

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département de Génie des matériaux

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Génie des Matériaux

Option : Sciences des matériaux-pour la construction durable

Thème

Valorisation des sables locaux dans
la formulation de béton ordinaire

Présenté par :

AYADI Walid abdelghani

GUENOUNE Abdelmalek

Suivi par :

Dr. GHERNOUTI Youcef

Liste Des Figures

Chapitre I : Etude Bibliographique

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

Figure I.2 : Exemple des granulats alluvionnaires naturels.

Figure I.3 : Exemple des granulats de carrière.

Figure I.4 : Série des tamis pour la granulométrie.

Figure I.5 : L'analyse granulométrique par tamisage.

Figure I.6 : Exemple de courbe granulaires des granulats por béton.

Figure I.7 : Forme d'un granulats.

Figure I.8 : Détermination de la masse volumique apparente.

Figure I.9 : Détermination de la masse volumique absolue.

Figure I.10 : L'essai au piston de l'équivalent de sable.

Figure I.11: Appareil pour détermine la valeur de bleu méthylène.

Figure I.12 : Machine D'essai Micro Deval.

Figure I.13 : Machine D'essai Los Angeles.

Figure I.14 : Les utilisations des super plastifiants.

Figure I.15 : Essai d'affaissement au cône d'Abrams.

Figure I.16 : Mesure de la masse volumique à l'état frais.

Figure I.17 : Eprouvettes cylindriques de diamètre 16 cm et de hauteur 32cm.

Figure I.18 : Machine d'essai de compression.

Figure I.19 : Machine d'essai de Traction par fendage.

Figure I.20 : Machine d'essai de Traction par flexion.

Figure I.21: Mesure de la masse volumique du béton durci.

Figure I.22 : principe d'utilisation.

Figure I.23 : L'appareille Ultra Son (TICO).

Figure I.24 : Courbe RILEM.

Figure I.25 : Relation entre la résistance à la compression à 28 jours et le rapport E/C.

Figure I.26 : Relation entre la résistance à la compression et le rapport C/E.

Figure I.27 : Relation entre la résistance calculée d'une pate pure de ciment et le rapport C/E

Figure I.28 : La relation entre C/E et la résistance à la compression (f_c) d'après la formule de Bolomey.

Figure I.29 : Influence du dosage en ciment sur la résistance à la compression au jeune âge du béton.

Figure I.30 : Influence du type de ciment sur la résistance à la compression à court terme.

Figure I.31 : Variation de la résistance en compression à 28 jours en fonction du rapport G/S

Figure I.32 : Influence de la dimension maximale du granulat sur la résistance à la compression à 28 jours pour des bétons ayant différents dosage en ciment.

Figure I.33 : Optimisation du rapport G/S en fonction de l'affaissement.

Figure I.34 : Courbe optimale type selon la méthode Dreux-Gorisse.

Figure I.35 : Situation géographique des ergs de l'Algérie.

Chapitre II : Etude Expérimentale

Figure II.1 : Super plastifiant (structuro 311).

Figure II.2 : Différents types de graviers de carrière de Kadara.

Figure II.3 : Courbe granulométrique des graviers.

Figure II.4 : Différents types de sable utilisé.

Figure II.5 : Courbe granulométrique des sables.

Figure II.6 : Abaque permettant la détermination du dosage en ciment à prévoir en fonction de rapport C/E et l'ouvrabilité désirée

Figure II.7 : Courbe granulométrique des granulats.

Figure II.8 : Figure II.8 : Essai d'affaissement au cône d'Abrams des bétons étudiés.

Figure II.9 : Evaluation d'affaissement des bétons étudiés.

Figure II.10 : Détermination de la masse volumique de béton frais.

Figure II.11 : Figure II.11 : Evolution de la Masse volumique des bétons à l'état frais.

Figure II.12 : Exemple de différentes éprouvettes après l'écrasement.

Figure II.13 : Evolution des résistances mécaniques à la compression en fonction de temps des bétons étudiés.

Figure II.14 : Exemple d'essai à la traction par fendage sur éprouvette 16*32 cm.

Figure II.15 : Evolution de la résistance mécanique à la traction par fendage des bétons étudiés à 28 jour.

Figure II.16 : Exemple d'essai à la traction par flexion sur éprouvette 7*7*28 (cm).

Figure II.17: Evolution de la résistance à la traction par flexion des bétons étudiés à 28 jour.

Figure II.18 : Détermination de la masse volumique de béton durci.

Figure II.19 : Evaluation de la Masse volumique des différents bétons étudiés à 28 jours.

Figure II.20 : Evolution de la porosité dans les bétons étudiés à 28 jours.

Figure II.21 : Détermination de La vitesse de propagation des ondes ultrasons.

Figure II.22 : Evolution de la vitesse de propagation des ondes ultrasons dans les bétons étudiés à 28 jour.

Liste Des Tableaux

Chapitre I : Etude Bibliographique

Tableau I.1 : Résistance à la compression des ciments.

Tableau I.2 : Séries de tamis employés pour la détermination du module de finesse du sable.

Tableau I.3 : Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par G. DREUX.

Tableau I.4 : Différents utilisations de différents types d'adjuvants.

Tableau I.5 : Classe de consistance (Slump test).

Tableau I.6 : Classements qualitatifs du béton selon la vitesse de propagation.

Chapitre II : Etude Expérimentale

Tableau II.1 : Composition chimique du ciment CPJ CEM II/A 42.5 R.

Tableau II.2 : Composition minéralogique de ciment CPJ CEM II/A 42.5 R.

Tableau II.3 : Caractéristiques Physique de ciment CPJ CEM II/A 42.5 R.

Tableau II.4 : Caractéristiques mécanique de ciment CPJ CEM II/A 42.5 R.

Tableau II.5 : Caractéristiques de l'adjuvant (structuro 311).

Tableau II.6 : Résultat de l'analyse granulométrique de gravie (3/8).

Tableau II.7 : Résultat de l'analyse granulométrique de gravie (8/15).

Tableau II.8 : Résultat de l'analyse granulométrique de gravie (15/25).

Tableau II.9 : Résultats des principales caractéristiques physiques des graviers.

Tableau II.10 : Résultats des principales caractéristiques mécaniques des graviers.

Tableau II.11 : Résultat de l'analyse granulométrique de sable carrière KADARA.

Tableau II.12 : Résultats des principales caractéristiques physiques de sable KADARA.

Tableau II.13 : Résultat de l'analyse granulométrique de sable Oued-Souf.

Tableau II.14 : Résultats des principales caractéristiques physiques de sable Oued-Souf.

Tableau II.15 : Résultat de l'analyse granulométrique de sable Boussaâda.

Tableau II.16 : Résultats des principales caractéristiques physiques de sable Boussaâda.

Tableau II.17 : Le choix de quantité de chaque sable.

Tableau II.18 : Résultat de l'analyse granulométrique de sable mélange.

Tableau II.19 : Résultats des principales caractéristiques physiques de sable mélange.

Tableau II.20 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire G.

Tableau II.21 : Quantité de différents composants de béton témoin.

Tableau II.22 : Les quantités des sables utilisés dans les compositions des bétons étudiés.

Tableau II.23 : Résultats d'affaissement des bétons étudiés.

Tableau II.24 : Résultats de la masse volumique des différents bétons étudiés.

Tableau II.25 : Résultats de l'essai de compression sur les bétons étudiés.

Tableau II.26 : Résultats de l'essais de traction par fendage sur les bétons étudiés à 28 jour.

Tableau II.27 : Résultats de l'essai de traction par flexion sur les bétons étudiés à 28 jour.

Tableau II.28 : Résultats de la masse volumique des bétons durci à 28jours.

Tableau II.29 : Résultats de la porosité dans bétons étudiés à 28jours.

Tableau II.30 : Résultats de la vitesse de propagation dans les bétons étudiés à 28 jour.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
<i>I. Etude Bibliographique</i>	
I.1. GENERALITE SUR LE BETON.....	3
1.1. INTRODUCTION.....	3
1.2 HISTORICITE DU BETON.....	3
1.3 LES COMPOSANTS D'UN BETON.....	4
1.3.1. CIMENT.....	5
1.3.1.1. Définition	
1.3.1.2. Classification des ciments.....	5
• Classification suivant la composition.....	5
• Classification suivant les résistances à la compression.....	6
1.3.2. L'EAU DE GACHAGE.....	7
1.3.3. ADDITIONS MINERALES.....	7
1.3.4. GRANULAT.....	8
1.3.4.1. Définition.....	8
1.3.4.2. Différents types de granulats.....	8
1.3.4.3. Caractéristiques principales des granulats.....	11
1.3.5. ADJUVANTS.....	22
1.3.5.1. Définition.....	22
1.3.5.2. Classification des adjuvants	22
1.3.5.2. Utilisations des différents types des adjuvants.....	23
1.4. DIFFERENTS TYPES DE BETONS.....	24
1.5. PROPRIETES ESSENTIELLES D'UN BETON.....	25
1.5.1. PROPRIETES DU BETON FRAIS.....	26

1.5.1.1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams.....	26
1.5.1.2. La masse volumique du béton frais.....	27
I.5.2. PROPRIETES DU BETON DURCI.....	28
1.5.2.1. Essai de résistance à la compression.....	28
1.5.2.2. Essai de résistance à la traction.....	29
1.5.2.3. Masse volumique du béton durci.....	30
1.5.2.4. La Porosité	31
1.5.2.5. Essais non destructif par Auscultation sonique (Ultra Son)	31
1.6. PARAMETRES QUI INFLUENT SUR LES CARACTERISTIQUES DU BETON	33
1.6.1. Influence du rapport eau/ciment (E/C)	33
1.6.2. Influence du dosage en ciment.....	35
1.6.3. Influence du type de ciment.....	36
1.6.4. Influence du squelette granulaire.....	37
1.6.5. Dimension maximale des granulats Dmax.....	37
1.6.6. Influence du squelette granulaire sur l'affaissement	38
1.7. METHODES DE FORMULATION DES BETONS	39
1.7.1. Méthode de Bolomey.....	39
1.7.2. Méthode de Faury	39
1.7.3. Méthode de Valette.....	40
1.7.4. Méthode de Dreux-Gorisse.....	40
I.2. GENERALITE SUR LE SABLE.....	41
2.1. INTRODUCTION.....	41
2.2. LES DIFFERENTS CONSTITUANTS DU SABLE	42
2.2.1. Le silicium	42
2.2.2. La silice (ou quartz SiO_2)	42
2.2.3. Les silicates	42
2.2.4. Les argiles	42
2.2.5. Les carbonates.....	43

2.3. CLASSEFUCATIONS DES SABLES.....	43
2.3.1. La granularité.....	43
2.3.2. La propreté et la teneur en fines.....	43
2.3.3. La nature minéralogique.....	43
2.3.4. Leurs provenances	43
2.4. LES CARACTERISTIQUES DU SABLE ET SES APPLICATIONS.....	44
2.4.1. Les caractéristiques du sable.....	44
2.4.2. Les principales applications du sable.....	45
2.5. LES RESSOURCES DES SABLES EN ALGERIE.....	46
2.5.1. Les sables roules siliceux.....	47
2.5.1. les sables de concassage calcaires	47
2.5.1. le sable de dune.....	47
2.6. UTILISATION DE SABLE LOCALE DONS LE BETON EN ALGERIE.....	48
CONCLUSION.....	48

II . Etude Expérimentale

INTRODUCTION.....	49
II.1 CARACTERISATION ET FORMULATION	50
1.1. CARACTERISTIQUES DES MATIERES PREMIERES UTILISENT	50
1.1.1. Ciment.....	50
1.1.2. Adjuvant	52
1.1.3. Granulats.....	53
1.1.3.1. Gravier.....	54
1.1.3.2. Sables	58
1.2. FORMULATIONS DES BETONS	64
1.2.1. Formulation de béton témoin	64
1.2.2. Formulation de différents bétons étudiés	69

II.2. PRESENTATIONS DES RESULTATS ET DISCUSSION	73
2.1. ESSAIS REALISE A L'ETAT FRAIS	73
2.1.1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams	73
2.2.2. Mesure de la masse volumique	75
2.3. ESSAIS REALISE A L'ETAT DURCI	76
2.3.1. Essai de résistance à la compression	76
2.3.2. Essai de résistance à la traction	78
2.3.3. Mesure de la masse volumique du béton durci	81
2.3.4. Mesure de la Porosité	82
2.3.5. Mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasons	83
CONCLUSION GENERALE	85

Introduction

Générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Aujourd'hui le béton occupe une importante place dans le domaine de la construction son intérêt réside de sa grande facilité de mise en œuvre, sa résistance en compression, sa durabilité, son ouvrabilité et son coût acceptable, ont contribué à accroître son utilisation pour tous les ouvrages, comme des immeubles de bureaux ou d'habitation, des ponts, des routes, des tunnels, d'aéroports, des barrages, et des ports... etc.

Le béton est un matériau composite et hétérogène résulte d'un mélange intime de ciment, de granulats, d'eau, et présente des propriétés mécaniques qui peuvent être très supérieures à celles des roches naturelles. Le sable est un élément essentiel entrant dans la composition du béton. Son utilisation permet d'assurer une continuité granulaire nécessaire entre le ciment et le gravier pour une meilleure cohésion du béton. La demande sans cesse croissante sur les granulats a provoqué un épuisement rapide des sabliers et une exploitation anarchique des sables de mer causant ainsi un grave préjudice à l'équilibre de l'environnement à proximité des plages en ayant des répercussions directes sur les ressources naturelles, l'érosion des berges d'oued et l'avancée de mer.

Les pratiques de l'industrie du béton sont conditionnées par les ressources locales et sont relativement routinières. Cependant, l'industrie du béton est confrontée ces dernières années à des changements importants : utilisation d'adjuvants de plus en plus performants, développement de nouveaux bétons (bétons à hautes performances, béton auto-compactant). En Algérie, la plupart des bétons courants sont actuellement fabriqués avec des granulats siliceux alluvionnaires. Face à une demande fort croissante, les ressources potentielles en alluvions, bien qu'importantes, sont épuisables et les gisements sont soumis à des contraintes environnementales de plus en plus rigides faisant croître leur coût d'exploitation déjà élevé. Malgré l'abondance de sable de dune dans le sud, ce matériau reste inconnu. Sa quantité se chiffre en milliards de m³. Il est disponible dans près de 60% du territoire. Certaines de ses caractéristiques physico-chimiques laissent penser qu'il pourrait être adopté en tant que matériau de construction.

L'objectif de ce travail, est la valorisation des sables locaux dans la formulation de béton. Trois types de sable algérien ont été utilisés, un sable concassé résultant du concassage de roche d'une pétrographie calcaire massif, proviennent de la carrière de KEDARA, d'un coût de revient élevé, et deux types de sable de dune Algérien disponibles en grandes quantités dans le marché, le 1^{er} est un sable fin de la région de Oued-Souf, et le 2^{ème} c'est un sable très fin de la région de Boussaâda.

Ce mémoire est composé de deux chapitres.

Le premier chapitre, est consacré à une étude bibliographique détaillée sur le matériau béton et ces constituants, ainsi que les sables et leurs origines.

Le deuxième chapitre, est consacré à l'étude expérimentale et subdivisé en deux parties :

- La première partie, décrit la caractérisation des matériaux utilisés pour la confection des bétons dans le cadre de ce travail, en présentant leurs propriétés physiques, chimiques et mécaniques. La méthode de formulation, ainsi que les compositions retenues pour les différents bétons étudiés.
- La deuxième partie, décrit les résultats obtenus et leurs interprétations, à partir de nombreux essais expérimentaux, à l'état frais et à l'état durci sur les différentes formulations du béton.

Finalement, on clôtura notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Etude

Bibliographique

I.1. GENERALITE SUR LE BETON

1.1. INTRODUCTION

Le béton est un matériau hétérogène multiphasique poreux dont les constituants présentent des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques différentes. Il est constitué d'un mélange de granulats et d'une pâte (ciment, d'eau et éventuellement d'ajouts).

Les granulats sont des matériaux inertes qui, agglomérés par un liant, constituent le squelette du béton, lui confèrent sa compacité, participent à sa résistance mécanique et atténuent les variations volumiques lors du durcissement.

La pâte de ciment est le siège des réactions d'hydratation des constituants qui conduisent aux processus de prise et de durcissement et la transforment en matrice liante.

Les adjuvants fournissent aux formulations de béton une gamme étendue, variée et nuancée de possibilités pour faciliter la mise en œuvre des bétons, adapter leur fabrication au temps froid ou au temps chaud, réduire les coûts de mise en œuvre, améliorer les propriétés du béton durci, voire même lui conférer des propriétés nouvelles.

1.2. HISTOIRE DU BETON

Histoire du béton montre que sa technique, bien fixée empiriquement par les Romains, avec la chaux grasse et la pouzzolane, a évolué seulement au 19^{ème} siècle, après l'apparition des chaux hydrauliques et des ciments.

L'invention de la chaux hydraulique par Louis Vicat en 1817, celle du ciment portland par Aspdin en Ecosse en 1824 et l'installation des premiers fours par Pavin de Lafarge au Teil en France en 1830 préparent l'avènement du béton [1].

A l'origine, le béton était constitué d'un mélange de trois matériaux : le ciment, les granulats et l'eau. Dans la plupart des cas, le ciment était du ciment Portland obtenu par mélange homogène d'argile et de calcaire, ou d'autres matériaux contenant de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer, cuit à la température de linéarisation puis broyé. Par la suite, de petites quantités d'adjuvants chimiques ont été ajoutées au mélange afin d'améliorer certaines des propriétés du béton à l'état frais ou durci.

Au 20^{ème} siècle, le béton se développa considérablement avec l'évolution de ses techniques : usage croissant des adjuvants, béton prêt à l'emploi, matériel de mise en œuvre.

Dans les années quatre -vingt et quatre-vingt-dix du siècle dernier, les études relatives aux bétons à hautes performances ont montré le rôle de l'excès d'eau dans les bétons. La réduction

de cette quantité d'eau par l'emploi de défloculants, a conduit aux gains de résistance allant jusqu'à 200 MPA et à une excellente durabilité.

De nos jours, l'étendue des exigences possibles a augmenté de façon spectaculaire. Par exemple l'affaissement au cône d'Abrams varie de 0 pour les bétons fermes à plus pour les bétons autoplaçants, qui sont caractérisés ailleurs par des étalements. De même, les résistances en compression à 28 jours peuvent varier de l'ordre de 10 MPA pour certains bétons de masse, à des valeurs très élevées, supérieures à 200 MPA.

1.3 LES COMPOSANTS D'UN BETON

Le béton est un mélange de plusieurs composants : ciment, eau, sable, gravier et, le plus souvent, adjuvants (figure I.1) qui constituent un ensemble homogène. Les composants sont très différents : leurs masses volumiques vont, dans les bétons courants, de 1 (eau) à 3 (ciment) t/m³ ; les dimensions de leurs grains s'échelonnent de 0.5 µm (grains les plus fins du ciment) à 25 mm (gravillons). Mais cette liste s'allonge très vite dès que des propriétés particulières sont visées, on utilise alors des fines complémentaires ou additions minérales [2].

constituants	Volume (%)	Poids (%)
Granulats	60-78	65-85
Ciment	7-14	9-18
Eau	14-22	5-9
Air	1-6	-



Figure I.1: Constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un Béton ordinaire [3].

La confection d'un béton approprié à sa destination consiste, à déterminer et à optimiser la composition granulaire et le dosage des divers constituants.

Dans les bétons les plus simples, le squelette granulaire est composé de deux coupures seulement, un sable et un gravier. Le ciment et l'eau de gâchage, dont les proportions relatives en masse sont fixées par le rapport E/C, vont former, avec les adjuvants éventuels, la pâte de ciment qui constituera le liant du béton. Ce rapport E/C joue un rôle primordial durant les étapes de vie du béton, l'eau en excès le rend plus fluide à l'état frais mais diminue les résistances du béton durci. Des additions minérales (cendres volantes, fumées de silice,

laitiers, fillers,..) peuvent être rajoutées dans le but de modifier les propriétés du béton. L'utilisation de ces éléments fins est toujours combinée à l'emploi de superplastifiants pouvant réduire ainsi la quantité d'eau nécessaire à l'atteinte d'une fluidité suffisante. Le béton est donc un matériau hétérogène dont les constituants présentent des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques différentes et dans lequel chacun de ces composants joue un rôle bien précis dans le mélange [3].

1.3.1. CIMENT

1.3.1.1. Définition

C'est un liant minéral obtenu par décarbonatation d'un calcaire et décomposition d'une argile à une température avoisinant, les 1450 °C .Broyés sous forme d'une poudre fine souvent d'une couleur grise, en contact avec l'eau forment des minéraux hydratés très stables.

Les travaux effectués [4] ont montré que les principaux composés du ciment portland sont :

- Le Silicate Tricalcique (Alite) : $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S).
- Le Silicate Bicalcique (Belite) : $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S).
- L'Aluminate Tricalcique : $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A).
- L'Alumino-Ferrite Tétracalcique : $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF).

Et d'autres éléments tels que les sulfates, les alcalins ... etc.

La pâte du ciment est le constituant à l'origine de la cohésion du béton, elle représente 20% à 50% du volume total, se caractérise par sa capacité à s'hydrater et à former une matrice solide qui lie les granulats entre eux.

La pâte du ciment se constitue du ciment anhydre, d'eau et d'éventuels adjuvants additifs [5]. Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium. Dans les ciments, les aluminates peuvent également intervenir dans le processus de durcissement. La somme des proportions de l'oxyde de calcium (CaO) et du dioxyde de silicium (SiO_2) réactifs doit être d'au moins 50 % en masse.

1.3.1.2. Classification des ciments

- **Classification suivant la composition**

La norme européenne [6] donne 27 ciments courants, qui sont regroupés en cinq principaux types à savoir :

- CEM I : Ciment Portland Artificiel.
- CEM II : Ciment Portland Composé.
- CEM III : Ciment de Haut Fourneau.
- CEM IV : Ciment Pouzzolanique.
- CEM V : Ciment aux Laitiers et aux Cendres.

Ces ciments sont différents par le type d'ajout, on trouve :

► **Laitier Granulé De Haut Fourneau** : Obtenu par refroidissement rapide du laitier fondu provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau ; il contient au moins deux tiers en masse de laitier vitreuse et présente des propriétés hydrauliques, après avoir subi une activation convenable.

► **Matériaux Pouzzolaniques** : Sont des substances naturelles ou artificielles siliceuses ou silico alumineuses, ou une combinaison de celles – ci contenant de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) et d'autres oxydes mais la teneur en (SiO_2) réactif doit être au moins égale à 25 % en masse.

► **Cendres Volantes** : produits pulvérulents de grande finesse proviennent du dépoussiérage des gaz des chaudières des centrales thermiques. On distingue deux familles [7] :

- ✓ **Cendres Volantes Siliceuses** : Sont principalement des particules sphériques ayant des propriétés pouzzolaniques, constituées essentiellement de silice (SiO_2) et d'alumine (Al_2O_3)
- ✓ **Cendres Volantes Calcique** : Présentent des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolanique, contenant une teneur en oxyde de calcium (CaO) réactif >10% en masse, le reste était de la silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3), d'oxyde de fer (Fe_2O_3).

► **Filler Calcaire** : est un matériau très finement broyé, il a pour rôle de remplir les vides entre les sables et les graviers, tout en présentant une certaine activité physico- chimique en favorisant l'hydratation des silicates tricalciques [8].

► **Fumée De Silice** : provient de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours. Elle est formée de particules sphériques contenant au moins 85 % en masse en silice amorphe [9].

- **Classification suivant les résistances à la compression**

La norme européenne [10] classes les ciments courant d'après leur résistance à la compression voir (Tableau I.1)

Tableau I.1: Résistance à la compression des ciments [10].

Classe de résistance	Résistance à la compression (MPa)			
	Résistance à court terme		Résistance courante	
	2 jours	7 jours	28 jours	
23.5N	-	≥ 16.0	≥ 32.5	≤ 52.5
32.5R	≥ 10.0	—	≥ 42.5	≤ 62.5
42.5 N	≥ 10.0	—	≥ 52.5	—
42.5 R	≥ 20.0	—		
52.5 N	≥ 20.0	—		
52.5 R	≥ 30.0	—		

1.3.2. L'EAU DE GACHAGE

L'eau est 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. L'aspect fondamental du dosage en eau reste celui de la recherche d'un optimum sur un objectif contradictoire : une meilleure résistance obtenue en réduisant la quantité d'eau et une amélioration de l'ouvrabilité en augmentant la teneur en eau. C'est lors de la recherche de cet optimum que les adjuvants peuvent jouer un rôle [3].

Le rapport E/C est un critère important des études de béton ; c'est un paramètre essentiel de l'ouvrabilité du béton et de ces performances : résistance à la compression, durabilité.

Toutes les eaux ne peuvent pas être utilisées pour gâcher le béton. Certes, l'eau potable distribuée par le réseau du service public est toujours utilisable mais, de plus en plus souvent, nous sommes placés devant la nécessité d'utiliser une eau non potable. La norme [11], a permis de préciser à quelles conditions une eau est utilisable.

1.3.3. ADDITIONS MINERALES

Différentes additions peuvent être mélangées au ciment pour modifier les propriétés du béton frais et durci [12]. Les principales sont les fillers calcaires, la fumée de silice, la pouzzolane naturelle le laitier de haut fourneau et les cendres volantes. Ces additions minérales confèrent

aux bétons frais de meilleures qualités de maniabilité, augmenter la cohésion et entraînent une diminution du ressuage et de la ségrégation du béton [13]. D'un autre côté, les additions minérales améliorent aussi l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques [14].

1.3.4. GRANULAIRE

1.3.4.1. Définition

La plupart des définitions relatives aux granulats sont empruntées du texte de la norme [15]. Un granulat est un ensemble de grains compris entre 0 et 125 mm, ci des matériaux pierreux de petites dimensions, produits par l'érosion ou le broyage mécanique (concassage) des roches. Ce sont des matériaux inertes entrant dans la composition des bétons et mortiers. Ils constituent le squelette du béton et ils représentent, environ 80 % du poids total du béton. Ils sont constitués de sables (Gros et Fin) et de gravier. Cependant, les granulats doivent satisfaire à certaines exigences de qualité pour qu'ils soient utilisés dans le béton. Il y a deux Intérêts d'utiliser des granulats dans le béton :

Le 1^{er} économique : Diminution de la quantité de liant (ciment et addition) ;

Le 2^{ème} technique : Limitent les variations dimensionnelles dans le béton
(les granulats sont plus rigides que la pâte de ciment) [16].

1.3.4.2. Différents types de granulats

Les granulats utilisés pour le béton sont d'origine naturelle, artificielle :

- Naturels : lorsqu'ils sont issus de roches meubles ou massives et qu'ils subissent aucun traitement autre que mécanique (réduction de dimensions) ;
- Artificiels : lorsqu'ils proviennent de la transformation à la fois thermique et mécanique de roches ou de minerais.

A. Granulats naturels courants

Ils n'ont subi que des opérations de transformation de type mécanique: concassage, criblage, lavage...

On les distingue selon leur origine :

A.1. Origine minéralogique

Parmi les granulats naturels, les plus utilisés pour le béton proviennent de roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques telles que les quartzs et quartzites, ou de roches éruptives telles que les basaltes, les granites, les porphyres.

A.2. Origine « d'extraction »

Indépendamment de leur origine minéralogique, on classe les granulats en deux catégories:

- ❖ **Les granulats alluvionnaires, dits roulés** : dont la forme a été acquise par l'érosion. Ces granulats sont lavés pour éliminer les particules argileuses, nuisibles à la résistance du béton et cribléton et criblés pour obtenir différentes classes de dimension. Bien qu'on puisse trouver différentes roches selon la région d'origine, les granulats utilisés pour le béton sont le plus souvent siliceux, calcaires ou silico-calcaires [16].

Trois catégories de granulats roulés existent dans la nature :

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



Figure I.2 : Exemple des granulats alluvionnaires naturels [16].

- ❖ **Les granulats concassés (de carrière)** : sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. Une phase de pré-criblage est indispensable à l'obtention de granulats propres. Différentes phases de concassage aboutissent à l'obtention des classes granulaires souhaitées. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent d'un grand nombre de paramètres: origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage [17].



Figure I.3 : Exemple des granulats de carrière.

Ce type de granulats prouve une très bonne liaison avec la pâte de ciment à cause de leur texture de surface et leur rugosité. D'autre part ils nécessitent plus d'eau pour une maniabilité donnée et ceci est due à leurs angularités et donc à leurs surfaces spécifiques étendues [18].

B. Les granulats artificiels

On distingue :

B.1. Sous-produits industriels, concassés ou non

Les plus employés sont le laitier cristallisé concassé et le laitier granulé de haut fourneau obtenus par refroidissement à l'eau.

La masse volumique apparente est supérieure à 1250 kg/m^3 pour le laitier cristallisé concassé, 800 kg/m^3 pour le granulé [19].

B.2. Granulats à hautes caractéristiques élaborés industriellement

Il s'agit de granulats élaborés spécialement pour répondre à certains emplois, notamment granulats très durs pour renforcer la résistance à l'usure de dallages industriels, ou granulats réfractaires [19].

B.3. Granulats allégés par expansion ou frittage

Ces granulats [19], très utilisés dans de nombreux pays comme l'URSS ou les Etats- Unis, n'ont pas eu en France le même développement, bien qu'ils aient des caractéristiques de résistance, d'isolation et de poids très intéressants. Les plus usuels sont l'argile ou le schiste expansé et le laitier expansé. D'une masse volumique variable entre 400 et 800 kg/m^3 selon le

type et la granularité, ils permettent de réaliser aussi bien des bétons de structure que des bétons présentant une bonne isolation thermique. Les grains de poids intéressants puisque les bétons réalisés ont une masse volumique comprise entre 1200 et 2000 kg/m³.

B.4. Les granulats très légers :

Ils sont d'origine aussi bien végétale et organique que minérale (bois, polystyrène expansé). Très légers (20 à 100 kg/m³), ils permettent de réaliser des bétons de masse volumique comprise entre 300 et 600 kg/m³. On voit donc leur intérêt pour les bétons d'isolation, mais également pour la réalisation d'éléments légers : blocs coffrants, blocs de remplissage, dalles, ou rechargements sur planchers peu résistants [20].

1.3.4.3. Caractéristiques principales des granulats

Les granulats utilisés dans la construction doivent répondre à des impératifs de qualité et à des caractéristiques propres à chaque usage. Les propriétés des granulats sont liées aux caractéristiques intrinsèques des roches originales et aux caractéristiques de fabrication.

Le prélèvement d'un échantillon pour les caractérisations des granulats doit se faire conformément aux normes [21,22] relatives au prélèvement par "échantillonneur" ou par "quartage".

A. Caractéristiques géométriques

A.1. Classe granulaire

Les granulats sont classés en fonction de leurs grosseurs déterminées par criblage sur les tamis à mailles dont la dimension intérieure est exprimée en millimètres (mm) [23].

Le terme granulat d/D est réservé aux granulats dont les dimensions s'étalent de d pour les petits éléments à D pour les gros éléments. La norme expérimentale [24] précise les appellations des différentes classes granulaires avec leurs caractéristiques dimensionnelles.

La norme [24] distingue quatre familles de granulats: les fillers, les sablons, les sables et les gravillons, et également quatre catégories pour les granulats naturels A, B, C et D [23].

- ✓ Filler 0/D pour D < 2 mm et ayant au moins 70 % de grains passant au tamis de 0,63 mm ;
- ✓ Sablon 0/D pour D < 1 mm et ayant au moins 70 % de grains passant au tamis de 0,63 mm ;
- ✓ Sable 0/D lorsque D est tel que : 1 mm < D ≤ 6,33 mm ;
- ✓ Graves 0/D lorsque D > 6,3 mm ;

- ✓ Gravillons d/D lorsque $d \geq 1 \text{ mm}$ et $D \leq 125 \text{ mm}$;
- ✓ Ballast d/D lorsque $d \geq 25 \text{ mm}$ et $D \leq 50 \text{ mm}$.

la classe des granulats est définie par tamisage au travers d'une série de tamis dont les mailles ont les dimensions suivantes en (mm) : [23]

0.063 ; 0.08 ; 0.100 ; 0.125 ; 0.160 ; 0.200 ; 0.250 ; 0.315 ; 0.40 ; 0.50 ; 0.63 ; 0.80 ; 1.00 ;
1.25 ; 1.60 ; 2.00 ; 2.50 ; 3.15 ; 4.00 ; 5.00 ; 6.30 ; 8.00 ; 10.00 ; 12.50 ; 16.00 ; 20.00 ; 25.00 ;
31.50 ; 40.00 ; 50.00 ; 63.00 ; 80.00 ; 100.00 ; 125.00.

A.2. Granulométrie :

L'analyse granulométrique est régie par les normes [25,26]. Les granulats sont désignés par d et D, ou d et D représentent la plus petite et la plus grande des dimensions demandées [27].

L'analyse granulométrique consiste à fractionner le matériau en différentes coupures au moyen de tamis [28]. Les masses des différents refus sont rapportées à la masse initiale sèche du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe granulométrique) [27]. Une bonne continuité de la courbe granulométrique est nécessaire pour obtenir un béton maniable [23].

Les tamis sont définis par la norme [26]. Les ouvertures de mailles permettent un classement granulaire. Les dimensions successives des mailles suivent des progressions géométriques [27] :

$$\begin{aligned} \text{De } \sqrt[10]{10} &\approx 1.25 \text{ pour l'ancienne série française} \\ \text{De } 10^{1/20} &\approx 1.25 \text{ pour la nouvelle série européenne} \end{aligned}$$

- ✓ Le module d'un tamis dans le cas de l'ancienne série française, est le produit par 10 du logarithme décimal de l'ouverture exprimée en micron augmentée d'une unité.
- ✓ Le tamisage est l'opération qui consiste à séparer un matériau en différentes fractions au moyen d'une série de tamis de caractéristique connues [27].



Figure I.4 : série des tamis pour la granulométrie.

- ✓ En appelle tamisat la partie des granulats qui est passée à travers le tamis et refus la partie qui est restée sur le tamis [27].



Figure I.5: L'analyse granulométrique par tamisage.

- ✓ La courbe granulométrique donne les pourcentages cumulés en masse, de grains passant dans les tamis successifs.
On trace la courbe granulométrique sur un graphique comptant en ordonnée le pourcentage des tamisats sous les tamis dont les mailles D sont une progression géométrique de raison [23].

La figure suivant montre des exemples de fuseaux granulaires à l'intérieur desquels doivent se trouver les fuseaux de fabrication de granulats.

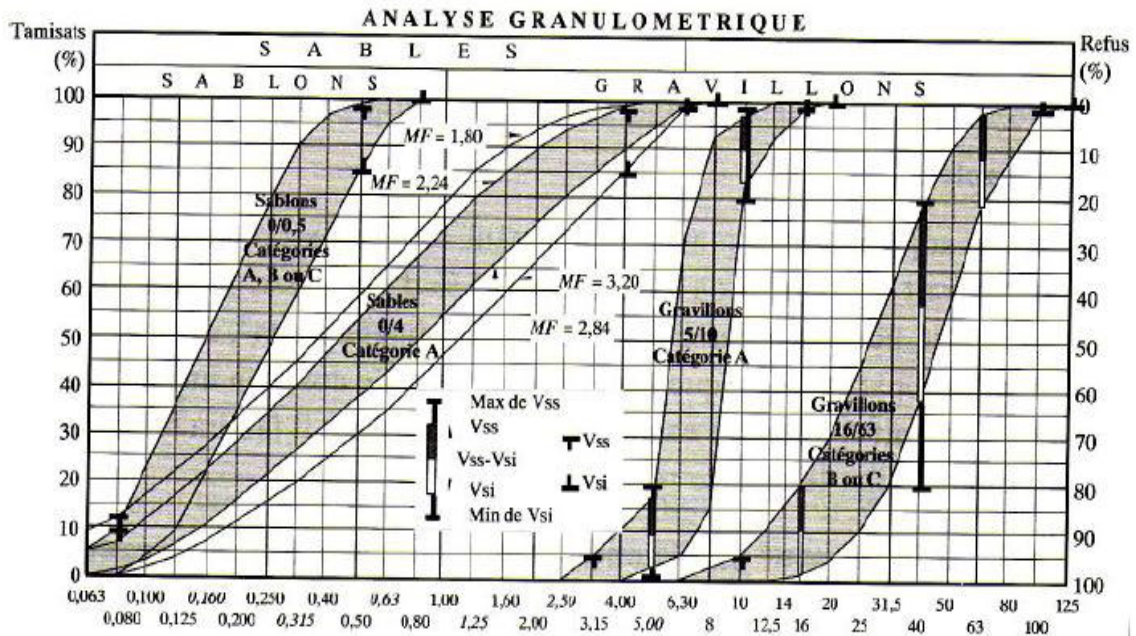


Figure I.6 : Exemple de courbe granulaire des granulats pour béton [23].

A.3. Module de finesse d'un sable (Mf):

Le module de finesse est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments des fins dans un granulat. Le module de finesse est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis [29]. Le Tableau I.2 présente la série des tamis employés pour la caractérisation du module de finesse selon la norme prise en compte [23, 27].

Le Module de finesse d'un sable donne par la formule suivant :

$$MF = \sum \text{Refus cumulés en \% des tamis}$$

Tableau I.2 : Séries de tamis employés pour la détermination du module de finesse du sable.

01 Tamis	0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 et 5 mm	[29]
02 Tamis	0,125 - 0,25 - 0,5 - 1 - 2 et 4 mm	[30]

Des recherches sur l'influence de la finesse des sables sur les diverses qualités du béton ont conduit à délimiter certains fuseaux de granularités admissibles.

- La partie central A ($2.2 < MF < 2.8$) convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limité [23].
- La partie central B ($1.8 < MF < 2.2$) est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance [23].
- La partie central C ($2.8 < MF < 3.2$) correspond à des sables à utiliser pour la recherche de résistance élevées, mais on aura, en général, une moins bonne ouvrabilité et des risques de ségrégation [23].

Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse d'environ 2.2 à 2.8 ; au-dessus, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité [23].

- **La Correction d'un sable**

Il n'est pas rare d'avoir un sable disponible présentant un "Mf" non satisfaisant. Une façon de le rendre convenable consiste à le mélanger à un autre sable de telle sorte que la combinaison des deux "Mf" permette l'obtention du "Mf" escompté. On utilise pour cela la méthode d'ABRAMS. C'est une règle de mélange de granulats basée sur l'obtention d'un module de finesse global à partir de la connaissance des modules de finesse des granulats à mélanger.

On dispose de deux sables "S1" et "S2" de module de finesse respective "Mf₁" et "Mf₂".

On désire obtenir un mélange granulaire "S" de module de finesse "Mf".

Les pourcentages de "S1" et "S2" nécessaires pour obtenir le mélange S sont tels :

$$S1\% = \frac{MF - MF_2}{MF_1 - MF_2} * 100 \qquad S2\% = \frac{MF_1 - MF}{MF_1 - MF_2} * 100$$

A.4. Forme des granulats :

La forme des granulats a une incidence sur la maniabilité du béton, la forme la plus souhaitable se rapprochant de la sphère ; une mauvaise forme (aiguilles, plats) nécessite une quantité d'eau plus élevée et peut provoquer des défauts d'aspect [23].

La forme d'un élément granulométrique est définie par ses trois caractéristiques dimensionnelles principales, voir la figure (I.7) :

- ✓ Sa longueur L ;
- ✓ Son épaisseur E qui est le plus petit ; écartement d'un couple de plans tangents parallèles ;
- ✓ Sa grosseur G.

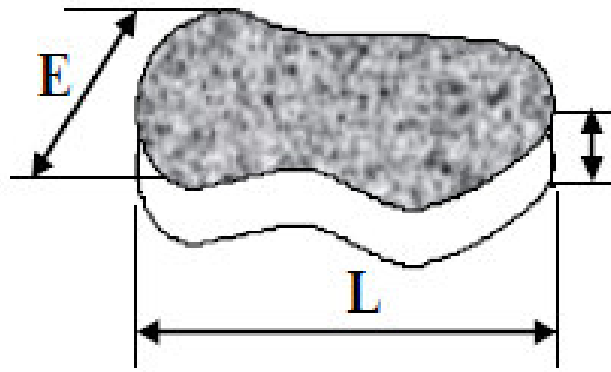


Figure I.7 : forme d'un granulats [19].

A.5. Le coefficient d'aplatissement (A)

Le coefficient d'aplatissement caractérise donc la forme des granulats à partir de leur plus grande dimension et de leur épaisseur est par définition le pourcentage d'éléments tels que $G/E > 1.58$, [23]. (G représentant en fait la dimension de la maille carrée minimale au travers de laquelle passe l'élément). Le coefficient A est déterminé selon la norme [31] par un double tamisage. Puis par un second tamisage des refus retenus sur les différents tamis sur une série de grilles à fentes parallèles, le rapport entre les dimensions des tamis et des grilles étant de 1.58. L'ancienne norme [P 18 541] spécifiait que la valeur du coefficient d'aplatissement doit être $A \leq 30 \%$ [23].

- ❖ La forme des granulats influence: La facilité de mise en œuvre et le compactage du béton et La compacité du mélange, donc le volume des vides à remplir par la pâte de ciment.
- ❖ L'état de surface des grains influence: La compacité du mélange et l'adhérence du granulats à la pâte de ciment et La forme est d'autant meilleure qu'elle est proche d'une sphère ou d'un cube.

B. Caractéristiques physiques

B.1. La Masse Volumique Apparente (en vrac)

La masse volumique en vrac doit être déclarée et déterminée conformément à la norme européenne [32]. La masse sèche des granulats remplissant un conteneur spécifié est déterminée par pesage et la masse volumique en vrac correspondante est calculée. Le pourcentage de porosité inter granulaire se calcule à partir de la masse volumique en vrac et de la masse volumique réelle.

La Masse Volumique Apparente donne par la formule suivant :

$$M_{v_{app}} = \frac{M_2 - M_1}{V}$$

L'essai de La Masse Volumique Apparente doit être réalisé selon la norme [32].



Figure I.8 : détermination de la masse volumique apparente.

B.2. La Masse Volumique Absolue :

La masse volumique Absolue doit être déclarée et déterminée conformément à la norme européenne [33]. La Masse Volumique Absolue donne par la formule suivant :

$$M_{v_{abs}} = \frac{M}{V_2 - V_1}$$

L'essai de La Masse Volumique Absolue doit être réalisé selon la norme [33].

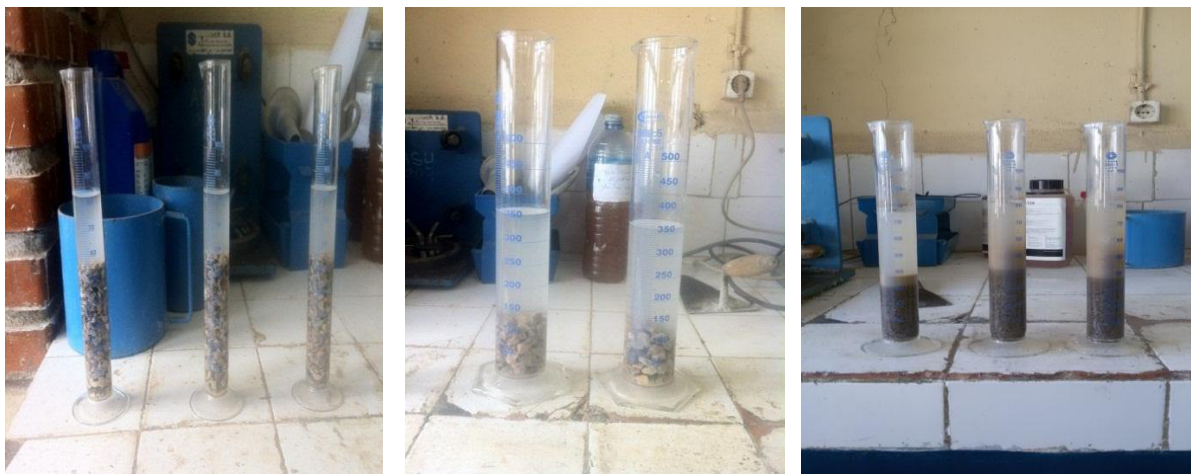


Figure I.9 : détermination de la masse volumique absolue.

B.3. Propreté des granulats :

La qualité des granulats utilisés dans les bétons est un facteur très important. Trois grandes catégories d'impuretés peuvent être rencontrées dans les granulats: matières organiques, les argiles et les matériaux fins (issues du concassage ou du broyage des roches). Leur présence à la surface des granulats interférant avec le processus d'hydratation du ciment et empêche la bonne adhérence granulats-liants, entraînant ainsi une chute des résistances mécaniques et des variations de propriétés rhéologiques des mélanges. De telles impuretés semblent être plus courantes dans les sables que dans les gros granulats, plus facilement lavés [18].

B.3.1. Pour les cailloux et gravillons : c'est le pourcentage de passant au tamis de 0,5 mm ; le seuil est fixé à 2 % et 5 % pour des granulats concassés [16].

B.3.2. Pour un sable : la propreté est définie par l'essai d'équivalent de sable et l'essai au bleu de méthylène [16].

- **Equivalent de sable (ES)**

L'équivalent de sable est un rapport conventionnel volumétrique multiplié par 100 entre les éléments dits sableux et les éléments plus fins. Il existe deux types de mesures en fonction du degré d'argilosité du matériau : l'essai visuel et l'essai au piston [27, 28]

Actuellement, trois textes réglementaires décrivent cet essai :

- ✓ équivalent de sable [34] ;
- ✓ équivalent de sable à 10% de fines [35] ;
- ✓ évaluation des fines - équivalent de sable [36].

L'équivalent de sable est un rapport conventionnel volumique entre les grains fins et les autres. Il permet donc de caractériser l'importance des fines par une valeur numérique [27].

Cet essai rend compte globalement de la quantité des éléments les plus fins contenus dans les granulats, en exprimant un rapport conventionnel volumique entre les éléments dits sableux et les éléments plus fins (ex argile). Les éléments sableux, éléments grenus et non floculables qui sédimentent dans le fond de l'éprouvette. Les éléments fins, éléments formant le floculat, qui restent en suspension dans la solution [27].

Plus l'équivalent de sable est élevé, moins le matériau contient d'éléments fins nuisibles. Il s'applique assez bien aux sols faiblement plastiques et peut s'appliquer à tous les matériaux grenus. Il s'effectue sur les fractions inférieures à 5 mm [23].

L'équivalent de sable donne par la formule suivant :

$$ES = \frac{H_2}{H_1} \quad \text{Essai au piston}$$

$$ES = \frac{H_2}{H_1} \quad \text{Essai visuel}$$

L'essai de L'équivalent de sable doit être réalisé selon la norme [34].



Figure I.10 : L'essai au piston de l'équivalent de sable.

Tableau I.3 : Valeurs préconisées pour l'équivalent de sable par G. DREUX [23].

PS	Nature et qualité du sable
< 60	Sable argileux risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité.
$60 \leq PS < 70$	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour béton de qualité quand on ne craint pas particulièrement de retrait.
$70 \leq PS < 80$	Sable propre à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
$PS > 80$	Sable très propre l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

- **Essai au bleu de méthylène**

Cet essai permet contrairement à l'ES de faire la distinction entre les différents types d'argile contenus dans un sable. Le bleu de méthylène étant absorbé préférentiellement par les argiles du type Montmorillonites (argiles gonflantes et les matières organiques. Les autres argiles (kaolinites) sont peu sensibles au bleu [27].

L'essai au bleu de méthylène est pratiqué selon la norme [37] sur la fraction granulaire (0/2 mm) des sables courants (**V_B**) ou sur les fillers (0/0,125 mm) contenus dans une sable filerie, un gravillon ou un tout venant (**V_{BF}**) [27]. La valeur limite selon les spécifications pour les bétons hydraulique est égale à 01 [23].

L'essai de bleu de méthylène doit être réalisé selon la norme [37].



Figure I.11 : Appareil pour détermine la valeur de bleu méthylène.

C. Caractéristiques mécaniques (résistance à l'usure et aux chocs)

Ce sont des essais importants pour les granulats routiers. En effet, le passage répété de véhicules conduit à émousser, à polir progressivement les granulats et ainsi à diminuer l'adhérence des pneumatiques sur la chaussée. Ces caractéristiques permettent également d'estimer la qualité des granulats utilisés dans la confection de bétons.

C.1. Essai Micro Deval

Cet essai permet de mesure la résistance à l'usure par frottements entre les granulats et une charge abrasive. Il consiste à mesurer la quantité d'élément inférieur à 1.6 mm produite dans un broyeur, dans des conditions bien définies, à sec ou en présence d'eau. Plus le coefficient

micro-Deval est élevé, meilleur est le matériau [27]. Selon les normes [38,39], doit être 35% pour les granulats naturels. Le coefficient micro-Deval (M_{DE}) donne par la formule :

$$M_{DE} = \frac{m}{M} \times 100$$

L'essai Micro Deval doit être réalisé selon la norme [39].



Figure I.12 : Machine D'essai Micro Deval.

C.2. Essai Los Angeles

Cet essai permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat. Il consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produite en soumettant le matériau à une série de chocs et de frottement dans la machine Los Angeles (LA). À un coefficient Los Angeles faible correspond un excellent matériau [27]. Selon les normes [40,41] Le coefficient Los Angeles doit être ≤ 40 pour les granulats naturels type B.

Le coefficient Los Angeles (**LA**) donne par la formule :

$$LA = \frac{m}{M} \times 100$$

L'essai Essai Los Angeles doit être réalisé selon la norme [41].



Figure I.13 : Machine D'essai Los Angeles.

1.3.5. ADJUVANTS

1.3.5.1. Définition

Les adjuvants sont des produits chimiques qui, incorporés dans les bétons lors de leur malaxage ou avant leur mise en œuvre à des doses inférieures à 5% du poids de ciment, provoquent des modifications des propriétés ou du comportement de ceux-ci [42].

Un adjuvant n'est pas un palliatif. Il n'a pas pour mission ni pour effet de faire un bon béton à partir d'un mauvais dosage ou d'une mise en œuvre défectueuse. Ce n'est pas un produit capable de se substituer aux règles de la bonne technique [23].

1.3.5.2. Classification des adjuvants

La norme [43] classe les adjuvants pour bétons, mortiers et coulis, suivant leur fonction principale. On peut distinguer trois grandes catégories d'adjuvants :

A. Les adjuvants modifiant l'ouvrabilité du béton : Ces adjuvants modifient le comportement rhéologique des bétons, mortiers et coulis à l'état frais, avant le début de prise. Ils abaissent le seuil de cisaillement de la pâte et en modifient la viscosité [44].

- **Plastifiants - Réducteurs d'eau :** Ce sont des produits qui, sans modifier la consistance, permettent de réduire la teneur en eau du béton donné, ou qui, sans modifier la teneur en eau, en augmentent l'affaissement (ou l'étalement), ou qui produisent les deux effets à la fois [45].
- **Superplastifiants - Haut réducteurs d'eau :** Ce sont des produits qui, sans modifier la consistance, permettent de réduire fortement la teneur en eau du béton donné, ou qui, sans modifier la teneur en eau, en augmentent considérablement l'affaissement (ou l'étalement), ou qui produisent les deux effets à la fois [46].

A. Adjuvants modifiant la prise et le durcissement : Ces adjuvants modifient les solubilités des différents constituants des ciments et surtout leur vitesse de dissolution. Leur action se traduit par une évolution différente de la résistance d'un béton, mortier ou coulis adjuvanté comparée à celle du témoin [44]. On peut distinguer deux types d'adjuvants :

- **Accélérateurs de prise et durcissement :** Les premiers diminuent le temps de début de transition du mélange pour passer de l'état plastique à l'état rigide. Ils sont utilisés souvent en préfabrication et les derniers augmentent la vitesse de développement des

résistances initiales du béton, avec ou sans modification du temps de prise. Ils sont préférentiellement utilisés par temps froid.

- **Retardateurs de prise :** Ces adjuvants augmentent le temps de début de transition du mélange, pour passer de l'état plastique à l'état rigide. Ils sont généralement utilisés par temps chaud. [47].

B. Adjuvants modifiant certaines propriétés du béton

On peut distinguer deux types d'adjuvants :

- **Entraîneurs d'air :** Ces adjuvants permettent d'incorporer pendant le malaxage une quantité contrôlée de fines bulles d'air entraîné uniformément réparties et qui subsistent après durcissement. Ils sont utilisés pour protéger les bétons du gel. [48].
- **Hydrofuges de masse :** Ces adjuvants permettent de limiter la pénétration de l'eau dans les pores et les capillaires du béton, sans altérer ses qualités plastiques et esthétiques, [49].

1.3.5.3. Utilisations des différents types des adjuvants :

Tableau I.4 : Différentes utilisations de différents types d'adjuvants [23].

Adjuvants	Utilisation
plastifiants	Béton pour dallages (béton pompé). Béton maigre (blocs manufacturés) Béton très ferrailé.
super plastifiants	Bétons à compacité, et donc durabilité. Bétons à haute performance. Bétons autoplaçants.
accélérateurs	Décoffrage rapide (réduction du temps de prise). Bétonnage par temps froid. Mise du béton hors- gel. En préfabrication : augmentation de la rotation des coffrages. Travaux d'étanchement, travaux à la mer (entre deux marées). Réparations rapides, mises en circulation rapide des routes
Retardateurs	Les bétons mis en place sur de fortes épaisseurs (ouvrages d'art, barrages..). Tout bétonnage par temps chaud. Transports de béton sur de longues distances. Bétons injectés en continu. Mortiers stabilisés utilisables plusieurs jours sur chantier.
entraîneurs d'air	Les barrages, Les routes, Les ponts., Les travaux maritimes. Les travaux en montagne. Les ouvrages exposés au gel et à l'action des eaux agressives.

On distingue essentiellement l'adjuvant haut réducteur d'eau (super plastifiant). Le dosage en adjuvant n'excède pas 5 % de la masse du ciment. Il a pour rôle de maintenir une maniabilité donnée tout en diminuant la quantité d'eau dans le béton. Ils permettent ainsi d'obtenir un béton plus résistant en raison de la réduction de l'eau. A titre indicatif, le super plastifiant permettent de réduire la teneur en eau de 25 à 35 % tout en gardant une même maniabilité [50]. Parmi les super plastifiants les plus connus on citera : les polynaphtalènes sulfonés (PNS), les sulfonâtes de mélamine (MS), les polymères carboxyliques d'éther (PCE).

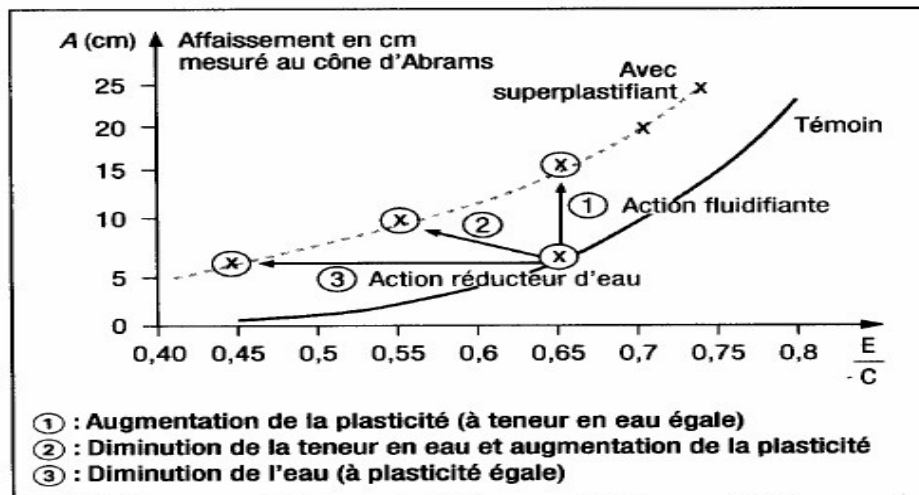


Figure I.14: Les utilisations des super plastifiants, d'après [23].

1.4. DIFFERENTS TYPES DE BETONS

1.4.1. Béton ordinaire

Mélange homogène composé exclusivement des constituants de base ciment, granulat, eau, avec un rapport (E/C) qui varie en fonction de la plasticité ainsi que de la résistance désirée. Le béton ordinaire est caractérisé par sa résistance à la compression qui se situe entre $20 \text{ MPA} \leq f_{c28} \leq 50 \text{ MPA}$ [51].

1.4.2. Béton léger

Les bétons légers comme ayant une masse volumique après séchage 2100 kg/m^3 . Parmi ces bétons on peut citer les bétons de granulats légers. Ils sont utilisés dans le domaine du confort thermique [52].

1.4.3. Béton lourd

C'est un béton dont la masse volumique est supérieure à 2600 kg/m^3 , les résistances mécaniques du béton lourd sont comparables à celles des bétons classiques et même plus élevées compte tenu des faibles dosages en eau [23].

1.4.4. Béton autoplaçant (BAP)

Développé dans les années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo au Japon [53], le béton auto plaçant est un béton fluide, très déformable, homogène et stable qui se met en place par gravitation et sans l'utilisation d'un moyen de vibration.

Il épouse parfaitement les formes des coffrages les plus complexes, il ne doit pas subir de ségrégation et doit présenter des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique [54].

1.4.5. Béton de haute performance (BHP)

Bétons aux résistances mécaniques élevées au jeune âge et à 28 jours (Supérieure à 50 MPA), et un rapport pondéral (E/C) inférieur à 0.4. Leur propriété essentielle est leur grande résistance en compression qui dépasse largement le cas des bétons ordinaires.

Ceci est obtenu grâce à leur faible porosité qui est diminuée en réduisant la quantité d'eau de gâchage par l'emploi d'adjuvants plastifiants et super plastifiants [55].

1.4.6. Béton de fibre

Béton dans lequel sont incorporées des fibres, ce qui permet suivant l'ouvrage de supprimer le treillis soudé traditionnel [56].

1.4.7. Béton a durcissement rapide

Bétons dont le développement des résistances mécaniques est accéléré, ces bétons permettent la réalisation des travaux sur des éléments d'ouvrages demandant une remise en service rapide, ainsi que le décoffrage prématuré ou la mise en précontrainte le plus rapidement en préfabrication [57].

1.5. PROPRIETES ESSENTIELLES D'UN BETON

Le béton doit être considéré sous deux aspects :

- **le béton frais** : mélange de matériaux solides en suspension dans l'eau, se trouve en état foisonné à la sortie des appareils de malaxage et en état compacté après sa mise en œuvre dans son coffrage ;
- **le béton durci** : solide dont les propriétés de résistance mécanique et de durabilité s'acquièrent au cours du déroulement de réactions physico-chimiques

1.5.1. PROPRIETES DU BETON FRAIS

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité qui est la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage complet du ferrailage [58]. L'ouvrabilité doit être telle que le béton soit maniable et qu'il conserve son homogénéité. Elle est caractérisée par une grandeur représentative de la consistance du béton frais. Dans le cas de béton ordinaire elle est principalement influencée par :

- La nature et le dosage du liant.
- La forme des granulats.
- La granularité et la granulométrie.
- Le dosage en eau. [27].

L'ouvrabilité peut s'apprécier de diverses façon et en particulier par des mesures de plasticité. Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité. Nous n'en citerons que quelques-uns, les plus couramment utilisés dans la pratique. [59], [60].

1.5.1.1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est très simple à mettre en œuvre au laboratoire et au niveau des chantiers [61]. Il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40 mm. Il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son poids propre.

Selon la norme NFP 18 -451 l'essai consiste à remplir de béton un moule en tôle tronconique ($D = 20 \text{ cm}$, $d = 10 \text{ cm}$, $h = 30 \text{ cm}$), le remplissage s'effectue en trois couches tassées avec une tige en acier de 16mm de diamètre et dont l'extrémité est arrondie, à raison de 25 coups par couche (figure I.14). On soulève ensuite le moule avec précaution et on mesure l'affaissement.

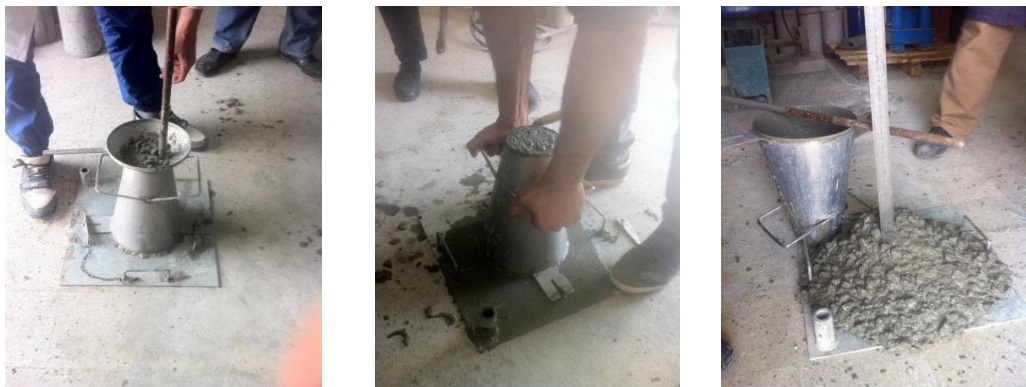


Figure I.15 : Mesure d'affaissement au cône d'Abrams.

Tableau I.5 : classe de consistance (Slump test) [28].

Classe des consistances	Affaissement (cm)	Tolérance (cm)
Ferme	0 à 4	1
Plastique	5 à 9	2
Très plastique	10 à 15	3
Fluide	> 16	

1.5.1.1. La masse volumique du béton frais

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

$$D = \frac{M2 - M1}{V}$$

Où

D : la masse volumique du béton frais, en (kg/m³) ;

M1 : la masse du récipient, en (kg) ;

M2 : la masse du récipient plus la masse de béton contenu dans le récipient, en (kg) ;

V : le volume du récipient, e en kilogrammes (kg) ;

Calcul de la masse volumique doit être réalisé selon la norme [62].



Figure I.15 : Mesure de la masse volumique à l'état frais.

1.5.2. PROPRIETES DU BETON DURCI

Lorsque le béton a durci, sa forme ne peut plus être modifiée mais ses caractéristiques continuent d'évoluer pendant de nombreux mois, voire des années.

- La compacité d'un béton (ou sa faible porosité) est un avantage déterminant pour sa durabilité.
- Une bonne résistance à la compression est la performance souvent recherchée pour le béton durci.
- Les phénomènes de retrait sont une caractéristique prévisible dans l'évolution du béton.
- Les caractéristiques de déformations sous charge du béton sont connues et peuvent être mesurées.

1.5.2.1. Essai de résistance à la compression

La caractéristique essentielle d'un béton à l'état durci est la résistance mécanique en compression à l'âge de 28 jours. Le béton est un matériau qui travaille bien en compression. La connaissance de ses propriétés mécanique est donc indispensable pour le dimensionnement et le calcul des ouvrages.

La résistance à la compression du béton est mesurée par la charge conduisant à l'écrasement par compression axiale d'une éprouvette cylindrique de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur [63] (voir figure I.17). Les éprouvettes sont chargées jusqu'à rupture dans une machine pour essai de compression, La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression calculée.

L'essai d'écrasement doit être réalisé selon les normes [64,65].



Figure I.18: Machine d'essai de compression.



Figure I.17: éprouvettes cylindriques de diamètre 16 cm et de hauteur 32cm.

1.5.2.2. Essai de résistance à la traction

La résistance à la traction est également mesurée sur des éprouvettes 16x32 cm par l'essai de fendage conformément à la norme [66]. La résistance à la traction peut être déterminée par différents essais [23] :

- **Traction par fendage :** (essai brésilien).

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

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

Où :

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

F : est la charge maximale, (N) ;

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

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

L'essai d'écrasement doit être réalisé selon la norme [66].



Figure I.19 : Machine d'essai de Traction par fendage.

- **Traction par flexion**

L'essai consiste à rompre une éprouvette prismatique de dimensions 7 x 7 x 28 (cm) sont soumises à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux

supérieurs et inférieurs. La charge maximale enregistrée au cours de l'essai est notée et la résistance à la flexion est calculée. La résistance en traction par fendage est donnée par l'équation suivante :

$$F_t = \frac{3 F L}{2 b h^2}$$

Où :

F_t : est la résistance en traction par fendage, en (MPa) ou en (N/mm²) ;

F : est la charge maximale, (N) ;

L : écartement entre les appuis, en (mm) ;

b : épaisseur de l'éprouvette, en (mm).

L'essai d'écrasement doit être réalisé selon la norme [67]



Figure I.20 : Machine d'essai de Traction par flexion.

1.5.2.3. Masse volumique du béton durci

Calculer la masse volumique de l'échantillon au moyen des valeurs de masse et de volume précédemment déterminées, à l'aide de la formule suivant :

$$D = \frac{M}{V}$$

Où :

D : est la masse volumique, en (kg/m³), pour un état de l'échantillon et une méthode de détermination du volume données ;

M : est la masse de l'échantillon, en (kg), pour un état de l'échantillon donné ;

V : est le volume de l'échantillon, en (m³), déterminé selon la méthode choisie.

L'essai de la masse volumique doit être réalisé selon la norme [68].



Figure I.21: Mesure de la masse volumique du béton durci.

1.5.2.4. La Porosité

Une caractéristique essentielle du béton durci est sa porosité – rapport du volume des vides au volume total. Les études de Féret avaient déjà établi le lien entre la porosité du béton et sa résistance. L'importance de cette caractéristique sur la résistance du béton aux agents agressifs, sur la carbonatation et sur la tenue au gel a été démontrée depuis. C'est donc un facteur déterminant de la durabilité du béton.

1.5.2.5. Essais non destructif par Auscultation sonique (Ultra Son)

Il s'agit d'évaluer la résistance du béton à partir de la vitesse de propagation d'ondes (voir le tableau I.6). Mesure du temps de propagation de la première impulsion d'un train d'ondes appelées ondes longitudinales, généré par un transducteur (voir la figure I.24), entre deux points déterminés du béton. Ces essais sont rapides et faciles à mettre en œuvre, et consiste à prendre des mesures qui n'endommagent pas les constructions [69]. Consiste à presser les deux têtes sur les faces des l'éprouvettes, donc la surface du béton est bien nettoyée (voir la figure I.22). En utilisant une pâte de contact qui facilite la transmission du son. La vitesse de propagation est donnée par l'équation suivante :

$$V = \frac{L}{t}$$

Où :

V : la vitesse de propagation en (m/s) ;

L : est la distance entre les transducteurs en (m) ;

t : est le temps de propagation en (seconde).

L'essai de la vitesse de propagation doit être réalisé selon la norme [70].

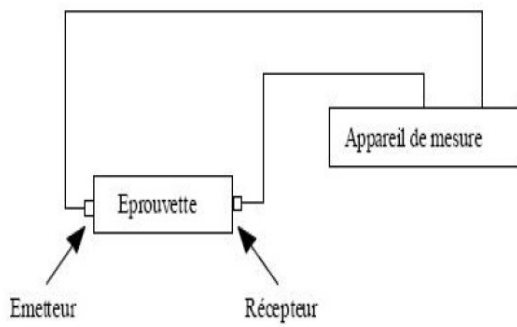


Figure I.21 : principe d'utilisation [69].

Figure I.23 : l'appareille Ultra Son (TICO).

Les résultats obtenus en appliquant la courbe de la RILEM (voir figure I.24) sont donnés dans le cas où le béton testé est considéré connue. Les résistances ne correspondent pas toujours à la résistance réelle du béton in situ.

Tableau I.6 : Classements qualitatifs du béton selon la vitesse de propagation [69].

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

Estimation de la résistance du béton selon RILEM

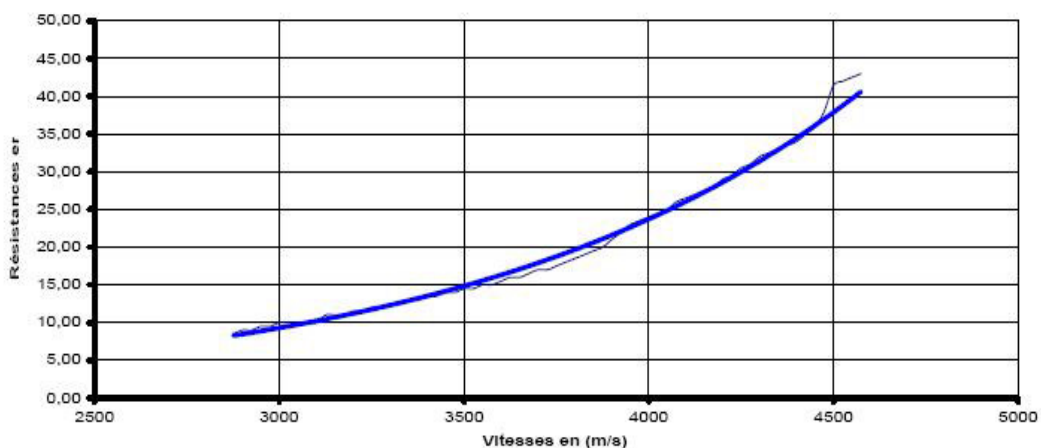


Figure I.24 : Courbe RILEM. [69].

1.6. PARAMETRES QUI INFLUENT SUR LES CARACTERISTIQUES DU BETON

1.6.1. Influence du rapport eau/ciment (E/C)

A part son rôle majeur dans le phénomène de l'hydratation, l'eau est l'un des facteurs les plus importants au niveau de l'ouvrabilité du béton. L'augmentation du dosage en eau augmente la fluidité du béton et entraîne la diminution de la concentration en solides. Au niveau rhéologique, le seuil de cisaillement et la viscosité diminuent [71]. Cependant, l'introduction excessive d'eau provoque la chute de la résistance mécanique du béton à l'état durci, ainsi que l'apparition des phénomènes de ségrégation à l'état frais. Le dosage du ciment est très souvent relié aux propriétés mécaniques du béton et à sa durabilité. On considère aussi que l'écoulement et l'ouvrabilité du béton sont reliés au rapport E/C. La formulation des bétons ordinaires doit impérativement passer par l'optimisation de ces paramètres.

Neville [72], a montré que la courbe qui représente la résistance en fonction du rapport E/C avait l'allure d'une hyperbole. Le même auteur a montré que cette relation ne dépendait ni du type des granulats utilisés ni de l'âge du béton. Ce résultat a aussi été trouvé par Boukli Hacene [3] qui a montré aussi que cette relation dépend très peu du dosage en ciment (figure I.25).

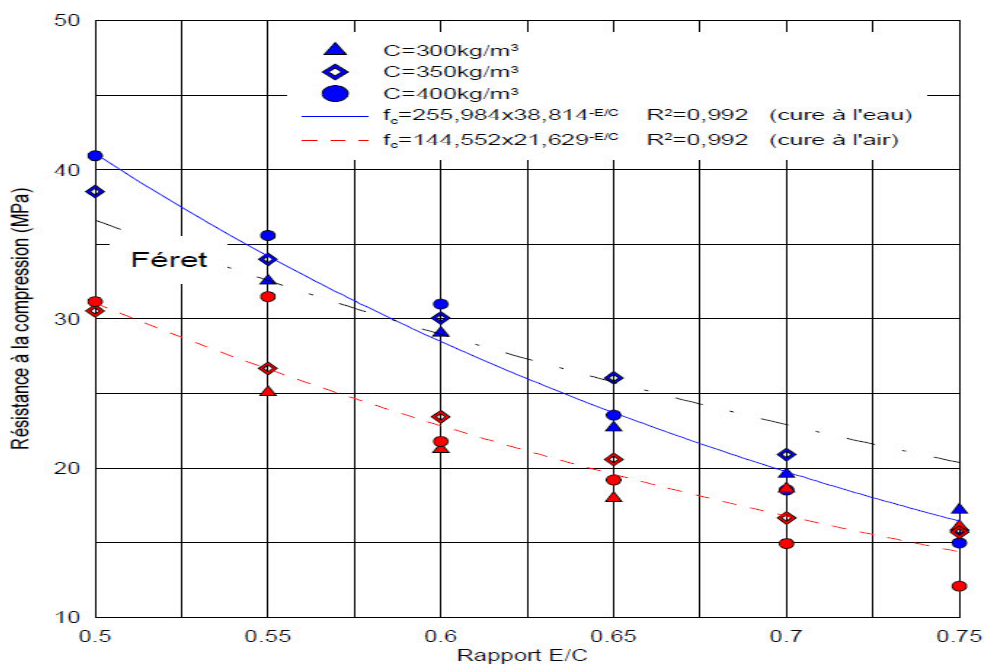


Figure I.25 : Relation entre la résistance à la compression à 28 jours et le rapport eau/ciment [3]

Cependant d'autres auteurs ont montré que la relation était plutôt linéaire pour des valeurs du rapport C/E compris entre 0.4 et 0.85 (figure I.26) [73].

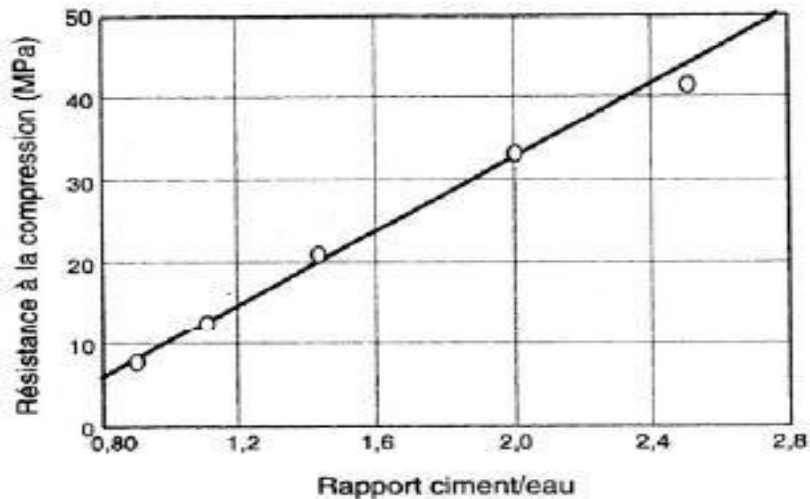


Figure I.26 : Relation entre la résistance à la compression et le rapport C/E [72].

Nielsen [74] a montré que la linéarité de la relation entre la résistance et le rapport (C/E) n'est plus valable pour des rapports C/E supérieurs à 2,6, ce qui correspond à un rapport E/C égale à 0,38. Comme on le voit sur la (figure I.27), pour des rapports C/E supérieurs à 2,6, la relation avec la résistance est quelque peu différente même si elle demeure linéaire.

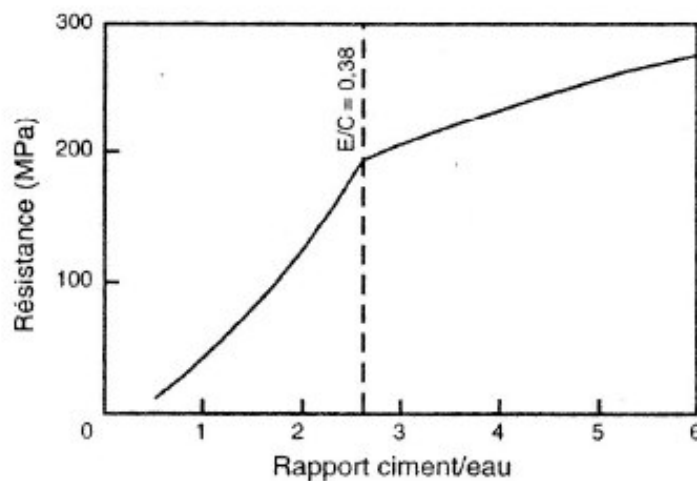


Figure I.27: Relation entre la résistance calculée d'une pate pure de ciment et le rapport C/E [74].

La (figure I.28) montre que la relation entre la résistance à la compression et le rapport C/E d'après la formule de Bolomey est linéaire et croissante surtout dans l'intervalle de C/E entre 1,5 et 2,5 c'est-à-dire entre 0,4 et 0,66 pour E/C.

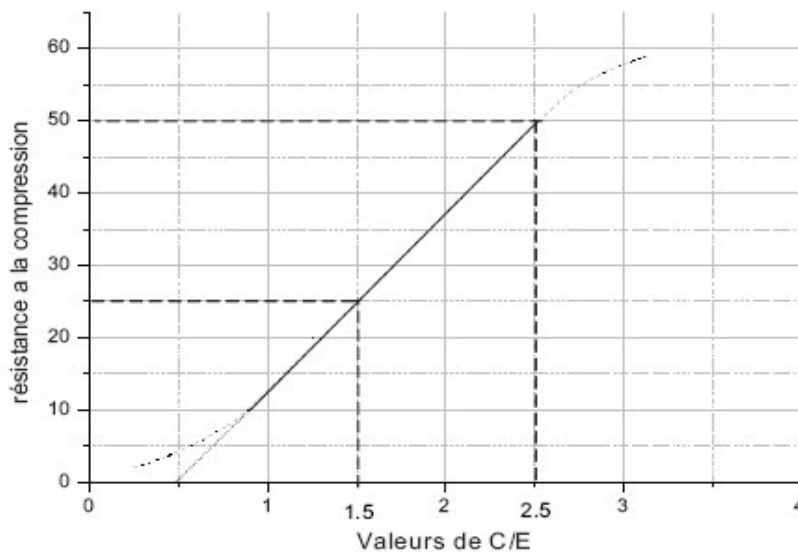


Figure I.28: La relation entre C/E et la résistance à la compression (f_c) d'après la formule de Bolomey [23].

$$F_c = G \times CE (C / E - 0.5)$$

G : coefficient de granularité égale à 0.5.

CE : classe vraie du ciment, égale à 50 MPA.

Le rapport E/C conditionne aussi la porosité de la matrice cimentaire du béton durci, qui est un paramètre qui influe beaucoup sur la durabilité du béton [75].

1.6.2. Influence du dosage en ciment

Pour un dosage en eau constant, l'augmentation du dosage en ciment du béton aura pour conséquence de diminuer le rapport E/C du béton, ce qui se traduira nécessairement par une augmentation de la résistance à court terme [76].

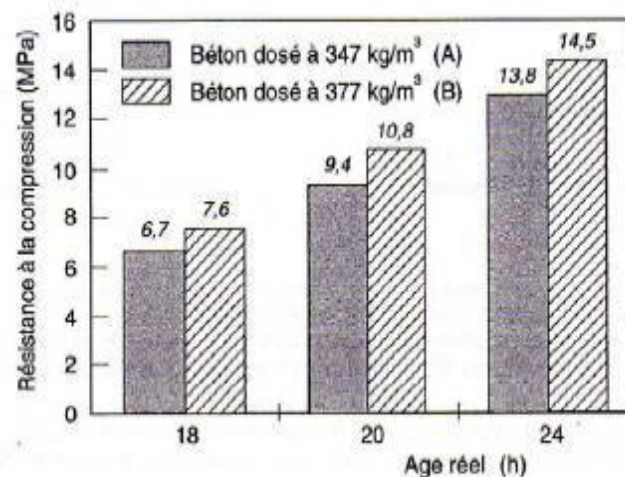


Figure I.29 : Influence du dosage en ciment sur la résistance à la compression au jeune âge du béton [76].

La (figure I.29) montre l'influence du dosage en ciment sur les résistances à court terme et sur le rapport E/C du béton [76].

Nombreux sont les textes réglementaires qui spécifient des dosages minimaux en ciment tel que :

- la norme P 18 011 sur la classification des environnements agressifs qui spécifie les dosages suivants :

$C \geq \frac{500}{\sqrt[5]{D}}$ pour des environnements à moyenne agressivité.

$C \geq \frac{700}{\sqrt[5]{D}}$ pour des environnements à forte et très forte agressivité.

D : Dimension maximale des granulats.

Baron et Ollivier [76] ont montré que l'augmentation du dosage en ciment amène à réduire le rapport E/C pour obtenir le même affaissement. En effet, un béton dosé à 377 kg/m³ de ciment a nécessité une teneur en eau de 192 l (soit E/C = 0,5) pour obtenir un affaissement de 7 cm. Le même affaissement a été obtenu pour un béton dosé à 347 kg/m³ et un volume d'eau de 186 l (E/C = 0,53). Cela s'explique par une plus grande quantité de liant qui disperse les granulats et améliore la fluidité.

1.6.3. Influence du type de ciment

La démarche de formulation d'un béton passe par le choix du type de ciment. Plus la classe de résistance est élevée et plus la résistance à la compression est élevée, à toutes les échéances. L'influence de ce paramètre sur la résistance à court terme est présentée sur la (figure I .30).

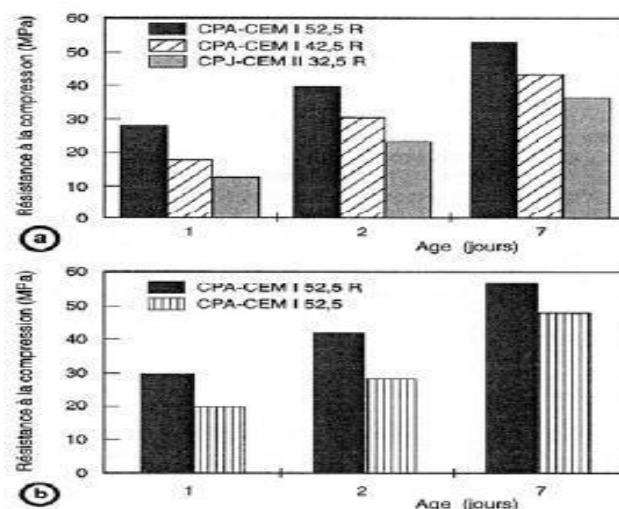


Figure I.29 : Influence du type de ciment sur la résistance à la compression à court terme [76].

Cette figure montre que le choix d'un ciment CPA-CEM I 52,5 R développera à dosage identique dans le béton des résistances à court terme considérablement supérieures à celles d'un ciment CPJ-CEM II 32,5 R. De même, un CPA-CEM I 52,5 R développe des résistances à court terme beaucoup plus rapidement qu'un CPA-CEM I 52,5N tout en présentant à 28 jours des résistances équivalentes [76].

1.6.4. Influence du squelette granulaire

Moins influente que le dosage en ciment ou le dosage en eau, la composition granulométrique du mélange n'intervient que d'une manière relativement faible sur la plupart des propriétés du béton. Sauf pour la résistance à la compression où nous pouvons voir (fig. I.31) que pour des valeurs de (G/S) supérieures à « 2.2 » la résistance à la compression augmente considérablement, une augmentation certainement positive mais prise sur le compte de l'ouvrabilité, parce qu'en pratique on ne dépasse pas les valeurs de 1.5 à 1.6 pour avoir un béton ouvrable [23].

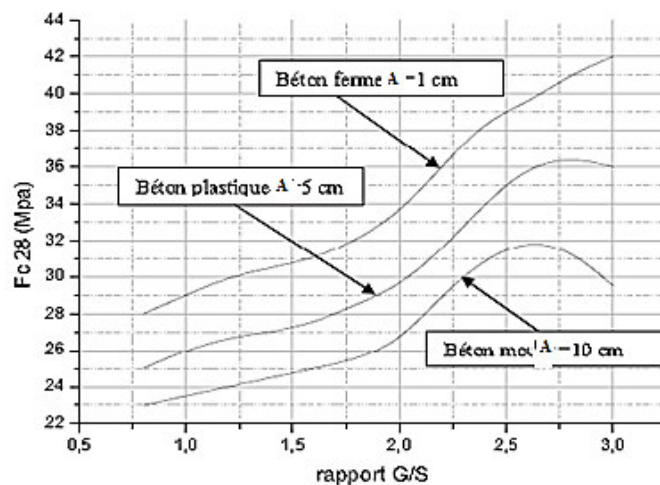


Figure I.31 : Variation de la résistance en compression à 28 jours en fonction du rapport G/S [23].

1.6.5. Dimension maximale des granulats Dmax

L'utilisation des granulats de dimension maximale contribue de façon très significative à l'augmentation de la résistance du béton. Mais cela reste dans les limites de la faisabilité, parce que le choix de D max reste conditionné par le [BAEL 91] :

- L'ouvrabilité demandée
- Les dimensions de l'ouvrage et l'épaisseur des pièces
- L'espacement des armatures
- L'enrobage des armatures

L'effet négatif de l'augmentation de la dimension maximale du granulat dans le béton s'applique à l'échelle de toutes les grosseurs, mais l'effet de la dimension des grains sur la diminution de la demande en eau est particulièrement important en dessous de 38,1 mm (figure I.32). Pour des dimensions supérieures, le bilan des deux effets dépend du dosage du béton [76].

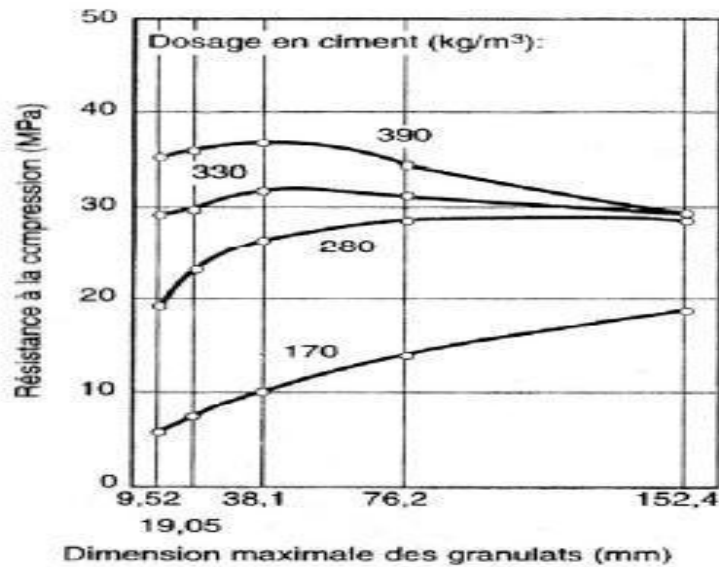


Figure I.32: Influence de la dimension maximale du granulat sur la résistance à la compression à 28 jours pour des bétons ayant différents dosages en ciment [72].

1.6.6. Influence du squelette granulaire sur l'affaissement

Une étude réalisée sur des bétons autoplaçants a fait ressortir que l'augmentation de la fraction volumique granulaire avait une influence négative sur les propriétés rhéologiques des bétons [77]. Cependant l'optimisation du squelette granulaire et par conséquent le paramètre G/S est essentielle pour améliorer la fluidité du mélange [3].

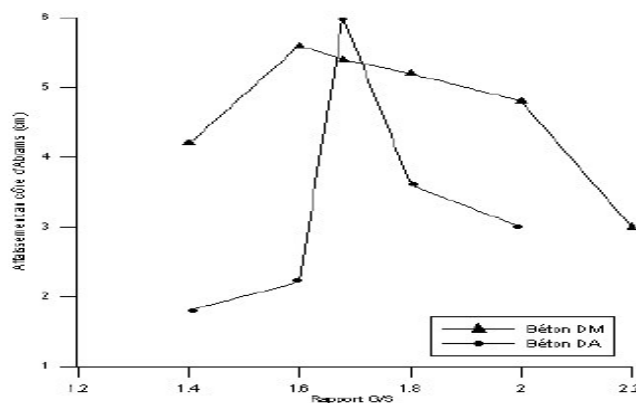


Figure I.33: Optimisation du rapport G/S en fonction de l'affaissement [3].

1.7. METHODES DE FORMULATION DES BETONS

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents composants (granulat, eau, ciment) afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées (résistance, consistance).

1.7.1. Méthode de Bolomey

Par une formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et d'où s'efforce de réaliser avec des granulats dont on dispose une composition granulaire totale (ciment compris), dont la courbe soit aussi proche que possible de la courbe de référence théorique [23]. La formule de base est la suivante :

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

Où :

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

d : Le diamètre du plus petit granulat.

D : Le diamètre du plus gros granulat.

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.

1.7.2. Méthode de Faury

En 1942 Faury [23], proposa une nouvelle loi de granulation du type continu.

Il s'inspirait pour cela de la théorie de Caquot relative à la compacité d'un granulat de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen.

La loi de granulation qui en découle est une loi fonction de $5\sqrt{d}$. La courbe granulométrique idéale conduisant à la compacité maximale est alors théoriquement une droite ; cependant Faury a distingué les grains fins et moyens ($<D/2$), des gros grains ($>D/2$) et la pente de la droite n'est pas la même pour chacune de ces deux catégories.

On trace pour l'ensemble du mélange, ciment compris une courbe granulométrique de référence qui est composée de deux droites si l'on opère sur un graphique gradué, en abscisse $5\sqrt{d}$.

L'abscisse du point de rencontre de ces deux droites est fixée à $D/2$ et son ordonnée **Y** est donnée par la formule suivante :

$$Y = A + 17.5 \sqrt{D} + \frac{B}{\frac{R-0.75}{D}}$$

A : constante, traduisant la maniabilité du béton ;

B : Varie de 1 à 2 selon que le béton ferme au no ;

D : Exprimé en dimension de passoire ;

R : Le rayon moyen du moule.

1.7.3. Méthode de Valette

Valette [23] a mis au point une méthode essentiellement expérimentale mais qui nécessite certains nombres de calculs préparatoires. Cette méthode est souvent désignée par « dosage des bétons à compacité maximale » ou « dosage des bétons à minimum des sables » ou « dosage des bétons à granularité discontinue ».

On calcule d'abord le dosage de sable et de ciment devant donner en principe le mortier plein avec un minimum de ciment. On ajoute ensuite, le maximum de gravier mouillé compatible avec une ouvrabilité permettant un moulage correct et une mise en œuvre facile dans les conditions du chantier. On obtient alors le béton plein à minimum de sable et le moins dosé en ciment.

1.7.4. Méthode de Dreux-Gorisse

Cette méthode est de nature fondamentalement empirique. Dreux a mené une large enquête pour recueillir des données sur des bétons satisfaisants. Sur la base d'une analyse statistique de ce grand nombre de bétons et en combinant les courbes granulaires obtenues, ils ont pu fonder une approche empirique pour déterminer une courbe granulaire de référence ayant la forme de deux lignes droites dans un diagramme semi-logarithmique [78].

Elle est d'autre part très simple d'utilisation puisqu'elle ne demande que de connaître les courbes granulométriques des granulats utilisés.

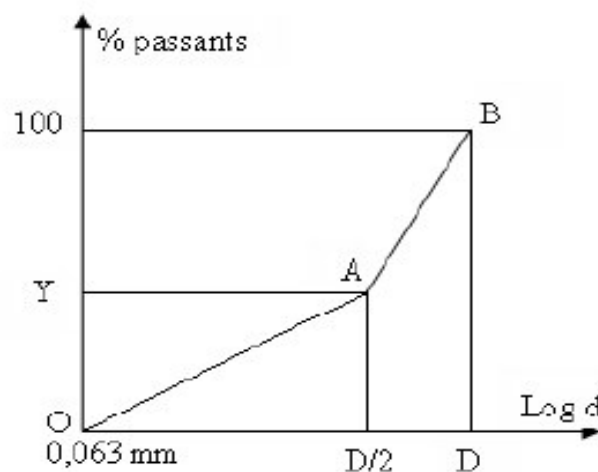


Figure I.34: Courbe optimale type selon la méthode Dreux-Gorisse [23].

Sur un graphe d'analyse granulométrique type AFNOR (linéaire en module et logarithmique en dimension des granulats), on trace une composition granulaire de référence OAB. Le point B (à l'ordonnée 100%) correspond à la dimension D des plus gros granulats, c'est-à-dire :

Point B ($X = D_{\max}$ et $Y = 100 \%$)

Point O ($X = 0.063$ et $Y = 0$)

Le point de brisure A aux coordonnées suivantes :

- En abscisses (à partir de la dimension D du tamis)

Si : $D \leq 20$ mm ; l'abscisse est $D/2$.

Si : $D \geq 20$ mm l'abscisse est située au milieu du « segment gravier » limité par le module 38 (5 mm) et le module correspondant à D.

- En ordonnées : $y = 50 - \sqrt{K}$

Où K : est un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage de la forme des granulats roulés ou concassés et également du module de finesse du sable.

Une correction supplémentaire sur K peut être effectuée (cas de sable grossier) en la valeur $K_s = 6$, $M_f - 15$ ou M_f étant le module de finesse du sable qui varie de 2 à 3 [23].

I.2. GENERALITE SUR LE SABLE

2.1. INTRODUCTION

Le sable est un élément essentiel entrant dans la composition du béton. Son utilisation permet d'assurer une continuité granulaire nécessaire entre le ciment et le gravier pour une meilleure cohésion du béton. La demande sans cesse croissante sur les granulats a provoqué un épuisement rapide des sabliers et une exploitation anarchique des sables de mer causant ainsi un grave préjudice à l'équilibre de l'environnement à proximité des plages en ayant des répercussions directes sur les ressources naturelles, l'érosion des berges d'oued et l'avancée de mer [79].

Le terme sable est généralement utilisé pour désigner un mélange de grains meuble n'ayant aucune cohésion et dont la dimension des grains est généralement comprise entre 0,062 et 5 mm. Du point de vue géologique, le terme sable recouvre deux aspects : un aspect granulométrique (taille des grains) et un aspect minéralogique (nature minéralogique des grains). Une particule individuelle est appelée grain de sable.

Le sable peut avoir une origine naturelle ou artificielle ; d'origine naturelle, il provient de la désagrégation naturelle de roches au cours de leur processus d'érosion, artificiel, il est obtenu par broyage de roches massives après des opérations de concassage et de criblage, il est appelé aussi sable de carrière, il est caractérisé par des grains aux aspérités marquées. La composition du sable varie d'un endroit à l'autre selon la nature des roches. Dans l'industrie du verre, de la fonderie et d'autres domaines, le sable recherché est celui qui a une grande teneur en silice un bon classement et des grains arrondis ou subarrondis : sont appelés sables siliceux ou sables industriels.

2.2. LES DIFFERENTS CONSTITUANTS DU SABLE

Le sable comporte différentes variétés de minéraux qui sont dérivés de l'élément de base le silicium (Si). Ces principaux minéraux sont classés comme suit : silice, silicates (famille la plus abondante dans la nature, plus de 90 % du poids de l'écorce terrestre), argiles et carbonates. Ces dernières se trouvent généralement sous forme de trace dans le sable [79].

2.2.1. Le silicium

Le silicium est un corps pur de symbole chimique Si, de numéro atomique 14, de poids atomique 28,08 g/mol. Il ne se trouve jamais à l'état natif mais constitué sous forme de silice et de silicate. C'est l'élément le plus abondant de l'écorce terrestre (environ 27,2 %) après l'oxygène (environ 60%).

2.3.2. La silice (ou quartz SiO_2)

Le dioxyde de silicium ou silice occupe parmi les oxydes, une place exceptionnelle. Les nombreuses applications industrielles (optique, électronique, production de matériaux réfractaires, etc.).

2.2.3. Les silicates

Les silicates désignent une importante famille de minéraux dérivants de la silice (SiO_2) car ils constituent environ 97 % de la croûte terrestre. Ces minéraux dont le squelette est essentiellement formé par des tétraèdres de silicium [SiO_4] sont additionnés à d'autres éléments tels l'aluminium, le magnésium, le fer, le calcium, le potassium, le sodium etc..

2.2.4. Les argiles

Les argiles regroupent l'ensemble des matériaux dont les particules n'excèdent pas 2 mm de diamètre équivalent. Ils correspondent à des minéraux spécifiques que l'on ne rencontre

jamais en particule plus grosse. Ces minéraux sont des silicates d'aluminium hydratés, ils appartiennent à la famille des phyllo silicates qui présentent une structure cristalline en feuillet.

2.2.5. Les carbonates

Les minerais de carbonate rencontrés le plus souvent dans les sols sont la Calcite CaCO_3 , la Dolomite $[\text{Ca Mg}(\text{CO}_3)_2]$, la Nahcolite (NaHCO_3), la Trona $[\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}]$ et la Soda ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$).

2.3. CLASSEFUCATIONS DES SABLES

On peut classer les sables selon dont [81] :

2.3.1. La granularité : permet de séparer les sable en trois catégories sont:

- Sables fins ; Sables moyens ; Sables grossiers.

2.3.2. La propreté et la teneur en fines : elle est appréciée par la valeur de l'équivalent de sable.

2.3.3. La nature minéralogique : En général, les sables peuvent être classés comme suit:

Sables siliceux ; Sables silico-calcaires ; Sables calcaires.

2.3.4. Leurs provenances : Selon leurs provenances [82], les sables peuvent être classés comme suit :

- **Sable de rivière :** il est obtenu par dragage des lits des cours d'eau. Il doit être dur et propre pour qu'on puisse l'utiliser dans les bétons.
- **Sable de mer :** il provient des côtes de la mer. Pour l'utiliser dans les bétons, il faut qu'il ne soit pas trop fin et qu'il soit lavé de son sel.
- **Sable de carrière :** Il contient souvent de l'argile qui enrobe les grains et les empêche d'adhérer aux liants. Il est donc à proscrire.

Sable artificiel : il est obtenu par concassage des roches (calcaires durs, gré ...). Il est souvent plein de filler. Pour qu'il soit utilisable dans les bétons, il faut limiter le pourcentage des fines.

- **Sable de dune :** c'est une variété des sables de mer. Il est donc très fin. Les sables de dune se trouvent dans les régions sud du pays. Ils sont situés en zone présaharienne.

Les sables retenus sont ceux issus des dunes continentales. Ces dunes sont constituées des nombreux amas de sables fins accumulés dans certaines régions spécifiques du Sahara.

2.4. LES CARACTERISTIQUES DU SABLE ET SES APPLICATIONS

2.4.1. LES CARACTERISTIQUES DU SABLE

Les principaux critères utilisés pour caractériser un sable sont sa courbe granulométrique et sa rondeur. D'autres caractéristiques sont la teneur en matières argileuses, en coquillages et chlorures [83].

- **La courbe granulométrique**

La granulométrie mesure la dispersion de la taille des grains. Elle est décrite par un intervalle $0/X$ où X donne la valeur en millimètre pour laquelle 85% des grains ont un diamètre inférieur ou égal à X . Plus X est petit plus le sable est considéré comme fin. La teneur en « fines » d'un sable est aussi prise en compte. Il s'agit de la proportion de grains dont la taille est inférieure à 0,063mm. La teneur en fines affecte la manière dont le sable absorbe l'eau par capillarité. Les sables de concassage, à moins d'être lavés, ont une teneur en fines élevée. À l'inverse, les sables extraits de la mer ou de rivières ou les sables lavés en général ont une teneur en fines plus faible car les fines sont entraînées avec l'eau.

- **La forme du grain**

Suivant l'origine du sable, la forme du grain est différente. Ainsi, un grain rond améliore la fluidité du sable et des mélanges auxquels il participe. À l'inverse, un grain anguleux favorise la résistance du matériau dont il fait partie. Les sables marins ou naturels sont plus ronds. Suivant leur origine les sables de rivière sont plus ou moins ronds. Les sables de concassage sont anguleux.

- **Autres caractéristiques techniques**

Outre la granularité et la forme des grains, le taux de chlorures, les teneurs en argile et en coquillages sont d'autres paramètres importants de la qualité du sable. Une teneur en chlorure trop élevée n'est pas souhaitable dans des applications liées au fer telles que les bétons armés puisqu'ils oxydent le fer et provoquent la rouille de la structure métallique. La présence de sels dans les mortiers ou les matériaux de construction provoque des phénomènes d'efflorescence.

L'argile étant rétenteur d'eau, une présence importante dans le sable affecte les dosages d'eau dans des applications comme le béton ou le mortier. L'argile apporte aussi un composant « gras » qui affecte, par exemple, la plasticité du sable.

2.4.2. LES PRINCIPALES APPLICATIONS DU SABLE

- **Les bétons**

Le béton est un mélange dont on désire qu'une fois durci il reproduise les qualités de résistance de la pierre. Son utilisation est très importante dans la construction : il est utilisé pour la fabrication de fondations et de chapes, de matériaux de constructions divers (tuyauteries, poutres, etc.) [83]. Ce mélange est constitué de granulats, de sable, de ciment et d'eau. Les graviers apportent les qualités de la roche. Le ciment combiné avec l'eau est le liant des pierres. Le sable, granulat de petite taille, remplit les vides entre les éléments de plus grande taille : il favorise donc la résistance du béton et diminue la quantité de liant nécessaire au mélange.

Il existe de nombreuses variétés de béton avec leurs avantages et leurs utilisations propres. Deux paramètres importants sont la résistance et l'ouvrabilité du mélange. Les qualités de résistance du béton seront d'autant meilleures que la partie « granulats » sera importante (c'est-à-dire que la partie « liant » est réduite autant que possible). Une combinaison équilibrée des granulats de différente taille permet cela. Dès lors, un bétonnier utilisera une combinaison de sables et de granulats de différentes tailles pour donner une courbe granulométrique équilibrée à son produit.

L'ouvrabilité d'un béton est la capacité d'un mélange à être coulé. Un mélange plus fluide permet une mise en œuvre plus facile. L'ajout d'eau en excès améliore l'ouvrabilité du mélange mais provoque, outre une chute de résistance, des phénomènes de retrait et de fissuration. La forme des granulats est un autre facteur qui peut améliorer l'ouvrabilité du mélange. S'ils sont ronds ou presque arrondis, le mélange s'écoule plus facilement, suivant le phénomène du roulement à billes. L'ajout d'adjuvants spéciaux permet également d'améliorer l'ouvrabilité.

- **Maçonnerie et mortiers**

Les sables sont essentiels dans la fabrication de mortiers et de mortiers de jointoiment de façade. Typiquement, un mortier est un mélange de ciment, de sable et d'eau. Suivant les cas, les qualités de mortiers diffèrent très fort. Ainsi, un particulier ou un petit entrepreneur réalise son mortier à partir du sable maçon qu'il trouve chez un négociant en matériau. Par contre, les

mélanges sable et ciment pour mortiers préfabriqués vendus en sacs ou en silos ont une composition plus pointue, avec plusieurs types de sables en général [83].

- **Les mélanges bitumeux**

Asphalte coulé et enrobé sont des mélanges bitumeux. Une vision très réductrice des choses est de considérer que les matériaux bitumeux sont des bétons où le liant est du bitume.

L'enrobé est le mélange le plus proche du béton. Outre le bitume, il est composé de fines, de sable et de granulats. Il est utilisé principalement pour le revêtement de chaussées. Excepté l'eau, les enjeux techniques sont les mêmes que pour le béton. L'ouvrabilité est assurée par la température du mélange (200°C) avant mise en œuvre. La rondeur des granulats a un effet favorable mais secondaire [83]. En comparaison de l'enrobé, l'asphalte coulé se caractérise par une plus grande proportion de bitume et de fines. Les fines apportent de la consistance au mélange. Une fois sèche, ce matériau possède une grande étanchéité.

- **L'industrie du verre**

Le sable siliceux (naturel) est la principale matière première dans la fabrication du verre. La silice est en effet l'élément vitrifiant qui donne au verre sa structure. Si la silice vitrifie, les autres composants du sable tels les oxydes de fer et de manganèse sont des impuretés qui diminuent les qualités transparentes du verre. Le sable recherché doit être aussi pur que possible [83]. La granulométrie est aussi surveillée : la présence de fines n'est pas souhaitée car elles génèrent des poussières et les grains trop gros ralentissent le processus de fusion.

- **Autres usages**

Actuellement, le sable est largement utilisé dans le domaine de filtration, par exemple filtration de l'eau et filtration des produits toxiques. Il est aussi utilisé pour les opérations à hautes températures et qui nécessitent des matériaux réfractaires comme le moulage et les fours. Dans le domaine optique, le sable est utilisé pour la production des verres de toutes sortes. On le trouve aussi dans le domaine énergétique, électrique et électronique comme les panneaux et les équipements d'énergie solaire. Le sable est la matière première pour l'extraction de dioxyde de silicium (SiO_2) qui est lui-même la source de silicium (Si) pur [79].

2.5. LES RESSOURCES DES SABLES EN ALGERIE

Les pratiques de l'industrie en du béton en Algérie sont conditionnées par les ressources locales et sont relativement routinières. Cependant, l'industrie du béton est confrontée ces dernières années à des changements importants : utilisation d'adjuvants de plus en plus performants, développement de nouveaux bétons (bétons à hautes performances, béton auto-

compactant) [81]. Dans notre pays, s'ajoute un bouleversement supplémentaire : l'emploi d'un nouveau type de sable. Trois familles de sables se distinguent :

2.5.1. Les sables roules siliceux

Dit ronds, sont issus d'un processus naturel d'érosion. En général, ils sont dragués dans les Oueds. Leur usage est courant depuis des années et est même recommandé. Cependant, les réserves disponibles sont proches de l'épuisement ou protégées par de nouvelles règles environnementales en matière de dragage des Oueds. Ce matériau est donc devenu moins intéressant économiquement.

2.5.2. Les sables de concassage calcaires

Sont le produit d'un processus industriel contrôlé de concassage, de lavage et de criblage appliqué à des roches calcaires exploitées en carrières, la contrainte du coût de revient élevé, le rends économiquement moins intéressant.

2.5.3. Le sable de dune

Le sable de dune de l'erg occidental occupe 6% de la surface du Sahara Algérien. La figure I.34, présente la situation géographique des ergs de l'Algérie.

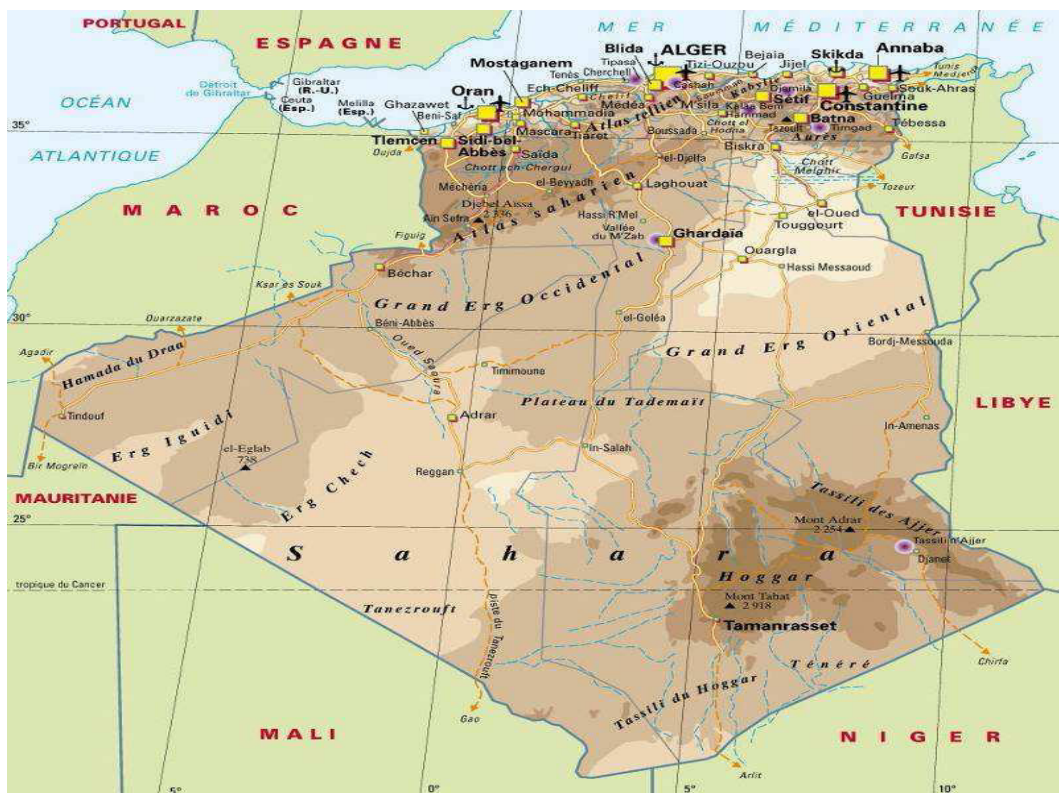


Figure I.35 : Situation géographique des ergs de l'Algérie [84].

Ce type de sable spécialement est un matériau d'une grande disponibilité en Algérie. Ce matériau est pratiquement non exploité, malgré les éventuelles caractéristiques qu'il peut présenter. L'utilisation de ce nouveau matériau dans le secteur de construction, peut soulager davantage le domaine d'habitat, et contribuer au développement des régions du sud algérien, très riches en sable de dune [85].

2.6. UTILISATION DE SABLE LOCALE DONS LE BETON EN ALGERIE

En Algérie, la plupart des bétons courants sont actuellement fabriqués avec des granulats siliceux alluvionnaires. Face à une demande fort croissante, les ressources potentielles en alluvions, bien qu'importantes, sont épuisables et les gisements sont soumis à des contraintes environnementales de plus en plus rigides faisant croître leur coût d'exploitation déjà élevé [81]. Dons notre pays, malgré l'abondance de sable de dune dans le sud, ce matériau reste inconnu. Sa quantité se chiffre en milliards de m³. Il est disponible dans près de 60% du territoire.

De nombreux chercheurs, dans des thématiques scientifiques diverses, cherchent à exploiter ce type de sable, propre et présent à l'abondance. Son utilisation pourrait être liée à sa très forte teneur en silice, matériau à la base d'applications dans l'électronique et l'optique, ce sable présente aussi un grand intérêt économique et environnemental pour l'Algérie. En effet, la hausse de la demande du sable de construction en Algérie, l'incapacité des carrières algériennes à fournir du sable fin et l'arrêt programmé de l'utilisation du sable de plage, qui conduit à un grand problème écologique et touristique pour l'Algérie [84].

CONCLUSION

Cette partie théorique nous permet de conclure que :

Le béton est un matériau hétérogène dont le choix des composants est en fonction des critères qui lui sont recherchés. Ces critères sont essentiellement les résistances mécaniques et la durabilité, elles dépendent de la porosité et de la qualité et des composants.

Le sable est un matériau indispensable pour la fabrication du béton. Il constitue environ 30% à 40% comme composant principal de toute la masse du béton. Sa disponibilité dans les régions du sud du pays est très importante et indéfinie. Comme le sable ordinaire, qui est généralement extrait soit de carrière d'oued ou de plage se fait très rare, il est nécessaire d'adapter ce sable de dune dans le béton pour la réalisation de différentes constructions et ouvrages.

Chapitre II

Etude

Expérimentale

INTRODUCTION

Dans le cadre de la valorisation des sables algériens dans les bétons de construction. Notre étude expérimentale consiste à valoriser les sables locaux dans le béton, et cela suivant la formulation de G. Dreux en modifiant le type de sable utilisé (selon la formule d'Abrams).

Ce travail consiste à répondre aux exigences techniques, résistance et maniabilité conformes aux normes, mais aussi économiques en réduisant le coût de revient du béton.

Pour cela on a réparti notre travail en deux parties :

La première partie : nous allons dans un premier temps caractériser les matériaux employés dans cette étude, en présentant leurs propriétés physiques, chimiques et mécaniques.

Dans un deuxième temps, nous expliquons la méthode de formulation utilisée, après avoir défini les différentes compositions des bétons étudiées.

La deuxième partie : nous allons exposer les différents résultats obtenus à partir des nombreux essais expérimentaux, réalisés sur les différentes formulations du béton à l'état frais et durci.

II.1 CARACTERISATION ET FORMULATION

Nous allons présenter dans cette partie, les caractéristiques essentielles des différents constituants du béton. Ainsi que les compositions des différents bétons étudiés dans le cadre de cette étude.

1.1. CARACTERISTIQUES DES MATIERES PREMIERES UTILISENT

1.1.1. Ciment

Le ciment utilise dans notre étude est un ciment portland composé, dont les caractéristiques physico mécaniques et chimiques satisfont aux exigences des ciments CPJ CEM II/A 42.5 R selon la norme français [NF P 15-301].

- **Caractéristiques chimique du ciment CPJ CEM II/A 42.5 R**

L'analyse chimique des ciments déterminé selon la norme français [NF EN 196-2]. Le tableau (II.1), résumées Les compositions chimiques du ciment utilisé.

Tableau II.1: Composition chimique du ciment CPJ CEM II/A 42.5 R.

Composition Chimique	Teneur %
SiO ₂	17,50
Al ₂ O ₃	5,17
Fe ₂ O ₃	2,92
CaO	60,21
MgO	1,87
K ₂ O	0,57
Na ₂ O	0,18
SO ₃	2,59
CaO libre	1,434
Cl ⁻	0,020
Ins.	0,70
P.F	8,630

L'analyse chimique de ciment montre que la prédominance d'oxyde de calcium 60.21 % présence de la silice de l'ordre 17,50 %, et d'autres constituants à faible pourcentage peut être classée avec les impuretés, comme des oxydes (d'aluminium, fer, magnésium, potassium). Donc la perte au feu est faible.

- **Caractéristiques minéralogique du ciment CPJ CEM II/A 42.5 R**

Les caractéristiques minéralogiques du ciment utilisé sont résumées dans le tableau (II.2).

Tableau II.2 : Composition minéralogique de ciment CPJ CEM II/A 42.5 R.

Phase	Constituants minéraux du Clinker	Teneur rapporté au Clinker (%)
Clinker	C ₃ S	56
	C ₂ S	20
	C ₃ A	06
	C ₄ AF	12
	CaO ₁	01
Régulateur de prise	Gypse	05

- **Caractéristiques physiques du ciment CPJ CEM II/A 42.5**

L'analyse physique des ciments déterminé selon la norme français [NF EN 196-3].

Le tableau (II.3), résumées les caractéristiques physiques du ciment utilisé.

Tableau II.3: Caractéristiques physiques de ciment CPJ CEM II/A 42.5 R.

		Résultats
Consistance normalisé (%)	H ₂ O	27.3
Temps de prise (mn)	Début	165
	Fine	230
Stabilité (mm)	Froid	-
	Chaud	0.0
Essai de retrait (µm/m)	03jours	344
	07 jours	478
	28jours	784
Essai de gonflement (µm/m)	03jours	0
	07 jours	0
	28jours	0
Masse volumique absolue (g/cm ³)		3.03
Finesse suivant la méthode Blaine (cm ² /g)		4242

La consistance obtenue est conforme à la norme [NF EN 196-3] où les valeurs sont généralement comprises entre 26 et 33%. De même, un temps de prise minimal de 60 minutes est prescrit par la norme [NF P 15-301] pour les ciments de classe 42,5.

Les masses volumiques absolue du ciment utilisé, sont incluses dans l'intervalle imposé par la norme Algérienne [NA 231], compris entre 2900 – 3150 kg/m³.

- **Caractéristiques mécanique du ciment CPJ CEM II/A 42.5 R**

La Détermination des résistances mécaniques des ciments selon la norme français [NF EN 196-1]. Les caractéristiques mécaniques du ciment utilisé sont résumées dans le tableau II.4.

Tableau II.4: Caractéristiques Physique de ciment CPJ CEM II/A 42.5 R.

Masse totale au démoulage des 06 Eprouvettes (g)		3395.4
Echéances en jours	Flexion (N/mm ²)	Compression (N/mm ²)
02	4.0	20.9
07	6.2	38.3
28	7.0	47.8

1.1.2. Adjuvant

L'adjuvant que nous avons utilisé pour la confection du béton est un superplastifiant (**structuro 311**) de nouvelle génération avec un grand pouvoir réducteur d'eau.



Figure II.1 : super plastifiant (structuro 311).

- **Caractéristiques de l'adjuvant structuro 311**

Tableau II.5 : Caractéristiques de l'adjuvant (structuro 311).

Apparence	Liquide marron clair
Densité	1.05 ± 0.01 (kg /l)
PH	5.5 ± 1.0
Teneur en chlorure soluble en Eau (Cl ⁻)	≤ 0.10 %
Teneur en alcalins (Na ₂ O EQ)	max 2 % en mass
Fonction principale	Augmenter la maniabilité
Fonction secondaire	Augmenter résistances initiales et finales

1.1.3. Granulats

Les granulats est un ensemble de grains minéraux, de dimensions comprises entre 0 et 250 mm destinés à la confection des mortiers, et bétons.

Nous avons réalisé au l'laboratoire centrale de l'ENGOA – REGHAIA. Les analyses suivantes :

- **Analyses sur les graviers**
 - ✓ Analyse granulométrique,
 - ✓ Masse volumique absolue,
 - ✓ Masse volumique apparente,
 - ✓ Essai Los Angeles,
 - ✓ Essai Micro-Deval.
- **Analyses sur les sables**
 - ✓ Analyse granulométrique,
 - ✓ Equivalent de sable (ESP),
 - ✓ Masse volumique absolue,
 - ✓ Module de finesse.

1.1.3.1. Gravier

Dans notre travail, ont utilisé trois types des graviers, résultant du concassage de roche d'une pétrographie calcaire massif, proviennent de la carrière de Kadara.

- Gravier (3 / 8)
- Gravier (8 / 15)
- Gravier (15/25)



Figure II.2 : Différents types de graviers de carrière de KADARA.

a) Caractéristiques granulométriques des graviers

L'analyse granulométrique des granulats déterminé selon la norme française [NF EN 933-1]. Il est atteint par le tamisage d'un échantillon dans une série de tamis et de déterminer le Pourcentage de passants et du refus sur chaque tamis. Les quantités tamisées sont : 2000 g (3/8) et 3500 g (8/15) et (15/25) 5000 g.

- **Graviers (3/8)**

Selon l'analyse faite au laboratoire central de l'ENGOA, on a obtenu les résultats des passants cumulés de gravie (3/8), représentés dans le tableau (II.6).

Tableau II.6 : Résultat de l'analyse granulométrique de gravie (3/8).

Tamis (mm)	Gravier (3/8)		
	Poids refus (g)	Refus (%)	Passant (%)
10	-	-	100
8	1.6	0.08	99.92
6.3	416.9	20.84	79.16
5	1035.6	65.28	34.72
2.5	1987.8	99.39	0.61
F.T	2000	100	-

- **Graviers (8/15)**

Selon l'analyse faite au laboratoire central de l'ENGOA, on a obtenu les résultats des passants cumulés de gravie (8/15), représentés dans le tableau II.7.

Tableau II.7 : Résultat de l'analyse granulométrique de gravie (8/15).

Tamis (mm)	Gravier (8/15)		
	Poids refus (g)	Refus (%)	Passant (%)
16	-	-	100
12.5	20.9	17.74	82.26
10	2487.5	71.07	28.92
8	3380.3	96.58	3.42
6.3	3484.3	99.55	0.45
5	3486.8	99.62	0.38
2.5	3491.9	99.76	0.24
F.T	3500	100	-

- **Graviers (15/25)**

Selon l'analyse faite au laboratoire central de l'ENGOA, on a obtenu les résultats des passants cumulés de gravie (15/25), représentés dans le tableau (II.8).

Tableau II.8 : Résultat de l'analyse granulométrique de gravie (15/25).

Tamis (mm)	Gravier (15/25)		
	Poids refus (g)	Refus (%)	Passant (%)
25	-	-	100
20	1381.0	27.62	72.38
16	3570.9	71.42	28.58
12.5	4890.2	97.81	2.19
10	4975.0	99.50	0.50
8	4979.2	99.59	0.41
6.3	4980.2	99.61	0.39
F.T	5000	100	-

Les différentes courbes granulométriques des graviers utilisés sont montrées sur la figure II.3.

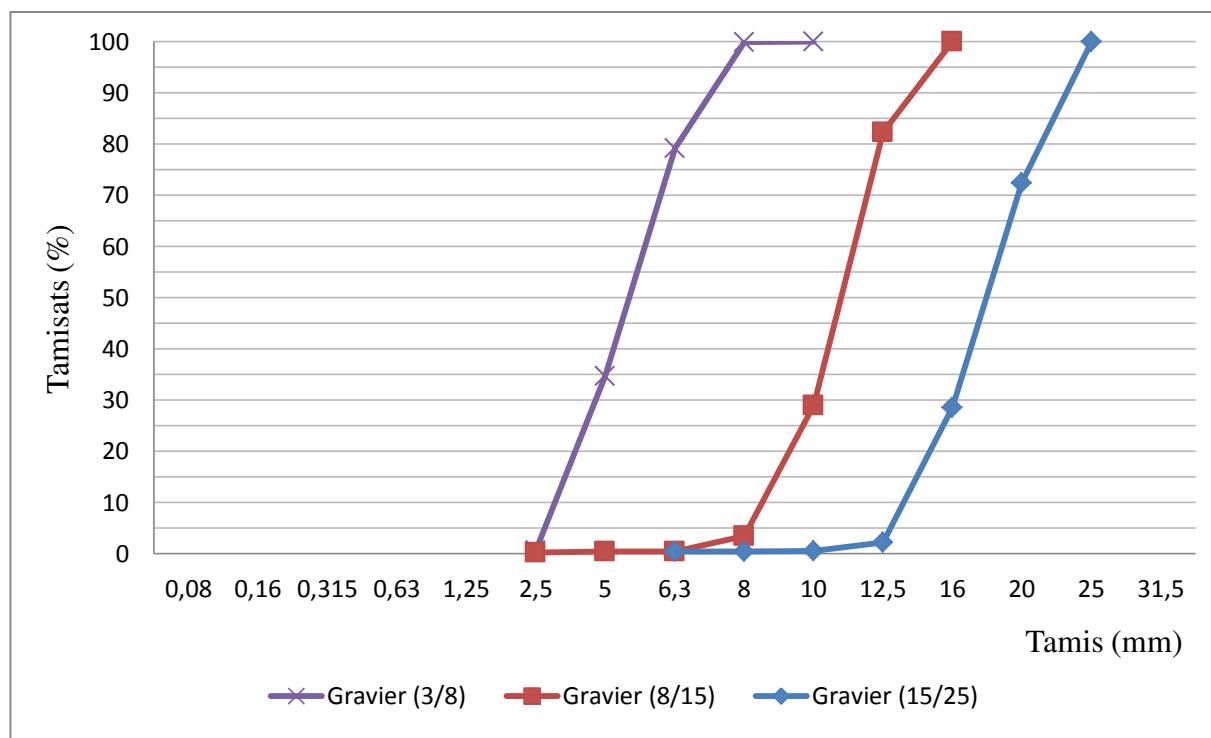


Figure II.3 : Courbe granulométrique des graviers.

Les trois classes granulaires telles que 3/8 - 8/15 - 15/25, montre que les graviers sont à granulométrie continue.

b) Caractéristiques physiques des graviers

Les caractéristiques physiques des graviers, sont déterminées selon la norme européenne [EN 1097-6]. Les différents résultats obtenus lors des essais de principales caractéristiques physiques des graviers sont présentées dans le tableau (II.9).

Tableau II.9 : résultats des principales caractéristiques physiques des graviers.

Caractéristiques physiques	Graviers		
	Gravier (3/8)	Graviers (8/15)	Graviers (15/25)
Masse volumique Absolue (g/cm^3)	2.64	2.66	2.66
Masse volumique Apparente (g/cm^3)	1.44	1.45	1.48
Coefficient d'aplatissement	-	11.86	8.86

Les résultats obtenus sur le tableau (II.9) montrent que :

Les graviers de la carrière présentent des masses volumiques (apparente et absolue) qui répondent aux spécifications de la norme européenne [EN 1097-6]. La masse volumique apparente est comprise entre 1300 kg/m^3 et 1600 kg/m^3 et la masse volumique absolue est nettement plus élevée et est comprise entre 2000 kg/m^3 et 3000 kg/m^3 . Le coefficient d'aplatissement des graviers répond aux spécifications de l'ancienne norme [P 18 541] spécifiait que la valeur du coefficient d'aplatissement doit être $A \leq 30 \%$.

c) Caractéristiques Mécaniques des graviers

Les caractéristiques mécaniques des graviers, sont déterminées selon la norme européenne [EN 1097-6]. Les différents résultats obtenus lors des essais de caractérisation mécanique des graviers sont présentées dans le tableau (II.10).

Tableau II.10 : résultats des principales caractéristiques mécanique des graviers.

Caractéristiques Mécaniques	Graviers		
	Gravier (3/8)	Graviers (8/15)	Graviers (15/25)
Los Angeles (%)	-	22.75	
Macro Deval (%)	-	17	

1.1.3.2. Sables

Dans notre travaille, on a utilisé 3 types de sable :

- **Sable de carrière** : c'est un sable concassé prévenant, de la carrière de Kadara, résultant du concassage de la même roche utilisée pour produire les graviers,
- **Sable d'Oued-Souf,**
- **Sable de Boussaâda.**



Figure II.4 : Différents types de sable utilisé.

a) Sable de carrière Kadara

- **Caractéristiques Granulométrique**

L'analyse granulométrique des granulats déterminé selon la norme français [NF EN 933-1]. Il est atteint par le tamisage d'un échantillon dans une série de tamis et de déterminer le Pourcentage de passants et du refus sur chaque tamis. La quantité tamisée est ; 1000 g.

D'après l'analyse faite au laboratoire central de l'ENGOA, on a obtenu les résultats des passants cumulés de sable carrière, représentés dans le tableau (II.11).

Tableau II.11 : Résultat de l'analyse granulométrique de sable carrière Kadara.

Tamis (mm)	Sable carrière Kadara			
	Poids refus (g)	Refus (%)	Passant (%)	Module de finesse
6.3	1	0.1	99.85	3.02
5	3.4	0.34	99.66	
2.5	133.9	13.39	86.61	
1.25	472	47.2	52.8	
0.63	683.7	68.37	31.63	
0.3	818.5	81.85	18.15	
0.16	914.3	91.43	08.57	
0.08	979.7	97.97	2.03	
F.T	999.3	99.93	-	

- **Caractéristiques physiques**

Les différents résultats obtenus lors des essais de principales caractéristiques physiques de sable sont présentées dans le tableau (II.12).

Tableau II.12 : Résultats des principales caractéristiques physiques des sables.

Caractéristiques physiques	Equivalent de sable (%)	Masse volumique absolue (g/cm ³)
Sable de carrière Kadara	91	2.61

Les résultats obtenus sur le tableau (II.12) montrent que :

Les essais nous ont donné, un équivalent de sable de 91 %. La carrière de Kadara produit un sable très propre, l'absence presque totale de fines argileuses. Qui répond aux exigences de la norme française [XP P 18-598].

b) Sable Oued-Souf

• Caractéristiques Granulométrique

D'après l'analyse faite au laboratoire central de l'ENGOA, on a obtenu les résultats des passants cumulés sable d'Oued-Souf, représentés dans le tableau (II.13).

Tableau II.13 : Résultat de l'analyse granulométrique de sable Oued-Souf.

Tamis (mm)	Sable d'Oued-Souf			
	Poids Refus (g)	Refus (%)	Passant (%)	Module de finesse
6.3	2.5	0.25	99.75	2.07
5	5.0	05	99.50	
2.5	20.1	2.01	97.99	
1.25	89.5	8.95	91.05	
0.63	323.4	32.34	67.66	
0.3	692.4	69.24	30.76	
0.16	937.0	93.70	6.30	
0.08	993.2	99.32	0.68	
F.T	997	99.7	-	

• Caractéristiques physiques

Les différents résultats obtenus lors des essais de principales caractéristiques physiques de sable Oued-Souf, sont présentées dans le tableau (II.14).

Tableau II.14 : résultats des principales caractéristiques physiques de sable Oued-Souf.

Caractéristiques physiques	Equivalent de sable (%)	Masse volumique absolue (g/cm ³)
Sable d'Oued-Souf	82.06	2.66

Les résultats obtenus sur le tableau (II.14) montrent que :

Les essais nous ont donné, un équivalent de sable de 82.06 %. Le sable d'Oued-Souf est un sable très propre, l'absence presque totale de fines argileuses. Qui répond aux exigences de la norme française [XP P 18-598].

c) Sable Boussaâda

- **Caractéristiques granulométriques**

D'après l'analyse faite au laboratoire central de l'ENGOA, on a obtenu les résultats des passants cumulés de sable Boussaâda, représentés dans le tableau (II.15).

Tableau II.15 : Résultat de l'analyse granulométrique de sable Boussaâda.

Tamis (mm)	Sable Boussaâda			
	Poids refus (g)	Refus (%)	Passant(%)	Module de finesse
1.25	-	-	100	0.65
0.63	0.3	0.03	99.97	
0.3	98.8	9.88	90.12	
0.16	556.2	55.62	44.38	
0.08	969	96.9	3.1	
FT	997.8	99.78	-	

- **Caractéristiques physiques**

Les différents résultats obtenus lors des essais de principales caractéristiques physiques de sable Boussaâda sont présentées dans le tableau (II.16).

Tableau II.16 : résultats des principales caractéristiques physiques de sable Boussaâda.

Caractéristiques physiques	Equivalent de sable (%)	Masse volumique absolue (g/cm ³)
Sable Boussaâda	33	2.62

D'après le tableau (II.16), les résultats obtenus montrent que :

Le pourcentage des fines de sable Boussaâda, un peu élevé et que l'équivalent de sable est inférieur à 60% ; limite de la norme française [XP P 18-598]. Le sable Boussaâda et un sable argileux, risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité, [23].

d) Mélange de sable

D'après les résultats de l'équivalent de sable, on constate que le sable Boussaâda est un sable argileux, risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité. Nous avons mélangé ce sable avec un sable très propre Oued-Souf, pour formuler un sable légèrement argileux de propreté admissible pour la formulation d'un béton de qualité. Le tableau (II.17), montre les différents mélanges choisis et les valeurs de leurs équivalent de sable ES.

Tableau II.17 : Le choix de quantité de chaque sable.

Mélange de sable	Sable Boussaâda (%)	Sable Oued-Souf (%)	Equivalent de sable (%)
Mélange 1	50	50	56
Mélange 2	45	55	63
Mélange 3	40	60	67

D'après les résultats obtenue sur le tableau (II.17), le mélange choisie et le mélange (3), qui présente un ES = 67%, qui répond aux exigences de la norme française [XP P 18-598].

- **Caractéristiques Granulométriques**

D'après l'analyse faite au laboratoire central de l'ENGOA, on a obtenu les résultats des passants cumulés de sable, représentés dans le tableau (II.18).

Tableau II.18 : Résultat de l'analyse granulométrique de mélange de sable.

Tamis (mm)	Mélange de sable			Module de finesse
	Poids refus (g)	Refus (%)	Passant (%)	
6.3	-	-	100	1.5
5	0.7	0.07	99.93	
2.5	10.4	01.04	98.96	
1.25	55.5	5.55	94.45	
0.63	194.6	19.46	80.54	
0.3	441.5	44.15	55.85	
0.16	780.5	78.05	21.95	
0.08	981.3	98.13	1.87	
F.T	999	99.9	-	

- **Caractéristiques physiques**

Les différents résultats obtenus lors des essais de principales caractéristiques physiques de sable sont présentées dans le tableau (II.19).

Tableau II.19 : résultats des principales caractéristiques physiques de mélange de sable.

Caractéristiques physiques	Equivalent de sable (%)	Masse volumique absolue (g/cm^3)
Mélange de sable	67.5	2.64

Les résultats obtenus sur le tableau (II.19), montrent que :

L'équivalent de sable montre que le mélange de sable de la composition (60% de sable Oued-Souf et 40 % de sable Boussaâda), est un sable légèrement argileux de propreté admissible pour béton de qualité selon la norme française [XP P 18-598].

La courbe granulométrique des sables utilisés sont montrée sur la figure II.5.

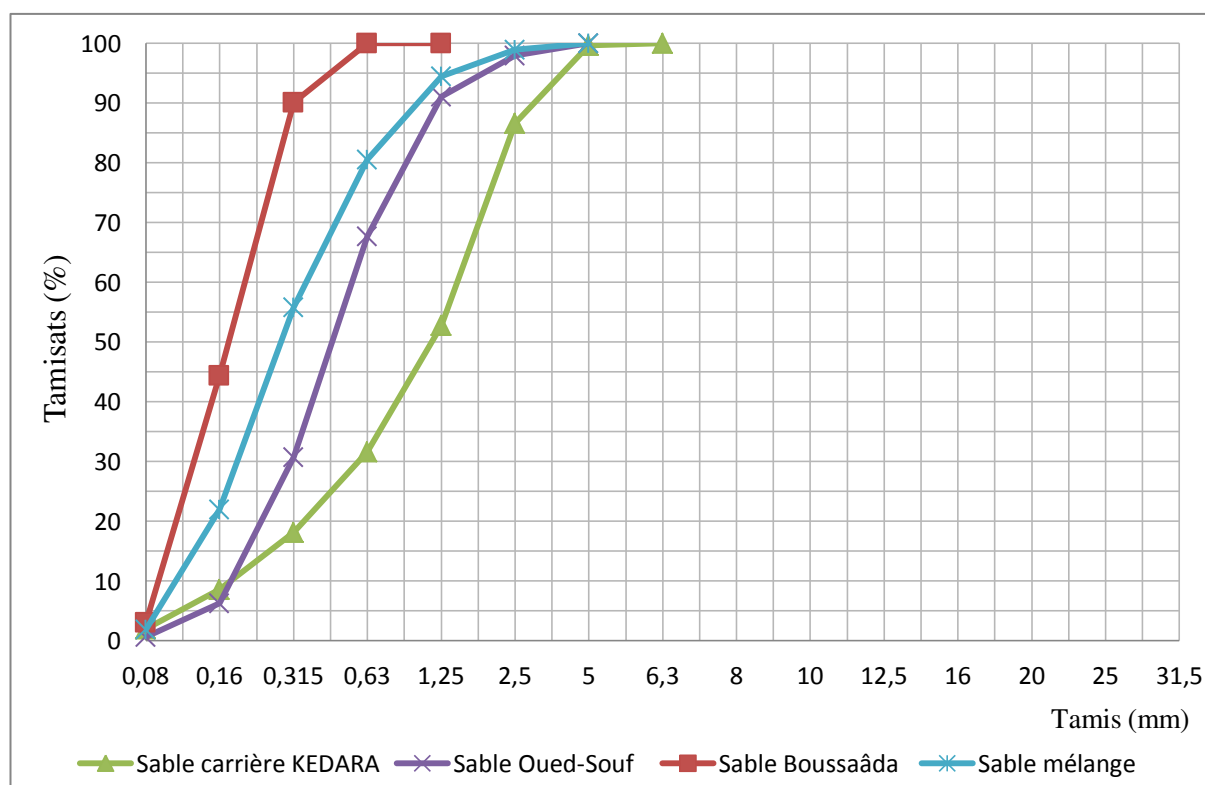


Figure II.5 : courbe granulométrique des sables.

1.2. FORMULATIONS DES BETONS

1.2.1. Formulation de béton témoin (BT)

Le béton témoin formules est un mélange ordinaire préparé à partir de sable de carrier Kadara et trois classe séparées de graviers ; 3/8, 8/15 et 15/25 résultant du concassage de roche d'une pétrographie calcaire massif, de ciment portland composé et l'eau et un dosage de 1% de super plastifiant, la méthode de composition utilisée est la méthode DREUX GORISSE [23].

L'objectif de cette méthode, c'est de déterminer en fonction de la maniabilité et de la résistance définis par le cahier des charges, la nature et la quantité de matériaux nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton.

Les étapes de formulation basées sur la résistance visée et l'affaissement au cône d'ABRAMS.

- **Critère de résistance**

Le béton doit être formulé pour qu'à 28 jours sa résistance moyenne en compression atteigne la valeur caractéristique σ'_{28j} .

Cette valeur doit, par mesure de sécurité, être supérieure de 15% à la résistance minimale en compression σ_{28j} nécessaire à la stabilité de l'ouvrage.

$$\sigma'_{28j} = 1.15 \sigma_{28j}$$

La résistance désirée pour le béton témoin à 28 jours est :

$$\sigma_{28j} = 27 \text{ MPA}$$

La résistance moyenne visée pour le béton témoin à 28 jours :

$$\sigma'_{28j} = 27 * 1.15$$

$$\sigma'_{28j} = 31.05 \text{ MPA}$$

- **Calcule dosage en ciment**

D max = 25, granulats de bonne qualité G = 0.5 (Tableau II.20).

$$\sigma'_{28j} = \sigma'_c * G * \frac{C}{E} - 0.5$$

D'où

$$\frac{C}{E} = 2.27$$

σ'_{28j} : résistance visée à 28 jours ;

σ'_c : classe vraie de ciment en (MPa) ;

G : coefficient granulaire ;

C : dosage en ciment (kg/m^3) ;

E : dosage en eau (kg/m^3).

Tableau II.20 : valeurs approximatives du coefficient granulaire G.

Qualité des granulats	Dimension des granulats (D)		
	$D \leq 16 \text{ mm}$	$25 \leq D \leq 40 \text{ mm}$	$D \geq 63 \text{ mm}$
Excellente	0.55	0.6	0.65
Bonne, courante	0.45	0.5	0.55
Passable	0.35	0.4	0.45

Les granulats utilisés ont un diamètre de 25 mm et son bonne Qualité, d'où un coefficient granulaire **G = 0.5**

Le ciment retenu est un CPJ CEM II/A 42.5 R

Donc le rapport C/E vaut : $C/E = 2.27$.

- **Dosage en ciment par 1 m³ de béton**

Connaissant le rapport C/E et l'affaissement au cône d'ABRAMS souhaité A, on en déduit grâce à l'abaque (figure II.6), C/E en fonction de A, le dosage en ciment correspond :

$$\left\{ \begin{array}{l} C/E = 2.27 \\ A = 8 \text{ cm} \end{array} \right. \Longrightarrow C = 400 \text{ kg (voir la figure II.6)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C/E = 2.27 \\ C = 400 \text{ kg} \end{array} \right. \Longrightarrow \text{On déduit la valeur de E qui est : } E = 176 \text{ (kg)}$$

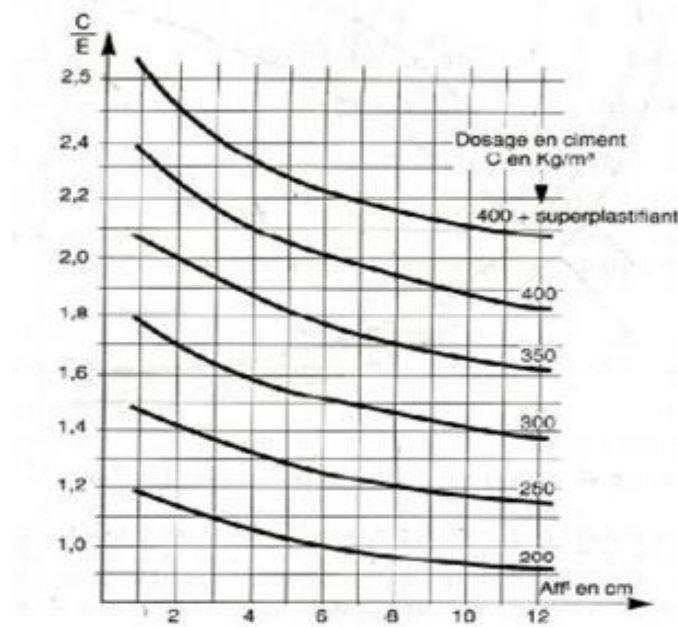


Figure II.6 : Abaque permettant la détermination du dosage en ciment à prévoir en fonction de rapport C/E et l'ouvrabilité désirée [23].

- **Tracé de la courbe granulaire de référence :**

Cette courbe correspondant au mélange des granulats (sable et gravier). Sur le même graphe d'analyse granulométrique (pourcentage des tamis en fonction du module ou diamètre des tamis), déjà obtenu (voir figure II.7), on trace une courbe granulaire de référence OAB avec :

- Point B à l'ordonnée 100% correspond à la dimension D des plus gros granulats.

$$\text{Point B} \begin{cases} X = 25 \\ Y = 100\% \end{cases}$$

- Point de brisure A à pour coordonnées

$$\text{En l'abscisse :} \quad D \leq 25 \quad X = \frac{D}{2}$$

$$\text{En ordonnée :} \quad Y = 50 - \sqrt{D_{\max}} + K + K_s + K_p$$

- ❖ Dosage de ciment $C = 400 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow K = 0$, pour les granulats concassés.
- ❖ Pour le dosage en ciment de 400 kg/m^3 , et avec un granulat concassé et une vibration normale et le module de finesse :

$M_f = 3.02$ est :

$$K_s = 6 M_f - 15 \quad K_p = K + (5 \text{ à } 10)$$

$$K_s = 6 (3.02) - 15 \quad K_p = 0$$

$$K_s = 3.12$$

$$\text{Point A} \begin{cases} X = \frac{D}{2} = 12.5 \text{ mm} \\ Y = 50 - 5 + 3.12 \end{cases}$$

La courbe granulométrique de référence est représentée dans la figure suivante:

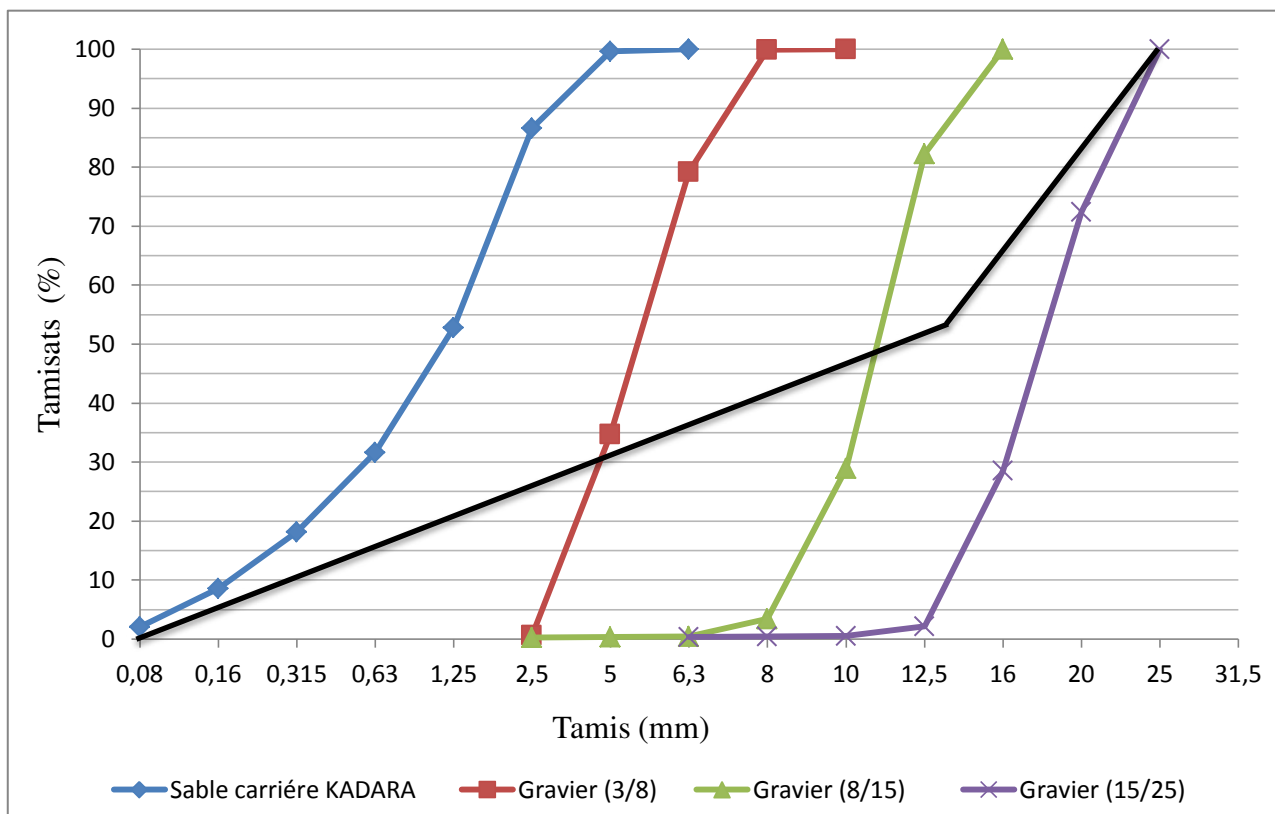


Figure II.7: Courbe granulométrique des granulats

• Dosage des granulats

La courbe granulaire de référence OAB doit être tracée sur le même graphe (Figure II.7) que les courbes granulométriques des granulats composants. On trace alors les lignes de partage entre chacun en joignant le point à 95% de la courbe granulaire du premier, au point à 5% de la courbe du granulat suivant, et ainsi de suite.

On lira alors sur la courbe de référence au point de croisement avec la ou les droites de partage le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats **S, G3/8, G8/15, G15/25**.

- Sable de carrière25 %
- Gravier (3/8)..... 15 %
- Gravier (8/15)..... 15 %
- Gravier (15/25)..... 45 %

On constate que le dosage des graviers est plus important par rapport au dosage de sable ($G/S = 3$), on a procédé à la correction des dosages des granulats ($G/S = 1.50$). Les pourcentages des granulats après la correction sont comme Suite :

- Sable de carrière40 %
- Gravier (3/8)..... 10 %
- Gravier (8/15)..... 23 %
- Gravier (15/25)..... 27%

- **Coefficient de compacité γ**

- $D = 25$
- Béton plastique donc $\gamma = 0.8275$
- Vibration normale

Ces valeurs sont convenables pour des granulats concassés sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :

- sable et gravier concassé = - 0.03 ; Donc $\gamma = 0.800 - 0.03 = 0.797$

- **Détermination de volume totale des granulats**

$$V_C = \frac{C}{\rho}; \quad V_C = \frac{400}{3.1} = 129 \text{ (l/m}^3\text{)}$$

$$V_g = 1000 \gamma - V_C$$

$$V_g = 1000 (0.797) - 129 = 668.5 \text{ (l/m}^3\text{)}$$

- **Détermination de volume d'adjuvant**

$$V_{adj} = \frac{4}{1.05} = 3.8 \text{ (l/m}^3\text{)}$$

- **Détermination du volume absolu de chaque granulat**

- Volume absolu du sable de carrière = 286 l
- Volume absolu de gravier (3/8) = 72 l
- Volume absolu de gravier (8/15) = 161 l
- Volume absolu de gravier (15/25) = 188 l

- Les masses spécifiques sont :

- Sable de carrière = 2.61 g/cm³
- Gravier (3/8) = 2.64 g/cm³
- Gravier (8/15) = 2.66 g/cm³
- Gravier (15/25) = 2.66 g/cm³

- Les dosages en matériaux secs seront donc en kg/m³

- Ciment = 400 kg/m³
- Sable de carrière = 2.61 × 286 = 750 kg/m³
- Gravier (3/8) = 2.64 × 72 = 190 kg/m³
- Gravier (8/15) = 2.66 × 161 = 428 kg/m³
- Gravier (15/25) = 2.66 × 188 = 500 kg/m³
- Eau total = 176 l/m³
- Adjuvant = 4 kg/m³

- La densité théorique du béton frais = 2448 kg/m³.

Le tableau II.21, représente les quantités de différents composants du béton témoin.

Tableau II.21 : les quantités de différents composants de béton témoin.

Béton Témoin	Ciment (kg/m ³)	Eau (kg/m ³)	E/C	Adj (kg/m ³)	G/S	Sable carrière (kg/m ³)	Graviers (kg/m ³)		
							3/8	8/15	15/25
B1	400	176	0.44	4	1.49	750	190	428	500

1.2.2. Formulation des bétons

Comme notre travail, et la valorisation des sables locaux dans le béton. On a préparée au niveau de laboratoire en totalité cinq formulations ont été étudiés dans ce travail, un béton de référence à base de sable de carrière Kadara (BT), et quatre bétons (B1, B2, B3 et B4) composées de différents mélanges de sable avec un module de finesse fixé au préalable MF = 2.4, selon la formule D'ABRAMS suivant :

✓ Formule D'Abrams [27] :

$$G\% = \frac{MF_d - MF_f}{MF_g - MF_f}$$

$$F\% = \frac{MF_g - MF_d}{MF_g - MF_f}$$

Où:

G % : est le pourcentage de sable grossier ;

F % : est le pourcentage de sable fin ;

MF_d : est le module de finesse souhaité ;

MF_g : est le module de finesse de sable grossier ;

MF_f : est le module de finesse de sable fin.

Les quantités des sables utilisés dans les compositions des bétons étudiés sont résumées dans le tableau (II.22), suivant :

Tableau II.22 : Les quantités des sables utilisés dans les bétons étudiés.

Béton	C kg/m ³	E kg/m ³	E/C	Adj kg/m ³	G/S	Sable kg/m ³			Gravier kg/m ³		
						Carrière	Boussaâda	Oued-Souf	3/8	8/15	15/25
BT	400	176	0.44	4	1.5	750	-	-	190	428	500
B1						-	-	750			
B2						260	-	490			
B3						555	195	-			
B4						448	124	178			

Note :

- Première mélange (Sable carrière + Sable Oued-Souf)

$$\text{Sable de carrière \%} = \frac{2.4-2.07}{3.02-2.07} = 35\%$$

$$\text{Sable d'Oued-Souf \%} = \frac{3.02-2.4}{3.02-2.07} = 65\%$$

- Deuxième mélange (Sable carrière + sable Boussaâda)

$$\text{Sable de carrière \%} = \frac{2.4-0.65}{3.02-0.65} = 74\%$$

$$\text{Sable Boussaâda} = \frac{3.02-2.4}{3.02-0.65} = 26\%$$

- Troisième mélange (Sable carrière + Mélange de sable)

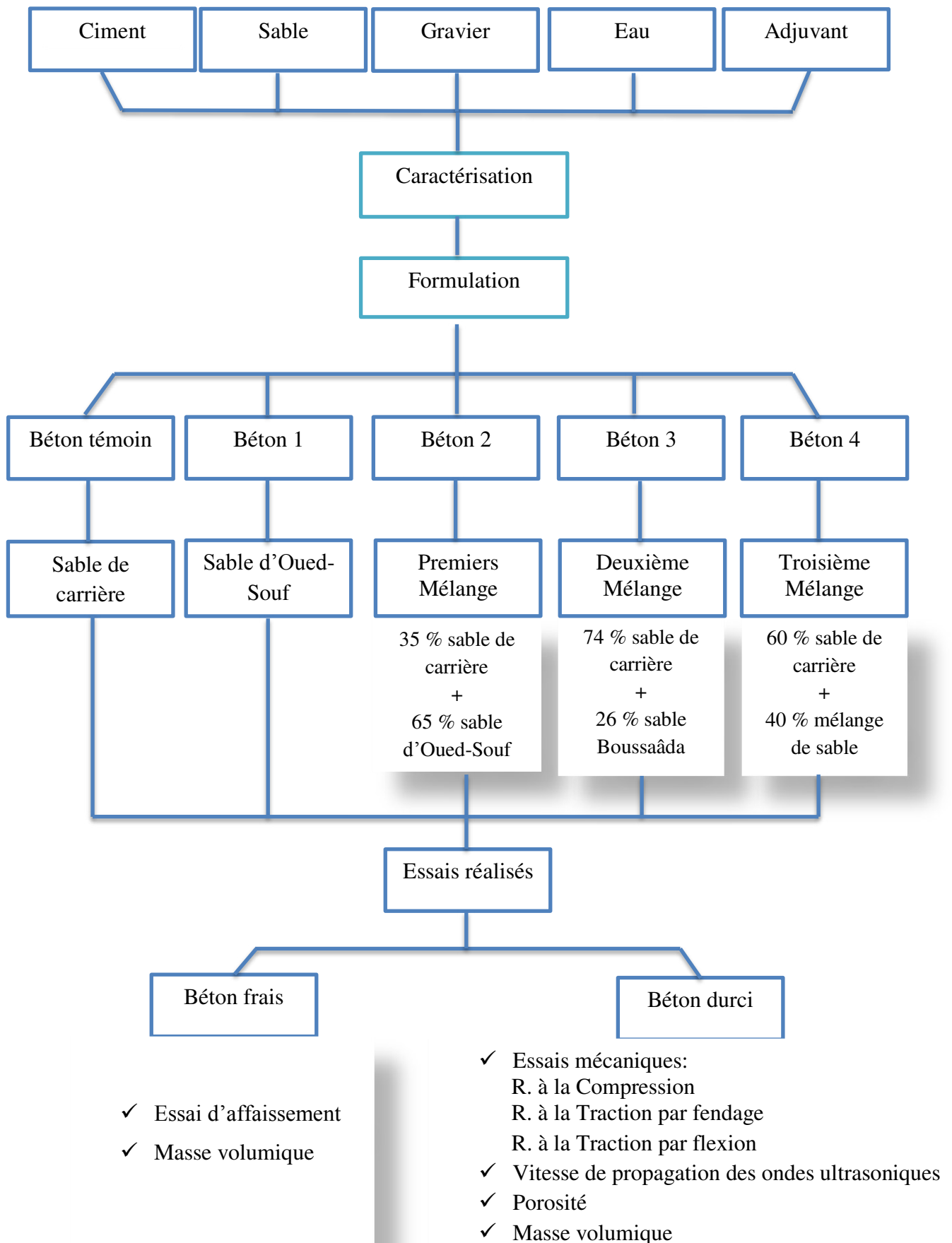
$$\text{Sable de carrière \%} = \frac{2.4-1.5}{3.02-1.5} = 60\%$$

$$\text{Mélange de sable \%} = \frac{3.02-2.4}{3.02-1.5} = 40\%$$

D'après les résultats obtenus on trouve les compositions suivantes :

- Béton 1, (**B1**) : c'est un béton élaboré avec le sable d'Oued-Souf, de module de finesse MF = 2.07
- Béton 2, (**B2**) : c'est un béton élaboré avec le sable de carrière Kadara et corrigé par le sable d'Oued-Souf, (35 % sable de carrière Kadara + 65 % sable Oued-Souf).
- Béton 3, (**B3**) : c'est un béton élaboré avec le sable de carrière Kadara et corrigé par le sable de Boussaâda, (74 % sable de carrière Kadara + 26 % sable Boussaâda).
- Béton 4, (**B4**) : c'est un béton élaboré avec le sable de carrière Kadara et corrigé par le mélange de sable, (60 % sable de carrière Kadara + 40 % mélange de sable).

L'organigramme suivant regroupe les différents constituants des bétons étudiés leurs notation et compositions, ainsi que les essais réalisés.



II.2. PRESENTATIONS DES RESULTATS ET DISCUSSION

Dans la partie précédente, nous avons exposé les caractéristiques des matériaux utilisés, ainsi que la formulation des bétons qui doivent être étudiés.

Cette partie portera sur la présentation et la discussion des résultats des essais expérimentaux obtenus sur les différents bétons testés, à savoir les essais à l'état frais : affaissement au cône d'Abrams et masse volumique, ainsi qu'à l'état durci : résistance mécanique à la compression, à la traction par fendage et t par flexion, masse volumique de béton durci, porosité et vitesse de propagation des ondes ultrasonique.

2.1. ESSAIS REALISE A L'ETAT FRAIS

2.1.1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams

L'essai d'affaissement est réalisé à l'aide du cône d'Abrams selon la norme [NF P 18 -451]. Les valeurs d'affaissement mesurées des bétons étudiés sont présentées dans le tableau (II.23).

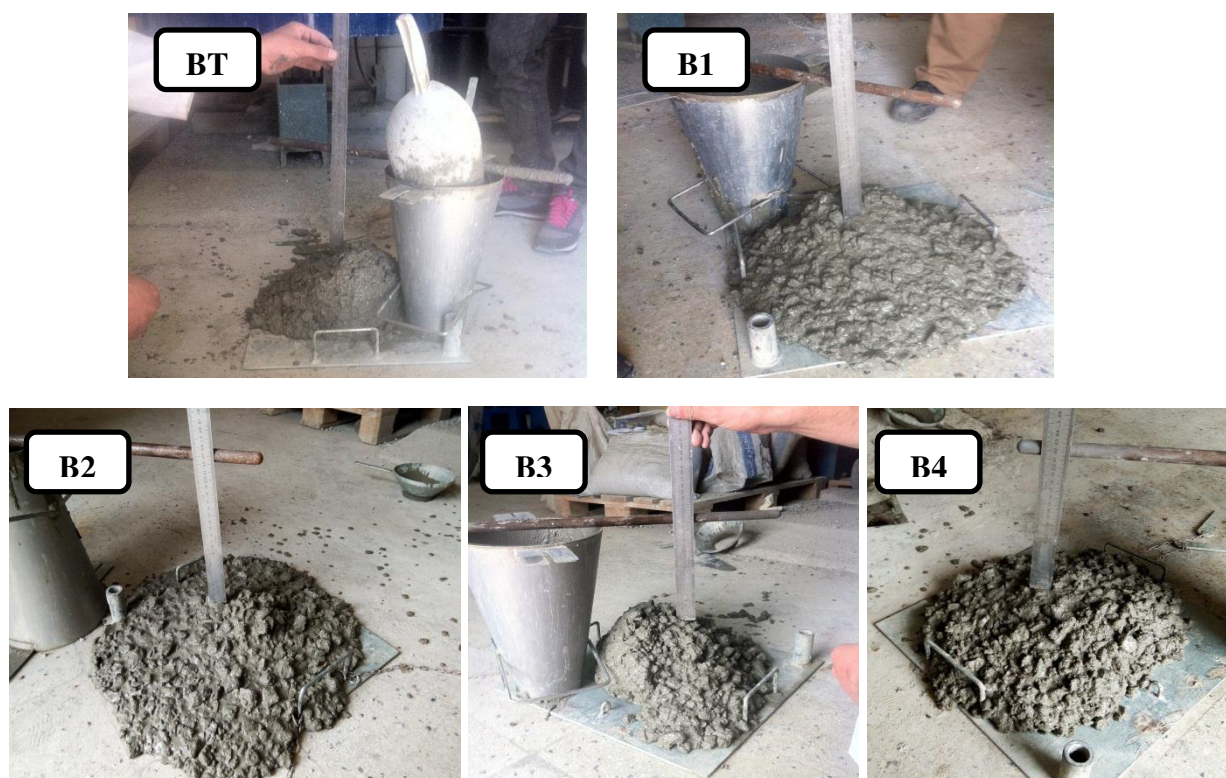


Figure II.8 : Essai d'affaissement au cône d'Abrams sur les différents bétons étudiés.

Tableau II.23 : Résultats d'affaissement des bétons étudiés.

Bétons		Béton T	Béton 1	Béton 2	Béton 3	Béton 4
Affaissement (cm)	T = 0 (min)	19	21	22.5	18	21
	T = 30 (min)	19	21	22	14	18

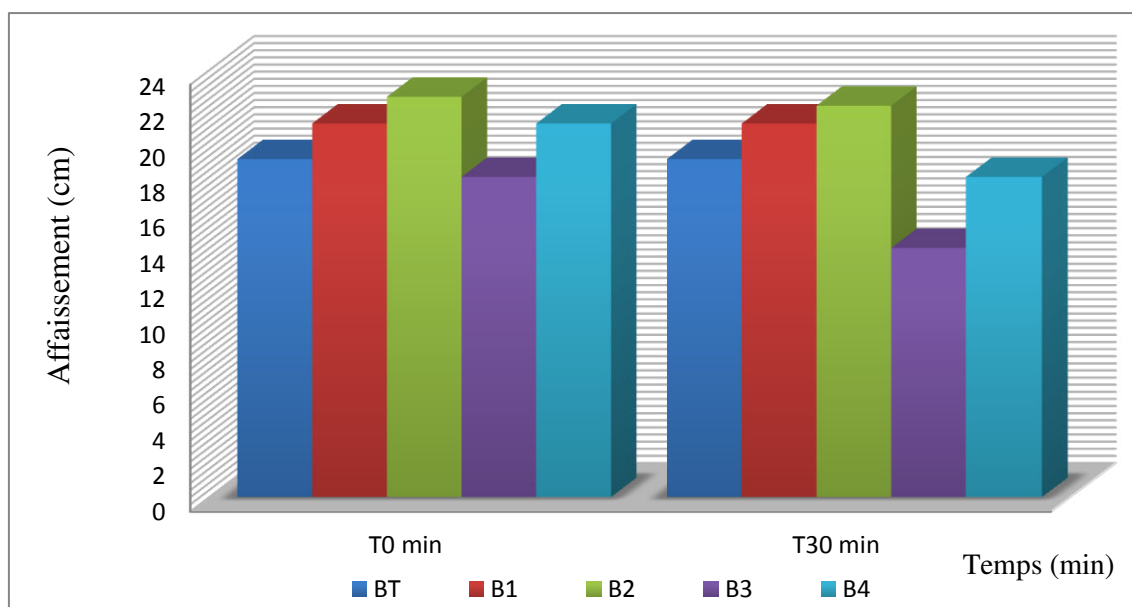


Figure II.9 : Evolution de l'affaissement des bétons étudiés.

La figure (II.9) montre la variation de l'affaissement des bétons étudiés. D'après les résultats obtenus on peut conclure que:

Tous les bétons étudiés dans ce travail sont classés comme des bétons très fluides (classe **S4** : affaissement supérieur à 16 cm), conformément aux prescriptions de la norme française [NF EN 206-1].

L'utilisation de sable de Oued-Souf dans les bétons (**B1**, **B2** et **B4**), améliore légèrement l'affaissement par rapport au béton témoin, cette amélioration est due aux caractérisations géométriques de sable d'Oued-Souf, qui présente un fuseau de granularité admissible ($1.8 < MF < 2.2$), et une forme du grain le plus souhaitable qui se rapproche de la sphère, influe positivement sur la maniabilité, et facilite la mise en œuvre de béton.

Pour le maintien d'ouvrabilité (affaissement après 30 minute) on remarque que le béton élaboré avec le sable d'Oued-Souf (B1) et le béton élaboré avec le sable de Kadara et corrigé par le sable d'Oued-Souf (B3), présentent une stabilité des valeurs d'affaissement (un bon maintien d'ouvrabilité). Cela est dû éventuellement au faible degré d'absorption d'eau des deux sables (KADARA et Oued-Souf).

Une diminution de l'affaissement (à 30 minutes) pour les bétons (B3, B4) est enregistrée, mais ils restent toujours fluides. Cela est due à la présence de sable de Boussaâda dans leurs compositions qui présente une propreté très faible (ES= 33%), c'est un sable argileux contient une quantité élevé des particules argileuses, avec un degré d'absorption d'eau important.

2.2.2. Mesure de la masse volumique

La masse volumique à l'état frais des différents bétons déterminé selon la norme européenne [EN 12350-6]. Le tableau (II.24), présentés les résultats obtenus de la masse volumique mesurée des différents bétons étudiés.



Figure II.10 : Détermination de la masse volumique de béton frais.

Tableau II.24 : Résultats de Masse volumique des différents bétons étudiés.

Bétons	Béton T	Béton 1	Béton 2	Béton 3	Béton 4
Masse volumique (kg/m ³)	2430	2430	2480	2460	2470

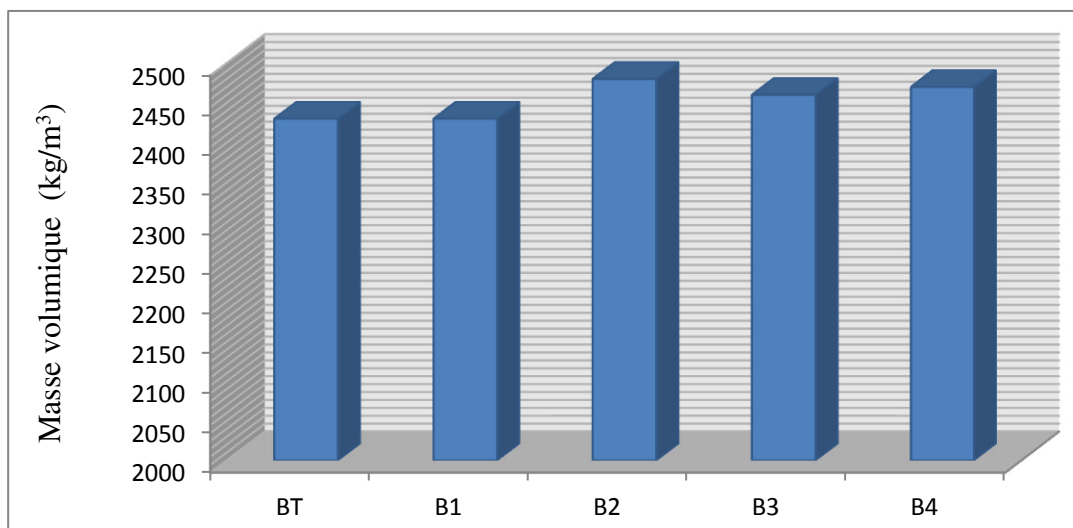


Figure II.11 : Evolution de la Masse volumique des bétons à l'état frais.

La figure (II.11), montre la variation de la masse volumique des bétons étudiés à l'état frais. D'après les résultats obtenus on remarque que :

Tous les bétons étudiés présentent presque la même valeur de masse volumique à l'état frais. Ceci s'explique par l'utilisation des sables de même densité par rapport à celle de sable utilisé dans le béton de référence.

2.3. ESSAIS REALISE A L'ETAT DURCI

2.3.1. Essai de résistance à la compression

L'essai mécanique de compression est déterminée selon la norme française [NF 12390-3] sur des éprouvettes 16*16*32 cm [12390-1]. Nous avons procédé à trois mesures (essais), pour chaque formulation, les résultats obtenus sont consignés dans le tableau (II.24).



Figure II.12 : Exemple de différentes éprouvettes après l'écrasement.

Tableau II.25 : Résultats de l'essai de compression sur les bétons étudiés.

Bétons	Résistance à la compression (MPa)							
	7 jour				28 jour			
	R _c 1	R _c 2	R _c 3	R _c M	R _c 1	R _c 2	R _c 3	R _c M
BT	29	28	31	29	53	53	52	52
B1	23	25	25	25	45	44	46	45
B2	35	35	35	35	50	50	53	51
B3	33	35	32	33	47	46	46	46
B4	31	28	30	29	45	43	42	43

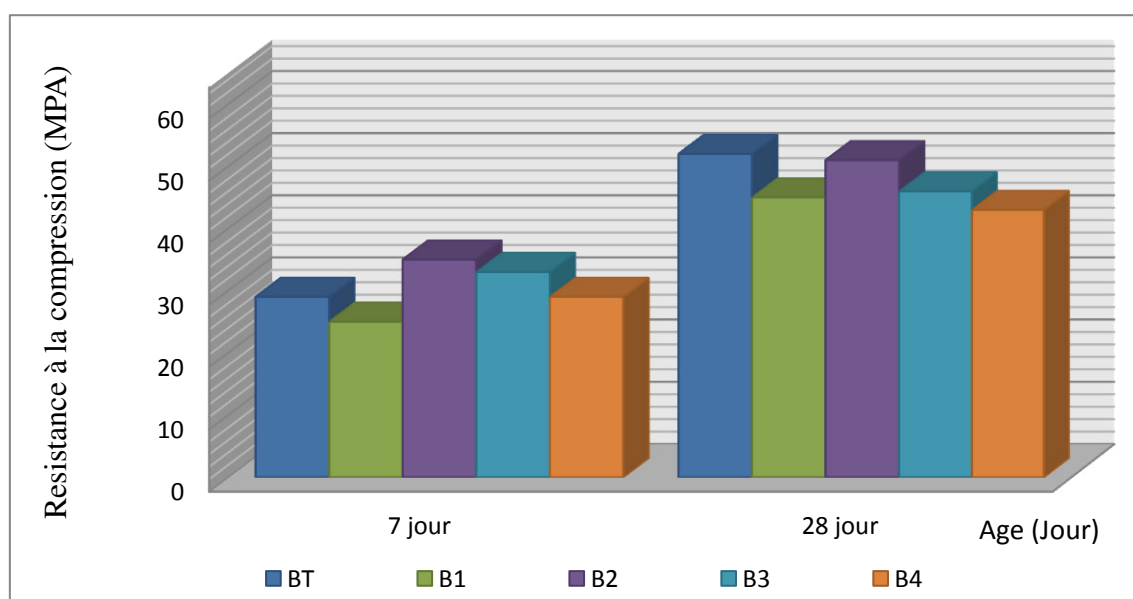


Figure II.13 : Evolution de la résistance mécanique à la compression en fonction de temps.

La figure (II.13), montre la variation de la résistance mécanique à la compression des bétons étudiés en fonction de temps (7 et 28 jour). Les résultats obtenus montrent que :

Le béton (**B1**) à base de sable Oued-Souf, présente une diminution de la résistance mécanique à la compression à 28 jours de l'ordre de (17%) par rapport au béton de référence. Cela est dû à la différence de propreté (ES) des deux sables, ainsi que la forme des grains de sable d'Oued-Souf qui présente une forme arrondis (sphérique) qui provoque une augmentation de la porosité de béton et une chute des résistances mécaniques.

La correction de sable de Kadara par le sable d'Oued-Souf dans le béton (**B2**), diminue légèrement la résistance à la compression à 28 jours, cette diminution est de l'ordre de 4%.

Les différents bétons (**B3**, **B4**) contenant le sable de Boussaâda, présente une chute de résistance à la compression à 28 jour jusqu'à 22 %. Cela est due à la mauvaise propreté de sable Boussaâda (ES=33%), ce sable contient un pourcentage élevé des fines argileuses, ces fines empêchent la cohésion des granulats et provoquent une chute des résistances mécaniques

2.3.2. Essai de résistance à la traction

- **Par fendage**

L'essai mécanique à la traction par fendage est déterminé selon la norme française [NF 12390-6.] sur des éprouvettes [12390-1]. Nous avons procédé à trois mesures (essais) pour chaque formulation, les résultats obtenus sont consignés dans le tableau (II.26).



Figure II.14 : Exemple d'essai à la traction par fendage sur éprouvette 16*16*32 (cm).

Tableau II.26 : Résultats de l'essais de traction par fendage sur les bétons étudiés à 28 jour.

Bétons	Résistance à la traction par fendage (MPa)			
	R _t 1	R _t 2	R _t 3	R _t M
BT	3	3	2	2.5
B1	2.3	2.3	2.3	2.3
B2	3	2.5	2	2.5
B3	2	2	3	2.4
B4	2.5	2.5	2.5	2.3

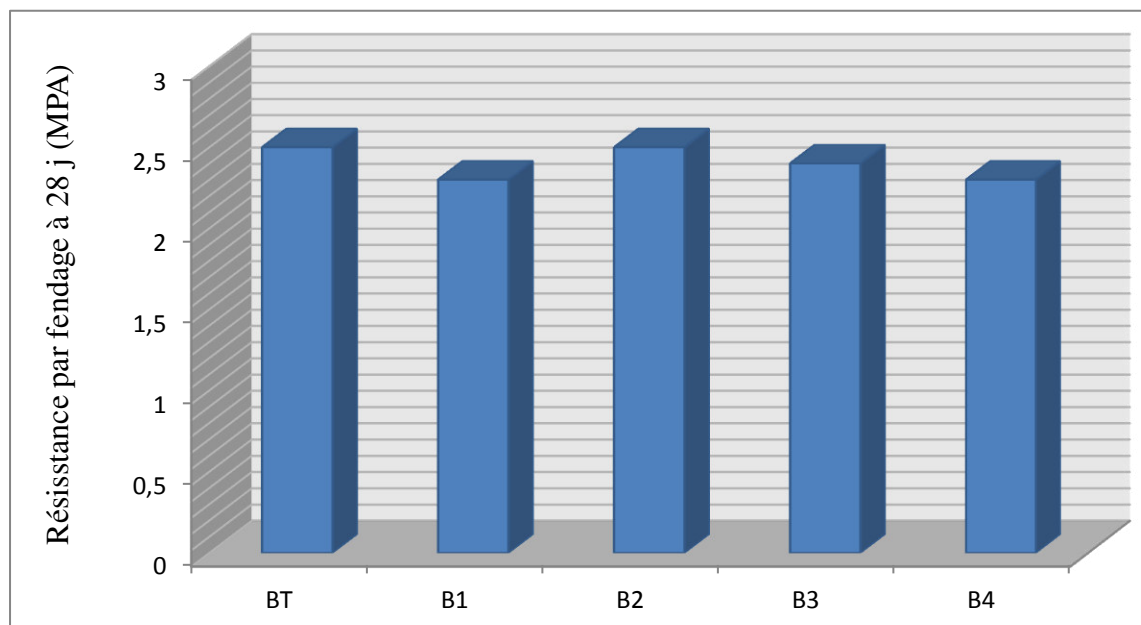


Figure II.15 : Evolution de la résistance mécanique à la traction par fendage des bétons étudiés à 28 jours.

- **Par flexion**

L'essai mécanique à la traction par flexion déterminé selon la norme français [NF 12390-5] sur des éprouvettes 7*7*28 cm [NF 12390-1]. Nous avons procédé à trois mesures (essais), pour chaque formulation, les résultats obtenus sont consignés dans le tableau (II.27).

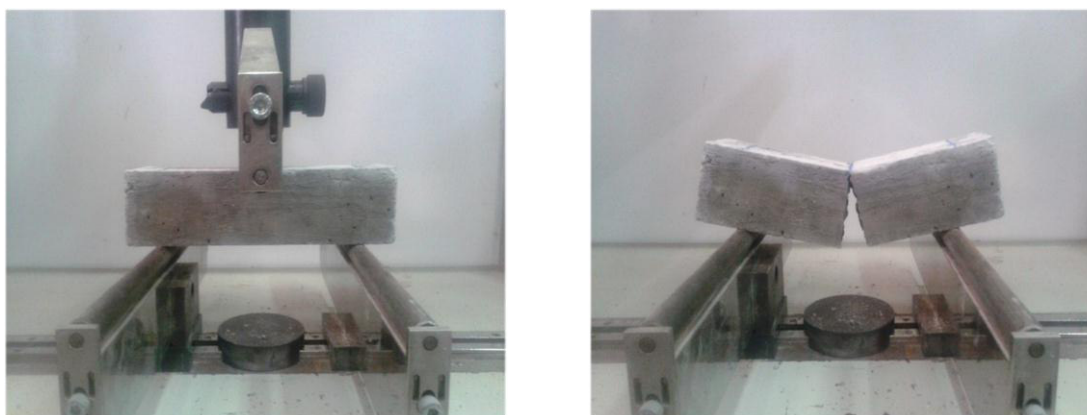


Figure II.16: Exemple d'essai à la traction par flexion sur éprouvette 7*7*28 (cm).

Tableau II.27 : Résultats de l'essai de traction par flexion des bétons étudiés à 28 jours.

Bétons	Résistance à la traction par flexion (MPA)			
	R _{tf} 1	R _{tf} 2	R _{tf} 3	R _{tf} M
BT	2.8	2.6	2	2.5
B1	2.3	2.3	2.5	2.4
B2	2.5	2.5	2.3	2.4
B3	2.5	2	2.6	2.4
B4	2.5	2.5	2.5	2.4

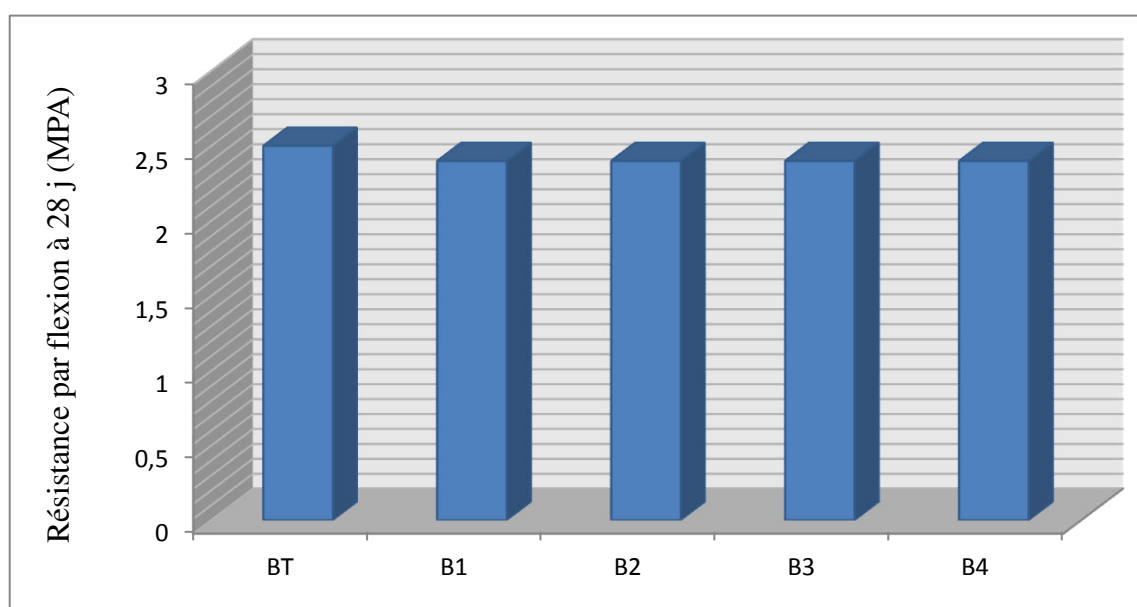


Figure II.17 : Evolution de la résistance à la traction par flexion des bétons étudiés à 28 jours.

Les figures (II.15 et 17), montrent la variation des résistances mécaniques à la traction par fendage et par flexion des bétons étudiés à 28 jours, respectivement. D'après les résultats obtenus on remarque que :

Tous les bétons étudiés présentent des valeurs de résistances à la traction par fendage et par flexion proches à celle de béton de référence celui à base de sable de Kadara. Donc on peut dire que l'influence de dosage et de type de sable est négligeable sur les résistances à la traction.

2.3.3. Mesure de la masse volumique du béton durci

La masse volumique à l'état durci des bétons étudiés déterminé selon la norme français [NF 12390-7]. Le tableau (II.28), présente les résultats obtenus.



Figure II.18 : Détermination de la masse volumique de béton durci.

Tableau II.28 : Résultats de la masse volumique des bétons durci à 28 jours.

Bétons	Béton T	Béton 1	Béton 2	Béton 3	Béton 4
Masse volumique (kg/m ³)	2410	2420	2450	2440	2450

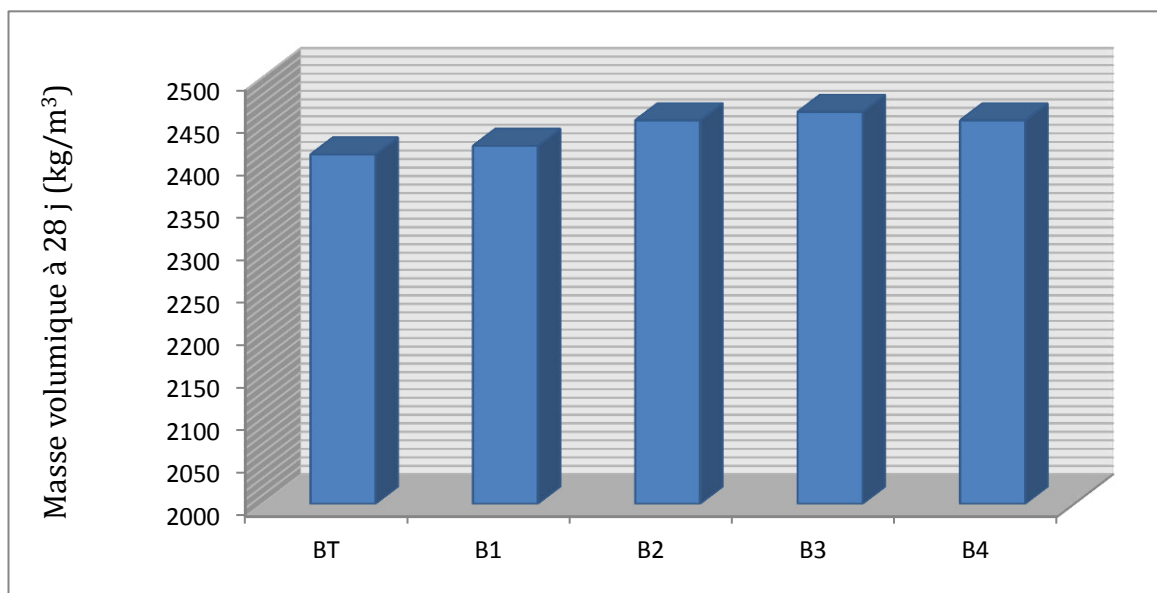


Figure II.19: Evaluation de la masse volumique des bétons étudiés à 28 jours.

La figure (II.19), montre la variation de la masse volumique des bétons étudiés à l'état frais. D'après les résultats obtenus on remarque que :

Tous les bétons étudiés présentent presque la même valeur de masse volumique à l'état durci. Ceci s'explique par l'utilisation des sables de même densité par rapport à celle de sable utilisé dans le béton de référence.

La valorisation des sables locaux étudiés dans notre travail confirme les valeurs de la masse volumique à l'état durci exigée par la norme française [NF 12390-7]. Pour les bétons normales, (la masse volumique à l'état durci à supérieur à 2000 kg/m^3 et inférieure à 2600 kg/m^3 avec une tolérance de 100 kg/m^3).

2.3.4. Mesure de la Porosité

Résultats de la Porosité des bétons étudiés à 28 jours, sont présents dans le tableau (II.29).

Tableau II.29 : Résultats de la Porosité des bétons étudiés à 28 jours.

Bétons	Béton T	Béton 1	Béton 2	Béton 3	Béton 4
Porosité (%)	2.3	2.6	2.6	3.2	3.2

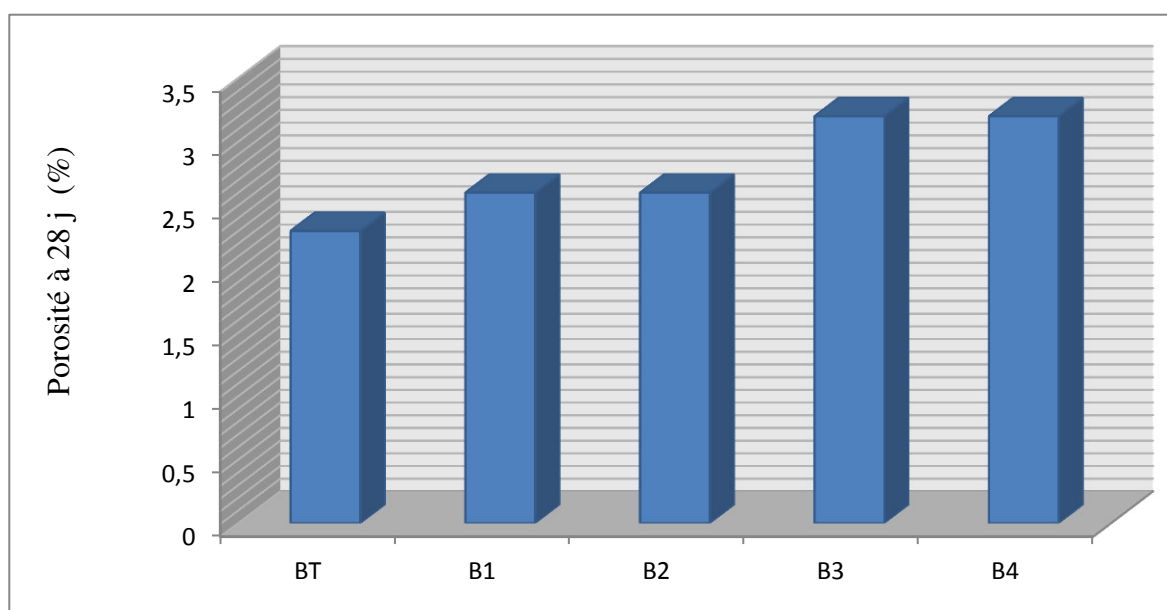


Figure II.20 : Evolution de la porosité des bétons étudiés à 28 jours.

La figure (II.20), montre la variation de la porosité dans les bétons étudiés à 28 jours. D'après les résultats obtenus on remarque que :

La correction de sable de carrière Kadara par le sable d'Oued-Souf, augmente légèrement la porosité du béton de l'ordre de (13 %), cette légère augmentation est due à l'influence de la forme sphérique des grains de sable d'Oued-Souf.

La correction de sable de carrière Kadara par le sable de Boussaâda, augmente la porosité du béton de l'ordre de (40 %), ce qui confirme la chute de résistance de ce béton à 28 jours. Cela est dû à la mauvaise propreté de sable Boussaâda qui contient des fines argileuses, empêchent la cohésion des granulats et provoquent une augmentation de la porosité.

2.3.5. Mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasons

La vitesse de propagation des ondes ultrasons déterminé selon la norme européenne [EN 1250-4]. Nous avons procédé à trois mesures (essais), pour chaque formulation. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau (II.30).



Figure II.21: Détermination de La vitesse de propagation des ondes ultrasons.

Tableau II.30 : Résultats de la vitesse de propagation dans les bétons étudiés à 28 jours.

Bétons	Vitesse de propagation (m/s)			
	V ₁	V ₂	V ₃	V _m
BT	5030	5010	5030	5020
B1	4690	4720	4720	4710
B2	4910	4900	4910	4910
B3	4690	4710	4730	4710
B4	4570	4630	4600	4600

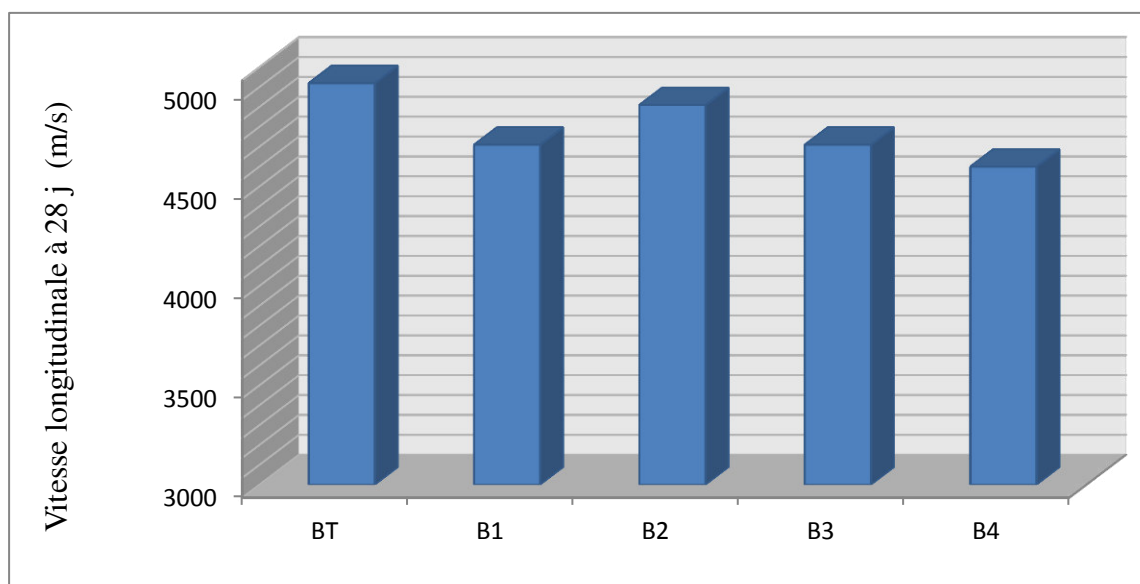


Figure II.22 : Evolution de la vitesse de propagation des ondes ultrasons dans les bétons étudiés à 28 jours.

La figure (II.22), montre la variation de la vitesse de propagation des ondes ultrasons dans les bétons étudiés à 28 jours. D'après les résultats obtenus on remarque que:

Tous les bétons étudiés présentent des valeurs de vitesse de propagation sonique supérieures à 4200 m/s, ce qui correspond à un béton de bonne qualité, sachant que le classement qualitatif exigée par la norme français [EN 1250-4] est comme suit :

- ✓ $2500 \text{ m/s} \leq V < 3200 \text{ m/s}$ béton de faible résistance,
- ✓ $3200 \text{ m/s} \leq V < 3700 \text{ m/s}$ béton de moyenne résistance,
- ✓ $3700 \text{ m/s} \leq V < 4200 \text{ m/s}$ béton à haute résistance,
- ✓ $V \geq 4200 \text{ m/s}$ béton à très haute résistance.

Conclusion

Générale

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail nous a permis de mettre en valeur l'utilisation des sables locaux dans la formulation des bétons ordinaires qui sont plus utilisés dans le domaine de la construction.

Le résultats trouvés après l'élaboration de différentes formulations réalisées par la correction des sables locaux, nous ont permis de tirer les conclusion suivante :

- ✓ L'utilisation de sable d'Oued-Souf dans le béton améliore l'affaissement et le maintien d'ouvrabilité.
- ✓ L'utilisation de sable de Boussaâda dans le béton diminue le maintien d'ouvrabilité.
- ✓ Tous les bétons étudiés présentent presque la même valeur de masse volumique à l'état frais et durci.
- ✓ La correction de sable de Kadara par le sable d'Oued-Souf dans le béton, diminue légèrement la résistance à la compression à 28 jours, cette diminution est de l'ordre de 4%.
- ✓ Les bétons contenant le sable de Boussaâda, présentent une chute de résistance à la compression à 28 jours, jusqu'à 22 %.
- ✓ Tous les bétons étudiés, présentent une stabilité des valeurs de la résistance à la traction par flexion et par fendage.
- ✓ La correction de sable de carrière de Kadara par le sable d'Oued-Souf, augmente légèrement la porosité du béton de, cette augmentation est de l'ordre de 13%. Par contre, la correction de sable de carrière Kadara par le sable de Boussaâda, augmente considérablement la porosité de l'ordre de 40 %.
- ✓ Tous les bétons étudiés, présentent des valeurs de vitesse de propagation sonique supérieure à 4200 m/s, ce qui correspond à un béton de bonne qualité.

Enfin on peut dire que les sables de Oued souf et Boussaâda, peuvent être utilisées avec le sable de carrière Kadara pour la formulation des bétons de qualités, qui vérifiés les critères de maniabilité et de résistances mécaniques, surtout avec le problème d'épuisement en ressources naturelles que fait face le marché des granulats.

Références

Bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] : CIMBÉTON : « Les bétons: formulation, fabrication et mise en œuvre », Paris, 2006.

[2] : Chanvillard et d'Aloia : « Prévion de la résistance en compression au jeune âge du béton, Application de la méthode du temps équivalent, Bull. Liaison Lab. Ponts et Ch. »,1994.

[3] : BOUKLI HACENE Sidi Mohammed El Amine: « CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA RESISTANCE CARACTERISTIQUE DES BETONS DE LA REGION DE TLEMEN », Thèse de Doctorat à L'université aboubekr belkaid, tlemcen, 2009.

[4] : ANDRIAMANANSTILAVO.N: «Comportement des matériaux cimentaires dans un coffrage expérimentation, modélisation et simulation de la poussée et du processus de maturation ». Thèse de doctorat à l'Université de boumerdes, 2003.

[5] : Walther .R et Miehlabradt.M : « Dimensionnement des structures en béton », traité de Génie Civil de l'école polytechnique fédérale de Lausanne, 1990.

[6] : NF EN 197-1 : Ciment - Composition, spécification et critères de conformité des ciment courants indice de classement P 15-101-1.

[7] : NF EN 450 : Cendres volantes pour béton - Définitions, exigences et contrôle de qualité: indice de classement P 18-050.

[8] : NF P 18 -508 : Additions pour béton hydraulique – Additions calcaires-Spécification et critères de qualité : indice de classement P 18-508.

[9] : NF P 18-502 : Additions pour béton hydraulique – Fumée de silice : indice de classement P 18-509.

[10] : NF EN 196 -1 : Méthodes d'essais des ciments – Détermination des résistances Mécaniques : indice de classement P 15 – 471.

[11] : NF EN 1008 : Eau de gâchage pour béton s –Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton indice de classement P 18-211.

[12] : NGUYEN T.L.H : « Outils pour la modélisation de la mise en œuvre des bétons », Thèse de doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées, 139 p, 2007.

[13] : El BARRAK. M : « Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais », Thèse de doctorat à l'université Toulouse III – Paul Sabatier, Juillet. 229 p, 2005.

- [14] : LAPOINTE R : « Contribution à l'étude des méthodes d'injections des fissures dans le béton », Mémoire des études graduées, Université McGill, Montréal, Canada, 1997.
- [15] : Norme Française XP P 18-540 : Granulats - Définitions, conformité, spécifications, indice de classement: P 15-540, 1997.
- [16] : COURS DE MDC : « LES GRANULAT », Université De Setif, (www.univ-setif.dz).
- [17] : BERREDJEM Layachi : « le recyclage des bétons de démolition, solution pour le développement durable. Formulation et comportements physiques et mécaniques des bétons à base de ces recyclé ». Mémoire de magister, Annaba, p 7,2009.
- [18] : A. M. NEVILLE : « Propriétés des bétons », traduit par le CRIB, Edition Eyrolles, 2000.
- [19] : Rappel sur les granulats : « Cours Géomatériaux », (alonet.yolasite.com).
- [20] : EN 13055-1 : Granulats légers — Partie 1 : Granulats légers pour bétons et mortiers, 2002.
- [21] : Norme Française XP P 18-553 : Granulats -Préparation d'un échantillon pour essai, AFNOR 1990.
- [22] : Norme Française EN 932-1: Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats – Partie 1: Méthodes d'échantillonnage, AFNOR 1990.
- [23] : G. DREUX & J. FESTA : « Nouveau guide du béton et ses constituants », Edition Eyrolles, 8^{ème} édition, 1998.
- [24] : Norme Française XP P 18-540 : Granulats - Définitions, conformité, spécifications, indice de classement: P 15-540, 1997.
- [25] : NF EN 933-1 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : Détermination de la granularité — Analyse granulométrique par tamisage Indice de classement : P 18-622-1, 1997.
- [26] : NF EN 933-2 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 2 : Détermination de la granularité — Tamis, dimensions nominales des ouvertures, 1996 Indice de classement : P 18-622-2, 1996.
- [27] : F. GABRYSIK : « Matériaux - Les Granulats - Chapitre 2 », Académie de Nancy-Metz, http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/Batiment_Pro/. P 7.

[28] : R. DUPAIN, R. LANCHAN & J.-C. SAINT-ARROMAN : « Granulats, Sols, Ciments et Bétons », Editions Casteilla, 2^{ème} édition conforme aux normes européennes, 2000.

[29] : Norme Française XP P 18-540 : Granulats - Définitions, conformité, spécifications, indice de classement : P 15-540, 1997.

[30] : Norme Européen EN 12620 : Granulats pour béton hydraulique, 2004.

[31] : Norme Française EN 933-3 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 3 : Détermination de la forme des granulats – Coefficient d'aplatissement", indice de classement P18-622, AFNOR 1996.

[32] : EN 1097-3 : granulat, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 3 : Méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité inter granulaire, indice de classement : P 18-650-3, version française, p 6, 1998.

[33] : EN 1097-6 : granulat Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 , indice de classement : P 18-650-6, 1998.

[34] : Norme Française XP P 18-598 : Granulats- Equivalent de sable, AFNOR, 1991.

[35] : Norme Française XP P 18-597 : Granulats- Détermination de la propreté des sables : équivalent de sable à 10 % de fines, AFNOR, 1990.

[36] : Norme Française EN 933-9 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 9 Evaluation des fines. Equivalent de sable, AFNOR, 1996.

[37] : Norme Française EN 933-9 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 9 Evaluation des fines. Essai au bleu de méthylène, AFNOR, 1996.

[38] : Norme Française P 18-577 : Granulats - Essai Micro-Deval, AFNOR, 1990.

[39] : Norme Française 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.

[40] : Norme Française XP P 18-573 : Granulats - Essai Los-Angeles, AFNOR, 1990.

[41] : NF EN 1097-2 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats – Partie 2 : Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation, indice de classement : P 18-650-2, AFNOR, 1998.

- [42] : ELBACHIR Yasmina : « Effet des différents adjuvants sur la performance du béton », mémoire de Master Professionnel, Université de Mohamed Boudiaf, 2014.
- [43] : NF EN 934-2 : Adjuvants pour béton, mortier et coulis, Définition, exigences, conformité, marquage et étiquetage, indice de classement : P 18-342.
- [44] : CIMBÉTON : « Les constituants des bétons et des mortiers, chapitre 2, Les adjuvants », Paris, 2006.
- [45] : NF EN 934-2 : Adjuvants pour béton, mortier et coulis, Définition, exigences, conformité, marquage et étiquetage, indice de classement : P 18-335.
- [46] : NF EN 934-2 : Adjuvants pour béton, mortier et coulis, Définition, exigences, conformité, marquage et étiquetage, indice de classement : P 18-336.
- [47] : NF EN 934-2 : Adjuvants pour béton, mortier et coulis, Définition, exigences, conformité, marquage et étiquetage, indice de classement : P 18-337.
- [48] : NF EN 934-2 : Adjuvants pour béton, mortier et coulis, Définition, exigences, conformité, marquage et étiquetage, indice de classement : P 18-338.
- [49] : NF EN 934-2 : Adjuvants pour béton, mortier et coulis, Définition, exigences, conformité, marquage et étiquetage, indice de classement : P 18-334.
- [50] : Journée d'information : « ciments – bétons – adjuvants », Les adjuvants Définitions Et opportunités d'utilisation, Organisée par : ERCE- CTC- est – GRANITEX, 2004.
- [51] : Dupain .R et Lanchon .R : « Granulats, sols, ciment et bétons » paris : Ed livre, 276 p.
- [52] : Cormon .P : « Bétons légers d'aujourd'hui », Ed .Eyrolles au radiateur .Editions du BRGM, 1973.
- [53] : Baron .J et Sauterey. R : « Le béton hydraulique Connaissances et Pratique », Presses, 1982.
- [54] : Chanvillard. G et Laplante .P : « Viser une résistance à court terme pour tenir les délais de fabrication ». Les béton bases et données pour leur formulation, 1997.
- [55] : Aitcin .P.C et Baron .J : « Bétons haute performance », Ed. Eyrolles, 1996.
- [56] : CIMBETON : « Le ciment est ses applications », fiches technique, 2000.
- [57] : Bresson .J : « Prévision des résistances », paris, tech batim. Trav. public, 387 p, 1980.

- [58] : DREUX. G : « Nouveau guide du béton. », Edition Eyrolles, 2^{ème} édition, 1979.
- [59] : Mr BOUFEDAH BADISSI Ahmed : « influence de la granularité classe granulaire 4/22. Sur les caractéristiques des granulats et sur les propriétés des bétons ordinaires », Mémoire de Magister, université Mentouri Constantine, 2011.
- [60] : VENANT.M : « Ciment et bétons. » 2^{ème} édition, 1973.
- [61] : Groupe Eyrolles : « Cône d'Abrams. » Edition Eyrolles.2010
- [62] : EN 12350-6 : Essai pour béton – Partie 6 : Masse Volumique : indice de classement P 18-431, 1999.
- [63] : Norme Française 12390-1 : Essai pour béton durci – Partie 1 : Dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules : indice de classement P 18-438).
- [64] : Norme Française 12390-3 : Essai pour béton durci – Partie 3: Résistance à la compression des éprouvettes : indice de classement P 18-433²⁾.
- [65] : Norme Française 12390-4. Essai pour béton durci – Partie 4: Résistance en compression d'essai caractéristiques des machines : indice de classement P 18-441.
- [66] : Norme Française 12390-6. Essai pour béton durci – Partie 6: Résistance en traction par fendage des éprouvettes : indice de classement P 18-434.
- [67] : Norme Française 12390-5. Essai pour béton durci – Partie 6 : Résistance en traction par flexion des éprouvettes.
- [68] : Norme Française 12390-7. Essai pour béton durci – Partie 7: Masse volumique du béton : indice de classement P 18-435.
- [69] : Norme expérimentale : béton, Auscultation Sonique, AFNOR, Décembre 1989.
- [70] : EN 1250-4 : Détermination de la vitesse de propagation du Ultra Son –Partie 4 : indice de classement P18-418.
- [71] : UTSI. S, EMBORG .M, CARSWARD. J : “Relation between workability and rheological parameters”, Therd International RILEM symposium on self-compacting concrete, RILEM Publication s.a.r.l, 2003.
- [72] : Neville .A.M : « Propriétés des Bétons », Traduit par le CRIB, Ed. Eyrolles, Paris, 2000.

[73] : ALEXANDER K.M, IVANUSEC I : "Long term effects of cement SO₃ content on the properties of normal and high-strength concrete, Part I. The effect on strength, Cement and Concrete Research", 12, N° 1, p 51-60, 1982.

[74]: NIELSEN L.F : "Strength development in hardened cement paste: examination of some empirical equations", Materials and Structures, 26, N° 159, p 255-60, 1993.

[75] : OLLIVIER J.P., BUIL M : « Conception des bétons : la structure poreuse, La durabilité des bétons », Presses de l'école Nationale des Ponts et Chaussées, Eds, Paris, 1992.

[76] : BARON J., OLLIVIER J.P : « Les bétons bases et données pour leur formulation », Edition Eyrolles, 522 p, Paris, 1996.

[77] : TALEB O., GHOMARI F., BOUKLI HACENE S.M.A. : « Modélisation des bétons autoplaçants par les plans d'expériences », 1st International Conférence on Civil Engineering, Laghouat Université, Alegria, 2012.

[78] : Ayad Mohamed et barka yassine : « modélisation des bétons ordinaires par des plans d'expériences », mémoire de master, Tlemcen, 2013.

[79] : LAZAR KHALED : « CARACTERISATION ET VALORISATION DU SABLE DU GRAND ERG ORIENTAL ». Résumer mémoire de magister, U.S.T.H.B.

[80] : Pierre Bédard : « Clef d'identification visuelle des grains de sable », version 1,0, 2014.

[81] : Azzouz Hocine : « étude des bétons à base des sables de dune », Mémoire de Magister Université Mohamed kheider, biskra, 2009.

[82] : REZIG Salima : « Optimisation de la formulation du béton de sable dans le cadre de valorisation des matériaux locaux », Université Mohamed Khider, Biskra.

[83] : Philippe Chevalier Jean-Christophe Van den Schrieck : « Le sable naturel en Région Wallonne », Août 2011.

[84] : TAFRAOUI Ahmed : « Contribution à la valorisation du sable de dune de l'erg occidental, (Algérie). Application aux nouveaux bétons », THESE DE DOCTORAT, Université de Toulouse, 2009.

[85] : Benchaâ Benabed¹, Lakhdar Azzouz¹, El-hadj Kadri², Akram Salah Eddine Belaidi¹, Hamza Soualhi² : « Propriétés physico-mécaniques et durabilité des mortiers à base du sable de dunes », Université Amar Telidji de Laghouat, Algérie, Chambéry, Savoie, 6 a 8 juin 2012.