



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université d'El-Oued

Faculté de Technologie

Département d'Hydraulique et de Génie Civil

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme du Master 2 en Génie Civil

Option: *Matériaux en génie civil*

THEME : ETUDE COMPARATIVE DE LA RESISTANCE ET DE
LA DURABILITE DES DIFFERENTS BETONS A BASE DE SABLE
MODIFIE

Dirigé par : DJDID Tarek

Présenté par : GUESSOUM Younes

TAIBI Said

Promotion : Juin 2019

REMERCIEMENTS

Nous tiens à exprimer toute nos reconnaissances à notre encadreur Monsieur **Tarak DJDID**. Je le remercie de nous avoir encadrés, orientés, aidés et conseillés.

Nous adressons nos sincères remerciements à le directeur du laboratoire LEC qui avoir ouvrir les portes de leur laboratoire pour effectuer tous les essais ainsi tous le personnel du laboratoire LEC.

Nous remercions vivement Monsieur **FAROUK RAHMANI** technicien de laboratoire LEC, par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et a accepté à nous rencontrer et répondre à nos questions durant nos recherches.

Nous remercions aussi Monsieur **Manishkumar Patel** sénior QA/QC engineer de la société indienne DODSAL, pour tous les supports, aides et conseils qui nous avons donnés pour réaliser ce travail.

Nous tiens à exprimer nos sincères remerciements aux membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant à la participation de l'évaluation de ce travail et de bien vouloir le juger.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous qui nous ont toujours soutenues et Encouragées au cours de la réalisation de ce mémoire.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Younes et Said

ملخص

تعاني العديد من المناطق في الجزائر من نقص رمال البناء مما توجب استيرادها من مناطق أخرى وفرض المزيد من التكلفة، لذلك استدعت الحاجة للبحث عن بدائل للرمال الطبيعية دون التضحية بأهمية و دور الخرسانة / الملاط . من خلال هذا العمل ، قمنا بدراسة تأثير الرمال المكسرة (M-sand) في الخرسانة عن طريق استبدال الرمال الطبيعية ذات النسب المئوية التالية (0٪ ، 40٪ ، 45٪ ، 50٪ ، 55٪ ، 60٪ و 100 ٪) وتطوير الخرسانة مع المقاومة المستهدفة من 45 Mpa. لقد أجرينا دراسات لاستقصاء تأثير بدائل الرمل الطبيعي بالرمل المكسر على الخواص الميكانيكية ومتانة الخرسانة ، مثل الضغط ، قوة الشد ، الانثناء ، الامتصاص ونفاذية الخرسانة عمرها 7 ، 28 و 60 يوما. تظهر النتيجة أن هناك زيادة في قوة الضغط لما استبدلت الرمال الطبيعية بالرمال المكسورة من 0 إلى 100٪ ، مع قيم قصوى في الخلطات ذات النسب 45٪ و 50٪. وكانت الزيادة في المقاومة حوالي 15 ٪ مقارنة مع خرسانة الرمال الطبيعية. لقد كشفت الدراسات أن استخدام الرمل المكسر في الخرسانة للبناء يعد اقتراحا مقبولا بالنسبة لخرسانة الصف (45/35) مما يقلل أيضا من استغلال الرمال الطبيعية.

كلمات البحث : الاسمنت ، الخرسانة ، الرمال الطبيعية ، رمال الوديان ، رمال المحاجر ، المقاومة الميكانيكية ، الديمومة .

Résumé

Plusieurs régions en Algérie souffrent du manque de sable de construction, ce qui rend nécessaire d'importer leur besoin de sable d'autres régions, imposant ainsi plus de coût et un retard dans les délais d'achèvement de la construction.

Donc il y a la nécessité de rechercher des solutions de remplacement du sable naturel sans sacrifier les performances du béton / mortier. Dans ce travail, nous avons étudié expérimentalement l'effet du sable concassé (M-sable) dans le béton en remplaçant le sable naturel avec les pourcentages (0%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60% et 100%) par du sable concassé tout en développant un béton avec une résistance ciblée de 45 MPa. Les études sont menées pour étudier l'effet de la substitution du sable naturel par du sable concassé et ses effets sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton, telles que la compression, résistances à la traction et à la flexion, absorption et perméabilité à l'âge de 7, 28 et 60 jours. Les résultats montrent qu'il existe une augmentation de la résistance à la compression durant le remplacement de 0 à 100% de sable naturel par le sable concassé, avec des valeurs maximum d'augmentation de la résistance aux pourcentages de 45% et 50%. L'augmentation de la résistance était de l'ordre de 15% pour le béton avec sable naturel. Les études ont révélé que pour l'utilisation du sable concassé dans le béton pour la construction, la proposition est acceptable pour le béton de grade (35/45) qui réduit également l'exploitation du sable naturel.

Mots-clés: *Ciment, Béton, Sable naturel, Sable de rivière, Sable concassé, Résistance mécanique, Durabilité.*

Abstract

Several regions in Algeria suffer from lack of construction sands, which leads to their import from other regions, thus imposing more cost and delay in construction completion time.

Therefore it is necessary to look for alternatives to natural sand without sacrificing concrete / mortar performance. In this work, we study experimentally the effect of crushed sand (M-sand) in concrete by replacing natural sand at percentages of (0%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60% and 100%) while developing a concrete with a targeted resistance of 45 MPa.

The studies are conducted to investigate the effect of natural sand when replaced by crushed sand on the mechanical properties and durability of concrete, such as compression, tensile and flexural strength, absorbency and permeability of concrete at age of 7, 28 and 60 days. The results show that there is an increase in compressive strength with the replacement of 0 to 100% of natural sand by crushed sand, with maximum values of increases in strength with the percentage of 45% and 50%. The increase in the strength was about 15% compared to concrete with natural sand. The studies have revealed that for the use of crushed sand in concrete for construction, the proposal is acceptable for grade concrete (35/45) which also reduces the exploitation of natural sand.

Keywords: Cement, Concrete, Naturel sand, River sand, Crushed sand Mechanical resistance, Durability.

SOMMAIRE

Contents

Remerciements.....	i
ملخص.....	ii
Résumé.....	iii
Abstract.....	iv
Liste des figures.....	ix
Liste des tableaux.....	xiii
➤ INTRODUCTION GENERALE	1
➤ Contexte général	1
CHAPITRE I ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	3
I.1 Historique de Développement de béton	3
I.2 Béton - le matériau	3
I.3 Le sable modifié de carrière	4
I.3.1 Pourquoi le sable fabriqué est-il utilisé?	4
I.3.2 Avantages du sable manufacturé (M-Sand)	5
I.3.3 Utilisation du sable de concassé dans le béton	6
I.4 Les bétons ordinaires et leurs constituants	6
I.4.1 Les Granulats[2].....	6
I.4.1.a Classes Granulaires	7
I.4.1.a.a Classification des granulats selon la grosseur	7
I.4.1.a.b Classification des granulats selon la provenance	8
I.4.2 Ciment (la norme EN 197-1)	11
I.4.3 Les adjuvants	13
I.4.4 L'eau	13
I.5 Le rapport E/C.....	14
I.6 RAPPORT GRAVIER / SABLE (G/S)	14
I.7 DURABILITÉ.....	16
I.7.1 Phénomène de carbonatation	16
I.7.2 Phénomène de pénétration des chlorures	17
I.7.3 Phénomène d'alcali-réaction	18
I.7.4 Phénomène de réaction sulfatique interne	18
I.7.5 Phénomène de réaction sulfatique externe (ESA) :	19

CHAPITRE II	ÉTUDE EXPERIMENTALE	21
II.1	Introduction :.....	21
II.2	Caractéristiques des matériaux :.....	21
II.2.1	Le sable :	21
II.2.2	Le Gravier :.....	38
II.2.3	Eau de gâchage (la norme NF EN 1008):	47
II.2.4	Ciment :	48
II.2.5	Adjuvants :.....	49
II.3	Formulation de béton:.....	49
II.3.1	Préambule:	49
II.3.2	Methode De Dreux – Gorisse	49
II.4	Mélange des bétons et préparation des échantillons.....	62
II.4.1	Lavage des agrégats.....	62
II.4.2	Mélange de béton et prélèvement des éprouvettes	62
II.5	Conservation des éprouvettes	64
II.6	Essais sur béton frais:	65
II.6.1	Température de béton	65
II.6.2	Essai d'affaissement au cône d'Abrams (la norme NF P18-451)	66
II.6.3	La masse volumique du béton frais (la norme EN 12350-6).....	67
II.7	Essais sur béton durci	68
II.7.1	Résistance à flexion (la norme NF P. 18-407).....	68
II.7.2	Résistance à la compression (la norme NF P. 18-406).....	69
II.7.3	Traction par fendage (essai brésilien)(la norme NF P 18-434)	70
II.7.4	Mesure de l'absorption capillaire (la norme NF EN 480-5)	71
II.7.5	Essai d'auscultation dynamique (Ultra Son)(la norme NF P 18-418)	72
II.7.6	Essai de carbonatation naturelle	73
CHAPITRE III	RESULTATS ET DISCUSSIONS	75
III.1	Introduction.....	75
III.2	Essai sur béton frais	75
III.2.1	Température de béton	75
III.2.2	Essai d'affaissement au cône d'Abrams (la norme NF P18-451)	75
III.2.3	La masse volumique du béton frais (la norme EN 12350-6)	76
III.3	Essai sur béton durci	77
III.3.1	-Résistance à la flexion (la norme NF P. 18-407).....	77
III.3.2	Résistance à la compression (la norme NF P. 18-406)	79
III.3.3	Traction par fendage (essai brésilien)(la norme NF P 18-434)	82
III.3.4	Mesure de l'absorption capillaire (la norme NF EN 480-5)	85
III.3.5	Essai d'auscultation dynamique (Ultra Son)(la norme NF P 18-418)	89
III.3.6	Essai de carbonatation naturelle:.....	91

III.4	Conclusion	91
IV.	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE	92
➤	BIBLIOGRAPHIE.....	93
➤	ANNEXES	I

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES	Page
Figure I.1 : Production de sable manufacturé	5
Figure I.2 : Différentes classes granulaires avec leurs caractéristiques dimensionnelles.	7
Figure I.3 : Les différentes dimensions des granulats.	8
Figure I.4 : Granulats roulés	9
Figure I.5 : Concasseur des agrégats	9
Figure I.6 : Fractions des gravillons	9
Figure I.7 : Granulats artificiels	10
Figure I.8 : Granulats recyclés	10
Figure I.9 : Variation de la résistance à la compression selon le rapport G/S	15
Figure I.10 : Le principe de la corrosion des armatures	17
Figure I.11 : corrosion des armatures.	18
Figure I.12 : Mécanisme proposé d'attaque du sulfate de magnésium	19
Figure II.1 : Substitution de sable naturel avec du sable concassé.	21
Figure II.2 : Tamiseur électrique.	23
Figure II.3 : Courbe granulométrique du sable naturel de construction	24
Figure II.4 : Courbe granulométrique du sable concassé de carrière	25
Figure II.5 : Courbe granulométrique du sable substitué (60% Sable Naturel et 40% Sable concassé).	26
Figure II.6 : Courbe granulométrique du sable substitué (55% Sable Naturel et 45% Sable concassé).	27
Figure II.7 : Courbe granulométrique du sable substitué (50% Sable Naturel et 50% Sable concassé).	28
Figure II.8: Courbe granulométrique du sable substitué (45% Sable Naturel et 55% Sable concassé).	29
Figure II.9 : Courbe granulométrique du sable substitué (40% Sable Naturel et 60%	30

Sable concassé).	
Figure (II.10) Schéma de principe de l'équivalent de sable	31
Figure (II.11) : Dispositif d'essai d'équivalent de sable	32
Figure II.12 : Essai de la détermination de la masse volumique absolue.	34
Figure II.13 : Essai de détermination de la masse volumique apparente.	34
Figure II.14 : Essai bleu de méthylène	36
Figure II.15 : Gravillons utilisés	38
Figure II.16 : Courbe granulométrique du gravier 8/15.	39
Figure II.17 : Courbe granulométrique du gravier 3/8.	40
Figure II.18 : L'appareil de Los Angeles.	42
Figure II.19 : Etapes de l'essai de Los Angeles.	42
Figure II.20 : Forme granulaire	43
Figure II.21 : Tamis pour essai d'aplatissement.	44
Figure II.22 : Sac de 50Kg de ciment CRS utilisée.	48
Figure II.23 : Courbe granulaire 100% sable naturel	54
Figure II.24 : Courbe granulaire 40% sable concassé	54
Figure II.25 : courbe granulaire 45% sable concassé	55
Figure II.26 : courbe granulaire 50 % sable concassé	55
Figure II.27 : courbe granulaire 55% sable concassé	56
Figure II.28 : courbe granulaire 60% sable concassé	56
Figure II.29 : courbe granulaire 100% sable concassé	57
Figure II.30 : Lavage des agrégats.	62
Figure II.31 : Malaxage du béton	62
Figure II.32 : Prélèvement des éprouvettes de béton	63
Figure II.33 : Milieu agressif (tranché de drainage)	64
Figure II.34 : Conservation des éprouvettes dans le milieu non agressive	65

Figure II.35 : Mesure de température de béton	65
Figure II.36 : Essai d'affaissement au cône d'Abrams	66
Figure II.37 : Mesure de l'affaissement au mélange M0 avec $E/C=0.35$.	66
Figure II.38 : Mesure de l'affaissement au mélange M0 avec $E/C=0.42$	67
Figure II.39 : Détermination de la masse volumique du béton état frais.	67
Figure II.40 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.	68
Figure II.41 : L'essai de résistance à la flexion.	69
Figure II.42 : L'essai de résistance à la compression.	69
Figure II.43 : Dispositif de mise en charge de l'éprouvette cylindrique pour l'essai de fendage	70
Figure II.44 : écrasements des éprouvettes cylindriques à l'essai de fendage	70
Figure II.45: Principe de l'essai d'absorption capillaire	71
Figure II.46 : L'essai d'absorption capillaire.	71
Figure II.47 : Principe d'utilisation de l'appareil d'auscultation dynamique	72
Figure II.48 : L'essai d'auscultation dynamique.	73
Figure II.49 : L'essai de carbonatation.	74
Figure III.1 : Valeurs des affaissements des mélanges des bétons	76
Figure III.2 : Masses volumiques des mélanges des bétons états frais	76
Figure III.3 : Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge de béton.	78
Figure III.4 : Courbes de la résistance à la traction par flexion des Mélanges (milieu non agressif)	78
Figure III.5 : Courbes de la résistance à la traction par flexion des Mélanges (milieu agressif)	79
Figure III.6 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge de béton	80
Figure III.7 : Courbes de la résistance à la compression des Mélanges (milieu non agressif)	81
Figure III.8 : Courbes de la résistance à la compression des Mélanges (milieu agressif)	81

Figure III.9 : Evolution de la résistance à la traction par fendage en fonction de l'âge de béton.	83
Figure III.10 : Courbes de la résistance à la traction par fendage des Mélanges (milieu non agressif).	83
Figure III.11 : Courbes de la résistance à la traction par fendage des Mélanges (milieu agressif).	84
Figure III.12 : Courbes de l'absorption d'eau par capillarité des mélanges à 7 jours (milieu non agressif)	85
Figure III.13 : Courbes de l'absorption d'eau par capillarité des mélanges à 7 jours (milieu agressif)	86
Figure III.14 : Courbes de l'absorption d'eau par capillarité des mélanges à 28 jours (milieu agressif)	87
Figure III.15 : Courbes de l'absorption d'eau par capillarité des mélanges à 28 jours (milieu agressif)	87
Figure III.16 : Courbes de l'absorption d'eau par capillarité des mélanges à 60 jours (milieu non agressif)	88
Figure III.17 : Courbes de l'absorption d'eau par capillarité des mélanges à 60 jours (milieu agressif)	89
Figure III.18 : Evolution de la vitesse de propagation de son en fonction de l'âge de béton.	90

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX	Page
Tableau I.1 : Désignation des différents ciments en fonction de leur composition	12
Tableau I.2 : Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe	13
Tableau I.3 : Principales qualités des bétons en fonction de leur (G/S) et leur granularité.	15
Tableau II.1: Analyse granulométrique du sable naturel de construction	24
Tableau II.2: Analyse granulométrique du sable concassé de carrière	25
Tableau II.3 : Analyse granulométrique du sable substitué (60% Sable Naturel et 40% Sable concassé).	26
Tableau II.4: Analyse granulométrique du sable substitué (55% Sable Naturel et 45% Sable concassé).	27
Tableau II.5 : Analyse granulométrique du sable substitué (50% Sable Naturel et 50% Sable concassé).	28
Tableau II.6 : Analyse granulométrique du sable substitué (45% Sable Naturel et 55% Sable concassé).	29
Tableau II.7: Analyse granulométrique du sable substitué (40% Sable Naturel et 60% Sable concassé).	30
Tableau II.8 : Les valeurs d'équivalent de sable indiquent la nature et qualité du sable.	32
Tableau II.9 : Résultat d'essai équivalent de sable.	33
Tableau II.10 : Masses volumiques du sable.	34
Tableau II.11 : Valeur de bleu de méthylène.	37
Tableau II.12 : Analyse chimique de sable.	37
Tableau II.13 : Analyse granulométrique du gravier 8/15.	39
Tableau II.14 : Analyse granulométrique du gravier 3/8.	40
Tableau II.15: Masses volumiques du gravier	41
Tableau II.16: Propreté du gravillon.	42
Tableau II.17: Coefficient d'aplatissement du gravier 8/15.	45
Tableau II.18: Coefficient d'aplatissement du gravier 3/8	46
Tableau II.19: Analyse chimique des gravillons.	47

Tableau II.20:Examens préliminaire d'eau de gâchage	47
Tableau II.21:Analyse chimique d'eau de gâchage.	48
Tableau II.22: Donnés de base pour formulation du béton.	49
Tableau II.23 : Dosage en ciment et en eau	50
Tableau II.24: Valeurs du terme correcteur et de ses compléments k.	51
Tableau II.25: Valeurs des coefficients de compacité.	52
Tableau II.26 : Valeurs du point de brisure de la courbe de référence	53
Figure II.27 : Courbe granulaire 40% sable concassé	53
Tableau II.28: Récapitulatif caractéristiques des composantes de mélange avec 100% sable naturel.	58
Tableau II.29 : Composition du béton pour mélange avec 100% sable naturel (M0)	59
Tableau II.30 : Composition du béton pour mélange avec 40% sable concassé (M1)	59
Tableau II.31 : Composition du béton pour mélange avec 45% sable concassé (M2)	60
Tableau II.32 : Composition du béton pour mélange avec 50% sable concassé (M3)	60
Tableau II.33 : Composition du béton pour mélange avec 55% sable concassé (M4)	60
Tableau II.34 : Composition du béton pour mélange avec 60% sable concassé (M5)	61
Tableau II.35 : Composition du béton pour mélange avec 100% sable concassé (M6)	61
Tableau II.36 : Analyse chimique du milieu agressive.	64
Tableau II.37 : Classements qualitatifs du béton selon la vitesse de propagation.	73
Tableau III.1 : Mesure des températures des mélanges des bétons.	75
Tableau III.2 : Valeurs des affaissements des mélanges des bétons	75
Tableau III.3 : Masses volumiques des mélanges des bétons états frais.	76
Tableau III.4 : Résistance à la traction par flexion des mélanges du béton	77
Tableau III.5 : Résistance à la compression des mélanges du béton.	80
Tableau III.6 : Résistance à la traction par fendage des mélanges du béton	82
Tableau III.7 : Evaluation de la capillarité des mélanges du béton à 7 jours	85
Tableau III.8 : Evaluation de la capillarité des mélanges du béton à 28 jours.	86
Tableau III.9 : Evaluation de la capillarité des mélanges du béton à 60 jours.	88
Tableau III.10 :Valeurs de la vitesse de propagation de son sur les mélanges de béton	90

➤ INTRODUCTION GENERALE

➤ Contexte général

Le secteur de la construction est l'un des plus gros consommateurs des ressources naturelles et de l'énergie dans les diverses industries. Il est maintenant devenu de plus en plus demandé dans l'industrie de la construction qui demande de développer des concepts durables pouvant améliorer les aspects économique, environnementale et la santé des communautés, et de bénéficier par les avantages des ressources et matériaux, de transports et le renforcement des capacités locales de l'économie et des communautés. Dans le monde, le béton est un des principaux matériaux de construction utilisés dans l'industrie de la construction. Environ 35 à 40% du volume de sable est utilisé dans la fabrication de béton. Le sable naturel utilisé dans le béton est l'une des ressources naturelles les moins chers. Cependant, l'exploitation excessive du sable naturel a conduit à l'épuisement des lits naturels dans les pays en voie de développement, plusieurs régions en Algérie sont confrontées à une pénurie de sable naturel de bonne qualité. Il est donc nécessaire de rechercher des alternatives au sable naturel sans sacrifier la durabilité du béton / mortier. De nombreuses alternatives au sable naturel sont considérées par les chercheurs. Parmi les substituts au sable naturel on trouve le sable manufacturé (M- Sable), le sable de laitier de cuivre, la poussière de carrière traitée, le sable de dune, Offshore Sand, les cendres volantes, les déchets de démolition de construction, les déchets de scieries d'aluminium, etc. Les environnementalistes lance l'alarme quant au danger de l'utilisation excessif du sable de rivière. Par conséquent, le sable naturel est devenu très coûteux et la disponibilité est devenue très rare dans plusieurs régions.

Suite à la revue littérature, les chercheurs se sont concentré sur l'utilisation de sable Concassé comme alternative au sable naturel pour trouver le pourcentage optimal de remplacement en vue d'obtenir la résistance maximale à la compression, la traction maximale et la résistance à la flexion avec du ciment Portland ordinaire et des matériaux de ciment supplémentaires comme la fumée de silice,, etc.. Pour résoudre le problème une alternative au sable naturel est plus essentielle dans la situation actuelle. Le sable concassé, produit par le concassage des roches, représente l'option la plus appropriée et économiquement viable. Bien que le M-sable soit utilisé depuis un certain temps, il n'est utilisé que dans les bétons de basse performance. L'utilisation du M-sable dans du béton à haute performance (grade 35/45) et la comparaison des paramètres de résistance du béton avec ceux du sable naturel sera utile pour comprendre l'utilisation du M-sable dans du béton haute performance à haute résistance. Dans cette étude, nous essayons d'étudier les caractéristiques de haute résistance du béton (grade 35/45) en utilisant du M-sable comme agrégat fin dans le béton avec remplacement partiel ou total. L'objectif du présent travail est d'étudier l'effet du pourcentage de remplacement du sable naturel par du sable manufacturé, à (0%, 40%, 45%, 50%, 55%,60% et 100%). Cette étude a été réalisée sur du béton de qualité (grade 35/45) avec un rapport ciment-eau (E/C) de 0,42.

Dans ce contexte notre travail a pour objectif la valorisation de sable concassé. L'étude s'est portée sur l'étude de propriétés mécaniques d'un béton à base de sable concassé.

Ce mémoire comporte une introduction générale plus trois chapitres, sachant que le premier est consacré à une généralité sur le béton ordinaire, leur constituant et les problèmes qui affectent la durabilité du béton. Dans le deuxième chapitre nous avons étudié les méthodes d'analyse et de caractérisation des différents matériaux utilisés dans la confection des différents mélanges du béton étudiés, en illustrant les résultats et les critiques portés sur chaque constituant. Et dans le dernier chapitre nous avons exposé les différents résultats expérimentaux relatifs aux essais effectués sur les éprouvettes de béton confectionnées conformément aux méthodes opératoires décrites, suivi d'une analyse et discussion sur les résultats. Puis en fin, nous avons clôturé notre étude par une conclusion générale qui englobe les résultats obtenus dans cette étude et conclut les intérêts pratiques. Des perspectives et recommandations sont données pour une contribution à la valorisation des sables concassé.

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Historique de Développement de béton

Le développement du béton en tant que matériau de construction remonte à plusieurs milliers d'années, à l'époque des anciens Égyptiens, des Grecs et des Romains. Ces premières compositions de béton étaient à base de chaux, bien que les Romains soient connus pour leur développement du ciment pouzzolanique et du béton léger à base de pierre ponce. Le toit en forme de dôme du panthéon témoigne de la durabilité de ce matériau. Mis à part un bref réveil à l'époque normande, des structures telles que l'abbaye de Reading et le peu de développement qui a suivi jusqu'au XVIII^e siècle. En 1756, Smeaton construisit le phare d'Eddystone, qui se dresse encore aujourd'hui sur Plymouth Hoe. En 1824, Aspdin déposa son brevet pour un ciment supérieur ressemblant à la pierre de Portland, utilisé pour la fabrication du béton dans la construction du tunnel sous la Tamise. Le pont Axmouth, dans le Devon, est un pont à arches entièrement en béton à trois travées construit en 1887 et qui continue de générer du trafic à ce jour.

Le crédit pour l'introduction de l'acier en tant que renforcement est attribué à Lambot en 1855 pour les bateaux en fer forgé, à Monier en 1867 et à Hennebique en 1897 qui construisit le premier bâtiment à ossature en béton armé en Grande-Bretagne à Weaver's Mill, Swansea. Il est intéressant de noter que l'un des bateaux de Lambot était toujours à flot 100 ans plus tard et serait en très bon état malgré l'environnement marin. Cependant, on ne peut pas en dire autant du premier pont renforcé de Hennebique en Écosse, qui aurait été touché en 1932 (fort effondrement dû à un environnement hostile). Néanmoins, les réparations de la gunite ont prolongé sa vie jusqu'à nos jours.

Les progrès notables réalisés au cours de ce siècle ont été l'introduction du béton précontraint par Freyssinet dans les années 1940, l'utilisation intensive du béton armé pendant la Seconde Guerre mondiale, y compris les célèbres ports de Mulberry, la rapide expansion du bâtiment en béton d'après-guerre provoquée par une pénurie d'acier, le boom de la construction d'autoroutes dans les années 1960 avec des chaussées et des ponts en béton et, plus récemment, la contribution du béton structural aux très grandes structures offshore. Bien que la grande majorité des structures en béton aient fonctionné de manière satisfaisante pendant de nombreuses années, de tels progrès n'ont pas été accomplis sans problèmes. Celles-ci vont structurellement de la défaillance des tours de refroidissement de la centrale de Ferrybridge aux effondrements provoqués par le vent jusqu'à l'effondrement progressif provoqué par l'explosion gazeuse de la tour de Ranan Point dans l'est de Londres dans les années 1960. Cependant, l'attention porte aujourd'hui principalement sur les atteintes à l'environnement, qui réduit considérablement la durée de vie de nombreuses structures en béton dans le monde, souvent en raison de la corrosion de l'acier à béton. [1]

I.2 Béton - le matériau

Le mot béton au sens de mortier est attesté dans le *Roman de Troie* (vers 1160-1170). Aujourd'hui, le béton est constitué d'une gamme de particules de granulats de pierre liées par une pâte de ciment durcie. Le béton doit être solide, exempt de changements de volume excessifs et résistant à la pénétration de l'eau. Il peut également être nécessaire de résister aux attaques chimiques ou de posséder une faible conductivité thermique. La force du béton

provient de l'hydratation du ciment par l'eau. Les constituants du ciment cristallisent progressivement pour former un gel ou une pâte qui entoure les particules d'agrégat et les lie pour produire un conglomérat. Généralement, la résistance et la perméabilité du béton sont régies par son rapport eau / ciment. Pour une résistance élevée et une faible perméabilité, le rapport eau / ciment doit être faible. Inversement, pour faciliter la mise en place et le compactage, le moyen le plus simple d'augmenter la maniabilité est d'augmenter le contenu en eau libre, bien qu'il existe aujourd'hui des plastifiants chimiques. Dans le béton normal, le type d'agrégat a peu d'effet sur la résistance mais affecte la maniabilité. Les procédures normales pour la conception des proportions de mélange impliquent de choisir un rapport d'eau pour fournir la résistance requise, puis de déterminer le contenu en eau et en additifs en tenant compte de la maniabilité et du type d'agrégat. Pour tous les bétons structuraux, il est également habituel de spécifier une teneur minimale en ciment afin de garantir un niveau d'alcalinité qui inhibe toute tendance à la corrosion de l'acier noyé. À l'inverse, des teneurs très élevées en ciment sont déconseillées, car une contraction thermique précoce entraînant une fissuration peut résulter de l'élévation de température induite par l'hydratation du ciment.

Le béton est un matériau qui, bien que relativement résistant en compression, présente une tension faible et, pour les éléments de structure soumis à une contrainte de traction, il peut être renforcé par des barres en acier. L'efficacité du béton armé en tant que matériau structural dépend des facteurs suivants:

- 1- La liaison inter faciale entre l'acier et le béton qui lui permet d'agir comme un matériau composite;
- 2- L'effet de passivation de l'environnement du béton pour empêcher la corrosion de l'acier;
- 3- Les coefficients similaires de déplacement thermique du béton et de l'acier.

Alternativement, le béton peut être pré comprimé en appliquant une charge à travers des câbles d'acier à haute résistance ancrés au béton. Sous charge pour décharger la compression et éviter des contraintes de traction importantes. [1]

I.3 Le sable modifié de carrière

Le sable manufacturé est communément connu sous plusieurs noms tels que sable concassé, sable de roche, sable vert, sable UltraMod, sable Robo, sable de Poabs, sable de Barmac, sable de Pozzolan, etc. IS 383-1970 (réaffirmé 2007) reconnaît la fabrication du sable Le sable'.

Le sable manufacturé (M-Sand) est un interactive de sable naturel pour la construction en béton. Le sable manufacturé est produit à partir de pierre dure par concassage.

Le sable concassé est de forme cubique avec des bords rectifiés, lavé et classé comme matériau de construction. La taille du sable fabriqué (M-Sand) est inférieure à 4,75 mm.[6]

I.3.1 Pourquoi le sable fabriqué est-il utilisé?

Le sable manufacturé est une alternative au sable naturel. En raison de la croissance rapide du secteur de la construction, la demande de sable a considérablement augmenté, provoquant une carence en sable de rivière adapté dans la majeure partie du monde.

En raison de l'épuisement du sable de rivière de bonne qualité pour l'utilisation de la construction, l'utilisation de sable manufacturé a été accrue. Une autre raison d'utiliser M-Sand est sa disponibilité et son coût de transport.

Étant donné que le sable manufacturé peut être concassé à partir des roches des granits durs, il peut être facilement disponible à proximité, réduisant ainsi le coût de transport depuis le lit de sable de la rivière lointaine.

Ainsi, le coût de construction peut être contrôlé en utilisant du sable manufacturé comme matériau alternatif pour la construction. L'autre avantage de l'utilisation de M-Sand est qu'il peut être dépourvu de poussière et que les tailles de sable m-sable peuvent être facilement contrôlées de manière à ce qu'elles répondent aux critères de classement requis pour la construction donnée.[6]



Figure I.1 : Production de sable manufacturé.

I.3.2 Avantages du sable manufacturé (M-Sand)

- Il est bien classé dans la proportion requise.
- Il ne contient pas de composé organique et soluble qui affecte le temps de prise et les propriétés du ciment, ainsi la résistance requise du béton peut être maintenue.
- Il ne contient pas d'impuretés telles que des revêtements d'argile, de poussière et de limon; augmente les besoins en eau, comme dans le cas du sable de rivière, qui altère la liaison entre la pâte de ciment et les agrégats. Ainsi, la qualité et la durabilité du béton ont augmenté.
- M-Sand est obtenu à partir de roche dure spécifique (granite) en utilisant la technologie de pointe internationale, ce qui permet d'obtenir la propriété requise du sable.

- M-Sand est de forme cubique et est fabriqué à l'aide d'une technologie telle que la roche frappée en acier à haute teneur en carbone, puis le procédé ROCK ON ROCK, qui est synonyme de processus naturel soumis à l'information sur le sable de rivière.
- Des machines modernes et importées sont utilisées pour produire M-Sand afin de garantir la zone de classement requise pour le sable.[6].

I.3.3 Utilisation du sable concassé dans le béton

Dans ce paragraphe on présente quelques travaux des recherches concernant l'utilisation du sable concassé dans le béton calcaires issues du sable de concassage sur les propriétés du béton :

Çelik et Marar (1996) ont utilisé les fines de roche (calcaire <75 mm) pour remplacer le sable dans le béton pour des proportions allant jusqu'à 30%, avec tous les autres ingrédients et proportions constantes. Ils ont conclu que l'affaissement et la teneur en air du béton frais a diminué quand le pourcentage de teneur en fine est augmenté. Tout en tenant compte des propriétés mécaniques, la teneur du fine jusqu'à 10% améliorent la résistance à la compression et la résistance à la flexion du béton et a observé que le béton contenant jusqu'à 5% du fine améliorait la résistance aux chocs. La teneur en fine supérieure à 15% a augmenté l'absorption d'eau du béton. La perméabilité à l'eau du béton est réduite à mesure que le pourcentage de teneur en fine a augmenté. Lorsque la teneur en poussière dépasse la valeur de 10%, la contrainte de retrait de séchage diminue.

Jackson et Brown (1996) ont déclaré que le pourcentage des fines allants de 5% à 15% peut être utilisé dans le béton.

Shukla et al. (2000) ont confirmé que le remplacement du sable par les fines des roches concassés réduit l'ouvrabilité du béton, alors que la compression la résistance et la résistance à la rupture des mélanges de béton augmentent jusqu'à 40% en remplacement du sable par de la poussière de pierre.

I.4 Les bétons ordinaires et leurs constituants

Le béton est le matériau le plus utilisé dans le monde du génie civil du fait de sa haute résistance en compression et de son faible coût. Il s'agit d'un matériau hétérogène composé, à l'échelle mésoscopique, d'une part d'un liant, le mortier de ciment, et d'autre part de granulats. Nous rappelons ci-après quelques généralités sur les différents composants des bétons, en particulier les bétons ordinaires et les bétons autoplaçants.

I.4.1 Les Granulats [2]

On appelle « granulats » les matériaux inertes, sables, graviers ou cailloux, qui entrent dans la composition des bétons. C'est l'ensemble des grains compris entre 0 et 125 mm, dont l'origine peut être naturelle, artificielle ou provenant de recyclage. Ces matériaux sont parfois encore appelés « granulats », cependant cette appellation est abandonnées depuis fort longtemps. Certains persistent à utiliser l'appellation « granulats », vieil usage tout à fait impropre; en effet le dictionnaire donne la définition suivante :

Agrégat : réunion de substances diverse formant un tout non homogène.
Les granulats sont classés en plusieurs catégories avec des spécifications particulières pour chacune d'elles.

I.4.1.a Classes Granulaires

I.4.1.a.a Classification des granulats selon la grosseur

Les granulats sont classés en fonction de leurs grosseurs déterminées par criblage sur les tamis à mailles carrées dont la dimension intérieure est exprimée en millimètres.

On appelle « tamisât » la partie des granulats qui est passée à travers le tamis et « refus » la partie qui est restée sur le tamis.

Le terme « Granulat d/D » est réservé aux granulats dont les dimensions s'étalent de d pour les petits éléments à D pour les gros éléments.

La norme XP P 18-540 précise les appellations des différentes classes granulaires avec leurs caractéristiques dimensionnelles :

Filler 0/D pour « D » < 2 mm et ayant au moins 70 % de grains passant au tamis de 0.63 mm ;

Sablon 0/D pour « D » ≤ 1 mm et avec moins 70 % de grains passant au tamis de 0.63 mm ;

Sable 0/D lorsque « D » est tel que : 1 mm < D ≤ 6.3 mm;

Graves 0/D lorsque « D » > 6.3 mm;

Gravillons d/D lorsque « d » ≥ 1 mm et « D » ≤ 125 mm ;

Ballast d/D lorsque « d » ≥ 25 mm et « D » ≤ 50 mm.

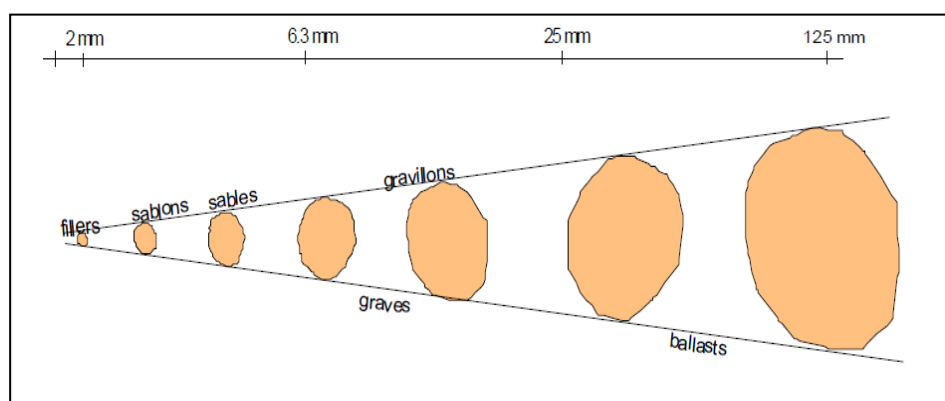


Figure I.2 : Différentes classes granulaires avec leurs caractéristiques dimensionnelles.

La classe des granulats est définie par tamisage au travers d'une série de tamis dont les mailles ont les dimensions suivantes en mm :

0.063 – 0.08 – 0.10 – **0.125** – 0.16 – 0.2 – **0.25** – 0.315 – 0.4 – **0.5** – 0.63 – 0.8 – **1** – 1.25 – 1.6 – **2** – 3.15 – **4** – 5 – 6.3 – **8** – 10 – 1.25 – 14 – **16** – 20 – 25 – **31.5** – 40 – 50 – **63** – 80 – 100 – **125**.

Les tamis dont les dimensions sont soulignées et notées en gras correspondent à la série de base préconisée par le CEN (NF EN 933-2) ; de ce fait, lors d'une étude granulométrique, ils doivent être utilisés en plus de tout autre tamis nécessaire à l'établissement de la courbe.



Figure I.3 : Les différentes dimensions des granulats. [5]

I.4.1.a.b Classification des granulats selon la provenance

A) Granulats naturels

a) Granulats roulés : ils sont les résultats de la désagrégation des roches par l'eau, le vent ou le gel. Ainsi ils se sont formés des dépôts sédimentaires de grains de grosseur allant du sable fin aux gros blocs, de natures minéralogiques différentes.

Trois catégories de granulats roulés existent dans la nature :

- Les granulats de rivière (d'oued).
- Les granulats de mer.
- Les granulats de dunes.

N.B. : Les granulats roulés se caractérisent par leur aspect de **grains arrondis et polis**.



Figure I.4 : Granulats roulés

b) Granulats concassés (de carrières) : ils proviennent du concassage de roches dures (granits, porphyres, basaltes, calcaires durs...etc.). Ils sont caractérisés par un aspect anguleux à arêtes vives. [5]

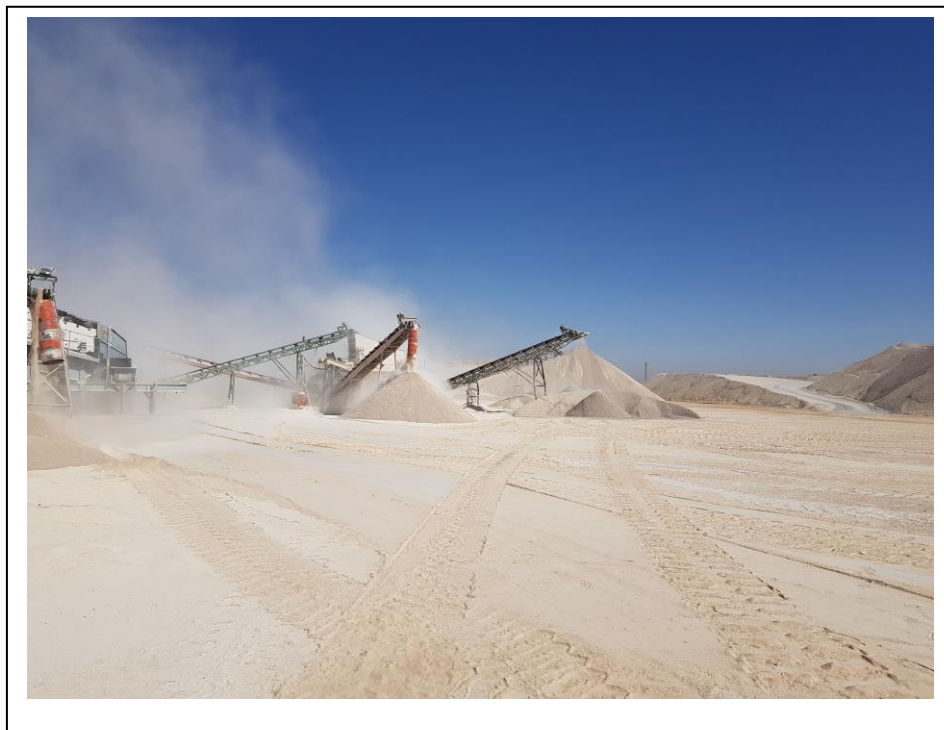


Figure I.5 : Concasseur des agrégats.



Figure I.6 : Fractions des gravillons.

B) Granulats artificiels [5]

Les granulats artificiels sont soit des sous-produits de l'industrie sidérurgique, soit fabriqués en vue d'obtenir un produit particulier. Ils proviennent de la transformation à la fois thermique et mécanique des roches ou des minerais. Les plus employés sont le laitier cristallisé concassé, obtenu par refroidissement lent à l'air ; le laitier granulé de haut fourneau, obtenu par refroidissement rapide dans l'eau et les granulats allégés par expansion ou frittage (l'argile ou le schiste expansés). Les granulats artificiels peuvent être employés pour réaliser des bétons à usage spécifique.



Figure I.7 : Granulats artificiels.

C) Granulats Recyclés [5]

Les granulats recyclés sont obtenus par traitement d'une matière inorganique utilisée précédemment dans la construction, tels que ceux issus des ouvrages démolies suite à des sinistres naturels comme les séismes et les crues, ou par vieillissement et dégradations. Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles.



Figure I.8 : Granulats recyclés.

I.4.2 Cément (la norme EN 197-1)

Le béton est le matériau le plus utilisé dans le monde du génie civil du fait de sa haute résistance. Le ciment le plus souvent utilisé est le ciment dit de Portland. Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine, s'hydratant en présence d'eau. Il forme ainsi une pâte qui fait prise et qui durcit progressivement, même sous l'eau. C'est un constituant de base du béton. Le ciment Portland est obtenu par cuisson à 1450°C d'un mélange artificiel soigneusement dosé et homogénéisé, de 80 % de calcaire et de 20 % d'argile. Le produit obtenu après refroidissement brusque à l'air est le clinker. Durant la cuisson, les composants du mélange cru se décomposent et se recombinent entre eux pour former les minéraux du clinker. Leur écriture chimique utilise de façon simplifiée les lettres C pour CaO (chaux), S pour SiO₂ (silice), A pour Al₂O₃ (alumine) et F pour Fe₂O₃ (oxyde de fer). Ces minéraux sont [3]:

- Le silicate tricalcique C₃S (3CaO,SiO₂): appelé aussi Alite. La teneur normale en C₃S du clinker est comprise entre 50 et 65 %.
- Le silicate bicalcique C₂S (2CaO,SiO₂): appelé aussi bélite. La teneur normale en C₂S du clinker varie entre 15 et 25 %.
- L'aluminate tricalcique C₃A (3CaO,Al₂O₃): appelé aussi célite. La teneur normale en C₃A du clinker varie entre 4 et 12 %.
- L'alumino-ferrite tétracalcique (C₄AF) ou brownmillérite. La teneur normale en C₄AF du clinker est comprise entre 0 (ciment blanc) et 10 %.

Les ciments sont classés en fonction de leur composition en cinq types principaux définis par la norme EN 197-1 :

- CEM I: Ciment portland,
- CEM II: Ciment portland composé,
- CEM III: Ciment de haut fourneau,
- CEM IV: Ciment pouzzolanique,
- CEM V: Ciment au laitier et aux cendres.

Les proportions (en masse) des différents constituants sont indiquées dans le tableau (I.1). Les constituants marqués d'une étoile (*) sont considérés comme constituants secondaires pour le type de ciment concerné ; leur total ne doit pas dépasser 5%.[3]

	Cim. Port- land	Ciment Portland composé		Ciment de haut-fourneau			Ciment pouzzolanique		Ciment composé	
	CEM I	CEM II/A	CEM II/B	CEM III/A	CEM III/B	CEM III/C	CEM IV/A	CEM IV/B	CEM V/A	CEM V/B
Clinker (K)	$\geq 95 \%$	$\geq 80 \%$ $\leq 94 \%$	$\geq 65 \%$ $\leq 79 \%$	$\geq 35 \%$ $\leq 64 \%$	$\geq 20 \%$ $\leq 34 \%$	$\geq 5 \%$ $\leq 19 \%$	$\geq 65 \%$ $\leq 89 \%$	$\geq 45 \%$ $\leq 64 \%$	$\geq 40 \%$ $\leq 64 \%$	$\geq 20 \%$ $\leq 38 \%$
Laitier (S)	*	6% $\leq$	6% $\leq$	$\geq 36 \%$ $\leq 65 \%$	$\geq 66 \%$ $\leq 80 \%$	$\geq 81 \%$ $\leq 95 \%$	*	*	$\geq 18 \%$ $\leq 30 \%$	$\geq 31 \%$ $\leq 50 \%$
Pouzzolanes (P ou Q)	*	total	total	*	*	*	11% $\leq$ total	36% $\leq$ total	18% $\leq$ total	31% $\leq$ total
Cendres siliceuses (V)	*	$\leq 20 \%$	$\leq 35 \%$	*	*	*	$\leq 35 \%$ (fumée)	$\leq 55 \%$ (fumée)	$\leq 30 \%$	$\leq 50 \%$
Fumée de silice (D)	*	(fumée	(fumée	*	*	*	$\leq 10 \%$)	$\leq 10 \%$)	*	*
Cendres calciques (W)	*	de	de	*	*	*	*	*	*	*
Schistes (T)	*	silice	silice	*	*	*	*	*	*	*
Calcaires (L ou LL)	*	$\leq 10 \%$	$\leq 10 \%$	*	*	*	*	*	*	*
Fillers	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Tableau I.1 : Désignation des différents ciments en fonction de leur composition.

Trois classes de résistance sont définies en fonction de la résistance minimale à 28 jours et une sous classe "R" ou "N" est associée pour désigner les ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées ou normale. Les spécifications de ces classes sont rappelées dans le tableau I.2

Classe	Résistance à la compression (MPa) EN 196-1 (et P15-301)				Retrait à 28 jours (1) P15-433 (µm/m)	Début de prise EN 196-3 (min)	Stabilité EN 196-3 (mm)
	au jeune âge		à 28 jours				
	2 jours	7 jours	mini	maxi			
32,5 N		≥ 16,0 14	≥ 32,5 30	≤ 52,5	≤ 800	≥ 75 (90) 60 (90)	≤ 10
32,5 R	≥ 10 (13,5) 8 (12)		≥ 32,5 30	≤ 52,5	≤ 1 000	≥ 75 (90) 60 (90)	≤ 10
42,5 N	≥ 10 (12,5) 10		≥ 42,5 40	≤ 62,5	≤ 1 000	≥ 60 50 (60)	≤ 10
42,5 R	≥ 20 18		≥ 42,5 40	≤ 62,5	≤ 1 000	≥ 60 50 (60)	≤ 10
52,5 N	≥ 20 18		≥ 52,5 50			≥ 45 (60) 40 (60)	≤ 10
52,5 R	≥ 30 28		≥ 52,5 50			≥ 45 (60) 40 (60)	≤ 10

Tableau I.2 : Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe.

I.4.3 Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques d'origines organique ou inorganique, le plus souvent sous forme liquide. Leur dosage ne doit pas dépasser 5% du poids du ciment et ils sont incorporés dans le béton lors du malaxage ou de la mise en œuvre. Les super-plastifiants sont des polymères organiques solubles dans l'eau. La polymérisation produit de longues chaînes moléculaires très denses. Ces dernières vont s'enrouler autour des grains de ciment et vont leur donner une charge hautement négative, de sorte qu'ils se repoussent les uns les autres, conduisant à une défloculation et une dispersion des grains de ciment. La répulsion est dite électrostatique dans le cas des super-plastifiants de type poly-sulfonates. Dans le cas des super-plastifiants de type poly-carboxylates, la répulsion est dite stérique et elle permet en principe une action fluidifiante prolongée. L'emploi de super-plastifiant permet d'améliorer la maniabilité et de réaliser des bétons à très haute résistance en réduisant le rapport e/c. leur dosage doit être contrôlé afin d'éviter des problèmes comme la perte de maniabilité dans le temps (la quantité de molécules de super-plastifiant disponible n'est pas suffisante pour empêcher la ré-agglomération des grains de ciment). Des surdosages peuvent entraîner des effets secondaires comme un retard de prise. [3]

I.4.4 L'eau

L'eau est un ingrédient essentiel du béton. Elle intervient à toutes les étapes de la vie du matériau. Introduite dans le béton lors de sa fabrication, elle va remplir deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère aux bétons frais les propriétés rhéologiques d'un pseudo-liquide permettant l'écoulement et le moulage ; une fonction chimique d'hydratation du ciment qui apporte la résistance mécanique. [3]

I.5 Le rapport E/C

La résistance croît en même temps que le dosage en ciment C et elle décroît en fonction du dosage en eau E et c'est pourquoi on a tendance à prendre en compte le rapport C/E comme facteur global intervenant dans la résistance du béton. Il est également d'usage pour certains d'adopter le facteur inverse E/C. Dans sa forme C/E, il permet d'exprimer la valeur de la résistance par une simple fonction linéaire et croissante.

Dans la pratique, un rapport E/C le plus bas possible revient grosso modo à un demi-litre d'eau par kilo de ciment, y compris l'humidité des granulats (sable!) et l'eau contenue par les adjuvants éventuels. Toutefois, environ seule la moitié de cette eau sera liée chimiquement au ciment, le reste étant nécessaire pour faciliter le malaxage et la mise en œuvre du béton frais. Tout excédent d'eau enfermée dans le béton lors du durcissement entraîne une structure moins compacte du matériau, et donc à une réduction de ses performances mécaniques et de sa résistance aux agents agressifs.

Il est difficile d'obtenir un rapport E/C faible en diminuant la quantité d'eau lorsque le sable contient beaucoup de fines. En effet, il faut plus d'eau pour mouiller du sable fin qu'une même masse de sable gros.

Il n'est possible d'obtenir un rapport E/C faible en augmentant la quantité de ciment que dans une certaine mesure, parce qu'un béton à teneur en ciment très élevée est plus sensible au retrait.

En général les valeurs pour obtenir la relation entre la résistance à la compression du béton et le rapport E/C sont suivantes :

$$E/C = 0.33 \dots \dots \dots f_c \# 60 \text{MPa}$$

$$E/C = 0.40 \dots \dots \dots f_c \# 50 \text{MPa}$$

$$E/C = 0.50 \dots \dots \dots f_c \# 40 \text{MPa}$$

$$E/C = 0.60 \dots \dots \dots f_c \# 30 \text{MPa}$$

$$E/C = 0.70 \dots \dots \dots f_c \# 22 \text{MPa}$$

.....[2]

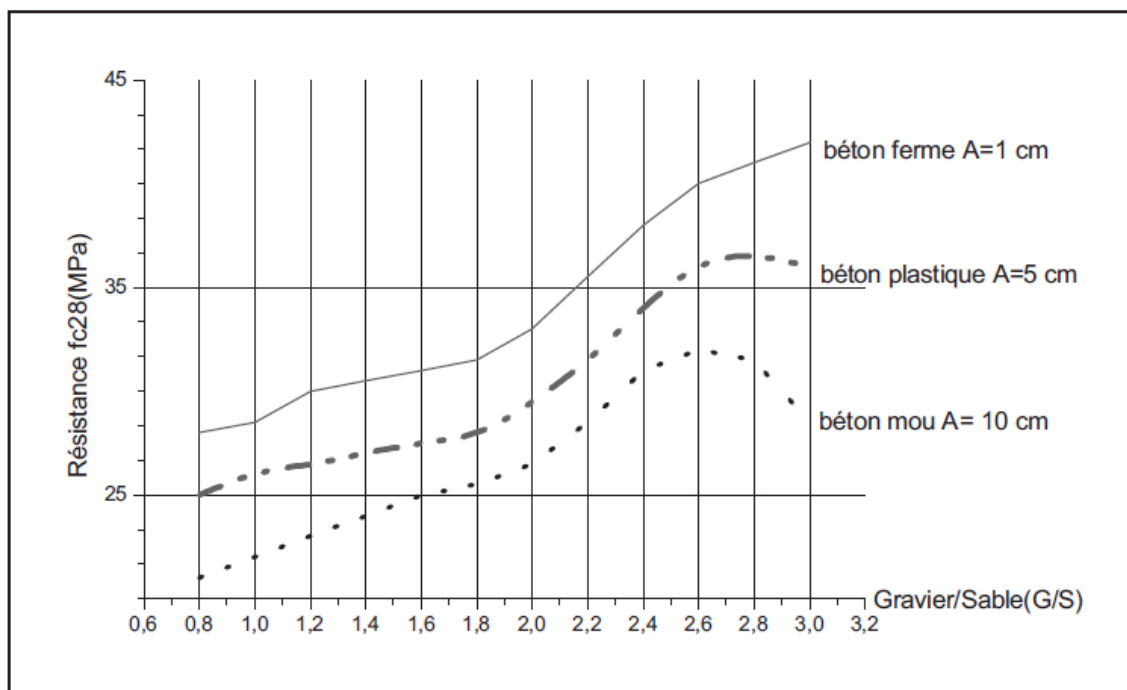
I.6 RAPPORT GRAVIER / SABLE (G/S)

Le rapport (G/S) correspond à celui des volumes absolus du gravier sur sable. La coupure entre sable et gravier se fait au tamis de module 38(5mm). Pour G/S = 2.2 (valeurs les plus courantes) l'influence de G/S est faible. Mais, la résistance augmente sensiblement pour des valeurs élevées de G/S surtout pour les bétons fermes. Le tableau suivant présente une récapitulation des qualités principales des bétons en fonction de leurs G/S. [2]

Caractéristiques	Appréciation concernant les bétons	
	à G/S élevé par rapport à ceux à G/S faible	à granularité discontinue par rapport à ceux à granularité continue
Ouvrabilité	Moins bonne surtout si $G/S > 2.2$	Moins bonne
Résistance à la compression	Meilleure surtout pour $G/S \geq 2.2$	Très légèrement supérieure
Résistance à la traction	Sans corrélation apparente	Très légèrement inférieure
Module d'élasticité	Sans corrélation très nette sauf pour le module statique un peu plus élevé en fonction de G/S	Un peu plus élevé
Vitesse de son	Sans corrélation très nette	Légèrement supérieure
Indice sclérométrique	Un peu supérieure	Très légèrement supérieure
Retrait	Sans corrélation très nette	Moins élevé surtout si $G/S > 2.2$
Compacité, densité	Légèrement plus élevé pour $G/S > 2.2$	Un peu plus élevé

Tableau I.3 : Principales qualités des bétons en fonction de leur (G/S) et leur granularité [2].

La figure ci-dessous montre l'influence de rapport G/S sur la résistance du béton avec plasticités différées [2].



A : Affaissement au cône d'ABRAMS

Figure 1.9 : Variation de la résistance à la compression selon le rapport G/S avec différentes.

I.7 DURABILITÉ

La durabilité d'un béton n'est pas une caractéristique, mais plutôt sa réponse aux charges en service et aux conditions environnementales ; la durabilité d'un béton dépend d'une multitude de caractéristiques du matériau, ainsi que de l'agressivité de son environnement. Un élément en béton qui subit des cycles de chargement et de déchargement ou de mouillage et de séchage, par exemple, peut se fissurer à cause de ces cycles. Des agents agressifs extérieurs pénétreront facilement dans sa matrice à travers les fissures et microfissures formées. Ces agents agressifs peuvent, par la suite, réagir avec les hydrates pour diminuer davantage la capacité portante de l'élément.

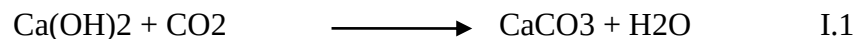
La définition et les spécifications des bétons doivent prendre en compte :

- ✓ les agressions liées à la carbonatation et à la pénétration des chlorures (en présence de sels),
- ✓ la prévention des désordres dus aux gonflements internes du béton (alcali-réaction et réaction sulfatique interne),
- ✓ la durabilité des bétons durcis soumis au gel en présence ou non de sels de déverglaçage.

Les caractéristiques induites sont à contrôler au cours de l'exécution pour assurer la durabilité de l'ouvrage.

I.7.1 Phénomène de carbonatation

- ✓ ▪ le CO₂ présent dans l'air pénètre dans le béton par le réseau poreux et les fissures et, en présence d'eau dans les pores, abaisse le pH (initialement de 13) de la solution interstitielle du béton à 9 par réaction avec la pâte de ciment hydratée et notamment la portlandite :



- ✓ ▪ au fur et à mesure de la progression du front de carbonatation, les armatures initialement protégées par une couche d'oxyde de fer (liée à l'alcalinité de la solution interstitielle) sont alors dépassivées et le phénomène de corrosion s'initie.
- ✓ La carbonatation est maximale lorsque l'humidité relative est modérée (cycle séchage/humidité).
- ✓ Après environ 30 ans, la profondeur de carbonatation dans un béton d'ouvrage peut varier de 1 à 30 mm suivant la compacité du béton, la fissuration de peau et le milieu environnant.

La corrosion induite par carbonatation est donc fonction de :

- ✓ L'exposition des parements au CO₂ et à l'eau
- ✓ La qualité du béton en place (compacité) et notamment en parement avec l'absence ségrégation, de bullage ou de fissuration (retrait gêné, dessiccation)
- ✓ L'enrobage du premier lit d'armature

I.7.2 Phénomène de pénétration des chlorures

- ✓ En pénétrant dans le béton par diffusion, les chlorures réagissent avec les hydrates ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ notamment) de la pâte de ciment, ce qui conduit à la dépasseivation et à la corrosion des armatures.
- ✓ La pénétration des chlorures est favorisée par des cycles séchage/humidité également.
- ✓ Distinction entre chlorures libres sous forme ionique dans la solution interstitielle (extractibles à l'eau) et chlorures totaux (extractibles à l'acide).
- ✓ Seuls les chlorures libres (solubles dans l'eau) peuvent diffuser et jouer un rôle actif dans le processus de corrosion des armatures.
- ✓ On définit un seuil critique $[\text{Cl}^- \text{libres}]_{\text{critique}} = 0,4\%$ par rapport à la masse de ciment soit 0,04 à 0,1% par rapport à la masse de béton.
- ✓ lorsque $[\text{Cl}^- \text{libres}] > [\text{Cl}^- \text{libres}]_{\text{critique}}$ au voisinage des armatures, le phénomène de corrosion s'initie.

La corrosion induite par la pénétration des chlorures est donc fonction de :

- ✓ La quantité initiale de chlorures dans le béton
- ✓ L'exposition des parements aux chlorures et à l'eau
- ✓ La qualité du béton en place (compacité), et notamment en parement avec l'absence de ségrégation, de bullage ou de fissuration (retrait gêné, dessiccation)
- ✓ L'enrobage du premier lit d'armature

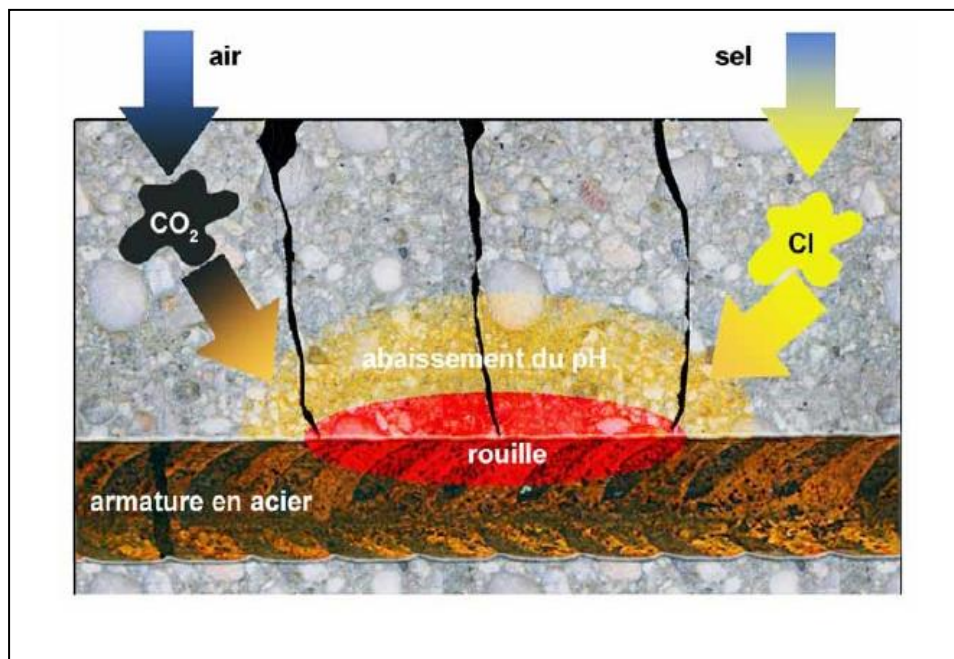


Figure I.10 : Le principe de la corrosion des armatures



Figure I.11 : corrosion des armatures.

La corrosion s'accompagne généralement d'un gonflement des armatures qui génère une fissuration accrue et des éclatements du béton en parement, ce qui accélère le processus de dégradation.

I.7.3 Phénomène d'alcali-réaction

- ✓ Réaction entre les granulats (silice réactive) et les alcalins (granulats, ciment, eau, adjuvants) en présence d'humidité
- ✓ Formation de gel
- ✓ Propriété gonflante : détérioration interne du matériau et des structures

La démarche préventive concernant l'alcali-réaction (RAG) est définie dans les recommandations LCPC(laboratoire central des ponts et des chaussées) de juin 1994 (rappelées à l'article NA.5.2.3.4 de la norme NF EN 206-1).

I.7.4 Phénomène de réaction sulfatique interne

- ✓ Réaction entre les ions sulfate de la solution interstitielle du béton et les aluminates du ciment plusieurs mois voire plusieurs années après la prise du ciment.
- ✓ Formation différée d'étrangéité.
- ✓ Propriété gonflante : détérioration interne du matériau et des structures.

Les principaux paramètres de la réaction sont :

- Eau et humidité (réaction et processus de transfert),
- Température et durée de maintien lors de la prise et du
- Durcissement (fonction de la géométrie de la pièce),
- Teneur en sulfates et en aluminates du ciment,
- Teneur en alcalins du béton (rôle sur la solubilité de l'étrangéité).

La démarche préventive concernant la réaction sulfatique interne (RSI) est définie dans les recommandations LCPC d'août 2007.

.....[4]

I.7.5 Phénomène de réaction sulfatique externe (ESA) :

Les sulfates sont associés à différents cations nous citons Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} . Souvent la nature de cette cation peut accentuer l'action de l'ion sulfate sur les matériaux cimentaires. Selon la littérature, plusieurs chercheurs montrent que les sulfates de magnésium présentent les dommages les plus sévères. A cet effet, nous présenterons par la suite uniquement les mécanismes d'attaque sulfatique associée à l'ion Magnésium. La Figure I.2 synthétise les quatre étapes de ce mécanisme [10] :

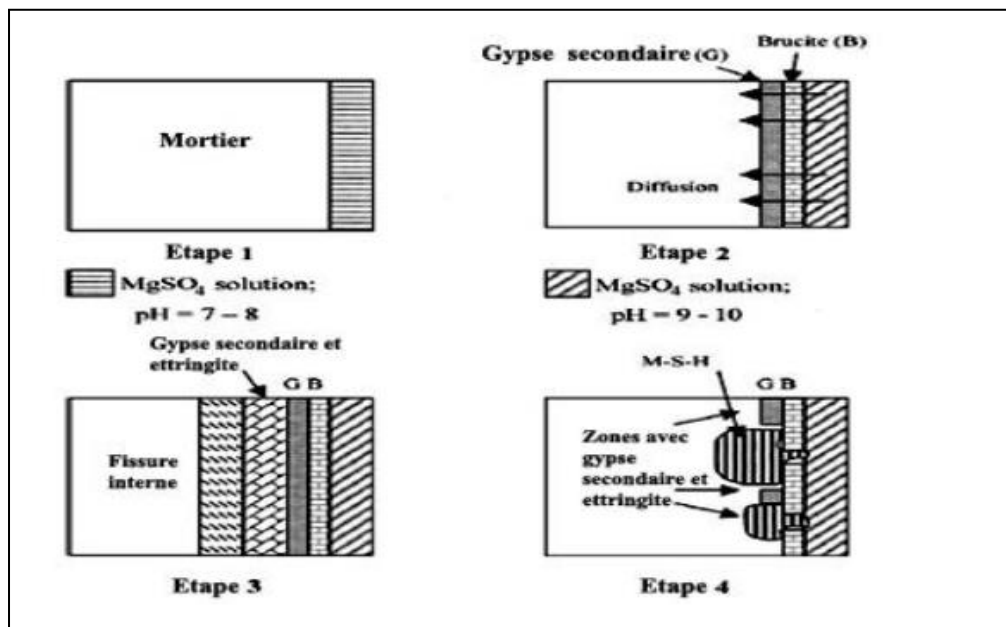
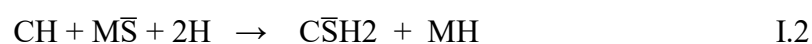


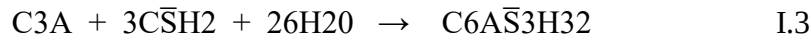
Figure I.12 : Mécanisme proposé d'attaque du sulfate de magnésium [10].

Le mécanisme d'attaque sulfatique externe (ESA) d'un matériau cimentaire associé au Mg^{2+} suit les quatre étapes suivantes :

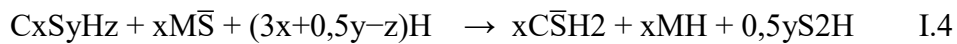
La première étape: se déclenche avec la lixiviation de la portlandite (CH) où les sulfates (SO_4^{2-}) et les ions (Ca^{2+}) vont précipiter pour former du gypse secondaire $\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2$, les ions (Mg^{2+}) réagissent quant à eux avec (OH^-) pour former l'hydroxyde de magnésium appelé Brucite (B). La solubilité de la brucite est très faible de l'ordre de 0,01 g/l et sa présence fait chuter le pH de la solution interstitielle à des valeurs proches de 10,5, induisant par la suite la décomposition du CSH [10].



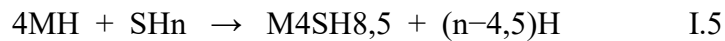
La deuxième étape : Le gypse secondaire $\bar{C}\bar{S}H_2$ résultant de (équation I.II) va réagir avec les aluminates tricalciques C3A pour former l'ettringite secondaire selon équation I.3, produit très expansif [10].



La troisième étape : Lors de la consommation de la portlandite (CH), le pH de la solution interstitielle chute ce qui déclenche la décalcification des C-S-H. Alors les ions (Mg^{2+}) et (S^{4-}) vont réagir pour produire ainsi du gypse, la brucite (B) et le gel de silice (S2H) comme illustré dans l'équation I.4 [10].



La quatrième étape : La brucite formée (B) va réagir avec les hydrosilicates (S2H) produisant ainsi le silicate de magnésium hydraté (M-S-H), qui n'ont aucune propriété de liaison et vont conduire à la désintégration de la pâte (équation I.5) [10].



CHAPITRE II

ÉTUDE EXPERIMENTALE

II.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous étudions les caractéristiques des différents matériaux utilisés dans la composition du Béton (le ciment, les granulats, l'adjuvant et l'eau) à savoir : la granulométrie, la composition chimique et minéralogique, la masse volumique, la propreté et autres propriétés physiques, ainsi que les essais mécaniques sur le béton.

Les essais ont été effectués au sein du laboratoire Etudes et Contrôles (*LEC Geosciences*).

II.2 Caractéristiques des matériaux :

La caractérisation des matériaux de construction nécessite la connaissance de la nature de ses composants. Par ailleurs, la détermination des dosages optimaux, ainsi que l'illustration de certaine interprétation ne pourraient être possible que si les différents constituants sont bien caractérisés.

II.2.1 Le sable :

Le sable est le constituant du squelette granulaire qui a le plus d'impact sur le mortier. Il joue un rôle primordial en réduisant les variations volumiques, les chaleurs dégagées. Il doit être propre et ne pas contenir d'éléments nocifs.

Dans notre étude on distingue trois types de sable, sable naturel de construction obtenu de la carrière KASEB ELSIL (OUARGLA), sable naturel de construction substituée par le sable concassé de carrière avec des pourcentages 40%, 45%, 50%, 55% et 60% et sable concassé de carrière obtenu au niveau de l'usine de concassage BENBRAHIM (HASSI MESSAOUD).



Figure II.1 : Substitution de sable naturel avec du sable concassé.

II.2.1.a Analyse granulométrique du sable : (la norme NF P 18 -560)

On peut définir l'analyse granulométrique par tamisage c'est un ensemble des opérations aboutissant à la séparation selon leur grosseur des éléments constituant échantillon, en employant des tamis à maille carrée afin d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension.

But de l'essai

La granulométrie ou analyse granulométrique s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

L'analyse granulométrique a trois buts :

- Déterminer les dimensions des grains.
- Déterminer les proportions de grains de même dimension (% pondéral).
- En déduire le Module de finesse (Mf).

Principe de l'essai

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns 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.

Matériel nécessaire

Des tamis dont les ouvertures carrées, de dimension normalisée, sont réalisés soit à partir d'un maillage métallique. Pour un travail d'essai aux résultats reproductibles, il est conseillé d'utiliser une machine à tamiser électrique qui comprime un mouvement vibratoire horizontal, ainsi que des secousses verticales, à la colonne de tamis. (Figure (II.2)). La dimension nominale de tamis se suit dans une progression géométrique de raison.



Figure II.2 : Tamiseur électrique.

Module de finesse(Mf)

Ce paramètre est utilisé pour caractériser la finesse des sables à bétons suivant La norme (NF P18-540).

Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse M_f compris entre 2,2 et 2,8 ; au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui demande une augmentation du dosage en eau, et au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité.

Pour $1,8 < M_f < 2,2$: le sable est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance.

Pour $2,2 < M_f < 2,8$: le sable est à utiliser si l'on recherche une ouvrabilité Satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités.

Pour $2,8 < M_f < 3,2$: le sable est à utiliser si l'on recherche des résistances élevées au détriment de l'ouvrabilité et avec des risques de ségrégation.

Pour $M_f > 3,2$: le sable est à rejeter.

$$M_f = \Sigma R_C / 100$$

R_C : refus cumulé en (%) sous les tamis de module 23 à 38(0,16 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 2,5 et 5)

Les valeurs de l'analyse granulométrie des sables utilisés dans notre étude sont exprimées dans les tableaux suivants :

TAMIS (mm)	POIDS	POIDS CUMULE E	% DE REFUS	% DE TAMISA T	Préparation d'échantillon
50					Poids total avant lavage:
40	0	0	0,00	100	1000
31,5	0	0	0,00	100	Poids Total après lavage:
25	0	0	0,00	100	966,8
20	0	0	0,00	100	Température de séchage
16	0	0	0,00	100	75°
12,5	0	0	0,00	100	Module de finesse
10	0	0	0,00	100	2,22
8	0	0	0,00	100	OBSERVATION : -Sable fin 0/5 1,8< Module de finesse < 3,2.
6,3	1,7	1,7	0,17	100	
5	1,4	3,1	0,31	100	
4	13	16,1	1,61	98	
2,5	30,9	47	4,70	95	
1,25	137,9	184,9	18,49	82	
0,63	224,9	409,8	40,98	59	
0,315	260,8	670,6	67,06	33	
0,16	232,9	903,5	90,35	10	
0,08	71,1	974,6	97,46	3	
< 0,08	7,2	981,8			

Tableau II.1: Analyse granulométrique du sable naturel de construction

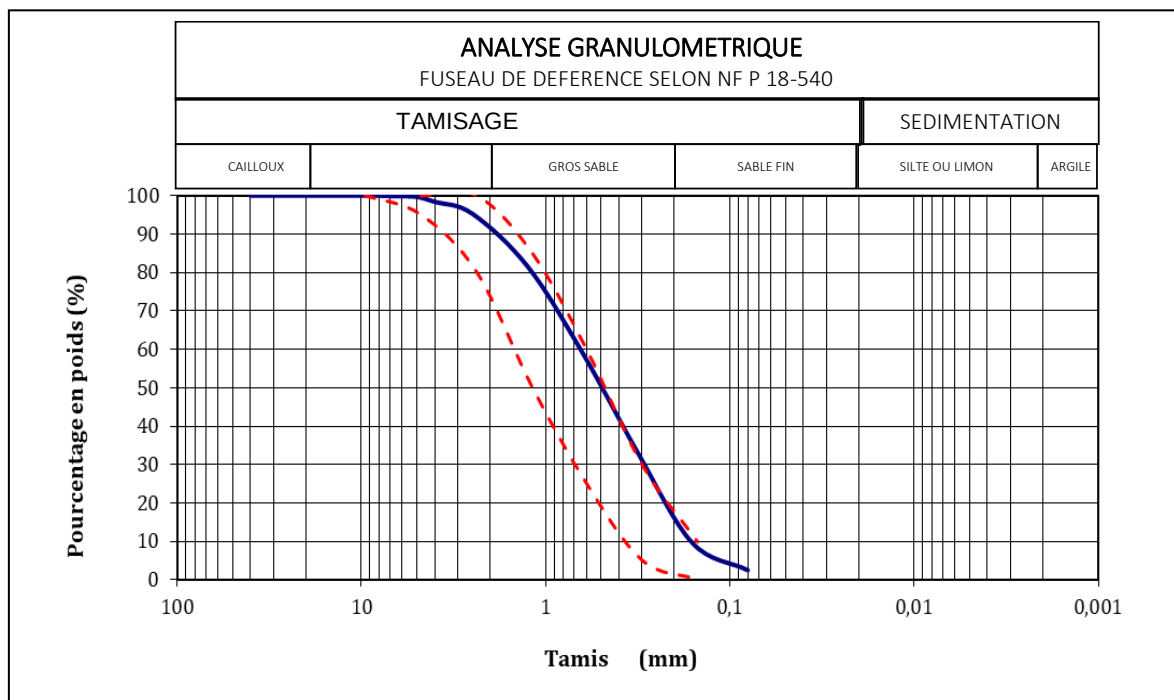


Figure II.3 : Courbe granulométrique du sable naturel de construction

TAMIS (mm)	POIDS	POIDS CUMULE E	% DE REFUS	% DE TAMISAT	Préparation d'échantillon
50					Poids total avant lavage:
40	0	0	0,00	100	1828,4
31,5	0	0	0,00	100	Poids Total après lavage:
25	0	0	0,00	100	1494,6
20	0	0	0,00	100	Température de séchage
16	0	0	0,00	100	75°
12,5	0	0	0,00	100	Module de finesse
10	6,4	6,4	0,35	100	2,18
8	7,6	14	0,77	99	OBSERVATION : -Sable fin 0/5 1,8< Module de finesse < 3,2.
6,3	3,2	17,2	0,94	99	
5	2,3	19,5	1,07	99	
4	9,8	29,3	1,60	98	
2,5	187	216,3	11,83	88	
1,25	399,3	615,6	33,67	66	
0,63	237,2	852,8	46,64	53	
0,315	163	1015,8	55,56	44	
0,16	268,8	1284,6	70,26	30	
0,08	158,8	1443,4	78,94	21	
< 0,08	35,3	1478,7			

Tableau II.2: Analyse granulométrique du sable concassé de carrière.

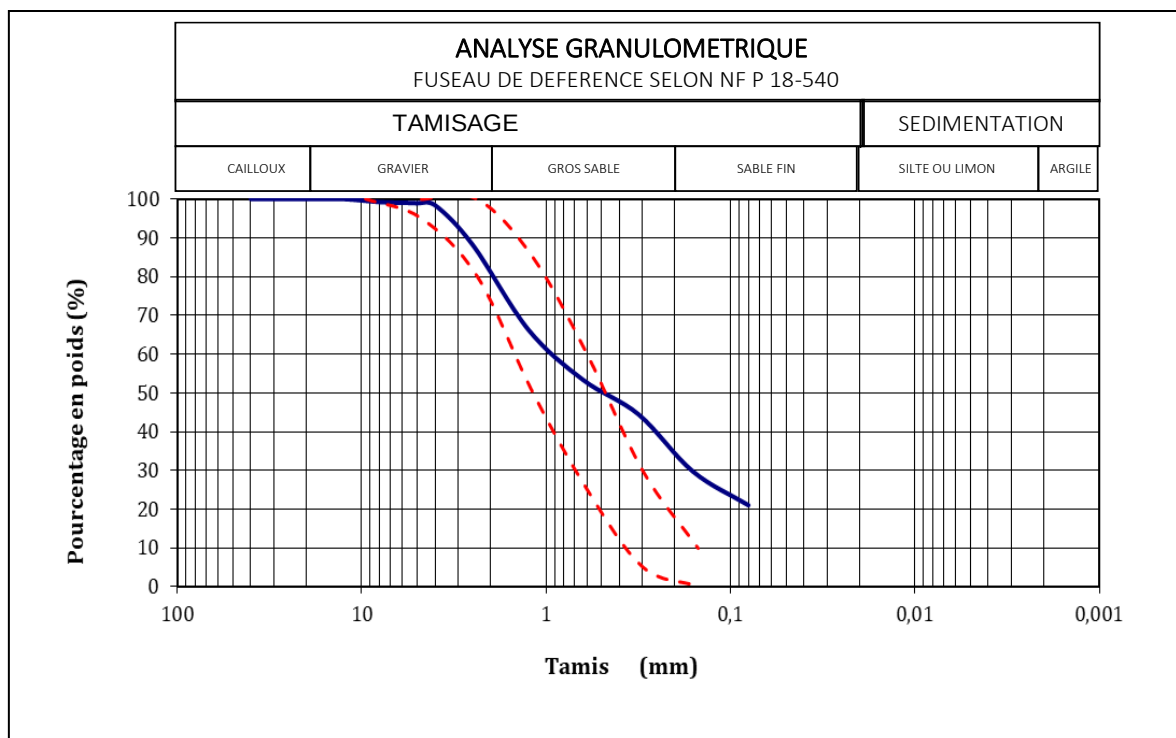


Figure II.4 : Courbe granulométrique du sable concassé de carrière

TAMIS (mm)	POIDS	POIDS CUMULE E	% DE REFUS	% DE TAMISA T	Préparation d'échantillon
50					Poids total avant lavage:
40	0	0	0,00	100	1807
31,5	0	0	0,00	100	Poids Total après lavage:
25	0	0	0,00	100	1685,8
20	0	0	0,00	100	Température de séchage
16	0	0	0,00	100	75°
12,5	0	0	0,00	100	Module de finesse
10	0	0	0,00	100	2,38
8	0	0	0,00	100	OBSERVATION : -Sable fin 0/5 1,8< Module de finesse < 3,2.
6,3	2,7	2,7	0,15	100	
5	4	6,7	0,37	100	
4	11,7	18,4	1,02	99	
2,5	141,2	159,6	8,83	91	
1,25	309,9	469,5	25,98	74	
0,63	340,7	810,2	44,84	55	
0,315	449,5	1259,7	69,71	30	
0,16	338,5	1598,2	88,44	12	
0,08	64,7	1662,9	92,03	8	
< 0,08	34,1	1697			

Tableau II.3 : Analyse granulométrique du sable substitué (60% Sable Naturel et 40% Sable concassé).

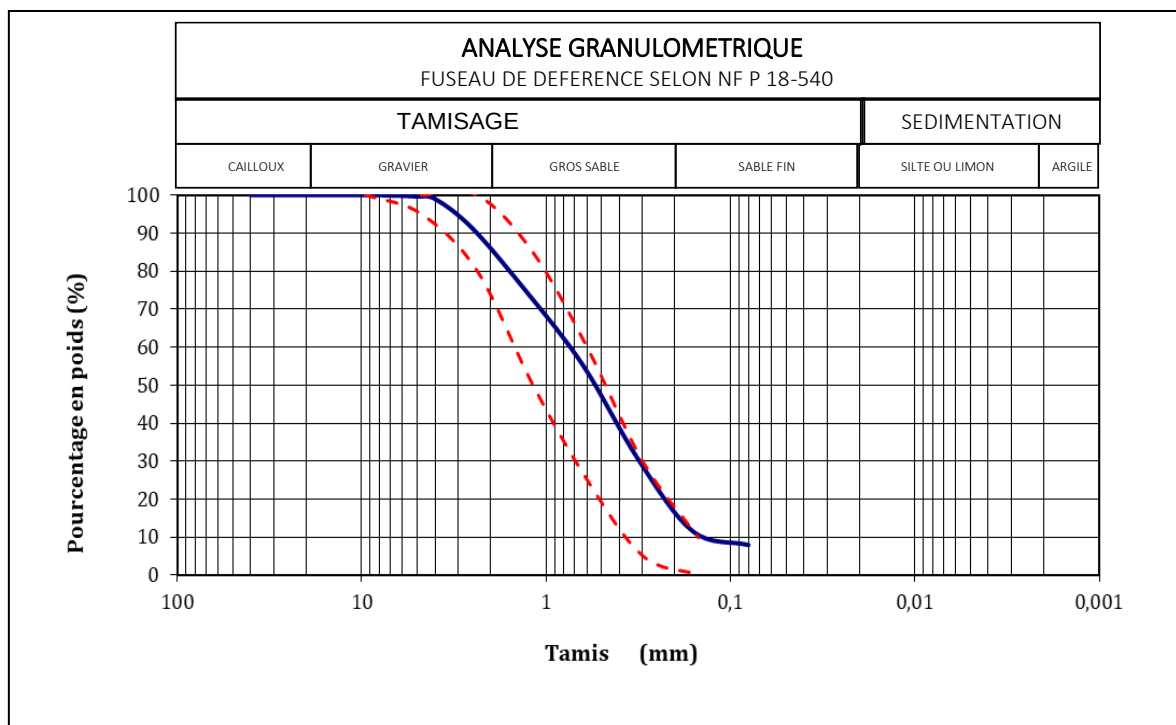


Figure II.5 : Courbe granulométrique du sable substitué (60% Sable Naturel et 40% Sable concassé).

TAMIS (mm)	POIDS	POIDS CUMULEE	% DE REFUS	% DE TAMISAT	Préparation d'échantillon
50					Poids total avant lavage:
40	0	0	0,00	100	1827,2
31,5	0	0	0,00	100	Poids Total après lavage:
25	0	0	0,00	100	1705,8
20	0	0	0,00	100	Température de séchage
16	0	0	0,00	100	75°
12,5	0	0	0,00	100	Module de finesse
10	0	0	0,00	100	2,35
8	0	0	0,00	100	OBSERVATION : -Sable fin 0/5 1,8< Module de finesse < 3,2.
6,3	2,7	2,7	0,15	100	
5	4	6,7	0,37	100	
4	11,7	18,4	1,01	99	
2,5	141,2	159,6	8,73	91	
1,25	309,9	469,5	25,70	74	
0,63	340,7	810,2	44,34	56	
0,315	449,5	1259,7	68,94	31	
0,16	338,5	1598,2	87,47	13	
0,08	64,7	1662,9	91,01	9	
< 0,08	34,1	1697			

Tableau II.4: Analyse granulométrique du sable substitué (55% Sable Naturel et 45% Sable concassé).

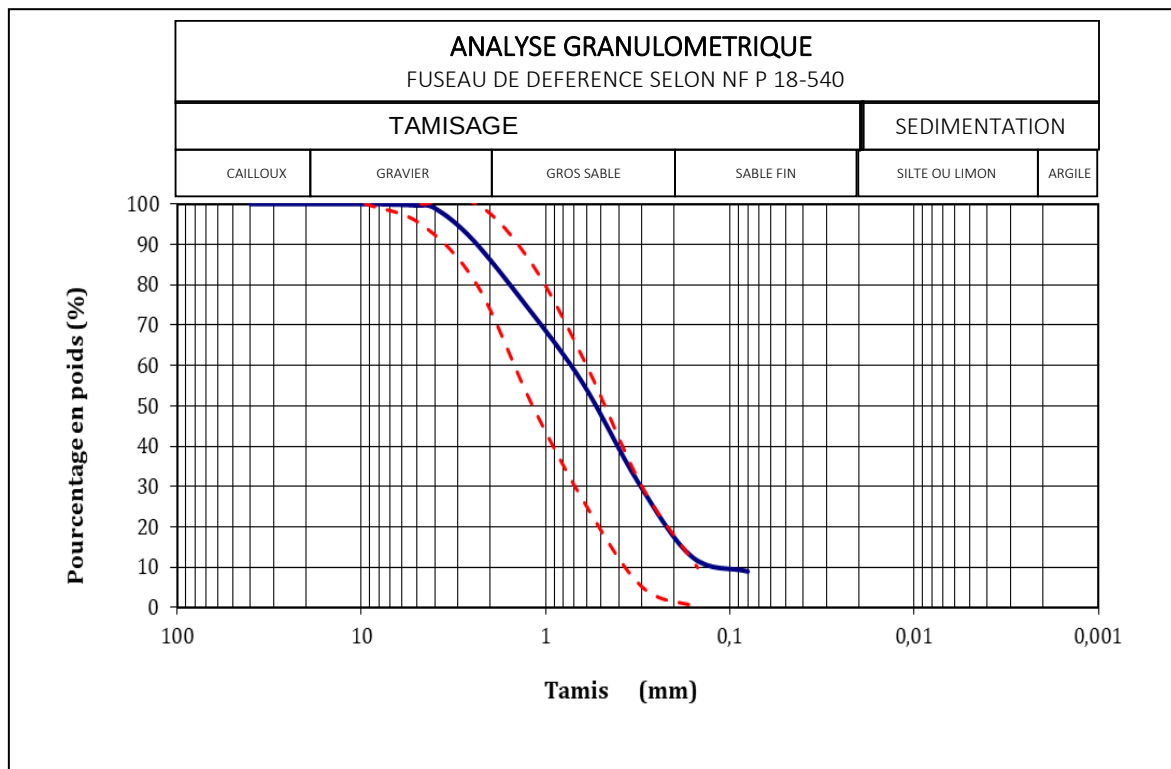


Figure II.6 : Courbe granulométrique du sable substitué (55% Sable Naturel et 45% Sable concassé).

TAMIS (mm)	POIDS	POIDS CUMULEE	% DE REFUS	% DE TAMISAT	Préparation d'échantillon
50					Poids total avant lavage:
40	0	0	0,00	100	1880,6
31,5	0	0	0,00	100	Poids Total après lavage:
25	0	0	0,00	100	1740,5
20	0	0	0,00	100	Température de séchage
16	0	0	0,00	100	75°
12,5	0	0	0,00	100	Module de finesse
10	0	0	0,00	100	2,30
8	0	0	0,00	100	OBSERVATION : -Sable fin 0/5 1,8< Module de finesse < 3,2.
6,3	3,1	3,1	0,16	100	
5	4,1	7,2	0,38	100	
4	11,5	18,7	0,99	99	
2,5	149,9	168,6	8,97	91	
1,25	311,4	480	25,52	74	
0,63	320,4	800,4	42,56	57	
0,315	464,6	1265	67,27	33	
0,16	337,7	1602,7	85,22	15	
0,08	89,4	1692,1	89,98	10	
< 0,08	36,8	1728,9			

Tableau II.5 : Analyse granulométrique du sable substitué (50% Sable Naturel et 50% Sable concassé).

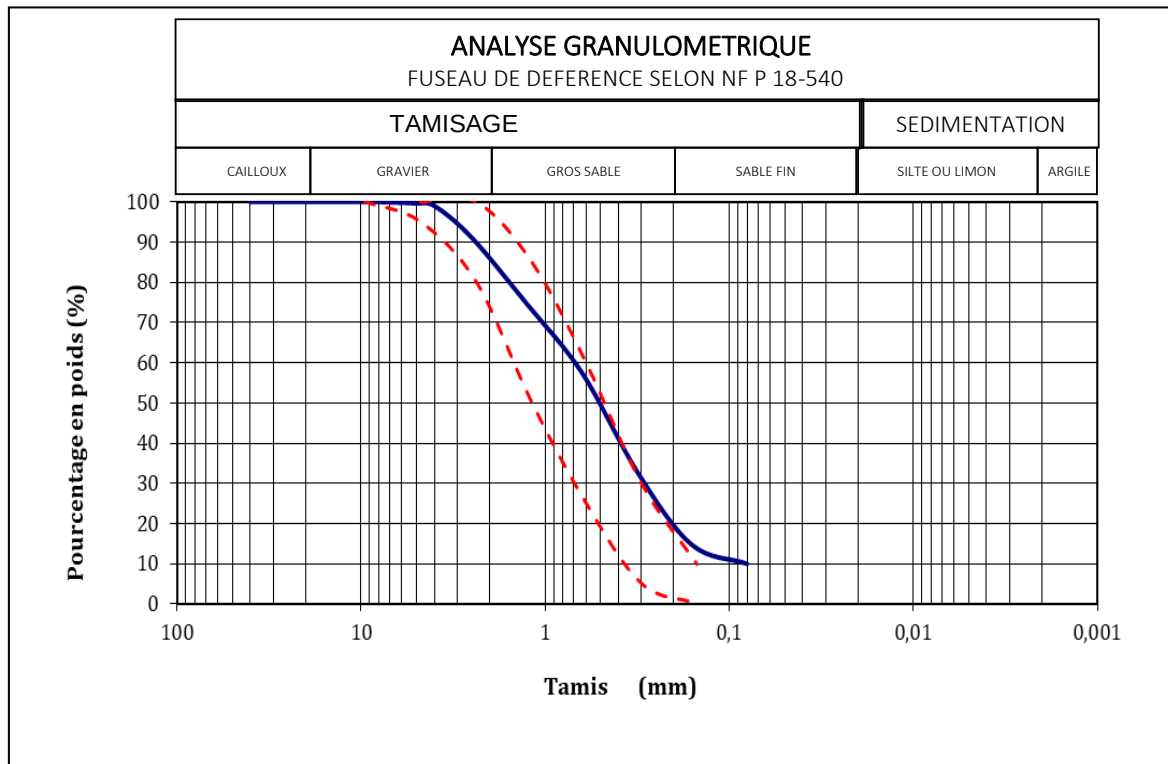


Figure II.7 : Courbe granulométrique du sable substitué (50% Sable Naturel et 50% Sable concassé).

TAMIS (mm)	POIDS	POIDS CUMULEE	% DE REFUS	% DE TAMISAT	Préparation d'échantillon
50					Poids total avant lavage:
40	0	0	0,00	100	1954,7
31,5	0	0	0,00	100	Poids Total après lavage:
25	0	0	0,00	100	1816
20	0	0	0,00	100	Température de séchage
16	0	0	0,00	100	75°
12,5	0	0	0,00	100	Module de finesse
10	0	0	0,00	100	2,46
8	0	0	0,00	100	OBSERVATION : -Sable fin 0/5 1,8< Module de finesse < 3,2.
6,3	8,2	8,2	0,42	100	
5	5,7	13,9	0,71	99	
4	14,6	28,5	1,46	99	
2,5	194,3	222,8	11,40	89	
1,25	378,4	601,2	30,76	69	
0,63	344,9	946,1	48,40	52	
0,315	381,8	1327,9	67,93	32	
0,16	378,6	1706,5	87,30	13	
0,08	53,1	1759,6	90,02	10	
< 0,08	45,2	1804,8			

Tableau II.6 : Analyse granulométrique du sable substitué (45% Sable Naturel et 55% Sable concassé).

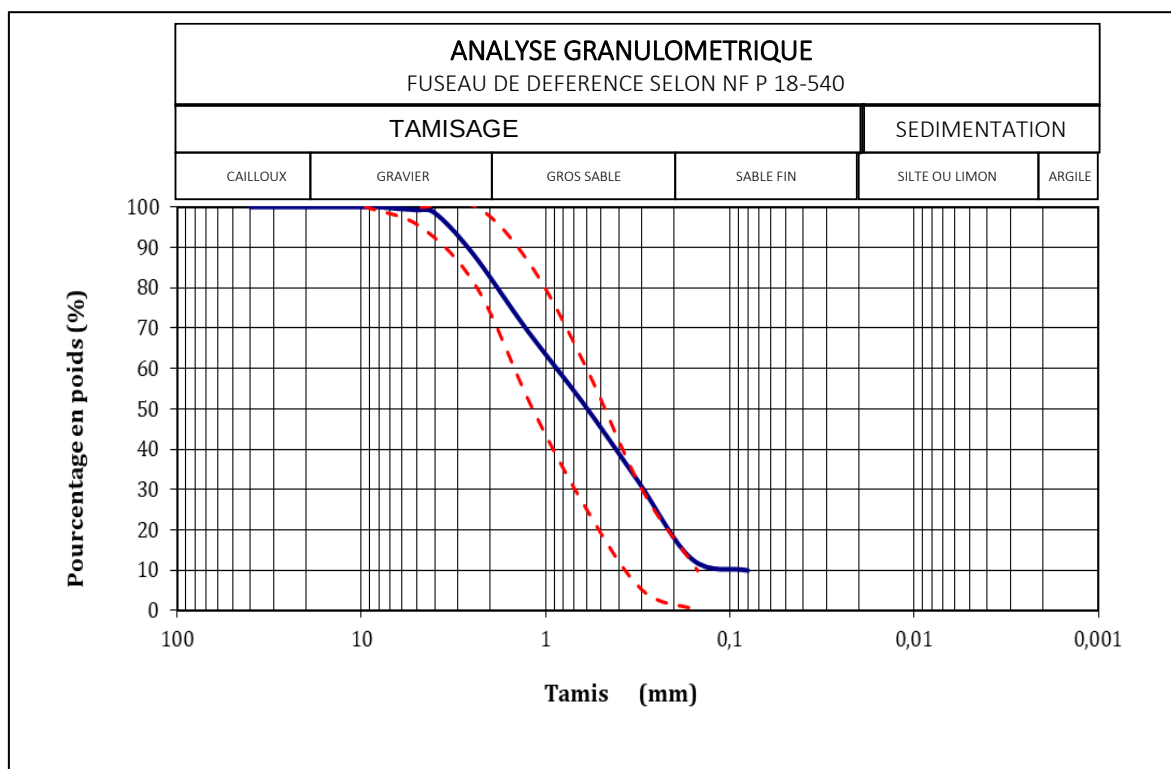


Figure II.8: Courbe granulométrique du sable substitué (45% Sable Naturel et 55% Sable concassé).

TAMIS (mm)	POIDS	POIDS CUMULEE	% DE REFUS	% DE TAMISAT	Préparation d'échantillon
50					Poids total avant lavage:
40	0	0	0,00	100	1953,9
31,5	0	0	0,00	100	Poids Total après lavage:
25	0	0	0,00	100	1825,2
20	0	0	0,00	100	Température de séchage
16	0	0	0,00	100	75°
12,5	0	0	0,00	100	Module de finesse
10	0	0	0,00	100	2,44
8	0	0	0,00	100	OBSERVATION : -Sable fin 0/5 1,8< Module de finesse < 3,2.
6,3	7,9	7,9	0,40	100	
5	2,1	10	0,51	99	
4	15,6	25,6	1,31	99	
2,5	225,4	251	12,85	87	
1,25	342,8	593,8	30,39	70	
0,63	329,2	923	47,24	53	
0,315	423,7	1346,7	68,92	31	
0,16	303	1649,7	84,43	16	
0,08	95,3	1745	89,31	11	
< 0,08	57	1802			

Tableau II.7: Analyse granulométrique du sable substitué (40% Sable Naturel et 60% Sable concassé).

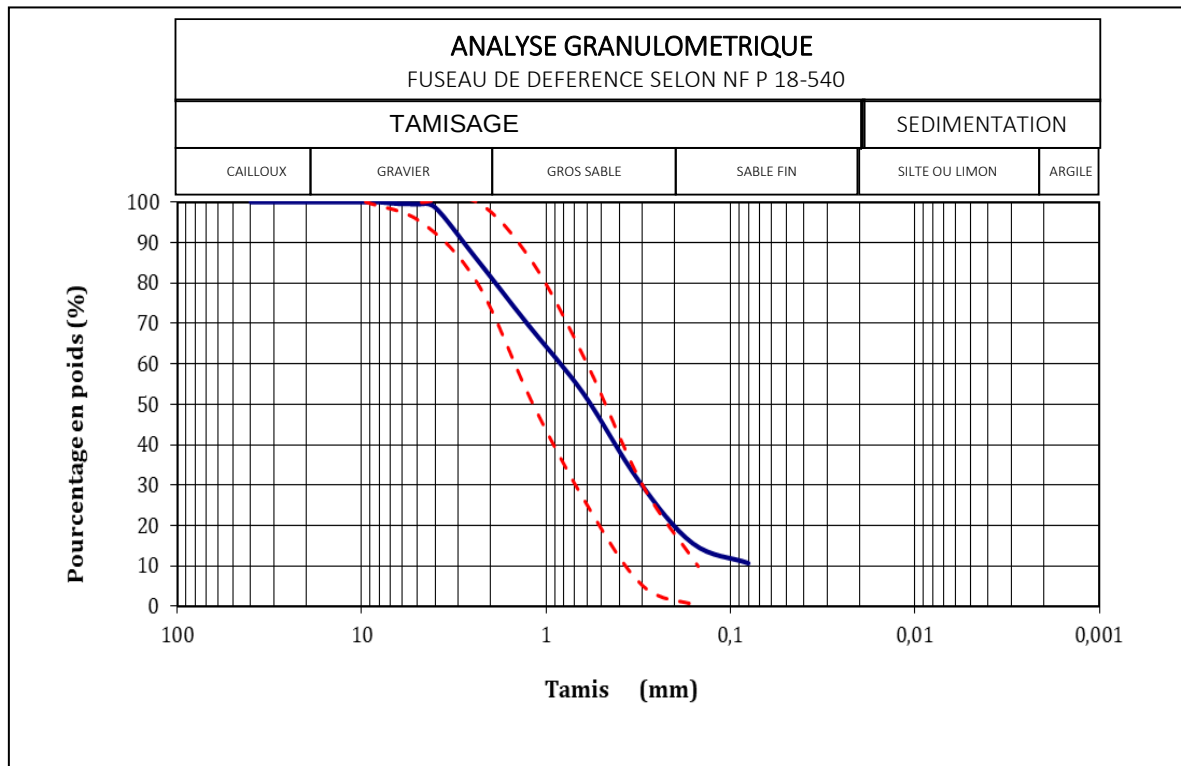


Figure II.9 : Courbe granulométrique du sable substitué (40% Sable Naturel et 60% Sable concassé).

II.2.1.b Equivalent de sable (la norme NF P 18 -598)

L'essai d'équivalent de sable permettant de mesurer la propreté d'un sable, est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 2mm. 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.

But de l'essai

Cet essai utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci.

Principe de l'essai

L'essai est effectué sur la fraction 0/2 mm du sable à étudier. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 minutes, on mesure les éléments suivants :

- hauteur h_1 : sable propre + éléments fins,
- hauteur h_2 : sable propre seulement.

On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention est :

$$ES = h_2/h_1 \times 100$$

Selon que la hauteur h_2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine ESv (équivalent de sable visuel) ou ES_p (équivalent de sable au piston)

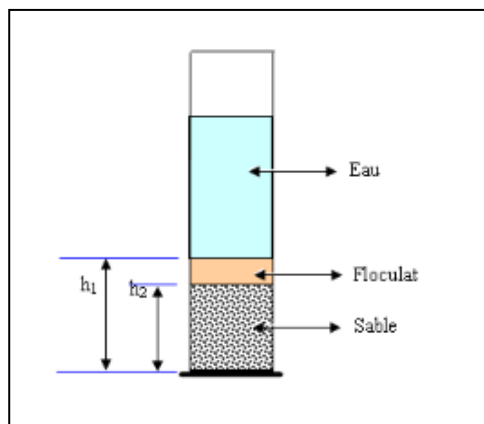


Figure (II.10) Schéma de principe de l'équivalent de sable



Figure (II.11) : Dispositif d'essai d'équivalent de sable

ES visuel	ES au	Nature et qualité du sable
ES < 65%	ES < 60%	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable À rejeter pour des bétons de qualité ou vérification plus précise de la nature des fines par un essai au bleu de
$65\% \leq \text{ES} < 75\%$	$60\% \leq \text{ES} < 70\%$	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour Les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de Conséquence notable sur la qualité du béton.
$75\% \leq \text{ES} < 85\%$	$70\% \leq \text{ES} < 80\%$	Sable propre à faible proportion de fines argileuses Convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
$\text{ES} \geq 85\%$	$\text{ES} \geq 80\%$	Sable très propre. L'absence presque totale de fines Argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

Tableau II.8 : Les valeurs d'équivalent de sable indiquent la nature et la qualité du sable.

Les valeurs de ES du sable utilisé dans notre étude sont résumées dans le tableau suivant :

Essai	01	02	03	Moyenne
Hauteur Total (H1)	13,2	12,9	12,9	60
Hauteur de sable par piston (H2)	8,2	7,6	7,5	
ES (%)= (H2/H1) X 100	62,12	58,91	58,14	
OBS	Es ≥ 60 acceptable pour béton de qualité courante.			

Tableau II.9 : Résultat d'essai équivalent de sable.

II.2.1.c Masse volumique absolue (la norme NF P 18 -555)

La masse volumique absolue ρ_s est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains. Il ne faut pas confondre ρ_s avec la masse volumique ρ qui est la masse de matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides. Les masses volumiques s'expriment en t/m^3 , en kg/dm^3 , ou en g/cm^3 .

But de l'essai

Cet essai a pour but de permettre de connaître la masse d'une fraction granulaire lorsque par exemple on élabore une compression de béton. Ce paramètre permet, en particulier, de déterminer la masse ou le volume des différentes classes granulaire malaxées pour l'obtention d'un béton dont les caractéristiques sont imposées.

Conduite de l'essai :

- Remplir une éprouvette graduée avec un volume d'eau (Niveau N_1).
- Peser un échantillon sec M_s de granulats (environ 100g) et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
- Le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume (Niveau N_2).

La masse volumique est alors :

$$M_s/(V_2-V_1)$$

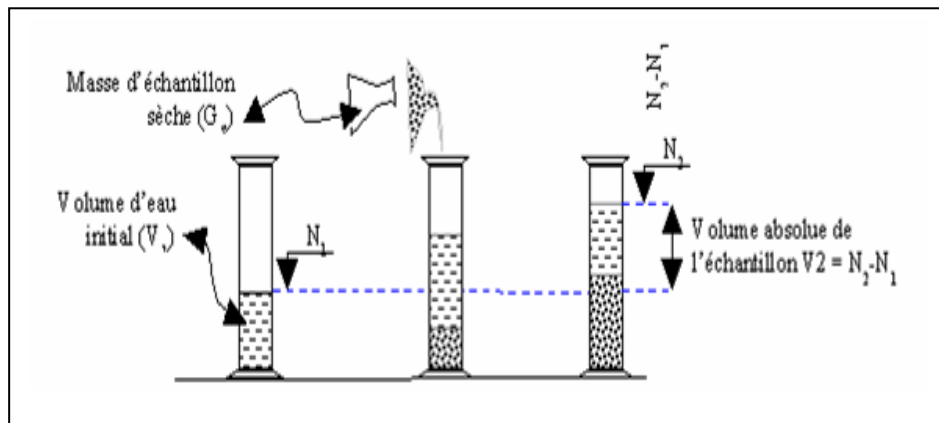


Figure II.12 : Essai de la détermination de la masse volumique absolue.

II.2.1.d La masse volumique apparente (la norme NF P 18 -555) :

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

L'essai est répété 3 fois pour un volume de 1 litre et la moyenne de ces essais donne la valeur de la masse volumique apparente.



Figure II.13 : Essai de détermination de la masse volumique apparente.

Les valeurs des masses volumiques apparentes et absolues du sable utilisé dans notre étude sont exprimées dans le tableau suivant :

ESSAI	UNITE	RESULTATS						
		100% SN	40 % SC	45 % SC	50 % SC	55 % SC	60 % SC	100% SC
A. Poids d'échantillon sec en air	g	306,6	450,4	467,4	325,6	394	403,4	500
B. Poids de pynometre + d'eau	g	1888,1	1888,1	1888,1	1888,1	1888,1	1888,1	1888,1
C. Poids de pynometre + d'eau + échantillon	g	2076,8	2167,1	2177,6	2089,4	2132,4	2138,6	2200,3
D. Le poids de l'échantillon saturé (surface sèche)	g	-	-	-	-	-	-	-
Masse volumique apparent (four sec) $A / (B + D - C)$	-	-	-	-	-	-	-	-
Masse volumique absolut: $D / (D + B - C)$	-	2,601	2,628	2,627	2,619	2,632	2,638	2,660
Masse volumique apparent	-	1,61	1,67	1,67	1,66	1,66	1,66	1,48
L'absorption $(D - A) / A * 100$	%	-	-	-	-	-	-	-

Tableau II.10 : Masses volumiques du sable.**II.2.1.e Essai bleu de méthylène (la norme NF P 18-592):****But de l'essai :**

Cet essai permet de mesurer la capacité des éléments fins à adsorber du bleu de méthylène. Le bleu de méthylène étant adsorbé préférentiellement par les argiles, les matières organiques et les hydroxydes de fer, cette capacité rend compte globalement de l'activité de surface de ces éléments.

On appelle «valeur de bleu» des fines, la quantité exprimée en grammes de bleu de méthylène adsorbée par 100 g de fines.

Conduite de l'essai :

Mettre 500 ml d'eau distillée ou déminéralisée dans la pissette, placer le sable dans le bac plastique, ajouter à l'aide de la pissette environ 100 ml d'eau déminéralisée ou distillée pour

recouvrir le matériau. Bien agiter l'ensemble avec la spatule. Verser en plusieurs fois le contenu du bac sur le tamis de 0,08 mm surmonté du tamis de décharge de 0,5 mm, l'ensemble étant placé au-dessus du bécher de 3 l. Rincer, pour faire passer la totalité du matériau restant dans le bac avec l'eau qui reste dans la pissette.

Sécher et peser les refus des deux tamis, soit M cette masse.

La masse réelle q de fines soumises à l'essai est donnée par la formule :

$$q = \frac{100 M_h}{100 + w} - M$$

Après avoir isolé les fines ajouter dans le bécher 30 g de kaolinite de valeur de bleu connue V_{BtaK} .

Le volume v' , exprimé en ml, de solution de bleu adsorbée par cette kaolinite est donné par la formule :

$$v' = 30 V_{BtaK}$$

L'ensemble eau + fines + kaolinite, est soumis à une agitation de cinq minutes à 600 tr/min, puis permanente à 400 tr/min, pendant toute la durée de l'essai à l'aide de l'agitateur, les ailettes étant situées à 1 cm au-dessus du fond du récipient.

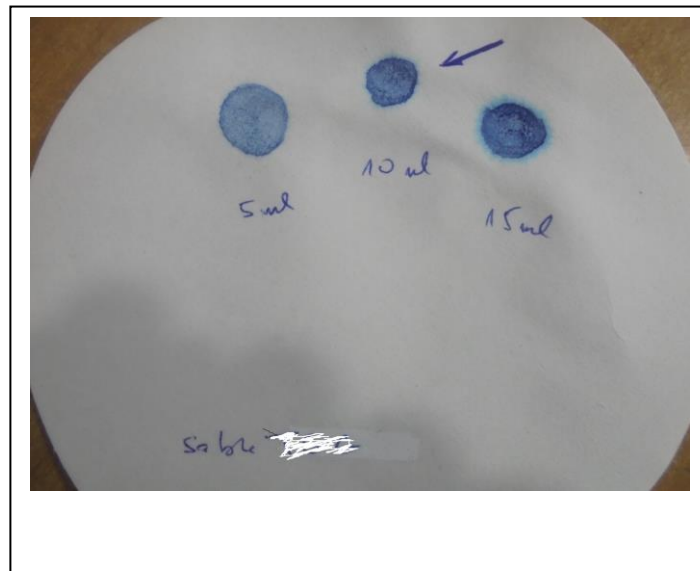


Figure II.14 : Essai bleu de méthylène.

Valeur de bleu

La valeur de bleu des fines VBta exprimée en grammes de bleu pour 100 g de fines est donnée par la formule :

$$V_{Bta} = \frac{V_1 - v'}{q}$$

V1 étant le volume final de solution injectée, en ml,

v' volume de solution de bleu kaolinite,

q masse réelle de fines soumises à l'essai.

Les valeurs de bleu de méthylène de sable utilisés dans notre étude sont résumées dans le tableau suivant :

	Sable Naturel
M: masse de la prise d'essai (g)	100
V: volume de la solution de bleu utilisé jusqu'à l'obtention du test positif (ml)	10
VB = V/M : Valeur de bleu (ml/g)	0,10

Tableau II.11 : Valeur de bleu de méthylène.

II.2.1.f Analyse chimique (la norme BS 1377 et NF EN 1008):**But de l'essai :**

Le but de l'analyse chimique est de déterminer les valeurs des agents agressifs (CaCo3, Insoluble, sulfates et Chlorures) dans les agrégats

Les valeurs de l'analyse chimique des agrégats utilisés dans notre étude sont exprimées dans le tableau suivant :

		Paramètres					
		CaCo3 (%)	Insoluble (%)	Cl ⁻ (mg)	CaSO4.2H2O (%)	So3 ²⁻ (%)	So4 ²⁻ (mg/l)
	Sable Naturel	1,97	96,03	0,014	0,61	0,28	33,75
Résultats acceptés et conformes aux normes							

Tableau II.12 : Analyse chimique de sable.

II.2.2 Le Gravier :

Le gravier utilisé dans notre étude est un gravier fourni de la centrale de concassage de BENBRAHIM, situé à 30km à l'ouest de la ville de HASSI MESSAOUD (entre HASSI MESSAOUD et OUARGLA).

Deux fractions de gravier ont été utilisées dans notre étude 8/15 et 3/8.



Figure II.15 : Gravillons utilisés

Les caractéristiques physiques et chimiques du gravier utilisé sont détaillées ci-après.

II.2.2.a Analyse granulométrique du gravier : (la norme NF P 18 -560)

Les résultats d'analyse granulométrique des graviers sont exprimés dans les tableaux suivants :

TAMIS (mm)	POIDS	POIDS CUMULEE	% DE REFUS	% DE TAMISAT	Préparation d'échantillon
50					Poids total avant lavage:
40	0	0	0,00	100	3000
31,5	0	0	0,00	100	Poids Total après lavage:
25	0	0	0,00	100	-
20	0	0	0,00	100	Température de séchage
16	149,6	149,6	4,99	95	75°
12,5	914	1063,6	35,45	65	OBSERVATION : - Gravier compris en totalité dans le fuseau de référence de la classe 8/15.
10	863,5	1927,1	64,24	36	
8	479,8	2406,9	80,23	20	
6,3	336,3	2743,2	91,44	9	
5	21,2	2764,4	92,15	8	
4	10,1	2774,5	92,48	8	
2,5	4,8	2779,3	92,64	7	
1,25	1,1	2780,4	92,68	7	
0,63	0	2780,4	92,68	7	
0,315					
0,16					
0,08					
< 0,08					

Tableau II.13 : Analyse granulométrique du gravier 8/15

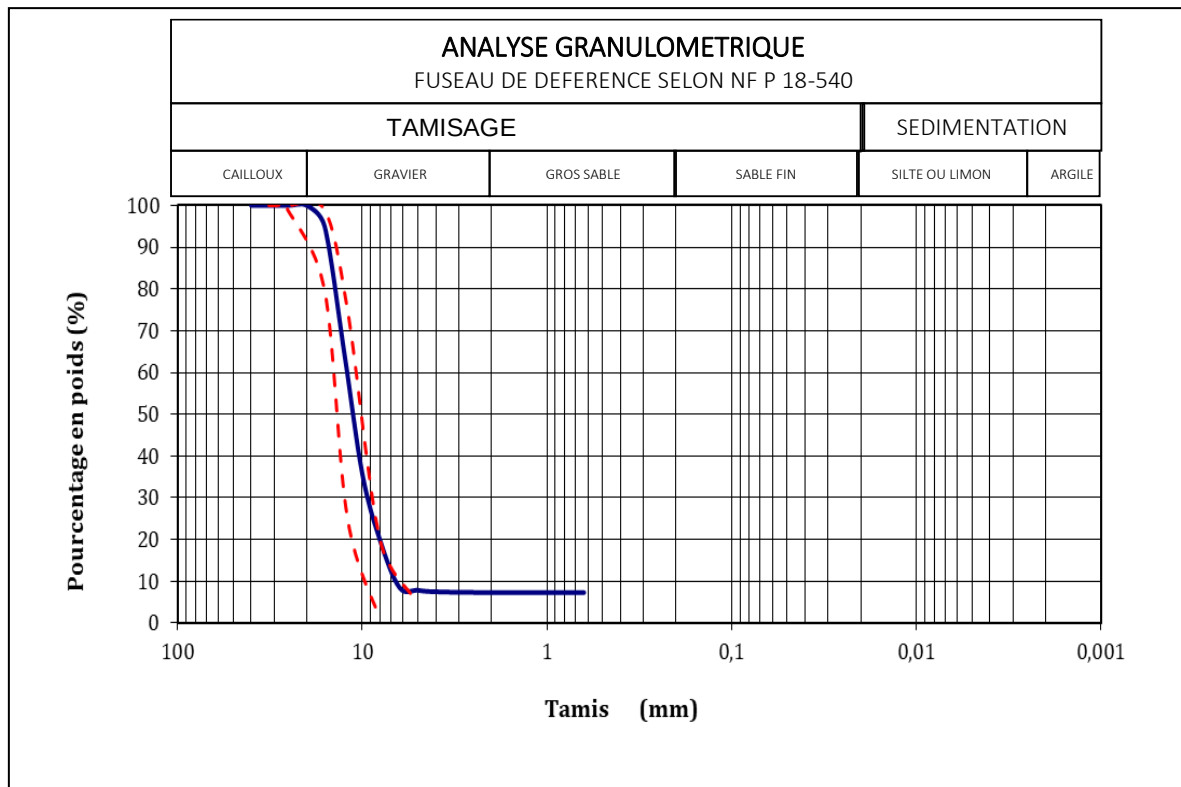


Figure II.16 : Courbe granulométrique du gravier 8/15.

TAMIS (mm)	POIDS	POIDS CUMULEE	% DE REFUS	% DE TAMISA T	Préparation d'échantillon
50					Poids total avant lavage:
40	0	0	0,00	100	1600
31,5	0	0	0,00	100	Poids Total après lavage:
25	0	0	0,00	100	-
20	0	0	0,00	100	Température de séchage
16	0	0	0,00	100	75°
12,5	0	0	0,00	100	OBSERVATION : - Gravier compris en totalité dans le fuseau de référence de la classe 3/8,
10	0	0	0,00	100	
8	1,8	1,8	0,11	99	
6,3	310	311,8	19,49	81	
5	380,9	692,7	43,29	57	
4	682	1374,7	85,92	14	
2,5	170,4	1545,1	96,57	3	
1,25	18,2	1563,3	97,71	2	
0,63	0,7	1564	97,75	2	
0,315	0,5	1564,5	97,78	2	
0,16	4,7	1569,2	98,08	2	
0,08	1,8	1571	98,19	2	
< 0,08	0,2	1571,2			

Tableau II.14 : Analyse granulométrique du gravier 3/8.

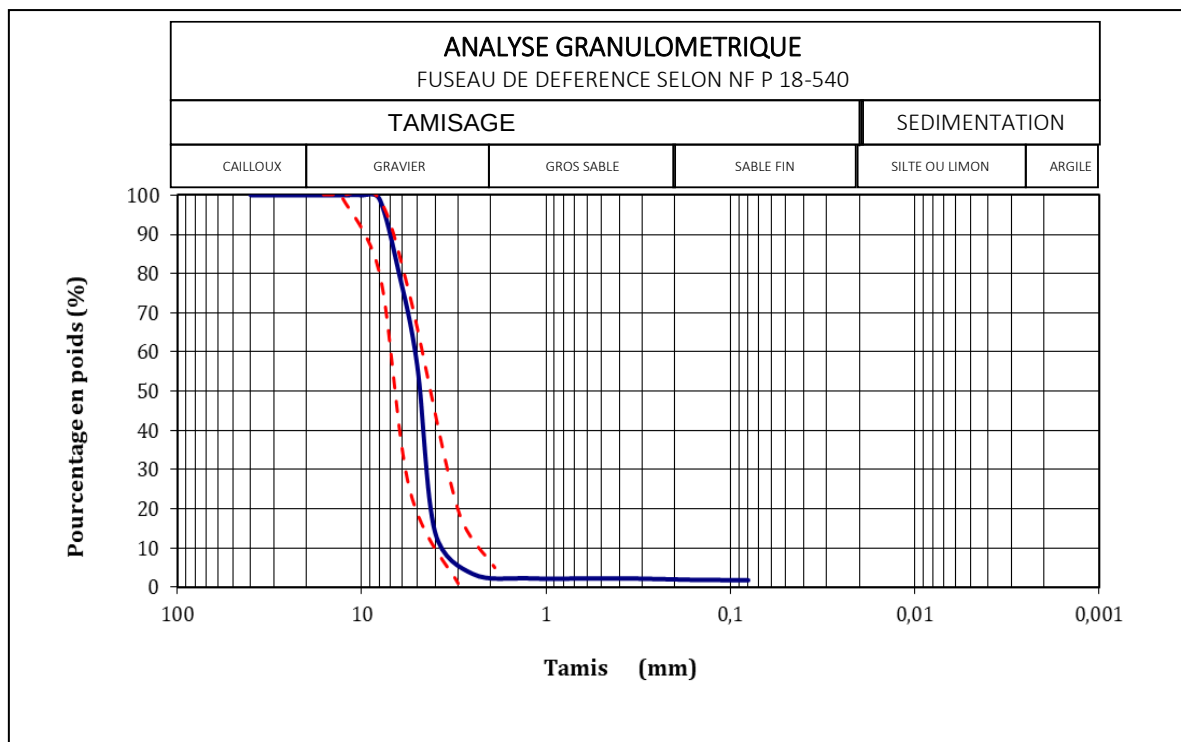


Figure II.17 : Courbe granulométrique du gravier 3/8.

II.2.2.b Masse volumique absolue et apparente (la norme NF P 18 -555):

Les valeurs de masses volumiques apparentes et absolues du sable utilisé dans notre étude sont exprimées dans le tableau suivant :

ESSAI	UNITE	RESULTATS	
		8/15	3/8
A. Poids d'échantillon sec en air	g	351,7	339
B. Poids de pycnomètre + d'eau	g	1884,3	1884,3
C. Poids de pycnomètre + d'eau + échantillon	g	2104,8	2096,9
D. Le poids de l'échantillon saturé (surface séché)	g	357,1	344,9
Masse volumique apparent (four sec) $A / (B + D - C)$	-	2,57	2,56
Masse volumique absolu : $D / (D + B - C)$	-	2,61	2,61
Masse volumique apparent	-	1,29	1,26
L'absorption $(D - A) / A * 100$	%	1,54	1,74

Tableau II.15: Masses volumiques du gravier.

II.2.2.c Propreté superficielle (la norme NF P 18 -591):

L'essai consiste à déterminer la propreté superficielle des granulats supérieurs à 2 mm par élimination des poussières et des particules argileuses inférieures à 0,5 mm. L'élimination est réalisée par lavage de l'échantillon sur le tamis correspondant. Le rapport du passant à 0,5 mm au poids total de l'échantillon représente la propreté superficielle des gravillons :

Classe granulaire	8/15	3/8	
Poids Total (P1)	3000	1600	P ≤ 5 %
Poids seche (refus du tamist 0,4 après lavage) (P2)	2945	1564	
Propreté (%)= (P1-P2) X 100 / P2	1,87	2,30	
OBS	le gravier est de propreté admissible pour béton de qualité courant		

Tableau II.16: Propreté du gravillon.**II.2.2.d Los Angeles (la norme NF P 18 -573):**

L'essai Los Angeles consiste à mesurer la masse m d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite par fragmentation du matériau testé de classe granulaire (10/14), soumis aux chocs d'une charge de 11 boulets par la mise en rotation du cylindre de la machine Los Angeles de 500 tours. Le coefficient Los Angeles (LA) est le pourcentage du rapport de la masse m par le 5kg du matériau testé :

$$LA = 100(m/5000)$$

**Figure II.18 :** L'appareil de Los Angeles .**Figure II.19 :** Etapes de l'essai de Los Angeles.

LA trouvé pour notre gravillon est égal à 28%, donc le gravillon est classé comme un matériau moyen.

II.2.2.e Coefficient d'aplatissement (la norme NF P 18 -561):

But de l'essai

La mesure du coefficient d'aplatissement (CA) caractérise la forme des granulats. Le CA s'obtient en faisant une double analyse granulométrique par voie sèche, en utilisant successivement, et pour le même échantillon de granulats :

- une série de tamis normalisés à mailles carrées,
- une série de tamis (grille) à fentes parallèles de largeurs normalisées.

Plus les gravillons sont plats, moins leur mise en place dans la route ou dans les bétons est facile et plus ils sont fragiles. Il est donc important de contrôler le coefficient d'aplatissement de chaque granulométrie.

Principe de l'essai

La forme d'un élément est définie par trois dimensions principales :

- Longueur L = le plus grand écartement d'un couple de plans tangents parallèles.
- Épaisseur E = le plus petit écartement d'un couple de plans tangents parallèles.
- Grosseur G = dimension de la maille carrée minimale à travers laquelle passe l'élément.

Le coefficient d'aplatissement A d'un lot de granulats soumis à l'essai est, par définition, le pourcentage

$$\frac{G}{E} > 1,58$$

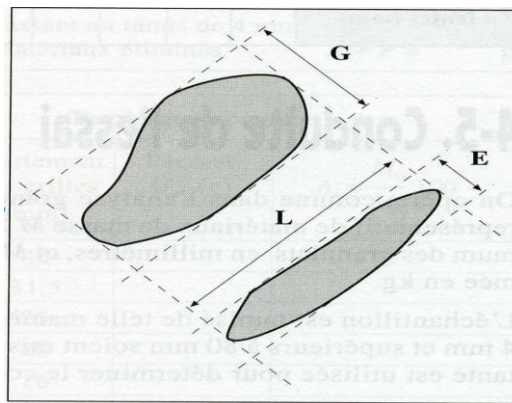


Figure II.20 : Forme granulaire.

L'essai consiste à effectuer un double tamisage :

- Tamisage sur tamis à mailles carrées, pour classer l'échantillon étudié en différentes classes d/D (avec D = 1,25 d), suivant leur grosseur G.

- Puis tamisage des différentes classes granulaires d/D , sur des grilles à fentes parallèles d'écartement :

$$\frac{d}{1,58}$$

Le coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire d/D correspond au passant du tamisage sur la grille à fentes d'écartement $d/1,58$, exprimé en pourcentage.

Le coefficient d'aplatissement global de l'échantillon est égal à la somme pondérée des coefficients d'aplatissement des différentes classes granulaires d/D composant l'échantillon.

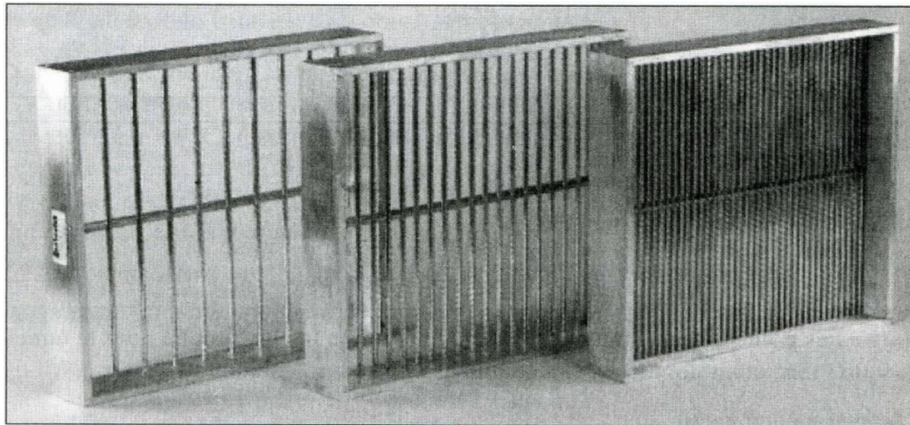


Figure II.21 : Tamis pour essai d'aplatissement.

Les valeurs des Coefficient d'aplatissement des gravillons utilisés dans notre étude sont exprimées dans le tableau suivant :

Tamisage sur tamis		Tamisage sur grilles		
Poids total (g) =	3000	Poids après lavage (g) =	2775	
Classes granulaires d/D (mm)	Mg (g)	Ecartement des grilles (mm)	passant Me (g)	Me / Mg x 100
> 50				
40 - 50				
31,5 - 40				
25 - 31,5	0	16	0,00	0,00
20 - 25	0	12,5	0,00	0,00
16 - 20	149,6	10	16,20	10,83
12,5 - 16	914	8	180,60	19,76
10 - 12,5	863,5	6,3	195,50	22,64
8 - 10	479,8	5	122,70	25,57
6,3 - 8	336,3	4	91,70	27,27
5 - 6,3	21,2	3,15	4,60	21,70
4 - 5	10,1	2,5	2,40	23,76
M = $\sum Mg$ =	2774,50	$\sum Me$ =	613,70	
A = $\sum Me / M \times 100$ =		20,46		
Commentaire: Le coefficient d'aplatissement =	20	< 30 ; acceptable pour utilisation en béton		

Tableau II.17: Coefficient d'aplatissement du gravier 8/15.

Tamisage sur tamis		Tamisage sur grilles		
Poids total (g) =	1600	Poids après lavage (g) =		1375
Classes granulaires d/D (mm)	Mg (g)	Ecartement des grilles (mm)	passant Me (g)	Me / Mg x 100
> 50				
40 - 50				
31,5 - 40				
25 - 31,5	0	16	0,00	#DIV/0!
20 - 25	0	12,5	0,00	#DIV/0!
16 - 20	0	10	0,00	#DIV/0!
12,5 - 16	0	8	0,00	#DIV/0!
10 - 12,5	0	6,3	0,00	#DIV/0!
8 - 10	1,8	5	1,10	61,11
6,3 - 8	310	4	99,70	32,16
5 - 6,3	380,9	3,15	123,70	32,48
4 - 5	682	2,5	243,10	35,65
$M = \sum Mg =$	1374,70	$\sum Me =$	467,60	
$A = \sum Me / M \times 100 =$		29,23		
Commentaire: Le coefficient d'aplatissement =	29	< 30 ; acceptable pour utilisation en béton		

Tableau II.18: Coefficient d'aplatissement du gravier 3/8.

II.2.2.f Analyse chimique du gravier (la norme BS 1377 et NF EN 1008)

Les valeurs d'analyse chimique des gravillons utilisés dans notre étude sont exprimées dans le tableau suivant :

		Paramètres					
		CaCO ₃ (%)	Insoluble (%)	Cl ⁻ (mg)	CaSO ₄ 2H ₂ O (%)	SO ₃ ²⁻ (%)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)
	3/8	59,39	29,69	0,028	3,80	1,76	211,54
	8/15	49,77	29,20	0,023	3,06	1,42	170,38

Tableau II.19: Analyse chimique des gravillons.

II.2.3 Eau de gâchage (la norme NF EN 1008)

L'eau utilisée dans le mélange de béton, doit être pure, propre, exempte de sels et de matières organiques, pour notre cas on a utilisé une eau obtenue d'un puit d'eau. Les résultats d'analyse chimique d'eau utilisés dans notre mélange sont exprimés dans le tableau suivant :

Examens préliminaires	Indication
Indication sur la couleur.	Absence.
Indication sur l'odeur.	Absence.
Goût.	Absence.
Huiles et graisses.	Absence.
Détergents.	Absence.

Tableau II.20:Examens préliminaire d'eau de gâchage.

Paramètres	Résultats d'analyses	Limite Norme NF EN 1008 Juillet 2003	Interprétation
Sulfates $[SO_4^{2-}]$ mg/l méthode d'essai 6.1.1	645,31	< 2000 mg/l	Conforme NF
Chlorures $[Cl^-]$ mg/l méthode d'essai 6.1.1	163,3	Béton précontraint <500 mg/l	Conforme NF
		Béton armé < 1000 mg/l	
		Béton non armé <4500	
Matières humiques méthode d'essai 6.1.2	-	Test de coloration	-
pH méthode d'essai 6.1.1	7.70	≥ 4	Conforme NF

Tableau II.21: Analyse chimique d'eau de gâchage.

II.2.4 Ciment

Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment portland composé CRS CEM I 42,5 R/SR5 selon la norme NA442, provenant de la cimenterie de AIN TOUTA, la fiche technique du ciment est donnée en annexe1.



Figure II.22 : Sac de 50Kg de ciment CRS utilisée.

II.2.5 Adjuvants

L'adjuvant utilisé dans notre étude est un superplastifiant / haut réducteur d'eau polyvalente de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique. Compatible avec tous les ciments même avec un taux C3A faible.

Le nom commercial de l'adjuvant utilisé est **Sika Viscocrete 665**, la fiche technique de l'adjuvant est donnée en annexe.

II.3 Formulation de béton

II.3.1 Préambule

Il n'existe pas de méthode actuellement de composition des mélanges qui soit bonne et vraie scientifiquement ; MR TEYCHENNE (un ingénieur anglais) a écrit que « les méthodes les plus pratiques de calcul des mélanges reposent sur des règles empiriques dérivant de recherches expérimentales. Ces règles sont fondées sur certaines hypothèses concernant les propriétés des matériaux utilisés ; on ne peut prétendre qu'un « calcul » de mélange permette d'aboutir au béton exactement désiré ; en fait le calcul du mélange est habituellement la première approche de préparation de mélanges d'essais ».

Dans notre étude nous avons utilisés la méthode de DREUX – GORISSE .

II.3.2 Methode De Dreux – Gorisse

II.3.2.a Principe De La Méthode

DONNEES DE BASE	
DIMENSION DES GRANULATS	$D_{\max} = 20 \text{ mm}$
RESISTANCE DESIREE	Elle est définie par la résistance caractéristique « f_{c28} » obtenue par compression de cylindres (éprouvettes cylindriques $\varnothing = 16 \text{ cm}$ et $H = 32 \text{ cm}$). $f_{c28} = 35 \text{ Mpa} \times 1.2$ (majoration de 20 %) Donc « f_{c28} » = 42 Mpa
CONSISTANCE DESIREE	5 cm < A < 10 cm Sant adjuvant et 11 cm < A < 18 cm avec adjuvant de type fluidifiant.

Tableau II.22: Données de base pour formulation du béton.

II.3.2.b Dosage En Ciment :

Le dosage en ciment est fixé indépendamment de l'étude granulaire.

Dans la méthode de « DREUX-GORISSE » ; on détermine à partir d'une résistance et d'une plasticité désirées, une valeur approximative du dosage en ciment et du dosage en eau ; on utilise la formule de BOLOMEY ; $f_{C28} = G \sigma'_c (C/E - 0.5)$

A partir de cette formule; on déduit une valeur approximative du rapport « C/E » ; puis par des ABAQUE on détermine « C » et « E » en fonction de « C/E », de la résistance, et de la plasticité désirée.

- σ'_c : classe de résistance réelle du ciment .
- C : dosage en ciment par mètre cube de béton en œuvre ;
- E : dosage en eau totale par mètre cube de béton en œuvre ;
- G : est un coefficient granulaire dépendant de la dimension et surtout de la nature minéralogique (adhérence plus ou moins bonne).

Valeurs Approximatives Du Coefficient Granulaire G : Ces valeurs supposent que le serrage du béton sera effectué par VIBRATION.

QUALITE DES GRANULATS	GRANULATS FINS D <16 mm	GRANULATS MOYENS 25 < D <40 mm	GROS GRANULATS D >63 mm
EXCELLENTE	0.55	0.60	0.65
COURANTE	0.45	0.50	0.55
PASSABLE	0.35	0.40	0.45

Tableau II.23: Valeur du coefficient Granulaire G.

Dans le cadre de notre étude ; nous avons affaire à des GRANULATS COURANTS de qualité BONNE avec des dimensions correspondants à des GRANULATS MOYENS ; ce qui nous autorise à considérer pour le coefficient G ; la valeur encadré en rouge ; **G = 0,45.**

A partir de la formule de BOLOMEY ; $f_{C28} = G \sigma'_c (C/E - 0,5)$

1- Avec : G = 0,45 ; $\sigma'_{C28} = 42.5$ Mpa et $f_{C28} = 42$ Mpa ; on en tire le rapport E/C ;

$$C/E = [(420) / (0,45 * 425)] + 0,5 = 2,69 \text{ et } E/C = 0,37$$

Le dosage du ciment proposé par le client est C = 450 Kg/m³.

II.3.2.c Dosage En Eau :

Ayant fait le choix du dosage en ciment « C », on déduit alors, d'après le rapport « C/E », le dosage approximatif en eau totale – (déterminée pour des matériaux supposés secs)- à prévoir mais qu'il conviendra d'ajuster ultérieurement par quelques essais de plasticité et d'ouvrabilité. La quantité d'eau à ajouter sur les granulats humides est obtenue en déduisant de la teneur en eau totale celle contenue dans les granulats ; un SABLE 0/3 d'apparence humide peut contenir entre 40 et 60 L/m³ ; un granulat 8/15 d'apparence humide peut contenir entre 20 et 40 L/m³.

Dans notre cas les granulats sont tout à fait secs.

REMARQUE IMPORTANTE : Après avoir approximativement évalué le dosage en eau par une règle la plus simple possible ; il sera très facile au cours des essais d'étude et de convenance, par quelques mesures d'affaissement au cône, de déterminer avec une précision suffisante le dosage en eau nécessaire pour obtenir effectivement en pratique un béton de la plasticité désirée ; principal objectif en définitive, de ce dosage en eau.

Les dosages de ciment et en eau maintenus sont :

TYPE DE BETON	CIMENT		E/C	DOSAGE EN EAU
	TYPE	DOSAGE		
Béton C 35/45	CRS CEM I 42,5 R/SR5	450	0,37	166.5

Tableau II.24 : Dosage en ciment et en eau

Cette valeur correspond à un dosage en eau total théorique sur granulats secs. Le dosage en eau réel sera celui ajusté expérimentalement pour obtenir la consistance désirée.

II.3.2.d Dosage Des Granulats :

- Sur un graphique d'analyse granulométrique type AFNOR (linéaire en module et logarithmique en dimensions des granulats), on trace une composition granulaire de référence OAB ; le point « B » (à l'ordonnée 100%) correspond à la dimension « D » du plus gros granulat et le point de brisure « A » à des ordonnées définies ci-dessous.
- On applique la règle de FAURY fixant l'abscisse du point de brisure de la courbe de référence au milieu de « segment gravier » limite par le module au (5 mm) et le module correspondant à D (D étant la dimension maximale des grains) ;

- **Dmax = 20 mm ; abscisse = 10 mm**
- L'ordonnée Y du point de brisure est déterminée par référence à une règle expérimentale mise au point au Laboratoire des bétons du CES (France) ; et qui s'établit ;
- $Y = 50 - (D)^{1/2} + K + K_s + K_p$
- K est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés et également du module de finesse du sable.
-

VIBRATION	FAIBLE	FAIBLE	NORM.	NORM.	FORTE	FORTE
FORME DES GRANULATS	ROULE	CONC.	ROULE	CONC.	ROULE	CONC.
Dosage.Cim. 400	0	+2	-2	0	-4	-2
350	+2	+4	0	+2	-2	0
300	+4	+6	+2	+4	0	+2
250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
200	+8	+10	+6	+8	+4	+6
400 + Fluide	-2	0	-4	-2	-6	-4

Tableau II.25: Valeurs du terme correcteur et de ses compléments k.

$K_p = +5$ à 10 environ selon le degré de plasticité désiré (pour béton pompé)

$K_s = 6M_f - 15$ (K_s serait considéré uniquement dans le cas de sable grossier)

- **Coefficient De Compacite**

Ce coefficient γ est ainsi défini : c'est le rapport à 1 m^3 du volume absolu des matières solides (ciment et granulats) réellement contenues dans 1 m^3 de béton frais en œuvre. On choisira une valeur approximative de γ dans le tableau ci-après ;

CONSISTANCE	SERRAGE	D = 12.5	D = 20	D = 31.5
MOLLE	FERME	0.795	0.805	0.810
	VIBRAT. FAIBLE	0.800	0.810	0.815
	VIBRAT. NORMA.	0.805	0.815	0.820
	PIQUAGE	0.805	0.815	0.820
PLASTIQUE	VIBRAT. FAIBLE	0.810	0.820	0.825
	VIBRAT. NORMA.	0.815	0.825	0.830
	VIBRAT. PUISST.	0.820	0.830	0.835
FERME	VIBRAT. FAIBLE	0.820	0.830	0.835
	VIBRAT. NORM.	0.825	0.835	0.840
	VIBRAT. PUISST.	0.830	0.840	0.845

Tableau II.26: Valeurs des coefficients de compacité.

- **Pourcentage Des Différents Granulats**

La courbe granulaire de référence OAB doit être tracée sur le même graphique que les courbes granulaires des granulats composants. On trace alors les lignes de partage entre chacun des granulats en joignant le point à 95% de la courbe granulaire du premier, au point de 5% de la courbe du granulat suivant, On lira alors sur la courbe de référence, au point de croisement avec la ou les droites de partage, le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats « g₁ », « g₂ » et « g₃ » ; « g₁ » correspondant à la fraction granulaire du gravier 8/15, « g₂ » correspondant à la fraction granulaire du gravier 3/8 et « g₃ » correspondant à la fraction granulaire du sable .

- **Courbe Granulaire De Reference**

- **Coordonne du point de brisure de la courbe de référence :**

$$X = 10 \text{ mm} \quad \text{et} \quad Y = 50 - (D)^{1/2} + K + K_s + K_p$$

TYPE BETON	DE	D _{max} (mm)	Abscisse	K	K _s	K _p	Y = 50 – (D) ^{1/2} + K
Béton C 37/45		20	10	+0	-1.68	7	50.85

Tableau II.27 : Valeurs du point de brisure de la courbe de référence.

Après avoir déterminé les coordonnées X et Y du point de brisure de la courbe de référence, les courbes granulaires seront tracées comme se suites :

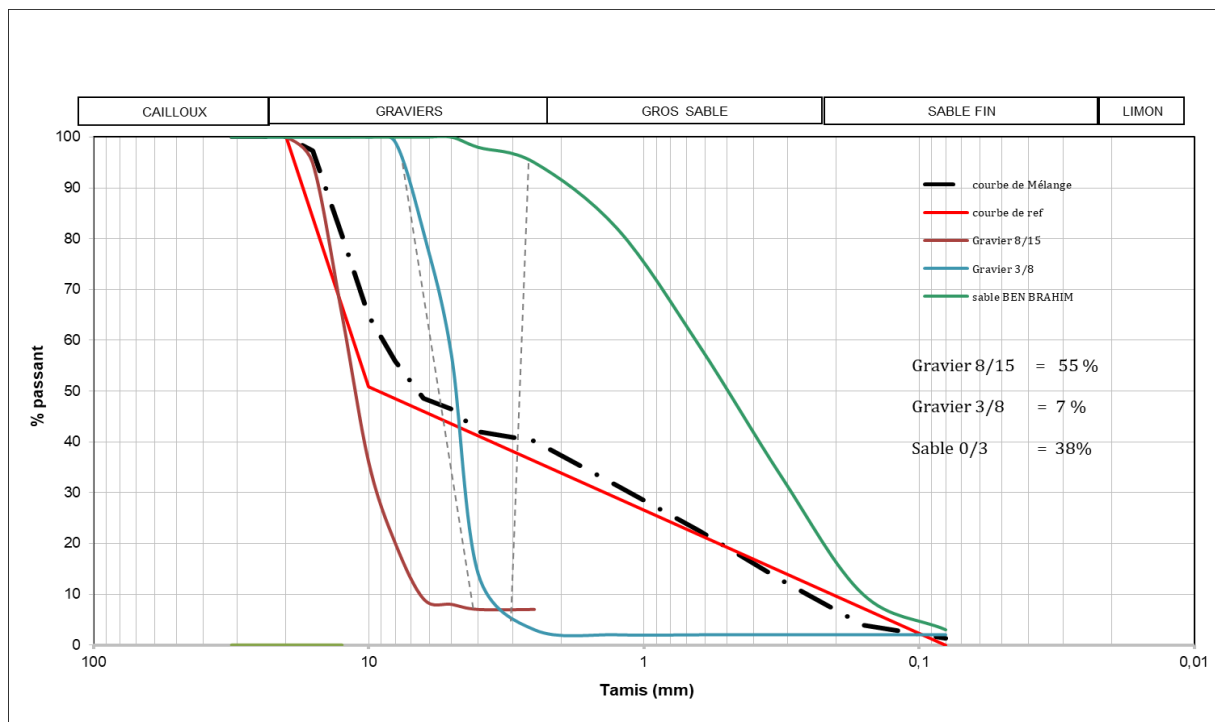


Figure II.23 : Courbe granulaire 100% sable naturel.

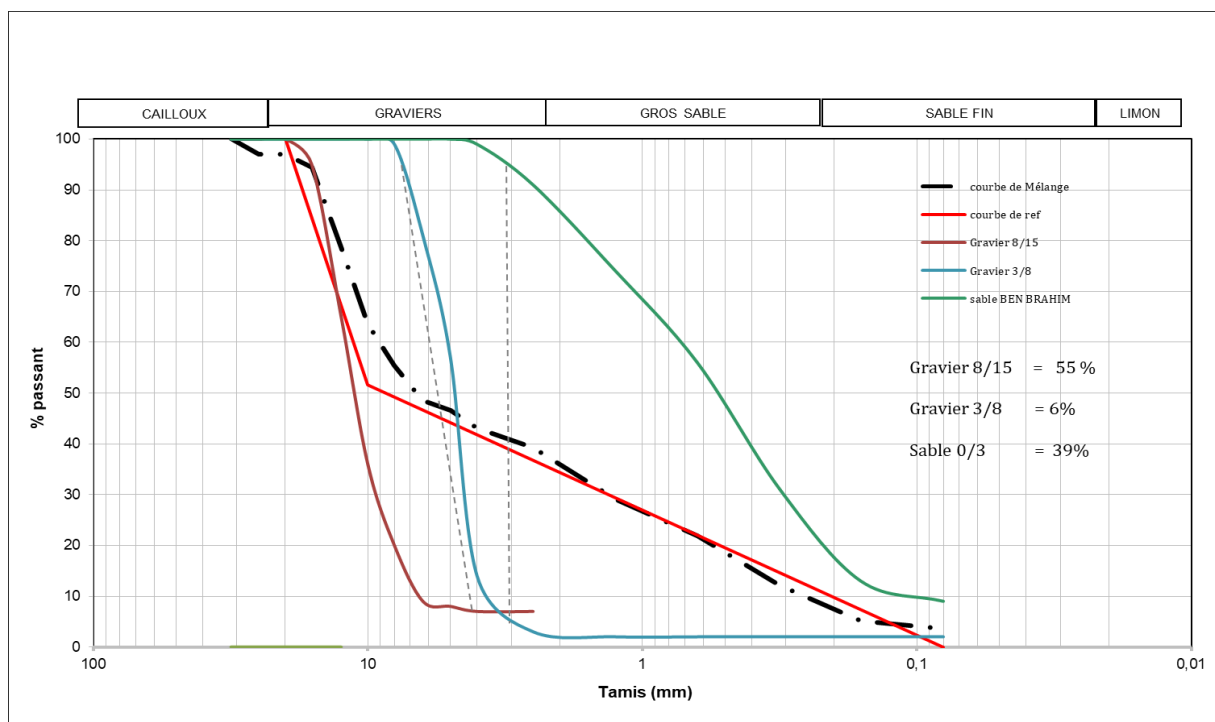


Figure II.24 : Courbe granulaire 40% sable concassé.

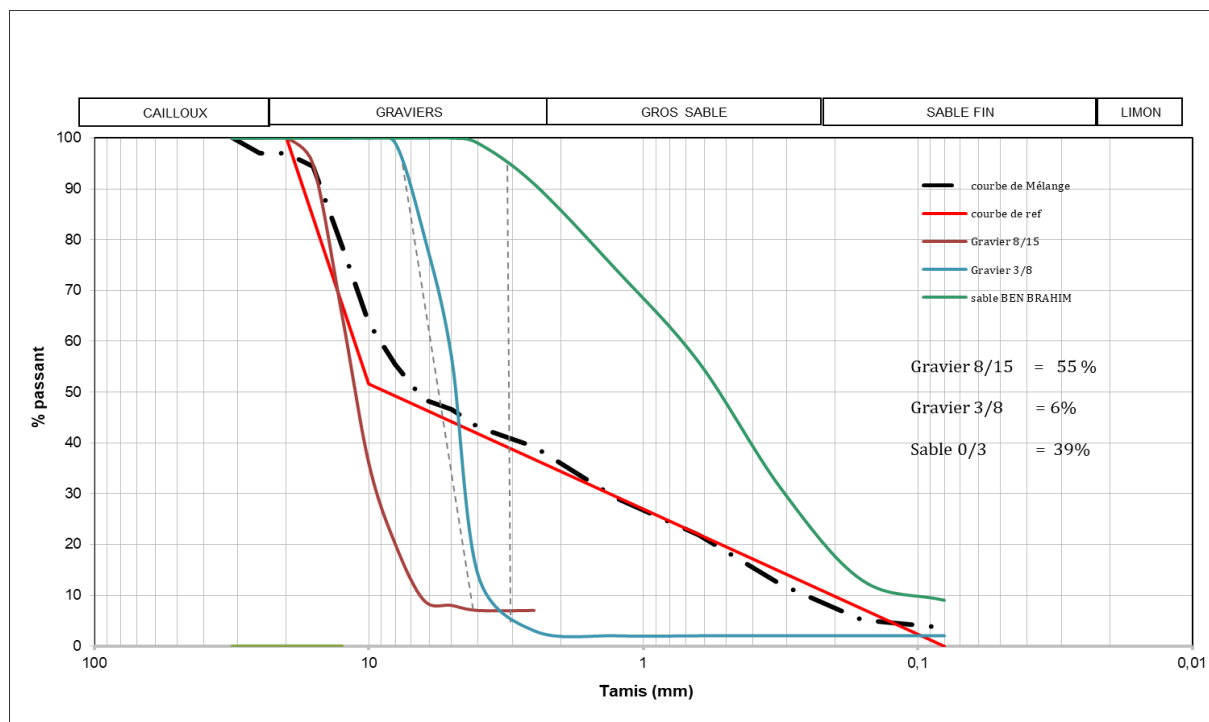


Figure II.25 : courbe granulaire 45% sable concassé.

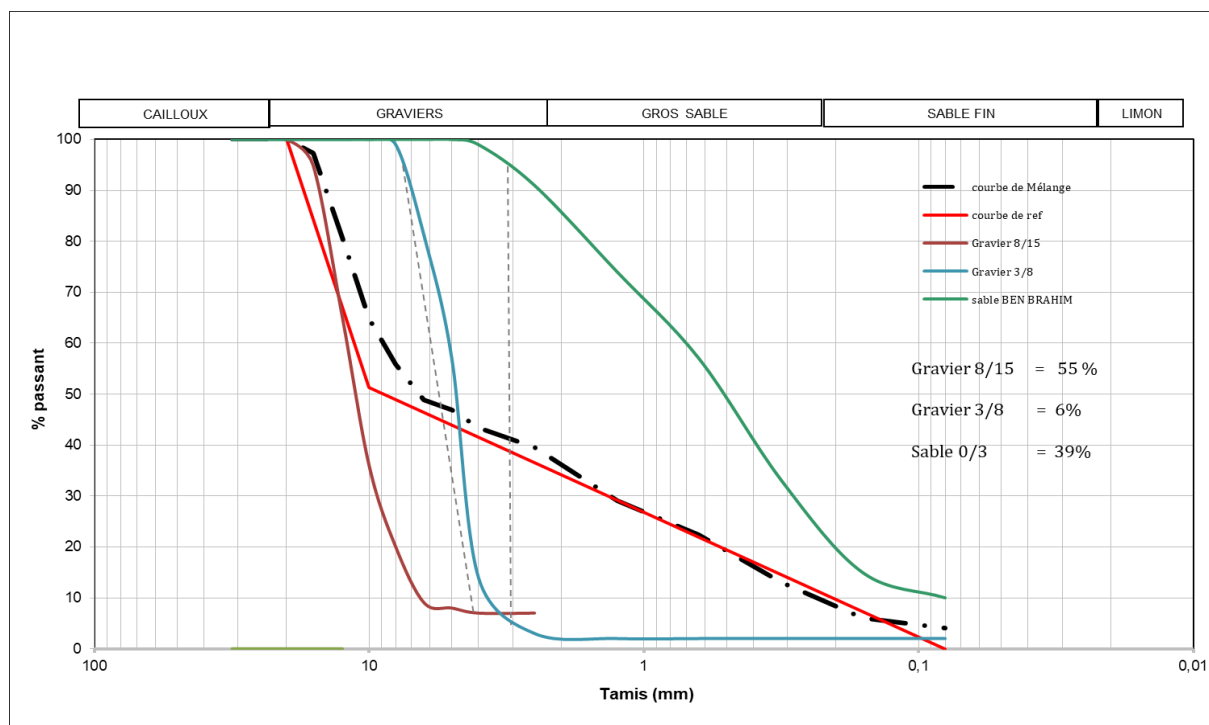


Figure II.26 : courbe granulaire 50 % sable concassé.

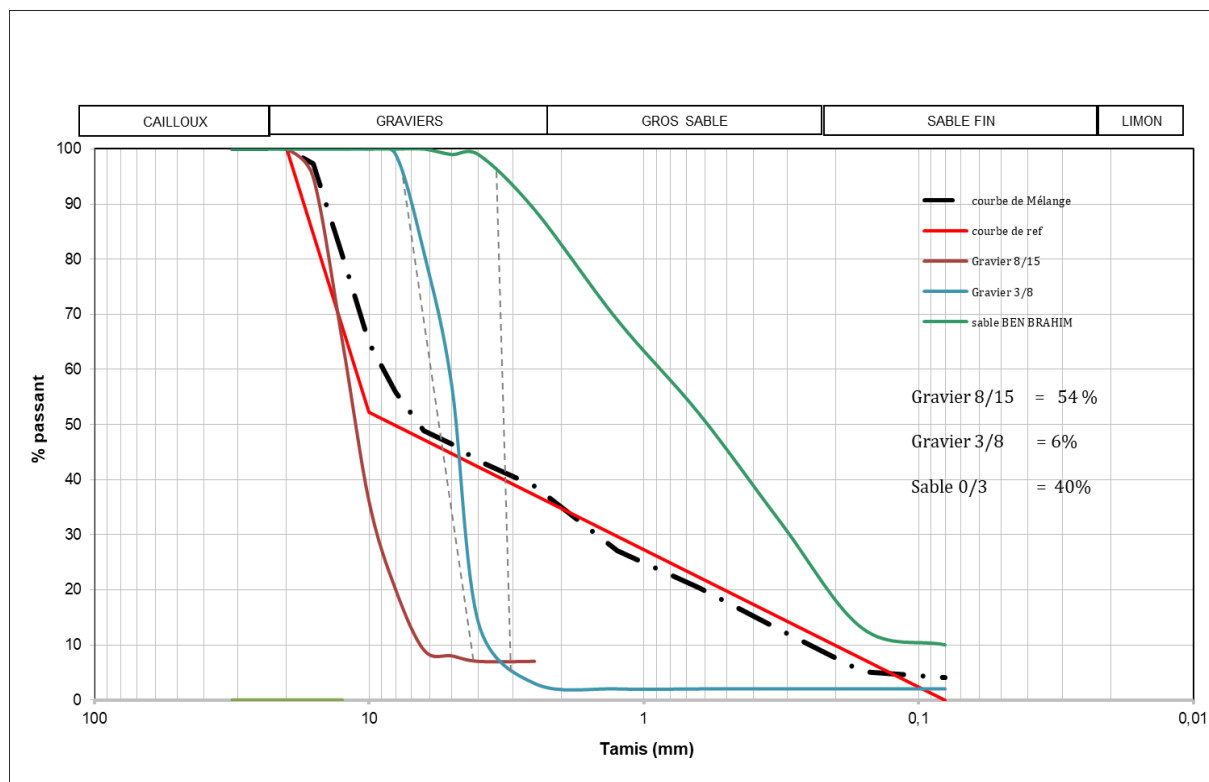


Figure II.27 : courbe granulaire 55% sable concassé.

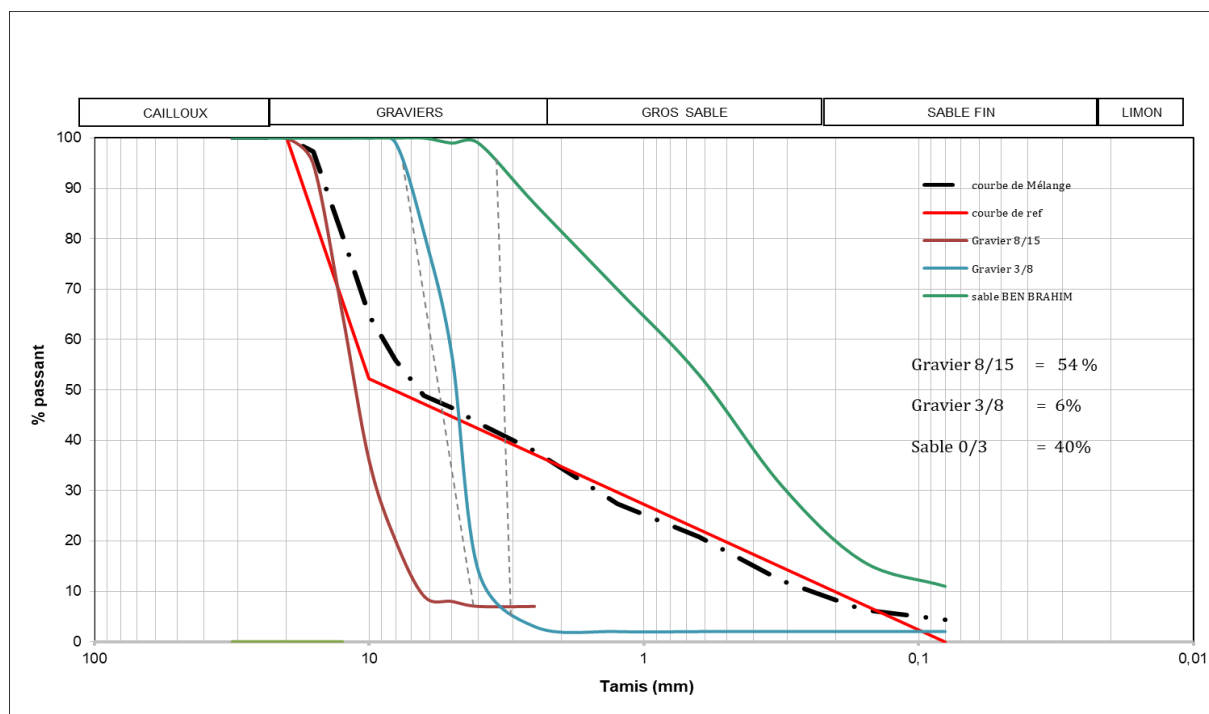


Figure II.28 : courbe granulaire 60% sable concassé.

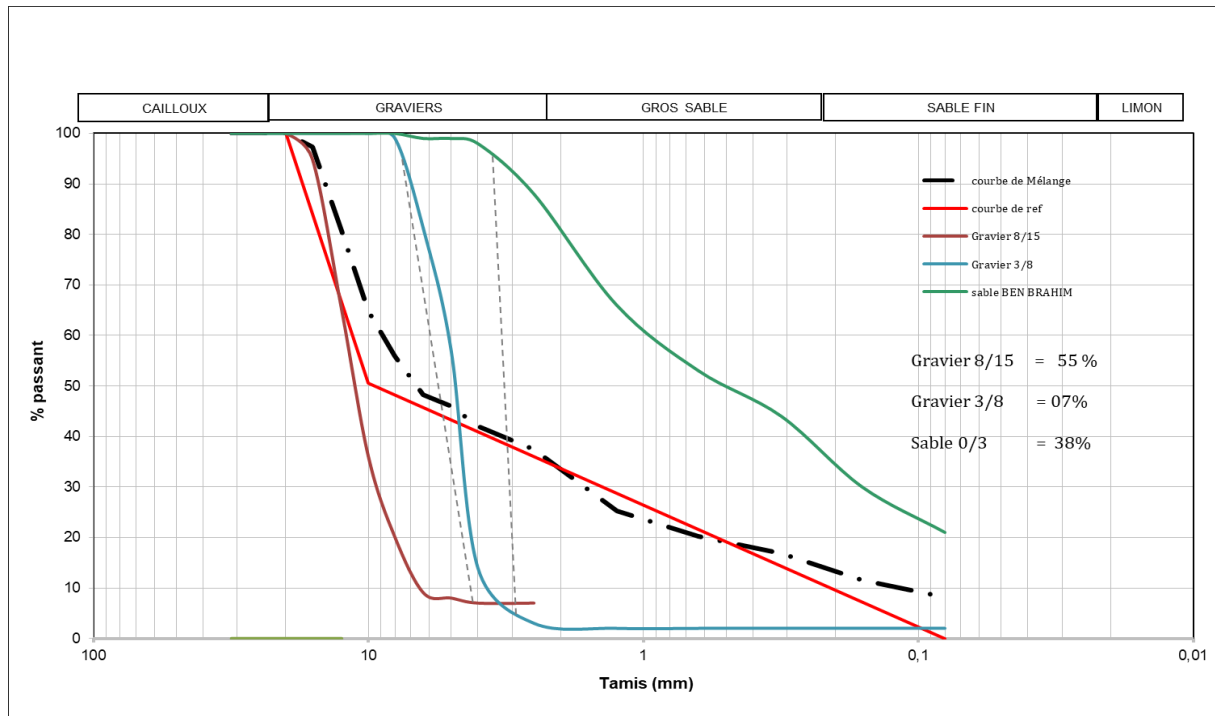


Figure II.29 : courbe granulaire 100% sable concassé.

II.3.2.e Etude De La Composition Du Béton

La formule de composition théorique calculée sera donc, pour 1 m³ de béton frais :

DOSAGE EN CIMENT : C (Kg)

DOSAGE EN EAU : E (L)

DOSAGE DES GRANULATS : P₁, P₂, et P₃ (Kg)

- **Essais D'étude** : La norme NF P 18-102 définit ainsi l'essai d'étude : « essai exécuté entièrement en laboratoire avec les constituants qui seront utilisés par le chantier, dans le but de déterminer la composition du béton étudié, compte tenu des caractéristiques demandées et des conditions de mise en œuvre ».
- La composition granulaire de référence étant définie d'après les règles précédentes ; on pourra alors réaliser divers essais d'étude de comportement, en particulier la fabrication de quelques éprouvettes de contrôle de résistance et permettant de juger d'un certain nombre de critères essentiels et de corriger éventuellement la formule de composition proposée.

- **RESISTANCE** : Les dosages en ciment et en eau étant déterminés approximativement à partir de la RESISTANCE DESIREE ; c'est par des essais que l'on vérifiera que la composition de référence donne bien la résistance désirée.

DESTINATION DU BETON	BETON ARME STRUCTURELLE DE QUALITE COURANTE	
TYPE DE CIMENT	CRS CEM I 42,5 R/SR5	
DONNEES DE BASE	DIMENSION MAXIMALE DES GRANULATS	20 mm
	CONSISTANCE MOYENNE DESIREE	A = 18 cm avec plastifiant
CARACTERISTIQUES DES CONSTITUANTS	RESISTANCE REELLE DU CIMENT	$\sigma'_{C28} = 42,5 \text{ Mpa}$
	MODULE DE FINESSE DU SABLE	MF = 2,22
	COEFFICIENT GRANULAIRE	G = 0,45
	• GRAVIER CONCASSE 8/15	2,57
	• GRAVIER CONCASSE 3/8	2,56
	• SABLE NATUREL 0/5	2,60
	CIMENT type CRS	3,10

Tableau II.28 : Récapitulatif caractéristiques des composantes de mélange avec 100% sable naturel.

Si « C » est le dosage en ciment, le volume absolu des grains de ciment est : **$C = C / 3.1$**

On choisira dans le tableau précédent une valeur convenable du coefficient de compacité γ en fonction de « D », de la consistance et de l'efficacité du serrage = **0,825**

Le volume absolu de l'ensemble des granulats est : **$V = 1000 \gamma - c$** .

Les volumes absolus de chacun des granulats sont par la suite :

$$V_1 = g_1 \times V ; \quad V_2 = g_2 \times V ; \quad V_3 = g_3 \times V ;$$

Si les masses spécifiques de chacun de ces granulats sont ω_1, ω_2 , et ω_3 les masses de chacun d'eux seront ;

$$P_1 = V_1 \times \omega_1 ; \quad P_2 = V_2 \times \omega_2 ; \quad P_3 = V_3 \times \omega_3 ;$$

- Il viendrait pour les volumes absolus pour la formulation du béton armé en infra et superstructure:

- VOLUME TOTAL ABSOLU : $1000 \times 0,825 = 825 \text{ L}$

- VOLUME ABSOLU DU CIMENT : $450 / 3,1 = 145,16 \text{ L}$

- VOLUME ABSOLU DES GRANULATS : $825 - 145.16 = 679.84$ L

- Les dosages des agrégats ou COMPOSITIONS ESCOMPTEES ; en poids (Kg) et en capacités (L) sont figuré sur les tableaux ci-dessous.

Composants	Pourcentage (%)	Volume Absolu "VA"	Masse Volumique Absolue	Poids en Kg	Masse volumique apparente kg/m^3	Poids en litre
Eaux		166,50	1	167	1,00	167
Ciment	-		3,1	450	1,25	360
Sable naturel	38	258,34	2,6	672	1,61	417
Gravier 8/15	55	373,91	2,57	961	1,30	739
Gravier 3/8	7	47,59	2,56	122	1,26	97
Adjuvant Sika viscocrete 665	1		-	4,50	1,09	4,15
DENSITE THEORIQUE DU BETON FRAIS EN ŒUVRE =				2,376	G/S = 1,63	

Tableau II.29 : Composition du béton pour mélange avec 100% sable naturel (M0).

Composants	Pourcentage (%)	Volume Absolu "VA"	Masse Volumique Absolue	Poids en Kg	Masse volumique apparente kg/m^3	Poids en litre
Eaux		166,50	1	167	1,00	167
Ciment	-		3,1	450	1,25	360
Sable modifier	39	265,14	2,627	697	1,67	417
Gravier 8/15	55	373,91	2,57	961	1,30	739
Gravier 3/8	6	40,79	2,56	104	1,26	83
Adjuvant Sika viscocrete 665	1		-	4,50	1,09	4,15
DENSITE THEORIQUE DU BETON FRAIS EN ŒUVRE =				2,383	G/S = 1,55	

Tableau II.30 : Composition du béton pour mélange avec 40% sable concassé (M1).

Composants	Pourcentage (%)	Volume Absolu "VA"	Masse Volumique Absolue	Poids en Kg	Masse volumique apparente kg/m^3	Poids en litre
Eaux		166,50	1	167	1,00	167
Ciment	-		3,1	450	1,25	360
Sable modifier	39	265,14	2,627	697	1,67	417
Gravier 8/15	55	373,91	2,57	961	1,30	739
Gravier 3/8	6	40,79	2,56	104	1,26	83
Adjuvant Sika visocrete 665	1		-	4,50	1,09	4,15
DENSITE THEORIQUE DU BETON FRAIS EN ŒUVRE =				2,383	G/S = 1,56	

Tableau II.31 : Composition du béton pour mélange avec 45% sable concassé (M2).

Composants	Pourcentage (%)	Volume Absolu "VA"	Masse Volumique Absolue	Poids en Kg	Masse volumique apparente kg/m^3	Poids en litre
Eaux		166,50	1	167	1,00	167
Ciment	-		3,1	450	1,25	360
Sable modifier	39	265,14	2,619	694	1,66	418
Gravier 8/15	55	373,91	2,57	961	1,30	739
Gravier 3/8	6	40,79	2,56	104	1,26	83
Adjuvant Sika visocrete 665	1		-	4,50	1,09	4,15
DENSITE THEORIQUE DU BETON FRAIS EN ŒUVRE =				2,381	G/S = 1,56	

Tableau II.32 : Composition du béton pour mélange avec 50% sable concassé (M3).

Composants	Pourcentage (%)	Volume Absolu "VA"	Masse Volumique Absolue	Poids en Kg	Masse volumique apparente kg/m^3	Poids en litre
Eaux		166,50	1	167	1,00	167
Ciment	-		3,1	450	1,25	360
Sable modifier	40	271,94	2,632	716	1,66	431
Gravier 8/15	54	367,11	2,57	943	1,30	726
Gravier 3/8	6	40,79	2,56	104	1,26	83
Adjuvant Sika visocrete 665	1		-	4,50	1,09	4,15
DENSITE THEORIQUE DU BETON FRAIS EN ŒUVRE =				2,385	G/S = 1,50	

Tableau II.33 : Composition du béton pour mélange avec 55% sable concassé (M4).

Composants	Pourcentage (%)	Volume Absolu "VA"	Masse Volumique Absolue	Poids en Kg	Masse volumique apparente kg/m^3	Poids en litre
Eaux		166,50	1	167	1,00	167
Ciment	-		3,1	450	1,25	360
Sable modifier	40	271,94	2,638	717	1,66	432
Gravier 8/15	54	367,11	2,57	943	1,30	726
Gravier 3/8	6	40,79	2,56	104	1,26	83
Adjuvant Sika viscocrete 665	1		-	4,50	1,09	4,15
DENSITE THEORIQUE DU BETON FRAIS EN ŒUVRE =				2,387	G/S = 1,50	

Tableau II.34 : Composition du béton pour mélange avec 60% sable concassé (M5).

Composants	Pourcentage (%)	Volume Absolu "VA"	Masse Volumique Absolue	Poids en Kg	Masse volumique apparente kg/m^3	Poids en litre
Eaux		166,50	1	167	1,00	167
Ciment	-		3,1	450	1,25	360
Sable modifier	38	258,34	2,66	687	1,48	464
Gravier 8/15	55	373,91	2,57	961	1,30	739
Gravier 3/8	7	47,59	2,56	122	1,26	97
Adjuvant Sika viscocrete 665	1		-	4,50	1,09	4,15
DENSITE THEORIQUE DU BETON FRAIS EN ŒUVRE =				2,391	G/S = 1,63	

Tableau II.35 : Composition du béton pour mélange avec 100% sable concassé (M6).

II.4 Mélange des bétons et préparation des échantillons

Notre étude consiste sur l'étude des caractéristiques du béton avec sable concassé en différents pourcentages 0%,40%,45%,50%,55%,60% et 100% , pour cela des mélanges du béton ont été effectués comme ce suit :

M0	—————>	100 % sable naturel et 0% de sable concassé (échantillon témoin).
M1	—————>	60 % sable naturel et 40% de sable concassé.
M2	—————>	55 % sable naturel et 45% de sable concassé.
M3	—————>	50 % sable naturel et 50% de sable concassé.
M4	—————>	45 % sable naturel et 55% de sable concassé.
M5	—————>	40 % sable naturel et 60% de sable concassé.
M6	—————>	100 % sable concassé.

II.4.1 Lavage des agrégats

Les agrégats utilisés (gravillons 8/15 et 3/8) ont été bien lavés et séchés avant de procéder au mélange du béton afin d'éliminer la poussière qui joue un rôle négative sur le résultat du béton.



Figure II.30 : Lavage des agrégats.

II.4.2 Mélange de béton et prélèvement des éprouvettes



Figure II.31 : Malaxage du béton.

Après avoir effectué un mélange pour chaque pourcentage, des éprouvettes de béton ont été pris comme suit :

Eprouvettes cubiques 150 x150x150 —————> pour test de compression.

Eprouvettes prismatiques 100x100x400 —————> pour test de flexion

Eprouvettes cylindriques D/110 et H/220 —————> pour test de traction (essai brésilien)

L'étude a été effectuée sur des échantillons à 7jours, 28jours et 60 jours.



Figure II.32 : Prélèvement des éprouvettes de béton.

II.5 Conservation des éprouvettes

Le démoulage a été fait 24 heures après la confection des éprouvettes. Afin de bien comprendre le comportement du béton vis-à-vis des agents agressifs et le rôle joué par l'addition de sable concassé au béton pour réduire la perméabilité du béton qui se relie positivement avec l'amélioration des caractéristiques mécaniques du béton, les échantillons de béton ont été soumis à deux modes de conservation. Le premier mode c'est la conservation des échantillons de chaque mélange dans un milieu agressif naturel (dans un tranché de drainage agricole à Touggourt). Les résultats d'analyse chimique de milieu agressif sont résumées dans le tableau suivant :

Paramètres	Boue	Eau
Sulfates [SO_4^{2-}] mg/l	5498.30	3697,37
Chlorures [Cl^-] mg/l	15620,0	5147,5
pH méthode	8,2	7,6

Tableau II.36 : Analyse chimique du milieu agressif.



Figure II.33 : Milieu agressif (tranché de drainage)

Le deuxième mode, c'est la conservation d'autres échantillons pour les mêmes mélanges dans l'eau non agressive aux conditions idéales dans le laboratoire (selon la norme NF EN 12390-2) afin de les utiliser comme références.



Figure II.34 : Conservation des éprouvettes dans le milieu non agressif

Les échantillons de béton sont soumis à des cycles de séchage-immersion, chaque cycle dur six jours, trois jours d'une immersion dans le milieu agressif suivi d'un séchage à l'air libre pendant trois jours.

II.6 Essais sur béton frais:

II.6.1 Température de béton

Après chaque malaxage d'un mélange, une mesure de température du béton a été effectuée, sachant que la température idéale pour obtenir un bon béton ne dépassera pas 32°C et ne pas doit pas être inférieure à 5°C.



Figure II.35 : Mesure de température de béton

II.6.2 Essai d'affaissement au cône d'Abrams (la norme NF P18-451)

Cet essai consiste à remplir un moule tronconique ($D=20\text{cm}$, $d=10\text{cm}$, $h=30\text{cm}$) en trois couches tassées par une tige d'acier de 16 mm de diamètre et d'extrémité arrondie. Le piquage est exécuté de l'ordre de 25 coups par couche. On soulève, ensuite, le moule avec précaution, puis, on mesure l'affaissement.

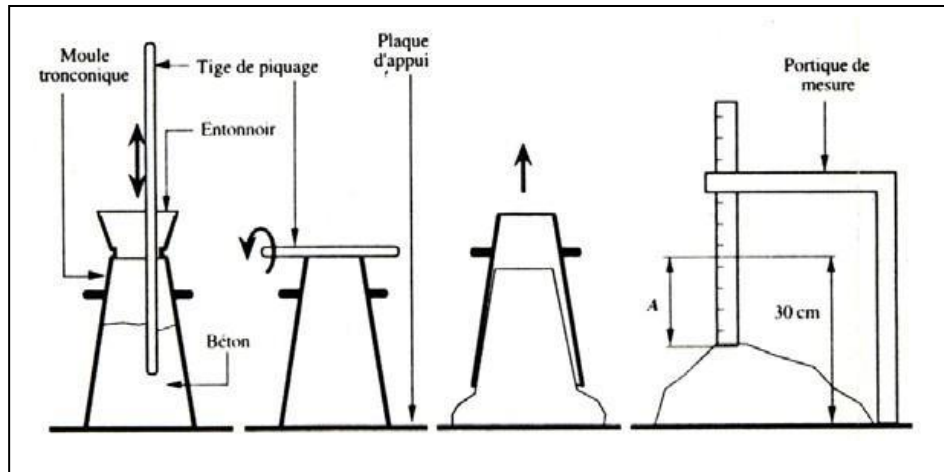


Figure II.36 : Essai d'affaissement au cône d'Abrams.

Dans notre étude et selon la valeur de $E/C=0.35$ obtenue par le calcul de la formulation du béton, un essai d'affaissement a été effectué sur le mélange M0, nous avons obtenu un béton très ferme et donc un problème de maniabilité a été soulevé.



Figure II.37 : Mesure de l'affaissement au mélange M0 avec $E/C=0.35$.

Afin d'assurer un béton maniable, des corrections sur la quantité d'eau ajoutée avec plusieurs essais d'affaissement ont été effectués, et enfin nous avons fixé le rapport E/C au 0.42 qui nous a donné un béton avec une bonne maniabilité.



Figure II.38: Mesure de l'affaissement au mélange M0 avec E/C=0.42

II.6.3 La masse volumique du béton frais (la norme EN 12350-6)

On mesure la masse volumique du béton frais à l'aide d'un récipient étanche à l'eau et suffisamment rigide. Le béton est mis en place dans le récipient et vibré à l'aide d'une aiguille vibrante, une table vibrante ou un serrage manuel en utilisant une barre ou une tige de piquage, après un arasement approprié. Le récipient et son contenu doivent être pesés afin de déterminer la masse volumique qui sera calculée en utilisant la formule suivante :

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

D : est la masse volumique du béton frais (kg/m³).

m₁ : est la masse du récipient (kg).

m₂: est la masse du récipient plus la masse du béton contenu dans le récipient (kg).

V : est le volume du récipient en mètre cube (m³).



Figure II.39 : Détermination de la masse volumique du béton état frais.

II.7 Essais sur béton durci

II.7.1 Résistance à la flexion (la norme NF P. 18-407)

C'est un essai destructif est réalisé sur des éprouvettes prismatiques (10×10×40) cm³, il s'agit de déterminer la résistance à la flexion en soumettant trois points de l'éprouvette à un effort centré, exercé à l'aide d'une presse (voir Figure II.42).

La résistance à la traction en MPa est la moyenne des résultats de trois éprouvettes. La contrainte de traction par flexion est donnée par la relation ci-dessous :

$$R_{cf} = \frac{3F \cdot l}{2b^3}$$

Ou R_{cf} : la résistance à la flexion (en MPa).

F : charge de rupture (en N).

b : côté de la section carrée (en mm), b=100mm.

l: distance entre appuis (en mm), l =300mm.

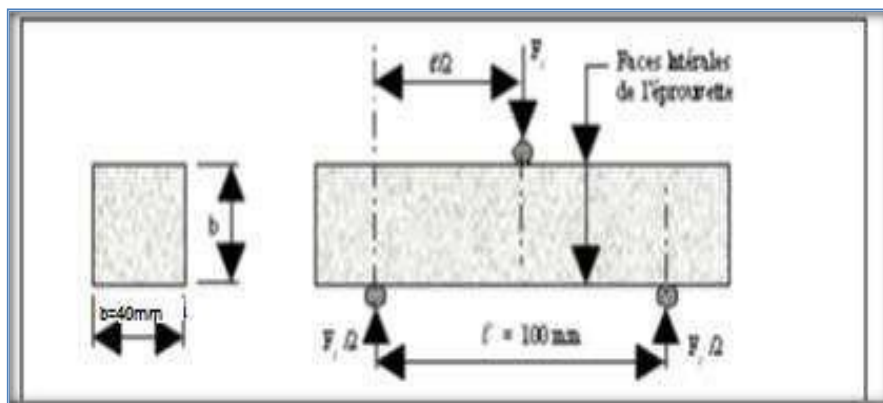


Figure II.40: Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion.



II.7.2 Résistance à la compression (la norme NF P. 18-406)

C'est un essai destructif est réalisé sur des éprouvettes cubiques (15×15×15) cm³, il s'agit de l'application d'un effort de chargement sur une éprouvette cubique, dans le sens perpendiculaire de son axe longitudinal, jusqu'à la rupture, sous une presse à béton, la résistance du béton est donnée par la formule suivante :

$$R_c = F/A_c \quad (\text{en MPa})$$

Avec:

F= la charge maximale à la rupture de l'éprouvette (en Newton).

A_c = l'aire de la section chargée de l'éprouvette (en mm²).



II.7.3 Traction par fendage (essai brésilien) (la norme NF P 18-434)

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton placé suivant deux génératrices opposées entre les deux plateaux de la presse. La résistance en traction par fendage est donnée par l'équation suivante :

$$F_{ct} = \frac{2 F}{\pi D L}$$

Où :

F_{ct} : est la résistance en traction par fendage, en (MPa) ou en (N/m²) ;

F : est la charge maximale, (N) ;

L : est la longueur de la ligne de contact de l'éprouvette, en (mm) ;

D : est le diamètre nominal de l'éprouvette, en (mm).

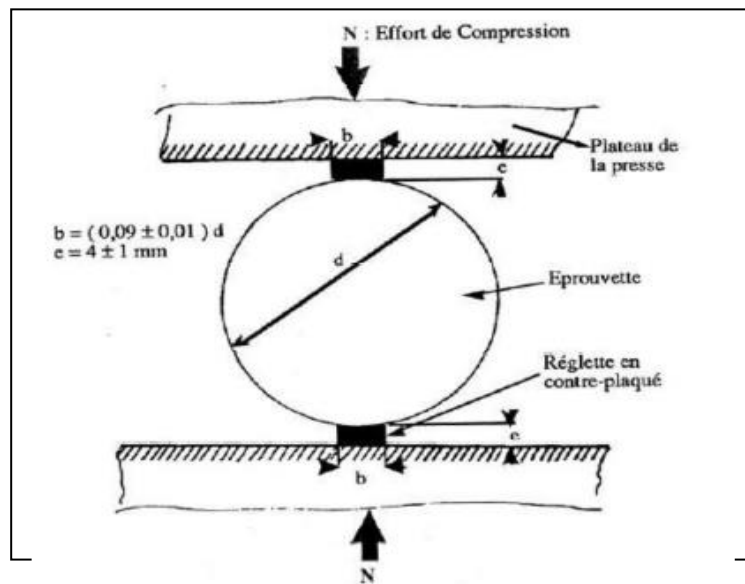


Figure II.43 : Dispositif de mise en charge de l'éprouvette cylindrique pour l'essai de fendage.



Figure II.44 : Ecrasements des éprouvettes cylindriques à l'essai de fendage.

II.7.4 Mesure de l'absorption capillaire (la norme NF EN 480-5)

Les essais d'absorption capillaire sont également intéressants. Ils renseignent globalement sur la structure et sur l'importance du réseau capillaire. Ils sont aussi utilisés en complément d'autres essais pour caractériser la durabilité du béton.

L'essai d'absorption capillaire est réalisé conformément au mode opératoire de la norme européenne NF EN 480 – 5. Il consiste à déterminer le taux d'absorption par remontée capillaire, due à la force de succion, d'une éprouvette cylindrique du béton posée à sa base sur de petits supports de telle manière que seuls les 2 à 5 premiers millimètres du bas de l'éprouvette soient immergés :

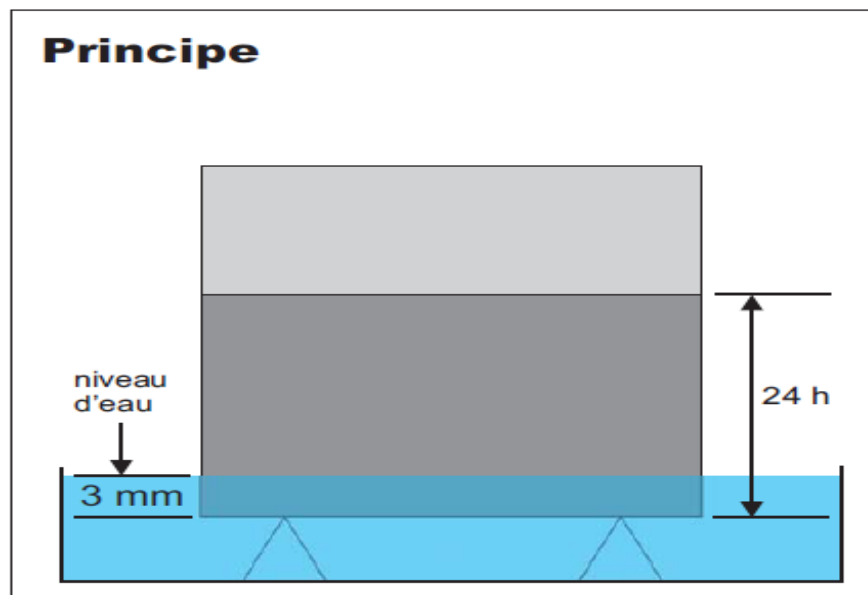


Figure II.45 : Principe de l'essai d'absorption capillaire



Figure II.46 : L'essai d'absorption capillaire.

On mesure alors l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps (jusqu'à 24 heures).

Pour une échéance donnée, l'absorption capillaire « CA » est exprimée en grammes par millimètre carré, par la formule suivante :

$$CA = \frac{M_j - M_0}{S} \quad (\text{en } g/mm^2)$$

M_0 : masse sèche de l'éprouvette avant immersion dans l'eau en grammes,

M_j : masse de la même éprouvette après le temps écoulé d'absorption en g,

S : section de la base de l'éprouvette en millimètre carré.

II.7.5 Essai d'auscultation dynamique (Ultra Son) (la norme NF P 18-418)

L'essai d'auscultation dynamique, par vitesse du son, consiste à mesurer le temps de propagation d'ondes sonique dans une éprouvette de béton à l'aide d'un appareil à ultrasons

(III.32) La vitesse de propagation du son est calculée par la formule suivante :

$$V = \frac{d}{t} \quad (\text{en } m/s)$$

Où :

d : distance entre faces de l'éprouvette mesurée en mètres,

t : temps de propagation d'ondes en secondes.

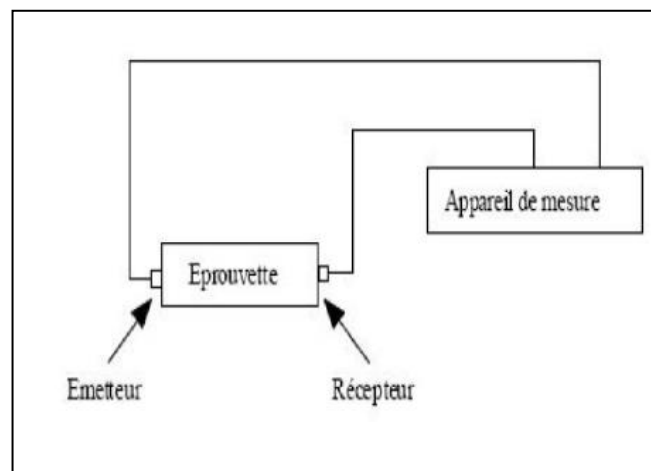


Figure II.47 : Principe d'utilisation de l'appareil d'auscultation dynamique



Figure II.48 : L'essai d'auscultation dynamique.

Vitesse de propagation (m/s)	Qualité du béton de Pui la résistance
$2500 \leq V < 3200$	béton de faible résistance
$3200 \leq V < 3700$	béton de moyenne résistance,
$3700 \leq V < 4200$	béton à haute résistance,
$V \geq 4200$	béton à très haute résistance.

Tableau II.37 : Classements qualitatifs du béton selon la vitesse de propagation.

Plus la vitesse de propagation du son est élevée plus le béton est plus dense (plus résistant) Cette vitesse nous donne des indications sur les qualités des bétons à savoir, à titre indicatif, l'homogénéité, la résistance, existence de fissure.

II.7.6 Essai de carbonatation naturelle

Après 60 jours de conservation, les échantillons de béton sont semis à un essai de carbonatation, la méthode d'essai consiste à rompre l'échantillon de béton par fendage et à répandre sur la surface de rupture une solution alcoolique de Phénolphthaléine qui sert d'indicateur coloré [7].

Cette solution permet de distinguer deux zones dans la surface pulvérisée :

- ✓ Une zone interne de couleur rose qui caractérise la zone non carbonatée de la surface.
- ✓ Une zone incolore externe qui caractérise la zone carbonatée de la surface. La mesure de l'épaisseur de cette zone caractérise la profondeur du front de carbonatation du béton.

Après environ 15 minutes, on mesure la profondeur du front de carbonatation sur la face de l'éprouvette chaque 2 cm. La profondeur du front carbonaté est représentée par la moyenne de ces mesures.[7]



Figure II.49 : L'essai de carbonatation.

II.8 Conclusion

Ces essais de caractérisation et d'analyse, nous permis :

- De bien comprendre les propres structures intrinsèques de ces matériaux.
- De formuler adéquatement les bétons constitués par ces matériaux en fonction de leurs propriétés.
- De faire une bonne lecture des résultats expérimentaux réalisés sur des éprouvettes confectionnées conformément aux normes.

CHAPITRE III

RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'analyse des différents résultats relatifs aux propriétés physico-mécaniques des bétons réalisés conformément aux méthodes décrites au chapitre II.

III.2 Essai sur béton frais

III.2.1 Température de béton

Les valeurs des mesures des températures pour chaque mélange sont résumées dans le tableau suivant :

Mélange	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Température (°C)	25.7	22.5	22.2	22	24.1	25.1	28.5

Tableau III.1 : Mesure des températures des mélanges des bétons.

Selon les valeurs des mesures des températures, nous constatons que tous les mélanges sont confectionnés dans des températures idéales.

III.2.2 Essai d'affaissement au cône d'Abrams (la norme NF P18-451)

Les résultats des mesures d'affaissement pour chaque mélange sont mentionnés dans le tableau suivant :

Mélange	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Affaissement (cm)	15.5	14.2	13.5	13	12.6	12.5	4

Tableau III.2 : Valeurs des affaissements des mélanges des bétons.

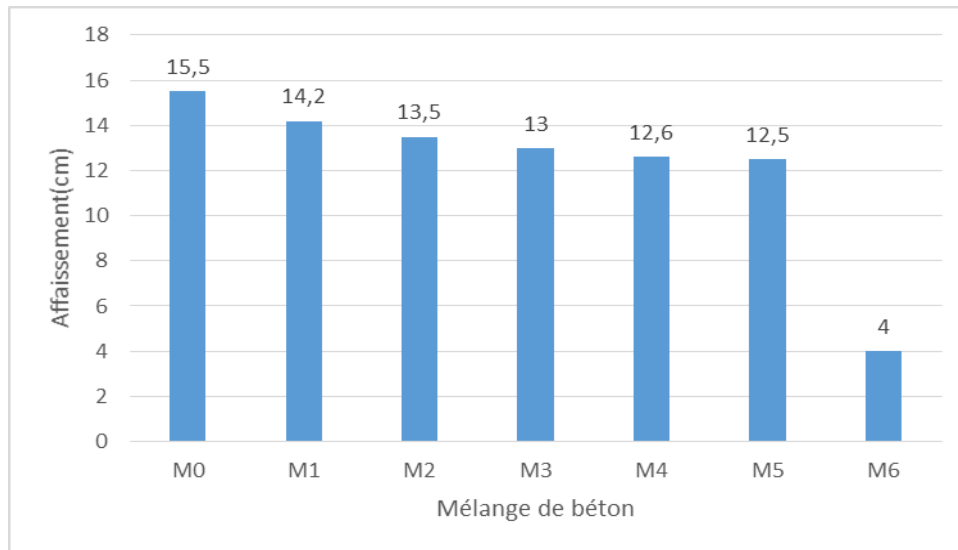


Figure III.1 : Valeurs des affaissements des mélanges des bétons

Nous constatons que les résultats obtenus indiquent qu'il existe une relation inverse entre la valeur d'affaissement et le pourcentage de sable concassé ajouté, Plus le pourcentage de sable concassé est augmenté, plus la valeur d'affaissements est réduite.

III.2.3 La masse volumique du béton frais (la norme EN 12350-6)

Les résultats des mesures des masses volumiques du béton frais pour chaque mélange sont résumés dans le tableau suivant :

Mélange	M0	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Masses volumiques (kg/m ³)	2330	2331	2348	2346	2326	2304	2270

Tableau III.3 : Masses volumiques des mélanges des bétons états frais.

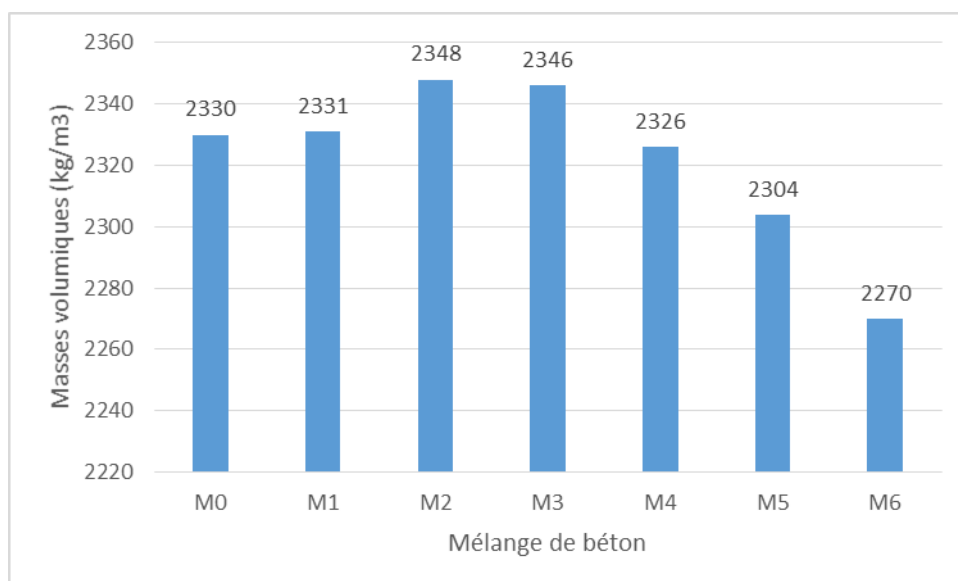


Figure III.2 : Masses volumiques des mélanges des bétons états frais.

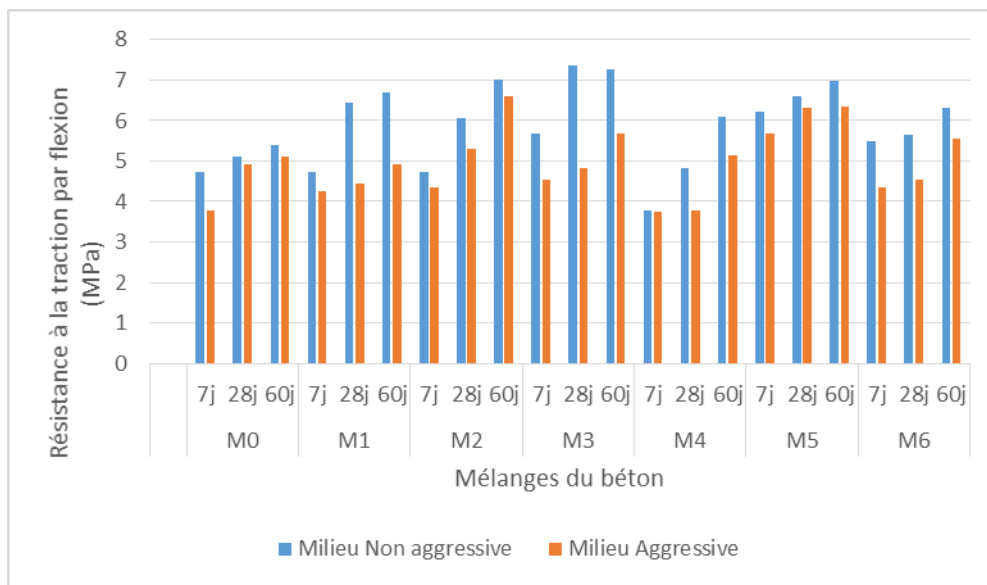
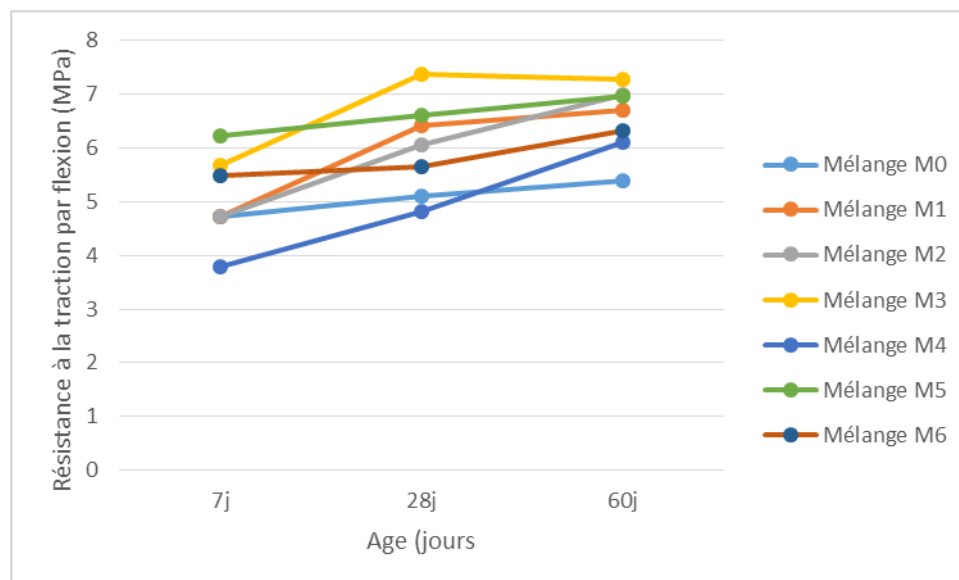
Nous constatons que les mélanges M2 et M3 conviennent aux pourcentages 45% et 50% donnent des masses volumiques plus hauts que les autres mélanges, donc avec les mélanges M2 et M3 on peut obtenir un béton plus compact.

III.3 Essai sur béton durci

III.3.1 Résistance à la flexion (la norme NF P. 18-407)

Le développement de la résistance à la flexion en fonction du taux de substitution du sable naturel par le sable de concassage est récapitulé au tableau suivant :

Mélange	Age (jours)	R_{cf} (Mpa)	
		Milieu Non Agressif	Milieu Agressif
M0	7j	4,73	3,78
	28j	5,1	4,91
	60j	5,4	5,1
M1	7j	4,73	4,25
	28j	6,43	4,44
	60j	6,71	4,91
M2	7j	4,73	4,35
	28j	6,05	5,29
	60j	7	6,61
M3	7j	5,67	4,54
	28j	7,37	4,82
	60j	7,27	5,67
M4	7j	3,78	3,73
	28j	4,82	3,78
	60j	6,098	5,15
M5	7j	6,23	5,67
	28j	6,61	6,33
	60j	6,98	6,34
M6	7j	5,48	4,35
	28j	5,65	4,54
	60j	6,33	5,57

Tableau III.4 : Résistance à la traction par flexion des mélanges du béton.**Figure III.3 :** Evolution de la résistance à la traction par flexion en fonction de l'âge de béton.**Figure III.4 :** Courbes de la résistance à la traction par flexion des Mélanges (milieu non agressif).

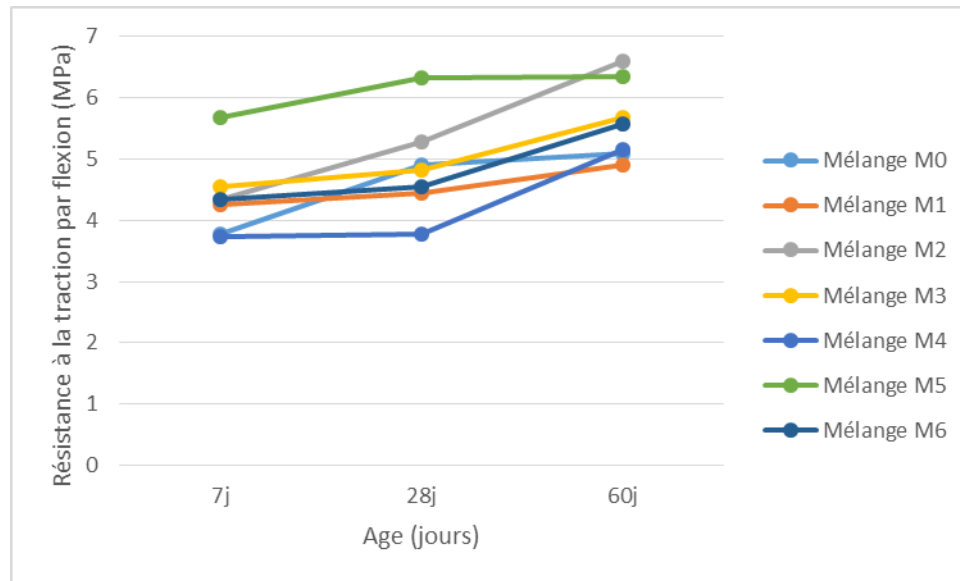


Figure III.5 : Courbes de la résistance à la traction par flexion des Mélanges (milieu agressif).

On remarque :

- La résistance à la traction est en évolution croissante pour toutes les formules en fonction de l'âge du béton à 7, 28 et 60 jours.
- la résistance à la traction par flexion du béton avec remplacement du sable naturel par le sable manufacturé continue à augmenter jusqu'au remplacement complet du sable naturel par sable concassé.
- Les mélanges M2 et M3 (45% et 50%) présentent des résistances maximales par rapport aux autres mélanges.
- Le remplacement du sable naturel par le sable manufacturé avec des pourcentages de 45% à 50% augmente la résistance à la traction par flexion jusqu'à 20%.
- Les échantillons conservés dans un milieu agressif donnent des bons résultats convergents et sont comparés aux échantillons du milieu non agressif.

III.3.2 Résistance à la compression (la norme NF P. 18-406)

Le développement de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution du sable naturel par le sable de concassage est récapitulé au tableau suivant :

Mélange	Age (jours)	Rc (Mpa)	
		Milieu Non Agressif	Milieu Agressif
M0	7j	32,39	29,03
	28j	37,53	31,3
	60j	40,2	35,5
M1	7j	29,62	32,18
	28j	33,51	40,8
	60j	38,95	42,79
M2	7j	33,55	24,65
	28j	45,4	39,54
	60j	46,2	43,65
M3	7j	33,28	30,2
	28j	37,28	38,02
	60j	41,4	42,3
M4	7j	27,95	26,2
	28j	36	32
	60j	40,3	38,52
M5	7j	28,64	26,84
	28j	36,5	32,4
	60j	41,2	39,65
M6	7j	27,83	29,61
	28j	42,43	35,25
	60j	46,58	39,75

Tableau III.5 : Résistance à la compression des mélanges du béton.

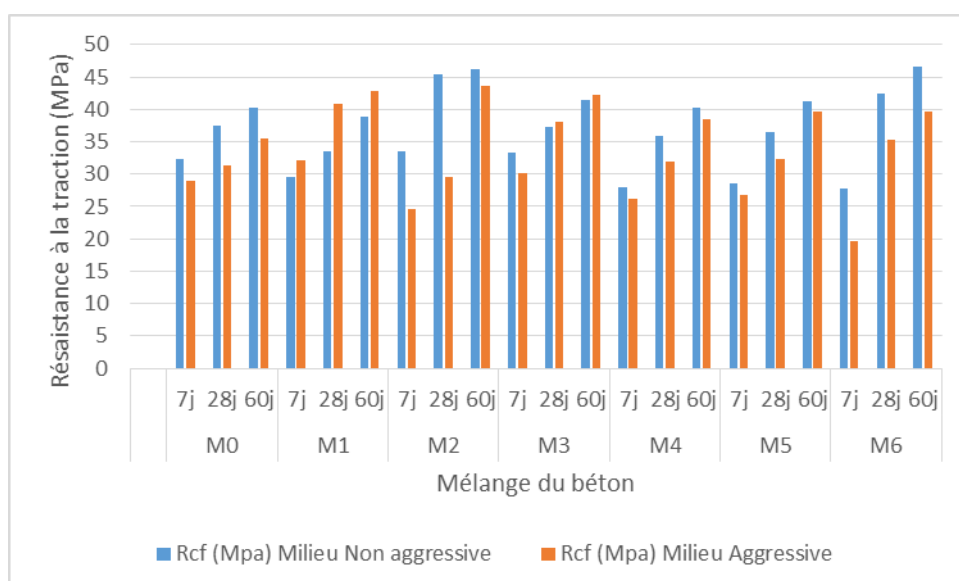
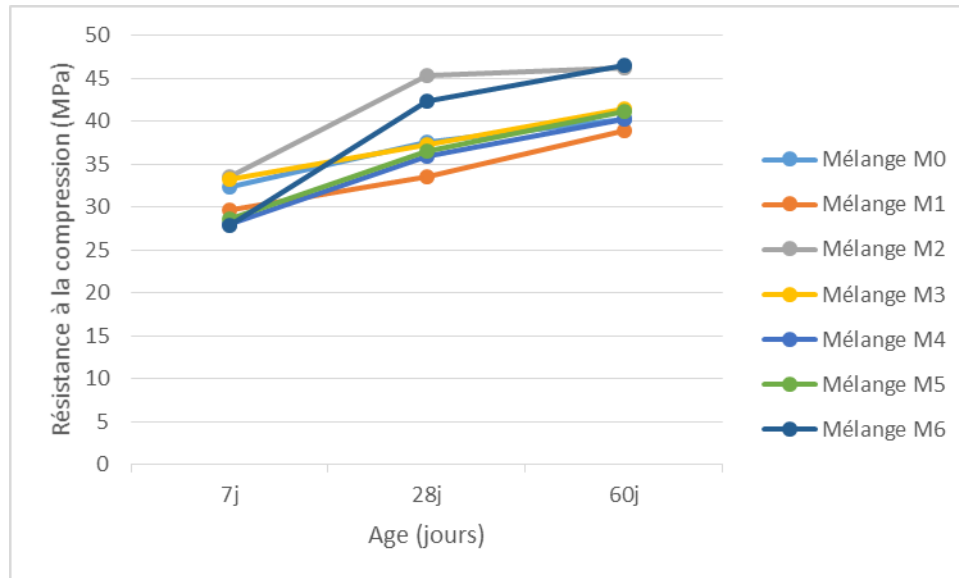
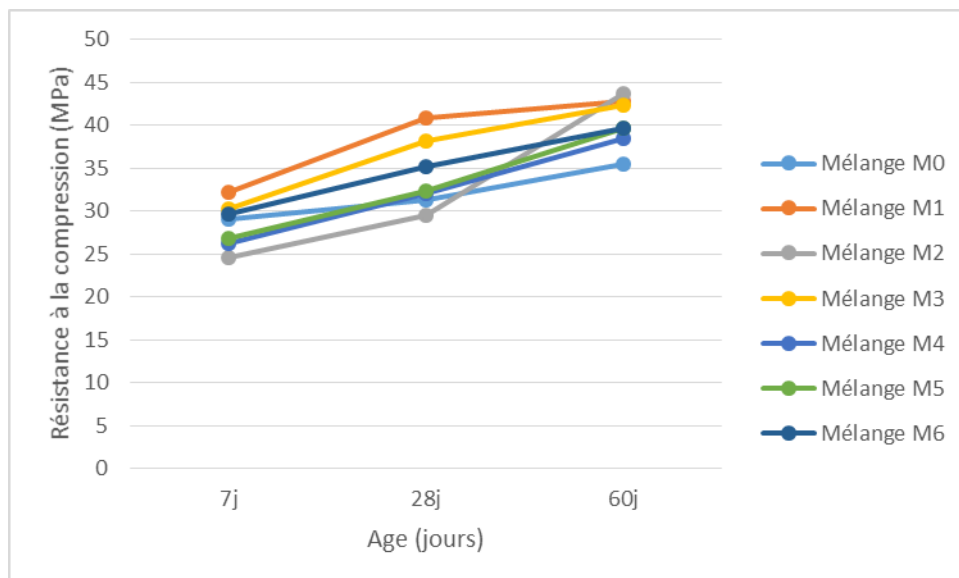


Figure III.6 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge de béton.**Figure III.7 :** Courbes de la résistance à la compression des Mélanges (milieu non agressif).**Figure III.8 :** Courbes de la résistance à la compression des Mélanges (milieu agressif).

On remarque :

- La résistance à la compression est en évolution croissante pour toutes les formules en fonction de l'âge de béton à 7, 28 et 60 jours.
- la résistance à la compression du béton avec remplacement du sable naturel par sable manufacturé continue à augmenter jusqu'au remplacement complet du sable naturel par le sable concassé.

- Les mélanges M2 et M3 (45% et 50%) présentent des résistances maximal para par rapport aux autres mélange.
- Le remplacement du sable naturel par le sable manufacturé avec des pourcentages de 45% à 50% augmente la résistance à la compression jusqu'à 15%.
- Les échantillons conservés dans un milieu agressif donnent des bons résultats convergents et sont comparés aux échantillons du milieu non agressif.

III.3.3 Traction par fendage (essai brésilien) (la norme NF P 18-434)

Le développement de la résistance à la compression en fonction du taux de substitution du sable naturel par le sable de concassage est récapitulé au tableau suivant :

Mélange	Age (jours)	Rc (Mpa)	
		Milieu Non Agressif	Milieu Agressif
M0	7j	4.1	3.8
	28j	4.26	4.1
	60j	4.3	4.26
M1	7j	3.3	3
	28j	3.97	3.53
	60j	4.65	4.23
M2	7j	2.88	2.7
	28j	4.74	4.15
	60j	4.84	4.23
M3	7j	3.83	4.03
	28j	4.11	4.44
	60j	4.28	4.53
M4	7j	3.12	3
	28j	3.47	3.56
	60j	3.77	3.61
M5	7j	3.48	3.4
	28j	4.34	3.85
	60j	4.81	4.21
M6	7j	2.91	3.25
	28j	3.54	3.55
	60j	3.91	3.65

Tableau III.6 : Résistance à la traction par fendage des mélanges du béton

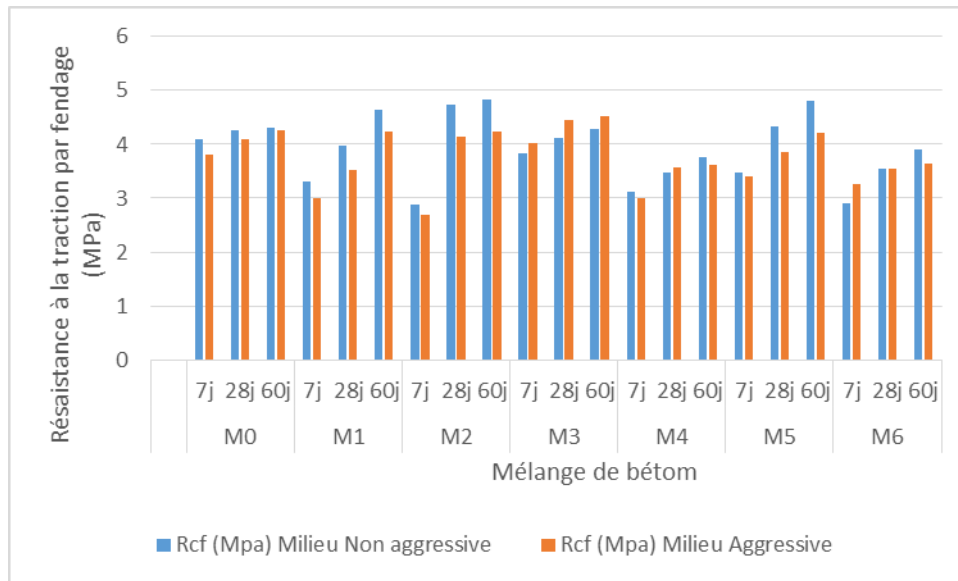


Figure III.9 : Evolution de la résistance à la traction par fendage en fonction de l'âge du béton.

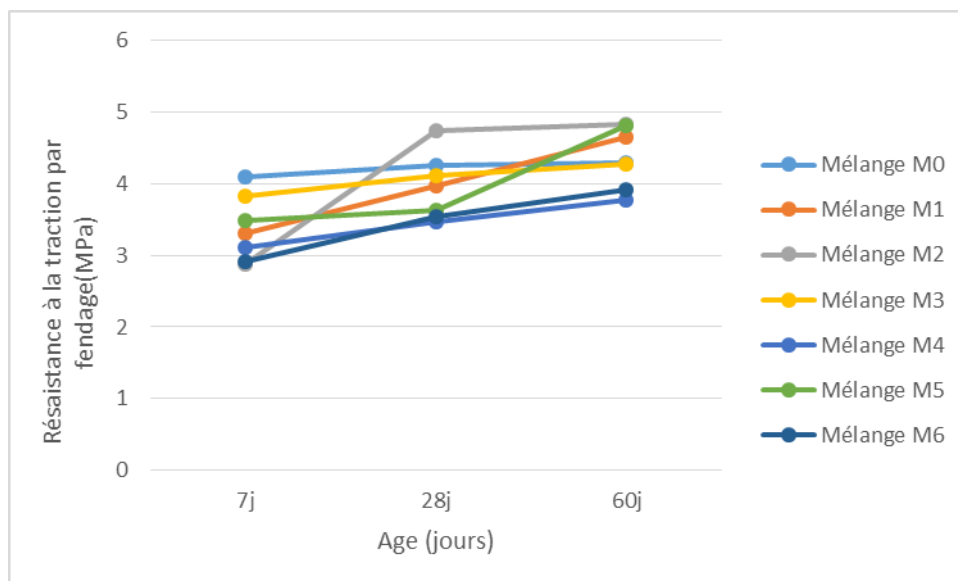


Figure III.10 : Courbes de la résistance à la traction par fendage des Mélanges (milieu non agressif).

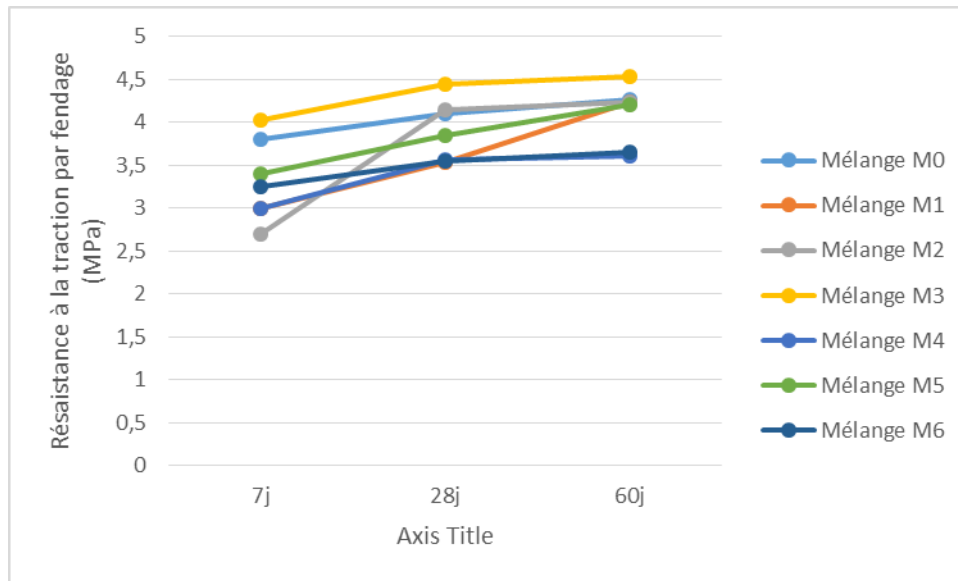


Figure III.11 : Courbes de la résistance à la traction par fendage des Mélanges (milieu agressif).

On remarque :

- La résistance à la traction par fendage est en évolution croissante pour toutes les formules en fonction de l'âge de béton à 7, 28 et 60 jours.
- la résistance à la traction par fendage du béton avec remplacement du sable naturel par le sable manufacturé continue à augmenter jusqu'au remplacement complet du sable naturel par le sable concassé.
- Les mélanges M2 (45%) présente une résistance maximal par rapport aux autres mélange.
- Le remplacement du sable naturel par le sable manufacturé avec des pourcentages de 45% augmente la résistance à la compression jusqu'à 13%.
- Les échantillons conservés dans un milieu agressif donnent des bons résultats convergents et sont comparés aux échantillons du milieu non agressif.

III.3.4 Mesure de l'absorption capillaire (la norme NF EN 480-5)

Les valeurs de l'absorption capillaire de nos mélanges sont résumées dans le tableau suivant :

Mélange	Environnement	Mj-M0(g) 3 minutes	Mj-M0(g) 10minutes	Mj-M0(g) 30 minutes	Mj-M0(g) 1 h	Mj-M0(g) 6 h	Mj-M0(g) 12h	Mj-M0(g) 24h
M0	Non Aggressive	5	8	11	13	26	31	40
	aggressive	4	6	9	11	18	20	23
M1	Non Aggressive	3	5	7	9	16	18	22
	aggressive	3	5	7	11	16	17	22
M2	Non Aggressive	5	7	9	12	20	26	33
	aggressive	2	4	6	8	14	17	21
M3	Non Aggressive	7	12	15	18	28	32	39
	aggressive	4	6	8	11	20	25	32
M4	Non Aggressive	13	18	25	32	43	59	64
	aggressive	4	6	9	12	21	26	33
M5	Non Aggressive	6	1000	16	19	28	31	36
	aggressive	5	8	13	18	28	33	45
M6	Non Aggressive	9	12	17	20	31	35	42
	aggressive	20	29	37	60	66	66	82

Tableau III.7 : Evaluation de la capillarité des mélanges du béton à 7 jours

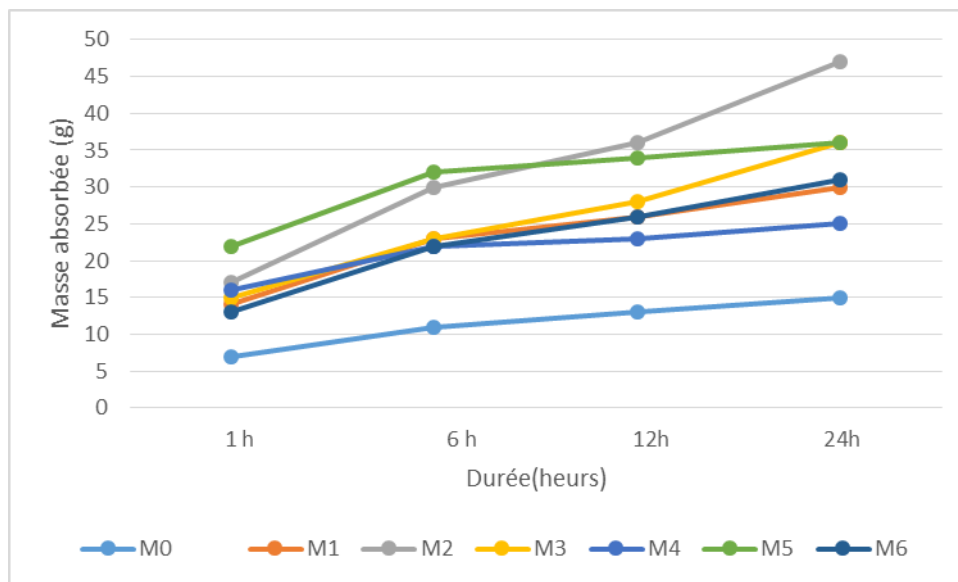


Figure III.12 : Courbes de l'absorption d'eau par capillarité des mélanges à 7 jours (milieu non agressif)

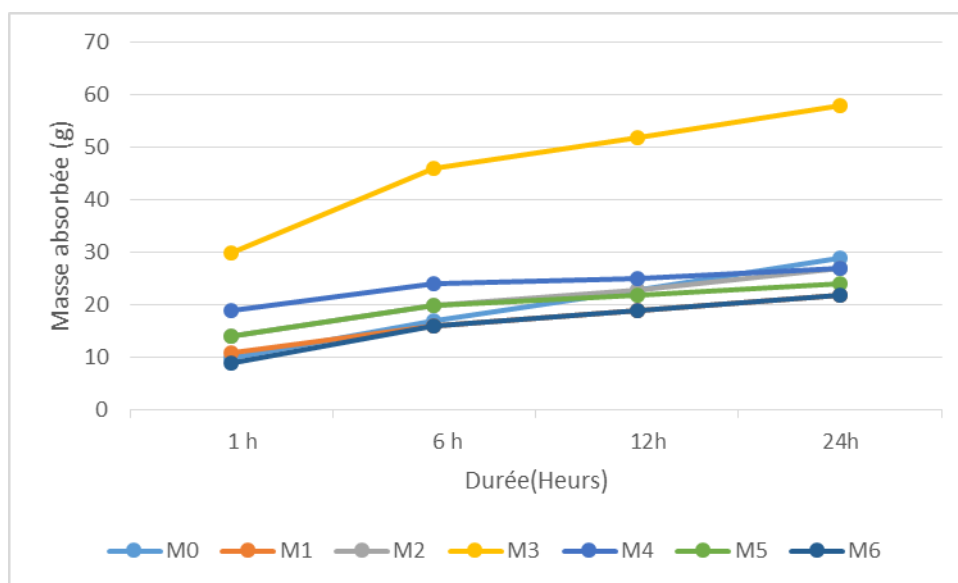


Figure III.13 : Courbes de l'absorption d'eau par capillarité des mélanges à 7 jours (milieu agressif)

Mélange	Environnement	Mj-M0(g) 3 minutes	Mj-M0(g) 10minutes	Mj-M0(g) 30 minutes	Mj-M0(g) 1 h	Mj-M0(g) 6 h	Mj-M0(g) 12h	Mj-M0(g) 24h
M0	Non Aggressive	5	8	11	13	26	31	40
	aggressive	4	6	9	11	18	20	23
M1	Non Aggressive	3	5	7	9	16	18	22
	aggressive	3	5	7	11	16	17	22
M2	Non Aggressive	5	7	9	12	20	26	33
	aggressive	2	4	6	8	14	17	21
M3	Non Aggressive	7	12	15	18	28	32	39
	aggressive	4	6	8	11	20	25	32
M4	Non Aggressive	13	18	25	32	43	59	64
	aggressive	4	6	9	12	21	26	33
M5	Non Aggressive	6	1000	16	19	28	31	36
	aggressive	5	8	13	18	28	33	45
M6	Non Aggressive	9	12	17	20	31	35	42
	aggressive	20	29	37	60	66	66	82

Tableau III.8 : Evaluation de la capillarité des mélanges du béton à 28 jours.

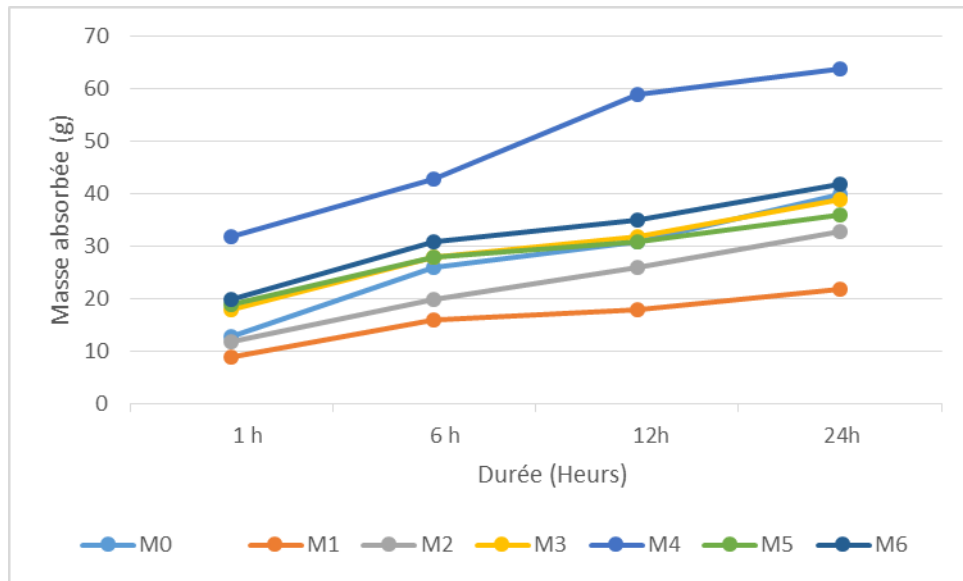


Figure III.14 : Courbes de l'absorption d'eau par capillarité des mélanges à 28 jours (milieu agressif).

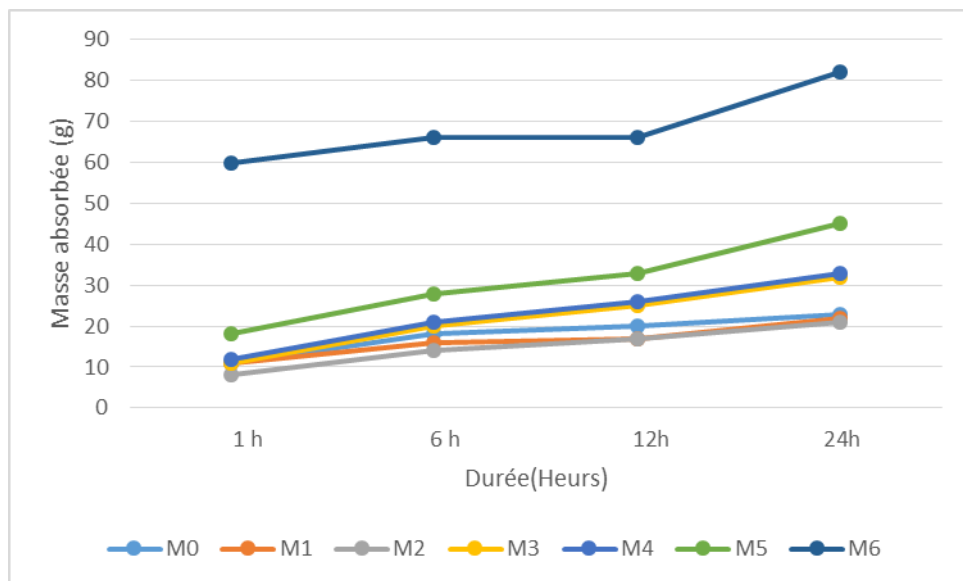


Figure III.15 : Courbes de l'absorption d'eau par capillarité des mélanges à 28 jours (milieu agressif).

Mélange	Environnement	Mj-M0(g) 3 minutes	Mj-M0(g) 10minutes	Mj-M0(g) 30 minutes	Mj-M0(g) 1 h	Mj-M0(g) 6 h	Mj-M0(g) 12h	Mj-M0(g) 24h
M0	Non Aggressive	1	2	2	3	6	8	11
	aggressive	3	4	5	6	9	11	15
M1	Non Aggressive	1	1	2	3	6	8	12
	aggressive	3	3	4	5	8	10	13
M2	Non Aggressive	2	3	4	4	8	11	15
	aggressive	4	5	6	7	11	13	16
M3	Non Aggressive	3	4	5	6	9	11	14
	aggressive	4	5	7	10	20	25	32
M4	Non Aggressive	2	3	4	5	9	11	14
	aggressive	3	5	6	8	11	14	17
M5	Non Aggressive	3	4	6	7	10	12	15
	aggressive	3	3	4	5	9	11	14
M6	Non Aggressive	5	6	9	11	15	16	20
	aggressive	5	8	10	13	25	32	36

Tableau III.9 : Evaluation de la capillarité des mélanges du béton à 60 jours.

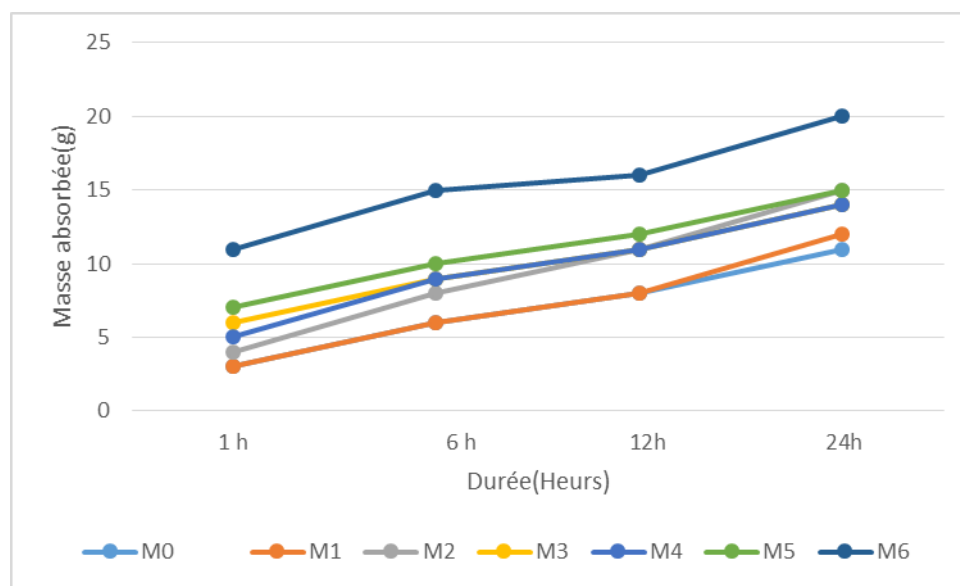


Figure III.16 : Courbes de l'absorption d'eau par capillarité des mélanges à 60 jours (milieu non agressif).

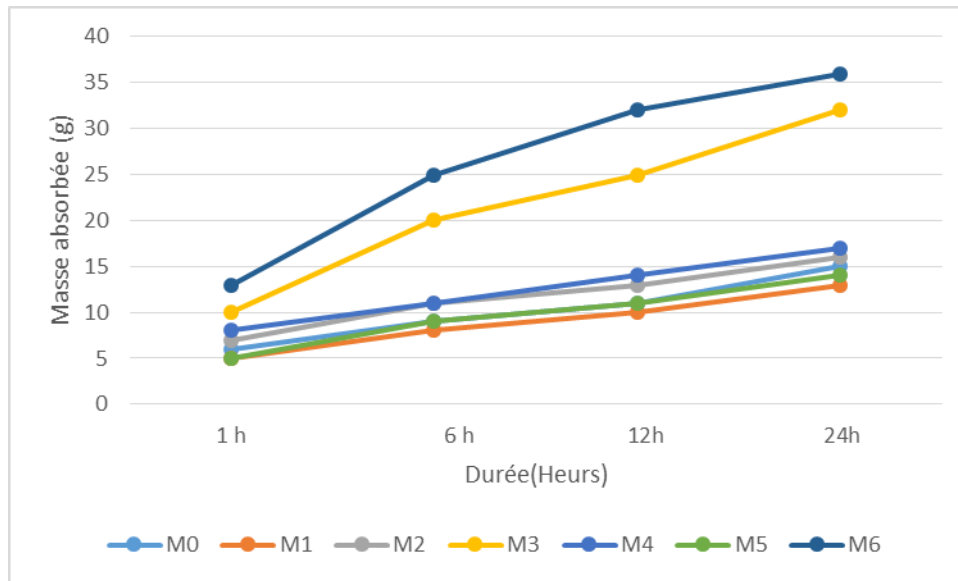


Figure III.17 : Courbes de l'absorption d'eau par capillarité des mélanges à 60 jours (milieu agressif).

On remarque :

- L'absorption capillaire croissant linéairement avec l'augmentation de pourcentage de sable concassé.
- Les mélanges avec 100% sable naturel montrent une étanchéité plus haute que les autres mélanges avec sable concassé.

III.3.5 Essai d'auscultation dynamique (Ultra Son)(la norme NF P 18-418)

Les valeurs des mesures de propagation du son sur les différents mélanges du béton sont résumées dans le tableau suivant :

Mélange	Age(jours)	Vitesse de son (m/s)	
		Milieu Non Aggressif	Milieu Aggressif
M0	7j	4273	4166
	28j	4516	4503
	60j	4806	4790
M1	7j	4132	4087
	28j	4423	4296
	60j	4656	4642
M2	7j	4132	4054
	28j	4503	4410
	60j	4775	4715
M3	7j	4087	4076
	28j	4571	4503
	60j	4599	4665
M4	7j	4120	4000
	28j	4530	4503
	60j	4775	4790
M5	7j	4087	4054
	28j	4544	4571
	60j	4760	4745
M6	7j	4054	4050
	28j	4054	4076
	60j	4250	4206

Tableau III.10 : Valeurs de la vitesse de propagation du son sur les mélanges de béton

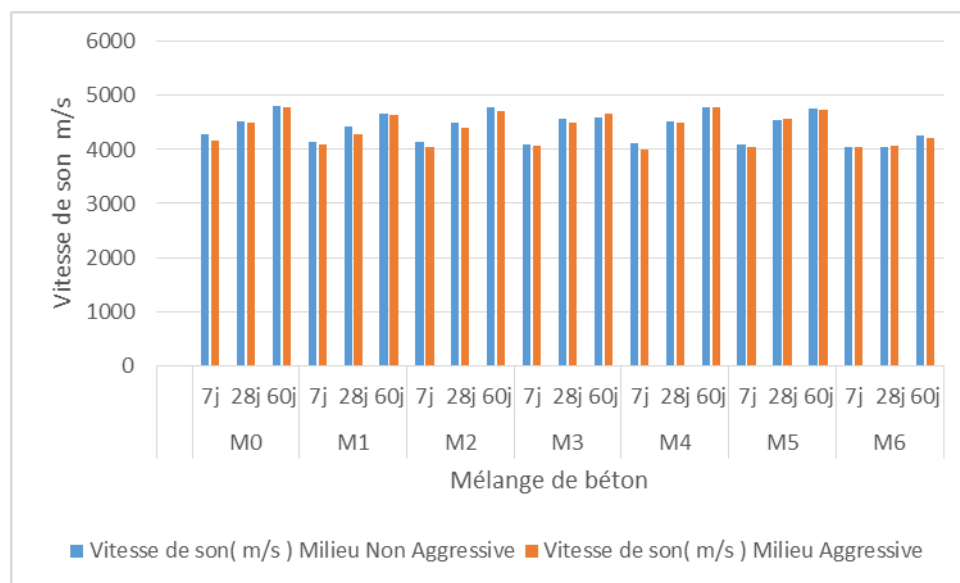


Figure III.18 : Evolution de la vitesse de propagation du son en fonction de l'âge du béton.

On remarque :

- Les vitesses des propagations des ondes pour tous les mélanges est supérieur de 4200 m/s qui correspondent à un béton à très haute résistance.

III.3.6 Essai de carbonatation naturelle:

Après les mesures des surfaces carbonatés nous constatons que les totalités des surfaces sont colorés, qui signifié que le phénomène de carbonatations n'est pas encore commencé vue la courte de durée de conservation dans le milieu agressif.

III.4 Conclusion

D'après les résultats obtenus précédemment, on conclut que les bétons confectionnés ont des bonnes résistances mécaniques, malgré qu'un problème de maniabilité a été soulevé surtout avec l'augmentation successive des pourcentages du sable concassé, nous avons aussi constaté une augmentation de la densité du béton frais suite à l'utilisation du sable concassé dans le béton.

CHAPITRE IV**CONCLUSION GENERALE ET
PERSPECTIVE****IV. Conclusion générale et perspective**

Cette étude a été entreprise dans le but d'évaluer la viabilité de l'utilisation du sable modifié de carrière (sable concassé) comme substitut du sable naturel dans le béton. L'effet du béton avec remplacement partiel et total du sable modifié de carrière sur les propriétés du béton avec un rapport E/C de 0,42 et la résistance à la compression, la résistance à la traction par fendage, la résistance à la flexion et la maniabilité a été étudiée. Les effets du remplacement partiel et total du sable modifié de carrière par du sable naturel sur la propriété de résistance et l'ouvrabilité ont été évalués et comparés au mélange de référence.

Les résultats trouvés nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- L'utilisation du sable concassé dans le béton influe négativement sur maniabilité du béton, sachant que l'augmentation du pourcentage de sable concassé réduira l'affaïement.
- L'utilisation de sable concassé dans le béton avec des pourcentages 45% à 50% augmente la densité (la compacité) du béton.
- Les propriétés mécaniques comme la résistance à la compression, la résistance à la traction et la résistance à la flexion sont augmentés avec l'augmentation de pourcentage du sable concassé avec un pourcentage des fines d'environ 10% augmente les caractéristique mécaniques jusqu'à 15%.
- L'utilisation du sable concassé dans le béton réduit l'étanchéité (augmente la capillarité) du béton.

Ainsi, on peut voir que le sable manufacturé peut être un substitut viable au sable naturel pour produire du béton.

➤ BIBLIOGRAPHIE

[1] GEOFF MAYS : Durability of concrete structures, **School of Mechanical, Materials and Civil engineering RMCS(Cranfield)**

[2] JEAN FESTA et GEORGES DREUX : Nouveau guide du béton et de ses constituants, Huitième édition 1998.

[3] IMÈNE JOUDI-BAHRI: Influence des sables fillérisés calcaires sur les propriétés des bétons courants et superplastifiés. Un exemple tunisien, **Doctorat 2012 Université de Lorraine, France & de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis** .

[4] M. DIERKENS : Construire des Ouvrages d'Art en Béton (Durabilité du béton armé), 2011 CETTE de Lyon.

[5] BOUNEDJEMA YASSINE: Evaluation des modifications mécaniques Et rhéologiques apportées par le sable de concassage aux mortiers et bétons, **Doctorat 2017 Université Hassiba Benbouali de Chlef**.

[6] the constructor-civil engineering home for civil engineer.

[7] MOHAMED RABEHI : Apport à la caractérisation de la porosité ouverte du béton d'enrobage par l'utilisation des tests d'absorption capillaire, **Doctorat 2014 Université Mohamed Khider – Biskra**

[8] AYADI WALID ABDELGHANI ET GUENOUNE ABDELMALEK : Valorisation des sables locaux dans la formulation de béton ordinaire , **Master 2016 UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES**

[9] HOMMI ABDERRAHMANE ET NIOU MEKKI: Effet de l'ajout de la boue de station d'épuration sur les propriétés mécaniques du mortier, **Master 2017 UNIVERSITE KASDI MERBAH – Ouargla**.

[10] AZIEZ Mohammed Nadjib: Attaques sulfatiques externes des matériaux cimentaires : influence de la température, **Doctorat LMD 2017 UNIVERSITE ABOUBAKR BELKAÏD– Tlemcen**.

Les Normes

NORMES	AFNOR	DZ
Essai d'affaissement	NF P18-451	NA 431
Résistance à la compression des éprouvettes	NF P 18-455	NA 427
Résistance à la flexion	NF P. 18-407	
Détermination de la résistance à la traction par fendage des éprouvettes.	NF P 18-434	
Prélèvement d'échantillon pour essai	NF P18-553	NA 2611
Mesure de la Masse Volumique Et Absorption	NF P 18-554	NA 255
Essai granulométrique granulats	NF P 18-560	NA 2607-1

Mesure du Coefficient D'aplatissement	NF P 18-561	NA 5125
Essai de propreté superficiel des agrégats	NF P 18-591	NA 463
Essai bleu de méthylène	NE P 18-592	NA 1948
Equivalent de sable	NF P 18-598	NA 455
Essai Los Angeles	NF P 18-573	NA 458
Analyse chimique	NF EN 1744-1	NA 461
Eau de gâchage	NF P 18-303	NA 1966(5036)
Granulats : définition, conformité, spécifications	NF P 18-540	NA 5113
Essai d'auscultation dynamique	NF P 18-418	
Mesure de l'absorption capillaire	NF EN 480-5	

➤ ANNEXES

Liste des annexes

Item	Description
Annexe 1	Fiche technique du ciment utilisé.
Annexe 2	Fiche technique d'adjuvant utilisé.

Annexe 1

Fiche technique du ciment utilisé.

Annexe 2

Fiche technique d'adjuvant utilisé.