la pouzzolane qui réagit avec la portlandite libéré par l'hydratation de ciment pour former des hydrates (C-S-H), qui contribue à l'augmentation de la résistance.

Figure IV.23 : Présente l'évolution de la résistance en fonction des différents régions, de laitier à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) à 60 jours, nous avons remarqué qu'un développement de la croissance de résistance de la région 2 par les autres régions 3 et 1, cela traduit par l'effet positif de laitier sur le gravier de la région 2, cette caractéristique est due à l'augmente de la résistance à long terme est donne des bonnes résultats, et la nature minéralogique de gravier de cette région.

Figure IV.24 : Présente l'évolution de la résistance en fonction des différents régions, de calcaire à différentes pourcentages (10 %, 15%, 20%) à 60 jours, nous avons constaté qu'une augmentation de la résistance de la région 2 en comparaison par des autres régions 1 et 3, cela signifie un effet positif de calcaire sur cette granulats, et cette résultats est développement croissante, les caractéristiques de cette granulats comme la compacité elle donne un bon résultats, et le calcaire elle réagit avec le ciment pour formé un grande résistance en remplissant les vides dans un béton.

IV.7 Conclusion :

Dans ce chapitre on étudiée les différentes propriétés comme la masse volumique et la résistance par les ajouts de pouzzolane, laitier, et calcaire, à pourcentage différente (10%, 15%, 20%), et leur effet sur le béton. De cette comparaison nous pouvons tirer les conclusions suivantes, le béton des régions 2 et 3 donne le bon résultat par rapport au béton de région 1, il ya plusieurs paramètres qu'influe sur la résistance du béton est l'un de ces paramètres si la nature et le type de granulats, et la nature de l'ajout et le pourcentage nécessaire pour avoir une bonne résistance.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail était d'évaluer expérimentalement l'effet des ajouts minéraux et sur les propriétés du béton frais et durci (rhéologie, résistances mécaniques, durabilité). Dans ce contexte trois ajouts minéraux avec des pourcentages de 10, 15 et 20% de la masse du ciment ont été utilisés : un ajout hydraulique latent, un ajout pouzzolanique et un ajout inerte, à savoir, du laitier de haut fourneau granulé broyé, de la pouzzolane naturelle et du calcaire. L'introduction des ajouts minéraux dans les mélanges de béton, a été faite lors du malaxage des constituants du béton.

La formulation des bétons a été faite par la méthode : la méthode de SCRAMTAÏEV, l'analyse des résultats expérimentaux a permis de conclure que :

L'introduction des ajouts minéraux dans le béton :

- ❖ Provoque une certaine amélioration dans la consistance (l'affaissement au cône d'Abrams) pour un dosage donné d'ajout minéral. Cela dépend du type, finesse et quantité d'ajout, la méthode et les paramètres de formulation.
- ❖ Ou la diminution directe de l'affaissement, donnant un béton de consistance plus ferme. Cela est attribué à la forte proportion d'éléments fins (ciment + ajout) dans les mélanges de béton, qui provoque un manque en eau pour la lubrification.
- ❖ Permet l'obtention de résistances supérieures à celles des bétons avec ciment seul, et même supérieures à celles des bétons avec de plus grands dosages en ciment, et cela avec un coût relativement moindre.
- ❖ Bien que la résistance à la compression au jeune âge de béton est réduite par l'incorporation de la pouzzolane naturelle, elle s'améliore en fonction du temps et atteint son optimum à long terme (28j au delà). Ceci peut être attribué à l'activité pouzzolanique qui est lente au jeune âge et se développe à long terme.
- ❖ Pour cela on ajoute des ajouts, qui peuvent apporter une meilleure réponse au problème de la fragilité du béton et minimiser le risque de fissuration, ce qui permet d'améliorer sa durabilité et sa résistance. Il existe actuellement une grande variété d'ajout. Parmi les plus utilisées, la pouzzolane, laitier, calcaire ...etc.

Perspectives et recommandations :

Pour limiter les paramètres variables dans les formulations de bétons avec ajouts minéraux et permettre de mettre plus clairement en évidence l'effet de leur incorporation sur

Conclusion Générale

les propriétés rhéologiques et mécaniques, et leur incidence sur le côté économique, il sera intéressant de choisir le remplacement par des ajouts minéraux :

- Soit du ciment.
- Soit du sable.
- Soit du sable + gravier.

Avec des pourcentages allant de 0 à 100%, et un pas de 10.

Par la suite, la consistance du béton témoin pourra être maintenue par l'introduction d'une quantité adéquate d'adjuvant fluidifiant afin de permettre de mettre en évidence son effet sur les résistances mécaniques par rapport aux bétons avec et sans ajouts minéraux.

- ✓ Etudier un seul ajout minéral avec des finesses variables, ou plusieurs ajouts avec une même finesse, ou une combinaison des deux.
- ✓ Etudier les propriétés de ces bétons pour différentes températures de mûrissement.
- ✓ Etudier les propriétés de ces bétons face aux agressions chimiques.
- ✓ Etudier des matériaux disponibles localement, susceptibles d'être utilisés comme ajouts minéraux.

Références bibliographiques

- [1] **Wei CHEN** « Etude expérimentale de la perméabilité du béton sous conditions thermiques et hydriques variables » thèse de doctorat, école centrale de LILLE(France), page 47, année 2011.
- [2] **A. BRAHMA** « le béton » office des publications universitaires.
- [3] **Lott. J.-P, al, 2005** CIMBÉTON : centre d'information sur le ciment et ses applications « Ciment et béton » conception et réalisation, Am principe Paris, Edition 2005.
- [4] **Dreux. G, Festa. J** « Nouveaux guide du béton et de ces constituants », Ed. Eyrolles, 1998.
- [5] **Frahtia.S** « l'influence de la concentration des fibres sur l'ouvrabilité de béton de fibre », thèse magistère, université de m'sila, année 2010.
- [6] **DJOBO YANKWA Jean Noël** « Effet de l'incorporation d'adjuvants minéraux sur les propriétés de ciment géopolymères à base de scories volcaniques » mémoire de Master en chimie, université de yaoundé I, année 2013.
- [7] **BELHOCINE AIDA et NAGOUDI NADJAT** «Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux» mémoire de master en génie civil, université kasdi merbah, ouargla, année 2014.
- [8] **SAADANI Sabrina** «Comportement des bétons à base granulats recycles» mémoire Magister en Génie Civil de Université mentouri constantine.
- [9] **Bentaleb Faiza et Athamnia Nawel** «caractérisation de gravier utilise de la région de m'sila» mémoire de l'ingénieur en génie civil, université de m'sila, année 2007.
- [10] **Plinskin L. (1993)**"La fabrication du ciment", Edition eyrolles, Paris, p 217.
- [11] **Noui.A**, cour de matériaux de construction 3^{ème} année génie civil, université de Bordj Bou Arreridj année 2012.
- [12] **Aitcin.P.C et Baron.J** « les adjuvants normalisés pour bétons, les bétons bases et données pour leur formulation» ed.eyrolles, 1996.
- [13] **Aitcin.P.C et Neville.A.M e t Acker.P,sep** « integrated .view of shrinkage deformation» concrete international, vol. 19, no 9, p. 35-41, 1997.
- [14] **Alexaderson.J** « strength losses in heat cured concrete swedish cement and concrete» research institute at the royal institute of technology stockholm, 1972.
- [15] **El Barrak M** « Contribution à l'étude de l'aptitude a l'écoulement des bétons autoplacants à l'état frais », Thèse de doctorat, Université Toulouse III – Paul Sabatier, France. 2005.
- [16] « Eau de gâchage pour béton.», P 18-303, 1999.

Références bibliographiques

- [17] **GEORGES DREUX et JEAN FESTA** « Nouveau guide du béton et de ses constituants » Huitième édition, Eyrolles, France, 1998.
- [18] **BOLOMEY** « Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC) », N°20, Juillet Août 1966.
- [19] **Messoudene.B** : cours (durabilité du béton), université de Bordj Bou Arreridj année 2014.
- [20] **Anriamanatsilvo.N.R** «comportement des matériaux cimentaires dans un coffrage : expérimentation, modélisation et simulation de la poussée et processus de maturation », thèse de doctorat, l'université de bretagne sud, à 2003.
- [21] **Chanvillard.G** « connaissances générale sur le matériau béton» Ed, Aléas 1999.
- [22] **Jean Michel Torrenti** «du béton frais au béton durci», sino data, éléments de comportement par directeur scientifique de l'école française du béton (EFB).
- [23] **cour en ligne (PDF)** «www.ajoutes minéraux.com».
- [24] **Benyahia Amar, Khelafi Hamid, Mouli Mohamed** : 1st international conference on pouzzolanic construction materials, (icpcm2014), «La Pouzzolane Naturelle de Beni-Saf au Service des Futurs Bétons Algériens» oran, November 24th to 25th, 2014
- [25] **zaitri rebih, guettaf y, djoual b** : 1st international conference on pouzzolanic construction materials, «effet de l'ajout calcaire sur le comportement du béton a base des granulats recycles» december 15th to 16th, 2014, Université Ammar Thélidji de Laghouat.
- [26] **BARRIOULET.M et LEGRAND.C** «L'effet de la masse des granulats dans l'écoulement du béton frais vibré ». Matériaux et construction N°20, p. 196-201, 1987.
- [27] **R.DUPAIN, R.LANCHON, J.C.SAINT ARROMAN** «Granulats, sols, ciments et bétons » Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire, Paris, 1995.
- [28] **J.M.BROCHERIEUX et P.MONACHON** «Comment se pose le problème de formulation pour une entreprise ». « Les bétons : bases et données pour leur formulation ». Association technique de l'Industrie des liants hydrauliques Troisièmes tirages, Eyrolles, France, p. 167-185,1999.
- [29] **P.C.AITCIN, J.BARON et J.P.BOURNAZEL** «Viser une résistance à la compression ». « Les bétons : bases et données pour leur formulation ». Association technique de l'Industrie des liants hydrauliques, troisième tirage, Eyrolles, France, p. 277-305,1999.
- [30] **BARON J, OLLIVIER J.P** «Les bétons bases et données pour leur formulation» Edition Eyrolles, Paris, p 522,1996.
- [31] **NEVILLE A.M** «Propriétés des bétons», éd. CRIB., Paris, Eyrolles, p806, 2000.
- [32] **J.-P. Lott, et al, 2005 chapitre 2** «la norme béton NF EN 206-1».

Références bibliographiques

- [33] PDF. Dr. Ir. P. Boeraeve « Composition du béton » 17/01/2010.
- [34] J.-P. Lott, et al, 2005 CIMENTÉTON : centre d'information sur le ciment et ses applications « Ciment et béton » conception et réalisation– Edition 2005, Am principe Paris.
- [35] DE LARRARD F« Structures granulaires et formulation des bétons», traduit de l'anglais par LECOMTE A., Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, Paris, p 414, 2000.
- [36] Fiche technique des ajouts minéraux actifs : (pouzzolane, laitier, calcaire), de la cimenterie d'AIN KHEBIRA, wilaya de SETIF, mars 2015.
- [37] Rapport Géologique Des Carriers : carrière de (BEL-LAIMOR, EL-EUCH, EL-M'HIR).
- [38] R.DUPAIN, R.LANCHON, livre «granulats, sols, ciment et béton».
- [39] MAAREF.H et MAHBOUS.R «L'effet des modes de cure sur la réponse mécanique d'un béton à base d'agréats recyclés» mémoire de l'ingénieur, Université Mohamed BOUDIAF M'SILA, année 2007.
- [40] AYADI.B et HAMMACHE.Y « Effet des fillers de calcaire sur le retrait d'un béton à base d'agréats recyclés adjuvantes » Mémoire de fin d'étude à Centre Universitaire de Bordj Bou Arreridj, année 2012.
- [41] HAMMOUCHE.Y et LAALAOUI.A «Etude du comportement d'un béton en fibres Polypropylène aux moyens des essais non destructifs» mémoire de fin d'étude à Centre Universitaire de Bordj Bou Arreridj, 2012.
- [42] Taibi yaakoub et Touati billel «Effet de granulats sur les propriétés de béton cas région de BORDJ BOU ARRERIDJ» mémoire de fin d'étude master génie civil Université de Bordj Bou Arreridj, année 2014.
- [43] Belgaraa.L (cour : matériaux de construction), Centre Universitaire de Bordj Bou Arreridj, 2012 , 3ème licence, département de génie civil, année 2012.
- [44] DEGHEFEL MOUSSA «Application de l'essai de la dureté pour la caractérisation du béton» magistère, dirige par BEDDAR MILOUD, M'sila, p 36,46, 2009/2010.
- [45] TP de mécanique des sols (MDS) de troisième génie civil par M^{me} : Rouabah.S, université de Bordj Bou Arreridj, novembre année 2012.
- [46] BRETTE.A «Fascicule de cours réalisé pour les classes de techniciens supérieurs travaux publique» sino dato, sino loco.
- [47] Fiche technique de ciment résistant aux sulfates (CPA CEM I 42.5 ES) Conformément a la norme NA 443 édition 2002 (CRS), « GICA », la cimenterie de AIN EL KEBIRA, SETIF, février 2015.

Références bibliographiques

- [48] **TP de liant minéraux** : première année master génie civil par MR : **BENNAICHI EL**, université de Bordj Bou Arreridj, octobre année 2013.
- [49] **Belguendouze.A et Badache.N** «Etude aux moyens des essais non destructifs pour la caractérisation physique et mécanique d'un béton» mémoire de fin d'étude à Université de Bordj Bou Arreridj, année 2013.
- [50] **R.DAUPAIN, J.-C. Saint-Arroman** «Granulats, sols, ciments et bétons» édition CASTEILLA-25, rue Monge-75005 PARIS, 4ème édition actualisée, février 2009, p 156-167.
- [51] **FESTA .J –DREUX. G** «Nouveau guide des bétons» livre, Huitième édition 1998, Troisième tirage, 2007.
- [52] **A.KOMMAR** «matériau et élément de construction» édition Eyrolles, Moscou 1978.
- [53] **Georges Dreux** « nouveau guide de béton», huitième édition1998, troisième tirage, édition Eyrolles paris, P : 123, 2007.

Faculté : Département de génie civil faculté des sciences et de technologies.

Université de Bordj Bou Arreridj.

Préparé par : CHENNOUF Azeddine

Promoteur : Mr. LOUMACHI Lazhar

Titre: Effet des ajouts minéraux actifs sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons à base des granulats de la région de Bordj Bou Arreridj.

NATURE : Master en génie civil, option: matériaux.

Résumé :

Ce travail a pour but d'évaluer expérimentalement l'effet des ajouts minéraux (calcaire, pouzzolane et laitier) sur les propriétés du béton frais et durci, ce béton est confectionné à partir du gravier des trois régions de la wilaya de Bordj Bou Arreridj. Les bétons étudiés sont formulés par : la méthode de SCRAMTAIEV Ils sont confectionnés avec des teneurs constantes en ciment. Les pourcentages d'ajouts minéraux sont de 10, 15 et 20 % par masse du ciment, et leur introduction dans le béton se fait lors du malaxage.

ملخص :

يهدف هذا العمل لتقييم التجربة تأثير المضافات المعدنية (الحجر الجيري، البوزلان، والخبث) على خواص الخرسانة الطازجة و المتصلدة، هذه الخرسانة تحتوي على الحصى الموجودة في ثلاث مناطق على مستوى ولاية برج بوعرييج، يتم وضعها في الخرسانة التي درسها طريقة SCRAMTAIEV وهي مصنوعة مع كميات ثابتة من الإسمنت. نسبة المضافات المعدنية هي 10 و 15 و 20٪ وزنا من الإسمنت، والذي يتم عرضه من داخل الخرسانة يحدث أثناء الخلط.

PROMOTION : juin 2015.
