



Université Abderrahmane Mira de Bejaia

Faculté de Technologie

Département des Mines et Géologie

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Filière : Génie Minier

Option : Valorisation des Ressources Minérales

Présenté par :

AOUF ADEL

Thème

*Evaluation de la qualité des granulats et leurs
impacts sur la formulation des bétons*

Soutenu le 14/09/2023 devant le jury composé de :

| | | | |
|--------------|----------------------|--------------|---------|
| Président | Mr. MEGHERFI Karim | M.C.B | U.A.M.B |
| Promoteur | Mr. AKDIM Abdelghani | M.A.A | U.A.M.B |
| Examinatrice | Mme. KAMLI Ouarda | M.C.B | U.A.M.B |

Année Universitaire : 2022 - 2023

Remerciements

Dans le cadre de la réalisation de cette étude, Je remercie avant tout ALLAH le tout puissant, de m'avoir donné la force, la patience et la volonté de mener à bien ce travail.

Mes remerciements les plus sincères s'adressent à mon promoteur Mr.AKDIM Abdelghani pour ces conseils, ses remarques et orientations, sa patience et surtout sa disponibilité.

Ma profonde gratitude va aussi à Monsieur MEGHERFI et à Mme KAMLI, Pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer ce travail.

Je tiens aussi à remercier tout le personnel du Laboratoire des Travaux Publiques de l'Est (LTPE) de la wilaya de Sétif, où ce travail a été réalisé.

J'espère que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette étude trouvent ici l'expression de mes sincères sentiments et chaleureux remerciements.

Dédicaces

Je tiens à dédier ce modeste travail à :

*A la mémoire de mon très cher père, que DIEU garde son
âme dans son vaste paradis.*

*A ma très chère mère qui n'a jamais cessé de prier pour
moi, que DIEU la garde pour moi.*

A mes chers frères et sœurs.

A toutes les personnes de ma grande famille.

A mes chers amis

Table de matières

| | |
|--|----|
| Liste des tableaux..... | 1 |
| Liste des figures..... | 1 |
| Liste des abréviations | 1 |
| Liste des formules | 1 |
| Introduction Générale | 1 |
| CHAPITRE I : Etude bibliographique | 3 |
| Introduction..... | 3 |
| PARTIE 1 : Etude sur les granulats..... | 3 |
| I.1.1. Définition..... | 3 |
| I.1.2. Nature des granulats | 4 |
| I.1.3. Classification des granulats | 4 |
| I.1.4. Origine minéralogique des granulats | 5 |
| I.1.5. Normes et qualités conventionnelles | 7 |
| I.1.6. caractéristiques des granulats | 7 |
| I.1.7. Essais sur les granulats | 11 |
| PARTIE 2 : Etude sur les bétons..... | 15 |
| I.2.1. Définition..... | 15 |
| I.2.2. Composantes du béton | 15 |
| I.2.3. Propriétés du béton | 17 |
| I.2.4. Types des bétons | 18 |
| I.2.5. Formulation du béton | 22 |
| I.2.6. Essais sur le béton | 24 |
| CHAPITRE II : Matériels et méthodes | 26 |
| Introduction..... | 26 |

| | |
|---|-----------|
| II.1. Préparation d'un échantillon pour essai..... | 26 |
| II.1.1. But et principe de l'échantillonnage..... | 26 |
| II.1.2. Quartage | 27 |
| II.2. Essais sur les granulats..... | 28 |
| II.2.1. Essai de détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage (NF EN 933-1)..... | 28 |
| II.2.2. Essai pour détermination de la forme des granulats - Coefficient d'aplatissement (NF EN 933-3)..... | 30 |
| II.2.3. Essai de détermination de la masse volumique réelle (NF EN 1097-6)..... | 32 |
| II.2.4. Essai de détermination de la résistance à l'usure (Micro-DEVAL) (NF EN 1097-1)..... | 34 |
| II.2.5. Essai de détermination de la résistance à la fragmentation Los Angeles (LA) (NF EN 1097-2)..... | 37 |
| II.2.6. Essai d'Equivalent de sable (NF EN 933-8)..... | 40 |
| II.2.7. Essai au bleu de méthylène (MBF) (NF EN 933-9) | 43 |
| II.3. Essais sur béton..... | 46 |
| II.3.1. Essai d'affaissement au cône d'ABRAMS (NF EN 12350-2)..... | 46 |
| II.3.2. Essai de la résistance à la compression | 48 |
| Conclusion | 53 |
| CHAPITRE III : Résultats et Discussion..... | 54 |
| Introduction..... | 54 |
| III.1. Résultats et discussion des essais sur granulats..... | 54 |
| III.1.1. Résultats et discussion de l'Analyse granulométrique (Gr) | 54 |
| III.1.2. Résultats et discussion de la détermination de la forme des granulats - Coefficient d'Aplatissement | 59 |
| III.1.3. Résultats et discussion de la détermination de la masse volumique réelle... | 62 |
| III.1.4. Résultats et discussion de la résistance à l'usure essai micro-Deval (MDE) | 65 |

| | |
|--|-----------|
| III.1.5. Résultats et discussion de la détermination de la résistance à la fragmentation Los Angeles (LA) | 66 |
| III.2. Résultats et discussion des essais sur le sable | 68 |
| III.2.1. Résultats et discussion de l'essai au bleu de méthylène | 68 |
| III.2.2. Résultats et discussion de l'équivalent de sable (Es)..... | 69 |
| III.3. Résultats et discussion des essais sur béton | 70 |
| III.3.1. Résultats et discussion de l'affaissement au cône d'ABRAMS | 70 |
| III.3.2. Résultats et discussion de la résistance à la compression | 74 |
| Conclusion | 76 |
| Conclusion Générale..... | 77 |
| Références Bibliographiques..... | |
| Annexe 1..... | |
| Annexe 2..... | |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau I-1 : Différents types de bétons et leurs avantages..... | 19 |
| Tableau II-1 : Charge abrasive selon la classe granulaire..... | 35 |
| Tableau II-2 : Nombre de boulets selon la classe granulaire. | 39 |
| Tableau II-3 : Classes d'affaissement selon la norme NF EN 206-1..... | 48 |
| Tableau II-4 : Classes et résistances caractéristiques des bétons..... | 53 |
| Tableau III-1 : Résultats de l'aplatissement des granulats de la carrière de LAFARGE | 59 |
| Tableau III-2 : Résultats de l'aplatissement des granulats de la carrière de TAYA..... | 60 |
| Tableau III-3 : Résultats de l'aplatissement des granulats de la carrière de TEDJENNENT.. | 60 |
| Tableau III-4 : Résultats de l'aplatissement des granulats de la carrière d'ENNOUR..... | 61 |
| Tableau III-5 : Résultats de l'essai de détermination de la masse volumique réelle des granulats de la carrière de LAFARGE..... | 62 |
| Tableau III-6 : Résultats de l'essai de détermination de la masse volumique réelle des granulats de la carrière de TAYA | 62 |
| Tableau III-7 : Résultats de l'essai de détermination de la masse volumique réelle des granulats de la carrière de TEDJENNENT | 63 |
| Tableau III-8 : Résultats de l'essai de détermination de la masse volumique réelle des granulats de la carrière d'ENNOUR..... | 64 |
| Tableau III-9 : Résultats de l'essai (MDE) des granulats de la carrière de LAFARGE..... | 65 |
| Tableau III-10 : Résultats de l'essai (MDE) des granulats de la carrière de TAYA | 65 |
| Tableau III-11 : Résultats de l'essai (MDE) des granulats de la carrière de TEDJENNENT . | 65 |
| Tableau III-12 : Résultats de l'essai (MDE) des granulats de la carrière d'ENNOUR..... | 66 |
| Tableau III-13 : Caractéristiques intrinsèques des granulats (MDE)..... | 66 |
| Tableau III-14 : Résultats de l'essai (LA) des granulats de LAFARGE | 67 |
| Tableau III-15 : Résultats de l'essai (LA) des granulats de TAYA..... | 67 |
| Tableau III-16 : Résultats de l'essai (LA) des granulats de TEDJENNENT | 67 |
| Tableau III-17 : Résultats de l'essai (LA) des granulats d'ENNOUR..... | 67 |
| Tableau III-18 : Caractéristiques intrinsèques des granulats (LA). | 68 |
| Tableau III-19 : Résultats de l'essai au bleu de méthylène (MBF) de sable de la carrière d'ARRIS KHOUDJA..... | 69 |
| Tableau III-20 : Résultats de l'analyse équivalent de sable (Es)..... | 69 |
| Tableau III-21 : Références pour déterminer la signification de : ESV et ESP..... | 70 |

| | |
|--|----|
| Tableau III-22 : Résultat de l'affaissement au cône d'ABRAMS du béton formulé avec les granulats de LAFARGE..... | 71 |
| Tableau III-23 : Résultat de l'affaissement au cône d'ABRAMS du béton formulé avec les granulats de TAYA | 71 |
| Tableau III-24 : Résultat de l'affaissement au cône d'ABRAMS du béton formulé avec les granulats de TEDJENNENT..... | 72 |
| Tableau III-25 : Résultat de l'affaissement au cône d'ABRAMS du béton formulé avec les granulats d'ENNOUR..... | 72 |
| Tableau III-26 : Résultats de la résistance à la compression du béton formulé avec les granulats de LAFARGE..... | 74 |
| Tableau III-27 : Résultats de la résistance à la compression du béton formulé avec les granulats de TAYA | 74 |
| Tableau III-28 : Résultats de la résistance à la compression du béton formulé avec les granulats de TEDJENNENT | 74 |
| Tableau III-29 : Résultats de la résistance à la compression du béton formulé avec les granulats d'ENNOUR..... | 75 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure I-1 : Différents types de granulats | 3 |
| Figure I-2 : Appellations des granulats suivant leurs dimensions | 5 |
| Figure I-3 : Volume hachuré = Volume réelle (apparent) | 9 |
| Figure I-4 : Volume hachuré = Volume absolu (sans pores)..... | 9 |
| Figure I-5 : Principe de l'essai Micro-DEVAL | 12 |
| Figure I-6 : Principe de l'essai Los-Angeles..... | 13 |
| Figure I-7 : Les modes d'équivalent de sable ; ESV et ESP. | 14 |
| Figure I-8 : Bleu de méthylène | 14 |
| Figure II-1 : Schéma d'une opération de quartage..... | 27 |
| Figure II-2 : Exécution de l'analyse granulométrique | 29 |
| Figure II-3 : Appareillage nécessaire pour l'analyse granulométrique..... | 30 |
| Figure II-4 : Grilles à fentes..... | 32 |
| Figure II-5 : Pycnomètre (photo prise en Avril 2023) | 34 |
| Figure II-6 : Exécution de l'essai Micro-DEVAL (photos prises en Avril 2023) | 36 |
| Figure II-7 : Exécution de l'essai Los Angeles (photos prises en Avril 2023)..... | 39 |
| Figure II-8 : Exécution de l'essai d'Equivalent de sable | 42 |
| Figure II-9 : Exécution de l'essai au Bleu de méthylène | 45 |
| Figure II-10 : Essai d'affaissement au cône d'ABRAMS | 46 |
| Figure II-11 : Exécution de l'essai d'affaissement au cône d'ABRAMS..... | 47 |
| Figure II-12 : Machine à essai de compression | 49 |
| Figure II-13 : Positionnement de l'échantillon | 50 |
| Figure III-1 : Courbes granulométriques des granulats de la carrière de LAFARGE (EL-MEHIR) | 55 |
| Figure III-2 : Courbes granulométriques des granulats de la carrière de TAYA..... | 56 |
| Figure III-3 : Courbes granulométriques des granulats de la carrière de CTM (TEDJENNENT)..... | 57 |
| Figure III-4 : Courbes granulométriques des granulats de la carrière d'ENNOUR (EL-GROUZ) | 58 |

Liste des abréviations

| | |
|--------------------------------|--|
| CEN | Comité Européen de Normalisation |
| ρ | Masse volumique |
| ρ_r | Masse volumique réelle |
| ρ_{abs} | Masse volumique absolue |
| P | Porosité |
| C | Compacité |
| I | Indice de vide |
| W% | Teneur en eau |
| MDE | Coefficient Micro-DEVAL en présence d'eau |
| MDS | Coefficient Micro-DEVAL sec |
| LA | Coefficient Los Angeles |
| ES | Equivalent de sable |
| ESP | Equivalent de sable mesuré au piston |
| ESV | Equivalent de sable mesuré visuellement |
| MB ou MBF | Valeur de bleu de méthylène |
| RHA | Rice Husk Ash |
| RC ou R | Résistance à la compression |
| Gr | Analyse granulométrique par tamisage |
| D | Diamètre maximal des gravillons |
| d | Diamètre minimal des gravillons |
| A | Aplatissement global |
| Ai | Aplatissement partiel |
| WA24 | Coefficient d'absorption d'eau après immersion pendant 24H |
| f | Teneur en fines |

Liste des formules

| | |
|--|----|
| $\rho = \frac{M}{V}$ (I.1) : Masse volumique | 8 |
| $\rho_{\text{réel}} = \frac{M_{\text{mat}}}{V_{\text{réel}}}$ (I.2) : Masse volumique réelle | 8 |
| $\rho_{\text{abs}} = \frac{M_{\text{mat}}}{V_{\text{abs}}}$ (I.3) : Masse volumique absolue..... | 9 |
| $P = \frac{V_{\text{pores}}}{V_{\text{tot}}} \times 100$ (I.4) : La porosité | 10 |
| $C = \frac{V_{\text{mat}}}{V_{\text{tot}}} \times 100$ (I.5) : La compacité | 10 |
| $P + C = 1$ (100%)... .. (I.6) : Relation entre la porosité et la compacité | 10 |
| $I = \frac{P}{C}$ (I.7) : Indice de vide | 10 |
| $W\% = \frac{E}{M_s} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100$ (I.8) : Teneur en eau | 10 |
| $\frac{G}{E} > 1.58$ (I.9) : Rapport grandeur sur épaisseur des granulats | 11 |
| $ESP(\%) = 100 \times \frac{h_2}{h_1}$ (I.10) : Equivalent de sable à piston | 13 |
| $ESV(\%) = 100 \times \frac{h'_2}{h_1}$ (I.11) : Equivalent de sable visuel | 13 |
| $P = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}}$ (I.12) : Formule de BOLOMEY | 22 |
| $f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100$ (II.1) : pourcentage de fines (f) passant à travers le tamis de 0.063 mm | 29 |
| $\frac{R_n}{M_1} \times 100$ (II.2) : pourcentage des refus cumulés | 29 |
| $100 - (\frac{R_n}{M_1} \times 100)$ (II.3) : pourcentage cumulé de tamisât | 29 |
| $P_n = \frac{M_2 - (\sum R_i + P)}{M_2} \times 100 < 1\%$ (II.4) : Pourcentage en fines (f) passant à travers le tamis de 0.063mm | 29 |
| $A_i = \frac{m_i}{R_i} \times 100$ (II.5) : Aplatissement partiel | 31 |
| $A = \frac{M_2}{M_1} \times 100$ (II.6) : Aplatissement globale | 31 |
| $\rho_a = \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$ (II.7) : Masse volumique absolue | 33 |
| $\rho_r = \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$ (II.8) : Masse volumique réelle | 33 |

| | |
|--|--|
| $\rho_{ssd} = \frac{M1}{M1 - (M2 - M3)}$ (II.9) : Masse volumique réelle saturée surface sèche...33 | |
| $WA24 = \frac{100(M1-M4)}{M4}$ (II.10) : Coefficient d'absorption d'eau après immersion pendant 24H33 | |
| $MDE = \frac{m}{M} \times 100$ (II.11) : Coefficient MDE36 | |
| $MDE = \frac{500-m}{5}$ (II.12) : Coefficient MDE37 | |
| $LA = \frac{5000-m}{50}$ (II.13) : Coefficient Los-Angeles40 | |
| $f = 100 - \frac{M2(100+W)}{M1}$ (II.14): Teneur en fines f42 | |
| $MT = \frac{120(100+W)}{100}$ (II.15) : Teneur en fines f (f > 10%)42 | |
| $MT = M3 + M4$ (II.16) : Teneur en fines f (f > 10%)42 | |
| $M3 = \frac{1200}{f} (1 + \frac{W}{100})$ (II.17) : Masse granulat humide42 | |
| $M4 = 120 - \frac{1200}{f}$ (II.18) : Masse du sable correcteur sec42 | |
| $Es = \frac{h2}{h1}$ (II.19) : Equivalent de sable Es43 | |
| $M1 = \frac{M0}{1+(W+100)}$ (II.20) : Masse sèche de la prise d'essai MB 45 | |
| $MB = \frac{V1}{M1} \times 10$ (II.21) : Valeur au Bleu de méthylène 45 | |
| $R = \frac{F}{A}$ [MPa] (II.22) : Résistance à la compression 53 | |

Introduction générale

Introduction Générale

Le béton est sans aucun doute été depuis longtemps, le matériau prédominant dans tous les secteurs de la construction, à travers toutes les régions du monde. Il conserve sa position privilégiée en tant que matériau de choix pour la fabrication d'éléments structuraux. Bref, c'est un matériau irremplaçable.

Cependant, sa fragilité reste toujours un handicap majeur de son comportement mécanique, vue la qualité de ses constituants notamment les granulats, qui jouent un rôle crucial dans la performance à long terme du béton. C'est pourquoi la stabilité et la durabilité des ouvrages de construction sont étroitement liées à la qualité du béton utilisé, ainsi qu'à la qualité intrinsèque de ses granulats constitutifs.

Après avoir obtenu une compréhension approfondie des propriétés et des caractéristiques des divers constituants de béton, il devient impératif de déterminer les dosages pour chacun de ces composants, en vue de créer 1m³ réel de béton.[1] Ce processus vise à élaborer une formulation de béton qui soit en mesure de satisfaire aux spécifications de qualité prédéfinies, en considérant les différents paramètres qui affectent ce matériau à ses deux états : frais et durci.

L'objectif principal de ce modeste travail est d'examiner l'influence de la qualité des granulats sur le comportement mécanique du béton, et afin de le bien exposer, nous avons réalisé une série d'essais d'identification sur quatre gammes complètes de granulats issus des carrières distinctes. Ces granulats sont ensuite utilisées pour effectuer quatre formulations de béton en maintenant constants les autres composants de ce dernier, et enfin nous avons testé et comparé les quatre produits de nos formulations.

Pour mener à bien notre recherche et par intérêt méthodologique, nous l'avons structurée en trois chapitres :

Un premier chapitre comme revue bibliographique, subdivisé en deux parties. La première traite des aspects théoriques sur les granulats. La deuxième partie porte des généralités sur le béton.

Dans le deuxième chapitre nous nous sommes focalisées sur les différents essais d'identification et de caractérisation effectuée en abordant leurs principes, mode opératoire et équipement utilisé.

Nous avons consacré le dernier chapitre à la partie expérimentale où nous avons exposé les résultats obtenus, nous les avons interprété et comparé en se référant aux normes et recommandations.

Notre recherche se clôture par une conclusion générale qui synthétise l'intégrité du travail réalisé.

Chapitre I

CHAPITRE I : Etude bibliographique

Introduction

Les granulats et le béton sont des éléments essentiels dans l'industrie de la construction, et jouent un rôle crucial dans le domaine de l'ingénierie civile. Les granulats sont utilisés comme composant essentiel du béton, le béton quant à lui, est le matériau de construction le plus largement utilisé dans le monde en raison de ses propriétés diverses. Dans ce chapitre nous essayerons récapituler certaines généralités sur les agrégats ainsi le béton.

PARTIE 1 : Etude sur les granulats

I.1.1. Définition

Ensemble de matériaux inertes (sables, graviers, cailloux...etc), dont l'origine peut-être naturelle, artificielle ou provenant de recyclage, et qui entrent dans la composition des bétons. [1]

Ceux qui sont naturels résultent du processus d'altération et d'abrasion ou par la fragmentation des minéraux de nature et grosseur différentes, on les trouve sous une forme arrondie ou rugueuse, d'une dimension comprise entre 0 et 125 mm.

On les classe en fonction de leurs granularités et on les utilise pour la réalisation d'ouvrages de génie civile, de travaux routiers et de bâtiments, et pour la décoration interne et externe.



Figure I-1 : Différents types de granulats. [2]

I.1.2. Nature des granulats

La nature des granulats utilisés dans le béton peut varier en fonction des disponibilités locales, des spécifications du projet, des exigences de performance et des normes en vigueur [2]. Le choix des granulats appropriés est crucial pour obtenir un béton de qualité et répondre aux exigences spécifiques de chaque projet.

Un granulat, en fonction de sa nature et de son origine, peut-être : [3]

I.1.2.1. Granulats naturels

Issus de roches meubles ou de roches massives et qu'ils ne subissent aucun traitement autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage). [3]

I.1.2.2. Granulats artificiels

D'origine minérale et qui proviennent de la transformation à la fois thermique et mécanique de la roche ou de minerais [3], comme les laitiers de haut fourneau qui se produisent lors de la fusion du minerai de fer.

I.1.2.3. Granulats recyclés

Qui proviennent des produits industriels récupéré et recyclé lors de la démolition d'ouvrages ou lorsque ces produits sont réutilisés, tels que des bétons, des briques ou des débris de construction [3]. Ils sont utilisés dans le souci de durabilité et de gestion des déchets, tout en respectant les normes de qualité requises.

I.1.3. Classification des granulats

Le terme granulat est parfois utilisé pour les granulats grossiers par opposition au sable, qui est généralement considéré comme ayant une taille limite inférieure d'environ 0.07mm ou légèrement inférieure.

Les matériaux entre 0.06mm et 0.02mm sont classés comme limon, et les particules les plus petites sont appelées argile.

Le béton est fabriqué à partir de particules de granulats de différentes dimensions. La distribution de la taille de ces particules est appelée granulométrie. [4]

La classification des granulats s'effectue par une analyse granulométrique, en utilisant une série de tamis avec des mailles carrées de dimensions recommandées par le CEN (NF EN 933-2).

Les appellations des différentes classes granulaires obtenues par tamisage sont précisées par la nouvelle norme XP P 18-540 d'octobre 1997 : [1]

| | |
|-----------------|--|
| -fillers 0/D | pour $D < 2$ mm et ayant au moins 70% de grains passant au tamis de 0,63mm ; |
| -sablon 0/D | pour $D \leq 1$ mm et avec moins de 70% de grains passant au tamis de 0,63mm ; |
| -sable 0/D | lorsque D est tel que : $1 \text{ mm} < D \leq 6,3$ mm ; |
| -graves 0/D | lorsque $D > 6,3$ mm ; |
| -gravillons d/D | lorsque $d \geq 1$ mm et $D \leq 125$ mm ; |
| -ballast d/D | lorsque $d \geq 25$ mm et $D \leq 50$ mm ; |

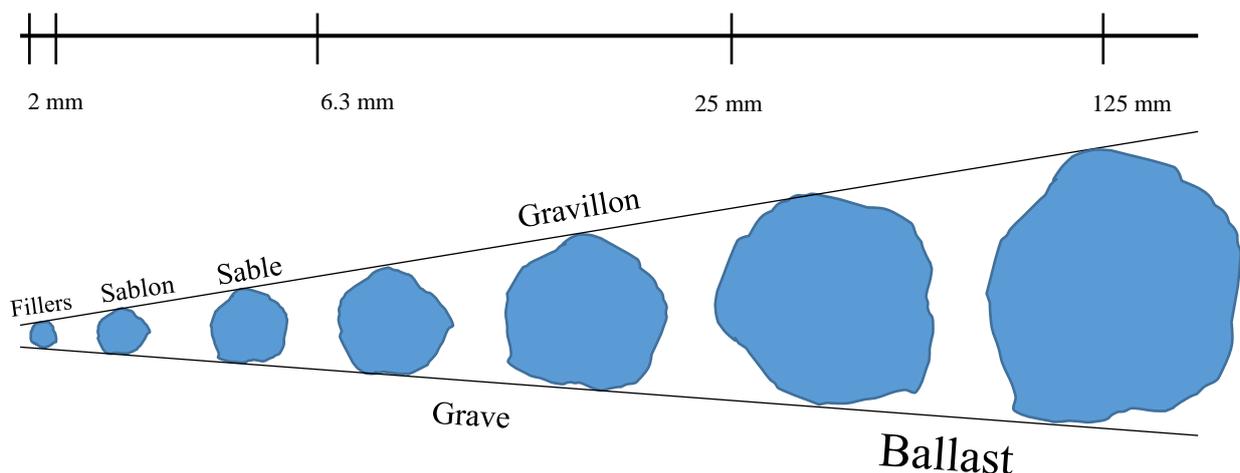


Figure I-2 : Appellations des granulats suivant leurs dimensions

I.1.4. Origine minéralogique des granulats

Le granulat tire bon nombre de ses propriétés de sa roche mère, telles que les propriétés physiques et mécaniques, alors l'origine de cette roche est très importante.

Les roches elles-mêmes sont composées de divers minéraux, définis comme des substances inorganiques naturelles de composition chimique plus ou moins définie et généralement d'une structure cristalline spécifique, (ASTM C294), et sont classées en fonction de leur origine :

I.1.4.1. Roches massives

Les roches massives sont des roches consolidées (cimentées), susceptible de fournir des granulats par plusieurs opérations de concassage (primaire, secondaire, tertiaire et quaternaire), en sélectionnant les matériaux à récupérer entre chaque étape de concassage. [5]

Ce type de roches est d'origine magmatique, sédimentaire (calcaire, grés) ou métamorphiques (granite, quartzite, schistes, basaltes...) :

➤ **Roches magmatiques**

Elles sont des roches endogènes (formées à l'intérieur du globe), résultant par un refroidissement plus ou moins rapide du magma.

Ce refroidissement (cristallisation du magma) distingue deux types de roches éruptives :

- Roches plutoniques : si le refroidissement s'est effectué lentement et en profondeur ;
- Roches volcaniques : si le refroidissement s'est effectué rapidement, près de la surface. [6]

➤ **Roches sédimentaires**

Elles sont des roches exogènes (formées à la surface du globe), résultant par la décomposition physico-mécanique et chimique (altération, sédimentation, érosion et transport) d'autres roches préexistantes.

Leurs propriétés dépendent largement des propriétés du ciment ou des phases cimentées. Comme prévu, ils varient considérablement, allant des grès faiblement cimentés aux calcaires très fortement cimentés.

Parce que leurs minéraux ont subi un processus de dégradation, ils ont tendance à être plus stables que ceux des roches ignées (ou métamorphiques). [6]

➤ **Roches métamorphiques**

Ce type des roches résulte de la transformation à l'état solide des roches préexistantes (sédimentaire, éruptive), par une augmentation de la pression et de la température.

Généralement ces roches se forment au sein de l'écorce terrestre, donc elles sont des roches endogènes. [6]

I.1.4.2. Roches meubles

Les roches meubles sont des roches non consolidées (composants non soudés entre eux), dont les granulats sont récupérés sans opération de concassage. Cette dernière s'effectue uniquement pour les éléments plus gros (cailloux, gros graviers). [5]

I.1.5. Normes et qualités conventionnelles

Les granulats occupent généralement 60% à 75% du volume de béton (70% à 85% en masse), alors le choix de granulats de bon type et de bonne qualité est très important, car il influe sur les propriétés de béton. [7]

Un mauvais béton est toujours faible, non-homogène, ayant une consistance d'une soupe et se durci en une masse alvéolé. Contrairement au bon béton, ayant des ingrédients identique (granulats, eau, ciment). La différence réside dans le 'savoir-faire', qui aide à la création d'un béton répondant à deux critères généraux : [4]

- Mise en œuvre facile à l'état frais (malaxage, transport, mise en place dans le coffrage ...);
- Une bonne qualité et une forte résistance à l'état durci.

Pour fabriquer un bon béton, il est nécessaire de prendre en considération certains critères concernant le choix des granulats.

Le type, la taille et les catégories de granulats doivent être sélectionnés en tenant compte : [8]

- Des contraintes d'exécution de l'ouvrage ;
- De l'utilisation finale du béton ;
- Des conditions environnementales auxquelles sera soumis le béton ;
- De toutes les exigences liées aux traitements de surface appliqués au béton frais ou durci.

I.1.6. caractéristiques des granulats

La nature minérale des granulats joue un rôle essentiel dans leur utilisation. Les granulats doivent respecter des exigences et des critères de qualité et de régularité qui dépendent de deux aspects principaux : [9]

- La nature de la roche (résistance aux chocs et à l'usure, caractéristiques physicochimiques,...) ;
- Les caractéristiques physiques liées au processus d'élaboration des granulats tels que leurs dimensions, leurs formes et leur propreté.

I.1.6.1 La masse volumique

Les normes qui définissent et permettent la détermination des masses volumiques des granulats sont : NF P 18-554, 18-555, 18-558, EN 1097-3, EN 1097-6 [10, 11, 12, 13, 14].

La masse volumique s'exprime par la formule suivante :

$$\rho = \frac{M}{V} \dots \dots \dots (I.1)$$

Avec :

ρ : Masse volumique, exprimée en : (g/cm^3), (kg/m^3) et (t/m^3)

M : Masse exprimée en : (g), (kg) ou en tonne (t).

V : Volume, exprimée en : (cm^3) et (m^3)

➤ Masse volumique réelle

Une propriété physique intrinsèque qui permet de évaluer la masse d'un volume donné, en informant sur le degré de compacité du matériau. [15]

C'est le rapport entre la masse de matériau et le volume réel des grains

$$\rho_{\text{réel}} = \frac{M_{\text{mat}}}{V_{\text{réel}}} \dots \dots \dots (I.2)$$

Avec :

$$V_{\text{réel}} = V_{\text{granulat}} + V_{\text{inter-grains}}$$

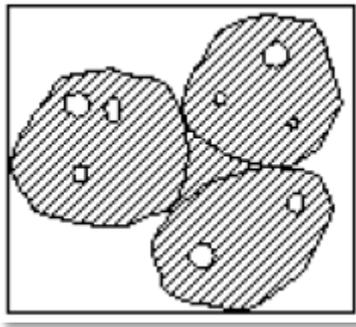


Figure I-3 : Volume hachuré = Volume réelle (apparent) [16]

➤ **Masse volumique absolue**

Une propriété physique utilisée pour déterminer la formulation des bétons, ainsi que pour modéliser les caractéristiques intrinsèques des matériaux, tels que la résistance à la compression.

C'est la masse de matériau par unité de volume, sans tenir compte des vides intergranulaires.

$$\rho_{abs} = \frac{M_{mat}}{V_{abs}} \dots \dots \dots (I.3)$$

Avec :

M_{mat} : masse du matériau

$$V_{abs} = V_{réel} - V_{pores}$$

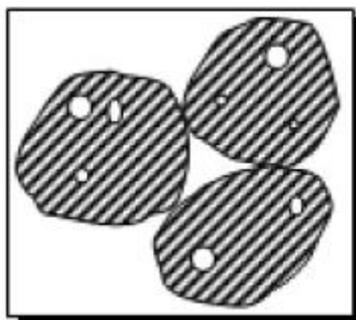


Figure I-4 : Volume hachuré = Volume absolu (sans pores) [16]

I.1.6.2 Compacité et Porosité

Elles sont deux concepts opposés qui concernent la disposition des pores (vides) dans un matériau.

- **La porosité :** Qui réfère à la présence des pores dans un matériau, en déterminant sa capacité à stocker ou à permettre le passage de fluides ou de gaz.

Elle est exprimée par la formule suivante :

$$P = \frac{V_{\text{pores}}}{V_{\text{tot}}} \times 100 \quad \dots \dots \dots (I.4)$$

- **La compacité :** Qui réfère à la densité du matériau d'une manière dont les pores sont étroitement emballés.

Un matériau compact aura une porosité réduite, car les pores sont étroitement juxtaposés, laissant peu d'espace vide entre elles.

Elle est exprimée par la formule suivante :

$$C = \frac{V_{\text{mat}}}{V_{\text{tot}}} \times 100 \quad \dots \dots \dots (I.5)$$

NB : La porosité et la compacité sont liées par la relation. [17]

$$P + C = 1 \text{ (100\%)} \quad \dots \dots \dots (I.6)$$

I.1.6.3 Indice de vide

L'indice de vide est le quotient de la porosité par la compacité, exprimé par : [1]

$$I = \frac{P}{C} \quad \dots \dots \dots (I.7)$$

I.1.6.4 Teneur en eau

La teneur en eau d'un matériau est le rapport du poids d'eau contenu dans ce matériau au poids du même matériau sec. On peut aussi définir la teneur en eau comme le poids d'eau W contenu par unité de poids de matériau sec.

Elle est exprimée en % :

$$W\% = \frac{E}{M_s} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad \dots \dots \dots (I.8)$$

Où :

E : Poids d'eau dans le matériau.

Ms : Poids du matériau sec.

Mh : Poids matériau humide.

I.1.6.5 Coefficient d'aplatissement

La détermination du coefficient d'aplatissement est l'un des tests permettant de caractériser la forme la plus ou moins massive des granulats.

La forme d'un granulat est définie par trois grandeurs géométriques : La longueur **L**, L'épaisseur **E**, La grosseur **G**. Le coefficient d'aplatissement A d'un ensemble de granulats est le pourcentage pondéral des éléments qui vérifient la relation :

$$\frac{G}{E} > 1.58 \quad \dots \dots \dots (I.9)$$

I.1.7. Essais sur les granulats

Quel que soit l'usage que l'on en fait (pour formuler un béton de qualité, pour usage routiers, pour décoration ...), il est essentiel d'effectuer différentes essais aux granulats avant de les utiliser, afin de garantir leur conformité aux normes, et d'évaluer leurs caractéristiques et leur qualité.

I.1.7.1. Analyse granulométrique

C'est la détermination de la distribution en poids des particules d'un matériau suivant leur dimension en référant à la norme

Elle implique le passage d'un échantillon à travers une série de tamis superposés, dont les mailles deviennent de plus en plus petites de haut en bas. Ensuite, on pèse la quantité de matériau retenue sur chaque tamis pour calculer le pourcentage de poids de chaque fraction granulométrique. Pour faciliter le processus, les tamis sont généralement agités par des vibrations afin d'optimiser l'efficacité du tamisage [18]. Cette méthode de tamisage permet d'obtenir des informations précises sur la répartition des différentes tailles de particules dans un échantillon de matériau.

I.1.7.2. Détermination de coefficient d'aplatissement

La mesure du coefficient d'aplatissement des granulats est un indicateur de la forme des grains, en particulier de la présence d'éléments plats et allongés.

Le coefficient d'aplatissement est déterminé en effectuant une analyse granulométrique en deux étapes sur les différentes fractions (d_i/D_i) d'un échantillon de granulats. Cela comprend l'utilisation d'une série de tamis normalisés avec des mailles carrées, suivie d'une série de tamis avec des fentes de largeurs normalisées ($D_i/2$). [19]

Le coefficient d'aplatissement global est déterminé en calculant le pourcentage de la masse totale des particules qui passent à travers les grilles à fentes par rapport à la masse totale des particules sèches soumises à l'essai [19]. Cela permet d'évaluer la proportion des particules qui sont aplaties par rapport à l'ensemble des particules testées.

I.1.7.3. Détermination de la masse volumique réelle

La masse volumique réelle est obtenue en calculant le rapport entre la masse et le volume d'un échantillon. La masse est déterminée en pesant la prise d'essai saturée en surface sèche, puis en la pesant à nouveau après séchage à l'étuve. Le volume est calculé en mesurant la masse du volume d'eau déplacé, soit en utilisant la méthode du panier en treillis qui permet de réduire le poids, soit en utilisant la méthode du pycnomètre qui consiste à peser le volume d'eau directement. [20]

I.1.7.4. Essai Micro-DEVAL

L'essai de "Micro-DEVAL" permet de quantifier la résistance des granulats à la fois à la fragmentation due aux chocs et à l'usure causée par les frottements réciproque avec une charge abrasive.

Cela peut être réalisé soit en présence d'eau (MDE), soit en absence d'eau (MDS), dans un cylindre en rotation, et dans des conditions normalisées par la norme NF EN 1097-1. [21]

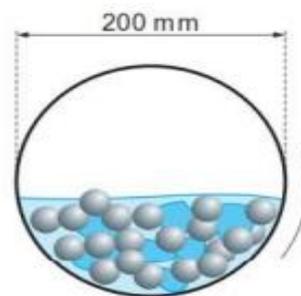


Figure I-5 : Principe de l'essai Micro-DEVAL

I.1.7.5. Essai Los Angeles

Cet essai peut être utilisé pour mesurer la résistance combinée à la fragmentation causée par l'impact des boulets et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat en calculant un coefficient de Los Angeles. [22]

Le test consiste à mesurer la masse m d'éléments inférieurs à 1,6 mm produits par fragmentation du matériau à tester (d'un diamètre compris entre 4 et 50 mm) et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los Angeles en un nombre de rotations défini.

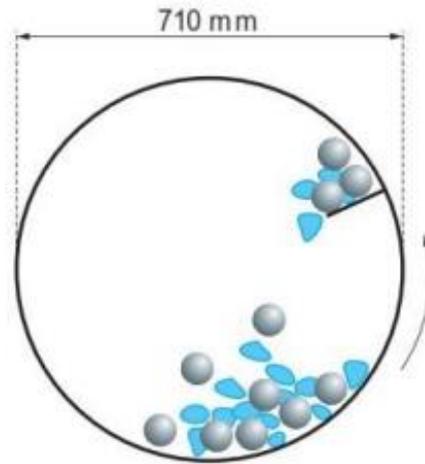


Figure I-6 : Principe de l'essai Los-Angeles

I.1.7.6. Essai d'Equivalent de sable

Pour le sable, cet essai consiste à plonger un poids défini de sable dans une solution flocculant. Après agitation, le mélange est laissé à décanter pendant 20 minutes. Ensuite, on mesure la hauteur, dans l'éprouvette normalisée, du sédiment H1, et du sédiment + flocculat H2 [23]

Le résultat de l'essai s'exprime par :

$$ESP(\%) = 100 \times \frac{h_2}{h_1} \dots \dots \dots (I.10)$$

$$ESV(\%) = 100 \times \frac{h'_2}{h_1} \dots \dots \dots (I.11)$$

Où :

ESP : équivalent de sable mesuré au piston

ESV : équivalent de sable mesuré visuellement

h_1 : hauteur du sable propre et élément fins.

h_2 : hauteur du sable propre seulement au piston

h'_2 : hauteur du sable propre seulement.

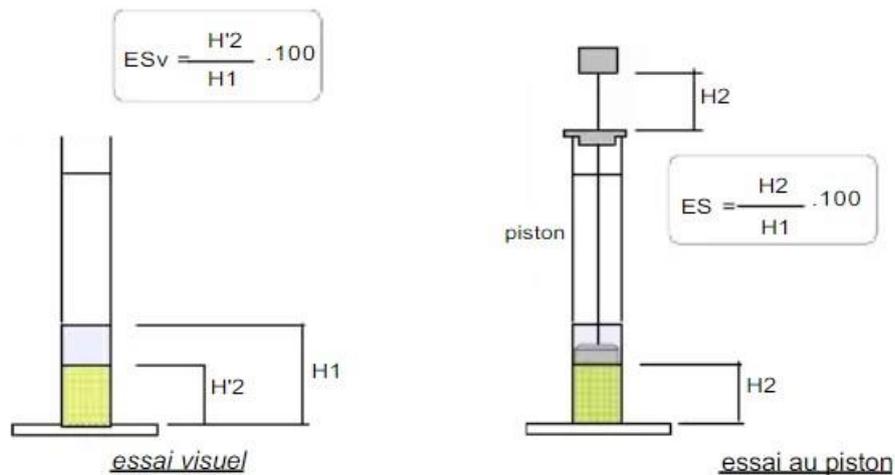


Figure I-7 : Les modes d'équivalent de sable ; ESV et ESP. [24]

I.1.7.7. Essai au bleu de méthylène

Le bleu de méthylène est un réactif de rétention pour les tests d'identification de qualité et de propreté particulaire selon la norme NF EN 933-9. [25]



Figure I-8 : Bleu de méthylène

Une quantité pesée de solution de bleu de méthylène est ajoutée en continu à la suspension aqueuse de la prise d'essai. L'adsorption de la solution colorée par la prise d'essai est vérifiée par un test ponctuel sur papier filtre après chaque ajout de solution pour déterminer la présence de colorant libre. Si la présence de colorant libre est confirmée, la valeur du bleu de méthylène (MB ou MBF) est calculée et exprimée en grammes de colorant adsorbé par kg de fraction de granules testée.

PARTIE 2 : Etude sur les bétons

I.2.1. Définition

Le béton, au sens le plus large, est tout produit ou masse fabriqué à l'aide d'un milieu de cimentation. Généralement, ce milieu est le produit de la réaction entre le ciment hydraulique et l'eau. [4]

Ce produit est constitué d'un mélange intime de ciment, de granulats, d'eau et parfois, d'ajouts minéraux et de faible quantité d'adjuvant. Le durcissement de ces constituants dosés, résultant un produit artificiel ayant une solidité et une résistance dépassant celle des roches naturelles. [1]

Le béton est conçu pour former une matrice homogène à partir d'un mélange de composants hétérogènes, de nature, de masse volumique et de taille variables. Mais pris dans leur ensemble, ils forment une pâte qui représente l'élément actif du béton qui enrobe les granulats. La pâte (ciment + eau) agit initialement comme un lubrifiant, et durcit comme une colle. [26]

I.2.2. Composantes du béton

I.2.2.1 Les granulats

Les granulats (sable et gravillons) constituent le squelette granulaire du béton, occupants au moins trois quarts de son volume. Ils proviennent généralement des roches naturelles.

Leur meilleure durabilité, forte stabilité volumétrique et leur faible coût volumique par rapport au mélange ciment-eau, Justifie leur utilisation pour la confection d'un béton. [27]

La forme, la texture de la surface et la concentration en granulats ont un effet significatif sur le comportement du béton à l'état frais. [28]

I.2.2.2 Le ciment

C'est le liant hydraulique obtenu par cuisson puis broyage d'un mélange de calcaire et d'argile. Il est le constituant fondamental du béton qui permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide. [29]

Pendant le gâchage, le liant hydraulique réagit chimiquement avec l'eau (hydratation), cela forme une pâte qui occupe 25 à 40% du volume total du béton, jouant le rôle de matrice en liant les granulats.

Le ciment généralement utilisé dans le génie civil est le ciment «portland», ayant 4 constituants essentiels de types minéralogiques : [17]

- Silicate tricalcique (ou alite) 3CaO , SiO_2 (noté C3S) : 60 à 65% ;
- Silicate bicalcique (ou bélite) 2CaO , SiO_2 (noté C2S) : 20 à 25% ;
- Aluminate tricalcique (ou célite) 3CaO , Al_2O_3 (noté C3A) : 8 à 12% ;
- Alumino-ferrite tétracalcique 4CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 (noté C4AF) : 8 à 10%.

I.2.2.3 L'eau de gâchage

L'eau est l'un des ingrédients essentiels du béton, elle intervient à toutes les étapes de la vie du matériau par ses propriétés physico-chimiques et mécaniques. L'eau introduite dans le béton lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles : une fonction physique qui confère au béton frais des propriétés rhéologiques permettant son écoulement et son moulage et une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation. [30]

Dans de nombreux cahiers des charges, la qualité de l'eau est couverte par une clause indiquant que l'eau de gâchage doit être potable [4]. Il est exclu d'employer de l'eau de mer, qui contient environ 30 g/l du sel (chlorure de sodium), pour la fabrication de bétons armés ou précontraints. [31]

I.2.2.4 Les additions minérales

Différentes additions peuvent être mélangées au ciment pour modifier les propriétés du béton frais et durci [32]. Tels que les cendres volantes, les fumées de silice et les cendres de balle de riz (RHA), qui sont des matériaux finement broyés, ajoutés pour obtenir des propriétés techniques spécifiques du mortier de ciment et de bétons.

Ces matériaux, réagissent chimiquement avec le $\text{Ca}(\text{OH})_2$, formé lors de l'hydratation du ciment. Cette réaction se traduit par une amélioration de la solidité, une diminution de la perméabilité, une meilleure résistance aux attaques chimiques et à l'expansion de l'alcali-granulat.

L'incorporation d'additions minérales, en particulier de sous-produits de déchets industriels tels que : les cendres volantes, le laitier de haut fourneau et la fumée de silice, améliore considérablement et favorablement de nombreuses propriétés du béton. En raison de

la forme sphérique et de la petite taille des particules vitreuses, les adjuvants de sous-produits industriels ont tendance à remplir l'espace vide entre les grains de ciment relativement gros, qui est autrement occupé par l'eau.

D'autres objectifs tout aussi importants de leur utilisation en grande quantité comme remplaçant du ciment et/ou de granulats fins dans le béton, sont l'efficacité économique et le recyclage écologique des déchets industriels et d'autres sous-produits. [33]

I.2.2.5 Les adjuvants

Un adjuvant est un produit chimique qui est incorporé dans le béton à un dosage inférieur à 5 % en poids de ciment, soit lors du malaxage du béton, soit avant sa mise en œuvre. Provoquant un changement dans ses propriétés ou son comportement. [1] Ils peuvent être ajoutés pour améliorer la maniabilité (adjuvants plastifiants), retarder ou accélérer le temps de prise (adjuvants retardateurs ou accélérateurs), augmenter la résistance (adjuvants super-plastifiants), réduire la perméabilité...etc.

Les principaux adjuvants sont : [31]

- Les plastifiants ;
- Les retardateurs de prise du ciment ;
- Les accélérateurs de prise et de durcissement ;
- Les entraîneurs d'air.

I.2.3. Propriétés du béton

Le béton est un matériau polyvalent qui peut être façonné dans toutes les formes nécessaires pour une construction. Il est durable, résistant au feu, économique et nécessite peu d'entretien au fil du temps.

Afin d'optimiser l'utilisation du béton, il est essentiel de bien comprendre ses propriétés à deux états différents. Tout d'abord, à l'état frais, lorsqu'il est plastique et manipulable. Ensuite, à l'état durci, lorsque sa forme ne peut plus être modifiée mais que ses caractéristiques continuent à évoluer pendant plusieurs mois, voire des années. [26]

I.2.3.1. Propriétés du béton frais

- **L'ouvrabilité** : C'est la propriété essentielle du béton frais, qui caractérise son aptitude à remplir les coffrages et à enrober convenablement les armatures [26].

La maniabilité du béton est définie comme la quantité de travail interne nécessaire pour obtenir un compactage complet. [4]

I.2.3.2. Propriétés du béton durci

Le béton durci se caractérise par plusieurs propriétés, en particulier :

- **La résistance à la compression** : C'est l'une des propriétés essentielles du béton qui évalue sa capacité à résister aux forces de compression. Elle est généralement exprimée en termes de résistance caractéristique à 7 jours ou à 28 jours.

La résistance mécanique d'un béton est fondamentalement liée aux performances mécaniques des granulats. [28]

- **La durabilité** : le béton durci maintient toujours face aux agressions du milieu (gel, dégel...);
- **La compacité et la porosité** : plus le béton est compact (moins il est poreux), plus il est performant. On comprend que les deux premières sont conditionnées par ses deux dernières.

I.2.4. Types des bétons

Il existe une grande variété de béton ayant des propriétés spécifiques, qui répondent à différents besoins de construction. Il est important de sélectionner le type de béton approprié en fonction des exigences structurelles, de durabilité, d'esthétique et de performances spécifiques à chaque projet.

Voici certains des types de béton les plus couramment utilisés sur chantier :

Tableau I-1 : Différents types de bétons et leurs avantages. [34]

| Types de bétons | Avantages |
|---------------------------|---|
| Béton léger | - Malléable et léger - Résistant aux chocs |
| Béton lourd | - Répond à des normes de sécurité très strictes - Dispose de granulats très lourds |
| Béton armé | - Fondations renforcées par l'acier - Risque de fissuration du béton limité - Béton très adapté en utilisation avec un coffrage, métallique, mixte, circulaire, sur-mesure... |
| Béton auto-plaçant | - Extrêmement fluide - Mise en œuvre sans vibration pour un gain de temps conséquent - Béton très adapté en utilisation avec un coffrage métallique |
| Béton fibré | - Renforcement général de la fondation - Risque de fissuration du béton limité |
| Béton prêt à l'emploi | - Gain de temps conséquent - Transféré et livré sur chantier |
| Béton précontraint | - État de compression optimal - Meilleure qualité de finition des fondations réalisées |
| Béton haute-performance | - Plus résistant à la compression - Plus fluide et moins poreux |
| Béton projeté | - Réduit l'affaissement de la fondation - Empêche le coulage ultérieur du béton |
| Béton de ciment alumineux | - Temps de bétonnage réduit - Meilleure résistance sur le long terme |

- Béton léger** : Ce type de béton est fabriqué par des granulats légers, tels que la perlite, la vermiculite ou les billes d'argile expansée. Il est caractérisé par une densité plus faible, une isolation thermique améliorée et un poids de structure réduit. Le béton léger est utilisé dans des applications nécessitant une isolation thermique, comme les toitures, les murs de façade et les éléments préfabriqués.

- **Béton lourd** : C'est une sorte de béton qui a une plus grande densité que le béton standard. Il est principalement dédié à des applications qui nécessitent une masse importante pour répondre à des exigences spécifiques, tels que : la protection contre les radiations, l'isolation acoustique, l'amélioration du contre poids et de la stabilisation...
- **Béton armé** : Le béton armé est renforcé par l'ajout d'armatures en acier (barres, treillis ...), pour but d'améliorer la résistance globale du béton.
Il est appliqué dans la construction de poutres, de poteaux, de planchers, de murs et de structures plus complexes.
- **Béton auto-plaçant (BAP)** : Il s'agit d'un matériau très fluide à l'état frais, et qui présente une exceptionnelle facilité de mise en œuvre, en évitant la vibration et en diminuant les nuisances sonores du chantier.[1]
- **Béton fibré** : Il poursuit le même objectif que le béton armé, en utilisant une approche similaire. Le béton fibré a pour objectif de renforcer la solidité globale de la structure. Bien que les armatures dans le béton armé, les fibres présentes dans le béton, jouent un rôle essentiel en limitant les risques de fissuration et en améliorant la résistance du matériau sur un long terme [34]. Ces fibres peuvent être fabriquées à partir de matériaux naturels (l'amiante, le sisal, la cellulose...) ou de produits manufacturés tels que le verre, l'acier, le carbone et les polymères (le polypropylène, le kevlar...). [4]
- **Béton prêt à l'emploi** : On parle de ce type lorsque le béton est livré depuis une installation centrale (à l'aide d'un camion toupie), au lieu d'être dosé et malaxé sur place. Il est largement utilisé en raison de ses nombreux avantages par rapport aux méthodes traditionnelles de fabrication : [4]
 - Il permet un contrôle précis du dosage, réduisant ainsi la variabilité des propriétés souhaitées du béton durci ;
 - Il peut être utilisé sur des chantiers encombrés ou dans la construction routière où l'espace est limité pour une centrale à béton et des stocks d'agréats ;
 - L'utilisation de camions malaxeurs garantit une manipulation soignée lors du transport, évitant ainsi la ségrégation du mélange et maintenant sa maniabilité ;
 - Il offre une grande praticité lorsque de petites quantités de béton ou une mise en place intermittente sont nécessaires.
- **Béton précontraint** : L'avènement des techniques de la technologie du béton précontraint a donné une impulsion à la fabrication d'un béton de plus grande résistance

[35]. Ce type de béton maintient une compression optimale, permettant de l'utiliser dans des conditions idéales, ce qui favorise une finition de meilleure qualité.

La précontrainte est obtenue en intégrant des câbles en acier dans le béton, comme cela le cas avec les armatures en acier dans le béton armé, et elle peut être appliquée par pré-tension et par post-tension : [34]

- **Pré-tension** : Le plus souvent utilisée en bâtiments, consiste à mettre les armatures en tension avant que le béton ne prenne. Par la suite, les relâchées, ce qui entraîne la compression du béton par adhérence. Cette technique ne permet pas d'atteindre des valeurs de précontrainte aussi élevées que ceux obtenus avec la post-tension. [36]
- **Post-tension** : Consiste à disposer des câbles de précontrainte dans des gaines incorporées au béton. Après que le béton ait durci, ces câbles sont tendus à l'aide de vérins afin de comprimer l'ouvrage au repos. Cette méthode assez complexe, est généralement utilisée pour les grandes ouvrages (tels que les ponts), car elle nécessite la mise en œuvre d'encombrantes « pièces d'about » (dispositifs installées de part et d'autre de l'ouvrage et permettent la mise en tension des câbles). [36]
- **Béton haute-performance** : Les bétons de haute performance se distinguent par des caractéristiques bien plus avantageuses que les bétons conventionnels. Ils offrent une résistance à la compression accrue et une meilleure fluidité. De plus, ils présentent une porosité réduite, ce qui permet une meilleure protection des armatures préalablement intégrées. [34]
- **Béton projeté** : C'est un mortier transporté dans un tuyau, accéléré par un jet d'air comprimé et mise en œuvre par projection sur une paroi. On distingue la projection par deux voies : [1]
 - **Voie sèche** : Où le mélange est sec, et l'eau est ajoutée à l'extrémité de la lance.
 - **Voie mouillée ou humide** : l'eau est ajoutée lors du malaxage du béton.

Le béton projeté est utilisé pour : [4]

- Les sections minces et légèrement armées (tels que : les coques en béton, les toitures en tôle, les revêtements de tunnel et les réservoirs en béton précontraint) ;
- La réparation de béton détérioré ;

- La stabilisation de pentes rocheuses ;
 - L'enrobage de l'acier pour la protection contre le feu ;
 - La réalisation de revêtements minces sur des surfaces en béton, en maçonnerie ou en acier.
- **Béton de ciment alumineux** : Ce type se compose de ciment à base d'aluminate de calcium, dite ciment alumineux. Ce dernier présente divers avantages pour le béton, notamment une prise plus rapide et une résistance accrue à long terme, ainsi qu'une meilleure résistance aux températures élevées. [34]

I.2.5. Formulation du béton

La confection du béton est un processus spécifique : il a des caractéristiques différentes selon la nature et la quantité de chaque composant (ciment, granulats, eau, adjuvants). [37]

Il existe différentes méthode pour formuler un béton :

- **Méthode de BOLOMEY**

En utilisant une méthode adéquate, une courbe granulométrique de référence est tracée et l'objectif est de créer une composition granulaire totale (intégrant le ciment) avec les granulats disponibles, de manière à ce que la courbe obtenue se rapproche autant que possible de la courbe de référence théorique.

La formule de base est la suivante :

$$P = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}} \dots \dots \dots (I.12)$$

Avec :

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

D : diamètre du plus gros grain

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

Cette méthode aboutit, théoriquement tout au moins, à une granularité continue.

- **Méthode de FAURY**

Cette méthode, développée par Jean Faury, est une approche spécifique reposant sur des règles empiriques et une connaissance approfondie des propriétés des matériaux constitutifs du béton. Les étapes clés de cette méthode comprennent :

- La sélection des matériaux (granulats, ciment) en fonction des spécifications et des performances souhaitées ;
- La détermination des proportions approximatives des matériaux basée sur des relations empiriques ;
- La réalisation d'essais préliminaires pour vérifier les performances du mélange, des ajustements et optimisations des proportions en fonction des résultats des essais ;
- La validation des performances du mélange par des essais supplémentaires ;
- La documentation détaillée de toutes les informations pertinentes.

Il est important de souligner que la méthode de formulation des bétons Faury repose sur l'expérience et peut varier d'un praticien à l'autre, en fonction des conditions et des exigences spécifiques de chaque projet.

- **Méthode de LA VALETTE**

La méthode de formulation de béton "La Valette" fait référence à une méthode développée par l'entreprise La Valette, spécialisée dans la production de béton prêt à l'emploi. Cette méthode peut inclure des techniques et des procédures particulières qui leur sont propres.

Elle implique le calcul du dosage optimal de sable et de ciment pour obtenir le mortier le plus dense possible avec un minimum de ciment. Ensuite, on ajoute la quantité maximale de gravier mouillé compatible avec une consistance permettant un moulage correct et une mise en œuvre facile sur le chantier. Le résultat est un béton dense avec un minimum de sable et la plus faible proportion de ciment possible. [38]

- **Méthode de DREUX-GORISSE**

Cette méthode est une approche spécifique de la formulation des bétons, développée par les ingénieurs français Pierre Dreux et Jean-Pierre Gorisse.

Le but de cette méthode est de calculer les types et les quantités de matériaux nécessaires (eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier G en kg/m³), pour fabriquer un

mètre cube de béton, en se basant sur des critères prédéfinis de maniabilité et de résistance énoncés dans le cahier des charges. [39]

Il est important de noter que cette technique nécessite une connaissance approfondie des propriétés des matériaux constitutifs du béton.

I.2.6. Essais sur le béton

Les essais sur le béton revêtent une importance cruciale, car ils fournissent une compréhension approfondie de son comportement dans les deux phases clés de sa vie : frais et durci.

- À l'état frais, ces essais offrent un aperçu précieux de la maniabilité du béton, évaluant sa facilité de mise en œuvre et sa capacité de coulage optimal.
- En parallèle, à l'état durci, ils fournissent une évaluation essentielle de sa résistance mécanique et de sa durabilité face aux agressions environnementales.

Cette combinaison d'informations permet de garantir que le béton répond aux normes de qualité, assurant la construction de structures robustes et durables.

I.2.6.1 Essais au cône d'ABRAMS

Cet essai est conçu pour évaluer l'état frais du béton. Il vise à mesurer sa fluidité et à déterminer sa consistance à l'aide d'un moule tronconique nommé le cône d'ABRAMS.

Plus l'affaissement de béton est grand, plus ce dernier est réputé fluide.

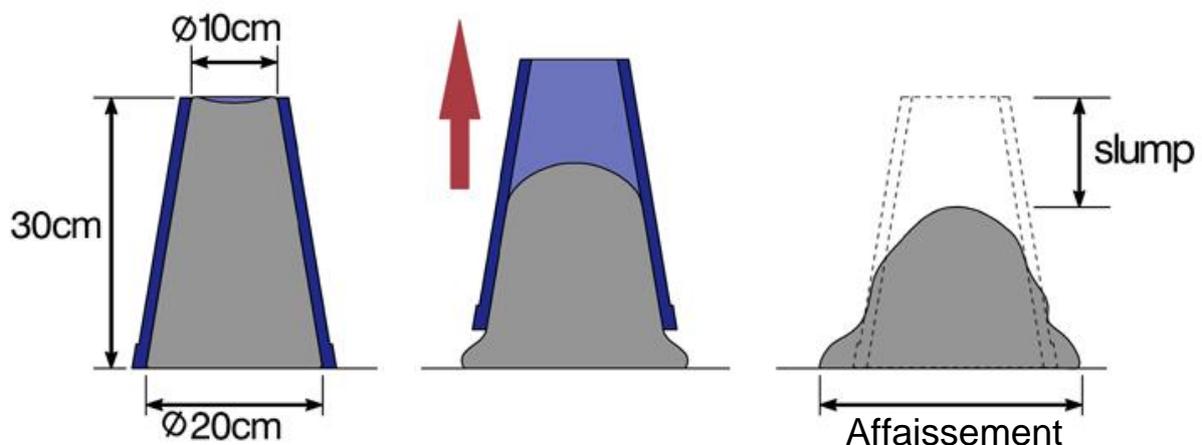


Figure I-9 : Principe de l'essai d'affaissement au cône d'ABRAMS

I.2.6.2 Essais de la résistance en compression

C'est l'expérience la plus répandue pour estimer les caractéristiques générales de résistance du béton durci. Il consiste à soumettre une charge compressive sur la section d'un échantillon cubique ou cylindrique, à l'aide d'une presse électrique jusqu'à rupture.

La résistance à la compression (RC) est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.

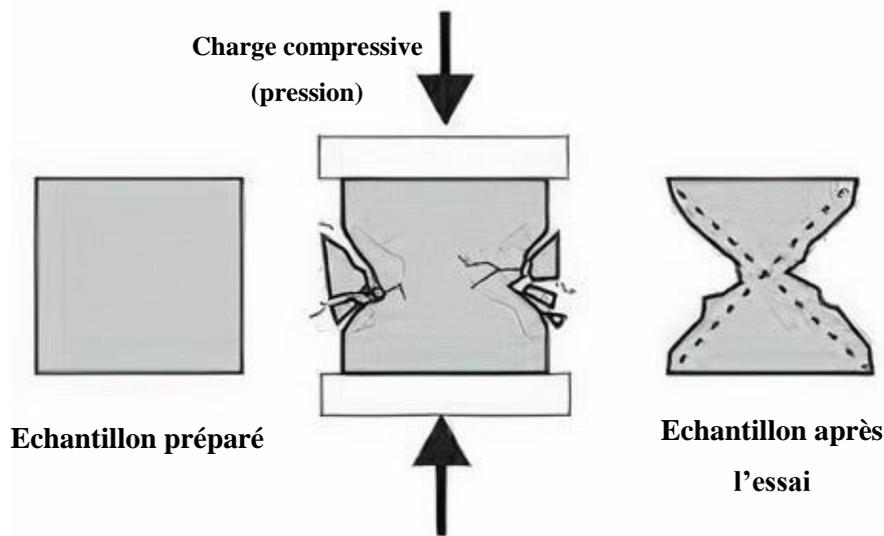


Figure I-10 : Principe de l'essai en compression

Conclusion

Ce chapitre nous permet de conclure que la qualité du béton est conditionnée par la qualité des granulats qui fournissent la structure, la résistance et d'autres propriétés nécessaire à une construction solide et durable.

Chapitre II

CHAPITRE II : Matériels et méthodes

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons nous lancer dans les essais sur les granulats et le béton, qui sont des méthodes normalisées permettant d'évaluer leurs caractéristiques et leurs performances. Ces essais jouent un rôle crucial dans le contrôle de la qualité des matériaux de construction, en garantissant leur conformité aux normes et aux spécifications requises.

II.1. Préparation d'un échantillon pour essai

Il est essentiel de prélever des quantités adéquates de granulats pour réaliser tous les essais, que ce soit pour évaluer le matériau à sa source, en réserve ou après sa mise en œuvre. [9]

Les échantillons destinés aux essais de laboratoire sont prélevés sur chantier par les équipes du contrôle sous la responsabilité de l'ingénieur conformément aux fréquences exigées et au mode de prélèvement et échantillonnage, emballage et d'identification.

Un échantillon est constitué de plusieurs prélèvements séparés, chacun ayant une masse approximativement égale (au moins trois prélèvements lorsque l'on évalue le produit final). Ces prélèvements sont ensuite regroupés et réduits par quartage ou par un autre moyen approprié jusqu'à l'atteinte de la taille spécifiée dans la norme. [9]

Les échantillons utilisés de notre part pour la réalisation de ce travail nous ont été directement référés par les responsables de ses opérations sur les différents sites ayant fait l'objet de notre étude, et ce en respectant les protocoles exposés ci-dessus.

II.1.1. But et principe de l'échantillonnage

Les essais réalisés en laboratoire nécessitent des quantités réduites de matériaux qui doivent permettre la mesure de paramètres caractéristiques de l'ensemble du matériau prélevé. Il est essentiel que l'échantillon utilisé en laboratoire soit représentatif de l'ensemble afin d'obtenir des résultats fiables lors des essais.

Le processus de prélèvement d'échantillons se déroule en deux étapes :

- **Prélèvement sur le chantier, la carrière ou l'usine** : d'une quantité substantiellement plus grande de matériaux par rapport à celle utilisée pour l'essai spécifique ;

- **Au laboratoire :** une quantité adéquate est prélevée de cet échantillon initial afin de garantir sa représentativité pour l'essai en question.

II.1.1.1. Prélèvement au niveau de la centrale

Dès leur arrivée à la centrale, les granulats sont disposés en tas de manière à ce que les plus gros grains se trouvent en bas et les plus fins en haut. Pour notre prélèvement, nous avons prélevé des échantillons du haut vers le bas en couvrant toute la périphérie du tas conique

II.1.1.2. Prélèvement au niveau du laboratoire

Le passage de l'échantillon total prélevé sur le tas à l'échantillon réduit, nécessaire à l'essai, peut se faire par quartage ou à l'aide d'un échantillonneur (par division).

II.1.2. Quartage

Ce procédé se fait à l'aide d'un appareil de laboratoire dite échantillonneur. Cet appareil divise facilement en deux parties représentatives la totalité de l'échantillon initial, chaque moitié étant recueillie dans un bac de manière séparée. La répétition en cascade de cette opération, en retenant à chaque opération le contenu de l'un des bacs, permet d'obtenir, après trois à quatre opérations identiques, la quantité de matériau représentatif et nécessaire à l'essai envisagé.

La figure ci-dessous présente le procédé permettant de sélectionner une masse ' m ' à partir d'un prélèvement de masse ' $3m$ '.

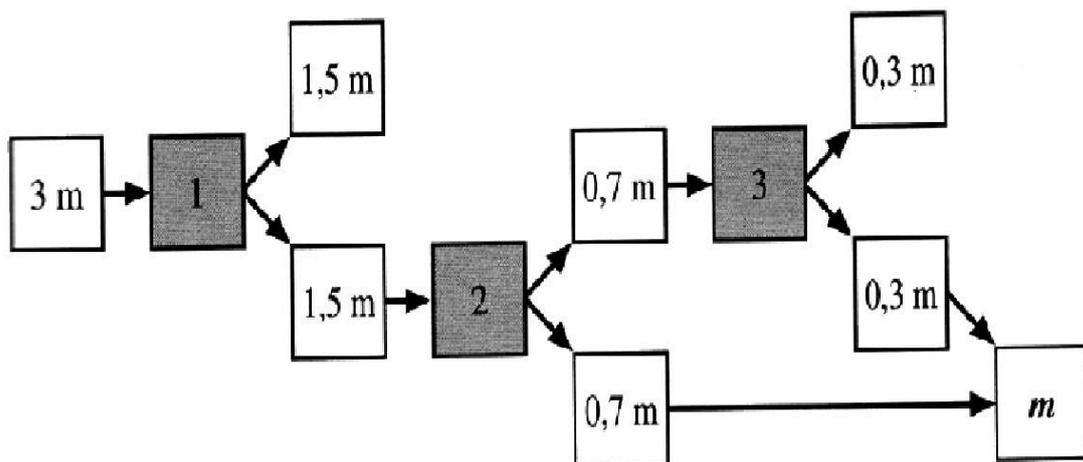


Figure II-1 : Schéma d'une opération de quartage.

II.2. Essais sur les granulats

Les granulats que nous étudions sont des graviers de différentes classes granulaires, notamment 4/8, 8/16 et 16/25 mm, ainsi que des sables de la classe granulaire 0/4 mm.

II.2.1. Essai de détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage (Gr) (NF EN 933-1)

1) Principe de l'essai

L'objectif de l'essai est de trier les granulats présents dans l'échantillon en utilisant une série de tamis superposés ayant des mailles carrées de dimensions recommandées par le CEN (NF EN 933-2) [1]. Les tamis sont ordonnés de haut en bas avec des ouvertures de dimensions décroissantes. Le matériau à étudier est placé dans la partie supérieure des tamis, et les grains sont classés par vibrations dans la colonne de tamis.

2) Mode opératoire

- Nous séchons la prise d'essai à une température jusqu'à obtenir une masse constante M_1 ;
- Nous réalisons ensuite un tamisage par lavage afin de séparer les éléments de dimension inférieure à 0.063 mm. Pendant le lavage, nous protégeons le tamis 0.063 mm en utilisant un ou deux tamis (1 mm ou 2 mm) ;
- Nous poursuivons le lavage jusqu'à ce que l'eau passant à travers le tamis 0.063 mm soit claire ;
- Nous séchons l'échantillon lavé à $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$;
- Après refroidissement, nous pesons l'échantillon jusqu'à obtenir une masse constante M_2 ;
- Le matériau séché est versé sur une série de tamis, avec une progression des ouvertures croissante du bas vers le haut ;
- Nous pesons le refus du tamis ayant la plus grande maille, noté R_1 ;
- Nous pesons également le refus du tamis immédiatement inférieur. La somme de R_1 et R_2 représente le refus cumulé sur le deuxième tamis ;
- Nous répétons cette opération pour tous les tamis, ce qui nous permet de connaître les masses des refus cumulés R_n ;
- La somme des refus cumulés mesurés sur les différents tamis, ainsi que le tamisât sur le fond, doit correspondre au poids de l'échantillon initial introduit en tête de colonne.

La perte éventuelle de matériaux (P_n) pendant l'opération de tamisage ne doit pas dépasser 1% du poids total de l'échantillon ;

- Enfin, nous calculons le pourcentage de fines (f) passant à travers le tamis de 0.063 mm.



Figure II-2 : Exécution de l'analyse granulométrique

3) Calcul et expression des résultats

Les formules suivantes expriment les calculs effectués pour chaque fraction

- Le pourcentage de fines (f) passant à travers le tamis de 0.063 mm :

$$f = \frac{(M1 - M2) + P}{M1} \times 100 \dots \dots \dots (II.1)$$

- Le pourcentage des refus cumulés :

$$\frac{Rn}{M1} \times 100 \dots \dots \dots (II.2)$$

- Le pourcentage cumulé de tamisât :

$$100 - \left(\frac{Rn}{M1} \times 100 \right) \dots \dots \dots (II.3)$$

- Le pourcentage de fines (f) passant à travers le tamis de 0.063 mm :

$$P_n = \frac{M2 - (\sum Ri + P)}{M2} \times 100 < 1\% \dots \dots \dots (II.4)$$

4) Appareillages et équipements

- **Série de tamis** : d'ouverture des mailles variante entre 0,063mm et 31,5mm + Fond du tamis + Couvercle ;
- **Tamiseuse** : électrique ou manuelle ;
- **Etuve** : Réglé pour maintenir une température de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$;
- **Balance électrique précise** ;
- **Matériau de lavage et de nettoyage** : tuyau, robinet, bac de réception, brosse.



Figure II-3 : Appareillage nécessaire pour l'analyse granulométrique

II.2.2. Essai pour détermination de la forme des granulats - Coefficient d'aplatissement (NF EN 933-3)

1) Principe de l'essai

Cet essai vise à mesurer les dimensions des granulats (Longueur L, Epaisseur E et Grosseur G), en effectuant une double opération de tamisage :

- Tamisage sur tamis d'essai à mailles carrées : pour classer l'échantillon étudié en différentes classes d/D (avec $D=1.25 d$) suivant leurs grosseurs G ;
- Tamisage sur grilles à fentes parallèles d'écartement ($E=d/1.58$) : pour les différentes classes granulaires d/D obtenus ;

Les coefficients d'aplatissement de chaque classe granulaires d/D correspondent aux passants du tamisage sur la grille à fontes, exprimés en pourcentages (%).

La somme pondérée des coefficients mesuré pour chaque classe granulaire, représente le coefficient d'aplatissement global, et l'élévation, de ce dernier, indique une forme plus aplatie des granulats.

2) Mode opératoire

- Nous tamisons la prise d'essai sur les tamis spécifiés ;
- Nous pesons et éliminons tous les grains passant au tamis de 4 mm et retenus sur celui de 80 mm ;
- Nous pesons et conservons séparément tous les grains de chaque granulat élémentaire d_i/D_i compris entre 4 mm et 80 mm ;
- Nous tamisons chaque granulat élémentaire d_i/D_i obtenu sur la grille à fente correspondante. Ce tamisage est effectué manuellement et est considéré comme terminé lorsque le refus ne varie pas de plus de 1% pendant 1 minute de tamisage ;
- Pour chaque granulat élémentaire, nous pesons le matériau passant à travers la grille à fente correspondante ;
- Nous calculons la somme des masses des granulats élémentaires d_i/D_i , soit M_1 ;
- Nous calculons la somme des masses des grains de chaque granulat élémentaire d_i/D_i passant à travers une grille à fente correspondante, d'écartement $D_i/2$, soit M_2 .

3) Calcul et expression des résultats

Le coefficient d'aplatissement est exprimé par les formules suivantes

- Pour l'aplatissement partiel (A_i)

$$A_i = \frac{m_i}{R_i} \times 100 \quad \dots \dots \dots (II.5)$$

Avec

m_i : masse du matériau passant à travers la grille à fentes d'écartement E correspondant

R_i : masse de la classe granulaire d/D

- Pour l'aplatissement global (A)

$$A = \frac{M_2}{M_1} \times 100 \quad \dots \dots \dots (II.6)$$

Avec

$$M2 = \sum mi$$

$$M1 = \sum Ri$$

4) Appareillage et équipements

- **Série de tamis** : d'ouverture des mailles variante entre 4mm et 31,5mm + Fond du tamis + Couvercle ;
- **Série de grilles** : d'écartement ($E=d/1.58$) pour chaque classe granulaire ;
- **Etuve** : Réglé pour maintenir une température de (110 ± 5) °C ;
- **Balance électrique précise.**



Figure II-4 : Grilles à fentes

II.2.3. Essai de détermination de la masse volumique réelle (NF EN 1097-6)

1) Principe de l'essai

L'essai vise à mesurer successivement les paramètres masse et volume qui caractérisent un échantillon.

La masse de l'échantillon est mesurée par pesage, et le volume est déduit après immersion de l'échantillon dans l'eau.

La masse volumique ensuite, est obtenue en divisant la masse par le volume, et elle s'exprime en (g/cm^3) , (Kg/m^3) et (t/m^3) .

2) Mode opératoire

- Nous échantillonons et pesons une masse M ;
- Nous lavons la prise d'essai sur un tamis de 4 mm afin d'éliminer les grains les plus fins ;
- Nous rejetons les refus et laissons la prise d'essai s'égoutter ;
- Nous remplissons le pycnomètre d'eau jusqu'au débordement, plaçons le couvercle en évitant de piéger de l'air dans le récipient, puis pesons-le, soit M3 ;
- Nous immergeons la prise d'essai préparée dans le pycnomètre rempli d'eau à une température de (22 ± 3) °C, éliminons l'air occlus en faisant tourner et osciller doucement le pycnomètre en position inclinée, puis pesons-le, soit M2 ;
- Nous retirons les granulats de l'eau, les laissons goutter pendant quelques minutes, puis les transférons sur un chiffon sec pour les sécher doucement en surface. Ensuite, nous les pesons, soit M1 ;
- Nous les séchons ensuite à l'étuve à une température de (110 ± 5) °C jusqu'à obtenir une masse constante, soit M4.

3) Calcul et expression des résultats

Les grandeurs recherchées sont obtenues par les formules suivantes

- La masse volumique absolue :

$$\rho_a = \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \dots \dots \dots (II.7)$$

- La masse volumique réelle :

$$\rho_r = \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \dots \dots \dots (II.8)$$

- La masse volumique réelle saturée surface sèche :

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \dots \dots \dots (II.9)$$

- Coefficient d'absorption d'eau après immersion pendant 24H :

$$WA_{24} = \frac{100(M_1 - M_4)}{M_4} \dots \dots \dots (II.10)$$

4) Appareillage et équipements

- **Tamis** : d'ouverture des mailles de 4mm ;
- **Etuve** : Réglé pour maintenir une température de (110 ± 5) °C ;
- **Balance électrique précise** ;

- **Plateaux** : résistants à des températures élevées ;
- **Pycnomètre** ;
- **Matériau de lavage et de nettoyage** : tuyau, robinet, bac de réception, et chiffon absorbant.

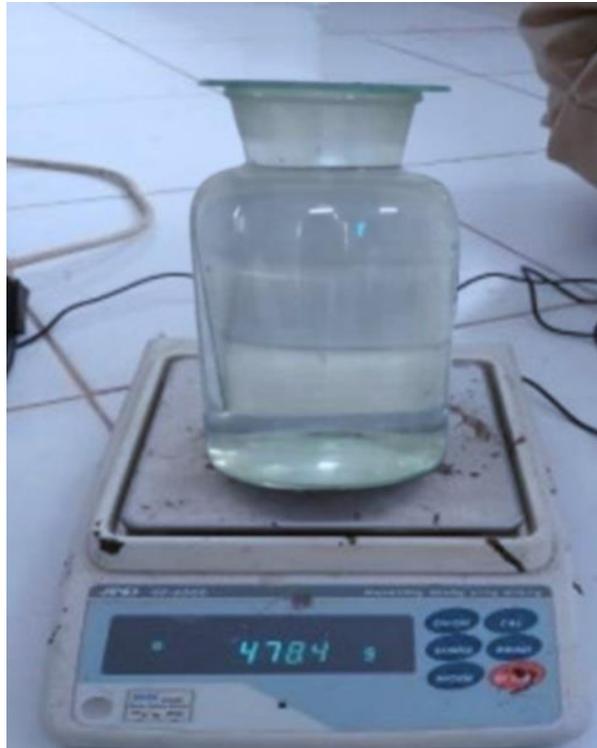


Figure II-5 : Pycnomètre (photo prise en Avril 2023)

II.2.4. Essai de détermination de la résistance à l'usure (Micro-DEVAL) (NF EN 1097-1)

1) Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer la résistance à l'usure, produite par frottement réciproque entre les granulats et des boulets métalliques.

Un mélange constitué de l'échantillon avec des billes en acier inoxydable (de 10mm de diamètre), est placé dans un cylindre creux, puis ce dernier est mis en rotation à une vitesse spécifiée pendant un nombre défini de tours. Après la récupération, le lavage et le tamisage (séparation des particules usées) du produit, on mesure la perte de sa masse. Plus cette perte est faible, plus la résistance à l'usure des granulats est élevée.

2) Mode opératoire

- Nous devons réaliser l'essai sur des granulats ayant une granularité comprise entre 10 mm et 14 mm. La courbe granulométrique de l'échantillon correspondant à cette classe granulaire doit satisfaire l'une des exigences suivantes :

60 % à 70 % des granulats passent au travers d'un tamis de 12,5 mm, ou 30 % à 40 % des granulats passent au travers d'un tamis de 11,2 mm ;

Les classes granulaires serrées alternatives pour l'essai Micro-DEVAL sont : 4/6,3 ; 4/8 ; 6,3/10 ; 8/11,2 ; 11,2/16.

La classe 31,5/50 est utilisée pour les ballasts.

- Nous tamisons l'échantillon de laboratoire sur des tamis de 10 mm, 11,2 mm (ou 12,5 mm) et 14 mm afin de constituer des fractions distinctes comprises entre 10 mm et 11,2 mm (ou 12,5 mm) et entre 11,2 mm (ou 12,5 mm) et 14 mm ;
- Nous lavons les fractions séparément et les séchons dans une étuve à (110 ± 5) °C jusqu'à obtention d'une masse constante ;
- Après refroidissement des fractions, nous les laissons reposer ;
- Nous mélangeons les deux fractions afin d'obtenir un échantillon de laboratoire modifié avec une granularité entre 10 mm et 14 mm ;
- Nous réduisons l'échantillon de laboratoire pour obtenir une prise d'essai conforme aux exigences de la norme EN 932-2. La prise d'essai doit se composer de deux éprouvettes d'une masse de (500 ± 2) g ;
- Nous plaçons une éprouvette dans chaque cylindre d'essai et ajoutons un nombre suffisant de billes d'acier pour obtenir une charge de (5000 ± 5) g ;
- Lorsque nous réalisons des essais avec d'autres classes granulaires, nous utilisons les charges abrasives indiquées dans le tableau ci-dessous ;

Tableau II-1 : Charge abrasive selon la classe granulaire

| Classe granulaire (mm) | Taille de tamis intermédiaire (mm) | Pourcentage passant dans le tamis intermédiaire (%) | Charge abrasive (g) |
|------------------------|------------------------------------|---|---------------------|
| 4 à 6,3 | 5 | 30 à 40 | 2000 ± 5 |
| 4 à 8 | 6,3 | 60 à 70 | 2800 ± 5 |
| 6,3 à 10 | 8 | 30 à 40 | 4000 ± 5 |
| 8 à 11,2 | 10 | 60 à 70 | 4400 ± 5 |
| 11,2 à 16 | 14 | 60 à 70 | 5400 ± 5 |

- Nous ajoutons (2.5 ± 0.05) L d'eau dans chaque cylindre ;
- Nous fixons soigneusement un couvercle sur chacun des cylindres, puis les plaçons sur les deux arbres ;

- Nous faisons tourner les cylindres à une vitesse de (100 ± 5) tr/min pendant $(12\ 000 \pm 10)$ tours ;
- Après l'essai, nous recueillons le granulat et les billes d'acier dans un bac en veillant à éviter les pertes de granulats. Nous lavons soigneusement l'intérieur du cylindre et le couvercle à l'aide d'une pissette, en recueillant l'eau de lavage ;
- Nous versons le matériau ainsi que l'eau de lavage sur un tamis de 1.6 mm, protégé par un tamis de 8 mm. Nous lavons les matériaux sous un jet d'eau propre ;
- Nous séparons soigneusement les granulats retenus sur le tamis à 8 mm des billes d'acier, en veillant à ne perdre aucune particule de granulat ;
- Nous plaçons le refus à 8 mm sur un plateau et ajoutons le refus à 1.6 mm sur le même plateau ;
- Nous séchons le contenu du plateau dans une étuve à (110 ± 5) °C jusqu'à obtention d'une masse constante ;
- Nous tamisons à sec le refus à 1.6 mm ;
- Nous pesons le refus sur le tamis de 1.6 mm avec une précision de 0.1 %, soit m.

Note : L'essai peut être réalisé sans l'ajout d'eau et on obtient le M_{DS} .



Figure II-6 : Exécution de l'essai Micro-DEVAL (photos prises en Avril 2023)

3) Calcul et expression des résultats

La résistance à l'usure s'exprime par le coefficient Micro-DEVAL :

$$MDE = \frac{m}{M} \times 100 \quad \dots \dots \dots \text{(II.11)}$$

D'où

$$MDE = \frac{500 - m}{5} \dots \dots \dots (II.12)$$

m : Masse de la fraction refusée au tamis 1,6 mm.

4) Appareillage et équipements

- **Série de tamis** : d'ouverture de(s) maille(s) :
 - variante entre 4mm et 31,5mm : pour l'échantillon a étudié ;
 - de 1.6mm : pour éliminer les particules fins ;
 - variante entre 31,5mm et 50mm : pour les ballasts.
- **Machine micro-DEVAL** ;
- **Charge abrasive** : billes en aciers inoxydables de 10mm de diamètre ;
- **Etuve** : Réglé pour maintenir une température de (110±5) °C ;
- **Balance électrique précise** ;
- **Outils supplémentaires** : bac, aimant, tournevis, pelle, éprouvette.

II.2.5. Essai de détermination de la résistance à la fragmentation Los Angeles (LA) (NF EN 1097-2)

1) Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produits en soumettant le matériau au choc de boulets normalisée dans la machine Los Angeles.

Un mélange constitué de l'échantillon avec des boulets en acier inoxydable (de 47mm de diamètre), est placé dans le tambour de test, puis il est mis en rotation à une vitesse spécifiée pendant un nombre défini de tours.

Après un certain nombre de rotations, les granulats sont tamisés pour mesurer la quantité d'usure et d'éclatement. Cette méthode permet d'estimer la capacité des granulats à résister et à maintenir leur intégrité lorsqu'ils sont soumis à des contraintes de frottement et de choc dans des applications concrètes.

2) Mode opératoire

- Nous devons réaliser l'essai sur des granulats ayant une granularité comprise entre 10 mm et 14 mm (et 31.5/50 mm, pour les ballasts). La courbe granulométrique de l'échantillon correspondant à cette classe granulaire doit satisfaire l'une des exigences suivantes : 60 % à 70 % des granulats passent au travers d'un tamis de 12.5 mm, ou 30 % à 40 % des granulats passent au travers d'un tamis de 11.2 mm ;
- Nous tamisons l'échantillon de laboratoire sur des tamis de 10 mm, 11.2 mm (ou 12.5 mm) et 14 mm pour former des fractions distinctes comprises entre 10 mm et 11.2 mm (ou 12.5 mm) et entre 11.2 mm (ou 12.5 mm) et 14 mm, ainsi que (31.5/40 mm, 40/50 mm, pour les ballasts). Nous lavons les fractions séparément et les séchons dans une étuve à (110 ± 5) °C jusqu'à obtention d'une masse constante ;
- Après refroidissement des fractions, nous mélangeons les deux fractions pour obtenir un échantillon de laboratoire modifié avec une granularité entre 10 mm et 14 mm ;
- Nous réduisons cet échantillon pour obtenir une prise d'essai d'une masse de 5000 ± 5 g (classe 10/14), pour les ballasts, une masse de 5000 ± 50 g pour chaque fraction 31.5/40 et 40/50, soit (10000 ± 100) g ;
- Nous nous assurons que le tambour est propre avant d'y placer l'échantillon ;
- Nous plaçons soigneusement le nombre de boulets dans la machine conformément au tableau ci-dessous, puis nous y introduisons la prise d'essai ;
- Nous refermons le couvercle et faisons tourner la machine pendant 500 tours et 1000 tours pour les ballasts, à une vitesse constante de 30 tr/min à 33 tr/min ;
- Nous versons le granulat sur un plateau placé sous l'appareil en veillant à éviter toute perte de matériau ;
- Nous vidons soigneusement le tambour et le nettoyons en éliminant toutes les fines, en particulier autour de la plaque saillante ;
- Nous retirons avec précaution les boulets du plateau en veillant à ne perdre aucune particule de granulat ;
- Nous analysons le matériau recueilli sur le plateau en le lavant et en le tamisant avec un tamis de 1.6 mm ;
- Nous séchons le refus à 1.6 mm dans une étuve à (110 ± 5) °C jusqu'à obtention d'une masse constante ;
- Nous tamisons à sec le refus à 1.6 mm ;

- Nous pesons avec une précision de 0.1 g le refus sur le tamis de 1.6 mm, soit m.



Figure II-7 : Exécution de l'essai Los Angeles (photos prises en Avril 2023)

Tableau 0-2 : Nombre de boulets selon la classe granulaire.

| Classe granulaire (mm) | Nombre de boulets | Masse de la charge de boulets (g) |
|------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| 10/14 | 11 | 4690 à 4860 |
| 4 à 8 | 8 | 3410 à 3540 |
| 6.3 à 10 | 9 | 3840 à 3980 |
| 8 à 11.2 | 10 | 4260 à 4420 |
| 11.2 à 16.0 | 12 | 5120 à 5300 |
| 31.5/50 | 12 | 5120 à 5300 |

3) Calcul et expression des résultats

La résistance à la fragmentation s'exprime par le coefficient Los-Angeles :

$$LA = \frac{5000 - m}{50} \dots \dots \dots (II.13)$$

Avec : **m** : Masse des refus au tamis 1.6mm.

4) Appareillage et équipements

- **Série de tamis** : d'ouverture de(s) maille(s) ;
 - variante entre 4mm et 31,5mm : pour l'échantillon a étudié ;
 - de 1.6mm : pour éliminer les particules fins ;
 - variante entre 31,5mm et 50mm : pour les ballasts ;
- **Machine Los-Angeles** ;
- **Charge abrasive** : boulets en aciers de 47mm de diamètre ;
- **Etuve** : Réglé pour maintenir une température de (110±5) °C ;
- **Balance électrique précise** ;
- **Outils supplémentaires** : bac, clé molette, pelle, brosse.

II.2.6. Essai d'Equivalent de sable (NF EN 933-8)

1) Principe de l'essai

L'essai est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5mm, afin de déterminer la quantité et la qualité des éléments fins contenant dans l'échantillon, et d'évaluer la propreté de matériau.

La valeur de l'équivalent de sable E_s est le rapport, multiplié par 100, de la hauteur de la partie sableuse sédimentée, à la hauteur totale du floccula et de la partie sableuse sédimentée.

2) Mode opératoire

- Nous réduisons l'échantillon de laboratoire selon la norme EN 932-2 pour obtenir deux sous-échantillons ;
- À partir du premier sous-échantillon, nous prélevons deux prises d'essai, qui seront utilisées pour déterminer les teneurs en eau et en fines ;

- Nous séchons la première prise d'essai dans une étuve à (110 ± 5) °C pour déterminer et enregistrer la teneur en eau W ;
- Nous pesons et enregistrons la masse de la seconde prise d'essai M1, puis nous la lavons sur un tamis de 0,063 mm, séchons les particules retenues, et pesons et enregistrons la masse M2 ;
- Nous déterminons la teneur en fines f ;
- Si la teneur en fines de la fraction 0/2 mm est supérieure à 10%, les particules lavées retenues sur le tamis de 0,063 mm sont utilisées comme sable correcteur ;
- Nous réduisons le second sous-échantillon pour obtenir deux éprouvettes de masse MT ;
- Nous remplissons les éprouvettes avec la solution lavante jusqu'au premier trait ;
- Nous versons la quantité du sable MT en veillant à éliminer les bulles d'air et laissons reposer pendant 10 minutes ;
- Nous bouchons les éprouvettes et les agitons avec un mouvement rectiligne et horizontal de 20 cm d'amplitude, effectuant 90 allers-retours en 30 secondes ;
- Nous lavons et remplissons les éprouvettes avec le tube laveur en rinçant le bouchon au-dessus de l'éprouvette et en faisant descendre et remonter lentement le tube laveur dans la masse du sable pour faire remonter les particules fines dans la solution supérieure ;
- Nous sortons le tube laveur lorsque le niveau du liquide atteint le trait supérieur, puis nous laissons reposer pendant 20 minutes ;
- Nous mesurons la hauteur du floculat pour chaque éprouvette h1 avec une précision au millimètre ;
- Nous déterminons la hauteur des sédiments h2 avec une précision au millimètre en mesurant la distance entre la face inférieure de la tête du piston et la face supérieure du manchon.

NB :

- 1- Pour l'essai sur la fraction 0/4, le mode opératoire est le même mais sans appliquer la correction de la teneur en fines ;
- 2- Il est important que les valeurs de $100(h2/h1)$ ne diffèrent pas de plus de 4 pour les deux éprouvettes ;
- 3- L'essai doit être réalisé à une température de 23 ± 3 °C.



Figure II-8 : Exécution de l’essai d’Equivalent de sable

3) Calcul et expression des résultats

- Teneur en fines (f) :

$$f = 100 - \frac{M2(100+W)}{M1} ; \dots \dots \dots (II.14)$$

Si $f \leq 10\%$ $MT = \frac{120(100+W)}{100} ; \dots \dots \dots (II.15)$

Si $f > 10\%$ $MT = M3 + M4 ; \dots \dots \dots (II.16)$

Avec :

M3 : masse de granulat humide de 2ème sous échantillon :

$$M3 = \frac{1200}{f} \left(1 + \frac{W}{100}\right) ; \dots \dots \dots (II.17)$$

M4 : masse du sable correcteur sec :

$$M4 = 120 - \frac{1200}{f} ; \dots \dots \dots (II.18)$$

- Equivalent de sable (Es) :

$$Es = \frac{h_2}{h_1}; \dots \dots \dots (II.19)$$

h_2 : hauteur de sédiment ;

h_1 : hauteur de flocculat.

4) Appareillage et équipements

- **Tamis** : de 5mm d'ouverture de mailles + fond ;
- **Etuve** : Réglé pour maintenir une température de (110 ± 5) °C ;
- **Balance précise** ;
- **Epruvette en plastique** : avec deux traits repères et leurs bouchon ;
- **Bonbonne** : pour la solution lavante avec son bouchon ;
- **Machine agitatrice** ;
- **Chronomètre** ;
- **Thermomètre** ;
- **Piston taré** : à masse coulissante de 1Kg pour la mesure d'Esp (équivalent de sable à piston).

II.2.7. Essai au bleu de méthylène (MBF) (NF EN 933-9)

1) Principe de l'essai

La méthode consiste à ajouter progressivement des doses de solution de bleu de méthylène dans un bain aqueux contenant l'échantillon à tester. Après chaque ajout, on observe l'adsorption du bleu en réalisant une tache sur un papier filtre (test de la tache). La tache se compose d'un dépôt central coloré en bleu intense, entouré d'une zone humide incolore.

Pour que le test soit considéré comme positif, une auréole bleu clair persistante doit apparaître autour du dépôt central dans la zone humide. Si l'auréole reste incolore, le test est considéré comme négatif.

La taille du dépôt central doit être comprise entre 8 et 12 mm.

2) Mode opératoire

- Nous devons réduire les échantillons de laboratoire conformément à l'EN 933-2 pour obtenir deux sous-échantillons d'au moins 200 g de la fraction 0/2 mm ou 30 g de la fraction 0/0,125 mm ;
- Nous séchons le sous-échantillon 1 à 110 ± 5 °C et calculons sa teneur en eau ;
- Nous pesons une masse M_0 du sous-échantillon 2, qui doit être supérieure à 200 g pour la fraction 0/2 mm et supérieure à 30 g pour la fraction 0/0,125 mm ;
- Nous déterminons la masse M_1 ;
- Nous plaçons la masse M_1 dans un bécher contenant 500 ± 5 ml d'eau déminéralisée ;
- Dans le cas d'un matériau pauvre en éléments fins, nous ajoutons au bécher $30 \text{ g} \pm 0,1$ g de kaolinite séchée à 110 ± 5 °C, dont la valeur de bleu connue est MBK. $V' = 30$ MBK, où V' est exprimé en ml de solution de bleu absorbée par la kaolinite ;
- Nous agitons l'ensemble (eau + M_1) ou (eau + M_1 + Kaolinite) à 600 tr/min pendant 5 minutes ;
- Nous introduisons dans le bécher une dose de 5 ml de solution de colorant et agitons à 400 ± 40 tr/min pendant au moins une minute. Nous effectuons ensuite un test à la tache en prélevant une goutte en suspension à l'aide d'une baguette en verre et en la déposant sur le papier filtre pour obtenir un dépôt d'un diamètre de 8 à 12 mm ;
- Si l'auréole n'apparaît pas après l'ajout des 5 ml de solution, nous effectuons des ajouts de 5 ml tout en agitant pendant 1 minute et réalisons des tests à la tache jusqu'à l'apparition de l'auréole ;
- Nous continuons l'agitation sans ajouter de solution et effectuons des tests à la tache toutes les minutes pendant 5 minutes ;
- Si l'auréole persiste pour les cinq taches, le test est considéré comme positif. Sinon :
- Si l'auréole disparaît après la cinquième tache, nous ajoutons 2 ml de colorant et effectuons le test à la tache. Si l'auréole disparaît après la quatrième tache, nous ajoutons 5 ml de colorant et effectuons le test à la tache ;

- Nous enregistrons le volume total de solution de colorant V1 ajouté pour obtenir une auréole visible pendant 5 minutes, avec une précision d'1 ml près.



Figure II-9 : Exécution de l'essai au Bleu de méthylène

3) Calcul et expression des résultats

- Masse sèche de la prise d'essai

$$M1 = \frac{M0}{1 + (W + 100)} \dots \dots \dots (II.20)$$

- Valeur au Bleu de Méthylène, exprimé en (g/Kg) :

$$MB = \frac{V1}{M1} \times 10 \dots \dots \dots (II.21)$$

4) Appareillage et équipements

- **Tamis :** 2mm et 0,125mm de dimension de mailles ;
- **Etuve :** Réglé pour maintenir une température de (110±5) °C ;
- **Burette graduée :** d'une capacité de 100ml ou 50ml et de graduation de 1/10 ml ou 1/5ml ;
- **Papier filtre :** ayant un support pour percolation du Bleu de Méthylène ;
- **Balance précise ;**
- **Agitateur à ailette :** tournant entre 400 et 700 tr/min, le diamètre des ailettes est compris entre 70mm et 80mm ;

- **Chronomètre ;**
- **Pipette :** pour pipeter les gouttes de bleu de méthylène ;
- **Bicher en verre ;**
- **Fiole en verre.**

II.3. Essais sur béton

II.3.1. Essai d'affaissement au cône d'ABRAMS (NF EN 12350-2)

1) Principe de l'essai

Cet essai, consiste à déterminer la plasticité du béton frais, en mesurant la hauteur d'affaissement de son volume tronconique, par un équipement appelé le cône d'ABRAMS.

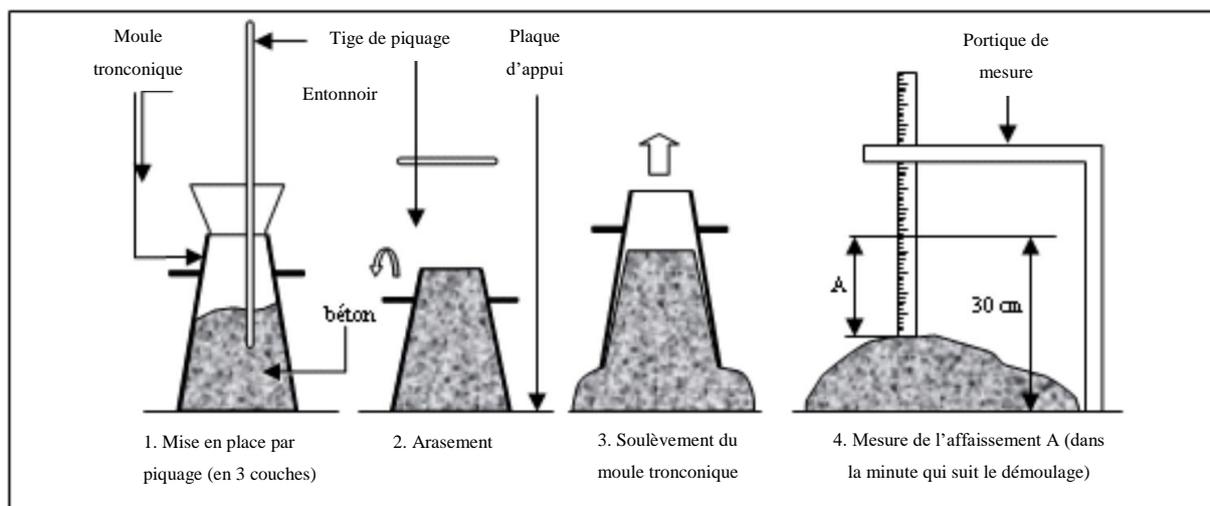


Figure II-10 : Essai d'affaissement au cône d'ABRAMS

2) Mode opératoire

- Nous humidifions le cône en acier galvanisé et le plateau support ;
- Nous plaçons le cône sur le plateau et nous le maintenons fermement en place pendant le remplissage ;
- A l'aide de la main écope, nous remplissons avec du béton le cône d'ABRAMS en trois couches. Chaque couche correspondant approximativement après piquage au tiers de la hauteur du cône. Piquer chaque couche 25 fois avec la tige de piquage en répartissant les coups uniformément sur la section de chaque couche ;
- Lors du piquage de la 2ème et 3ème couche, il est nécessaire que la tige pénètre légèrement la couche sous-jacente ;
- Lors du remplissage de la couche supérieure, nous mettons un excès de béton au-dessus du cône dans l'entonnoir avant de procéder au piquage ;

- Après avoir piqué la couche supérieure, nous retirons l'entonnoir et nous nivelons la surface de béton à l'aide de la truelle ;
- Nous enlevons le béton qui s'est écoulé sur le plateau ;
- Nous démoulons le béton en soulevant verticalement le cône avec précaution ;
- L'enlèvement du cône doit se faire en 5 à 10 secondes, par une remontée verticale régulière et d'un coup ;
- Immédiatement après avoir retiré le cône, nous mesurons l'affaissement (h) en déterminant la différence entre la hauteur du moule et le point le plus haut du béton affaissé.



Figure II-11 : Exécution de l'essai d'affaissement au cône d'ABRAMS

3) Calcul et expression des résultats

Le classement des bétons se fait selon la valeur d'affaissement et la consistance de ce béton.

Tableau 0-3 : Classes d'affaissement selon la norme NF EN 206-1.

| Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams – norme NF EN 206-1 | | |
|--|-----------------------------|--|
| Classe | Consistance du béton | Affaissement (en mm) au cône d'Abrams |
| S1 | Ferme | 10 - 40 |
| S2 | Plastique | 50 - 90 |
| S3 | Très plastique | 100 - 150 |
| S4 | Fluide | 160 - 210 |
| S5 | Très fluide | ≥ 220 |

4) Appareillage et équipements

- **Le cône d'ABRAMS** : moule en métal (acier zingué), de forme tronconique (D= 20cm, d= 10cm, h= 30cm), muni de poignés ;
- **Entonnoir de remplissage** : sert à faciliter le remplissage du cône ;
- **Plateau en métal** : sur lequel le cône est posé lors du remplissage ;
- **Tige de piquage** : tige d'acier de 16mm de diamètre et 60cm de longueur dont les extrémités sont arrondies ;
- **La potence en acier** : pourvue d'une règle graduée servant à mesurer l'affaissement du béton ;
- **Main écope** : de 10 cm de largeur ;
- **Truelle** : outil de chargement du béton.

II.3.2. Essai de la résistance à la compression

1) Principe de l'essai

La résistance en compression mesurée sur des échantillons de béton durci est déterminée en calculant le rapport entre la charge maximale supportée lors de la rupture en compression axiale et l'aire de la section transversale de l'échantillon perpendiculaire à la direction de la force de compression.

2) Appareillage et équipements

- Echantillons du béton ;
- Machine à essai de compression.



Figure II-12 : Machine à essai de compression

II.3.2.1. Moules pour échantillons cubiques

Les caractéristiques des moules pour échantillons cubiques destinés à l'essai de compression sont définies par la norme NF EN 12390-3.

1) Mode opératoire

➤ Préparation et positionnement des échantillons

- Nous devons mouler les faces d'appui de l'échantillon en cas d'échantillon cubique, ou les rectifier ou les surfacer conformément aux exigences ;
- Nous devons veiller à ce que l'échantillon soit soumis à un essai de résistance dans les plus brefs délais, mais en moins de 10 heures ;

L'installation d'essai doit être maintenue à une température de (20 ± 5) °C ou (25 ± 5) °C dans des climats chauds. Si les échantillons doivent être conservés dans l'installation d'essai pendant plus de 4 heures, nous devons les protéger contre toute perte d'humidité.

- Nous devons nettoyer toutes les surfaces de la machine d'essai en contact avec l'échantillon et éliminer tout grain détaché ou autre corps étranger ;

Dans le cas de machines d'essai à deux colonnes, nous devons éviter de mettre la surface moulée des échantillons cubiques en contact avec les plateaux et les placer en face d'un des montants.

- Avant de positionner l'échantillon dans la machine d'essai, nous devons l'essuyer pour éliminer l'excès d'eau superficielle ;
- Nous devons positionner les échantillons cubiques de manière à ce que le chargement s'effectue perpendiculairement au sens du coulage ;
- Nous devons centrer l'échantillon avec précision sur le plateau inférieur, avec une tolérance de 1% de la dimension nominale ;
- Si des plateaux auxiliaires sont utilisés, nous devons les aligner avec les faces supérieure et inférieure de l'échantillon.



Figure II-13 : Positionnement de l'échantillon

➤ **Mise en charge**

- Nous devons sélectionner une vitesse constante de chargement dans la plage de $(0,6 \pm 0,2)$ MPa/s (N/mm^3s) pour l'essai. Après l'application de la charge initiale, qui ne doit pas dépasser environ 30% de la charge de rupture, nous augmentons la charge de manière continue à la vitesse constante sélectionnée $\pm 10\%$ jusqu'à la rupture de l'échantillon, sans provoquer de choc ;
- Nous veillons à appliquer une charge initiale aussi proche que possible de la vitesse de chargement sélectionnée ;
- Si nous utilisons une machine d'essai commandée manuellement, lorsque la rupture de l'échantillon est imminente, nous ajustons les commandes pour éviter toute diminution de la vitesse de chargement sélectionnée ;
- Pendant les phases finales de l'essai, la vitesse de chargement peut être réglée par le mode de rupture de l'échantillon. Cependant, nous faisons tout notre possible pour maintenir autant que possible la vitesse de chargement sélectionnée ;
- Nous enregistrons la charge maximale obtenue en KN lors de l'essai.

Note : pour des bétons à forte et à faible résistance, par exemple supérieure à 80MPa (N/mm^3) et inférieur à 20MPa (N/mm^3) d'autres recommandations concernant les vitesses de chargements peuvent être spécifiées dans des dispositions valables sur le lieu d'utilisation du béton.

➤ **Evaluation des types de rupture**

L'évaluation des types de rupture peut fournir des informations sur la qualité du béton, sa résistance et sa ductilité.

Pour évaluer les types de rupture dans l'essai de résistance à la compression du béton, on examine l'apparence de l'échantillon après la rupture, et on la compare avec les exemples de rupture correcte et incorrecte, schématisées dans les figures (II-14 , II-15), et correspondant le mieux à l'observation.

Note : Pour la rupture correcte, les quatre faces exposées sont fissurées approximativement de la même façon, en général sans dommage important des faces en contact avec les plateaux.

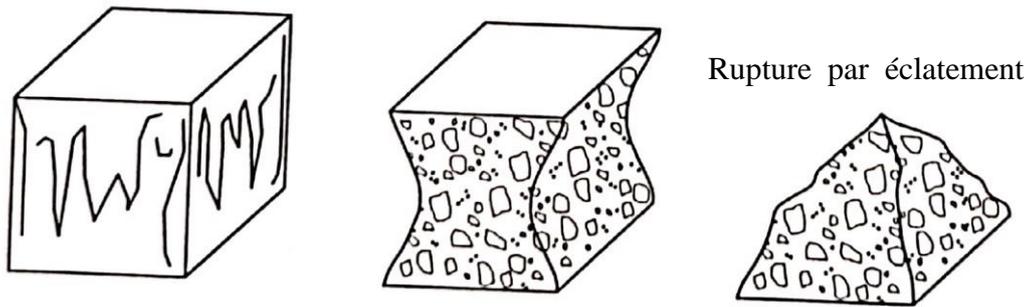


Figure II-14 : Ruptures correctes d'échantillons cubiques [40]

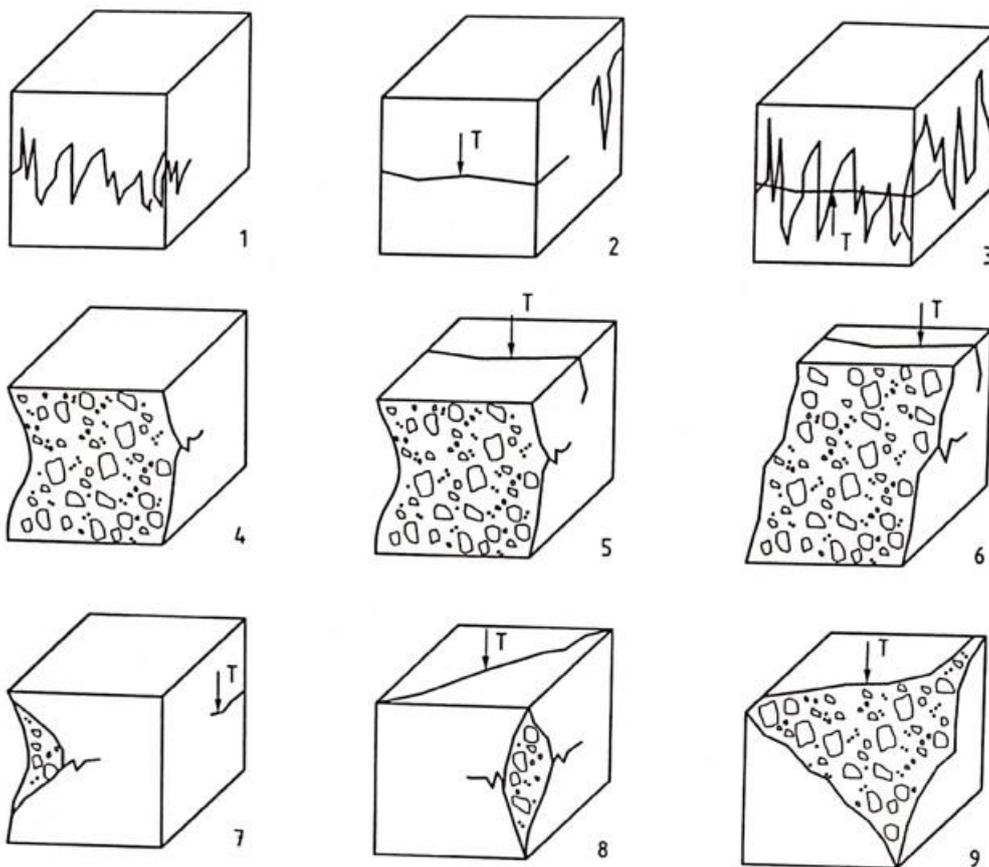


Figure II-15 : Ruptures incorrectes d'échantillons cubiques [40]

Légende :

T : Fissure de l'éclatement.

2) Calcul et expression des résultats

La résistance à la compression est définie par la formule :

$$R = \frac{F}{A} [\text{MPa}] \dots \dots \dots \text{(II.22)}$$

Ou :

F : la force (charge) exercée par la machine sur l'éprouvette KN

A : la surface de l'éprouvette, $A = 20 \text{ cm}^2$

Tableau II-4 : Classes et résistances caractéristiques des bétons

| Classe | C12.5/15 | C16/20 | C20/25 | C25/30 | C30/37 | C35/45 | C40/45 | C45/55 | C50/60 |
|---------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| RC_{cyl.} | 12 | 16 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
| RC_{cube.} | 15 | 20 | 25 | 30 | 37 | 45 | 50 | 55 | 60 |

Conclusion

Il est nécessaire de souligner que ces essais sont normalisés et règlementés, garantissant ainsi une évaluation objective et fiable des matériaux, ils permettent de s'assurer que les granulats utilisés dans la confection du béton respectent les normes et les spécifications requises.

Chapitre III

CHAPITRE III : Résultats et Discussion

Introduction

Dans le cadre d'évaluer l'impact de la qualité des granulats sur le comportement mécanique du béton, nous avons personnalisé cette partie pour présenter, interpréter, et comparer :

- Les différentes valeurs obtenues par essais d'identifications réalisées sur les granulats ;
- Les résultats finals des essais effectués sur les bétons formulés.

Pour arriver à cet objectif, notre étude comparative a consisté en la détermination de la meilleure composition granulométrique, entre des granulats provenant de quatre différentes carrières, pour obtenir un béton hydraulique d'une grande résistance et d'une bonne stabilité.

III.1. Résultats et discussion des essais sur granulats

III.1.1. Résultats et discussion de l'Analyse granulométrique (Gr)

III.1.1.1. Présentation des résultats

Après avoir mené l'analyse granulométrique sur les granulats provenant des quatre carrières (LAFARGE, TAYA, CTM et ENNOUR), les résultats de chaque fraction ont été obtenus (voir annexe 1).

Ces données ont ensuite été représentées graphiquement dans les figures (III-1, III-2, III-3 et III-4), et à partir de ces représentations, nous avons pu observer le comportement de la distribution granulaire de chaque échantillon, ainsi que calculer les coefficients suivants :

- Coefficient d'uniformité (HAZEN) : $Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$
- $Cu < 2$: granulométrie serré (uniforme)
- $Cu > 2$: granulométrie étalée
- Coefficient de courbure : $Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$
- $1 < Cc < 3$: granulométrie bien graduée (continuité bien répartie)
- $Cc < 1$ ou $Cc > 3$: granulométrie mal graduée (continuité mal répartie)

1) Résultats de l'analyse granulométrique des échantillons de LAFARGE (EL-MEHIR)

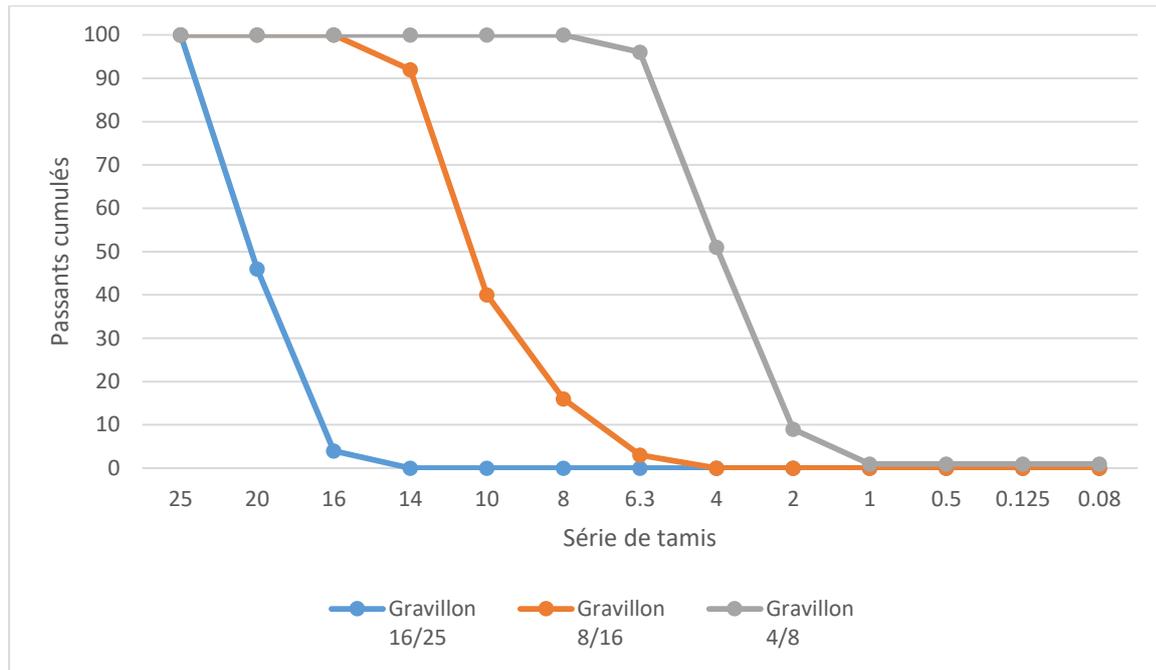


Figure III-1 : Courbes granulométriques des granulats de la carrière de LAFARGE (EL-MEHIR)

Détermination des diamètres suivants : D_{10} , D_{30} , D_{50} et D_{60} qui représentent respectivement les diamètres des mailles des tamis qui permettent le passage de : 10%, 30%, 50% et 60% du matériau de départ.

- **Granulats 4/8**

$D_{10} = 2.03$ mm, $D_{30} = 3.02$ mm, $D_{50} = 3.98$ mm, $D_{60} = 4.19$ mm.

$C_u = 2.06 > 2$: granulométrie étalée.

$C_c = 1.8 < 3$: granulométrie bien graduée (continuité bien répartie).

- **Granulats 8/16**

$D_{10} = 7.12$ mm, $D_{30} = 9$ mm, $D_{50} = 10.24$ mm, $D_{60} = 10.71$ mm.

$C_u = 1.5 < 2$: granulométrie serrée (uniforme).

$C_c = 1.06 < 3$: granulométrie bien graduée (continuité bien répartie).

- **Granulats 16/25**

$D_{10} = 16.17$ mm, $D_{30} = 18.06$ mm, $D_{50} = 20.01$ mm, $D_{60} = 20.82$ mm.

$C_u = 1.29 < 2$: granulométrie serrée (uniforme).

$C_c = 0.97 < 1$: granulométrie mal graduée (continuité mal répartie).

2) Résultats de l'analyse granulométrique des échantillons de TAYA

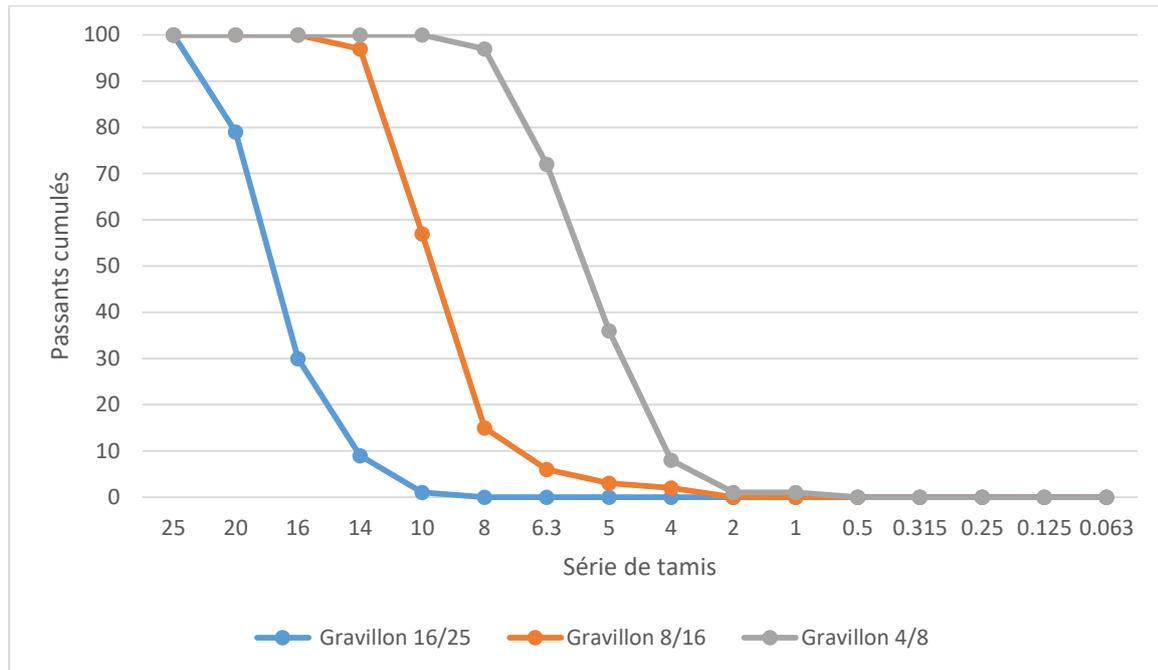


Figure III-2 : Courbes granulométriques des granulats de la carrière de TAYA

Détermination des diamètres suivants : D_{10} , D_{30} , D_{50} et D_{60} qui représentent respectivement les diamètres des mailles des tamis qui permettent le passage de : 10%, 30%, 50% et 60% du matériau de départ.

- **Granulats 4/8**

$D_{10} = 4.02$ mm, $D_{30} = 4.85$ mm, $D_{50} = 5.41$ mm, $D_{60} = 5.83$ mm.

$C_u = 1.45 < 2$: granulométrie serrée (uniforme).

$C_c = 1.004 < 3$: granulométrie bien graduée (continuité bien répartie).

- **Granulats 8/16**

$D_{10} = 6.81$ mm, $D_{30} = 8.53$ mm, $D_{50} = 9.64$ mm, $D_{60} = 10.03$ mm.

$C_u = 1.47 < 2$: granulométrie serrée (uniforme).

$C_c = 1.07 < 3$: granulométrie bien graduée (continuité bien répartie).

- **Granulats 16/25**

$D_{10} = 14.03$ mm, $D_{30} = 16$ mm, $D_{50} = 17.48$ mm, $D_{60} = 18.05$ mm.

$C_u = 1.29 < 2$: granulométrie serrée (uniforme).

$C_c = 1.01 < 3$: granulométrie bien graduée (continuité bien répartie).

3) Résultats de l'analyse granulométrique des échantillons de CTM (TEDJENNENT)

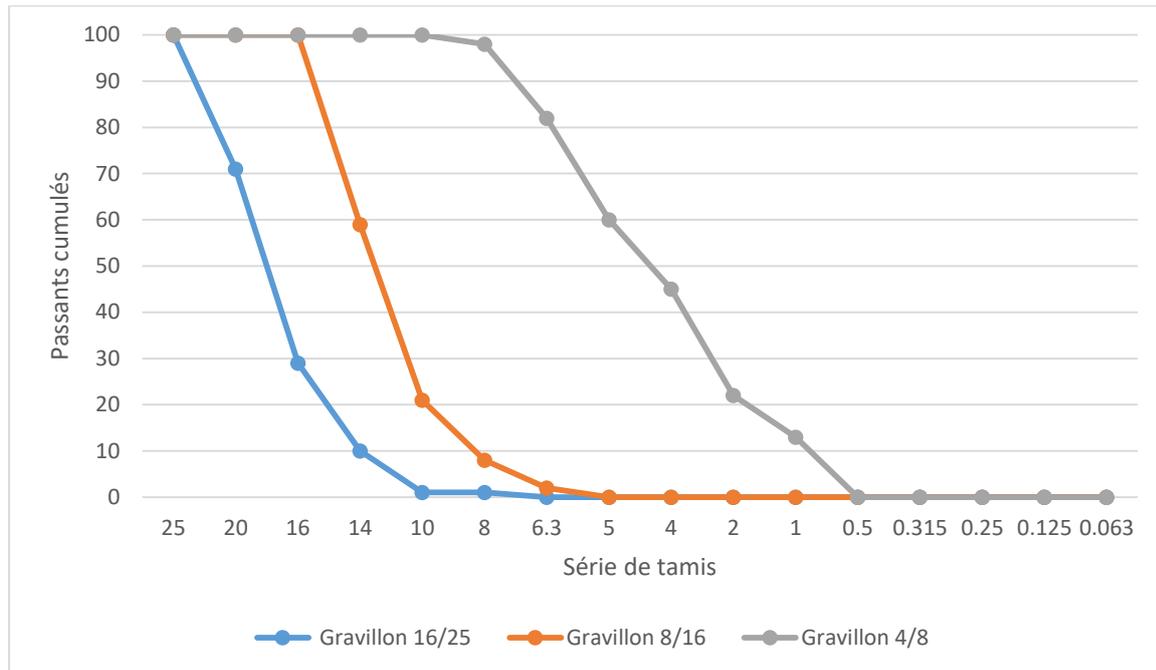


Figure III-3 : Courbes granulométriques des granulats de la carrière de CTM (TEDJENNENT)

Détermination des diamètres suivants : D_{10} , D_{30} , D_{50} et D_{60} qui représentent respectivement les diamètres des mailles des tamis qui permettent le passage de : 10%, 30%, 50% et 60% du matériau de départ.

- **Granulats 4/8**

$D_{10} = 0.83$ mm, $D_{30} = 2.44$ mm, $D_{50} = 4.16$ mm, $D_{60} = 5$ mm.

$C_u = 6.02 > 2$: granulométrie étalée.

$C_c = 1.43 < 3$: granulométrie bien graduée (continuité bien répartie).

- **Granulats 8/16**

$D_{10} = 8.02$ mm, $D_{30} = 11$ mm, $D_{50} = 12.76$ mm, $D_{60} = 14$ mm.

$C_u = 1.74 < 2$: granulométrie serrée (uniforme).

$C_c = 1.05 < 3$: granulométrie bien graduée (continuité bien répartie).

- **Granulats 16/25**

$D_{10} = 14$ mm, $D_{30} = 16$ mm, $D_{50} = 18.02$ mm, $D_{60} = 19$ mm.

$C_u = 1.35 < 2$: granulométrie serrée (uniforme).

$C_c = 0.96 < 1$: granulométrie mal graduée (continuité mal répartie).

4) Résultats de l'analyse granulométrique des échantillons d'ENNOUR (EL-GROUZ)

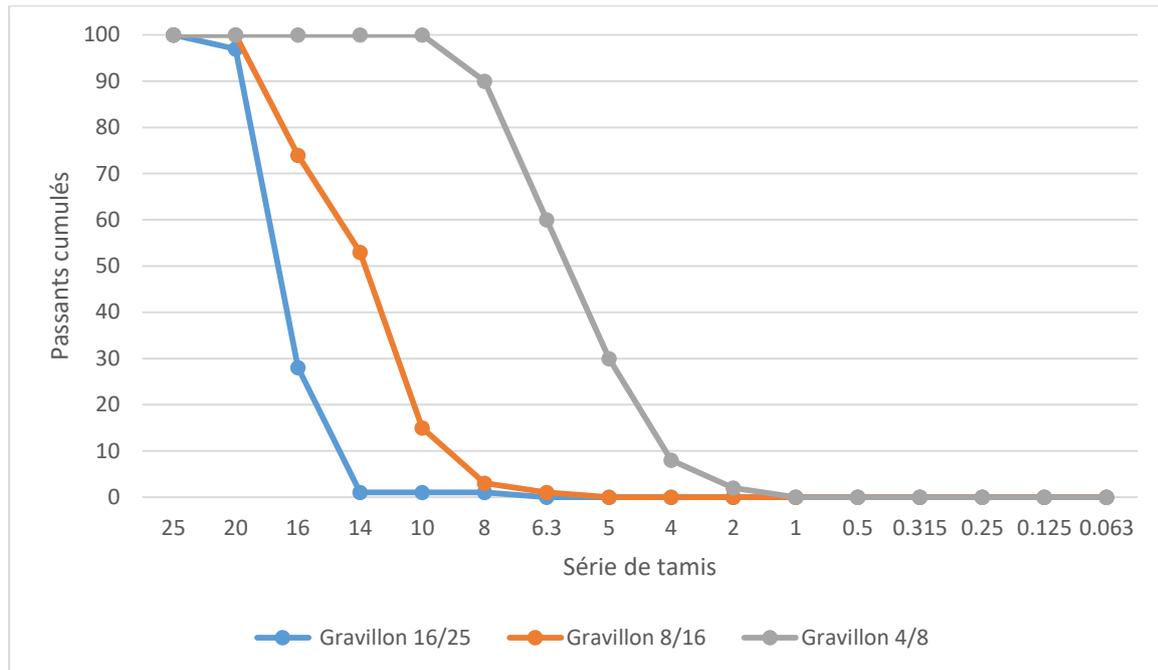


Figure III-4 : Courbes granulométriques des granulats de la carrière d'ENNOUR (EL-GROUZ)

Détermination des diamètres suivants : D_{10} , D_{30} , D_{50} et D_{60} qui représentent respectivement les diamètres des mailles des tamis qui permettent le passage de : 10%, 30%, 50% et 60% du matériau de départ.

- **Granulats 4/8**

$D_{10} = 4.01$ mm, $D_{30} = 5$ mm, $D_{50} = 5.86$ mm, $D_{60} = 6.3$ mm.

$C_u = 1.57 < 2$: granulométrie serrée (uniforme).

$C_c = 0.99 < 1$: granulométrie mal graduée (continuité mal répartie).

- **Granulats 8/16**

$D_{10} = 9$ mm, $D_{30} = 11.4$ mm, $D_{50} = 13.7$ mm, $D_{60} = 14.46$ mm.

$C_u = 1.61 < 2$: granulométrie serrée (uniforme).

$C_c = 1 < 3$: granulométrie bien graduée (continuité bien répartie).

- **Granulats 16/25**

$D_{10} = 14.51$ mm, $D_{30} = 16.01$ mm, $D_{50} = 16.84$ mm, $D_{60} = 17.23$ mm.

$C_u = 1.18 < 2$: granulométrie serrée (uniforme).

$C_c = 1.03 < 3$: granulométrie bien graduée (continuité bien répartie).

III.1.1.2. Interprétation des résultats

Selon les représentations graphiques de données obtenues, il est évident que ces carrières présentent des distributions granulaires distinctes. Prenant en considération le coefficient de HAZEN et celui de la courbure, on constate qu'uniquement la carrière de TAYA qui représente une répartition granulaire uniforme et bien graduée pour toute ces classe granulométrique. Contrairement aux autres carrières (LAFARGE, TEDJENNENT et ENNOUR), on remarque que l'étalement et/ou la mal répartition s'expose seulement dans une de ces fractions.

III.1.1.3. Comparaison des résultats de l'analyse granulométrique

Suivant la norme NF EN 933-1 retenue pour la confection des bétons, nous retenons que les classes granulaires de toutes les quatre carrières sont conforme à la formulation des bétons hydrauliques.

III.1.2. Résultats et discussion de la détermination de la forme des granulats - Coefficient d'Aplatissement

III.1.2.1. Présentation des résultats

L'essai d'aplatissement a été réalisé pour les trois classes granulométrique de chaque carrière, pour but de déterminer la forme des granulats dominante dans chaque fraction.

Les résultats du coefficient d'aplatissement sont présentés dans les tableaux suivants.

Les résultats détaillés du coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire ont été récapitulés (Voir annexe 2).

1) Résultats du coefficient d'aplatissement des échantillons de LAFARGE (EL-MEHIR)

Tableau III-1 : Résultats de l'aplatissement des granulats de la carrière de LAFARGE

| Carrière | Classes granulaires | Tamissage sur tamis d'essai | Tamissage sur grilles à fentes | Aplatissement (%) |
|---------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | | $M1 = \sum R_i (g)$ | $M2 = \sum m_i (g)$ | $A = \frac{M2}{M1} \times 100$ |
| LAFARGE EL-MEHIR | Gravillon 16/25 | 5337 | 212 | 3.97 |
| | Gravillon 8/16 | 3451 | 454 | 13.16 |
| | Gravillon 4/8 | 1915 | 217 | 11.33 |

Avec :

- M1 : somme des refus sur tamis d'essai
- M2 : somme des passants sur grilles à fentes

2) Résultats du coefficient d'aplatissement des échantillons de TAYA

Tableau III-2 : Résultats de l'aplatissement des granulats de la carrière de TAYA

| Carrière | Classes granulaires | Tamissage sur tamis d'essai | Tamissage sur grilles à fentes | Aplatissement (%) |
|----------|---------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | | $M1 = \sum R_i$ (g) | $M2 = \sum m_i$ (g) | $A = \frac{M2}{M1} \times 100$ |
| TAYA | Gravillon 16/25 | 5482 | 341 | 6.22 |
| | Gravillon 8/16 | 3354 | 480 | 14.3 |
| | Gravillon 4/8 | 1932 | 553 | 28.6 |

Avec :

- M1 : somme des refus sur tamis d'essai
- M2 : somme des passants sur grilles à fentes

3) Résultats du coefficient d'aplatissement des échantillons de CTM (TEDJENNENT)

Tableau III-3 : Résultats de l'aplatissement des granulats de la carrière de TEDJENNENT

| Carrière | Classes granulaires | Tamissage sur tamis d'essai | Tamissage sur grilles à fentes | Aplatissement (%) |
|----------------|---------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | | $M1 = \sum R_i$ (g) | $M2 = \sum m_i$ (g) | $A = \frac{M2}{M1} \times 100$ |
| CTM TEDJENNENT | Gravillon 16/25 | 5657 | 338 | 5.97 |
| | Gravillon 8/16 | 3284 | 428 | 13.03 |
| | Gravillon 4/8 | 1923 | 399 | 20.75 |

Avec :

- M1 : somme des refus sur tamis d'essai
- M2 : somme des passants sur grilles à fentes

4) Résultats du coefficient d'aplatissement des échantillons d'ENNOUR (EL-GROUZ)

Tableau III-4 : Résultats de l'aplatissement des granulats de la carrière d'ENNOUR

| Carrière | Classes granulaires | Tamissage sur tamis d'essai | Tamissage sur grilles à fentes | Aplatissement (%) |
|-------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | | $M1 = \sum R_i$ (g) | $M2 = \sum m_i$ (g) | $A = \frac{M2}{M1} \times 100$ |
| ENNOUR (EL-GROUZ) | Gravillon 16/25 | 5383 | 217 | 4.03 |
| | Gravillon 8/16 | 3362 | 325 | 9.67 |
| | Gravillon 4/8 | 1912 | 292 | 15.27 |

Avec :

- M1 : somme des refus sur tamis d'essai
- M2 : somme des passants sur grilles à fentes

III.1.2.2. Interprétation des résultats

D'après les résultats obtenus, on observe l'élévation du pourcentage de l'aplatissement en diminuant la classe granulométrique des échantillons, ainsi que l'intervalle assez remarquable entre les fractions.

Les valeurs du coefficient d'aplatissement dans les quatre carrières sont plus ou moins proches pour les classes (16/25 et 8/16), cela signifie la similitude de la forme de ces granulats.

Par contre pour la fraction (4/8), la différence des résultats indique la différence de la forme de ces granulats.

III.1.2.3. Comparaison des résultats

Selon la norme de spécification NF EN 933-3 :

- Les résultats de l'essai d'aplatissement pour la fraction (4/8) des deux carrières (TAYA et TEDJENNENT) qui sont respectivement (28.6 et 20.75) et supérieur à 20%, ne sont pas conformes pour la confection des bétons hydrauliques.
- Les autres résultats obtenus, qui sont inférieur à 20%, indiquent que les granulats peuvent être utilisés pour la confection des bétons hydrauliques.

III.1.3. Résultats et discussion de la détermination de la masse volumique réelle

III.1.3.1. Présentation des résultats

La masse volumique et le coefficient d'adsorption d'eau sont deux paramètres intrinsèques, qui jouent un rôle crucial dans l'identification du comportement et du type de granulats approprié pour la confection des bétons.

Les résultats de l'essai de détermination de la masse volumique réelle, masse volumique apparente et du coefficient d'adsorption d'eau sont récapitulés dans les tableaux ci-dessous.

1) Résultats de l'essai de détermination de la masse volumique réelle des échantillons de LAFARGE (EL-MEHIR)

Tableau III-5 : Résultats de l'essai de détermination de la masse volumique réelle des granulats de la carrière de LAFARGE

| Carrière | ρ_a (g/cm ³) | | | ρ_r (g/cm ³) | | | WA24(%) | | |
|----------------|-------------------------------|------|-------|-------------------------------|------|-------|---------|------|-------|
| | 4/8 | 8/16 | 16/25 | 4/8 | 8/16 | 16/25 | 4/8 | 8/16 | 16/25 |
| LAFARGE | 2.70 | 2.66 | 2.68 | 1.42 | 1.39 | 1.33 | 0.37 | 0.78 | 0.31 |

Avec :

- ρ_a : masse volumique absolue
- ρ_r : masse volumique apparente
- WA24 : coefficient d'adsorption d'eau après immersion pendant 24H

D'après ces résultats obtenus, en remarque que:

- Les valeurs de la masse volumique absolue sur les trois fractions sont plus ou moins égales ;
- Les valeurs de la masse volumique apparente sur les trois fractions sont plus ou moins égales ;
- Le coefficient d'adsorption d'eau est de l'ordre de 0.37%, 0.78% et 0.31% respectivement pour les classes granulométriques 4/8mm, 8/16mm et 16/25mm.

2) Résultats de détermination de la masse volumique réelle des échantillons de TAYA

Tableau III-6 : Résultats de l'essai de détermination de la masse volumique réelle des granulats de la carrière de TAYA

| Carrière | ρ_a (g/cm ³) | | | ρ_r (g/cm ³) | | | WA24(%) | | |
|-------------|-------------------------------|------|-------|-------------------------------|------|-------|---------|------|-------|
| | 4/8 | 8/16 | 16/25 | 4/8 | 8/16 | 16/25 | 4/8 | 8/16 | 16/25 |
| TAYA | 2.66 | 2.67 | 2.65 | 1.4 | 1.43 | 1.41 | 0.64 | 0.48 | 0.22 |

Avec :

- ρ_a : masse volumique absolue
- ρ_r : masse volumique apparente
- WA24 : coefficient d'adsorption d'eau après immersion pendant 24H

D'après ces résultats obtenus, en remarque que:

- Les valeurs de la masse volumique absolue sur les trois fractions sont plus ou moins égales ;
- Les valeurs de la masse volumique apparente sur les trois fractions sont plus ou moins égales ;
- Le coefficient d'adsorption d'eau est de l'ordre de 0.64%, 0.48% et 0.22% respectivement pour les classes granulométriques 4/8mm, 8/16mm et 16/25mm.

3) Résultats de détermination de la masse volumique réelle des échantillons de CTM (TEDJENNENT)

Tableau III-7 : Résultats de l'essai de détermination de la masse volumique réelle des granulats de la carrière de TEDJENNENT

| Carrière | ρ_a (g/cm ³) | | | ρ_r (g/cm ³) | | | WA24(%) | | |
|-------------------|-------------------------------|------|-------|-------------------------------|------|-------|---------|------|-------|
| | 4/8 | 8/16 | 16/25 | 4/8 | 8/16 | 16/25 | 4/8 | 8/16 | 16/25 |
| TEDJENNENT | 2.55 | 2.59 | 2.64 | 1.36 | 1.31 | 1.36 | 1.02 | 0.83 | 0.35 |

Avec :

- ρ_a : masse volumique absolue
- ρ_r : masse volumique apparente
- WA24 : coefficient d'adsorption d'eau après immersion pendant 24H

D'après ces résultats obtenus, en remarque que:

- Les valeurs de la masse volumique absolue sur les trois fractions sont plus ou moins égales ;
- Les valeurs de la masse volumique apparente sur les trois fractions sont plus ou moins égales ;
- Le coefficient d'adsorption d'eau est de l'ordre de 1.02%, 0.83% et 0.35% respectivement pour les classes granulométriques 4/8mm, 8/16mm et 16/25mm.

4) Résultats de détermination de la masse volumique réelle des échantillons d'ENNOUR (EL-GROUZ)

Tableau III-8 : Résultats de l'essai de détermination de la masse volumique réelle des granulats de la carrière d'ENNOUR

| Carrière | ρ_a (g/cm ³) | | | ρ_r (g/cm ³) | | | WA24(%) | | |
|---------------|-------------------------------|------|-------|-------------------------------|------|-------|---------|------|-------|
| | 4/8 | 8/16 | 16/25 | 4/8 | 8/16 | 16/25 | 4/8 | 8/16 | 16/25 |
| ENNOUR | 2.62 | 2.64 | 2.61 | 1.6 | 1.38 | 1.37 | 0.92 | 0.41 | 0.20 |

Avec :

- ρ_a : masse volumique absolue
- ρ_r : masse volumique apparente
- WA24 : coefficient d'adsorption d'eau après immersion pendant 24H

D'après ces résultats obtenus, en remarque que:

- Les valeurs de la masse volumique absolue sur les trois fractions sont plus ou moins égales ;
- Les valeurs de la masse volumique apparente sur les trois fractions sont plus ou moins égales ;
- Le coefficient d'adsorption d'eau est de l'ordre de 0.92%, 0.41% et 0.20% respectivement pour les classes granulométriques 4/8mm, 8/16mm et 16/25mm.

III.1.3.2. Interprétation des résultats

Les résultats obtenus de l'essai de détermination de la masse volumique et du coefficient d'adsorption d'eau sont conformes à la norme de spécifications NF EN 1097-6, ce qui fait l'objectif de les rendre approprié pour la confection des bétons.

III.1.3.3. Comparaison des résultats

Après analyse et interprétation des résultats obtenus, les granulas issue des quatre carrières possèdent des caractéristiques physiques autorisant les d'être utile pour la confection des bétons.

III.1.4. Résultats et discussion de la résistance à l'usure essai micro-Deval (MDE)

III.1.4.1. Présentation des résultats

L'essai de la résistance à l'usure (Micro-DEVAL) a été effectué sur la fraction 10/14mm des quatre carrières, utilisant une charge abrasive d'une masse de 5000g, et une vitesse de rotation, pour les cylindre, de 100 tr/min pendant 12000 tours.

Les résultats de l'essai sont récapitulés dans les tableaux suivants.

1) Résultats de l'essai Micro-DEVAL des échantillons de LAFARGE (EL-MEHIR)

Tableau III-9 : Résultats de l'essai (MDE) des granulats de la carrière de LAFARGE

| Carrière | m(g) | MDE (%) |
|----------|-------|---------|
| LAFARGE | 428.2 | 14.36 |

Avec :

- m : Masse de la fraction refusée au tamis 1.6mm
- MDE : Coefficient Micro-DEVAL

2) Résultats de l'essai Micro-DEVAL des échantillons de TAYA

Tableau III-10 : Résultats de l'essai (MDE) des granulats de la carrière de TAYA

| Carrière | m(g) | MDE (%) |
|----------|--------|---------|
| TAYA | 404.35 | 19.13 |

Avec :

- m : Masse de la fraction refusée au tamis 1.6mm
- MDE : Coefficient Micro-DEVAL

3) Résultats de l'essai Micro-DEVAL des échantillons de CTM (TEDJENNENT)

Tableau III-11 : Résultats de l'essai (MDE) des granulats de la carrière de TEDJENNENT

| Carrière | m(g) | MDE (%) |
|------------|-------|---------|
| TEDJENNENT | 411.6 | 17.68 |

Avec :

- m : Masse de la fraction refusée au tamis 1.6mm
- MDE : Coefficient Micro-DEVAL

4) Résultats de l'essai Micro-DEVAL des échantillons d'ENNOUR (EL-GROUZ)

Tableau III-12 : Résultats de l'essai (MDE) des granulats de la carrière d'ENNOUR

| Carrière | m(g) | MDE (%) |
|----------|-------|---------|
| ENNOUR | 390.2 | 21.96 |

Avec :

- m : Masse de la fraction refusée au tamis 1.6mm
- MDE : Coefficient Micro-DEVAL

III.1.4.2. Interprétation des résultats

D'après les résultats déduits, on observe la différence entre les valeurs du coefficient MDE où ils sont de l'ordre de 14.36%, 19.13%, 17.68% et 21,96% respectivement pour les carrières LAFARGE, TAYA, TEDJENNENT et ENNOUR.

On peut interpréter les résultats obtenus des coefficients MDE des granulats à partir du tableau suivant :

Tableau III-13 : Caractéristiques intrinsèques des granulats (MDE).

| MDE | QUALITE |
|---------------------------|----------------|
| MDE < 13 | Très bon |
| $13 \leq \text{MDE} < 20$ | Bon à moyen |
| $20 \leq \text{MDE} < 25$ | Moyen à faible |
| MDE ≥ 25 | Médiocre |

III.1.4.3. Comparaison des résultats

Selon la norme de spécification NF EN 1097-1 et les résultats obtenus, les quatre carrières offrent des granulats de caractéristique intrinsèque bonnes à moyenne pour être introduit dans la formulation des bétons hydrauliques.

III.1.5. Résultats et discussion de la détermination de la résistance à la fragmentation

Los Angeles (LA)

III.1.5.1. Présentation des résultats

L'essai de la résistance au à la fragmentation (Los Angeles) a été effectué sur la fraction 10/14mm des quatre carrières, utilisant 11 boulets en acier et introduisant une masse de 5000g pour chaque prise, avec une vitesse de rotation de 30 tr/min pendant 500 tours.

Les résultats de l'essai sont récapitulés dans les tableaux suivants.

1) Résultats de l'essai Los Angeles des échantillons de LAFARGE (EL-MEHIR)

Tableau III-14 : Résultats de l'essai (LA) des granulats de LAFARGE

| Carrière | m (g) | LA (%) |
|----------|--------|--------|
| LAFARGE | 4022.5 | 19.55 |

Avec :

m : Masse du refus au tamis 1.6mm

LA : Coefficient Los-Angeles

2) Résultats de l'essai Los Angeles des échantillons de TAYA

Tableau 0-15 : Résultats de l'essai (LA) des granulats de TAYA

| Carrière | Masse du refus au tamis 1.6mm ; m (g) | Los-Angeles ; LA (%) |
|----------|--|----------------------|
| TAYA | 3785 | 24.3 |

Avec :

m : Masse du refus au tamis 1.6mm

LA : Coefficient Los-Angeles

3) Résultats de l'essai Los Angeles des échantillons de CTM (TEDJENNENT)

Tableau III-16 : Résultats de l'essai (LA) des granulats de TEDJENNENT

| Carrière | Masse du refus au tamis 1.6mm ; m (g) | Los-Angeles ; LA (%) |
|------------|--|----------------------|
| TEDJENNENT | 3999 | 20.02 |

Avec :

m : Masse du refus au tamis 1.6mm

LA : Coefficient Los-Angeles

4) Résultats de l'essai Los Angeles des échantillons d'ENNOUR (EL-GROUZ)

Tableau III-17 : Résultats de l'essai (LA) des granulats d'ENNOUR

| Carrière | Masse du refus au tamis 1.6mm ; m (g) | Los-Angeles ; LA (%) |
|----------|--|----------------------|
| ENNOUR | 3487 | 30.26 |

Avec :

m : Masse du refus au tamis 1.6mm

LA : Coefficient Los-Angeles

III.1.5.2. Interprétation des résultats

D'après les résultats déduits, on observe la différence entre les valeurs du coefficient LA où ils sont de l'ordre de 19.55%, 24.3%, 20.02% et 30.26% respectivement pour les carrières LAFARGE, TAYA, TEDJENNENT et ENNOUR.

On peut interpréter les résultats obtenus des coefficients LA des granulats à partir du tableau suivant :

Tableau III-18 : Caractéristiques intrinsèques des granulats (LA).

| LA | QUALITE |
|-------------------|----------------|
| LA < 15 | Très bon |
| $15 \leq LA < 20$ | Bon à moyen |
| $20 \leq LA < 30$ | Moyen à faible |
| LA ≥ 30 | Médiocre |

III.1.5.3. Comparaison des résultats

Selon la norme de spécification NF EN 1097-2 et les résultats obtenus, on constate que uniquement la carrière de LAFARGE qui a des granulats d'une qualité bonne à moyenne.

Les trois autres carrières offrent des granulats de caractéristiques intrinsèques moyennes à faibles pour être introduit dans la formulation des bétons hydrauliques.

III.2. Résultats et discussion des essais sur le sable

III.2.1. Résultats et discussion de l'essai au bleu de méthylène

III.2.1.1. Présentation des résultats

Le sable analysé pour cette étude comparative, et qui va être introduit dans nos formulations, est le sable 0/4 de la carrière « ARRIS KHOUDJA ».

Pour cet essai nous avons choisi la fraction 0/2 du même sable pour évaluer la nature des particules fines contenant dans ce matériau

Les résultats de l'essai sont introduits dans le tableau suivant :

Tableau III-19 : Résultats de l'essai au bleu de méthylène (MBF) de sable de la carrière d'ARRIS KHOUDJA

| Carrière | M1 (g) | V1 (ml) | MB (%) |
|---------------|--------|---------|--------|
| ARRIS KHOUDJA | 208 | 15 | 0.72 |

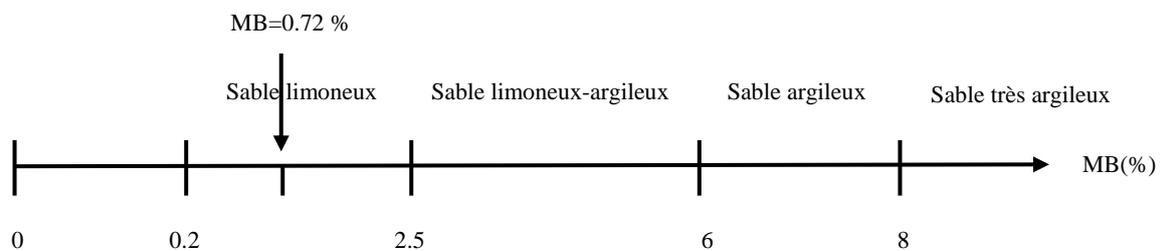
Avec :

- M1 : masse sèche de la prise d'essai ;
- V1 : volume de bleu de méthylène ajouté ;
- MB : Valeur au bleu de méthylène de la fraction 0/2

III.2.1.2. Interprétation des résultats

D'après les résultats récapitulés dans tableau III-19, on déduit la propreté de notre échantillon ainsi l'absence de la matière argileuse dedans.

On effet, on peut la classer selon la norme NF EN 933-9 comme sable limoneux :



III.2.2. Résultats et discussion de l'équivalent de sable (Es)

III.2.2.1. Présentation des résultats

Pour cette analyse, nous avons utilisé la fraction 0/2mm du même sable de la carrière d'ARRIS KHOUDJA. Et d'après les résultats, on constate qu'il présente un équivalent de sable à vue (ESV) moyen de l'ordre de 77.07%, et un équivalent de sable à piston (ESP) moyen de l'ordre de 72.74%.

Tableau III-20 : Résultats de l'analyse équivalent de sable (Es)

| Eprouvette | Hauteur du floculat h1 (cm) | Hauteur du sédiment h'2 à vue (cm) | Hauteur du sédiment h2 à piston (cm) | ESV (%) $\frac{h'2}{h1} \times 100$ | ESP (%) $\frac{h2}{h1} \times 100$ |
|-------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|--|---------------------------------------|
| 1 | 11.4 | 8.9 | 8.4 | 78.07 | 73.68 |
| 2 | 11.7 | 8.9 | 8.4 | 76.07 | 71.79 |
| Equivalent de sable : ES (%) | | | | 77.07 | 72.74 |

III.2.2.2. Interprétation des résultats

La présente récapitulatif affiche les valeurs obtenus de l'équivalent de sable à vue et à piston, et en référant à la norme de spécification NF EN 933-8, on déduit que la nature de ce sable est propre, et qu'il est de bon qualité pour la confection des bétons hydrauliques.

On peut interpréter les résultats obtenus de l'essai d'équivalent de sable à partir du tableau suivant :

Tableau III-21 : Références pour déterminer la signification de : ESV et ESP

| ESV (%) | ESP (%) | Nature et qualité du sable |
|---------------|---------------|---|
| ESV < 65 | ESP < 60 | Sable argileux – risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité. |
| 65 < ESV < 75 | 60 < ESP < 70 | Sable légèrement argileux de propreté admissible pour béton de qualité courante |
| 75 < ESV < 85 | 70 < ESP < 80 | Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité. |
| ESV ≥ 85 | ESP ≥ 80 | Sable très propre – l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton. |

III.3. Résultats et discussion des essais sur béton

Pour avoir une comparaison plus précise entre les propriétés des granulats issus de chaque carrière, et de visualiser son influence sur la qualité des bétons, une approche a été adopté pour les formulations réalisés. Où nous avons fixé la même qualité des autres constituants des bétons formulés, et nous avons varié entre les fractions granulaires des quatre carrières.

III.3.1. Résultats et discussion de l'affaissement au cône d'ABRAMS

III.3.1.1. Présentation des résultats

1) Béton formulé avec les granulats de LAFARGE (EL-MEHIR)

Tableau III-22 : Résultat de l'affaissement au cône d'ABRAMS du béton formulé avec les granulats de LAFARGE

| Composition | Matériau | Provenance | Dosage (Kg/m³) |
|---|-----------------|---------------------------------|----------------------------------|
| | 16/25 | Carrière LAFARGE EL MEHIR | 330 |
| | 8/16 | | 491 |
| | 4/8 | | 184 |
| | Sable | ARRIS KHOUDJA | 828 |
| | Ciment | CPJ 42.5 AIN EL KBIRA | 350 |
| | Eau | Potable, Sétif | 159 |
| | Adjuvant | POLYFLOW SPRE 400 (SOLU EST) | 3.68 |
| Affaissement au cône d'ABRAMS (cm) | | | 18 |

Le tableau (III-22) indique la composition du béton C25/30 formulé exclusivement avec les granulats de LAFARGE et son affaissement.

2) Béton formulé avec les granulats de TAYA

Tableau III-23 : Résultat de l'affaissement au cône d'ABRAMS du béton formulé avec les granulats de TAYA

| Composition | Matériau | Provenance | Dosage (Kg/m³) |
|---|-----------------|---------------------------------|----------------------------------|
| | 16/25 | Carrière de TAYA | 416 |
| | 8/16 | | 491 |
| | 4/8 | | 145 |
| | Sable | ARRIS KHOUDJA | 768 |
| | Ciment | CPJ 42.5 AIN EL KBIRA | 350 |
| | Eau | Potable, Sétif | 159 |
| | Adjuvant | POLYFLOW SPRE 400 (SOLU EST) | 2.8 |
| Affaissement au cône d'ABRAMS (cm) | | | 15 |

Le tableau (III-22) indique la composition du béton C25/30 formulé exclusivement avec les granulats de TAYA et son affaissement.

3) Béton formulé avec les granulats de CTM (TEDJENNENT)

Tableau III-24 : Résultat de l'affaissement au cône d'ABRAMS du béton formulé avec les granulats de TEDJENNENT

| Composition | Matériau | Provenance | Dosage (Kg/m ³) |
|---|----------|---------------------------------|-----------------------------|
| | 16/25 | Carrière CTM TEDJENNENT | 638 |
| | 8/16 | | 406 |
| | 4/8 | | 164 |
| | Sable | ARRIS KHOUDJA | 624 |
| | Ciment | CPJ 42.5 AIN EL KBIRA | 350 |
| | Eau | Potable, Sétif | 175 |
| | Adjuvant | POLYFLOW SPRE 400 (SOLU EST) | 3 |
| Affaissement au cône d'ABRAMS (cm) | | | 6 |

Le tableau (III-22) indique la composition du béton C25/30 formulé exclusivement avec les granulats de TEDJENNENT et son affaissement.

4) Béton formulé avec les granulats d'ENNOUR (EL-GROUZ)

Tableau III-25 : Résultat de l'affaissement au cône d'ABRAMS du béton formulé avec les granulats d'ENNOUR

| Composition | Matériau | Provenance | Dosage (Kg/m ³) |
|---|----------|---------------------------------|-----------------------------|
| | 16/25 | Carrière d'ENNOUR (EL-GROUZ) | 635 |
| | 8/16 | | 413 |
| | 4/8 | | 149 |
| | Sable | ARRIS KHOUDJA | 646 |
| | Ciment | CPJ 42.5 AIN EL KBIRA | 350 |
| | Eau | Potable, Sétif | 175 |
| | Adjuvant | POLYFLOW SPRE 400 (SOLU EST) | 4 |
| Affaissement au cône d'ABRAMS (cm) | | | 6 |

Le tableau (III-22) indique la composition du béton C25/30 formulé exclusivement avec les granulats d'ENNOUR et son affaissement.

III.3.1.2. Interprétation des résultats

D'après les résultats récapitulés dans les tableaux ci-dessus nous avons tiré les conclusions suivantes :

- Les granulats issus des deux carrières : TADJENNENT et ENNOUR ont conduit à la formation d'un béton de classe S2 (béton plastique) avec un affaissement de valeur similaire pour les deux de 6cm. Cette plasticité du béton est attribuable à la qualité satisfaisante de nos granulats, conforme.
- Les granulats issus de la carrière de TAYA ont conduit à la formation d'un béton de classe S3 (béton très plastique) avec un affaissement de valeur de 15cm. Ce comportement est déconseillé pour la confection des bétons hydrauliques.
- Les granulats issus de la carrière de LAFARGE ont conduit à la formation d'un béton de classe S4 (béton fluide) avec un affaissement de valeur de 18cm. Cependant, la fluidité de ce béton en résulte, lui a rendu inapproprié pour notre étude.

III.3.1.3. Comparaison des résultats

Selon la norme de spécification NF EN 206-1, et à l'aide des résultats obtenus, nous avons déduit que :

- Les granulats de la carrière d'ENNOUR et de TADJENNENT formulent un béton plastique conforme à la norme.
- Les granulats de la carrière de TAYA formulent un béton très plastique ce qui est déconseillé
- Les granulats de la carrière de LAFARGE formulent un béton fluide ce qui ne répond pas aux exigences.

III.3.2. Résultats et discussion de la résistance à la compression

III.3.2.1. Présentation des résultats

1) Béton formulé avec les granulats de LAFARGE (EL-MEHIR)

Tableau III-26 : Résultats de la résistance à la compression du béton formulé avec les granulats de LAFARGE

| Numéro de l'éprouvette | Affaissement (cm) | Age | Résistance à la compression (MPa) | Moyenne |
|------------------------|-------------------|-----|-----------------------------------|---------|
| 01/412/23 | S4 Mesuré | 7 J | 30.1 | 30.00 |
| 02/412/23 | 18cm pendant | | 29.6 | |
| 03/412/23 | l'essai d'étude | | 30.3 | |

2) Béton formulé avec les granulats de TAYA

Tableau III-27 : Résultats de la résistance à la compression du béton formulé avec les granulats de TAYA

| Numéro de l'éprouvette | Affaissement (cm) | Age | Résistance à la compression (MPa) | Moyenne |
|------------------------|-------------------|-----|-----------------------------------|---------|
| 01/413/23 | S3 Mesuré | 7 J | 26.4 | 26.67 |
| 02/413/23 | 15cm pendant | | 27.1 | |
| 03/413/23 | l'essai d'étude | | 26.5 | |

3) Béton formulé avec les granulats de CTM (TEDJENNENT)

Tableau III-28 : Résultats de la résistance à la compression du béton formulé avec les granulats de TEDJENNENT

| Numéro de l'éprouvette | Affaissement (cm) | Age | Résistance à la compression (MPa) | Moyenne |
|------------------------|-------------------|-----|-----------------------------------|---------|
| 01/414/23 | S2 Mesuré 6cm | 7 J | 25.3 | 24.93 |
| 02/414/23 | pendant l'essai | | 24.9 | |
| 03/414/23 | d'étude | | 24.6 | |

4) Béton formulé avec les granulats d'ENNOUR (EL-GROUZ)

Tableau III-29 : Résultats de la résistance à la compression du béton formulé avec les granulats d'ENNOUR

| Numéro de l'éprouvette | Affaissement (cm) | Age | Résistance à la compression (MPa) | Moyenne |
|------------------------|---------------------------------------|-----|-----------------------------------|---------|
| 01/415/23 | S2 Mesuré 6cm pendant l'essai d'étude | 7 J | 27.3 | 27.33 |
| 02/415/23 | | | 26.5 | |
| 03/415/23 | | | 28.2 | |

III.3.2.2. Interprétation des résultats

D'après les résultats récapitulés dans les tableaux ci-dessus on constate que la résistance moyenne à la compression des éprouvettes du béton C25/30 confectionné avec les granulats provenant des carrières de LAFARGE, TAYA, TEDJENNENT et ENNOUR sont respectivement de l'ordre de 30 MPa, 26.67 MPa, 24.93 MPa et 27.33 MPa, ce qui est conforme à la norme en vigueur ;

III.3.2.3. Comparaison des résultats

Conformément à la norme de spécification NF EN 12390-3, et à l'aide des résultats obtenus, on observe :

- Une résistance à compression élevée pour le béton formulé par les granulats de la carrière LAFARGE ;
- La résistance du béton des trois autres carrières est légèrement faible par rapport à celui de LAFARGE ;
- Les valeurs de résistance à compression des bétons formulés par les granulats de TAYA, TEDJENNENT et ENNOUR sont plus ou moins égales

Prenant en compte les valeurs de l'affaissement au cône d'ABRAMS, on remarque qu'elle n'a pas une influence sur le comportement mécanique des bétons formulés dans notre cas, où on détermine les valeurs de l'affaissement pour chaque béton de l'ordre 18cm, 15mm, 6mm et 6mm traduisant des valeurs de résistance respectivement de l'ordre de 30 MPa, 26.67 MPa, 24.93 MPa et 27.33 MPa.

Conclusion

Cette partie du travail concernait les présentations, interprétations et comparaisons de tous résultats et données obtenus par analyses réalisées sur :

- Granulats de fractions 4/8, 8/16 et 16/25 provenant des quatre carrières : LAFARGE, TAYA, TEDJENNENT et ENNOUR ;
- Sable 0/4 issue de la carrière d'ARRIS KHOUDJA ;
- Bétons hydrauliques C25/30 formulées par les granulats sur lequel on a fait l'objet de notre étude.

A travers ces résultats obtenus, et en se référant aux normes de spécification pour chaque essai, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Tous les granulats des quatre carrières, ont les caractéristiques requises pour être introduits dans la formulation des bétons hydrauliques. Sauf que pour la fraction 4/8, des granulats de TAYA et de TEDJENNENT, qui ne répondent pas aux exigences de la norme NF EN 933-3.
- Le sable d'ARRIS KHOUDJA présente un comportement conforme aux exigences, et serve aussi une propreté convenant parfaitement pour les bétons hydrauliques.
- Les quatre formulations ont une composition de même type de matériaux, d'un dosage plus ou moins identique, et de différents granulats.

Cela signifie que la qualité de ces bétons formulés, dépend de la qualité et de la quantité des granulats introduits.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce travail de recherche rentre dans le cadre d'apporter une contribution à une meilleure compréhension sur les méthodes d'évaluation de la qualité des agrégats, et leurs impact sur la formulation des bétons hydrauliques.

Dans ce contexte, notre objectif était d'analyser en profondeur les caractéristiques des granulats, provenant de quatre carrières distincts, et de comprendre comment ces caractéristiques influencent sur la formulation des bétons.

Pour parvenir à cet objectif, nous avons utilisé une série de méthodes et de matériels, notamment des essais sur :

- Granulats de fractions 4/8, 8/16 et 16/25 provenant des quatre carrières : LAFARGE, TAYA, TEDJENNENT et ENNOUR ;
- Sable 0/4 issue de la carrière d'ARRIS KHOUDJA ;
- Bétons hydrauliques C25/30 formulées par les granulats sur lequel on a fait l'objet de notre étude.

L'analyse des résultats de ces essais, en se référant aux normes de spécifications, a permis de conclure que la qualité et le dosage des granulats jouent un rôle crucial dans la performance du béton hydraulique, influençant sa maniabilité, sa résistance et sa durabilité.

Les granulats conformes aux normes ont été associés à des bétons de meilleure qualité, tandis que l'utilisation des granulats non conforme, à une des normes exigées, a conduit à formuler des bétons moins performants.

Notre modeste travail est une suite de nombreuses recherches, et elle n'a porté que sur quelque type d'analyses et de caractérisation des granulats naturels, ainsi que pour ce genre de bétons.

Toutefois, cette étude pourrait être complétée et poursuivi à long terme en vue de l'importance de ces matériaux et de leurs propriétés sur la résistance et la durabilité des structures de construction.

Références

Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] G.DREUX, J.FESTA, Nouveau guide du béton et de ses constituants, EYROLLES, Huitième édition 1998, Troisième tirage, 2007.
- [2] Infociments : la base documentaire de référence sur les ciments et bétons. (n.d.). <https://infociments.fr/>
- [3] RICHARD Maillot, Mémento technique des granulats. Les Presses de l'Ecole des Mines, Paris, (2001).
- [4] Neville, A. M., & Brooks, J. J. (1987). Concrete Technology. Longman Scientific and Technical, Second edition, 2010.
- [5] T.MARTAUD, 22 OCT 2008. Evaluation environnementale de la production des granulats naturels en exploitation de carrière – indicateurs, modèles, outils. Financement LCPC, thèse Université d'Orléans, 218p. Co Direction C Proust/ISTO, A Jullien/ LCPC.
- [6] Alexander, M., & Mindess, S. (2005). Aggregates in Concrete. CRC Press, Modern concrete technology series 13, 2010.
- [7] Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., & Panarese, W. C. (2002). Design and Control of Concrete Mixtures.
- [8] Ollivier, J., & Vichot, A. (2008). La durabilité des bétons: bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement. Presses Ponts et Chaussées.
- [9] P-C AÏTCIN, F GENEREUX, J JOLICOEUR, Y MAURICE « Technologie des Granulats» 4ème édition, 2018.
- [10] Norme Française P 18 554, "Granulats - Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux", (1990).
- [11] Norme Française P 18-555, "Granulats - Mesures des masses volumiques, coefficient d'absorption et de la teneur en eau des sables", AFNOR, (1990).
- [12] Norme Française P 18-558, "Granulats: Détermination de la masse volumique absolue des fines", AFNOR, (1990).

- [13] Norme Française EN 1097-3, "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie3: Détermination de la Masse volumique apparente", AFNOR, (1996).
- [14] Norme Française EN 1097-6, "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6: Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient de l'absorption d'eau", AFNOR, (1996).
- [15] NF EN 1936 : Normalisation Française, Méthodes d'essai pour pierres naturelles Détermination des masses volumiques réelle et apparente et des porosités ouvertes et totale, AFNOR, 2007.
- [16] Essais -Granulats. (n.d.). <https://forum-btp.blogspot.com/2014/06/essais-granulats.html>
- [17] Xing, Z. (2011). Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00624785>.
- [18] B.A Wills, T.J Napier-Munn « Mineral Processing Technology », 2006.
- [19] NF EN 933-3 : Norme Européenne, Essai pour détermination de la forme des granulats - Coefficient d'aplatissement, 2012.
- [20] NF EN 1097-6 : Norme Européenne, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats, Partie 06 : Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau, 2001.
- [21] NF EN 1097-1, "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 1: Détermination de la résistance à l'usure (Micro-Deval) (indice de classement P 18-650.1)", AFNOR, (1996).
- [22] Hadidane, H., Oucief, H., & Merzoud, M. (2019). Comportement mécanique des couches d'assises modifiées par des débris de démolition. Academic Journal of Civil Engineering, 36(1), 529-533. <https://doi.org/10.26168/ajce.36.1.112>.
- [23] M.GHOMARI F. & BENDI-OUIS A. 'SCIENCE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION' UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID, ANNEE UNIVERSITAIRE 2007 – 2008.
- [24] F. GABRYSIK, "Matériaux - Les Granulats - Chapitre 2", Académie de Nancy-Metz, http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/Batiment_Pro/

- [25] Norme Française EN 933-9, "Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 9: Qualification des fines - Essai au bleu de méthylène", AFNOR, (1996).
- [26] CIMbéton « Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre », Tome 2.
- [27] Neville, A. M. (2011). Properties of Concrete, Fifth Edition. Prentice Hall.
- [28] M. Westerholm, B. Lagerblad, J. Silfwerbrand et E. Forssberg, «Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars,» Cement & Concrete Composites, vol. 30, n°40, p. 274–282, 2008.
- [29] Le dictionnaire professionnel du BTP.
- [30] NF P18-303, Normalisation, Française Eau de gâchage pour béton, AFNOR, 1999.
- [31] M.SADDIKA, Matériaux et Ouvrage de génie civil, 2014.
- [32] NF P 18-572, Normalisation Française, Essai d'usure micro-Deval, AFNOR, 1990.
- [33] Ramachandran, V. S. (1995). Concrete admixtures handbook : properties, science, and technology. In Noyes Publications eBooks.
- [34] COFFRAGES COSMOS, Les différents types de bétons et leurs spécificités.
- [35] Shetty, M. S. (1987). Concrete Technology: Theory and Practice. <http://fipak.areeo.ac.ir/site/catalogue/18349289>.
- [36] Cbd. (2023). Les différents types de béton. Constructis. <https://www.constructis.org/differents-types-beton/>
- [37] D. Boukhelkhal, S. Kenai., Détermination non destructive de la résistance du béton sur site (Scléromètre & Ultrason). Rencontres Universitaires de Génie Civil, Bayonne, France, May 2015.
- [38] A.KADI, T.NAAMAOU, « Méthodes de la formulation des bétons », Mémoire de fin d'étude, UNIVERSITE AHMED DRAIA D'ADRAR, 2020.
- [39] G.DREUX, « Composition des bétons », CEBTP.
- [40] Norme Française EN 12390-3,"Essais pour béton durci - Partie3 : Résistance à la compression des éprouvettes ", AFNOR, (2019).

Annexes

Annexe 1

Analyse granulométrique des granulats de la carrière de LAFARGE

| <i>ANALYSE GRANULOMETRIQUES CONSTITUANT DU MÉLANGE DES GRANULAT</i> | | | | | |
|---|------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|----------------|
| <i>TAMIS</i> | <i>SABLE 0/4</i> | <i>GRAVILLON 4/8</i> | <i>GRAVILLON 8/16</i> | <i>GRAVILLON 16/25</i> | <i>MÉLANGE</i> |
| <i>25</i> | <i>100</i> | <i>100</i> | <i>100</i> | <i>100</i> | <i>100</i> |
| <i>20</i> | <i>100</i> | <i>100</i> | <i>100</i> | <i>46</i> | <i>90</i> |
| <i>16</i> | <i>100</i> | <i>100</i> | <i>100</i> | <i>4</i> | <i>83</i> |
| <i>14</i> | <i>100</i> | <i>100</i> | <i>92</i> | <i>0</i> | <i>80</i> |
| <i>10</i> | <i>100</i> | <i>100</i> | <i>40</i> | <i>0</i> | <i>66</i> |
| <i>8</i> | <i>100</i> | <i>100</i> | <i>16</i> | <i>0</i> | <i>59</i> |
| <i>6.3</i> | <i>100</i> | <i>96</i> | <i>3</i> | <i>0</i> | <i>55</i> |
| <i>4</i> | <i>90</i> | <i>51</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>46</i> |
| <i>2</i> | <i>56</i> | <i>9</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>26</i> |
| <i>1</i> | <i>35</i> | <i>1</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>16</i> |
| <i>0.5</i> | <i>25</i> | <i>1</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>11</i> |
| <i>0.125</i> | <i>16</i> | <i>1</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>7</i> |
| <i>0.08</i> | <i>13</i> | <i>1</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | <i>6</i> |

Analyse granulométrique des granulats de la carrière de TAYA

ANALYSE GRANULOMETRIQUES CONSTITUANT DU MÉLANGE DES GRANULAT

| <i>TAMIS</i> | <i>SABLE 0/4</i> | <i>GRAVILLON 4/8</i> | <i>GRAVILLON 8/16</i> | <i>GRAVILLON 16/25</i> | <i>MÉLANGE</i> |
|--------------|------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|----------------|
| 25 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100.00 |
| 20 | 100 | 100 | 100 | 79 | 95.17 |
| 16 | 100 | 100 | 100 | 30 | 83.90 |
| 14 | 100 | 100 | 97 | 9 | 78.26 |
| 10 | 100 | 100 | 57 | 1 | 65.62 |
| 8 | 100 | 97 | 15 | 0 | 53.81 |
| 6.3 | 100 | 72 | 6 | 0 | 49.38 |
| 5 | 98 | 36 | 3 | 0 | 44.85 |
| 4 | 98 | 8 | 2 | 0 | 42.34 |
| 2 | 81 | 1 | 0 | 0 | 34.10 |
| 1 | 58 | 1 | 0 | 0 | 24.44 |
| 0.5 | 40 | 0 | 0 | 0 | 16.80 |
| 0.315 | 31 | 0 | 0 | 0 | 13.02 |
| 0.25 | 27 | 0 | 0 | 0 | 11.34 |
| 0.125 | 18 | 0 | 0 | 0 | 7.56 |
| 0.063 | 14 | 0 | 0 | 0 | 5.88 |

Analyse granulométrique des granulats de la carrière de TEDJENNENT

ANALYSE GRANULOMETRIQUES CONSTITUANT DU MÉLANGE DES GRANULAT

| <i>TAMIS</i> | <i>SABLE 0/4</i> | <i>GRAVILLON 4/8</i> | <i>GRAVILLON 8/16</i> | <i>GRAVILLON 16/25</i> | <i>MÉLANGE</i> |
|--------------|------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|----------------|
| 25 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100.00 |
| 20 | 100 | 100 | 100 | 71 | 90.14 |
| 16 | 100 | 100 | 100 | 29 | 75.86 |
| 14 | 100 | 100 | 59 | 10 | 60.38 |
| 10 | 100 | 100 | 21 | 1 | 48.96 |
| 8 | 100 | 98 | 8 | 1 | 45.92 |
| 6.3 | 100 | 82 | 2 | 0 | 42.82 |
| 5 | 99 | 60 | 0 | 0 | 40.05 |
| 4 | 95 | 45 | 0 | 0 | 37.30 |
| 2 | 69 | 22 | 0 | 0 | 26.13 |
| 1 | 40 | 13 | 0 | 0 | 15.17 |
| 0.5 | 25 | 0 | 0 | 0 | 8.75 |
| 0.315 | 18 | 0 | 0 | 0 | 6.30 |
| 0.25 | 17 | 0 | 0 | 0 | 5.95 |
| 0.125 | 13 | 0 | 0 | 0 | 4.55 |
| 0.063 | 11 | 0 | 0 | 0 | 3.85 |

Analyse granulométrique des granulats de la carrière d'ENNOUR

| <i>ANALYSE GRANULOMETRIQUES CONSTITUANT DU MÉLANGE DES GRANULAT</i> | | | | | |
|---|-----------|---------------|----------------|--------------------|---------|
| TAMIS | SABLE 0/4 | GRAVILLON 4/8 | GRAVILLON 8/16 | GRAVILLON 16/25 | MÉLANGE |
| 25 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100.00 |
| 20 | 100 | 100 | 100 | 97 | 98.98 |
| 16 | 100 | 100 | 74 | 28 | 69.54 |
| 14 | 100 | 100 | 53 | 1 | 55.53 |
| 10 | 100 | 100 | 15 | 1 | 46.79 |
| 8 | 100 | 90 | 3 | 1 | 43.23 |
| 6.3 | 100 | 60 | 1 | 0 | 40.03 |
| 5 | 100 | 30 | 0 | 0 | 37.40 |
| 4 | 96 | 8 | 0 | 0 | 34.24 |
| 2 | 69 | 2 | 0 | 0 | 24.31 |
| 1 | 43 | 0 | 0 | 0 | 15.05 |
| 0.5 | 27 | 0 | 0 | 0 | 9.45 |
| 0.315 | 20 | 0 | 0 | 0 | 7.00 |
| 0.25 | 18 | 0 | 0 | 0 | 6.30 |
| 0.125 | 13 | 0 | 0 | 0 | 4.55 |
| 0.063 | 11 | 0 | 0 | 0 | 3.85 |

Annexe 2

Détermination de la forme des granulats (LA) de la carrière de LAFARGE

Granulats 16/25

| Tamisage sur tamis d'essai | | Tamisage sur grilles à fentes | | Aplatissement partiel (%) |
|-------------------------------------|---|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| Granulat élémentaire d_i/D_i (mm) | Masse R_i du granulat élémentaire d_i/D_i (g) | Largeur de fente de la grille (mm) | Passant dur grille à fentes m_i (g) | $A_i = \frac{m_i}{R_i} \times 100$ |
| 63/80 | | 40±0.5 | | |
| 50/63 | | 31.5±0.5 | | |
| 40/50 | | 25±0.4 | | |
| 31.5/40 | | 20±0.4 | | |
| 25/31.5 | 20 | 16±0.4 | 0 | 0 |
| 20/25 | 808 | 12.5±0.4 | 36 | 4.46 |
| 16/20 | 3029 | 10±0.2 | 112 | 3.70 |
| 12.5/16 | 1382 | 8±0.2 | 58 | 4.20 |
| 10/12.5 | 83 | 6.3±0.2 | 5 | 6.02 |
| 8/10 | 15 | 5±0.2 | 1 | 6.67 |
| 6.3/8 | | 4±0.15 | | |
| 5/6.3 | | 3.15±0.15 | | |
| 4/5 | | 2.5±0.15 | | |
| $M1 = \sum R_i$ | 5337 | $M2 = \sum m_i$ | 212 | A(%) = 3.97 |

Détermination de la forme des granulats (LA) de la carrière de LAFARGE

Granulats 8/16

| Tamisage sur tamis d'essai | | Tamisage sur grilles à fentes | | Aplatissement partiel (%) |
|-------------------------------------|---|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| Granulat élémentaire d_i/D_i (mm) | Masse R_i du granulat élémentaire d_i/D_i (g) | Largeur de fente de la grille (mm) | Passant dur grille à fentes m_i (g) | $A_i = \frac{m_i}{R_i} \times 100$ |
| 63/80 | | 40±0.5 | | |
| 50/63 | | 31.5±0.5 | | |
| 40/50 | | 25±0.4 | | |
| 31.5/40 | | 20±0.4 | | |
| 25/31.5 | | 16±0.4 | | |
| 20/25 | | 12.5±0.4 | | |
| 16/20 | 71 | 10±0.2 | 5 | 7.04 |
| 12.5/16 | 532 | 8±0.2 | 72 | 1.35 |
| 10/12.5 | 788 | 6.3±0.2 | 108 | 1.37 |
| 8/10 | 827 | 5±0.2 | 112 | 1.42 |
| 6.3/8 | 878 | 4±0.15 | 123 | 1.40 |
| 5/6.3 | 252 | 3.15±0.15 | 31 | 1.23 |
| 4/5 | 103 | 2.5±0.15 | 12 | 1.16 |
| M1=∑R_i | 3451 | M2=∑m_i | 454 | A(%) = 13.16 |

Détermination de la forme des granulats (LA) de la carrière de LAFARGE

Granulats 4/8

| Tamisage sur tamis d'essai | | Tamisage sur grilles à fentes | | Aplatissement partiel (%) |
|-------------------------------------|---|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| Granulat élémentaire d_i/D_i (mm) | Masse R_i du granulat élémentaire d_i/D_i (g) | Largeur de fente de la grille (mm) | Passant dur grille à fentes m_i (g) | $A_i = \frac{m_i}{R_i} \times 100$ |
| 63/80 | | 40±0.5 | | |
| 50/63 | | 31.5±0.5 | | |
| 40/50 | | 25±0.4 | | |
| 31.5/40 | | 20±0.4 | | |
| 25/31.5 | | 16±0.4 | | |
| 20/25 | | 12.5±0.4 | | |
| 16/20 | | 10±0.2 | | |
| 12.5/16 | 4 | 8±0.2 | 0 | 0 |
| 10/12.5 | 6 | 6.3±0.2 | 1 | 1.67 |
| 8/10 | 124 | 5±0.2 | 14 | 1.13 |
| 6.3/8 | 712 | 4±0.15 | 72 | 1.01 |
| 5/6.3 | 734 | 3.15±0.15 | 76 | 1.05 |
| 4/5 | 335 | 2.5±0.15 | 54 | 1.61 |
| M1=∑R_i | 1915 | M2=∑m_i | 217 | A(%) = 11.28 |

Détermination de la forme des granulats (LA) de la carrière de TAYA

Granulats 16/25

| Tamisage sur tamis d'essai | | Tamisage sur grilles à fentes | | Aplatissement partiel (%) |
|-------------------------------------|---|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| Granulat élémentaire d_i/D_i (mm) | Masse R_i du granulat élémentaire d_i/D_i (g) | Largeur de fente de la grille (mm) | Passant dur grille à fentes m_i (g) | $A_i = \frac{m_i}{R_i} \times 100$ |
| 63/80 | | 40±0.5 | | |
| 50/63 | | 31.5±0.5 | | |
| 40/50 | | 25±0.4 | | |
| 31.5/40 | | 20±0.4 | | |
| 25/31.5 | 117 | 16±0.4 | 6 | 5.13 |
| 20/25 | 923 | 12.5±0.4 | 63 | 6.83 |
| 16/20 | 3015 | 10±0.2 | 176 | 5.85 |
| 12.5/16 | 1233 | 8±0.2 | 88 | 7.14 |
| 10/12.5 | 128 | 6.3±0.2 | 7 | 5.47 |
| 8/10 | 12 | 5±0.2 | 1 | 8.33 |
| 6.3/8 | | 4±0.15 | | |
| 5/6.3 | | 3.15±0.15 | | |
| 4/5 | | 2.5±0.15 | | |
| M1=∑R_i | 5428 | M2=∑m_i | 341 | A(%) = 6.28 |

Détermination de la forme des granulats (LA) de la carrière de TAYA

Granulats 8/16

| Tamisage sur tamis d'essai | | Tamisage sur grilles à fentes | | Aplatissement partiel (%) |
|-------------------------------------|---|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| Granulat élémentaire d_i/D_i (mm) | Masse R_i du granulat élémentaire d_i/D_i (g) | Largeur de fente de la grille (mm) | Passant dur grille à fentes m_i (g) | $A_i = \frac{m_i}{R_i} \times 100$ |
| 63/80 | | 40±0.5 | | |
| 50/63 | | 31.5±0.5 | | |
| 40/50 | | 25±0.4 | | |
| 31.5/40 | | 20±0.4 | | |
| 25/31.5 | | 16±0.4 | | |
| 20/25 | | 12.5±0.4 | | |
| 16/20 | 64 | 10±0.2 | 9 | 14.06 |
| 12.5/16 | 840 | 8±0.2 | 108 | 12.86 |
| 10/12.5 | 1128 | 6.3±0.2 | 171 | 15.16 |
| 8/10 | 957 | 5±0.2 | 139 | 14.52 |
| 6.3/8 | 203 | 4±0.15 | 32 | 15.76 |
| 5/6.3 | 137 | 3.15±0.15 | 19 | 13.87 |
| 4/5 | 25 | 2.5±0.15 | 2 | 8 |
| M1=∑R_i | 3354 | M2=∑m_i | 480 | A(%) = 14.3 |

Détermination de la forme des granulats (LA) de la carrière de TAYA

Granulats 4/8

| Tamisage sur tamis d'essai | | Tamisage sur grilles à fentes | | Aplatissement partiel (%) |
|-------------------------------------|---|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| Granulat élémentaire d_i/D_i (mm) | Masse R_i du granulat élémentaire d_i/D_i (g) | Largeur de fente de la grille (mm) | Passant dur grille à fentes m_i (g) | $A_i = \frac{m_i}{R_i} \times 100$ |
| 63/80 | | 40±0.5 | | |
| 50/63 | | 31.5±0.5 | | |
| 40/50 | | 25±0.4 | | |
| 31.5/40 | | 20±0.4 | | |
| 25/31.5 | | 16±0.4 | | |
| 20/25 | | 12.5±0.4 | | |
| 16/20 | | 10±0.2 | | |
| 12.5/16 | 16 | 8±0.2 | 3 | 18.75 |
| 10/12.5 | 23 | 6.3±0.2 | 5 | 21.74 |
| 8/10 | 247 | 5±0.2 | 61 | 24.70 |
| 6.3/8 | 581 | 4±0.15 | 180 | 30.98 |
| 5/6.3 | 694 | 3.15±0.15 | 195 | 28.10 |
| 4/5 | 371 | 2.5±0.15 | 109 | 29.38 |
| M1=∑R_i | 1932 | M2=∑m_i | 553 | A(%) = 28.6 |

**Détermination de la forme des granulats (LA) de la carrière de
TEDJENNENT**

Granulats 16/25

| Tamisage sur tamis d'essai | | Tamisage sur grilles à fentes | | Aplatissement partiel (%) |
|-------------------------------------|---|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| Granulat élémentaire d_i/D_i (mm) | Masse R_i du granulat élémentaire d_i/D_i (g) | Largeur de fente de la grille (mm) | Passant dur grille à fentes m_i (g) | $A_i = \frac{m_i}{R_i} \times 100$ |
| 63/80 | | 40±0.5 | | |
| 50/63 | | 31.5±0.5 | | |
| 40/50 | | 25±0.4 | | |
| 31.5/40 | | 20±0.4 | | |
| 25/31.5 | 49 | 16±0.4 | 2 | 4.08 |
| 20/25 | 1738 | 12.5±0.4 | 104 | 5.98 |
| 16/20 | 2886 | 10±0.2 | 173 | 5.99 |
| 12.5/16 | 976 | 8±0.2 | 59 | 6.05 |
| 10/12.5 | 8 | 6.3±0.2 | 0 | 0 |
| 8/10 | | 5±0.2 | | |
| 6.3/8 | | 4±0.15 | | |
| 5/6.3 | | 3.15±0.15 | | |
| 4/5 | | 2.5±0.15 | | |
| M1=∑R_i | 5657 | M2=∑m_i | 338 | A(%) = 5.97 |

**Détermination de la forme des granulats (LA) de la carrière de
TEDJENNENT**

Granulats 8/16

| Tamisage sur tamis d'essai | | Tamisage sur grilles à fentes | | Aplatissement partiel (%) |
|-------------------------------------|---|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| Granulat élémentaire d_i/D_i (mm) | Masse R_i du granulat élémentaire d_i/D_i (g) | Largeur de fente de la grille (mm) | Passant dur grille à fentes m_i (g) | $A_i = \frac{m_i}{R_i} \times 100$ |
| 63/80 | | 40±0.5 | | |
| 50/63 | | 31.5±0.5 | | |
| 40/50 | | 25±0.4 | | |
| 31.5/40 | | 20±0.4 | | |
| 25/31.5 | | 16±0.4 | | |
| 20/25 | | 12.5±0.4 | | |
| 16/20 | 29 | 10±0.2 | 3 | 10.34 |
| 12.5/16 | 164 | 8±0.2 | 26 | 15.85 |
| 10/12.5 | 891 | 6.3±0.2 | 105 | 11.78 |
| 8/10 | 1208 | 5±0.2 | 166 | 13.74 |
| 6.3/8 | 719 | 4±0.15 | 94 | 13.07 |
| 5/6.3 | 223 | 3.15±0.15 | 30 | 13.45 |
| 4/5 | 50 | 2.5±0.15 | 4 | 8.00 |
| $M1 = \sum R_i$ | 3284 | $M2 = \sum m_i$ | 428 | A(%) = 13.03 |

**Détermination de la forme des granulats (LA) de la carrière de
TEDJENNENT**

Granulats 4/8

| Tamisage sur tamis d'essai | | Tamisage sur grilles à fentes | | Aplatissement partiel (%) |
|-------------------------------------|---|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| Granulat élémentaire d_i/D_i (mm) | Masse R_i du granulat élémentaire d_i/D_i (g) | Largeur de fente de la grille (mm) | Passant dur grille à fentes m_i (g) | $A_i = \frac{m_i}{R_i} \times 100$ |
| 63/80 | | 40±0.5 | | |
| 50/63 | | 31.5±0.5 | | |
| 40/50 | | 25±0.4 | | |
| 31.5/40 | | 20±0.4 | | |
| 25/31.5 | | 16±0.4 | | |
| 20/25 | | 12.5±0.4 | | |
| 16/20 | | 10±0.2 | | |
| 12.5/16 | 2 | 8±0.2 | 0 | 0 |
| 10/12.5 | 19 | 6.3±0.2 | 2 | 10.53 |
| 8/10 | 426 | 5±0.2 | 91 | 21.36 |
| 6.3/8 | 651 | 4±0.15 | 131 | 20.12 |
| 5/6.3 | 710 | 3.15±0.15 | 149 | 20.99 |
| 4/5 | 115 | 2.5±0.15 | 26 | 22.61 |
| M1=∑R_i | 1923 | M2=∑m_i | 399 | A(%) = 20.75 |

Détermination de la forme des granulats (LA) de la carrière d'ENNOUR

Granulats 16/25

| Tamisage sur tamis d'essai | | Tamisage sur grilles à fentes | | Aplatissement partiel (%) |
|-------------------------------------|---|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| Granulat élémentaire d_i/D_i (mm) | Masse R_i du granulat élémentaire d_i/D_i (g) | Largeur de fente de la grille (mm) | Passant dur grille à fentes m_i (g) | $A_i = \frac{m_i}{R_i} \times 100$ |
| 63/80 | | 40±0.5 | | |
| 50/63 | | 31.5±0.5 | | |
| 40/50 | | 25±0.4 | | |
| 31.5/40 | | 20±0.4 | | |
| 25/31.5 | 91 | 16±0.4 | 2 | 2.20 |
| 20/25 | 720 | 12.5±0.4 | 28 | 3.89 |
| 16/20 | 3143 | 10±0.2 | 130 | 4.14 |
| 12.5/16 | 1247 | 8±0.2 | 51 | 4.09 |
| 10/12.5 | 169 | 6.3±0.2 | 6 | 3.55 |
| 8/10 | 13 | 5±0.2 | 0 | 0 |
| 6.3/8 | | 4±0.15 | | |
| 5/6.3 | | 3.15±0.15 | | |
| 4/5 | | 2.5±0.15 | | |
| M1=∑R_i | 5383 | M2=∑m_i | 217 | A(%) = 4.03 |

Détermination de la forme des granulats (LA) de la carrière d'ENNOUR

Granulats 8/16

| Tamisage sur tamis d'essai | | Tamisage sur grilles à fentes | | Aplatissement partiel (%) |
|-------------------------------------|---|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| Granulat élémentaire d_i/D_i (mm) | Masse R_i du granulat élémentaire d_i/D_i (g) | Largeur de fente de la grille (mm) | Passant dur grille à fentes m_i (g) | $A_i = \frac{m_i}{R_i} \times 100$ |
| 63/80 | | 40±0.5 | | |
| 50/63 | | 31.5±0.5 | | |
| 40/50 | | 25±0.4 | | |
| 31.5/40 | | 20±0.4 | | |
| 25/31.5 | | 16±0.4 | | |
| 20/25 | | 12.5±0.4 | | |
| 16/20 | 42 | 10±0.2 | 4 | 9.52 |
| 12.5/16 | 671 | 8±0.2 | 58 | 8.64 |
| 10/12.5 | 1238 | 6.3±0.2 | 125 | 10.10 |
| 8/10 | 890 | 5±0.2 | 91 | 10.22 |
| 6.3/8 | 325 | 4±0.15 | 32 | 9.85 |
| 5/6.3 | 109 | 3.15±0.15 | 10 | 9.17 |
| 4/5 | 87 | 2.5±0.15 | 5 | 5.75 |
| M1=∑R_i | 3362 | M2=∑m_i | 325 | A(%) = 9.67 |

Détermination de la forme des granulats (LA) de la carrière d'ENNOUR

Granulats 4/8

| Tamisage sur tamis d'essai | | Tamisage sur grilles à fentes | | Aplatissement partiel (%) |
|-------------------------------------|---|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| Granulat élémentaire d_i/D_i (mm) | Masse R_i du granulat élémentaire d_i/D_i (g) | Largeur de fente de la grille (mm) | Passant dur grille à fentes m_i (g) | $A_i = \frac{m_i}{R_i} \times 100$ |
| 63/80 | | 40±0.5 | | |
| 50/63 | | 31.5±0.5 | | |
| 40/50 | | 25±0.4 | | |
| 31.5/40 | | 20±0.4 | | |
| 25/31.5 | | 16±0.4 | | |
| 20/25 | | 12.5±0.4 | | |
| 16/20 | | 10±0.2 | | |
| 12.5/16 | 21 | 8±0.2 | 1 | 4.76 |
| 10/12.5 | 26 | 6.3±0.2 | 1 | 3.85 |
| 8/10 | 147 | 5±0.2 | 25 | 17.01 |
| 6.3/8 | 811 | 4±0.15 | 121 | 14.92 |
| 5/6.3 | 643 | 3.15±0.15 | 102 | 15.86 |
| 4/5 | 264 | 2.5±0.15 | 42 | 15.91 |
| M1=∑R_i | 1912 | M2=∑m_i | 292 | A(%) = 15.27 |

Résumé

Le béton est un matériau de construction incontournable depuis longtemps, et dans le monde entier. Cependant, sa performance mécanique est fortement influencée par la qualité et le dosage de ses composants, en particulier les granulats. Ce travail vise à étudier l'impact de la qualité des granulats provenant des carrières LAFARGE (EL-MEHIR), TAYA, CTM TEDJENNENT et ENNOUR (EL-GROUZ), et de sable de la carrière d'ARRIS KHOUDJA, sur le comportement mécanique des bétons formulés. Cette étude est effectuée en réalisant des essais d'identification et de caractérisation sur l'ensemble de nos matériaux, et en se référant aux normes et spécifications exigées.

Mots clés : béton, granulats, sable, formulation, normes, carrière, résistance mécanique.

Abstract

Concrete has been an indispensable construction material for a long time, used worldwide. However, its mechanical performance is strongly influenced by the quality and proportion of its components, especially aggregates. This work aims to study the impact of aggregate quality from the LAFARGE (EL-MEHIR), TAYA, CTM TEDJENNENT, and ENNOUR (EL-GROUZ) quarries, as well as sand from the ARRIS KHOUDJA quarry, on the mechanical behavior of formulated concrete. This study is conducted by realizing identification and characterization tests on all our materials, adhering to the required standards and specifications.

Keywords: concrete, aggregate, sand, formulation, standards, quarry, mechanical behavior.