

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
Ecole Nationale Polytechnique

Ecole Nationale Polytechnique

Ecole doctorale : Ingénierie et Environnement

Option : Construction et Environnement

Mémoire de magister en génie civil

Présenté par :

CHELLALI MOHAMED TAYEB

Ingénieur en travaux publics

THEME

Contribution à la valorisation du sable de dune de Boussaâda
dans la confection des bétons de construction

Soutenue devant le jury :

Président : Mme. MORSLI Meriem

Maître de conférences, ENP, Alger

Rapporteur : Pr. BALI Abderrahim

Professeur ENP, Alger

Examineurs : Mme KETTAB Ratiba

Maître de conférences, ENP, Alger

Mr SILHADI Kamel

Maître de conférences, ENP, Alger

Année Universitaire 2008/2009.

ملخص :

في صناعة الخرسانة تلعب الرمال دورا كبيرا في تحديد جودة المنتج، سواء كان ذلك من ناحية المظهر أو من ناحية الخصائص الميكانيكية للمنتج، اختبار الرمال يحدد بوضوح النتائج النهائية للتصنيع ، هذه الدراسة توضح التأثير النوعي للكثبان الرملية في صناعة الخرسانة.

من المعروف جيدا أن هذه الجزيئات الرقيقة جدا تسهم في تحديد صفات ليونة و مرونة الخرسانة، لكن أحيانا لها تأثير سلبي على المقاومة.

مجموع الرمال وضعت تحت اختبارات و تحاليل مختلفة: تحاليل فيزيائية و كيميائية و النتائج الإجمالية لهذه الاختبارات سمح لنا باستقراء مدى إمكانية استعمال هذه الكثبان الرملية في الخرسانة.

نختار وحدة النعومة كعامل أساسي و نقوم بتغييرها بنسب و بنسب مختلفة و نقيس و نلاحظ تصرف مختلف خصائص الخرسانة المدروسة، المرونة و الليونة، المقاومة و الانسحاب مراعين في ذلك ثبات نسبة هبوط المخروط.

نتائج قياس أبعاد حبيبات الكثبان الرملية غير جيدة لأنها رمال رقيقة جدا و ناعمة مما يعطي مقاومة ضعيفة و تتطلب كمية ماء كبيرة مما يؤدي إلى تشققات مهمة في الخرسانة بعدما تجف و هذا يعني أن نتائج الخصائص المدروسة غير جيدة و عليه فمن غير الممكن أن تحل الكثبان الرملية محل الرمال الخشنة في الخرسانة إلا بإجراء بعض التصحيحات.

مفاتيح: رمل الكثبان, خرسانة, بناء, صلابة, أبعاد.

Résumé :

Dans l'industrie du béton, les sables sont souvent déterminants pour la qualité des produits. Que ce soit pour l'aspect ou pour les contraintes mécaniques du produit, le choix des sables conditionne clairement le résultat final de la fabrication. Cette étude décrit qualitativement l'influence des sables des dunes sur la production du béton.

Il est bien connu que ces éléments fins et très fins contribuent aux qualités de plasticité et d'ouvrabilité du béton, on leur attribue parfois une influence néfaste sur les résistances.

Les différents sables (sable de dune et sable grossier) ont été soumis aux divers essais et analyses à savoir : les essais granulométriques, essais physiques et les essais chimiques. L'ensemble des résultats de ces essais nous a permis d'établir les différentes perspectives d'utilisation des sables de dune.

On choisit le module de finesse comme paramètre de base en le faisant varier systématiquement dans de larges proportions et en mesurant ou observant le comportement et les diverses qualité des bétons ainsi réalisés : ouvrabilité, résistance, retrait, en adoptant comme constante l'affaissement.

La mauvaise granulométrie du sable de dune ; sable très fin donne des résistances faibles, et demande une quantité d'eau élevé qui donne un retrait important ce qui veut dire que les résultats des caractéristiques testées est non satisfaisantes. Alors il n'est pas possible de remplacer le sable grossier du béton classique par un sable de dune sauf en introduisant une certaine correction.

Mots clés : Sable de dune, Béton, Construction, Résistance, Granulométrie.

Abstract:

In the concrete industry, sand is often determinant to product quality. Whether for appearance or for mechanical product, the choice of sand determines clearly aim of manufacturing. This qualitative study describes the influence of dune sand on the production of concrete. It is well known that these fine and very fine elements contribute to the plasticity and workability of concrete; they are sometimes credited with an adverse effect on resistance. The various sands (dune sand and coarse sand) were subjected to various tests and analysis such as particle size grading, sand equivalent test and physical tests and chemical test. The overall results of these tests allowed us to establish the different perspectives of use of dune sand in concrete. We choose the finesse module as a basic parameter varying systematically in large proportions and measuring or observing the behaviour and the various qualities and made of our concrete mixtures: workability, strength, shrinkage, taking as constant the slump. Inadequate size of fine dune sand, sand provides low strength, and requires a high amount of water that gives a high shrinkage which means that the results of the tested characteristics are unsatisfactory. So it is not possible to replace the coarse sand of conventional concrete with a sand dune, only if we use correction.

Key words: Dune Sand, Concrete, Construction, Strength, Grading.

Remerciements

- ✚ Tout d'abord, je remercie Dieu, le Tout Puissant, de nous avoir donné la volonté et le courage afin d'arriver à la finalité de ce modeste travail.
- ✚ Ensuite, je remercie mes parents qui m'ont beaucoup soutenu pendant toute ma vie et qui continueront à m'aider dans tous les projets de l'avenir. Ainsi que tous les membres de ma famille qui ont participé à m'encourager et m'aider dans mon projet.
- ✚ Je remercie mon professeur comme je le dit toujours et mon directeur de thèse professeur A. BALI pour son aide, ses conseils et sa disponibilité à la réalisation de ce travail.
- ✚ Mes remerciements vont également à tous les membres de jury de m'avoir fait l'honneur d'examiner ce modeste travail et faire leurs suggestions.
- ✚ Je remercie M^{eme} R.KETTAB et M^{eme} DEBICHE pour l'aide qu'elles m'ont donné.
- ✚ Je remercie le personnel du LCTP Hussein Day.
- ✚ Je remercie Mr. HANNICHE Abderrahmane mon amis et mon camarade de promotion et qui ma aidé moralement et physiquement tout le long de ce travail.
- ✚ Je remercie également M^{elle} S.BEDJOU et Mr Y. BENNA du CNERIB pour l'aide qu'ils m'ont apporté.
- ✚ Je remercie également mes camarades de promotion.
- ✚ Je remercie toute personne ayant, à divers titres, contribué à faire avancer ce travail.

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Les sables	
1. Introduction	3
2. Définition d'un sable	3
3. Historique	3
4. Origines du sable	4
5. Caractéristiques des sables	4
6. Propriétés	5
7. Classification d'un sable	6
8. Différents types de sables	7
9. Critère de choix d'un sable	9
10. Sables de dune	17
Chapitre 2 : Le béton	
1. Introduction	19
2. Historique	19
3. Principaux avantages et inconvénients du béton	21
4. Composants du béton	22
5. Préparation de béton	24
Chapitre 3 : Méthodes de formulations	
1. Introduction	28
2. Critères en fonction de la destination des bétons	29
3. Influence du rapport dosage en ciment sur dosage en eau : (E/C).....	33
4. Dosage en eau	34
5. Méthodes expérimentales	35
Chapitre 4 : Contrôle et essais sur béton	
1. Introduction	42
2. Caractéristiques principales du béton durcissant	42
3. Caractéristiques principales du béton frais	47
4. Elasticité du béton	57
5. Effet de Poisson	57

Chapitre 5 : Identification des matériaux utilisés

1. Introduction	58
2. Granulats fins (Sable)	62
3. Sable naturel	64
4. Gravier (8/15)	65
5. Gravier (15/25)	67
6. Eau de gâchage	69
7. Ciment	69
8. Détermination des formulations des bétons utilisés	71
9. 1 ^{ère} étape	77
10. 2 ^{ème} étape	80
11. 3 ^{ème} étape	82

Chapitre 6 : Analyse et discussion des résultats

1. Introduction	90
2. Consistance du béton frais	90
3. Formulations effectuées pour les différents essais	91
4. Béton durci	92
5. Résistance à la traction par flexion	94
6. Essai de retrait	95
Conclusion générale	97
Références bibliographiques	99
Table des matières	101
Annexe	107

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1 :

Figure 1.1 : Fuseau pour la granularité des sables à béton [6]	11
Figure 1.2 : Types de dunes [1]	17

Chapitre 3 :

Figure 3.1 : Courbe granulométrique et dimensions de D [7].....	28
Figure 3.2 : Relation entre (C/E) et la résistance à la compression (f_c) [6].....	33
Figure 3.3 : Méthode de BARON et LESAGE [26].....	38

Chapitre 4 :

Figure 4.1: Variations des résistances en compression d'un béton en fonction de la forme et des dimensions des éprouvettes [15].....	44
Figure 4.2 : Essai sur la résistance d'un béton en traction par flexion [14].....	46
Figure 4.3 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams	48
Figure 4.4 : Mesure de l'affaissement sur table	49
Figure 4.5 : Appareillage pour la mesure de retrait [12]	55

Chapitre 5:

Figure 5.1: Courbe granulométrique.....	70
Figure 5.2: Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériau	75
Figure 5.3: Courbe de mélange pour 0 % de sable de dune	79
Figure 5.4: Courbe de mélange pour 100% de sable de dune	81
Figure 5.5: Courbe de mélange pour 5 % de sable de dune	83
Figure 5.6: Courbe de mélange pour 10 % de sable de dune	85
Figure 5.7: Courbe de mélange pour 15 % de sable de dune	87
Figure 5.8: Courbe de mélange pour 20 % de sable de dune	89

Chapitre 6 :

Figure 6.1: Influence du pourcentage du sable de dune par rapport au rapport E/C	91
Figure 6.2: Résistance à la compression du béton contenant le sable de dune a 28 jours	94
Figure 6.3: Variation du retrait et gonflement en fonction du temps pour les deux modules de finesse	96

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 3 :

Tableau 3.1 : Détermination de D_{max} en fonction du ferrailage et de l'enrobage [6].....	31
Tableau 3.2 : Affaissement au cône conseillé en fonction du type d'ouvrage à réaliser [6].....	32
Tableau 3.3 : Dosage en ciment [29].....	34
Tableau 3.4 : Valeurs optimales de module de finesse des compositions granulaires.....	36
Tableau 3.5 : Valeure de A [6]	40

Chapitre 4 :

Tableau 4.1 : Appréciation de la consistance du béton en fonction de l'affaissement	49
Tableau 4.2 : Valeurs d'étalement à la table	50
Tableau 4.3 : Différents types de retrait	53

Chapitre 5 :

Tableau 5.1 : Appréciation de la dureté MICRO-DEVAL	60
Tableau 5.2 : Appréciation de la résistance à la fragmentation	61
Tableau 5.3 : Analyse granulométrique du sable de dune	62
Tableau 5.4: Propriétés physiques du sable de dune	63
Tableau 5.5 : Analyse chimique sommaire du sable de dune.....	63
Tableau 5.6 : Analyse granulométrique du sable naturel	64
Tableau 5.7 : Propriétés physiques du sable naturel	64
Tableau 5.8: Analyse chimique sommaire du sable naturel	65
Tableau 5.9 : Analyse granulométrique du Gravier (8/15	65
Tableau 5.10 : Propriétés physiques du gravier (8/15)	66
Tableau 5.11 : Analyse chimique sommaire du gravier (8/15)	66
Tableau 5.12 : Analyse granulométrique du gravier (15/25)	67
Tableau 5.13 : Propriétés physiques du gravier (15/25)	67
Tableau 5.14 : Analyse chimique sommaire du gravier (15/25)	68
Tableau 5.15: Analyse granulométrique et caractéristique	68
Tableau 5.16 : Analyse granulométrique et caractéristique	69
Tableau 5.17 : Origine des compositions granulaires du béton	71
Tableau 5.18: Coefficient A	73
Tableau 5.19 : Dosage des granulats avec 0% de sable de dune	77

Tableau 5.20 : Courbe de mélange pour 0% de sable de dune	78
Tableau 5.21 : Dosage des granulats avec 100% de sable de dune	80
Tableau 5.22 : Courbe de mélange pour 100% du sable de dune	80
Tableau 5.23 : Dosage des granulats avec 5 % de sable de dune	82
Tableau 5.24 : Courbe de mélange pour 5 % du sable de dune	82
Tableau 5.25 : Dosage des granulats avec 10 % de sable de dune	84
Tableau 5.26 : Courbe de mélange pour 10 % du sable de dune	84
Tableau 5.27 : Dosage des granulats avec 15 % de sable de dune	86
Tableau 5.28 : Courbe de mélange pour 15 % du sable de dune	86
Tableau 5.29 : Dosage des granulats avec 20 % de sable de dune	88
Tableau 5.30 : Courbe de mélange pour 20 % du sable de dune	88

Chapitre 6 :

Tableau 6.1 : Rapport E/C et l'affaissement du cône d'Abrams	90
Tableau 6.2 : Résumé sur les formulations des différents bétons utilisés	91
Tableau 6.3 : Résistance à la compression du béton contenant le sable de dune a 7 jours	92
Tableau 6.4 : Résistance à la compression du béton contenant le sable de dune a 28 jours....	93
Tableau 6.5 : Résistance à la traction du béton à 28 jours	94
Tableau 6.6 : Variation du retrait et gonflement en fonction du temps pour les deux modules de finesse.....	95

LISTE DES PHOTOS

Chapitre 2 :

Photo 2.1 : Malaxeur	26
Photo 2.2 : Moules	26
Photo 2.3 : Table vibrante	27

Chapitre 4 :

Photo 4.1 : Moules cylindriques	43
Photo 4.2 : Bac d'eau non remplis	44
Photo 4.3 : Table vibrante	44
Photo 4.4 : Eprouvette surfacés	45
Photo 4.5 : Presse électronique	45
Photo 4.6 : Machine automatique de flexion	46
Photo 4.7 : Eprouvette de traction par flexion	46
Photo 4.8 : Cône d'Abrams	48
Photo 4.9 : Appareil de malaxage	54

Chapitre 5 :

Photo 5.1 : Los Angeles	61
Photo 5.2 : Micro Deval	61



*INTRODUCTION
GÉNÉRALE*

Introduction générale

Au regard de la nouvelle législation protectrice de l'environnement qui interdit l'utilisation des sables alluvionnaire qu'ils soient de plages ou d'oueds, la majeure partie des entreprises se sont orientées vers l'utilisation des sables de dune particulièrement de Boussaâda et d'autres localités.

Au vu de ce qui a été sus exposé, nous nous sommes proposés d'entreprendre une étude qui consiste à confectionner le béton avec des sables de dune, et de voir l'impact que peut avoir cette substitution aux sables alluvionnaires et aux sables de carrière. Notre première démarche consistait en la confection d'un béton avec du sable fin et procéder à la substitution des sables alluvionnaire et de carrière et faire tous les essais en laboratoire.

Aujourd'hui, les sables utilisés dans le béton ordinaire en Algérie sont :

- Le sable d'oued lavé.
- Le sable de plage.
- Le sable de concassage.
- Le sable de dune.

Dans l'étude de la composition granulaire des bétons, la présence et la granularité des éléments fins jouent un rôle important. S'il est bien connu que ces éléments fins et très fins contribuent aux qualités de plasticité et d'ouvrabilité du béton, on leur attribue parfois une influence néfaste sur les résistances.

Les différents sables utilisés (sable de dune et sable grossier) ont été soumis aux divers essais et analyses à savoir : les essais granulométriques, essai d'équivalent de sable et des essais physiques tel que la compacité, Los Angles, Micro Deval ; ainsi que les essais chimiques. L'ensemble des résultats de ces essais nous a permis d'établir les différentes perspectives d'utilisation des sables de dune.

On choisit le module de finesse comme paramètre de base en le faisant varier systématiquement dans de larges proportions et en mesurant ou observant le comportement et les diverses qualités des bétons ainsi réalisés : ouvrabilité, résistance, retrait...

Cette étude est consacrée à une contribution à la valorisation du sable de dune de Boussaâda « sud de l'Algérie » dans la confection des bétons de construction. Elle se décompose en six chapitres, en plus de l'introduction et d'une conclusion générale.

Dans la première partie de notre travail, une synthèse bibliographique, en quatre chapitres, est présentée. Cette étude bibliographique s'appuie tout d'abord sur des sources d'information à vocation générale et sur des références spécialisées dans le domaine du matériau.

En premier lieu, une définition générale du sable, ses origines, ses propriétés, les différents types de sable et les critères de choix sont définis. On s'intéresse particulièrement au sable de dunes, sa granulométrie et ses caractéristiques chimiques, morphologiques et physico-chimiques.

Une définition générale du béton et ses constituants est donnée ; elle est basée sur les matériaux utilisés.

Le troisième chapitre présente des méthodes de formulation.

En fin une présentation des différents essais est effectuée.

La 2^{ème} partie composée de 2 chapitres traite de l'influence des granulats notamment du sable sur les qualités du béton ordinaire.

Cette partie donne une appréciation de l'identification des matériaux utilisés qui portera sur l'analyse des caractéristiques physiques et chimiques des granulats leur granulométrie, puis le calcul des dosages du béton en utilisant la formule de FAURY.

En fin une étude comparative entre un béton ordinaire et un béton contenant du sable de dunes à divers pourcentages sera commentée d'après les résultats des essais de laboratoire.

CHAPITRE : 1
LES SABLES

Les sables**1. Introduction**

Les dernières années ont connu une forte demande en béton liée au lancement des opérations de construction des logements sociaux et des travaux autoroutiers nécessitant par voie de conséquence de gros volumes de sable particulièrement le sable des dunes de Boussaâda .

Le béton est un mélange de granulats (sable gravier et éventuellement cailloux) liés entre eux par une pâte de ciment (ciment + eau) dont la quantité de sable est considérable, ce qui revient à dire qu'il y'a une l'influence du sable sur le comportement final du béton.

2. Définition d'un sable

Le **sable** est une roche sédimentaire meuble, constituée de petites particules provenant de la désagrégation d'autres roches dont la dimension est comprise entre 0,08 et 5 mm.

3. Historique

Des sables s'accumulent chaque jour le long des rivières ou sur le littoral. Il n'y a pratiquement pas de sable au grand large. Certains ports construits près des embouchures s'ensablent rapidement ; d'une année à l'autre, les bancs de sable d'une rivière se déplacent vers l'aval. Le quartz est généralement l'élément prédominant dans un sable, c'est un minéral dur qui entre dans la composition de roches telles que les granites ou les gneiss : roches très répandues, surtout dans les massifs montagneux.

L'altération des granites, des gneiss et autres roches dures et cohérentes donne naissance à des grains de quart, à quelques grains de feldspath, de micas et à des particules argileuses. L'usure de ces roches donne aussi des éléments plus gros tels que galets, graviers qui s'altèreront à leur tour.

Les phénomènes d'érosion affectent toutes les régions mais ils sont plus forts et plus rapides en altitude. Les avalanches, les glaciers qui avancent lentement, les eaux de ruissellement, les torrents, les rivières et les fleuves charrient sables et argiles vers la mer. Plus la pente est forte et plus le transport est rapide. Le courant véhicule alors des éléments de grosse taille. En partie basse, vers l'embouchure, le fleuve dépose des sédiments argilo-sableux qui peuvent créer un delta. Pendant leur parcours fluvial, les grains autres que le quartz finissent par s'altérer et disparaître alors que ce dernier résiste beaucoup plus. A l'arrivée en mer, une

sélection des sédiments s'opère. Les grains de sable, plus lourds que les particules argileuses se déposent rapidement. Les courants marins côtiers les étalent pour constituer les plages le long des rivages. La plupart des particules argileuses, très fines, flottent et s'éloignent en pleine mer. Certaines pourront parcourir de très grandes distances avant de se déposer. [23]

4. Origines du sable

4.1. Le vent

A plus grande échelle, les vents véhiculent des particules sur de très grandes distances. Chaque année, ils transportent plusieurs millions de tonnes de poussière et de sables fins.

Quand il se lève, le vent de sable déplace et dépose de très grandes quantités de matériaux. Le paysage alentour peut changer en quelques heures. Le vent chargé de grains mitraille les roches dures faisant naître des formes quelconques.

4.2. L'eau

L'expérience montre que le sable est un matériau poreux et perméable. Poreux : il est capable d'emmagasiner une grande quantité d'eau. Cette dernière correspond au volume des vides entre les grains, soit 200 à 400 litres d'eau par mètre cube de roche. Le sable est perméable et l'eau circule facilement dans les espaces libres entre les grains. Chemin faisant, elle s'y débarrasse de ses éventuelles impuretés : le sable joue le rôle d'un filtre. L'eau, versée boueuse au-dessus d'une couche, ressort claire et propre.

Dans la nature, les eaux de pluie s'infiltrent facilement dans les couches de sable et descendent jusqu'à la rencontre d'un niveau imperméable ; cela donne la nappe souterraine. Une telle nappe est mobile, s'écoule régulièrement dans le sens du pendage des couches et ressort à l'air libre au niveau des sources. Pendant leur parcours, ces eaux abandonnent leurs impuretés. [23]

5. Caractéristiques des sables

Une particule individuelle est appelée *grain de sable* ; les sables sont classés selon leur granulométrie (grosseur des grains).

Le sable se caractérise par sa capacité à s'écouler, plus les grains sont ronds, plus le sable s'écoule facilement. Le sable artificiel, obtenu par découpage ou broyage mécanique de roches, est principalement composé de grains aux aspérités marquées. On peut également différencier un sable qui a été transporté par le vent d'un sable transporté par l'eau. Le premier

est de forme plus ronde, sphérique, alors que la seconde est plus ovoïde. De plus, **le sable éolien** présente une diaphanéité plus mate que **le sable fluviatile** ou marin qui est dit "**émoussé-luisant**". L'aspect de la surface du grain de sable éolien est dû aux multiples impacts que subit le sable lors de son déplacement.

Le sable est issu de l'érosion des roches par le vent et par l'eau, il est majoritairement composé de grains de quartz (en ce cas il est blanc crème). Sa composition traduit en général la roche dont il provient :

- Roche volcanique : olivine, magnétite (minéraux noirs)
- Granite: contient du feldspath
- Dolomite : dolomies
- Gypse (très blanc)
- Glauconie (vert)

Mais il peut être teinté par de l'oxyde de fer (rouge à orange) ou à la suite de la présence de paléopodzol (mauve à violet).

Le sable peut avoir plusieurs couleurs en fonction de sa nature : noir ou blanc (exemple de sable blanc : gypse, White Sands ou sable noir...etc).

Les grains de sable sont assez légers pour être transportés par le vent et l'eau. Ils s'accumulent alors pour former des plages ou **des dunes**. [23]

6. Propriétés

Le sable forme naturellement des pentes stables jusqu'à environ 30°, au-delà de cet angle, il s'écoule par avalanches successives pour retrouver cette pente stable. Cette propriété peut être exploitée pour étudier des formes parfaites générées par l'écoulement du sable sur des plaques de formes différentes. Par exemple, en faisant couler du sable sur un socle de forme carrée, le sable va former une pyramide parfaite avec des pentes de 30°.

On peut caractériser les sables selon leur origine naturelle ou artificielle.

- Les sables naturels sont le produit d'une désagrégation naturelle des roches.
- Les sables artificiels ou sable de concassage sont produits par concassage mécanique au départ de roches saines non schisteuses (porphyre, calcaire, grès, quartzite).

7. Classification d'un sable

On peut classer les sables selon trois paramètres dont :

7.1. Granulométrie

Elle permet de séparer les sables en trois catégories :

- **Sables fins** : plus de 75% des éléments supérieurs à 80 μm , sont inférieurs à 0,5mm. Ces sables doivent être notablement corrigés pour acquérir des propriétés comparables à celles des graves.
- **Sables moyens** : Moins de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80 μm sont compris entre 0,2 et 2mm.
- **Sables grossiers** : Plus de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80 μm sont compris entre 0,5 et 5mm. Ces sables ont des propriétés qui se rapprochent des graves. [13]

7.2. Propreté

La propreté d'un sable est une caractéristique déterminante ; elle est appréciée soit par l'essai d'équivalent de sable, soit l'essai au bleu de méthylène. Afin de donner des limites pour chaque type de sable, le deuxième essai est plus précis, car il est réalisé sur la totalité du sable en écrétant toutefois le matériau à 6,3mm. Le résultat obtenu doit être exprimé en gramme de bleu.

Pour 100 grammes de sable, la valeur de bleu de méthylène est notée VBS.

Dans cette classification, on distingue quatre (04) catégories définies comme suit :

- 1) $VBS \leq 0,2$: sable propre
- 2) $0,2 \leq VBS \leq 0,4$: sable légèrement pollué.
- 3) $0,4 \leq VBS \leq 1$: sable pollué.
- 4) $VBS > 1$: sable très pollué. [24]

7.3. Nature minéralogique

En général, les sables peuvent être classés comme suit :

- Sables siliceux.
- Sables silico-calcaires.
- Sable calcaires.

7.4. Teneur en fines**7.5. Teneur en matière organique et sa nature.****8. Différents types de sables**

On peut distinguer deux types de sable :

8.1- Sables naturels

Comme leur nom le définit, ce sont des matériaux qui proviennent de la nature. Ils sont le résultat d'un processus complexe d'érosion et de sédimentation. Leur formation s'effectue en trois étapes successives : la décomposition sur place des différentes roches suivie d'un transport qui les amène à un dépôt où ils demeurent sous différentes formes. Les plus rencontrés et les plus connus sont :

8.1.1 - Sables fluviaux

On les trouve dans les fleuves et les rivières et éventuellement sur leurs côtes; ce sont des restes d'altération transportés par ces cours d'eau et déposés avant d'atteindre la mer.

En raison de la courte distance de transport, les grains de ces sables sont plus grossiers, mal concassés et présentent une forme anguleuse et un aspect très rugueux. [13]

8.1.2- Sables marins

Les éléments de petite taille, peu affectés par l'action fluviale, parviennent à la mer et s'y trouvent au fond. Ils sont mélangés à d'autres éléments provenant de l'action d'arrachement de la mer aux côtes et finissent par se déposer après avoir subi un long frottement. Les sables marins se caractérisent par leur petite taille de forme anguleuse.

8.1.3- Sables marins littoraux

On trouve ces sables dans les régions littorales. Ils se caractérisent par une granulométrie uniforme, des grains fins qui peuvent contenir de grandes quantités de minéraux rares; ils peuvent aussi avoir de fortes teneurs en calcaire ou en être complètement privés.

8.2- Sables du Sahara**8.2.1- Sables éoliens**

Ils sont constitués des grains de sable d'origine quelconque et se trouvent dans plusieurs régions du désert sous forme de dunes. (exemple de sud algérien). Leur origine est très différents, ils sont pris et déposés par le vent. Ils se caractérisent par une granulométrie

uniforme de taille moyenne (autour de 5mm), de grains arrondis et dépolis à cause de nombreux chocs entre eux. La vitesse du vent, son pouvoir portant ainsi que les distances de transport sont les seuls facteurs qui déterminent la taille des grains. [13]

8.2.2- Dépôt alluvionnaire

Les sables de rivière rencontrés se trouvent soit dans des oueds à écoulement fréquent de la bordure de l'Atlas (dépôts actuels), soit dans des lits d'anciens oueds dont l'écoulement remonte à des époques géologiques antérieures.

8.2.3- Sables de regs

Le reg est une formation de surface qui recouvre de vastes zones plates ou à relief très mou. L'action du vent a balayé le sable fin et enrichi la surface d'éléments plus gros tels les cailloux, gravier, gros sable, qui se trouvent déposés d'une manière régulière.

8.2.4- Sables géologiques en place

On peut ranger sous cette dénomination des formations continentales de sols fins, tels les sables argileux du continental intercalaire (appelé parfois albien), qui affleurent à la bordure ouest et sud du Sahara central et oriental (Reggane, Adrar, In Salah, plateau du Tahouratine).

[13]

8.2.5- Sables gypseux

Ce sont des sables contenant des proportions variables de gypse et étant soit des sables géologiques en place, soit des dépôts alluvionnaires.

8.2.6- Sables gypso-calcaires

Dans les plateaux entre Ouargla et Hassi Messaoud, on trouve sous une dalle de calcaire assez dure de surface, un mélange de cailloux calcaires mi-durs et de sable gypso-calcaire.

9. Critère de choix d'un sable

Le choix des matériaux de construction de base, tels que les sables qui rentrent dans la confection des mélanges composés, doit être dicté par un certain nombre de considérations afin d'atteindre les objectifs recherchés (résistance, durabilité,...). Selon le rôle du sable, ces considérations sont plus ou moins sévères.

Il paraît nécessaire d'établir une détermination physique plus approfondie. Pour cette étude, un certain nombre de caractères physiques ont été retenus.

Ce sont :

- La granulométrie.
- Le module de finesse.
- La densité apparente et la densité réelle.
- Le foisonnement.
- La porosité et la capacité de rétention.
- La perméabilité.
- L'angularité.
- La Propreté
- La forme.
- La dureté et friabilité.
- L'analyse chimique. [18]

9.1- Granulométrie

C'est la caractéristique physique essentielle pour l'identification des matériaux, puisque la notion de sable est basée sur le critère de taille des éléments.

La granulométrie nous permet de déterminer la répartition des grains suivant leurs grosseurs. Elle permet de classer et de définir d'après la grosseur des grains qui les composent, les différents matériaux employés dans la construction.

9.2- Module de finesse

Le module de finesse d'un granulat égal au $1/100^e$ de la somme des refus, exprimé en pourcentage sur les différents tamis de la série suivante :

0,16 – 0,315 – 0,63 – 1,25 – 2,5 – 5 – 10 – 20 – 40 et 80 mm.

Le module de finesse étant presque exclusivement vérifié sur les sables, les tamis concernés sont :

0,16 – 0,315 – 0,63 – 1,25 – 2,5 et 5 mm

Le module de finesse est plus particulièrement appliqué aux sables dont il est une caractéristique importante.

C'est une caractéristique intéressante, surtout en ce qui concerne les sables. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse d'environ 2,2 à 2,8 ; par exemple un sable qui a une majorité d'éléments fins et très fins nécessite une augmentation du dosage en eau et pour un sable qui manque de fines, le béton y perd en ouvrabilité.

La norme indiquée d'ailleurs, pour les catégories A et B de sable, une limite inférieure $L_i = 1,8$ et une limite supérieure $L_s = 3,2$.

Des recherches sur l'influence de la finesse des sables sur les diverses qualités du béton ont conduit à délimiter certains fuseaux de granularité admissible tels que ceux représentés sur la **figure 1.1**:

- La partie centrale A ($2,2 < M_f < 2,8$) convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités.
- La partie supérieure B ($1,80 < M_f < 2,20$) est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance.
- La partie inférieure C ($2,8 < M_f < 3,2$) correspond à des sables à utiliser dans la recherche de résistances élevées, mais on aura, en général, une moins bonne ouvrabilité et des risques de ségrégation. [7]

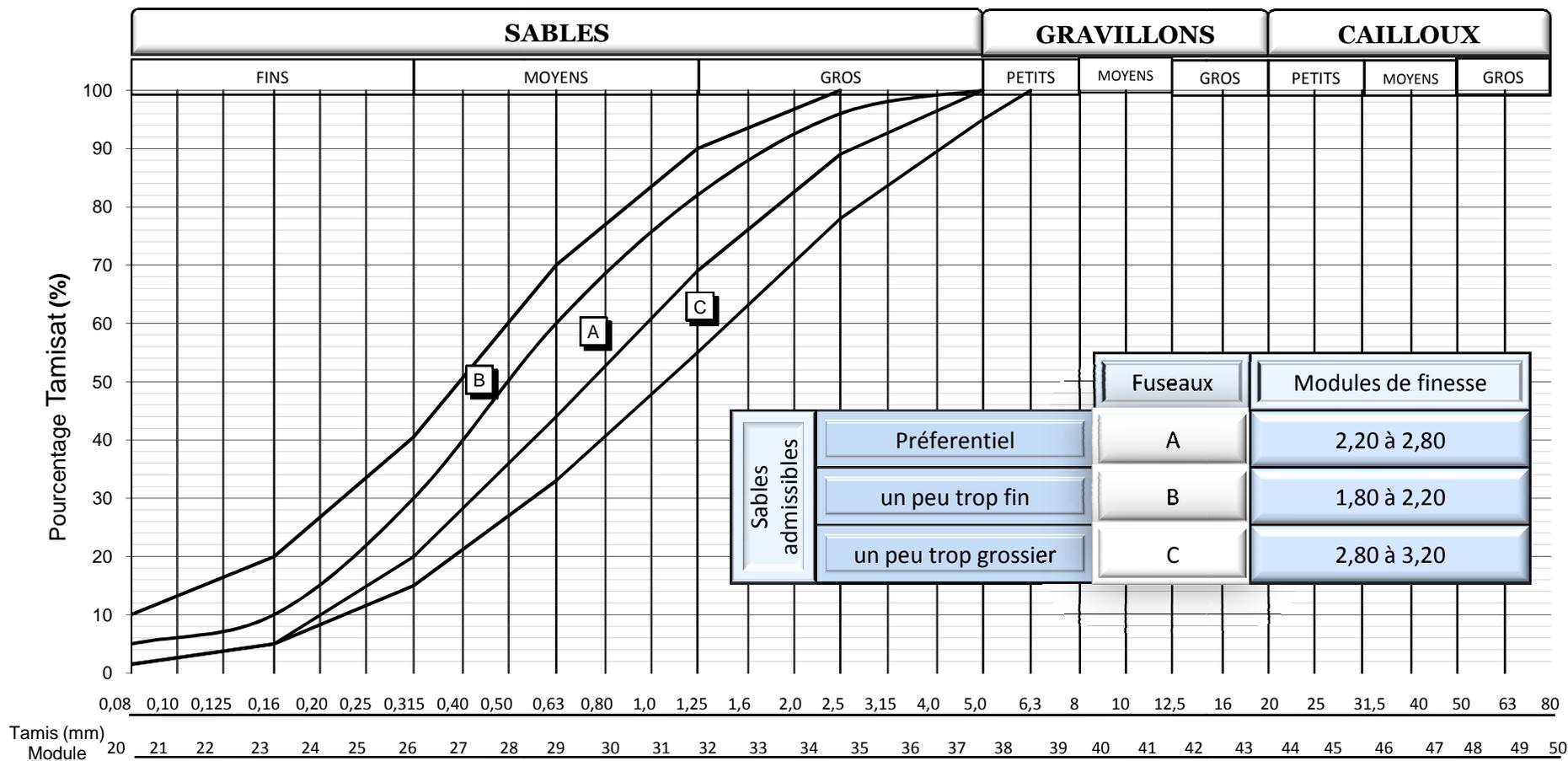


Figure 1.1 : Fuseau de référence pour la granularité des sables à béton [6]

9.3- Densité apparente (D_a) et la densité réelle (D_r)

La densité apparente d'un échantillon de terre ou de sable correspond à sa masse volumique. Cette mesure tient compte non seulement de la matière, mais aussi des espaces lacunaires. Quant à la densité réelle, elle se mesure après avoir retiré l'air des espaces lacunaires, et par conséquent, ne tient compte que de la partie solide de l'échantillon. Il en découle une faible amplitude.

Par conséquent, il est logique de retrouver un lien entre la densité apparente et la porosité.

9.4- Foisonnement

En complément de la densité apparente qui est, comme nous l'avons vu plus haut, le rapport de la masse sur le volume, il était intéressant de mesurer le foisonnement.

Le foisonnement est la capacité d'un échantillon à augmenter ou diminuer de volume après avoir été mis en place. Les résultats sont liés au volume occupé par l'air, volume directement dépendant de la forme et de l'agencement des grains.

C'est une différence, en pourcentage, entre le volume de l'échantillon mis en place et son volume une fois tassé.

Ce phénomène peut avoir une influence importante lorsque le dosage du béton est réalisé, non pas en poids, mais en volume. Nous appellerons donc coefficient de foisonnement f (exprimé en %) l'augmentation de volume correspondant à une humidité donnée, par rapport au volume occupé par la même quantité de sable mais à l'état sec :

$$f = \frac{V_{\text{humide}} - V_{\text{sec}}}{V_{\text{sec}}}$$

Ce coefficient de foisonnement est d'autant plus important que le sable est plus fin.

A défaut d'une connaissance précise du module de finesse, la courbe correspondant à $Mf = 2,50$ peut être considérée comme valable en valeur moyenne. [19]

9.5- Porosité et la capacité de rétention

La porosité d'un sol correspond à l'espace non occupé par le sable, les limons, l'argile, l'humus et la matière organique.

Elle est de deux types : la microporosité comprenant de petits espaces lacunaires et la macroporosité comprenant de grands espaces lacunaires. L'addition des deux représente la porosité totale.

Le volume correspondant à la microporosité est occupé par l'eau. Il indique la capacité de rétention en eau. Tandis que la macroporosité indique un volume d'air.

Lorsque ce volume d'air est rempli par l'eau de pluie ou d'irrigation, le sol est saturé. Avec des conditions normales de drainage, l'eau de saturation commence à descendre par gravité. Lorsque les pores sont vides, l'air atmosphérique remplace l'eau.

Lorsque les macro-pores sont exempts d'eau, le niveau d'humidité du sol est appelé capacité au champ ou capacité de rétention.

L'obtention de la capacité de rétention se fait à l'aide d'un échantillon séché à l'étuve que l'on place dans un filtre à Büchner (récipient en céramique muni de trous).

On laisse s'humecter l'échantillon pendant une nuit, puis on crée le vide afin de retirer l'eau de gravité ; il reste l'eau contenue dans les micropores. La différence de poids entre l'échantillon ainsi recueilli et l'échantillon sec, donne la capacité de rétention exprimée en pourcentage.

La porosité totale se calcule par la différence entre la densité apparente et la densité réelle.

La microporosité est la capacité de rétention moins la densité apparente.

La macroporosité est la différence entre la porosité totale et la microporosité.

La porosité dépend avant tout de la texture du sol. Pour un sable, la macroporosité occupe un fort pourcentage de la porosité totale.

L'étude de la porosité totale peut être complétée par l'étude de la mobilité de l'eau ou perméabilité.

9.6- Perméabilité

L'eau de pluie descend dans le sol par les pores qu'il présente et humecte ainsi les particules du sol. La perméabilité est la plus ou moins grande facilité que présente le sol à laisser l'eau descendre vers les couches inférieures. Cette propriété est donc bien en relation avec l'importance des espaces lacunaires. Elle s'exprime en cm/heure.

Un sable très fin ayant un pourcentage en micropores élevé, aura une vitesse de filtration faible, d'où l'importance du choix des matériaux lorsqu'il s'agit de sable de bunkers ou de construction de greens notamment.

9.7- Angularité

Caractéristique importante pour la stabilité du matériau, elle confère au sable un angle de frottement interne plus élevé, capable de résister aux différents déplacements. Les sables artificiels de concassage présentent des formes plus anguleuses, et par suite leur stabilité est améliorée, mais leur inconvénient majeur est que leur compactage est difficile, la raison pour laquelle ces sables présentent des densités nettement plus faibles que celles des sables roulés d'une même granulométrie ; Ils sont par conséquent plus maniables.

9.8- Forme

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.

La forme d'un granulat est définie par :

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

La longueur, la largeur et l'épaisseur du grain définissent sa bonne ou sa mauvaise forme. La forme des grains de sable est essentielle pour des propriétés telles que la compacité du mélange, l'angle de frottement interne, la maniabilité des mortiers, la résistance au broyage, à l'attrition ou à la fragmentation par écrasement. Cette forme bien que moins visible à l'œil nu, a autant d'importance pour les sables de béton soit hydraulique soit hydrocarboné. Ce sont les

grains de sable naturel ayant subi une attrition leur donnant une forme arrondie, qui présentent la meilleure forme au point de vue de la régularité du volume occupé par un poids donné, de résistance à la fragmentation, de la meilleure maniabilité dans les mortiers de ciment et la moindre tendance de ces derniers à la fissuration.

La nature de la roche d'origine influe beaucoup sur la forme des grains pour un mode de concassage donné dans le cas des sables artificiels.

Il s'agit ici de regarder la forme générale des grains de sable placés dans une capsule, et visionnés à l'aide d'une loupe binoculaire.

L'étude de la forme des grains, qui peut sembler superflue au premier abord, donne néanmoins sept catégories de formes différentes :

- **Rond** : les grains sont lisses et ressemblent à des billes. Ils roulent dans la capsule.
- **Rond à semi-angulaire** : la forme de la plupart des grains, encore très arrondis, commence à devenir semi-angulaire.
- **Semi-angulaire à rond** : Il y a davantage de grains à tendance semi-angulaire que de grains à tendance sphérique.
- **Semi-angulaire** : grains dont la surface présente des angles bien visibles mais dont l'aspect général revêt une forme arrondie.
- **Semi-angulaire à angulaire** : l'ensemble des grains tend à devenir angulaire.
- **Angulaire à semi-angulaire** : les plus petits grains sont angulaires alors que les plus gros sont semi-angulaires (arrondis au lavage).
- **Angulaire** : les grains montrent des arêtes vives. Ils sont peu mobiles dans la capsule.

La forme des grains de sable a non seulement une influence sur le foisonnement, car les grains de forme arrondie empêchent le sable de se tasser, mais encore sur la perméabilité, car les espaces lacunaires sont plus étroits que les sables de forme angulaire à semi-angulaire.

[13]

9.9- Propreté

Tous les granulats contiennent plus ou moins d'impuretés.

Le caractère commun à toutes ces impuretés est leur effet néfaste sur les qualités essentielles du béton (résistance, imperméabilité, durabilité). Il est donc indispensable que les sables n'en contiennent que dans la mesure où ces qualités ne sont affectées au-delà de limite tolérable.

- Certaines impuretés perturbent les résultats au-delà des limites admissibles, même si elles ne sont qu'à l'état de traces : *elles sont prohibées*.

- D'autres ont un effet moins puissant : elles peuvent être *tolérées* dans des limites qui seront à définir.

La pollution des gravillons accroît la demande en eau qui va causer la chute de résistance au jeune âge, augmente le retrait et nuit à la durabilité des bétons.

Afin de donner une indication sur la présence des fines et leur pourcentage on se réfère à l'essai normalisé équivalent de sable.

9.10- Dureté

La résistance des matériaux de construction aux différents efforts destructifs est directement liée à la dureté.

La dureté du matériau lui procure une bonne résistance à la fragmentation, à l'attrition, à l'usure et au polissage sous des efforts statiques ou dynamiques.

Il est constaté que cette dureté est liée à la nature minéralogique du matériau; un sable d'origine calcaire est plus friable qu'un sable siliceux, les sables calcaires évoluent pendant le compactage ce qui entraîne la création d'éléments fins.

Notons aussi que les sables durs sont peu sensibles à l'eau, moins sensibles au gel ce qui est favorable à la résistance et à la durabilité du matériau. Afin d'apprécier cette dureté, on utilise l'essai de friabilité des sables.

9.11- Analyse chimique

Elle concerne la détermination des proportions de matières organiques (sulfates, sulfures, chlorures et d'autres éléments chimiques) contenus dans les sables étudiés. Ces éléments présentent au-delà d'un certain seuil un caractère nuisible pour les propriétés des bétons ainsi réalisés.

En plus de ces études effectuées sur les sables, d'autres paramètres physiques ne manquent pas d'importance et doivent être définis, car ils vont servir comme données de base à la formulation, en particulier la masse volumique et le poids spécifique.

10. Sables de dune

10.1- Définition

Le sable est un produit de la désagrégation lente des roches sous l'action des agents d'érosion tels que l'air, la pluie etc. Les déserts de sable, ou ergs, se localisent dans les vastes cuvettes d'épandage ou des puissantes accumulations alluviales se sont concentrées par de grands écoulements liés aux périodes pluviales du début du quaternaire. Les grands ergs coïncident avec des zones où des vents saisonniers de directions variées se compensent.

Les dunes existent sous trois formes :

- **barkhane** est une dune en forme de croissant, à convexité au vent. Elle naît là où l'apport de sable est faible et sous des vents unidirectionnels (Figure A) ;
- **dune parabolique** est une dune dissymétrique en forme de fer à cheval à concavité au vent souvent plus ou moins fixée par la végétation (B). Sa disposition par rapport à la direction du vent est donc inverse de celle de la barkhane. La dune parabolique est peu mobile et généralement ne migre guère une fois qu'elle est formée ;
- **siouf** ou sif, dunes en forme de sabre, sont des ondulations longitudinales s'amincissant vers une extrémité (Figure C). [1]

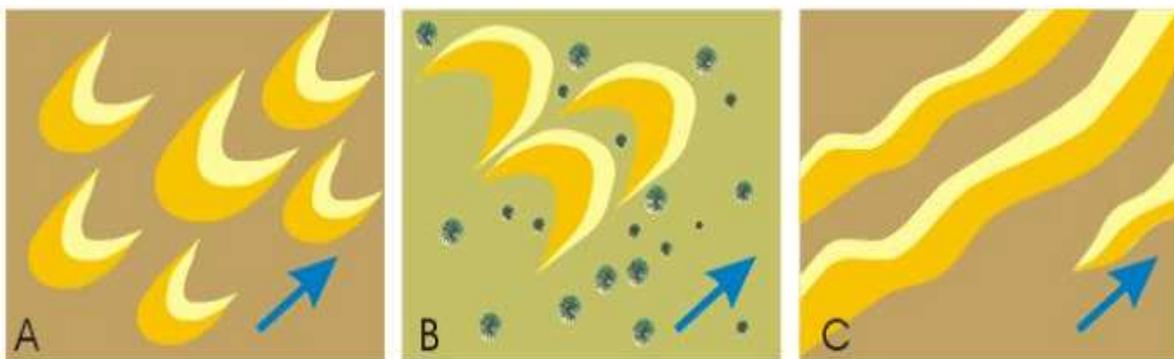


Figure 1.2 : Types de dunes. A: barkhanes ; B: dunes paraboliques ; C: dunes longitudinales.

La flèche bleue indique la direction du vent dominant

Le sable est considéré comme un sédiment détritique meuble composé, en l'absence totale de ciment, de grains jointifs mais libres, dont la taille est comprise entre 64 μm et 2 mm

[Pettijohn, 1987]. La valeur de cet intervalle diffère d'ailleurs suivant les auteurs : entre 20 μm et 2 mm pour [Folk et al, 1957], et entre 50 μm et 5 mm pour [Weydert, 1971].

Tout sable connaissant un début de cimentation, aussi faible soit-il, est par convention considéré comme un grès. Le terme sable est en fait très général, la qualification se référant au seul critère granulométrique. C'est ainsi que le terme sable, employé sous qualificatif indiquant l'origine, est impropre. On parle de sable quartzeux lorsqu'il est composé de grains de quartz, de sable calcaire si les éléments constitutifs sont des grains de calcaires, de sable micacés...etc.

Le sable est composé de différents minéraux, tels que la silice, les silicates, les carbonates et les argiles (les silicates sont la famille la plus abondante dans la nature, représentant 90 % en masse de l'écorce terrestre). Les sables de dunes étudiés sont essentiellement des sables siliceux, les carbonates et les argiles se trouvant sous forme de traces. [1]

CONCLUSION :

En définitive, selon leur histoire géologique, les sables se distinguent les uns des autres pas une multitude d'aspects : granulométrie, teneur et nature des fines, nature minéralogique, angularité, dureté, présence de matière humique...

Tous ces aspects sont d'inégale importance dans l'optique d'usage des bétons et les classifications fonctionnelles reprendront les aspects les plus utiles.



CHAPITRE : 2
LE BÉTON

Le Béton

1. Introduction

Le béton est aujourd'hui le matériau de construction par excellence. Environ 4 milliards de mètres cubes de béton sont utilisés tous les ans de par le monde pour la construction d'ouvrages de toutes natures, notamment de bâtiments, d'immeubles d'habitation, de ponts, de routes, de tunnels, d'aéroports, de barrages, de ports, de centrales thermiques et nucléaires et de plates-formes offshore.

Ce choix universel est fondé sur des critères techniques et économiques. La résistance mécanique et la durabilité, c'est-à-dire le bon comportement dans le temps face aux actions des charges et aux agressions physico-chimiques de l'environnement, constituent les principaux critères techniques. Les critères économiques sont évalués à partir de la disponibilité et du coût des matières premières, de la facilité d'emploi et du prix de revient du matériau en œuvre.

Le béton est un composite hétérogène qui résulte du mélange intime de ciment, de granulats, d'eau et de faibles quantités d'adjuvants. Ces constituants sont dosés de manière à obtenir, après durcissement, un produit solide dont les propriétés mécaniques peuvent être très supérieures à celles des roches naturelles. Dans la mesure où le ciment est un liant hydraulique fabriqué essentiellement à partir de minéraux naturels, le béton peut être considéré comme une roche artificielle. [9]

2. Historique

Comme les roches naturelles, le béton possède une grande résistance à la compression et une faible résistance à la traction. C'est pourquoi son utilisation comme matériau de construction, qui remonte aux Romains, ne s'est véritablement développée qu'avec l'invention du béton armé. Dans ce dernier, des armatures, c'est-à-dire des barres en acier (initialement en fer), pallient son insuffisante résistance à la traction.

L'invention du béton armé est généralement attribuée à Joseph Lambot, qui, en 1848, fit flotter une barque en ciment armé, et à Joseph Monier, qui construisit indépendamment, grâce à ce matériau, des bacs à fleurs en 1849. L'emploi du béton armé dans les structures s'étend dès lors rapidement en France sous l'impulsion de Joseph Monier, mais aussi de Coignet, de

François Hennebique et d'Armand Gabriel Considère. Dès 1906, une circulaire ministérielle fixe des " Instructions relatives à l'emploi du béton armé ", codifiant ainsi pour la première fois la conception et le calcul des ponts et des bâtiments avec ce matériau.

Un nouvel essor est apporté par l'invention, vers 1930, du béton précontraint par Eugène Freyssinet. Un pas conceptuel important est alors franchi, qui constitue " une véritable révolution dans l'art de construire ", tant par la mise en pratique de la notion de précontrainte que par l'approfondissement de la compréhension du comportement mécanique et rhéologique du béton. L'utilisation de la précontrainte autorise, en effet, la maîtrise de la distribution des contraintes dans la matière. Elle permet, en particulier, de tirer profit de la grande résistance à la compression du béton tout en évitant les inconvénients dus à sa faible résistance à la traction.

La reconstruction qui suit la Seconde Guerre mondiale voit la généralisation de l'emploi du béton précontraint pour la réalisation des ouvrages d'art français. Yves Guyon et Pierre Lebellet précisent alors les principes de calcul des structures précontraintes et mettent à la disposition des ingénieurs les méthodes nécessaires à leur conception.

La Société technique pour l'utilisation de la précontrainte (S.T.U.P.) met en œuvre les idées novatrices et les brevets d'Eugène Freyssinet et donne une forte impulsion au développement de l'emploi du béton précontraint dans le monde.

Les recherches menées depuis 1970 sur le béton, et particulièrement sur ses constituants actifs, conduisent à un nouveau bond qualitatif et quantitatif de ses propriétés. Aux États-Unis et au Japon, on fabrique et on met en œuvre, dans les années 1980, des bétons à hautes performances dont la résistance à la compression atteint 100 mégapascals (MPa) (environ 1 000 kg/cm³), et même 140 MPa (1 400 kg/cm³) dans un immeuble à Seattle aux États-Unis. En laboratoire, on obtient, d'ores et déjà, des résistances supérieures à 600 MPa (6 000 kg/cm³).

Bien que toujours composés de ciment, de granulats et d'eau, les bétons à hautes performances sont des matériaux nouveaux qui possèdent des propriétés mécaniques élevées, associées à une grande durabilité. Les améliorations apportées par l'industrie des liants hydrauliques à la qualité des ciments, la mise au point d'adjuvants spécifiques de synthèse ainsi que l'emploi d'ultrafines ont permis ce progrès spectaculaire. [1]

3. Principaux avantages et inconvénients du béton

3.1- Avantages du béton

Le béton possède plusieurs avantages et inconvénients :

- Il est peu coûteux, facile à fabriquer et nécessite peu d'entretien.
- Il épouse toutes les formes qui lui sont données. Des modifications et adaptations du projet sur le chantier sont faciles à effectuer.
- Il devient solide comme de la pierre. Correctement utilisé, il dure des millénaires. Il résiste bien au feu et aux actions mécaniques usuelles.
- Associé à des armatures en acier, il acquiert des propriétés nouvelles qui en font un matériau de construction aux possibilités immenses (béton armé, béton précontraint).
- Il convient aux constructions monolithiques. Les assemblages sont faciles à réaliser dans le cas de béton coulé sur place. Dans la plupart des cas, les dimensions des ouvrages et éléments d'ouvrage en béton sont suffisants pour ne pas poser de problème délicat de stabilité.
- Il exige peu d'énergie pour sa fabrication.

3.2- Inconvénients du béton

Les principaux inconvénients du béton ont pu être éliminés grâce à son association à des armatures en acier ou à l'utilisation de la précontrainte. De toutes façons, il reste les quelques inconvénients suivants:

- Son poids propre élevé (densité de 2,4 environ qui peut être réduite à 1,8 dans le cas de bétons légers de structure et à moins de 1,0 dans le cas de béton légers d'isolation)
- Sa faible isolation thermique (elle peut être facilement améliorée en ajoutant une couche de produit isolant ou en utilisant des bétons légers spéciaux)
- le coût élevé entraîné par la destruction du béton en cas de modification d'un ouvrage.

4. Composants du béton

La composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un béton dont les qualités sont recherchées pour la construction d'un ouvrage ou d'une partie d'ouvrage. Toute méthode de composition de béton doit être guidée par trois critères essentiels :

- la résistance ;
- l'ouvrabilité (facilité de mise en œuvre) ;
- La durabilité ;

La destination du béton à un usage déterminé fixe le dosage de ses différents constituants, caractérisés par leurs propriétés physiques, chimiques, et mécaniques.

4.1- Ciments

Les ciments sont des poudres fines obtenues par cuisson à haute température (vers 1450⁰ c) et broyage d'un mélange minéral (calcaire + argile en général). Lorsqu'ils sont mélangés à l'eau, ils forment une pâte susceptible de faire prise et de durcir grâce à une réaction d'hydratation en général exothermique. [10]

4.1.1- Constitutions de base des ciments

Les principaux constituants sont:

- Clinker portland ;
- Laitier granulé de haut fourneau ;
- Fillers calcaires ;
- Sulfate de calcium ;
- Additifs ;

4.2- Graviers

Les graviers sont définis par la norme P 18-101 comme un ensemble de grains minéraux, de dimensions comprises entre 5 et 125mm, destinés à la confection des bétons, aux couches de fondation, de base et de roulement des chaussées et des assises et des ballasts de voies ferrées

On distingue:

- les granulats naturels, issus de roches meubles ou massives extraites in situ et ne subissant aucun traitement autre que mécanique (c'est-à-dire concassage, broyage, criblage, lavage, sélection) ;
- les granulats artificiels proviennent de la transformation thermique de roches, de minerais, de sous produits industriels (laitiers, scories, etc.) ou encore de la démolition d'ouvrages ou de bâtiments divers en béton, souvent appelés granulats recyclés. [10]

-

4.3- Sable

On définit les sables comme étant la fraction des granulats pierreux dont les grains ont des dimensions comprises entre 80 μ m et 05 mm; il s'agit d'une définition globale, dont les bornes varient d'une classification à une autre. Ce sont aussi les matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 6,3mm et dont le passant à 80 microns n'excède pas 30%.

Dans le sens le plus courant, on entend par "sable" les éléments de dimensions 0 à 5 mm, non compris les fillers. A cette définition se rattachent les sables de concassage ; mais lorsque l'on dit sable, on pense essentiellement aux sables naturels abondants dans de nombreux pays et dont les réserves sont quasi inépuisables.

En fait, la définition granulométrique du sable est plus compliquée, elle varie suivant les époques et diffère suivant les pays et selon la destination.

4.4- Adjuvants

L'adjuvant est un produit incorporé au moment du malaxage du béton à dose inférieure ou égale à 5 % en masse de la teneur en ciment du béton, pour modifier les propriétés à l'état frais et/ou à l'état durci.

4.5- Eau de gâchage

Toutes les eaux ne peuvent pas être utilisées pour gâcher du béton parce qu'elles contiennent, dans certains cas, un excès d'impuretés qui détériore les propriétés du béton, notamment les propriétés physiques et mécaniques (prise et résistance), les propriétés esthétiques (taches, efflorescences) et la durabilité (corrosion des armatures, stabilité du béton).

Ces impuretés, éventuellement contenues dans l'eau de gâchage, sont soit des composés chimiques qui peuvent être actifs vis-à-vis du ciment, des granulats ou des armatures, soit des particules en suspension qui, du fait de leur quantité ou de leur qualité, sont indésirables. [6]

4.6- Additions

Ce sont les cendres volantes, les additions calcaires, les laitiers vitrifiés moulus de haut fourneau, les fumées de silice. Ces poudres sont utilisées comme constituants du ciment ou additions dans le béton.

5- Préparation de béton

Avant de commencer le bétonnage d'une pièce, le responsable devra vérifier le coffrage (dimensions, solidité, étanchéité, propreté, humidification des parois à l'eau ou enduction d'huile de démoulage) et s'assurer que la distance des armatures aux parois est partout respectée. Il établira préalablement un plan de bétonnage en fonction des dimensions et des formes de la pièce, du débit de la bétonnière des joints de reprise à respecté, des dispositions du ferrailage... etc.

Si le ferrailage est dense et surtout si la hauteur est importante, il convient de prévoir des goulottes permettant de conduire le béton jusqu'au fond de moule et éviter ainsi qu'il ne « cascade » à travers les armatures, car on ne retrouve alors que du gravier en fond de moule : c'est une des plus fréquentes et des plus graves causes de la ségrégation : dans ce cas, il est souhaitable que la possibilité de passage des goulottes ait été prévu par le projeteur lui-même lorsqu'il a dessiné le ferrailage.

Si la plasticité du béton n'est pas constante, comme cela arrive parfois malheureusement en raison des difficultés d'un dosage précis de l'eau, un coup d'œil sur le béton dans la benne permettra au chef de chantier d'apprécier sa plasticité et lui évitera de déverser une gâchée accidentellement trop sèche, dans le ferrailage très dense.

Dans certains cas (fonds de poutres très ferrillées, par exemple), il vaut mieux, plutôt que de courir ce risque, confectionner quelques gâchées spéciales plus plastiques. Les gâchées trop sèches (si toutefois elles restent acceptables) seront réservées aux parties hautes moins ferrillées, ou aux dalles de compression : ceci suppose évidemment que le plan d'avancement du bétonnage ait prévu cette éventualité. Cependant il reste évident qu'il est préférable d'obtenir une plasticité constante et bien adaptée aux conditions de bétonnage.

5.1- Malaxage

On mélange les composants à la main, à la pelle, ou au moyen d'engins mécaniques, tels qu'une bétonnière. Pour les grands travaux, le béton est fabriqué dans une centrale qui mélange automatiquement les constituants selon une composition programmée à l'avance. La production peut atteindre plus de 300 m³/h. L'objectif est de mélanger suffisamment les composants pour obtenir une pâte homogène, au sein de laquelle les éléments les plus fins, sable et ciment, comblent les vides laissés par l'agglomération des granulats ; on doit également envelopper complètement les graviers pour obtenir, une fois sec, un matériau constructif d'une roche.

Le malaxage a une influence essentielle sur les caractéristiques des mortiers et bétons. Plusieurs variables peuvent intervenir sur cette opération dont les principales sont :

- Le type de malaxage : le meilleur est celui qui assure au mélange un déplacement des matériaux les uns par rapport aux autres (palette, cuve tournante,...) où seule l'action de la pesanteur est utilisée.
- La durée du malaxage : elle doit être suffisante pour obtenir l'homogénéité des constituants. Il est même déconseillé d'augmenter cette durée, car un entraînement d'air peut en résulter avec les conséquences qui en découlent (micro-bullage interne, réduction des performances,.....).
- La vitesse de malaxage : le malaxage doit être rapide et les vitesses communiquées aux particules aussi grandes que possible pour mobiliser les grains du mélange.

La qualité du béton dépend beaucoup plus de l'homogénéisation du compound, non seulement au stade macroscopique, mais également au stade microscopique. Les constituants actifs (ciment+ fines) doivent être introduits en dernier dans les mélangeurs, immédiatement avant mise de l'eau. Il faut qu'ils soient bien répartis entre et autour de tous les grains de sable. [6]

Une stabilité du mélange parfaitement homogénéisé est favorable non seulement au point de vue de la maniabilité mais aussi au point de vue résistance. Après prise et durcissement, il sera uniformément réparti dans toute la masse.



Photo 2.1 : Malaxeur

5.2- Coulage

Le béton peut être transporté jusqu'au chantier par des toupies, bétonnières montées sur camion. Une pompe à béton achemine le matériau en hauteur ou sur des sites difficilement accessibles aux camions. Sur les gros chantiers, le pompage du béton permet des cadences beaucoup plus importantes que si l'on emploie des bennes amenées par grue sur le lieu de coulage. Le béton peut également être projeté au moyen de compresseurs pneumatiques. Ce matériau, qui ne nécessite pas de coffrage, est utilisé lors de la construction de piscines, ou pour reconforter des talus de terre instables risquant de s'écrouler. [6]



Photo 2.2 : Moules.

5.3- Vibration

Une fois dans un coffrage, le béton est vibré à l'aide d'aiguilles ou par des vibreurs électriques montés sur le coffrage. L'air expulsé durant cette phase provient des cavités entre les graviers, qui se remplissent de la pâte fine de ciment et de sable. La vibration permet un mélange efficace et améliore le durcissement.



Photo 2.3 :Table vibrante

5.4- Durcissement

La température ambiante a une grande influence sur le durcissement ou prise du béton. Par temps de gel, il peut être nécessaire de chauffer l'eau, parfois même les granulats, avant de malaxer et de couvrir le matériau pour retenir la chaleur dégagée par les réactions exothermiques lors de la prise du ciment. Par temps très chaud, c'est le contraire, on doit arroser notre béton à la prise pour que l'eau ne s'évapore pas et provoque un retrait, c'est-à-dire une diminution de volume de la pièce. Ce phénomène engendre des fissures dans le béton. Plus le béton est maintenu humide sur une longue période, plus sa résistance sera importante. La prise a lieu en quelques heures.

5.5- Décoffrage

Pour les pièces préfabriquées et les éléments non porteurs, il est possible de décoffrer quelques heures seulement après le coulage. En général, par temps doux, on coule le béton le soir pour décoffrer le lendemain matin. Les éléments porteurs, comme les poutres ou les planchers, doivent rester plusieurs jours dans leur coffrage : le béton doit durcir suffisamment pour supporter leur propre poids, ainsi que les charges qui y seront appliquées. [9]



CHAPITRE : 3
MÉTHODES DE
FORMULATIONS

Méthodes de formulations

1. Introduction

La composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un béton dont les qualités sont celles recherchées pour la construction d'un ouvrage ou d'une partie d'ouvrage.

Les méthodes proposées sont nombreuses et il n'est pas possible de les citer toutes ; elles aboutissent à des dosages *volumétriques* ou, de préférence, *pondéraux*, le passage de l'un à l'autre pouvant se faire, si nécessaire, par la connaissance de la densité apparente des granulats en vrac.

Ces méthodes sont dites à *granularité continue*, c.-à-d. lorsque l'analyse du mélange constituant le béton donne, sur le graphique granulométrique, une courbe s'élevant d'une façon continue du plus petit grain de ciment de ($d_c \approx 6,3$ microns) aux plus gros grains (D) des graviers, exemple : béton constitué d'un sable 0/5 mm et de deux graviers 5/20 mm et 20/50 mm (*courbe A sur la figure 3.1*). [7]

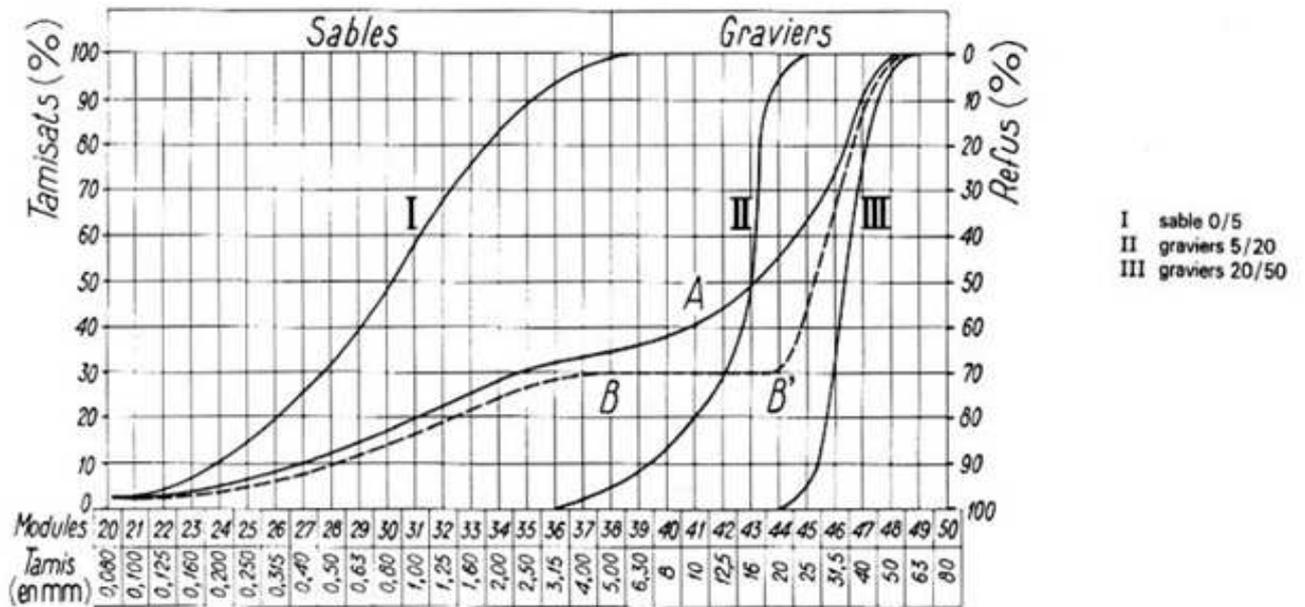


Figure 3.1 : courbe granulométrique et dimensions de D [7]

On dit par contre que l'on a une granularité discontinue lorsque la courbe granulométrique correspondante présente un palier qui équivaut à un manque d'éléments intermédiaires (exemple : béton constitué d'un sable 0/5 mm et d'un gravier 20/50 mm (**courbe B sur la figure 3.1**) ; le palier BB atteste du manque d'éléments entre 5 et 20 mm.

Ces deux types de béton, *continu* et *discontinu*, ont eu chacun leurs chauds partisans ou détracteurs. A notre avis, il n'y a pas entre ces deux types de granularité, et malgré les apparences, de profondes différences justifiant la querelle encore persistante à leur égard. Dans la plupart des cas, la continuité ou la discontinuité de la granularité dépend des granulats dont on dispose selon qu'ils présentent ou non entre eux des discontinuités. Nous pensons **que la granularité continue** permet d'obtenir des bétons plus plastiques et de bonne ouvrabilité ; par contre, **la granularité discontinue** conduit à des bétons à maximum de gros éléments et minimum de sable présentant, en général, des résistances en compression un peu supérieures mais au détriment de l'ouvrabilité. Il semble toutefois que **la plupart des bétons actuellement utilisés sont à granularité continue**.

Quelle que soit la méthode utilisée, la formule de composition **calculée** ne peut prétendre correspondre parfaitement au béton désiré, car il n'est pas possible d'appréhender avec précision, par le calcul, certaines qualités des constituants qui influent directement sur la qualité du béton : forme, angularité, porosité, adhésivité des granulats, fines du sable, finesse de mouture et classe de résistance vraie du ciment, etc. C'est pourquoi, comme beaucoup de spécialistes en la matière, **nous pensons que le calcul d'un mélange n'est qu'une première approche de préparation de mélanges d'essais** qui permettront de corriger expérimentalement la formule calculée pour aboutir au béton désiré. [7]

2. Critères en fonction de la destination des bétons

Les ouvrages que l'on construit aujourd'hui en béton sont des plus divers tant dans leur destination que dans leurs dimensions et toute étude de composition de béton doit en tenir compte ; il convient donc d'en définir les critères qui devront constituer clairement les données de l'énoncé du problème que pose l'étude de la composition d'un béton destiné à un ouvrage donné.

Dans notre étude, cinq critères principaux sont retenus :

- Le choix des granulats ;
- L'ouvrabilité ;
- La résistance à la compression ;
- La résistance à la traction ;
- Le retrait ;

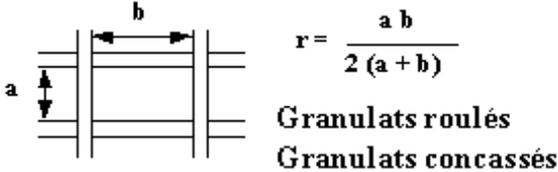
2.1- Choix des granulats (taille des granulats D_{\max})

Les granulats à utiliser dans la fabrication du béton doivent permettre la réalisation d'un squelette granulaire à minimum de vides. Il faut en conséquence utiliser des granulats de toutes tailles pour que les plus petits éléments viennent combler les vides laissés par les plus gros.

Pour permettre une mise en œuvre correcte du béton, il est important que la taille des plus gros granulats D_{\max} ne s'oppose pas au déplacement des grains entre les armatures métalliques du ferrailage. **Le tableau 3.1** donne une borne supérieure de D_{\max} à respecter en fonction de la densité du ferrailage, des dimensions de la pièce à réaliser, et de la valeur de l'enrobage des armatures. D_{\max} est le diamètre des plus gros granulats entrant dans la composition du béton. Sa valeur peut être lue sur la feuille d'analyse granulométrique des granulats correspondants.

Cette dimension dépend évidemment des dimensions de l'ouvrage (barrage, digues et murs de quai, structures de bâtiments, voiles minces, etc.), mais elle dépend également des dispositions du ferrailage (densité relative par rapport au coffrage, maillage).

Tableau 3.1 : Détermination de D_{max} en fonction du ferrailage et de l'enrobage. [6]

Caractéristiques de la pièce à bétonner		D_{max}
e_h	Espacement horizontal entre armatures horizontales	$\square e_h / 1,5$
e_v	Espacement vertical entre lits d'armatures horizontales	$\square e_v$
d	Enrobages des armatures : Ambiance très agressive $\square 5$ cm Ambiance moyennement agressive $\square 3$ cm Ambiance peu agressive $\square 3$ cm Ambiance non agressive $\square 1$ cm	$< d$
r	Rayon moyen du ferrailage  $r = \frac{a b}{2 (a + b)}$ Granulats roulés Granulats concassés	$\square 1,4 r$ $\square 1,2 r$
h_m	Hauteur ou épaisseur minimale	$\square h_m / 5$

Le rayon moyen r d'une maille de ferrailage est le rapport entre la surface de la maille et son périmètre.

Le rayon moyen R du moule est le rapport entre le volume à remplir dans la zone la plus ferrillée et la surface de coffrage et d'armatures en contact avec le béton. [6]

2.2- Résistance désirée

Elle est en général, définie par la résistance en compression sur cylindre à 28 jours. C'est elle qui conduit directement vers le choix du dosage approximatif en ciment dont on devra connaître la classe vraie C_E sur laquelle on peut compter en moyenne.

D'après les résultats de la note de calcul d'un ouvrage, on définit la résistance caractéristique à exiger en valeur minimale pour le béton utilisé.

Cette résistance caractéristique se calcule d'après des résultats sur Eprouvettes de contrôle (soumises à la rupture) en déduisant de la moyenne k fois l'écart type (sur l'ensemble des valeurs). Il convient donc que l'on vise dans l'étude du béton une valeur moyenne probable supérieure à la résistance caractéristique exigée.

2.3- Ouvrabilité

L'ouvrabilité peut se définir comme la facilité offerte par le béton à bien se mettre en œuvre pour le bon enrobage des armatures, un parfait remplissage du coffrage et sans ségrégation.

Ce critère peut, en général, se définir à partir de la plasticité par l'affaissement au cône d'Abrams selon les valeurs indiquées dans le **tableau 3.2**.

L'ouvrabilité est, pour le béton, une qualité fondamentale qui doit être très sérieusement prise en compte dans l'étude de composition. [6]

Tableau 3.2 : Affaissement au cône conseillé en fonction du type d'ouvrage à réaliser [6].

Affaissement en cm	Plasticité	Désignation	Vibration conseillée	Usages fréquents
0 à 4	Ferme	F	Puissante	Bétons extrudés Bétons de VRD
5 à 9	Plastique	P	Normale	Génie civil Ouvrages d'art Bétons de masse
10 à 15	Très plastique	TP	Faible	Ouvrages courants
Plus de 16	Fluide	Fl	Léger piquage	Fondations profondes Dalles et voiles minces

3. Influence du rapport dosage en ciment sur dosage en eau (E/C)

Les deux facteurs sont essentiels à la confection du béton. Ils présentent deux effets totalement opposés sur sa résistance. Si l'augmentation du ciment favorise son accroissement, un surplus d'eau entraîne sa diminution.

Ces deux effets sont le plus souvent rencontrés sous forme de rapport (E/C) alors que plusieurs recherches et formulation faites par le passé utilisent (C/E) qui se traduit par une fonction de résistance linéaire et croissante, et une plage de variation usuelle plus annoncée. (De 1,5 à 2,5 contre 0,4 à 0,66 pour E/C). **(Fig.3.2).** [6]

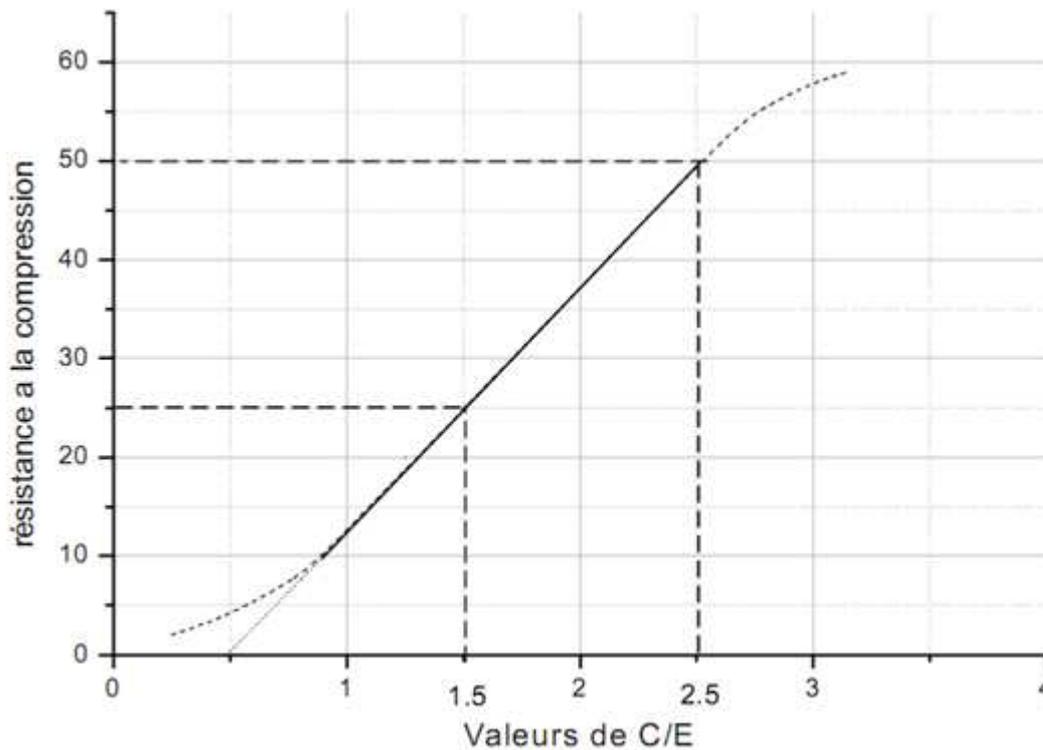


Fig. 3.2 : relation entre (C/E) et la résistance à la compression (f_c)

d'après la formule de BOLOMEY [6]

$$\{f_c = G \cdot C_E (C/E - 0.5)\}$$

G : coef, de granularité égale à 0.5.

C_E : classe vraie du ciment, égale à 50 MPA [6]

De nos jours la tendance n'est plus de fixer le dosage en ciment lors de passation de marché ou de contrat. Mais exiger une résistance caractéristique pour le béton une fois durci. Donc il appartient à l'entreprise chargée de la réalisation d'utiliser le dosage en ciment nécessaire. Par ailleurs un dosage minimal peut être exigé par le maître d'œuvre mais seulement afin de garantir l'ouvrabilité et l'étanchéité [6].

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

- la norme **P 18 011** sur la classification des environnements agressifs qui spécifie les dosages suivant [6] :

$$C \geq \frac{550}{\sqrt[3]{D}} \quad : \text{ pour des environnements à moyenne agressivité.}$$

$$C \geq \frac{700}{\sqrt[3]{D}} \quad : \text{ pour des environnements à forte et très forte agressivité.}$$

D : Dimension maximale des granulats.

- Le **BAEL 91** prescrit des dosages minimaux permettant d'obtenir des résistances caractéristiques dans les cas courants (CC) et les cas d'autocontrôle surveillé (AS) [6]:

Tableau 3.3. Dosage en ciment [28]

classe de ciment	32,5 et 32,5 R		42,5 et 42,5 R	
	CC	AS	CC	AS
$D_{\max} = 16$	300 kg/m ³			
20	350 kg/m ³	325 kg/m ³	325 kg/m ³	300 kg/m ³
25	à justifier	400 kg/m ³	375 kg/m ³	350 kg/m ³
30	non admis	à justifier	à justifier	à justifier

4. Dosage en eau

Le dosage en eau est un élément capital en matière d'ouvrabilité du béton.

Bien qu'il soit nécessaire, son augmentation entraîne une baisse des qualités intrinsèques du béton : diminution des résistances mécaniques, augmentation du retrait, de la porosité et de la perméabilité,... C'est pour quoi les chercheurs et laborantins essayent toujours de trouver un compromis entre la maniabilité et les autres qualités du béton. Chose qui n'est pas évidente, surtout lors qu'il s'agit de déterminer la quantité réelle d'eau dans le mélange. Puisque les granulats ne sont pas totalement secs lors de leur utilisation. [6]

5. Méthodes expérimentales

Le problème de la formulation des bétons comporte de nos jours d'avantage de variables, et l'espace dans lequel on évolue est beaucoup plus vaste (on peut viser des résistances de 1 à 2 MPa pour des matériaux ré-excavables destinés au remplissage de tranchée comme des résistances supérieures à 200 MPa pour des bétons à haute résistance). Face à ces réalités, provenant sans doute d'un progrès normal de la technologie, le formulateur est soumis à une pression croissante en termes de délais et de coûts. [27]

Entre partisans de la granularité continue et la granularité discontinue, les chercheurs se sont succédés avec chacun sa théorie et chacun son approche. Chacun essaie de justifier ces raisons. Or, si pour une granularité continue on favorise des bétons plus plastiques et de bonne ouvrabilité, une granularité discontinue conduit à des bétons à maximum de gros éléments et à minimum de sable, certes plus résistants mais moins ouvrables. Dilemme éternel auquel est toujours confrontée la formulation du béton. [6]

5.1. Méthode de Bolomey

Par une formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et l'on s'efforce de réaliser, avec les granulats dont on dispose, une composition granulaire totale (ciment compris) dont la courbe est aussi proche que possible de la courbe de référence théorique.

La formule de base est la suivante :

$$p = A + (100 - A) \sqrt{\frac{d}{D}}$$

Avec : p pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d

D diamètre du plus gros grain,

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

Cette méthode aboutit, théoriquement tout au moins, à une granularité continue. [6]

5.2. Méthode d'Abrams

C'est une règle de mélange fondée sur l'obtention d'un certain module de finesse global pour le mélange de granulats à partir de la connaissance des modules de finesse des granulats à employer. Le module de finesse du mélange est choisi de telle manière que les vides dans ce mélange sont, en principe, réduits au minimum.

Les modules optimaux pour béton de granulats roulés, déterminés expérimentalement par Abrams, sont indiqués dans le **tableau 3.4** en fonction du dosage en ciment et de la dimension D du granulat le plus gros.

Tableau 3.4 Valeurs optimales du module de finesse des compositions granulaires des bétons courants (d'après Abrams)							
Dosage en ciment (kg/m ³)	Dimension maximale D des granulats (mm)						
	10	15	20	25	30	40	60
275	4,05	4,45	4,85	5,25	5,60	5,80	6,00
300	4,20	4,60	5,00	5,40	5,65	5,85	6,20
350	4,30	4,70	5,10	5,50	5,73	5,88	6,30
400	4,40	4,80	5,20	5,60	5,80	5,90	6,40

5.3. Méthode de Vallette

R. Vallette a mis au point une méthode essentiellement expérimentale mais qui nécessite cependant un certain nombre de calculs préparatoires. Cette méthode est souvent désignée par dosage des bétons à compacité maximale ou dosage des bétons à minimum de sable ou dosage des bétons à granularité discontinue.

La méthode Vallette proprement dite est quelquefois utilisée avec certaines variantes. Voici sommairement résumé le principe de cette méthode.

Dans les cas les plus courants on partira, en général, de deux granulats (bétons binaires) : un sable 0/5 mm et un gravier présentant le plus souvent une certaine discontinuité avec le sable, un 16/25 mm par exemple.

On calcule d'abord le dosage de sable et de ciment devant donner, en principe, le mortier plein à minimum de ciment ; ce dosage s'obtient en mesurant les vides du sable mouillé et en calculant le dosage en ciment permettant de remplir le volume des vides du sable par un volume égal de pâte pure de ciment.

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. C'est la partie essentiellement expérimentale de la méthode et elle repose sur l'appréciation de l'opérateur en ce qui concerne la convenance du béton ; il doit donc être un praticien connaisseur en la matière. On obtient alors le béton plein à minimum de sable et le moins dosé (en ciment). Les dosages en ciment auxquels on aboutit ainsi sont presque toujours très nettement au-dessous des dosages nécessaires pour obtenir les résistances souhaitées, la plasticité nécessaire, l'Étanchéité ou autres qualités. Pour déterminer la composition du béton de dosage en ciment suffisant pour la résistance à obtenir, on fixe a priori dans certains cas, ou on Évalue par un calcul approprié, le volume de pâte pure compensatrice à substituer à un égal volume plein de sable mouillé. [6]

5.4. Méthode de Dreux- Gorisse

La méthode de formulation de Dreux-Gorisse permet de déterminer les quantités optimales de matériaux (eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier G) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges.

Cette méthode a pour seul but de permettre de définir d'une façon simple et rapide une formule de composition à peut prés adaptée au béton étudié, mais que seule quelque gâchées d'essai et la confection d'éprouvettes permettront d'ajuster au mieux la composition à adopter définitivement en fonction des qualités souhaitées et des matériaux effectivement utilisés. [6]

5.5.Méthode de JOISEL

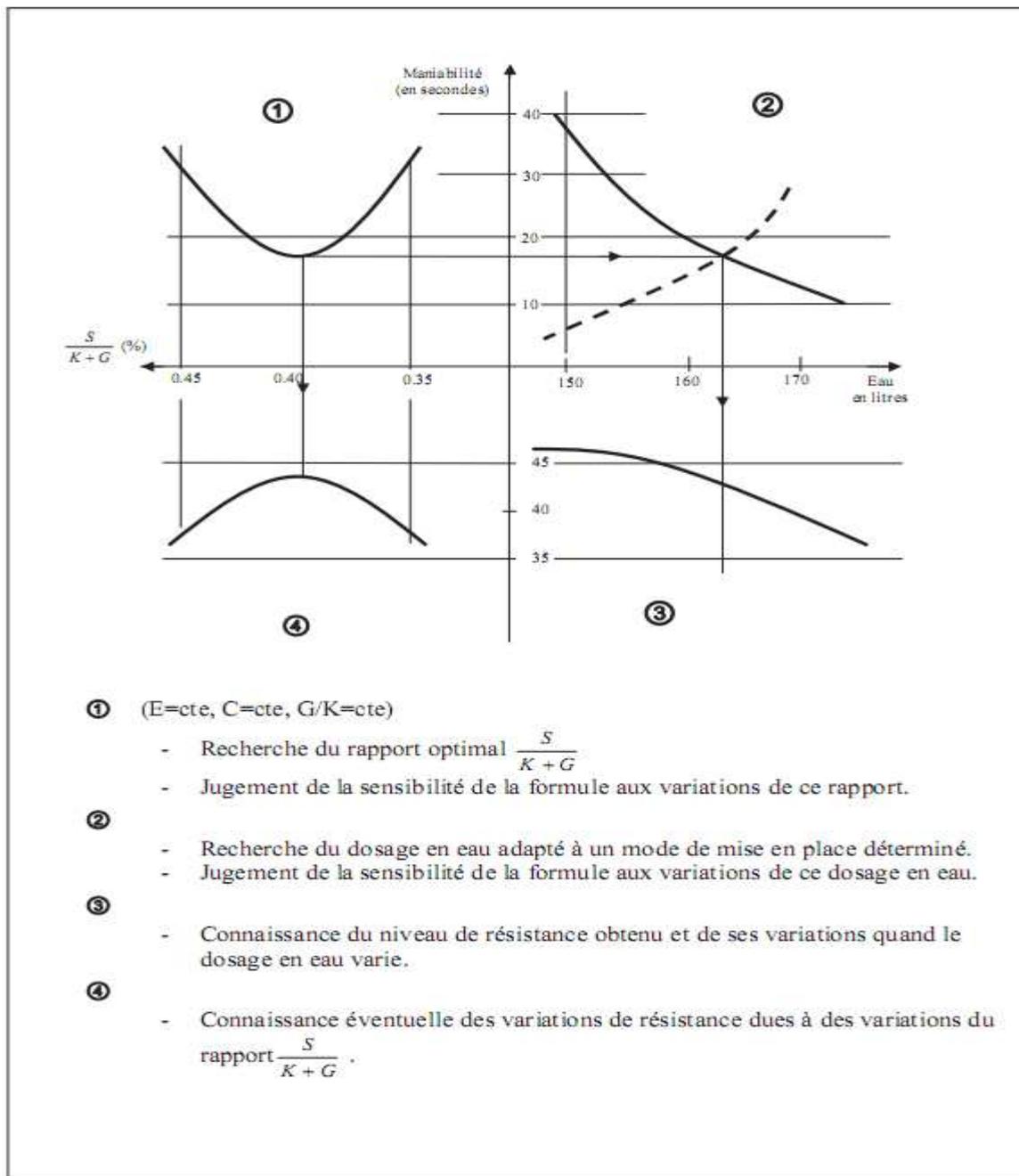
Inspirée comme celle de FAURY de la théorie de CAQUOT, la méthode JOISEL est plus générale. Il considère que la loi de granulation conduisant à la compacité maximale est fonction de ${}^m\sqrt{D}$, où « m » dépend de la compacité avec laquelle se serre un granulat de dimensions uniforme suivant les moyens de serrage, « m » peut alors varier de 3 à 10.

En utilisant ${}^m\sqrt{D}$ comme graduation des abscisses Joisel utilisa une courbe de référence de forme linéaire. [6]

5.6.Méthode de BARON et LESAGE

Méthode purement expérimentale, fondée sur l'utilisation du maniabilimètre dont le principe est de déterminer en premier lieu par approximations successives l'ensemble des proportions des constituants solides inertes qui correspondent à l'écoulement le plus rapide au maniabilimètre ; puis faire varier le dosage en eau jusqu'à l'obtention de l'écoulement désiré. [26]

Fig. 3.3 Méthode de BARON et LESAGE [26]



5.7. Méthode de FAURY

En 1942, J. Faury proposa, suite à une étude générale du béton, une nouvelle loi de granulation du type continu.

Il s'inspirait pour cela d'une 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 $\sqrt[5]{D}$; c'est pourquoi Faury adopta une échelle des abscisses graduée en $\sqrt[5]{D}$. 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 de référence n'est pas la même pour chacune de ces deux catégories.

On trace donc 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, en $\sqrt[5]{D}$. L'abscisse du point de rencontre de ces deux droites est fixée à $D/2$ et son ordonnée Y est donnée par une formule tenant compte de la grosseur D du granulat et comportant certains paramètres dont la valeur est à choisir dans des tableaux en fonction de la qualité des granulats (roulés ou concassés) et de la puissance du serrage (simple piquage ou vibration plus ou moins intense).

Cette valeur se calcule par la formule suivante :

$$Y = A + 17 \sqrt[5]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0,75}$$

Le paramètre A se choisit dans le **tableau 3.4** et D est exprimée en dimension passeoire.

B varie de 1 à 2 selon que le béton est ferme ou mou.

R est le rayon moyen du moule.

Tableau 3.5 : valeur de A [6]

	Sable et graviers roulés usuels	Sable roulés et graviers de broyage usuels	Sables et gravier de broyage usuels
Consistance très fluide. mise en œuvre sans serrage	32 et au-dessus	34 et au-dessus	38 et au-dessus
Consistance fluide pour faible serrage	30-32	32-34	36-38
Consistance molle pour serrage moyen	28-30	30-32	34-36
Consistance ferme pour serrage soigné	26-28	28-30	32-34
Consistance très ferme pour serrage puissant	24-26	26-28	30-32
Consistance de terre humide Serrage très puissant	22-24	24-26	28-30
Consistance exceptionnellement puissant	au-dessous de 22 (à déterminer dans chaque cas)	au-dessous de 24 (à déterminer)	Au-dessous de 28 (à déterminer)

Remarque

- Il n'y a pas une formulation précise mais un ensemble de formules qui satisfont plus ou moins parfaitement à l'ensemble des exigences de l'utilisateur ;
- Il y a lieu d'abord de mesurer les caractéristiques des constituants disponibles (granulométrie, propreté, teneur en eau des graviers, sables et additions...);
- Ensuite, il y a lieu de procéder à des premières formulations au moyen de méthodes décrites ci-dessous. Finalement, il y a lieu d'évaluer les formulations par des gâchées d'essais ;
- Il y aura donc lieu de rechercher des relations complémentaires entre les termes de la formulation.

Dans notre étude on va travailler avec la méthode de FAURY.



CHAPITRE : 4
CONTRÔLE ET ESSAIS

1- Introduction

Un béton frais au moment du malaxage des constituants est une dispersion de matériaux solides dans un liquide (l'eau).

Comme certains matériaux sont réactifs directement ou indirectement avec l'eau, cette dispersion va évoluer plus ou moins rapidement au cours du temps.

Outre les nombreuses réactions qui se produisent, il faudra aussi tenir compte de réactions physiques entre, d'une part les matériaux de la formulation (par exemple la décantation des granulats), et d'autre part entre les matériaux de la formulation et l'environnement (par exemple évaporation d'une partie de l'eau introduite au malaxage).

Il y a donc lieu de maîtriser l'ensemble des réactions par un choix judicieux de la quantité et de la qualité des constituants du béton et de l'environnement dans lequel les réactions se produisent.

2- Caractéristiques principales du béton durcissant

La caractéristique essentielle du béton durci est la résistance mécanique en compression à un âge généralement de 28 jours. Le béton est un matériau travaillant bien en compression, dont la connaissance de ses propriétés mécaniques est indispensable pour le calcul du dimensionnement des ouvrages.

Lorsqu'il est soumis à l'action d'une charge rapidement croissante, le béton se comporte comme un matériau fragile. D'une part, sa rupture n'est pas précédée de déformations importantes et, d'autre part, sa résistance à la traction est beaucoup plus faible que sa résistance à la compression.

On se préoccupe assez peu de sa durabilité, de son imperméabilité. Très souvent un béton de résistances mécaniques élevées est durable bien que l'on puisse confectionner avec un ciment très performant un béton sous-dosé, peu étanche, de durabilité limitée, mais possédant cependant les résistances en compression exigées.

On verra que la résistance du béton dépend d'un grand nombre de paramètres : le type et le dosage des matériaux utilisés, le degré et la condition de réalisation etc.

Par ailleurs, la résistance du béton est fonction d'une quantité de facteurs autres que la classe de ciment et qui sont à contrôler et à surveiller dès le choix de la qualité des granulats et tout au long de la chaîne de bétonnage.

La résistance d'un béton est une notion toute relative et elle dépend de la méthode d'essai utilisée (comprenant la forme des éprouvettes).

2.1- Résistance en compression

La résistance en compression à 28 jours est désignée par f_{c28} . Elle se mesure par compression axiale de cylindres droits de révolution et d'une hauteur double de leur diamètre. Le cylindre le plus couramment employé est le cylindre de 16 ($d = 15,96$ cm) dont la section est de 201cm^2 . La normalisation européenne indique comme dimension des cylindres $d = 16$ cm de $H = 32$ cm.

Elle varie suivant la taille des éprouvettes essayées. Plus celles-ci sont petites et plus les résistances sont élevées. La résistance sur cylindre d'élanement 2 (par exemple diamètre de 16 cm, hauteur de 32 cm) est plus faible de l'ordre de 20% que la résistance sur cubes de 20 cm (**Photo 4.1**). NF P 18-406 [15]

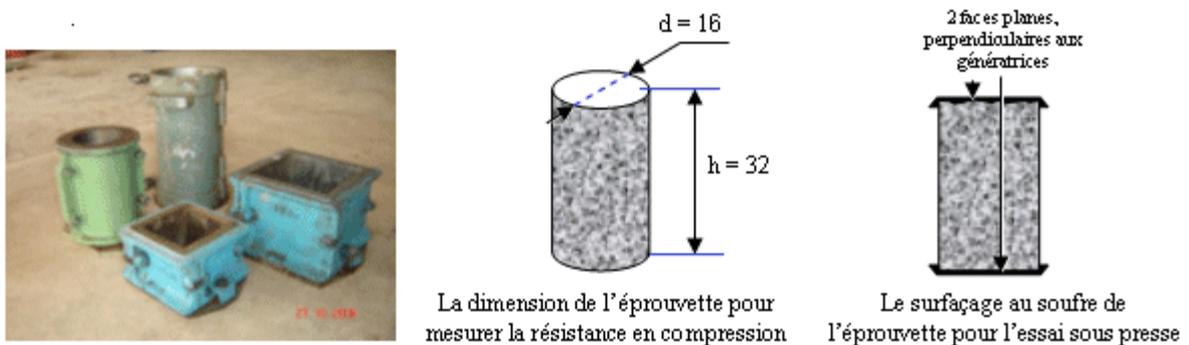


Photo 4.1 : Moules cylindriques, cubiques et les éprouvettes pour mesurer la résistance en compression.

Le béton de l'ouvrage a des résistances différentes de celles du même béton essayé sur éprouvettes d'essais normalisés (il y a l'effet de masse et une hydratation différente du fait des évolutions des températures elles-mêmes différentes). La résistance en compression est donc à associer à la méthode d'essai (ou à la référence de la norme utilisée) et à l'échéance fixée.

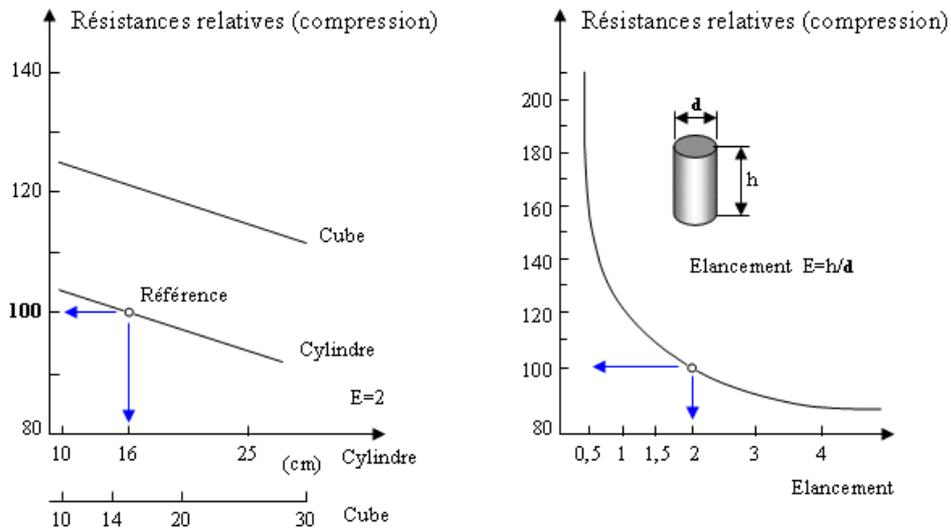


Fig. 4.1: Variations des résistances en compression d'un béton en fonction de la forme et des dimensions des éprouvettes. [15]

2.1.1- Mise en œuvre des éprouvettes

Le béton est testé sur des éprouvettes cylindriques normalisées de diamètre de 16 cm et de hauteur de 32 cm.

- On prépare les moules en les graissant.
- Après bétonnage et en même temps que les essais sur béton frais, on commence à remplir les éprouvettes en 3 couches en les vibrant pendant 15 secondes pour chaque couche.
- On laisse les éprouvettes reposer un peu, et puis on les frappe pour faire monter les bulles d'air.
- On surface la partie latérale supérieure.
- Après 24 heures, on démoule les éprouvettes et on les conserve dans un bac d'eau (photo 4.2).



Photo 4.2 : Bac d'eau non remplis.



Photo 4.3: Table vibrante.

2.1.2- Ecrasement des éprouvettes

- 24 heures avant chaque essai de compression, on enlève les éprouvettes du bassin en les mettant à sécher à l'aire libre.
- Le jour de l'essai, on surface les extrémités latérales des éprouvettes en employant le soufre (**Photo 4.4**) et ceci dans le but d'obtenir une planéité parfaite des faces de chargement ainsi que l'orthogonalité de celles-ci par rapport aux génératrices des cylindres.
- Après surfaçage, on met l'éprouvette dans la presse (**Photo 4.5**), on augmente la charge progressivement jusqu'à la rupture et on note la résistance à la compression



Photo 4.4 : Eprouvettes surfacés.



Photo 4.5: Presse électronique.

2.2- Résistance en traction

Généralement le béton est un matériau travaillant bien en compression, mais on a parfois besoin de connaître la résistance en traction, en flexion, au cisaillement. La résistance en traction à 28 jours est désignée par f_{t28} .

2.2.1- Résistance en traction par flexion

Les essais les plus courants sont des essais de traction par flexion. Ils s'effectuent en général sur des éprouvettes prismatiques d'élançement 4, reposant sur deux appuis (**Fig. 4.2**):

- soit sous charge concentrée unique appliquée au milieu de l'éprouvette (moment maximal au centre).
- soit sous deux charges concentrées, symétriques, égales, appliquées au tiers de la portée (moment maximal constant entre les deux charges (**Fig. 4.2**)).

Conformément à la norme **NF P 18-407 [14]**

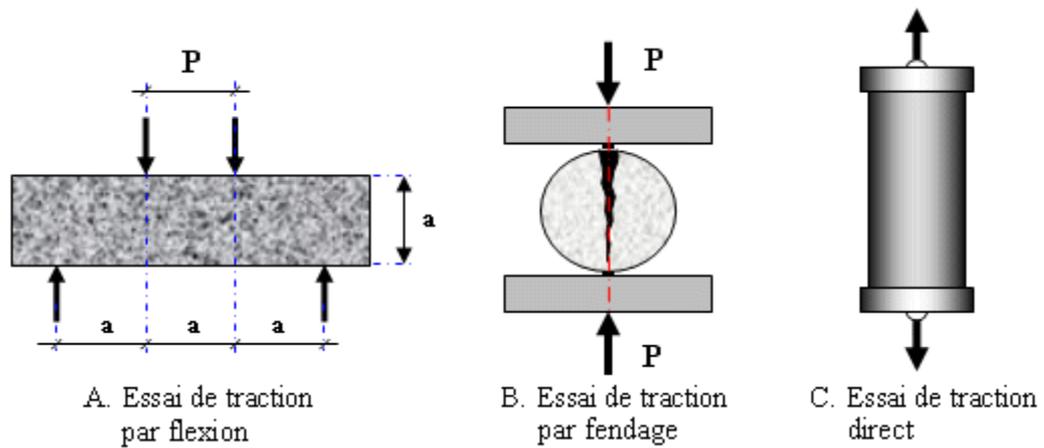


Fig. 4.2 : Essai sur résistance d'un béton en traction par flexion [14]



Photo 4.6 : Machine automatique de flexion.



Photo 4.7 : Eprouvettes de traction par flexion.

2.2.2- Résistance en traction par fendage

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse. Cet essai est souvent appelé "Essai Brésilien". Si P est la charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre par mise en traction du diamètre vertical, la résistance en traction sera :

$$f_{ij} = 2 \frac{P}{\pi DL}$$

avec : j = âge du béton (en jours) au moment de l'essai ;

D et L = diamètre et longueur du cylindre.

2.2.3- Résistance en traction directe

La mesure se fait par mise en traction de cylindres identiques à celle de la résistance en traction par fendage, mais l'essai est assez délicat à réaliser car il nécessite, après sciage des extrémités, le collage de têtes de traction parfaitement centrées, l'opération devant avoir lieu sans aucun effort de flexion parasite.

3- Caractéristiques principales du béton frais

La caractéristique essentielle du béton frais est l'ouvrabilité, qui conditionne non seulement sa mise en place pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage, mais également ses performances à l'état durci.

Il existe un très grand nombre d'appareils de mesure de l'ouvrabilité du béton reposant sur des principes différents. Certains mesurent une compacité, d'autres un temps d'écoulement ou encore utilisent l'énergie potentielle du béton ou nécessitent un apport d'énergie extérieur.

On comprend qu'il est difficile de convenir d'un tel appareil tenant compte de tous les bétons possibles pour tous les usages et qui tiennent compte aussi des différents facteurs de l'ouvrabilité. Certains appareils sont utilisés à la fois par les laboratoires et par les chantiers. La distinction proposée est donc parfois assez artificielle, sauf dans le cas d'appareillage très élaboré.

3.1 : Ouvrabilité du béton frais

Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité. On n'en citera que quelques-uns qui sont les plus couramment utilisés dans la pratique.

3.1.1- Affaissement au cône d'ABRAMS

Cet essai (slump-test) est incontestablement un des plus simples et des plus fréquemment utilisés, car il est très facile à mettre en œuvre. Il ne nécessite qu'un matériel peu coûteux et peut être effectué directement sur chantier par un personnel non hautement qualifié mais ayant reçu simplement les instructions nécessaires au cours de quelques séances de démonstration. L'appareillage est complètement décrit dans la norme **NF P 18-451** et est schématisé sur la (**figure 4.3**), il se compose de 4 éléments: un moule tronconique sans fond de 30 cm de haut,

de 20 cm de diamètre en sa partie inférieure et de 10 cm de diamètre en sa partie supérieure; une plaque d'appui; une tige de piquage; un portique de mesure. [9]

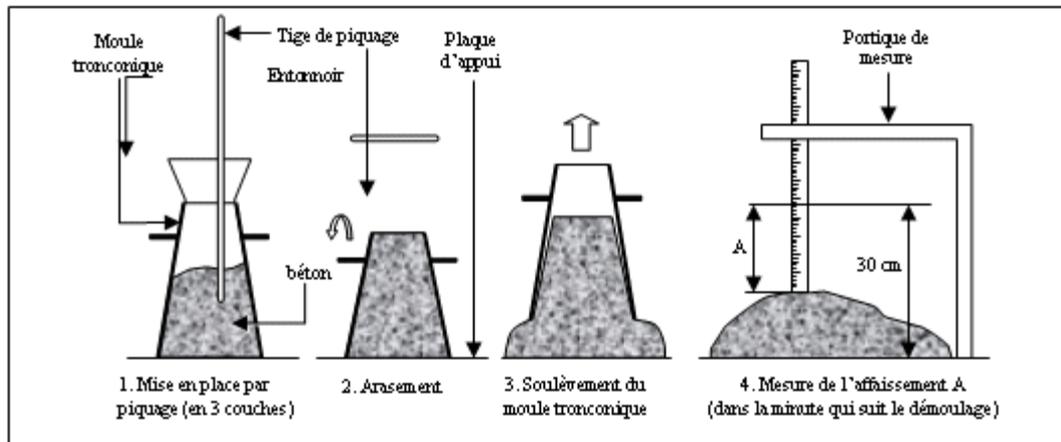


Fig 4.3 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams

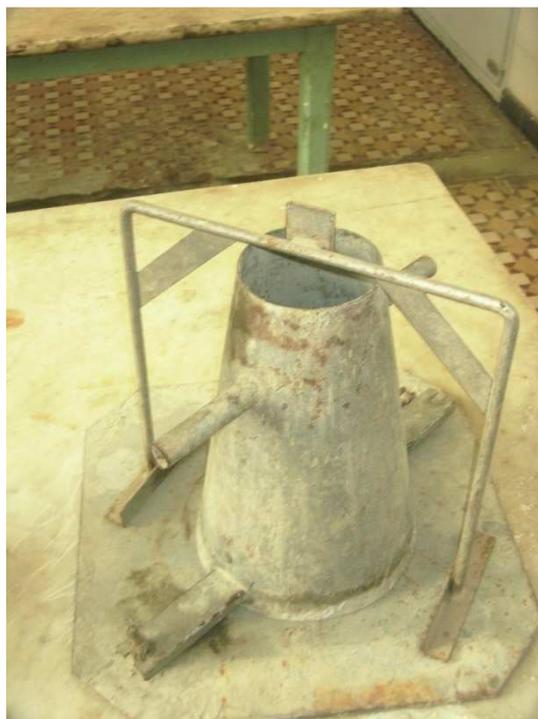


Photo 4.8: Cône d'Abrams

Les mesures sont quelques peu dispersées et il ne faut pas accorder à cet essai un caractère trop rigoureux, mais on peut admettre qu'il caractérise bien la consistance d'un béton et permet le classement approximatif indiqué au (tableau 4.1)

Tableau 4.1 : Appréciation de la consistance du béton en fonction de l'affaissement.

Affaissement (Cm)	Béton	Mise en œuvre
0 à 2	Très ferme	Vibration puissant
3 à 5	Ferme	Bonne vibration
6 à 9	Plastique	Vibration courante
10 à 13	Mou	Piquage
10 à 14	Très mou à liquide	Léger piquage

3.1.2- Etalement sur table (flow-test)

L'essai d'étalement sur table (Flow-test) consiste à utiliser une table à chocs (**Fig 4.4**), comprenant un plateau métallique animé d'un mouvement vertical. Un moule tronconique disposé sur cette table et du matériau à étudier (mortier ou béton). Après arasement et démoulage (en soulevant le moule), on donne à la table, à l'aide d'une manivelle, quinze chocs en quinze secondes (hauteur de chute = 12,5 mm). Le matériau s'étale sous forme d'une galette dont on mesure les deux diamètres perpendiculaires. L'étalement (en %) est donné par la formule:

$$\frac{D-D_1}{D} \times 100$$

avec D_1 : diamètre inférieur du moule:
 D : diamètre moyen de la galette après étalement.

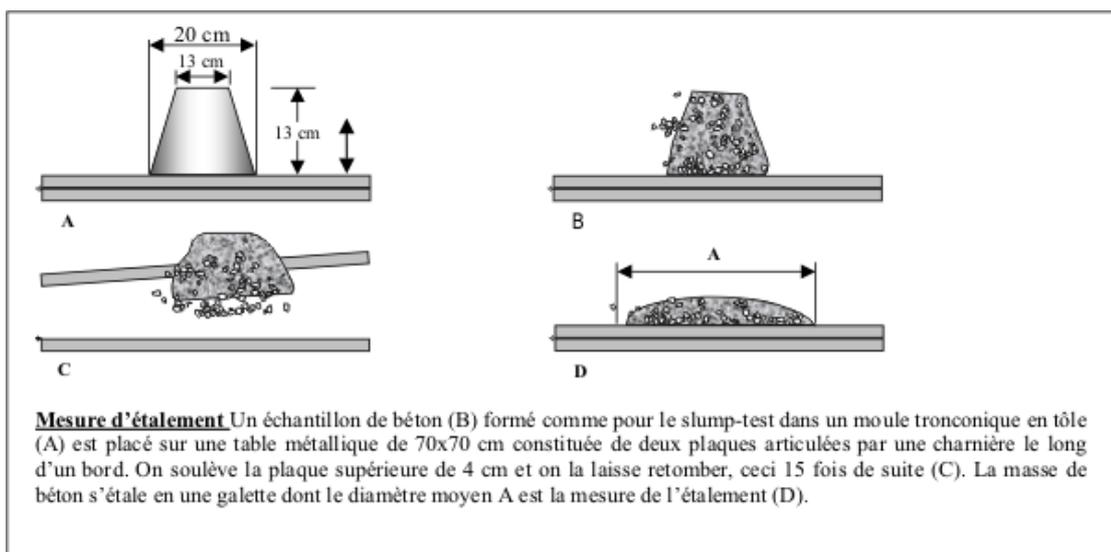


Fig 4.4: Mesure de l'affaissement sur table

C'est un essai très simple utilisable sur mortier ou sur béton (moules et tables de dimensions différentes), aussi bien en laboratoire que sur les chantiers (il est dans ce cas, très utilisé en Allemagne). On peut pour le béton admettre les valeurs données dans le **tableau 4.2**.

Tableau 4.2 : Valeurs d'étalement à la table [2]

<i>Ouvrabilité</i>	<i>Étalement à la table (%)</i>
Très ferme	10 – 30
Ferme	30 – 60
Normal	60 – 80
Mou	80 – 100
Très mou à liquide	>100

3.2- Déformation des bétons

La résistance mécanique et la déformation sont des caractéristiques importantes du béton, car elles jouent un grand rôle non pas seulement pour la stabilité, mais aussi la durabilité des ouvrages.

Lorsque le béton est soumis à l'action d'une charge rapidement croissante, il se comporte comme un matériau fragile. D'une part, sa rupture n'est pas précédée de déformations importantes et d'autre part, sa résistance à la traction est beaucoup plus faible que sa résistance à la compression. La résistance à la traction s'annule même complètement si des fissures de retrait se sont développées.

Le choix judicieux des matériaux, une mise en œuvre correcte, l'adoption de dispositions constructives appropriées jouent un rôle essentiel dans l'art de construire. Toutefois, comme une partie importante de ses activités est consacrée aux problèmes de dimensionnement des constructions, l'ingénieur attache une importance particulière aux caractéristiques de résistance mécanique et de déformation des matériaux, car leur connaissance lui est indispensable pour réaliser des constructions à la fois sûres et économiques.

Dès la fin de la mise en œuvre, le béton est soumis à des déformations, même en absence de charges.

3.2.1- Retrait

Les retraits se mesurent des prismes 4x4x16 cm en mortier 1/3, munis de plots à leurs extrémités et conservés, après démoulage, dans une enceinte à 20°C et à 50% d'humidité relative. Ce retrait progresse à peu près comme le logarithme entre 1 et 28 jours.

Le mortier prend son retrait plus rapidement que la pâte pure. Le rapport du retrait de la pâte pure sur le retrait du mortier croît avec le temps. Il est de l'ordre de 1,5 à 2,5 les premiers jours, puis augmente pour 2,5 à 3,5 en un an. En moyenne, le retrait sur mortier est 2 à 3 fois plus faible que celui de la pâte pure (avec le même ciment). [21]

C'est la diminution de longueur d'un élément de béton. On l'assimile à l'effet d'un abaissement de la température qui entraîne un raccourcissement

Causes et constatation	Remèdes
<p>Le retrait avant prise est causé par l'évaporation d'une partie de l'eau que contient le béton. Des fissures peuvent s'ensuivre car le béton se trouve étiré dans sa masse.</p>	<p>Il s'agit de s'opposer au départ brutal de l'eau par :</p> <ul style="list-style-type: none"> - la protection contre la dessiccation. - l'utilisation d'adjuvants ou de produits de cure.
<p>Après la prise, il se produit :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le retrait thermique dû au retour du béton à la température ambiante après dissipation de la chaleur de prise du ciment. On constate une légère diminution de longueur. 	<p>Il faut éviter de sur-doser en ciment. Les ciments de classe 45 accusent moins de retrait que ceux de classe 55 de durcissement plus rapide.</p>
<ul style="list-style-type: none"> - Le retrait hydraulique est dû à une diminution de volume résultant de l'hydratation et du durcissement de la pâte de ciment. Le retrait croît avec la finesse de ciment et le dosage. 	<p>Le béton aura d'autant moins de retrait qu'il sera plus compact ; ce qui dépend de la répartition granulaire, car un excès d'éléments fins favorise le retrait ainsi que les impuretés (argiles, limons).</p>

Estimation du retrait : $\Delta l = 3 \text{ ‰} \times L$.

Δl – est le raccourcissement.

L – est la longueur de l'élément.

Si une corniche en béton armé a une longueur de 15 cm, le retrait est de l'ordre de: $3 \text{ ‰} \times 15000 \text{ cm} = 0,45 \text{ cm}$.

3.2.2- Cause

Lors de la fabrication des bétons ordinaires, la quantité d'eau pour obtenir un béton maniable est toujours supérieure à celle nécessaire à l'hydratation du béton. Ainsi, pour un béton classique d'ouvrage d'art, seulement la moitié environ de l'eau de gâchage sera consommée au cours de l'hydratation. Le béton, contient de ce fait un surplus d'eau qui, en s'évaporant, va provoquer le séchage du matériau. Ce processus commence dès le décoffrage, lorsque la surface de la structure se trouve en déséquilibre hygrométrique avec le milieu ambiant. Il peut même commencer avant la prise, si les faces non coffrées n'ont pas été protégées.

Le gradient de concentration d'eau apparaissant entre le cœur et la surface de la structure induit un transfert d'humidité de l'intérieur vers l'extérieur de béton. Ces transferts sont très lents et les gradients hydriques, considérables au voisinage des surfaces de l'ouvrage, vont subsister très longtemps, de plusieurs années à plusieurs siècles pour les pièces les plus épaisses. Ainsi, le séchage des ouvrages reste pendant la majeure partie de leur durée de vie, un phénomène de surface.

C'est un phénomène de raccourcissement qui accompagne la prise du ciment on peut l'assimiler à l'effet d'un abaissement de température entraînant un raccourcissement.

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

Certains ciments sont plus sensibles que d'autres à la dessiccation (ciment à base de laitier par exemple : ciment fondu)

Selon le type d'ouvrage, on ne peut pas tenir compte des effets du retrait et des variations de températures pour les constructions dont la longueur totale ou comprise entre joints est inférieure ou égale à 25 m. Mais par exemple dans le cas de dallage ou de chapes, on doit

prévoir des joints de fractionnement pour éviter que les fissures ne se produisent, soit en limitant au coulage leurs dimension, soit par sciage mécanique dans les heures qui suivent la prise, soit par la mise en place au moment du coulage de profilés plastiques. [24]

3.2.3- Différents types de retrait

On distingue plusieurs types de retrait :

Tableau 4.3 : Différents types de retrait

Types	Causes	Constatations	Remèdes
Avant Prise	causé par l'évaporation d'une partie de l'eau que contient le béton.	Des fissures peuvent s'ensuivre car le béton se trouve étiré dans sa masse.	Il s'agit de s'opposer au départ brutal de l'eau par : - l'utilisation d'adjuvants ou de produits de cure.
Après, la prise (retrait thermique)	dû au retour du béton à la température ambiante après dissipation de la chaleur de prise du ciment.	On constate une légère diminution de longueur.	Il faut éviter de surdoser en ciment. Les ciments de classe 45 accusent moins de retrait que ceux de classe 55 de durcissement plus rapide.
Le retrait hydraulique	dû à une diminution de volume résultant de l'hydratation et du durcissement de la pâte de ciment.	Le retrait croît avec la finesse de ciment et le dosage.	Le béton aura d'autant moins de retrait qu'il sera plus compact ; ce qui dépend de la répartition granulaire, car un excès d'éléments fins favorise le retrait ainsi que les impuretés (argiles, limons).

3.2.4- Facteurs agissant sur l'amplitude de retrait

Tout paramètre influant sur le bilan de l'eau dans le béton, influera sur son retrait puisque ce dernier est lié, en grande partie, aux migrations d'eau. Ces facteurs qui agissent sont:

- ✓ Le dosage en ciment: le retrait augmente avec le dosage en ciment;
- ✓ La quantité d'eau de gâchage.
- ✓ Les vides d'air: l'évaporation de l'eau est facilitée par une forte perméabilité du béton;

- ✓ La finesse de mouture du ciment: cela nécessite une plus grande quantité d'eau de mouillage;
- ✓ La présence d'éléments fins: proviennent en général de l'emploi de granulats argileux ou de granulats de broyage non dépoussiérés;
- ✓ Nature du ciment: facteur de toute première importance. Les ciments à forte proportion de laitier conduisent à des valeurs de retrait plus élevées (cas d'une conservation dans l'air).
- ✓ Hygrométrie de l'ambiance: le retrait croit quand l'humidité relative diminue;

3.2.5- Essai de retrait

a. Objectif de l'essai

Il s'agit d'évaluer le retrait, ou le gonflement, que provoque le ciment sur des éprouvettes de mortier normal et avec sable de dune.

b. Principe de l'essai

On compare, à différents temps t , la variation de longueur d'une éprouvette 4x4x16 cm, par rapport à sa longueur à un temps t_0 pris pour origine.

c. Equipement nécessaire

Il est décrit dans la norme **NF P 15-433**

Une salle maintenue à une température de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et $5^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Un malaxeur normalisé



Photo 4.9 : Appareille de malaxage

Des moules équipés de plots de retrait en laiton sont vissés au moule au moment de la mise en place du mortier puis désolidarisés du moule avant le démoulage. Après le durcissement, les éprouvettes 4x4x16 sont donc munies à leurs deux extrémités de plots comme indiqué sur la **figure 4.5**.

Un déformètre (tel que celui schématisé sur la **figure 4.5**) équipé d'un comparateur permettant de réaliser des mesures avec une exactitude inférieure ou égale à 0.005 mm. Une tige de 160mm de longueur doit permettre de régler le zéro du déformètre. Cette tige est en Invar de façon à ce que les variations de température qu'elle peut connaître au cours de la manipulation n'entraînent pas de modification appréciable de sa longueur. [12]

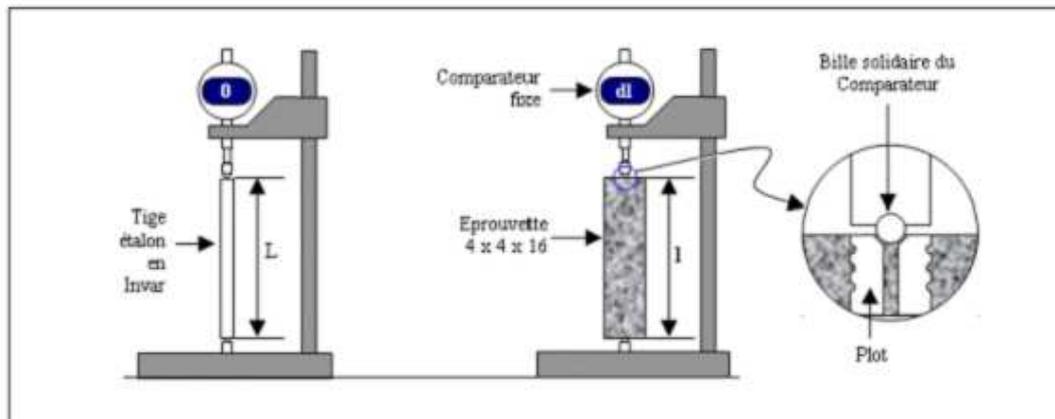


Fig. 4.5 : Appareillage pour la mesure de retrait [12]

d. Conduite de l'essai

Au moment de la mesure, le comparateur est mis au zéro sur la tige étalon en Invar de longueur $L = 160$ mm. Soit $dl(t)$ la valeur lue sur le comparateur au temps t ; l'éprouvette a une longueur au temps considéré :

$$l = L + dl(t)$$

Soit $\Delta l(t_0)$ la longueur de l'éprouvette au temps t_0 choisi d'origine. En générale, cette origine est prise au moment du démoulage, 24 h après la confection des éprouvettes. La variation de longueur au temps t sera :

$$\Delta l(t) = l(t) - l(t_0) = dl(t) - dl(t_0)$$

La variation relative de longueur est généralement désignée par ε et a pour expression :

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{L} = \frac{dl(t) - dl(t_0)}{L}$$

$\Delta l(t)$ est obtenu en faisant la moyenne sur les 3 éprouvettes issues de même moule. Lorsque les éprouvettes sont conservées dans l'air, $\Delta l(t)$ est généralement négatif et l'on parle alors de retrait de l'éprouvette. Lorsque l'éprouvette est conservée dans l'eau, $\Delta l(t)$ peut être positif ; il y'a alors gonflement. [12]

3.3- Gonflement

La pâte de ciment ou le béton mûris continuellement dans l'eau après leur mise en place augmentent en volume et en masse. Ce gonflement est dû à l'absorption d'eau par le gel de ciment. Les molécules d'eau agissent contre les forces de cohésion et tendent à éloigner les particules du gel, créant ainsi une pression de gonflement. De plus, l'intrusion de l'eau réduit la tension de surface du gel, provoquant par la suite une petite expansion.

Le gonflement du béton est nettement plus faible que celui de la pâte de ciment, soit à peu près 100×10^{-6} à 150×10^{-6} pour un béton dont le dosage en ciment est de 300 kg/m^3 . Cette valeur est atteinte 6 à 12 mois après la mise en place et on observe très peu de gonflement par la suite.

Le gonflement s'accompagne d'une augmentation de la masse de l'ordre de 1%. Le gain de masse est donc considérablement plus grand que celui du volume, car l'eau qui pénètre occupe l'espace créé par la diminution de volume du système eau-ciment due à l'hydratation.

Le gonflement est plus important dans l'eau de mer et sous de hautes pressions, conditions qui existent dans les structures sous-marines profondes. Sous une pression de 10 Mpa (qui correspond à une profondeur de 100m), le gonflement peut être environ 8 fois plus important que celui mesuré à la pression atmosphérique. Il est également occasionné par l'infiltration d'eau de mer (intrusion des chlorures).

3.4- Dilatation

Puisque le coefficient de dilatation thermique du béton est évalué à 1×10^{-5} , pour une variation de ± 20 °C on obtient: $\Delta l = \pm 2 \text{ ‰} \times \text{longueur}$.

Pour chaînage en B.A. de 20 m de longueur et un écart de température de 20 °C, on a une dilatation de : $2 \text{ ‰} \times 2000 \text{ cm} = 0,4 \text{ cm}$.

3.5- Fluage

Lorsqu'il est soumis à l'action d'une charge de longue durée, le béton se comporte comme un matériau VISCO-ELASTIQUE. La déformation instantanée qu'il subit au moment de l'application de la charge est suivie d'une déformation lente ou différée qui se stabilise après quelques années. C'est ce que l'on appelle le fluage

Le fluage est pratiquement complet au bout de 3 ans.

Au bout d'un mois, les 40 % de la déformation de fluage sont effectués et au bout de six mois, les 80%. Estimation de la déformation de fluage:

$\Delta l = 4 \text{ à } 5 \text{ ‰} \text{ longueur}$. [22]

Cette déformation varie surtout avec la contrainte moyenne permanente imposée au matériau.

4. Elasticité du béton

Le module d'élasticité E est défini par le rapport:

$$E = \frac{\text{contrainte unitaire}}{\text{déformation relative}}$$

Pour les projets courant, on admet:

$E_{ij} = 11\,000 f_{cj}^{1/3}$ (module de déformation longitudinale instantanée du béton) avec

- f_{cj} = résistance caractéristique à « j » jours.
- $E_{vj} = 3\,700 f_{cj}^{1/3}$ (module de déformation différée) avec
- $f_{cj} = 1,1 f_{c28}$. Il s'ensuit que

$$E_{vj} \approx \frac{1}{3} \text{ de } E_{ij}.$$

Notes : E_{ij} , E_{vj} , f_{c28} , f_{cj} sont exprimés en MPa.

Le module d'élasticité de l'acier est de l'ordre de : $200\,000 \text{ N/mm}^2$, soit $2\,000\,000 \text{ daN/cm}^2$.

[10]

5- Effet de Poisson

En compression comme en traction, la déformation longitudinale est aussi accompagnée d'une déformation transversale.

Le coefficient « Poisson » est le rapport :

$$\frac{\text{déformation transversale}}{\text{déformation longitudinale}} \quad \text{dont la valeur varie entre } 0,15 \text{ et } 0,30$$



CHAPITRE : 5
IDENTIFICATION DES
MATÉRIAUX

1- Introduction

La confection du béton selon les normes appropriées nécessite la connaissance des caractéristiques des différents constituants, afin d'avoir un béton ordinaire conforme aux normes. Ce chapitre sera consacré à l'étude et à la détermination des propriétés des constituants du béton sur lequel porte notre étude.

La connaissance des caractéristiques physico-chimiques de chaque composant à part, par des analyses et essais normalisés effectués au laboratoire, nous permet de faire l'interprétation des résultats obtenus par les essais sur le mélange de ses matériaux.

Les essais à effectuer pour chaque matériau sont :

Granulométrie ; Module de finesse ; Equivalent de sable ; Essai au bleu de méthylène ; Friabilité des sables ; Analyse chimique ; Micro Deval ; Coefficient d'aplatissement des gravillons ; Masse volumique (absolue, apparente) ; Essai Los-Angeles ; Compacité et porosité.

1.1- Analyse granulométrique

La granulométrie permet de classer et de définir d'après la grosseur des grains qui les composent, les différents matériaux employés dans la construction.

Pour effectuer ce classement on se sert de tamis et de passoire. Par définition, un tamis comporte des mailles carrées constituées par des fils qui se croisent, et une passoire comporte des trous ronds, pratiqués dans une tôle.

A noter cependant que la tendance actuelle est d'utiliser des tamis à mailles carrées pour toutes les dimensions même les plus grandes. Ce qui évite toute ambiguïté.

Un matériau se compose donc de grains de diverses grosseurs, qu'il faut classer. Pour cela on utilise la courbe granulométrique.

1.2- Courbe granulométrique

En ordonnées, on porte une échelle graduée de 0 à 100 % où figurent les fractions cumulées, passant à une maille déterminée. En abscisse on porte les dimensions des tamis, l'échelle est logarithmique. On obtient ainsi une série de points que l'on relie par les segments de droites, l'ensemble ainsi obtenu s'appelle : courbe granulométrique et représente ce que la terminologie officielle appelle la granularité du granulat.

1.3- Module de finesse

Il est noté M_f . Et Dans le cas des bétons hydrauliques des structures, le module de finesse est égal au centième de la somme des refus exprimés en pourcentage pondéral des tamis (0,16)-(0,315)-(0,63)-(1,25)-(2,5)-(5) mm.

1.4- Equivalent de sable

L'équivalent de sable est le rapport multiplié par 100, de la hauteur de la partie sédimentée à la hauteur totale du floculat et de la partie sédimentée.

Ces hauteurs sont déterminées dans une éprouvette où la prise d'essai a été traitée, dans des conditions définies, par une solution capable de faire flocculer les éléments fins.

L'essai permet d'avoir une idée globale de la quantité et de la qualité des éléments fins contenus dans un sable en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments dits sableux et les éléments fins (argile, impuretés). [16]

1.5- Essai au bleu de méthylène

Cet essai a le même but que l'essai précédent, mais son avantage est d'être à la fois quantitatif et qualitatif.

-Quantitatif : A nature de fines donnée, plus la teneur en fines sera importante plus la valeur du bleu sera forte.

-Qualitatif : A teneur en fines donnée, plus les fines seront 'actives' plus la valeur de bleu sera également importante.

1.6- Friabilité

Cet essai est aux sables ce qu'est l'essai micro-Deval pour les gravillons. Son but est de déterminer la résistance à l'attrition du sable en présence d'eau.

1.7- Micro-Deval

Le MICRO-DEVAL a pour objet de mesurer la résistance à l'usure par frottement des matériaux.

- La prise d'essai constituée par 500 g d'une des 3 classes granulaires 4/6 – 6/ 10 ou 10/14, est placée dans une cylindre métallique avec une charge constituée de billes d'acier de 10 mm de diamètre.

- La rotation du cylindre autour de son axe horizontal entraîne une usure par frottement granulats-billes et la formation d'une proportion de fines d'autant plus grande que le matériau est plus tendre.
- La durée de l'essai est de 2 heures.
- La vitesse de rotation du cylindre est de 100 tr/mn
- La charge de bille est de 5 kg pour la classe 10/14, 4 kg pour 6/10 et de 2 kg pour 4/6.
- Le coefficient Micro-Deval (MDE) est le pourcentage d'éléments passant au tamis de 2 mm par rapport au poids total de l'échantillon essayé.

Le tableau suivant donne l'appréciation de la qualité des granulats en fonction du coefficient MICRO – DEVAL [16]

Tableau 5.1 : Appréciation de la dureté MICRO-DEVAL. [16]

MICRO-DEVAL (%)	APPRECIATION
<13	Très bon à bon
13-20	Bon à moyen
20-25	Moyen à faible
>25	Médiocre

1.8- Coefficient d’aplatissement des gravillons

Le Coefficient d’aplatissement des gravillons est le pourcentage des grains tel que, si G désigne la dimension de la maille carrée minimale à travers laquelle passe l’élément et E le plus petit écartement d’un couple de plans tangents parallèles, on ait comme relation :

$G/E > 1,58$.

1.9- Masses volumiques absolue et apparente

Elles sont exprimées en Kg/m^3 , la masse volumique absolue qui est la masse par unité de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains. La masse volumique apparente est la masse du matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides. Elles sont déterminées selon les méthodes classiques, respectivement masse d’un certain volume de matériau et éprouvette graduée.

1.10- Essai Los-Angeles

L'essai permet d'estimer l'évolution de la granularité due à la fragmentation des éléments sous le choc de boulets : il se pratique sur 3 classes granulaires de matériaux concassés : 4/6,3 - 6,3/10 - 10/14. On introduit un poids de 5000 g d'échantillon dans un tambour métallique tournant autour d'un axe horizontal à une vitesse de 33 tours/mn, avec une charge de boulets de fonte ou d'acier de 420 g chacun, variable d'un granulat à un autre.

- On pèse les éléments passant au tamis de 1,6 mm.
- Le coefficient Los-Angeles (L A) est le rapport en % du poids de ce tamisât au poids initial.

Le matériau est évidemment d'autant meilleur que le coefficient L.A est plus faible ; un bon gravillon doit avoir un L.A. inférieur à 35 %.

Le tableau suivant représente l'appréciation de la qualité des granulats en fonction du coefficient de Los-Angeles [16]

Tableau 5.2 : Appréciation de la résistance à la fragmentation. [16]

LOS-ANGELES (%)	APPRECIATION
<15	Très bon à bon
15-20	Bon à moyen
20-30	Moyen à faible
>30	Médiocre



Photo 5.1 : Los ANGELES.



Photo 5.2 : Micro DEVAL

1.11- Compacité

On définit la compacité d'un béton comme le rapport du volume solide sur le volume total,

$$C = (MV_{\text{apparente}})/(MV_{\text{absolue}})$$

1.12- Porosité

La porosité est déterminée par le rapport du volume des vides renfermés dans les grains accessibles à l'eau, au volume réel de l'échantillon. Ou bien c'est complément à l'unité de la compacité $P=1-C$

1.13- Analyse chimique

A but de déterminer les teneurs de matières organiques, telles que les sulfates, sulfures et les chlorures, contenus dans les matériaux. Ces éléments peuvent perturber les résultats, au-delà des limites admissibles.

2. Granulats fins (Sable)

Le sable utilisé dans cette étude provient de la région de Boussaâda, il est chargé de grains fins.

2.1. Caractéristiques physiques

2.1.1. Analyse granulométrique

Le **Tableau 5.3** montre les refus et les tamisât du sable de dune utilisé.

Poids total = 1000 g

Tableau 5.3: Analyse granulométrique du sable de dune.

Diamètre (mm)	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Tamisât (g)	Tamisât (%)
5	0	0	1000	100
2.5	0	0	1000	100
1.25	0	0	1000	100
0.63	0	0	1000	100
0.315	29.5	29.5	970.5	97.05
0.16	511.6	541.1	458.9	45.89
0.08	440.2	981.3	18.9	1.87
f	16.7	998	0	0

2.1.2. Propriétés physiques

- Équivalent de sable (NFP 18-598):

- Bleu de méthylène (NFP 18-595)

Les principales caractéristiques physiques des matériaux utilisés (sable de dune) sont regroupées dans le **Tableau 5.4**.

Tableau 5.4 : Propriétés physiques du sable de dune

Essais	résultat
Module de finesse (M_f)	0.54
Equivalent de sable (ES)	92.63%
Valeur au bleu de méthylène (VB)	0.5 mg/l
Friabilité	20 %
Masse volumique apparente	1.9 t/m ³
Masse volumique absolue	2.58 t/m ³
Compacité	73.64 %
Porosité	26.36 %

2.2. Analyse chimique

L'analyse chimique sommaire de notre matériau est résumée dans le **tableau 5.5**.

Tableau 5.5 : Analyse chimique sommaire du sable de dune

Eléments	Pourcentage (%)
Insolubles (silice SiO ₂ +silicates)	95.56
Oxyde de fer (FeO ₃) et oxyde d'alumine (Al ₂ O ₃)	1.73
Chlorures (Na Cl)	0.29
Sulfates (CaSO ₄ , 2 H ₂ O)	Traces
Carbonates (CaCO ₃)	3.39
Anhydride Carbonique (CO ₂)	1.49
Perte au feu à 1050 °C	1.73
Eau de constitution (H ₂ O)	0.24

Conclusion

Le sable de dune de Boussaâda est de nature **siliceux** vu le taux important d'insolubles (silice SiO₂+silicates) avec grains roulés de forme arrondie et de surface lisse. Il est caractérisé par sa finesse, sa granulométrie et son diamètre maximal ; (grosseur maximale) qui n'excède pas 2,0 mm

3. Sable naturel

L'origine de sable est de la région d'AKBOU située à 200 KM d'Alger.

Les caractéristiques physico-chimiques de ce sable naturel sont présentées ci-dessous :

3.1. Caractéristiques physiques

3.1.1. Analyse granulométrique

Poids total = 2000 g

Tableau 5.6 : Analyse granulométrique du sable naturel.

Diamètre (mm)	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Tamisât (g)	Tamisât (%)
10	0	0	2000	100
8	0	0	2000	100
6.3	26	26	1974	98,7
5	36	62	1938	96,9
2.5	466	528	1472	73,6
1.25	576	1104	896	44,8
0.63	400	1504	496	24,8
0.315	236	1740	260	13
0.16	156	1896	104	5,2
0.08	70	1966	34	1,7
f	34	2000	0	0

3.1.2. Propriétés physiques

Les principales caractéristiques physiques de notre sable sont regroupées dans le **Tableau 5.7.**

Tableau 5.7: Propriétés physiques du sable naturel

Essais	résultat
Module de finesse (M_f)	3.42
Equivalent de sable (ES)	88.63
Valeur au bleu de méthylène (VB)	0.52 g/l
Friabilité	41.03 %
Masse volumique apparente	1,63 t/m ³
Masse volumique absolue	2,56 t/m ³
Compacité	63.67 %
Porosité	36,33 %

D'après des essais prouvés par Mr Dreux, il résulte que l'équivalent de sable augmente avec le module de finesse ; mais pour des valeurs faibles de ce dernier, l'E.S. conserve des valeurs relativement élevées ; ceci prouve que les sables employés dans notre mélange sont des sables très propres.

3.2. Analyse chimique

L'analyse chimique de notre sable est résumée dans le **tableau 5.8**.

Tableau 5.8 : Analyse chimique sommaire du sable naturel

Eléments	Pourcentage (%)
Insolubles (silice SiO ₂ +silicates)	85.5
Oxyde de fer (FeO ₃) et oxyde d'alumine (Al ₂ O ₃)	6.03
Chlorures (Na Cl)	0.47
Sulfates (CaSO ₄ , 2 H ₂ O)	Traces
Carbonates (CaCO ₃)	6.03
Anhydride Carbonique (CO ₂)	2.65
Perte au feu à 1050 °C	4.05
Eau de constitution (H ₂ O)	1.37

Le sable utilisé dans notre étude est de nature siliceux vu le taux important d'insoluble (Silice + silicates)

4. Gravier (8/15)

L'origine de gravier (8/15) est **KEDARA** (semi concassé)

4.1. Caractéristiques physiques

4.1.1. Analyse granulométrique

Poids total = 3000 g

Tableau 5.9 : Analyse granulométrique du Gravier (8/15).

Diamètre (mm)	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Tamisât (g)	Tamisât (%)
20	0	0	3000	100
16	0	0	3000	100
12,5	181,8	181,8	2818,2	93,94
10	1021,2	1203	1797	59,9
8	888,9	2091,9	908,1	30,27
6,3	758,1	2850	150	5
5	81,9	2931,9	68,1	2,27
2,5	42,9	2974,8	25,2	0,84
1,25	25,2	3000	0	0
f	0	3000	0	0

4.1.2. Propriétés physiques

Les principales caractéristiques physiques de notre gravier sont regroupées dans le **Tableau 5.10**.

Tableau 5.10 : Propriétés physiques du gravier (8/15).

Essais	résultat
Coefficient d'aplatissement	7.44 %
Micro-Deval	18.58 %
Los-Angeles	21.23 %
Masse volumique apparente	1,47 t/m ³
Masse volumique absolue	2,65 t/m ³
Compacité	55.48 %
Porosité	44.53 %

4.2. Analyse chimique

Les principales caractéristiques chimiques de notre gravier sont présentées dans le **Tableau 5.11**.

Tableau 5.11 : Analyse chimique sommaire du gravier (8/15).

Eléments	Pourcentage (%)
Insolubles (silice SiO ₂ +silicates)	10.43
Oxyde de fer (FeO ₃) et oxyde d'alumine (Al ₂ O ₃)	4.37
Chlorures (Na Cl)	0.47
Sulfates (CaSO ₄ , 2 H ₂ O)	traces
Carbonates (CaCO ₃)	86.21
Anhydride Carbonique (CO ₂)	37.93
Perte au feu à 1050 °C	38.88
Eau de constitution (H ₂ O)	0.95

Sur la base des résultats des **tableaux 5.11 et 5.14**, il est intéressant de constater que les principaux constituants minéralogiques du gravier sont : les carbonates suivis de perte a feu, ensuite du silice et enfin de l'alumine.

La silice et l'alumine sont des minéraux qui constituent la structure des argiles. La présence de la teneur en carbonates de calcium nous indique que les graviers appartiennent au groupe des argiles calcaires. Par ailleurs, on remarque que la perte au feu est assez importante, ce qui prouve l'existence de matières organiques dans les graviers.

5. Gravier (15/25)

L'origine de gravier est de **KADARA** (semi concassé)

5-1. Caractéristiques physiques

5.1.1. Analyse granulométrique

Poids total = 5000 g

Tableau 5.12: Analyse granulométrique du gravier (15/25).

Diamètre (mm)	Refus (g)	Refus cumulé (g)	Tamisât (g)	Tamisât (%)
31,5	0	0	5000	100
25	483	483	4517	90,34
20	2630,5	3113,5	1886,5	37,73
16	1588	4701,5	298,5	5,97
12,5	275	4976,5	23,5	0,47
10	23,5	5000	0	0
f	0	5000	0	0

5.1.2. Propriétés physiques

L'analyse physique de gravier 15/25 est résumée dans le **tableau 5.13**.

Tableau 5.13 : Propriétés physiques du gravier (15/25).

Essais	résultat
Coefficient d'aplatissement	5.66 %
Micro-Deval	16.68 %
Los-Angeles	22.24 %
Masse volumique apparente	1,39 t/m ³
Masse volumique absolue	2,64 t/m ³
Compacité	52.65 %
Porosité	47.35 %

5.2. Analyse chimique

Les principales caractéristiques chimiques de notre gravier sont présentées dans le **Tableau 5.14**.

Tableau 5.14 : Analyse chimique sommaire du gravier (15/25).

Eléments	Pourcentage (%)
Insolubles (silice SiO ₂ +silicates)	11.93
Oxyde de fer (FeO ₃) et oxyde d'alumine (Al ₂ O ₃)	5.05
Chlorures (Na Cl)	0.41
Sulfates (CaSO ₄ , 2 H ₂ O)	traces
Carbonates (CaCO ₃)	84.48
Anhydride Carbonique (CO ₂)	37.17
Perte au feu à 1050 °C	38.00
Eau de constitution (H ₂ O)	0.83

Récapitulation

Le **tableau 5.15** résume les essais granulométriques sur tous les granulats utilisés

Tableau 5.15: Analyse granulométrique et caractéristique.

Provenance du matériau	Sable 2 BOUSSAADA	Sable 1 AKBOU	Gravier 8/15 KADDARA	Gravier 15/25 KADDARA
Diamètre des Tamis				
31,5				100
25				90,34
20				37,73
16			100	5,97
12,5			93,94	0,47
10			59,9	0
8		100	30,27	
6,3		98,7	5	
5		96,9	2,27	
2,5		73,6	0,84	
1,25		44,8	0	
0,63	100	24,8		
0,315	97,05	13		
0,16	45,89	5,2		
0,08	1,87	1,7		

Tableau 5.16 : Analyse granulométrique et caractéristique.

Provenance du matériau	Sable 2 BOUSSAADA	Sable 1 AKBOU	Gravier 8/15 KADDARA	Gravier 15/25 KADDARA
Masse Vol. Apparente	1,9	1,63	1,47	1,39
Masse Vol. Absolue	2,58	2,56	2,65	2,64
Module de finesse	0.54	3,42		

6. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la confection de béton est une eau courante et potable du robinet sans traitement supplémentaire dépourvue des excès de matières nuisibles telles que les sels, les sulfates et les acides.

7. Ciment

Nous avons utilisé un seul type de ciment au cours de cette expérimentation. Il s'agit d'un ciment portland composé CPJ-CEM II / A 42.5 NA 442
Ce ciment provient de (**La cimenterie de CHLEF**) de dosage **350 kg/m³**.

SELON NF P18 - 560

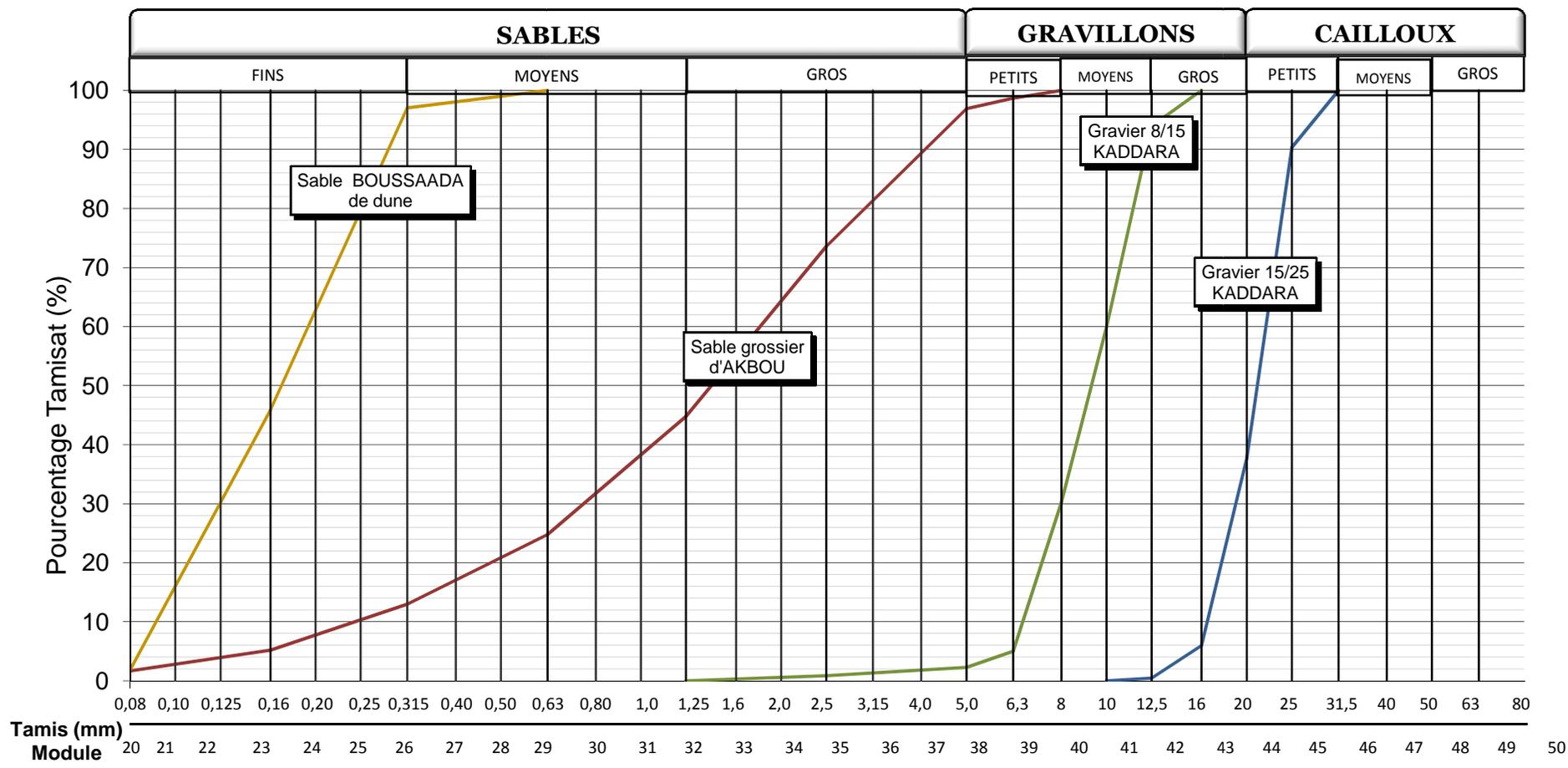


Figure 5.1: Courbe granulométriques.

8. Détermination des formulations des bétons utilisés

La composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un béton dont les qualités sont recherchées pour la construction d'un ouvrage ou d'une partie d'ouvrage

8.1. Composition granulaire du béton

Le tableau suivant résume l'origine de chaque granulat utilisé dans notre étude.

Tableau 5.17 : Origine des compositions granulaires du béton

Matériaux	Provenance
Gravier 15/25	<i>KADDARA</i>
Gravier 8/15	<i>KADDARA</i>
Sable 1	<i>AKBOU</i>
Sable fin	<i>BOUSSAADA</i>
Ciment	<i>CHLEF</i>
<i>Dosage Ciment (Kg/m³) 350</i>	

Il y a lieu de souligner que quelle que soit la méthode utilisée, celle-ci ne relève pas d'une science exacte et ne peut, à ce titre déterminé à elle seule les différents dosages de manière absolue ; c'est pourquoi une étude théorique ne conduit qu'à une approche du problème.

La solution définitive n'est obtenue qu'après avoir réalisé quelques essais (mesure et contrôle sur béton frais et béton durci)

Toute méthode de composition du béton doit être guidée par deux critères essentiels à savoir : **la résistance** et **l'ouvrabilité** ; or ces deux qualités sont étroitement liées l'une à l'autre mais varient en sens inverse.

Plusieurs méthodes de compositions des bétons ont été proposées par différents auteurs : méthode de Bolomey, Vallette, Dreux-Gorisse, Faury,

8.2.Méthode de Faury

8.2.1- Tracé de la Courbe granulométrique de référence

La valeur de Y est donnée par la formule suivante :

$$Y_{D/2} = A + 17\sqrt[3]{D} + \frac{B}{\frac{R}{D} - 0.75}$$

A : coefficient qui se choisit dans le tableau des valeurs de A

D : dimension maximale du béton.

B : constante, traduisant l'importance du serrage du béton,

Le coefficient B varie de 1 à 1,5.

B = 1.5 pour le béton mis en place par piquage (béton mou).

B = 1 dans tous les autres cas (béton ferme).

R : rayon moyen du moule.

- **Calcul la valeur Y**

Dans notre cas, le béton est soigneusement serré (B faible), effet de paroi négligeable (R très grand) alors résultat est voisin de zéro. Implique la valeur $B/(R/D-0.75) = 0$

Calcul de D max

$$D \text{ max} = d1 + ((d1-d2)*(x/y))$$

- $d1 = 25$
- $d2 = 20$

$$x = 100 - 90.34 = \mathbf{9.66}$$

$$y = 90.34 - 37.73 = \mathbf{52.61} \text{ du (Tableau 5.12)}$$

$$D \text{ max} = 25 + ((25 - 20)*(9.66/52.61)) = \mathbf{25.9}$$

$$D \text{ max}/2 = \mathbf{13}$$

➤ Coefficient A

- Consistance molle pour serrage moyen
 - Sable roulés et graviers de broyage usuels
- } A = 32

➤ Résultat

$$Y_{D/2} = 32 + 17 \sqrt[5]{25 \cdot 9} = \mathbf{64.6}$$

On peut maintenant tracer la courbe optimale. Le mélange optimum est celui dont la courbe granulométrique se rapproche le plus possible de la courbe de référence donnée par la méthode de Faury.

8.2.2- Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux

Pour déterminer les pourcentages en volumes absolus de granulats permettant la confection d'un mélange à minimum de vide il est nécessaire de tracer comme indiqué sur la **figure 5.2** des droites reliant deux à deux les courbes granulométriques des matériaux du mélange.

Ces droites sont définies par 5 % de refus pour le matériau à faible granularité et par 5 % de passant pour le matériau à forte granularité. L'intersection des droites ainsi tracées avec la droite brisée permet, par prolongement sur l'axe des ordonnées, de déterminer les pourcentages en volumes absolus de chaque matériau. Ces pourcentages doivent permettre l'obtention d'un mélange dont la courbe granulométrique est proche de la droite brisée. Si la courbe du mélange obtenue est trop éloignée de la courbe, un ajustement de ces pourcentages peut s'avérer nécessaire.

Pourcentage de ciment	:	14%
Pourcentage de sable	:	37%
Pourcentage de gravier (8/15)	:	21 %
Pourcentage de gravier (15/25)	:	28%

8.2.3- Détermination des masses de granulats

Connaissant le volume total absolu des granulats (V) et les pourcentages en volume absolue de sable (S %), de gravier (8/15) (g %) et de gravier (15/25) (G %), il est alors possible de déterminer les volumes de sable (V_s), de gravier (8/15) (V_g) et de gravier (V_G) ainsi que leurs masses respectives (S , g et G) :

- $V_s = V * S \%$ $S = V * S \% * \rho_{s(S)}$
- $V_g = V * g \%$ $g = V * g \% * \rho_{s(g)}$
- $V_G = V * G \%$ $G = V * G \% * \rho_{s(G)}$

A défaut de renseignements précis concernant les masses volumiques absolues des matériaux, on peut en première approximation utiliser les valeurs suivantes

- Masse sèche (litre) = 812 litres
- $\rho_{s(c)} = 3,1 \text{ t/m}^3$,
- $\rho_{s(S)} = 2,56 \text{ t/m}^3$,
- $\rho_{s(g)} = 2,65 \text{ t/m}^3$,
- $\rho_{s(G)} = 2,64 \text{ t/m}^3$.

ANALYSE GRANULOMETRIQUE

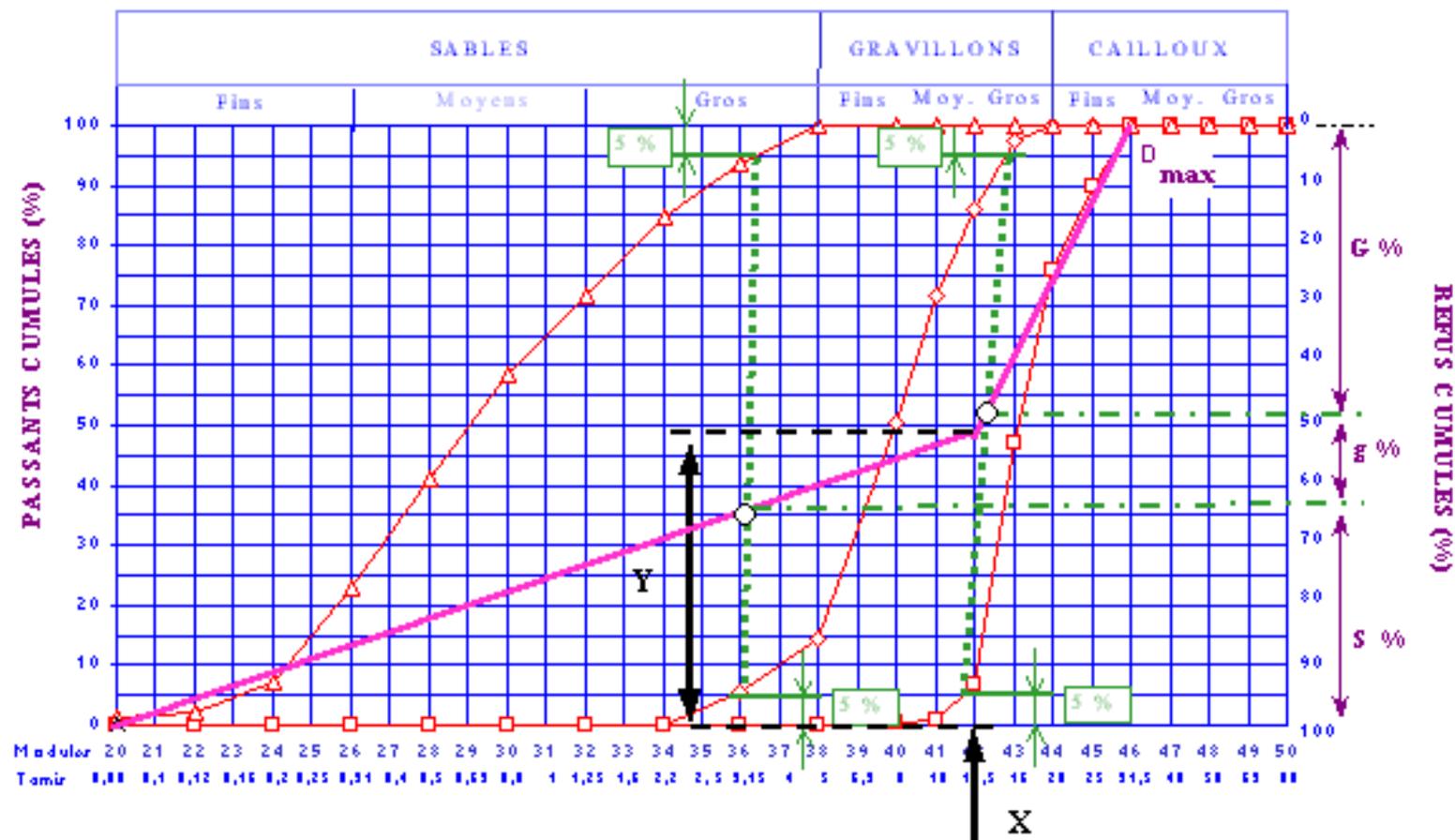


Figure 5.2 : Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériau.

8.2.4- Calcul de l'indice des vides

Le volume des vides est ici représenté par la somme des volumes (e) de l'eau de prise et du volume (v) inclus dans le béton.

Ce volume que nous désignons par (I) est le complément à 1 de la compacité P.

Ainsi, $I = e + v$ ou $I = 1 - P$

Approximativement, on considère que la quantité d'eau de gâchage est égale au volume des intervalles compris entre les grains du béton.

La quantité d'eau de gâchage exprimé par la valeur de l'indice de vide (I) se détermine par la formule suivante :

$$I = \frac{1000 K}{\sqrt[5]{D_{\max}}} \quad (I)$$

K : fonction de la nature des granulats et des moyens de serrage du béton $k = 0,36$.

Donc la valeur de (I) comme suite :

$$I = \frac{1000 \times 0,360}{\sqrt[5]{25,9}} = 187,77 l \Rightarrow E/C = 187,77 / 350 = 0,54$$

$$E [m^3] = 0,18 m^3$$

$$1-E = 0,82 m^3$$

Calcul du volume absolu des matières sèches

$$\text{Nous avons : } V_c + V_s + V_g + V_G = 1 - E$$

V_c, V_s, V_g et V_G Sont les volumes absolus respectifs du ciment, du sable, du gravier 3/8 et du gravier 8/15.

$$V_c + V_s = \frac{x}{100} \times (1 - E) = \frac{51}{100} \times (1 - 0,18) = 0,42 m^3$$

$$\text{avec } V_c = \frac{C}{\rho_c} = \frac{350}{3,14} = 0,111 m^3$$

$$V_s = \frac{x}{100} \times (1 - E) = \frac{37,0}{100} \times (1 - 0,18) = 0,303 m^3$$

$$V_g = \frac{y-x}{100} \times (1 - E) = \frac{21}{100} \times (1 - 0,18) = 0,172 m^3$$

$$V_G = \frac{100-y}{100} \times (1 - E) = \frac{28}{100} \times (1 - 0,18) = 0,229 m^3$$

8.2.5- Détermination les poids de Composition de béton

Masse de ciment : $(V.A) \times (P.S)$

Masse de sable : $(V.A) \times (P.S)$

Masse de gravillon $(V.A) \times (PS)$

Masse de gravier $(V.A) \times (P.S)$

Masse de l'eau

$$\Rightarrow P_c = \rho_c \times V_c = 3.14 \times 111 = 350 Kg$$

$$\Rightarrow P_s = \rho_s \times V_s = 2.56 \times 303 = 765.68 Kg$$

$$\Rightarrow P_g = \rho_g \times V_g = 2.65 \times 172 = 455.8 Kg$$

$$\Rightarrow \rho_G = \rho_G \times V_G = 2.64 \times 229 = 604.56 Kg$$

$$\Rightarrow P_{eau} = \rho_{eau} \times V_{eau} = 1 \times 188 = 188 Kg$$

8.2.6. Calcul de la densité théorique

Dans la composition de référence la densité théorique est la somme des masses de chacun des constituants correspondants à leurs volumes pour un mètre cube de béton, y compris l'eau.

La Densité théorique du béton $\rho_{th} = 2361 \text{ kg/m}^3$

9. 1^{ère} Etape

Dans cette étape on calcule le dosage de chaque granulat pour un béton ordinaire avec la méthode de FAURY

Le **tableau 5.19** résume ses pourcentages :

Tableau 5.19 : Dosage des granulats avec 0% de sable de dune.

	Matériaux	Provenance	Dosage	
			(%)	KG / M3
Composition	GRAVIER 15/25	AKBOU	28,00	600
	GRAVIER 08/15	AKBOU	21,39	460
	SABLE GROSSIER	KADDARA	36,71	763
	SABLE DE DUNE	BOUSSADA	0	0
	Ciment	CHLEF	13,90	350
	Eau	POTABLE (ALGER)	-	188

9.1. Courbe réelle de mélange (ciment +sable +gravier)

La courbe théorique sera comparée à une courbe de référence réelle du mélange

La courbe de mélange est déterminée de la façon suivante :

- Gravier : On multiplie le pourcentage en volume absolu du gravillon par ses pourcentages de tamisât successifs obtenus lors de l'analyse granulométrique
- Sable : On multiplie le pourcentage en volume absolu du sable par ses pourcentages de tamisât successifs obtenus lors de l'analyse granulométrique
- Ciment : Le pourcentage en volume absolu du ciment est identique pour toutes les ouvertures de tamis.

La courbe du mélange correspondant à la somme du pourcentage de chaque constituant obtenue ou niveau de chaque ouverture de tamis, et les résultats sont représentés dans le **tableau 5.20** suivant :

Tableau 5.20 : Courbe de mélange pour 0% de sable de dune

Echantillon	Sable De Boussaâda	Sable KADDARA	Gravier 8/15 D'AKBOU	Gravier 15/25 D'AKBOU	Ciment CHLEF	Mélange
Ouvertures des tamis	%					
31,5	0,00	36,71	21,39	28,00	13,90	100,00
25	0,00	36,71	21,39	25,30	13,90	97,30
20	0,00	36,71	21,39	10,56	13,90	82,56
16	0,00	36,71	21,39	1,67	13,90	73,67
12,5	0,00	36,71	20,09	0,13	13,90	70,84
10	0,00	36,71	12,81	0,00	13,90	63,42
8	0,00	36,71	6,47	0,00	13,90	57,09
6,3	0,00	36,24	1,07	0,00	13,90	51,20
5	0,00	35,57	0,49	0,00	13,90	49,96
2,5	0,00	27,02	0,18	0,00	13,90	41,10
1,25	0,00	16,45	0,00	0,00	13,90	30,35
0,63	0,00	9,10	0,00	0,00	13,90	23,00
0,315	0,00	4,77	0,00	0,00	13,90	18,67
0,16	0,00	1,91	0,00	0,00	13,90	15,81
0,08	0,00	0,62	0,00	0,00	13,90	14,52

Remarque :

Les pourcentages en sable figurant dans les tableaux (5.12), (5.23), (5.25), (5.27), (5.29) sont des pourcentages de la composition du béton et nous parlons ici de pourcentages de substitution des sables fins c.-à-d. :

2%	→	10% de sable fin	et	4%	→	10% de sable fin
6%	→	15% de sable fin	et	8%	→	20% de sable fin

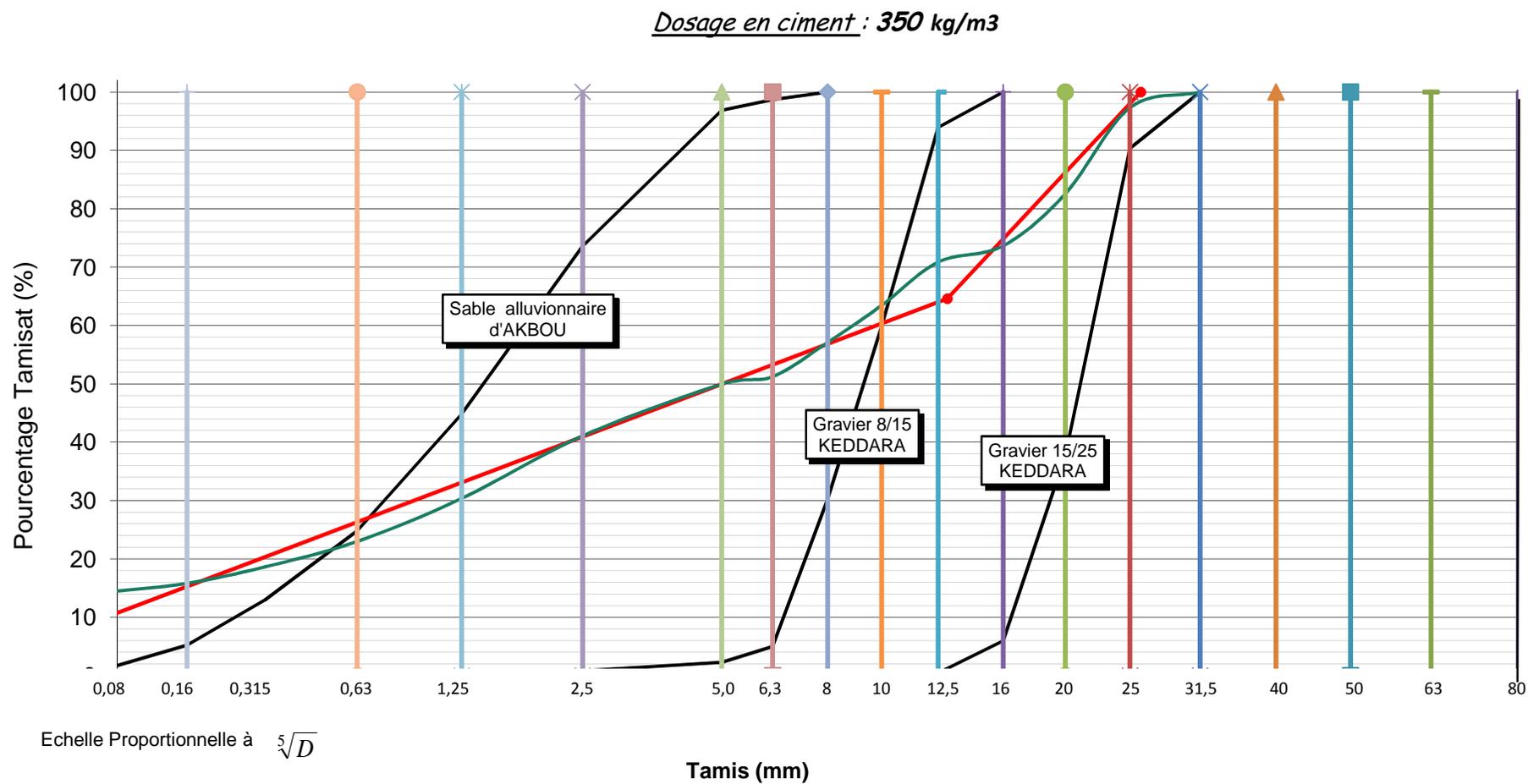


Fig. 5.3 : Courbe de mélange pour 0 % de sable de dune.

10. 2^{ème} Etape

Comme précédemment nous utilisons la même composition des granulats, mais cette fois-ci nous remplaçons toute la quantité du sable grossier par le sable de dune. Soit 100% de sable de dune. Donc on aura le **tableau 5.21** et le **tableau 5.22** qui représente la somme du pourcentage de chaque constituant obtenue ou niveau de chaque ouverture de tamis :

Tableau 5.21 : Dosage des granulats avec 100% de sable de dune.

Composition	Matériaux	Provenance	Dosage	
			(%)	KG / M ³
	GRAVIER 15/25	AKBOU	28,00	600
	GRAVIER 08/15	AKBOU	21,39	460
	SABLE GROSSIER	KADDARA	0	0
	SABLE DE DUNE	BOUSSAADA	36,71	763
	Ciment	CHLEF	13,90	350
	Eau	POTABLE (ALGER)	-	188

Tableau 5.22 : Courbe de mélange pour 100% du sable de dune

Echantillon	Sable De Boussaâda	Sable KADDARA	Gravier 8/15 D'AKBOU	Gravier 15/25 D'AKBOU	Ciment CHLEF	Mélange
Ouvertures des tamis	%					
31,5	36,71	0,00	21,39	28,00	13,90	100,00
25	36,71	0,00	21,39	25,30	13,90	97,29
20	36,71	0,00	21,39	10,56	13,90	82,56
16	36,71	0,00	21,39	1,67	13,90	73,67
12,5	36,71	0,00	20,09	0,13	13,90	70,83
10	36,71	0,00	12,81	0,00	13,90	63,42
8	36,71	0,00	6,47	0,00	13,90	57,08
6,3	36,71	0,00	1,07	0,00	13,90	51,68
5	36,71	0,00	0,49	0,00	13,90	51,10
2,5	36,71	0,00	0,18	0,00	13,90	50,79
1,25	36,71	0,00	0,00	0,00	13,90	50,61
0,63	36,71	0,00	0,00	0,00	13,90	50,61
0,315	35,63	0,00	0,00	0,00	13,90	49,53
0,16	16,85	0,00	0,00	0,00	13,90	30,75
0,08	0,69	0,00	0,00	0,00	13,90	14,59

Dosage en ciment : 350 kg/m³

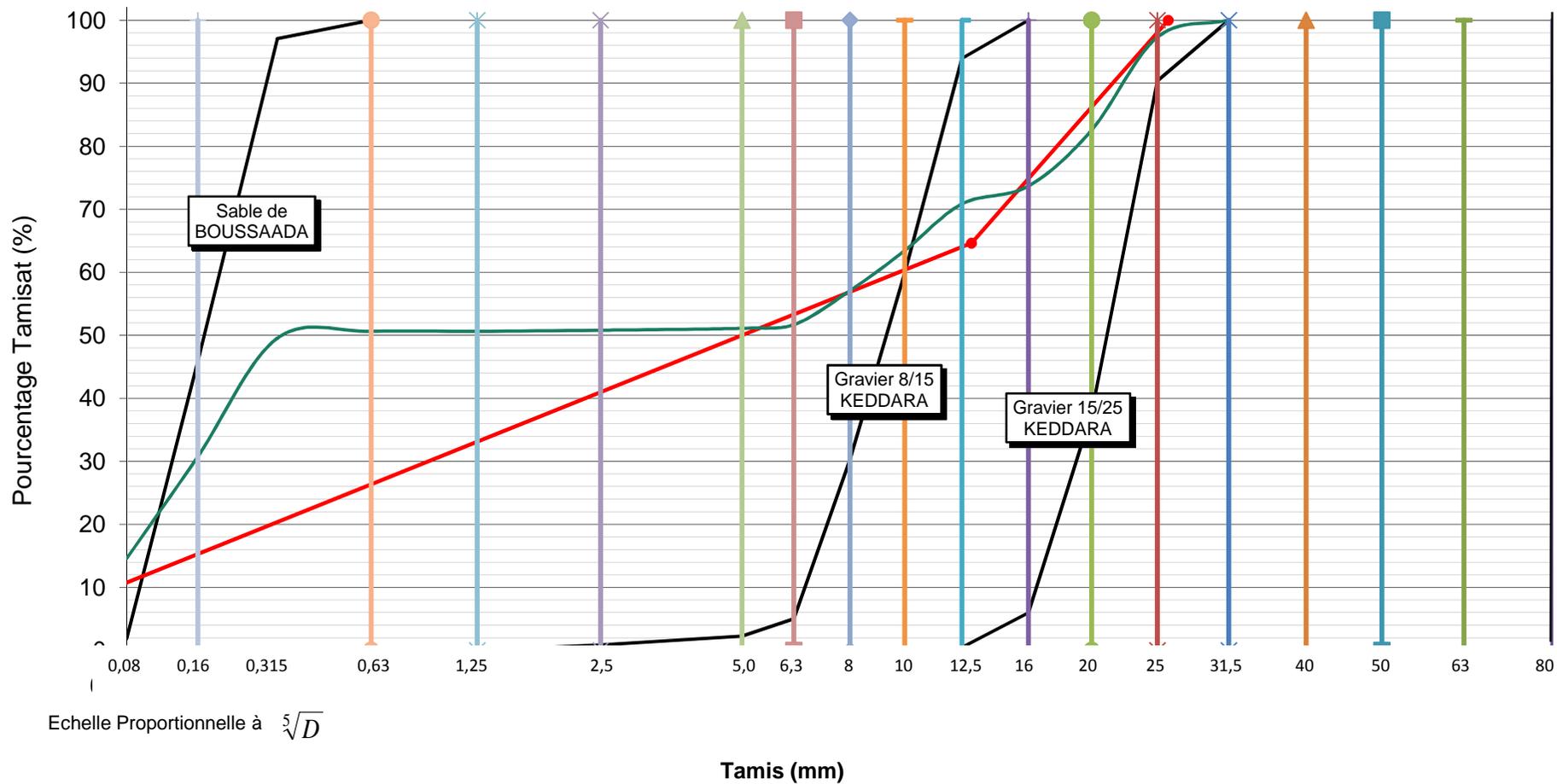


Fig. 5.4: Courbe de mélange pour 100% de sable de dune.

11. 3^{ème} Etape

On procède ensuite au mélange entre les deux sables, c.-à-d. la **substitution** du sable grossier par le sable fin « sable de dune » avec les pourcentages 5% , 10%, 15% et 20% de sable fin.

On aura :

Les résultats des compositions avec 5% sont donnés aux **tableaux 5.23** et le **tableau 5.24** qui représente la somme du pourcentage de chaque constituant obtenue ou niveau de chaque ouverture de tamis pour 5 % de pourcentage de sable de dune :

Tableau 5.23 : Dosage des granulats avec 5 % de sable de dune.

Composition	Matériaux	Provenance	Dosage	
			(%)	KG / M3
	GRAVIER 15/25	AKBOU	28,00	600
	GRAVIER 08/15	AKBOU	21,39	460
	SABLE GROSSIER	KADDARA	34,71	722
	SABLE DE DUNE	BOUSSAADA	2	42
	Ciment	CHLEF	13,90	350
	Eau	POTABLE (ALGER)	-	188

Tableau 5.24 : Courbe de mélange pour 5 % du sable de dune

Echantillon	Sable De Boussaâda	Sable KADDARA	Gravier 8/15 D'AKBOU	Gravier 15/25 D'AKBOU	Ciment CHLEF	Mélange
Ouvertures des tamis	%					
31,5	2,00	34,71	21,39	28,00	13,90	100,00
25	2,00	34,71	21,39	25,30	13,90	97,30
20	2,00	34,71	21,39	10,56	13,90	82,56
16	2,00	34,71	21,39	1,67	13,90	73,67
12,5	2,00	34,71	20,09	0,13	13,90	70,84
10	2,00	34,71	12,81	0,00	13,90	63,42
8	2,00	34,71	6,47	0,00	13,90	57,09
6,3	2,00	34,26	1,07	0,00	13,90	51,23
5	2,00	33,64	0,49	0,00	13,90	50,02
2,5	2,00	25,55	0,18	0,00	13,90	41,63
1,25	2,00	15,55	0,00	0,00	13,90	31,45
0,63	2,00	8,61	0,00	0,00	13,90	24,51
0,315	1,94	4,51	0,00	0,00	13,90	20,35
0,16	0,92	1,81	0,00	0,00	13,90	16,62
0,08	0,04	0,59	0,00	0,00	13,90	14,53

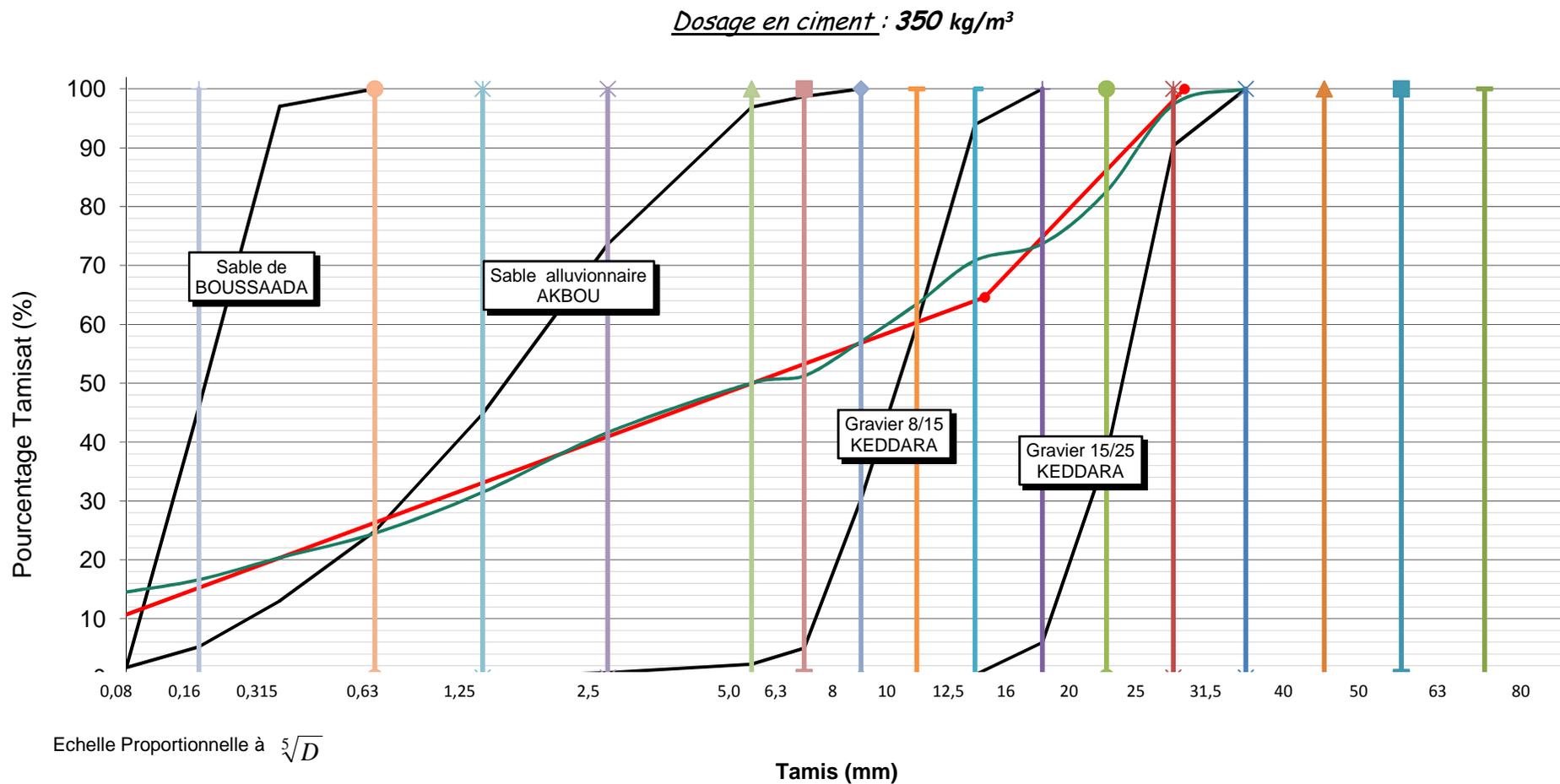


Fig. 5.5 : Courbe de mélange pour 5 % de sable de dune.

C.1. Avec 10 % de substitution de sable de dune

Les résultats des compositions avec 10 % sont donnés au **tableau 32** plus le **tableau 33** qui représente la somme du pourcentage de chaque constituant obtenue ou niveau de chaque ouverture de tamis pour 10 % de pourcentage de sable de dune :

Tableau 5.25 : Dosage des granulats avec 10 % de sable de dune.

Composition	Matériaux	Provenance	Dosage	
			(%)	KG / M3
	GRAVIER 15/25	AKBOU	28,00	600
	GRAVIER 08/15	AKBOU	21,39	460
	SABLE GROSSIER	KADDARA	32,71	680
	SABLE DE DUNE	BOUSSAADA	4	84
	Ciment	CHLEF	13,90	350
	Eau	POTABLE (ALGER)	-	188

Tableau 5.26 : Courbe de mélange pour 10 % du sable de dune.

Echantillon	Sable De Boussaâda	Sable KADDARA	Gravier 8/15 D'AKBOU	Gravier 15/25 D'AKBOU	Ciment CHLEF	Mélange
Ouvertures des tamis	%					
31,5	4,00	32,71	21,39	28,00	13,90	100,00
25	4,00	32,71	21,39	25,30	13,90	97,30
20	4,00	32,71	21,39	10,56	13,90	82,56
16	4,00	32,71	21,39	1,67	13,90	73,67
12,5	4,00	32,71	20,09	0,13	13,90	70,84
10	4,00	32,71	12,81	0,00	13,90	63,42
8	4,00	32,71	6,47	0,00	13,90	57,09
6,3	4,00	32,29	1,07	0,00	13,90	51,26
5	4,00	31,70	0,49	0,00	13,90	50,08
2,5	4,00	24,08	0,18	0,00	13,90	42,16
1,25	4,00	14,66	0,00	0,00	13,90	32,56
0,63	4,00	8,11	0,00	0,00	13,90	26,01
0,315	3,88	4,25	0,00	0,00	13,90	22,03
0,16	1,84	1,70	0,00	0,00	13,90	17,44
0,08	0,07	0,56	0,00	0,00	13,90	14,53

Dosage en ciment : 350 kg/m3

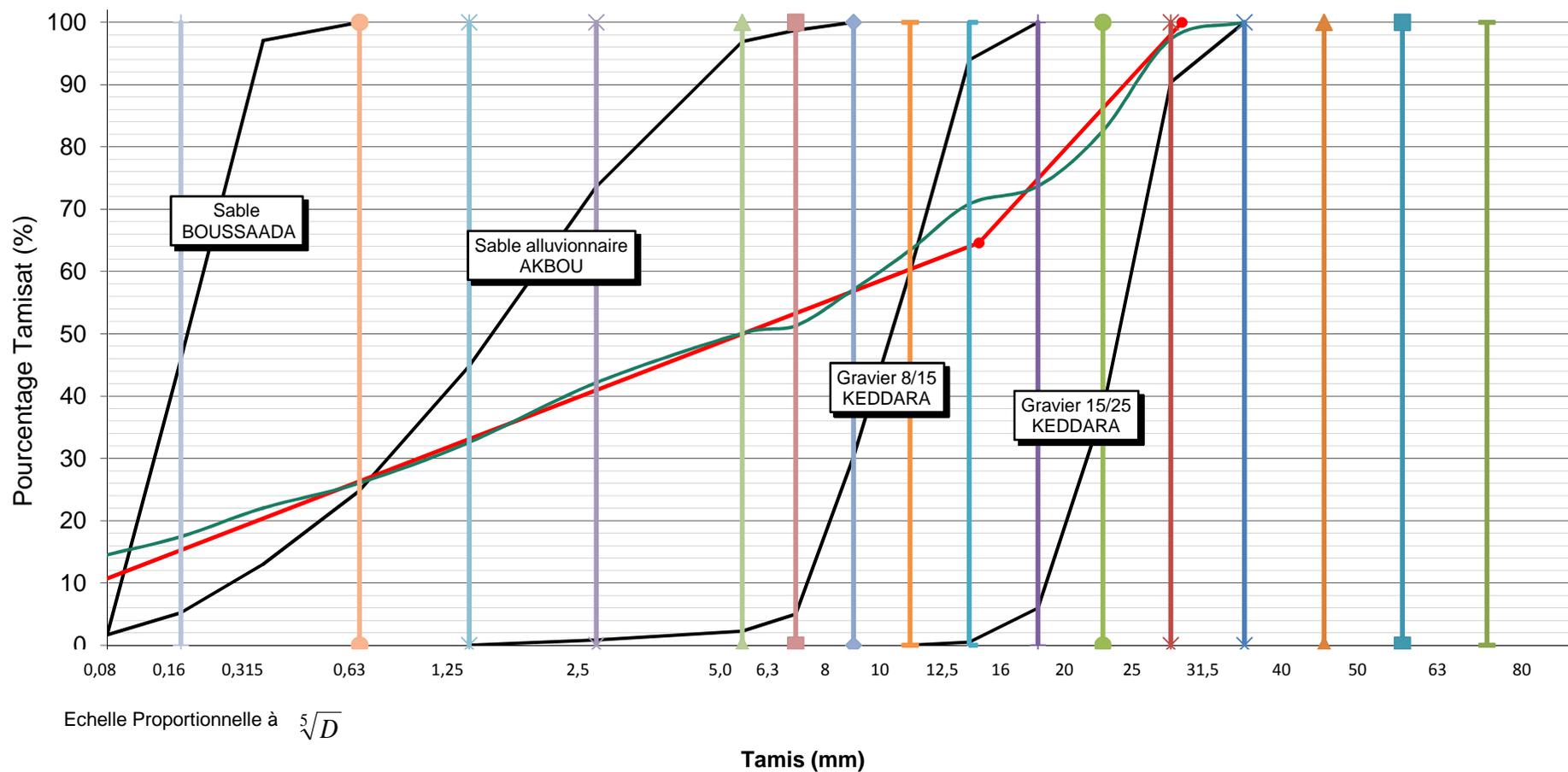


Fig. 5.6 : Courbe de mélange pour 10 % de sable de dune.

C.2. Avec 15 % de substitution de sable de dune

Les résultats des compositions avec 15 % sont donnés aux **tableaux 34**.

Le **tableau 35** représente la somme du pourcentage de chaque constituant obtenue ou niveau de chaque ouverture de tamis pour 15 % de pourcentage de sable de dune :

Tableau 5.27 : Dosage des granulats avec 15 % de sable de dune.

Composition	Matériaux	Provenance	Dosage	
			(%)	KG / M3
	GRAVIER 15/25	AKBOU	28,00	600
	GRAVIER 08/15	AKBOU	21,39	460
	SABLE GROSSIER	KADDARA	30,71	639
	SABLE DE DUNE	BOUSSAADA	6	126
	Ciment	CHLEF	13,90	350
	Eau	POTABLE (ALGER)	-	188

Tableau 5.28 : Courbe de mélange pour 15 % du sable de dune.

Echantillon	Sable De Boussaâda	Sable KADDARA	Gravier 8/15 D'AKBOU	Gravier 15/25 D'AKBOU	Ciment CHLEF	Mélange
Ouvertures des tamis	%					
31,5	6,00	30,71	21,39	28,00	13,90	100,00
25	6,00	30,71	21,39	25,30	13,90	97,30
20	6,00	30,71	21,39	10,56	13,90	82,56
16	6,00	30,71	21,39	1,67	13,90	73,67
12,5	6,00	30,71	20,09	0,13	13,90	70,84
10	6,00	30,71	12,81	0,00	13,90	63,42
8	6,00	30,71	6,47	0,00	13,90	57,09
6,3	6,00	30,31	1,07	0,00	13,90	51,28
5	6,00	29,76	0,49	0,00	13,90	50,15
2,5	6,00	22,60	0,18	0,00	13,90	42,68
1,25	6,00	13,76	0,00	0,00	13,90	33,66
0,63	6,00	7,62	0,00	0,00	13,90	27,52
0,315	5,82	3,99	0,00	0,00	13,90	23,72
0,16	2,75	1,60	0,00	0,00	13,90	18,25
0,08	0,11	0,52	0,00	0,00	13,90	14,53

Dosage en ciment : 350 kg/m³

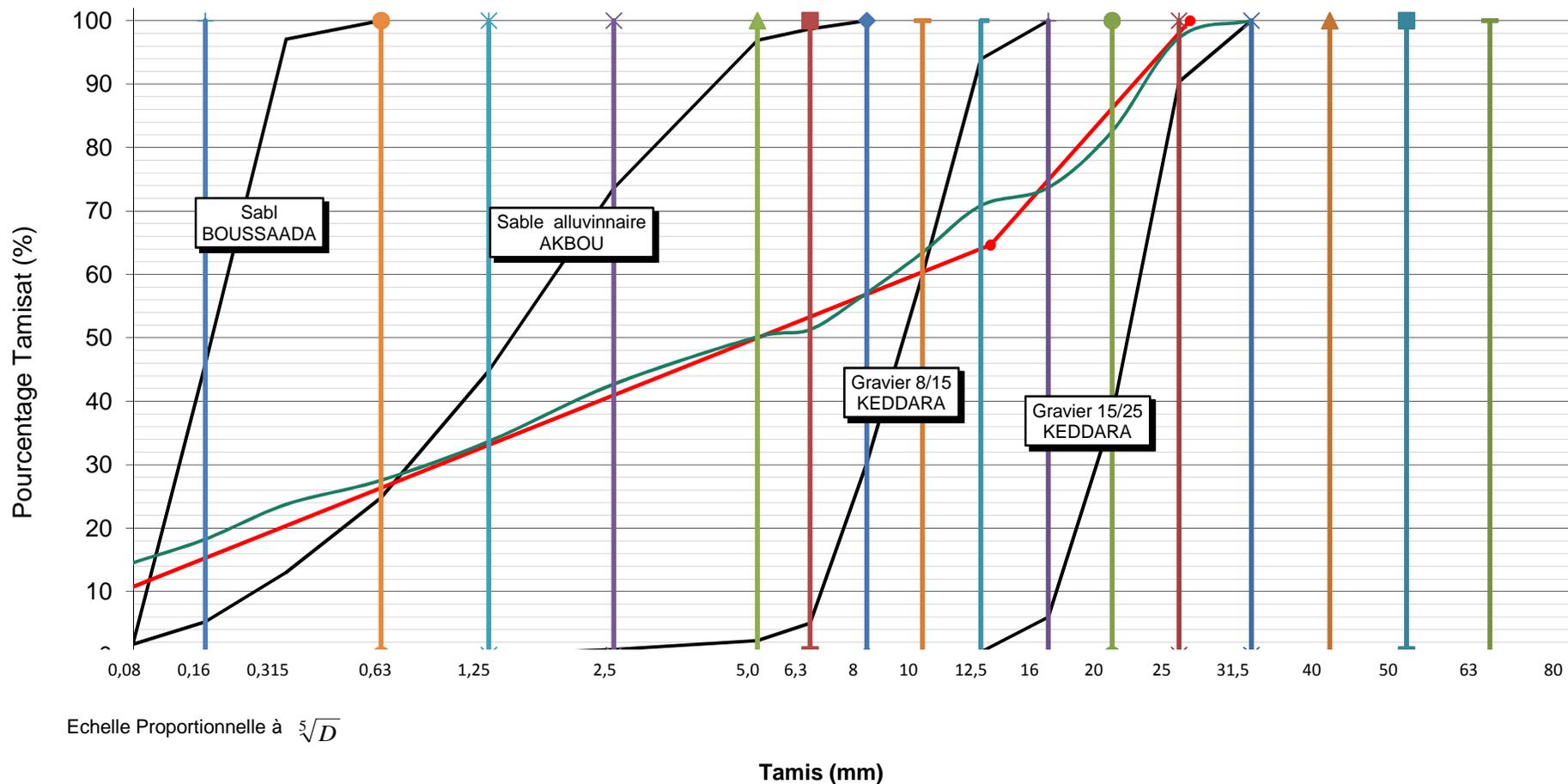


Fig. 5.7 : Courbe de mélange pour 15 % de sable de dune.

C.3. Avec 20 % de substitution de sable de dune

Les résultats des compositions avec 20 % sont donnés aux **tableaux 36**.

Le **tableau 37** représente la somme du pourcentage de chaque constituant obtenue ou niveau de chaque ouverture de tamis pour 20 % de pourcentage de sable de dune :

Tableau 5.29 : Dosage des granulats avec 20 % de sable de dune.

Composition	Matériaux	Provenance	Dosage	
			(%)	KG / M3
	GRAVIER 15/25	AKBOU	28,00	600
	GRAVIER 08/15	AKBOU	21,39	460
	SABLE GROSSIER	KADDARA	28,71	597
	SABLE DE DUNE	BOUSSAADA	8	168
	Ciment	CHLEF	13,90	350
	Eau	POTABLE (ALGER)	-	188

Tableau 5.30 : Courbe de mélange pour 20 % du sable de dune.

Echantillon	Sable De Boussaâda	Sable KADDARA	Gravier 8/15 D'AKBOU	Gravier 15/25 D'AKBOU	Ciment CHLEF	Mélange
Ouvertures des tamis	%					
31,5	8,00	28,71	21,39	28,00	13,90	100,00
25	8,00	28,71	21,39	25,30	13,90	97,30
20	8,00	28,71	21,39	10,56	13,90	82,56
16	8,00	28,71	21,39	1,67	13,90	73,67
12,5	8,00	28,71	20,09	0,13	13,90	70,84
10	8,00	28,71	12,81	0,00	13,90	63,42
8	8,00	28,71	6,47	0,00	13,90	57,09
6,3	8,00	28,34	1,07	0,00	13,90	51,31
5	8,00	27,82	0,49	0,00	13,90	50,21
2,5	8,00	21,13	0,18	0,00	13,90	43,21
1,25	8,00	12,86	0,00	0,00	13,90	34,76
0,63	8,00	7,12	0,00	0,00	13,90	29,02
0,315	7,76	3,73	0,00	0,00	13,90	25,40
0,16	3,67	1,49	0,00	0,00	13,90	19,06
0,08	0,15	0,49	0,00	0,00	13,90	14,54

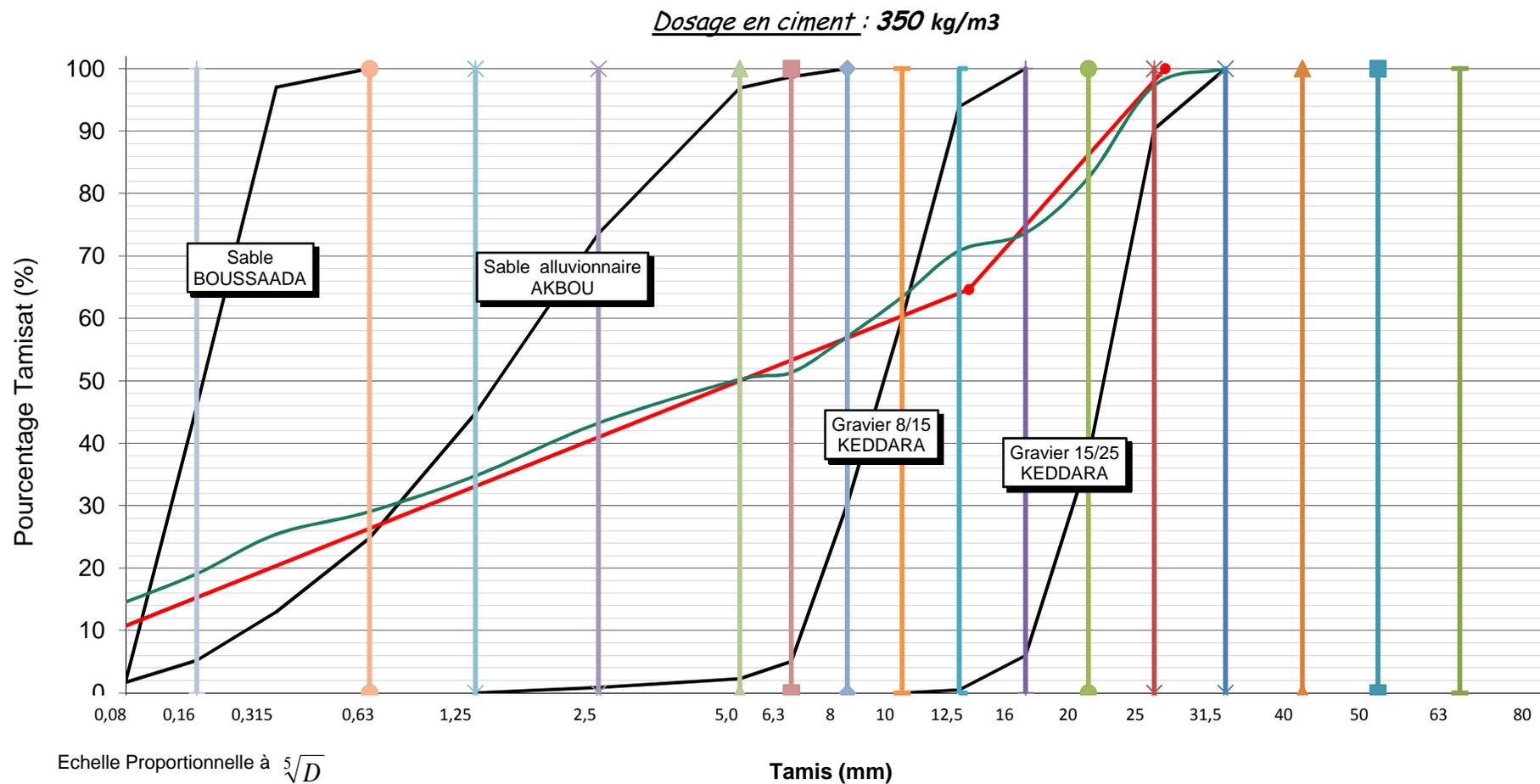


Fig. 5.8 : Courbe de mélange pour 20 % de sable de dune.



CHAPITRE : 6
ANALYSE ET
DISCUSSION

1. Introduction

Un béton frais au moment du malaxage des constituants est une dispersion de matériaux solides dans un liquide (l'eau).

Comme certains matériaux sont réactifs directement ou indirectement avec l'eau, cette dispersion va évoluer plus ou moins rapidement au cours du temps.

Outre les nombreuses réactions qui se produisent, il faudra aussi tenir compte de réactions physiques entre, d'une part les matériaux de la formulation (par exemple la décantation des granulats), et d'autre part entre les matériaux de la formulation et l'environnement (par exemple évaporation d'une partie de l'eau introduite au malaxage).

Il y a donc lieu de maîtriser l'ensemble des réactions par un choix judicieux de la quantité et de la qualité des constituants du béton et de l'environnement dans lequel les réactions se produisent.

2. Consistance du béton frais

La composition de béton a été faite de façon à avoir un affaissement constant au cône d'ARAMS de l'ordre d'environ 75 mm représentant un béton plastique (60 à 90 mm) que l'on tentait toujours d'y approcher.

Le **tableau 6.1** Montre que le rapport E/C était variable car la quantité d'eau nécessaire utilisée dépend du pourcentage d'absorption d'eau des gros granulats, d'où la difficulté de fixer la quantité d'eau ou bien le rapport E/C aura précisé.

Tableau 6.1: Rapport E/C et l'affaissement du cône d'ABRAMS

Pourcentage du sable de dune	Rapport E/C	L'affaissement (cm)
0 %	0.543	7
5 %	0.571	8
10 %	0.617	9
15 %	0.628	7.5
20 %	0.634	7
100 %	0.685	7

2.1. Interprétation

On constate une augmentation du rapport E/C avec l'augmentation du dosage du sable de dune pour un affaissement constant.

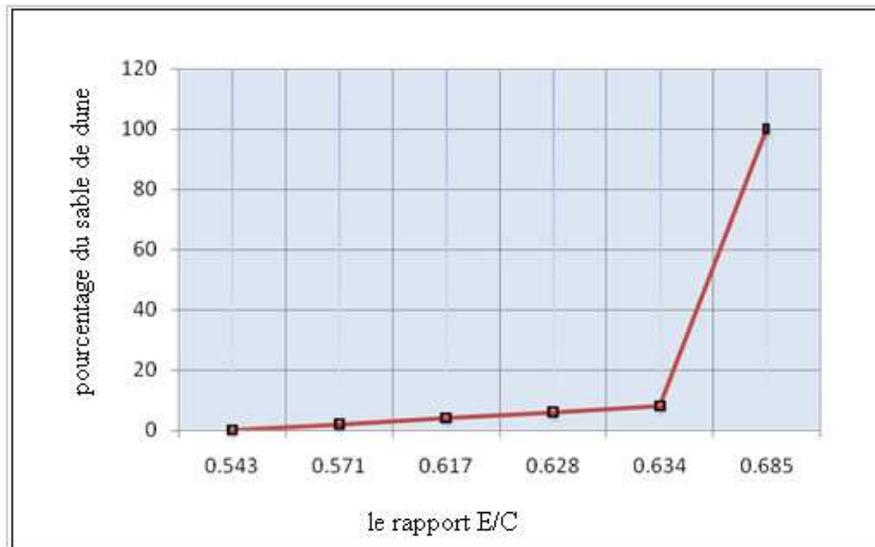


Fig. 6.1 : Influence du pourcentage du sable de dune par rapport au rapport E/C

3. Formulations effectuées pour différents essais

Tableau 6.2 : Résumé sur les formulations des différents bétons utilisés

	N°1 (0%) le 20/07/2009	N° 2 (100%) le 21/07/09	N° 3 (5%) le 22/07/09	N° 4 (10%) le 25/07/09	N° 5 (15%) le 26/07/09	N° 6 (20%) le 26/07/09
G 15/25	600 kg/m³	600	600	600	600	600
G 8/15	460 Kg/m³	460	460	460	460	460
sable grossier	760 Kg/m³	/	722	680	639	597
sable fin	/	760	42	85	126	168
ciment	350 Kg/m³	350	350	350	350	350
Eau	190 l/m³	240	200	216	220	222
Affaissement (cône d'ABRAMS)	7 cm	7	8	9	7,5	7

Sur le tableau 6.2 il est apparent qu'un module de finesse petit entraîne un dosage en eau élevé pour un affaissement constant ; l'incorporation graduelle des éléments fins nécessite plus d'eau.

4. Béton durci

Dans ce qui suit, nous allons présenter les résultats des essais effectués sur béton durci pour chaque pourcentage du sable de dune, ils concernent :

La résistance mécanique (à la compression et à la traction par flexion).

4.1. Résistance à la compression

Cet essai est effectué sur des éprouvettes cylindriques de 16 cm (dont la section est de 201cm²) et de hauteur H=32 cm.

Cet essai est effectué à l'âge de 7 jours pour les 3 premières éprouvettes et à l'âge de 28 jours pour les autres éprouvettes pour toutes les compositions, dont le but est de suivre l'évolution de la résistance à la compression du béton contenant le sable de dune. Les résultats obtenus sont représentés dans les deux **tableaux (6.3 et 6.4)**

Pour 7 jours

Tableau 6.3: Résistance à la compression du béton contenant le sable de dune à 7 jours.

Date	N° de formule	Résistance à 7 jours en (Mpa)	Moyenne (Mpa)
27/07/2009	1 pour (0 %)	22,9	22,41
		21,95	
		22,38	
28/07/2009	2 pour (100%)	13,77	14,40
		14,86	
		14,58	
29/07/2009	3 pour (2%)	18,65	18,86
		19,05	
		18,88	
01/08/2009	4 pour (4%)	20,19	19,88
		19,69	
		19,75	
02/08/2009	5 pour (6%)	21,88	21,64
		22,77	
		20,26	
03/08/2009	6 pour (8%)	22,3	22,24
		21,91	
		22,5	

Pour 28 jours

Tableau 6.4: Résistance à la compression du béton contenant le sable de dune à 28 jours.

la date	N° de formule	La résistance à 28 jours en (MPa)	la moyenne (MPa)
17/08/2009	1 pour (0 %)	25,36	24,98
		23,2	
		26,39	
18/08/2009	2 pour (100%)	15,48	16,05
		15,97	
		16,7	
19/08/2009	3 pour (2%)	20,44	20,95
		20,86	
		21,55	
22/08/2009	4 pour (4%)	22,4	21,79
		21,29	
		21,68	
23/08/2009	5 pour (6%)	22,85	23,32
		23,34	
		23,76	
24/09/2009	6 pour (8%)	25,25	24,87
		25,21	
		24,16	

Pour mieux voir et comprendre les résultats il est préférable de les présenter dans un graphe « **fig 6.2** » qui nous facilite la lecture de ces résultats.

Résultats

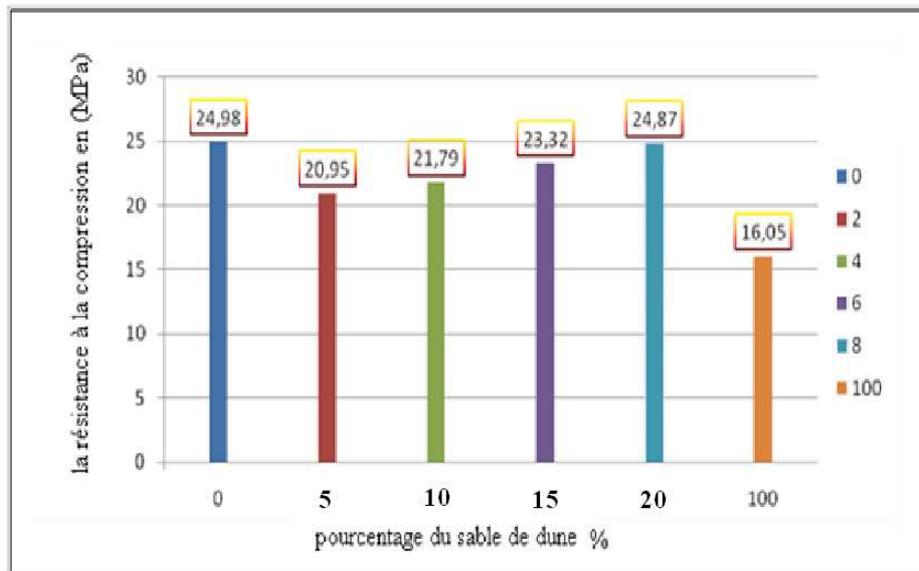


Fig. 6.2: Résistance à la compression du béton contenant le sable de dune à 28 jours.

4.2. Interprétation

On remarque dans ce graphe qu’il a une diminution importante de la résistance à la compression dans les deux cas opposé « avec sable de dune et sans sable de dune » de 24.98 MPa au 16.05 MPa respectivement.

Alors que dans les autres cas il a une augmentation progressive de la résistance de 20.95 MPa pour 5 % de sable fin jusqu’à 24.87 MPa pour 20 % du sable fin.

Donc :

Les résistances s’améliorent avec l’augmentation du pourcentage de sable de dune ; ceci s’explique par l’existence de fines favorisant l’arrangement des grains et le contact intergranulaire.

Mais dans le cas de 100 % de sable de dune ; l’insuffisance de résistance est attribuée à la finesse et le pourcentage élevé de vides de sable de dune.

5. Résistance à la traction par flexion

Cet essai est effectué sur des éprouvettes prismatiques.

Cet essai est effectué à l’âge de 28 jours pour les 2 compositions, Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 6.5. Résistance à la traction du béton à 28 jours

	Avec sable de dune (MPa)			Sans sable de dune (MPa)		
	1 ^{ère} éprouvette	2 ^{ème} éprouvette	3 ^{ème} éprouvette	1 ^{ère} éprouvet	2 ^{ème} éprouvet	3 ^{ème} éprouvet
28 jours	1,35	1,41	1,52	2,58	2,42	2,63
	1.42			2.54		

5.1. Interprétation

Il y'a une diminution remarquable à la résistance à la traction de **2.54 MPa** au **1.42 MPa**.

6. Essai de retrait

On compare, à différents temps t , la variation de longueur d'une éprouvette 4x4x16 cm, par rapport à sa longueur à un temps t_0 pris pour origine.

Sur la **fig. 6.3** nous avons représenté la variation du retrait et de gonflement en fonction du temps pour les deux modules de finesse.

Dans le cas où le dosage en eau a été déterminé pour un affaissement constant, il varie de **240L** à **190L** ce qui est très important et contribue à diminuer fortement la résistance et le retrait en devenant probablement prépondérant par rapport au module de finesse.

Nous précisons que les éprouvettes ont été conservées dans l'eau pendant 14 jours et placées ensuite dans l'atmosphère.

Tableau 6.6: Variation du retrait et gonflement en fonction du temps pour les deux modules de finesse

Nombre de jours	Retrait en μ/m Pour 100%	Retrait en μ/m Pour 0%
0	0	0
7	-10	-55
14	-22	-75
17	-11	-58
21	35	10
28	140	80

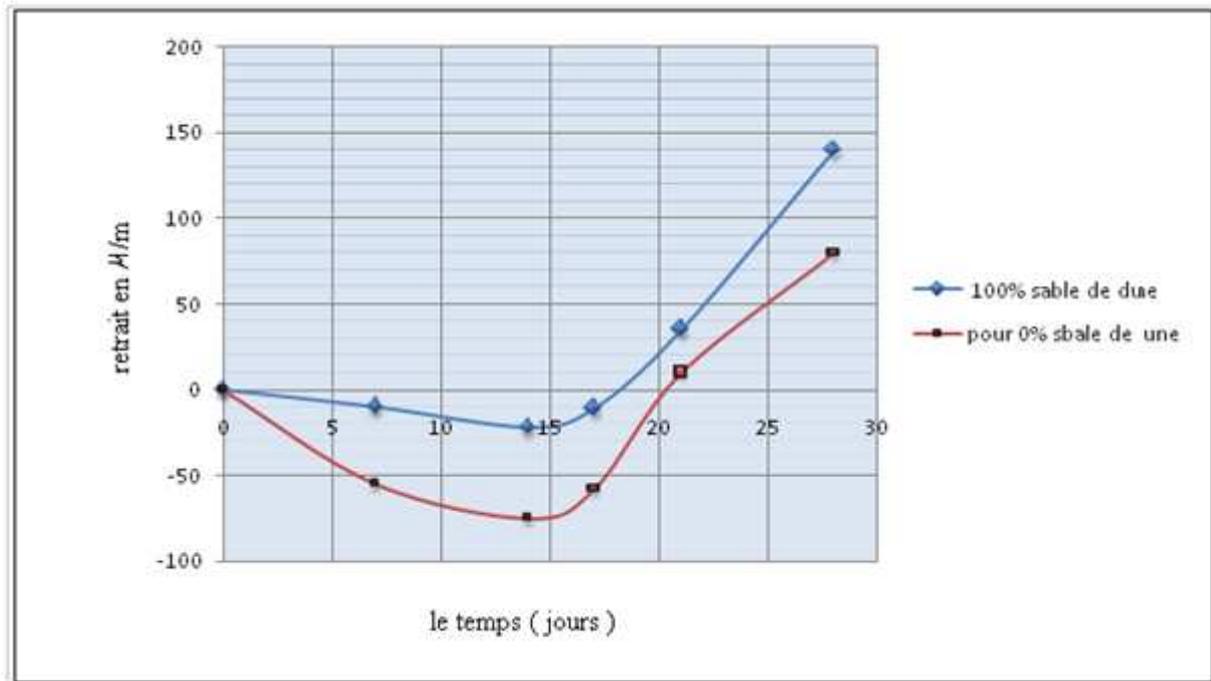


Fig. 6.3 : Variation du retrait et gonflement en fonction du temps pour les deux modules de finesse

6.1. Interprétation

On remarque que les 2 courbes commencent avec des valeurs négatives qui nous renseignent sur le gonflement des deux éprouvettes qui ont été conservées dans l'eau pendant 14 jours et placées ensuite à la température ambiante. Toujours dans le cas de l'affaissement constant on constate que le retrait semble apparemment un peu plus important pour les modules de finesse faibles mais il ne faut pas oublier l'importante variation du dosage en eau qui devient certainement prépondérante par rapport à l'influence du module de finesse du sable.

CONCLUSION
GÉNÉRALE

Conclusion générale

Notre étude se veut être une modeste contribution à la valorisation de sable de dune dans le béton de construction, pour cela on a effectué quelques essais de caractérisation qui auraient du être plus nombreux si le temps qui nous a été accordé était un peu plus étalé vu le grand nombre de formulations effectuées « plus de neuf formulations » avec l'analyse physique et chimique des matériaux et le manque de disponibilité des matériaux.

Le but de cette étude est de voir la possibilité de remplacer le sable alluvionnaire du béton classique par un sable de dune plus fin.

Au cours de nos recherches, nous nous sommes rendus compte qu'il fallait démarrer avec des bétons à base de sables alluvionnaires et de carrière et introduire les sables fins progressivement jusqu'à optimisation des résultats ; cela nous était très difficile vu les temps qui nous ont été impartis et les âges des bétons nécessaires aux essais étaient très courts.

On choisit le module de finesse comme paramètre de base en le faisant varier systématiquement dans de larges proportions et en mesurant ou observant le comportement et les diverses qualités des bétons ainsi réalisés : ouvrabilité, résistance, retrait, en adoptant comme constante l'affaissement au cône.

Une analyse globale des résultats permet de tirer les conclusions suivantes :

1. **Module de finesse** : c'est une valeur caractéristique très intéressante et pratique mais elle n'est pas suffisante ; elle constitue cependant, parmi d'autres, une indication très précieuse à condition de la rattacher à un tracé granulométrique.
2. **Dosage en eau** : A première vue, il semble que l'on peut diminuer le dosage en eau quand le module de finesse croît. En jouant sur l'eau pour obtenir une bonne plasticité caractérisée par un affaissement au cône de l'ordre de 7 à 9 cm, en effet, si l'on augmente le dosage en eau, le béton devient plus liquide, et celui-ci manque de cohésion. Avec les modules de finesse élevés il est préférable de s'en tenir à des bétons relativement fermes.
3. **Resistance** : on peut dire que la résistance croît en même temps que le module de finesse et que si l'on veut réaliser des résistances importantes il conviendra d'utiliser un sable relativement grossier de module élevé plutôt qu'un sable fin ; mais alors il faudra surveiller et soigner particulièrement l'exécution (mise en œuvre et serrage du béton) en raison de l'ouvrabilité déficiente et des risques de ségrégation.
4. **Dosage en ciment** : les inconvénients dus à des sables grossiers de module élevé apparaissent particulièrement lorsque le dosage en ciment est faible mais ils s'atténuent dans le cas des dosages en ciment élevés.

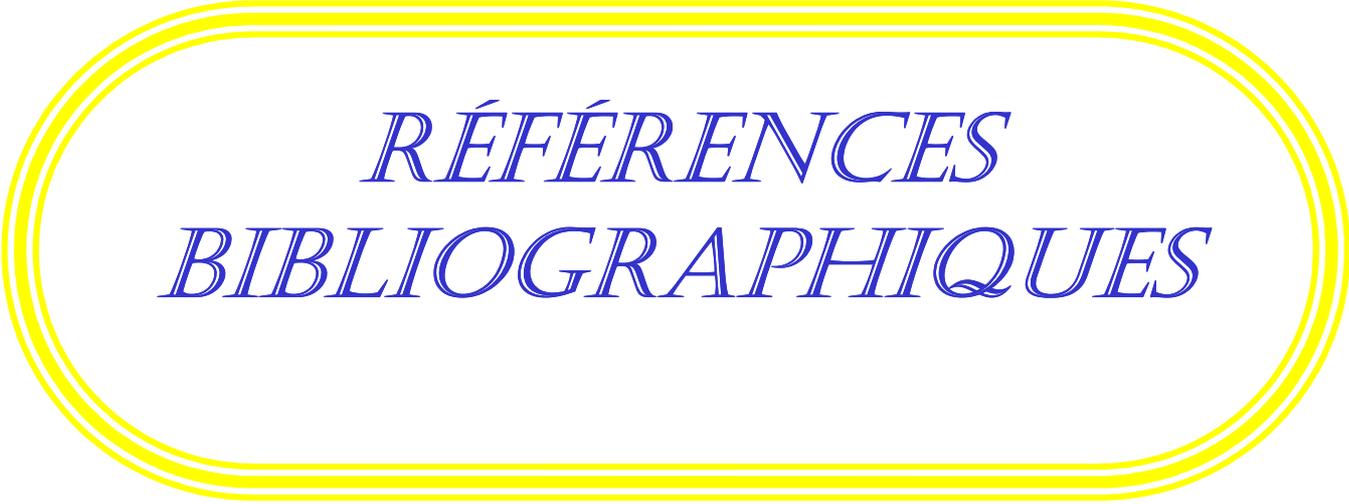
5. **Retrait** : contrairement à ce que l'on pense souvent, le module de finesse ne semble pas porter directement en lui une influence importante sur le retrait ; mais les sables très fins demandent davantage d'eau de mouillage que les sables grossiers c'est l'augmentation du dosage en eau qui est alors la véritable cause de retrait plus important constaté en général avec les sables fins.

La granulométrie du sable de dune ; sable très fin donne des résistances faibles, et demande une quantité d'eau élevée qui entraîne un retrait important ce qui veut dire que les résultats des caractéristiques testées ne sont pas satisfaisantes. Donc, dans ce cas, il n'est pas possible de remplacer le sable ordinaire du béton classique par un sable de dune sauf en introduisant une certaine correction.

Les perspectives

Pour des études ultérieures, nous recommandons :

- De reprendre nos études pour améliorer les résultats obtenus.
- D'incorporer des corrections aux sables fins afin de l'utiliser dans la confection des bétons.
- Modifier les pourcentages (passer à 5;10;15;20) de substitution de sable fin par le sable grossier.
- Reprendre les essais pour le béton avec 100% du sable fin.
- D'étudier l'effet des adjuvants.
- D'étudier le comportement à long terme du béton avec des différents pourcentages de substitution en gros et fins granulats (effet du retrait, fluage, vieillissement, durabilité, ...etc.).
- De choisir le module de finesse comme paramètre de base mais en faisant varier d'autres paramètres : « dosage en ciment, plasticité, dosage en eau.... ».
- D'étudier l'influence des autres paramètres « rapport G/S, le dosage en ciment, les adjuvants... »
- D'étudier le retrait au jeune âge.



*RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES*

Références bibliographiques :

- [1] **A.TAFRAOUI** : Contribution à la valorisation de sable de dune de l'erg occidental (Algérie), doctorat de l'université de Toulouse (février 2009).
- [2] **ATCHI ET BOUYAHIA**: Recyclage des matériaux de construction, projet de fin d'étude, ENP, Alger, Algérie, (2006).
- [3] **ABDELKARIME AMIRAT**: Formulation et comportement d'un béton de sable de dune pur structure, projet de fin d'étude, ENP, Alger, Algérie, (2004).
- [4] **BEDERINA .M** : Caractérisation mécanique et physique de béton de sable à base de déchets de bois, thèse de doctorat, ENP 2007.
- [5] **BENMALEK M** : Contribution à l'étude des bétons de sable dunaire pour éléments de structures, thèse de magister, ENP, Alger, Algérie, (1992).
- [6] **DREUX G. et FESTA J.** : « Nouveau guide du Béton et de ses constituants », Eyrolles Huitième édition, (Paris 1998).
- [7] **DREUX G. et FESTA J.** : Contribution a l'étude de l'influence de la finesse des sables sur diverses qualité des bétons, (Analyses de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics .1969).
- [8] **GUENNOUN R.**, «Etude et formulation d'un béton de sable de dune», P.F.E., ENP, Alger—Algérie juin 2003.
- [9] **HADID** : «béton –constituant -composition et essais sur béton », LCTP, février 2005
- [10] **HADJI ET DRIF** : Influence des granulats sur les qualités du béton, projet de fin d'étude, ENP, Alger, Algérie, (2005).
- [11] **HAMADACHE. K.**: Béton de sable modifié à la poudre de caoutchouc, projet de fin d'étude, ENP, Alger, Algérie, (2005).
- [12] **J. DELARUE ET R.BERTHIER** : Etudes de retrait de béton sous le climat d'Afrique de sud (1957).
- [13] **KHETAB .R** :«valorisation du sable de dune», thèse de doctorat ENP 2006.
- [14] **NORME FRANÇAISE** : « Béton – essais de flexion », AFNOR, Paris 1981].
- [15] **NORME FRANÇAISE** : « Béton – essais de compression », AFNOR, Paris 1981.
- [16] **NORME FRANÇAISE** : « Granulats. Equivalent de sable », AFNOR, Paris, septembre 1998.
- [17] **SABLOCRETE**, bétons de sable, Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, paris, France, (1994).
- [18] **TECHNIQUE DE L'INGENIEUR**, traité généralités et construction C9, A8660, C4260.

- [19] **Y.BENNA, S.BEDJOU, A.BRARA, B.GUETTACHE** : Valorisation des sables de dune : effet des additions sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des mortiers a base de sables de dune, Article (mais 2006).
- [20] **M.LAQUERBE, I.CISSE, G.AHOUANSOU** : Pour une utilisation rationnelle des graveleux lettriques et des sables de dunes comme granulats à béton. Application au cas du Sénégal, Article (1995).
- [21] **A.BENAISSA, P.MORLIER, P.VIGUIR, J-J.CHAUVIN** : Cinétique de dessiccation et retrait du béton de sable, Article de (I.T.B.T.P 1992).
- [22] **GHERIB.A**, «étude d'un béton de sable de dune pour pistes aéronautiques», thèse de magister, ENP 2003.
- [23] **B.FRANCOI, D.PHILIPPE, D.PIERRE, D.MARIE** : Quels sables pour votre golf ? Article de Les Cahiers de L'AGREF N°1.
- [24] **GUENNOUN R**, Etude et formulation d'un béton de sable de dune, P.F.E., ENP, Alger-Algérie, (juin 2003)
- [25] **PLANS D'EXPERIENCES**, Cours de 1ére année magistère. Département de génie civil. Université de M'SILA.
- [26] **G. DREUX**. Composition des bétons. Techniques de l'Ingénieur, traité Construction. C 2 220 – 1. C 2 220. 5 - 1982.
- [27] **De LARRARD/ SEDRAN**. Une nouvelle approche de la formulation des bétons - Annales du BTP.
- [28] **J. P. MOUGIN**. Cours de béton armé. BAEL 91. 2ème Édition, Modifiées 1999



*TABLE DES
MATIERES*

TABLE DES MATIERES

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Les sables	
1. Introduction	3
2. Définition d'un sable	3
3. Historique	3
4. Origines du sable	4
4.1. Le vent	4
4.2. L'eau	4
5. Caractéristiques des sables	4
6. Propriétés	5
7. Classification d'un sable	6
7.1. Granulométrie	6
7.2. Propreté	6
7.3. Nature minéralogique	6
7.4. Teneur en fines	6
7.5. Teneur en matière organique et sa nature	7
8. Différents types de sables	7
8.1. Sables naturels	7
8.1.1. Sables fluviatiles	7
8.1.2. Sables marins	7
8.1.3. Sables marins littoraux	7
8.2. Sables du Sahara	7
8.2.1. Sables éoliens	7
8.2.2. Dépôt alluvionnaire	8
8.2.3. Sables de regs	8
8.2.4. Sables géologiques en place	8
8.2.5. Sables gypseux	8
8.2.6. Sables gypso-calcaires	8
9. Critère de choix d'un sable	9
9.1. Granulométrie	9
9.2. Module de finesse	10
9.3. Densité apparente (Da) et Densité réelle (Dr)	12

9.4. Foisonnement	12
9.5. Porosité et la capacité de rétention	13
9.6. Perméabilité	14
9.7. Angularité	14
9.8. Forme	14
9.9. La Propreté	15
9.10. Dureté	16
9.11. Analyse chimique	16
10. Sables de dune	17
10.1. Dureté	17

Chapitre 2 : Le béton

1. Introduction	19
2. Historique	19
3. Principaux avantages et inconvénients du béton	21
3.1. Avantages du béton	21
3.2. Inconvénients du béton	21
4. Composants du béton	22
4.1. Ciments	22
4.1.1. Constitutions de base des ciments	22
4.2. Graviers	23
4.3. Sable	23
4.4. Adjuvants	23
4.5. Eau de gâchage	24
4.6. Additions	24
5. Préparation de béton	24
5.1. Malaxage	25
5.2. Coulage	26
5.3. Vibration	27
5.4. Durcissement	27
5.5. Décoffrage	27

Chapitre 3 : Méthodes de formulations

1. Introduction	28
2. Critères en fonction de la destination des bétons	29

2.1. Choix des granulats (la taille des granulats D_{max})	30
2.2. Résistance désiré	31
2.3. Ouvrabilité	32
3. Influence du rapport dosage en ciment sur dosage en eau : (E/C)	33
4. Dosage en eau	34
5. Méthodes expérimentales	35
5.1. Méthode de Bolomey	35
5.2. Méthode d'Abrams	36
5.3. Méthode de Vallette	36
5.4. Méthode de Dreux- Gorisse	37
5.5. Méthode de JOISEL	37
5.6. Méthode de BARON et LESAGE	38
5.7. Méthode de Faury	39

Chapitre 4 : Contrôle et essais sur béton

1. Introduction	42
2. Caractéristiques principales du béton durcissant	42
2.1. Résistance en compression	43
2.1.1. Mise en œuvre des éprouvettes	44
2.1.2. Ecrasement des éprouvettes	45
2.2. Résistance en traction	45
2.2.1. Résistance en traction par flexion	45
2.2.2. Résistance en traction par fendage	46
2.2.3. Résistance en traction directe	47
3. Caractéristiques principales du béton frais	47
3.1. Ouvrabilité du béton frais	47
3.1.1. Affaissement au cône d'Abrams	47
3.1.2. Etalement sur table (flow-test)	49
3.2. Déformation des bétons	50
3.2.1. Retrait	51
3.2.2. Cause	52
3.2.3. Différents types de retrait	53
3.2.4. Facteurs agissant sur l'amplitude de retrait	53
3.2.5. Essai de retrait	54

a. Objectif de l'essai	54
b. Principe de l'essai	54
c. Equipment nécessaire	54
d. Conduite de l'essai	55
3.3. Gonflement	56
3.4. Dilatation	56
3.5. Fluage	56
4. Elasticité du béton	57
5. Effet de Poisson	57

Chapitre 5 : Identification des matériaux utilisés

1. Introduction	58
1.1. Analyse granulométrique	58
1.2. Courbe granulométrique	58
1.3. Module de finesse	59
1.4. Equivalent de sable	59
1.5. Essai au bleu de méthylène	59
1.6. Friabilité	59
1.7. Micro-Deval	59
1.8. Coefficient d'aplatissement des gravillons	60
1.9. Masses volumiques absolue et apparente	60
1.10. Essai Los-Angels	61
1.11. Compacité	62
1.12. Porosité	62
2. Granulats fins (Sable)	62
2.1. Caractéristiques physiques	62
2.1.1. Analyse granulométrique	62
2.1.2. Propriétés physiques	63
2.2. Analyse chimique	63
3. Sable naturel	64
3.1. Caractéristiques physiques	64
3.1.1. Analyse granulométrique	64
3.1.2. Propriétés physiques	64
3.2. Analyse chimique	65

4. Gravier (8/15)	65
4.1. Caractéristiques physiques	65
4.1.1. Analyse granulométrique	65
4.1.2. Propriétés physiques	66
4.2. Analyse chimique	66
5. Gravier (15/25)	67
5.1. Caractéristiques physiques	67
5.1.1. Analyse granulométrique	67
5.1.2. Propriétés physiques	67
5.2. Analyse chimique	68
6. Eau de gâchage	69
7. Ciment	69
8. Détermination des formulations des bétons utilisés	71
8.1. Composition granulaire du béton	71
8.2. Méthode de Faury	72
8.2.1. Tracé de la Courbe granulométrique de référence	72
8.2.2. Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux	74
8.2.3. Détermination des masses de granulats	74
8.2.4. Calcul de l'indice des vides	76
8.2.5. Détermination les poids de Composition de béton	77
8.2.6. Calcul de la densité théorique	77
9. 1 ^{ère} étape	77
9.1. Courbe réelle de mélange	78
10. 2 ^{ème} étape	80
11. 3 ^{ème} étape	82
11.1. avec 10 % de sable de dune	84
11.2. avec 15 % de sable de dune	86
11.3. avec 20 % de sable de dune	88

Chapitre 6 : Analyse et discussion des résultats

1. Introduction	90
2. Consistance du béton frais	90
2.1. Interprétation	90
3. Formulations effectuées pour les différents essais	91
4. Béton durci	92

4.1. Résistance à la compression	92
4.2. Interprétation	94
5. Résistance à la traction par flexion	94
5.1. Interprétation	95
6. Essai de retrait	95
6.1. Interprétation	96
Conclusion générale	97
Références bibliographiques	99



ANNEXE

ANALYSE GRANULOMETRIQUE (Tamisage par voie Sèche après Lavage)

I. Objet

La présente norme NF P18-304 a pour objet de définir la classification des granulats d'après les dimensions de leurs grains, celles-ci étant exprimées en ouvertures à mailles carrées mesurées en millimètres. Elle décrit également, à titre d'exemple, une méthode à suivre pour l'analyse granulométrique et sa représentation graphique.

II. Domaine d'application

Elle s'applique aux granulats d'origines naturelle et artificielle utilisés dans le bâtiment et les travaux publics, dont la granularité est déterminée par tamisage.

Elle ne concerne ni les éléments inférieurs à 0,08 mm (fines, farines et fillers) ni ceux qui dépassent 80 mm (moellons et galets).

III. Vocabulaire

1. Granulométrie : c'est la détermination des dimensions des grains ;
2. Granularité : c'est la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.
3. Classe granulaire : est définie par deux dimensions d'ouvertures de mailles carrées avec des conditions déterminées de tamisât et de refus.

VI. Définitions

- **Analyse granulométrique**

C'est la détermination de la répartition dimensionnelle des grains d'un granulat suivant leurs grosseurs.

- **Courbe granulométrique**

Elle traduit la distribution pondérale des granulats élémentaires passant en fonction de la dimension de la maille carrée du tamis.

- **Refus d'un tamis**

C'est la partie de granulat refusée à travers les mailles d'un tamis.

- **Passant ou tamisât**

C'est la partie des granulats qui passent à travers les mailles d'un tamis.

V. Appareillage

- Un dispositif de lavage avec arroseur et, éventuellement, de malaxage ;
- Un jeu de tamis emboîtable à mailles carrées conforme à la norme NF ISO 565
dont les montures ont au moins :
 1. Un diamètre supérieur ou égal à 200 mm pour des mailles d'ouvertures inférieurs à 10 mm ;
 2. Un diamètre supérieur ou égal à 250 mm pour des mailles d'ouvertures entre 10 et 50 mm ;
 3. Un diamètre supérieur ou égal à 315 mm pour des mailles d'ouvertures supérieur à 50 mm ;

Toutes les montures des tamis d'une même colonne ont le même diamètre imposé par la dimension de la plus grande maille des tamis utilisés.

- Couvercle et fond de tamis de même diamètre que les tamis ;
- Récipients en matériau non altérable, brosse, pinceau,..... ;
- Balances dont les portées maximales et minimales sont compatibles avec les masses à peser et telles que les pesées sont effectuées avec une incertitude de 1/1000 de la valeur mesurée ;
- Etuve de dessiccation à température réglable entre 50°C et 150°C ;

VI. Exécution de l'essai

VI.1. Prise de l'échantillon

L'échantillon doit représenter le plus fidèlement possible la composition moyenne du matériau à essayer, le poids de l'échantillon à analyser dépend des dimensions et du pourcentage des éléments les plus gros qu'il contient. Il est recommandé de se tenir aux limites définies par la formule suivante :

$$200 D < P < 600 D$$

P : poids de l'échantillon exprimé en grammes.

D : la dimension maximale du plus gros granulat exprimé en mm.

VI.2. Tamisage par voie sèche

- Le matériau, préalablement échantillonné, est séché à 105°C dans une étuve ;
- On procède à l'élimination des fines par lavage continu, pour cela on introduit le matériau dans un récipient pourvu à sa partie supérieure d'un bec. Le lavage est effectué par renouvellement continu de l'eau qui s'écoule par le bec, cette eau se dirige sur un tamis de 0,08 mm destiné à éliminer les éléments argileux.
- On poursuit cette opération jusqu'à ce que l'eau contenue dans le récipient devienne claire.
- On met le matériau dans l'étuve jusqu'à ce qu'il soit complètement séché. On procède ensuite à l'opération de tamisage au tamis manuel ou bien au vibro-tamis.

EQUIVALENT DE SABLE

I. But de l'essai

Cet essai, utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons, l'est aussi pour les sols mais, dans ce cas, son importance est moindre. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans les sols des éléments sableux plus grossiers. Une procédure normalisée NF P18-598, permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci.

II. Principe de l'essai

L'essai est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier. Le tamisage se fait par voie humide afin de ne pas perdre d'éléments fins.

La valeur de l'équivalent de sable E_s est le rapport, multiplié par 100, entre la hauteur de la partie sableuse sédimentée noté h_2 et, la hauteur totale de flocculat plus la partie sableuse sédimentée notée h_1 .

Selon que la hauteur h_2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine l'équivalent de sable à vue (E_{sv}) ou l'équivalent de sable au piston (E_{sp}).

III. Appareillage et produits utilisés

III.1. Produits utilisés

III.1.1. Solution concentrée

La préparation de la solution concentrée s'effectue à partir de :

- Chlorure de calcium cristallisé, qualité produit pur ;
- Glycérine à 99% glycérol, qualité pharmaceutique ;
- Formaldéhyde en solution de 40% en volume, qualité pharmaceutique ;
- Eau distillée ou déminéralisée ;

Préparer une solution concentrée avec :

- 111 gr \pm 1 gr de chlorure de calcium anhydre ;

- 480 gr \pm 5 gr de glycérine ;
- 12 à 13 gr de la solution de formaldéhyde ;

Il est recommandé de stocker la solution concentrée dans des flacons en matière plastique contenant 125 ml \pm 1 ml, pour des raisons de commodité d'emploi et de meilleure conservation de cette solution.

III.1.2. Solution lavant

La solution lavant est préparée, en prenant 125 ml \pm 1 ml de la solution concentrée et en diluant à 5000 ml \pm 5 ml avec de l'eau distillée.

Pour la préparation de la solution lavant, à partir de la solution concentrée, on peut se contenter sur les chantiers d'eau déminéralisée au lieu d'eau distillée et même d'eau potable.

Remplacer la solution lavant au bout d'un mois si un léger dépôt ou des troubles apparaissent.

Le mélange est vigoureusement agité aux utilisations.

Dans le cas où la solution concentrée serait stockée dans un flacon de 125 ml, rincer plusieurs fois le flacon et verser les eaux de rinçage dans le flacon de 5000 ml avant de diluer le contenu de ce dernier à 5000 ml.

III.2. Appareillage

III.2.1. Appareillage d'usage courant

- Tamis de 5 mm d'ouvertures avec fond de tamis ;
- Spatule et cuillère ;
- Récipients de pesée pouvant recevoir environ 200 ml ;
- Balance dont la portée limitée est compatible avec les masses à peser et permettant de faire toutes les pesées avec une précision relative de 0,1% ;
- Chronomètre ;
- Règle de 50 cm graduée en mm ;
- Goupillon pour le nettoyage des éprouvettes ;
- Bacs pour tamisage ;
-

III.2.2. Appareillage spécifique

Éprouvettes cylindriques transparentes en matière plastique (fig.1) de diamètre intérieur égal à $32 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$, une épaisseur standard et d'une hauteur égale à $430 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$.

Chacune des deux éprouvettes est graduée et porte deux traits repères à $(100 \pm 0,25) \text{ mm}$ et $(380 \pm 0,25) \text{ mm}$ de la base.

Deux bouchons en caoutchouc pour fermer les éprouvettes, et piston taré (fig.2) constitué par :

- Une tige de $(440 \pm 0,1) \text{ mm}$ de longueur ;
- Une embase de $(25 \pm 0,1) \text{ mm}$ de diamètre, dont la surface inférieure est plate, lisse et perpendiculaire à l'axe de la tige et qui comporte latéralement trois vis de centrage du piston dans l'éprouvette, avec un léger jeu. Ses parties plongeantes sont en métal inoxydable ;
- Un manchon de $(10 \pm 0,1) \text{ mm}$ d'épaisseur, qui s'adapte sur l'éprouvette cylindrique et permet de guider la tige de piston, en même temps qu'il sert à répéter l'enfoncement du piston dans l'éprouvette. Ce manchon comporte une vis qui permet de la bloquer sur la tige du piston, ainsi qu'une encoche pour le passage de la réglette ;
- Un poids fixé à l'extrémité supérieure de la tige pour donner à l'ensemble du piston taré, hormis le manchon, une masse totale de $(1000 \pm 5) \text{ gr}$;
- Un tube lavure (fig.3), constitué par un tube rigide en acier inoxydable ou cuivre écroui, de diamètre extérieur $(6 \pm 0,1) \text{ mm}$ et de diamètre intérieur $(4 \pm 0,1) \text{ mm}$;
- Ce tube est menu à la partie supérieure d'un robinet, à la partie inférieure d'un embout fileté (fig.4) en acier inoxydable formant dièdre ; chaque face du dièdre étant percé d'un trou de $(1 \pm 0,1) \text{ mm}$;
- Un flacon transparent en verre ou en matière plastique, d'environ 5 l de volume, menu d'un système de siphon ;
- Un tube en caoutchouc ou en plastique de 1,50 m de longueur, 5 mm de diamètre intérieur reliant le tube lavure au siphon ;
- Un entonnoir pour transvaser le matériau dans l'éprouvette cylindrique (fig.5) ;
- Une machine d'agitation électrique capable d'imprimer à l'éprouvette un mouvement horizontal rectiligne et périodique de 1/3 seconde et 20 cm d'amplitude ;

IV. Préparation de l'échantillon pour essai

L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme P18-553. La masse, des passant au tamis de 5 mm, est prise entre 500 et 700 gr.

Si l'échantillon n'est pas humide ; l'humidifier afin d'éviter les pertes de fines.

Sur celui-ci, procéder à la préparation d'un échantillon pour la détermination de la teneur en eau « w », exprimée en pourcent, et de deux échantillon pour essai.

L'essai est effectué sur 120 gr de grains secs. Il est préférable d'utiliser un échantillon humide, ce qui évite de perdre ses éléments fins.

Après détermination de la teneur en eau « w » on pèse un échantillon humide de masse égale à :

$$120 (1 + w) \dots \dots \dots \text{(En grammes)}$$

V. Exécution de l'essai

La solution lavant ayant été siphonnée dans l'éprouvette cylindrique, jusqu'au trait repère inférieur, la prise d'essai humide, correspondant à une masse sèche de 120 gr de matériau, et verser soigneusement à l'aide de l'entonnoir dans l'éprouvette posée verticalement.

Frapper fortement à plusieurs reprises la base de l'éprouvette sur la paume de la main pour déloger les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon, et laisser reposer dix minutes.

V.1. Agitation de l'éprouvette

A la fin de cette période de dix minutes, boucher l'éprouvette avec le bouchon, puis la fixer sur la machine d'agitation.

Faire subir à l'éprouvette 90 cycles en 30 secondes.

Remettre l'éprouvette en position verticale. sur la table d'essai.

V.2. Lavage

Oter le bouchon en caoutchouc et le rincer au-dessus de l'éprouvette avec la solution lavant.

En descendant le tube lavant dans l'éprouvette, rincer les parois de l'éprouvette avec la solution lavant, puis enfoncer le tube jusqu'au fond de l'éprouvette.

Faire remonter les éléments argileux, tout en maintenant l'éprouvette en position verticale en procédant de la manière suivante : l'éprouvette est soumise à un lent mouvement de rotation, remonter lentement et régulièrement le tube laveur. Lorsque le niveau du liquide atteint le trait repère supérieur, relever le tube laveur, de façon à ce que le niveau du liquide se maintienne à la hauteur du trait repère. Arrêter l'écoulement dès la sortie du tube laveur.

V.3. Mesures

Laisser reposer pendant 20 minutes.

On mesure à l'aide de la règle, la hauteur h_1 du fond de l'éprouvette au niveau supérieur du floculat.

Descende doucement le piston taré dans l'éprouvette, jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. Pendant cette opération, le manchon coulissant prend appuis sur l'éprouvette.

Lorsque l'embase du piston repose sur le sédiment, on bloque le manchon coulissant sur la tige du piston (fig.2).

Mesurer la hauteur du sédiment h_2 au niveau de la face supérieure du manchon.

VI. Expression des résultats

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

$$E_s = 100 \times (h_2 / h_1)$$

Ces résultats sont donnés avec une décimale. La détermination portant sur deux échantillons, la propreté du sable est la moyenne des valeurs obtenues.

La valeur de la moyenne est arrondie à l'entier le plus voisin.

ESSAI AU BLEU DE METHYLENE (Essai à la TACHE)

I. But de l'essai :

Cet essai, utilisé de manière courante pour caractériser l'activité des argiles contenues dans les sols, est également utilisé pour évaluer l'influence des fines d'origines argileuses contenues dans les sables et graves d'origines naturelle ou artificielle.

Il rend compte ainsi de l'activité de surface des argiles, des matières organiques ainsi que des hydroxydes de fer contenus dans les fines. Cet essai est un test performant pour quantifier de manière sûre et simple la propreté des granulats.

II. Principe de l'essai :

L'essai consiste à mesurer, par dosage, la quantité de bleu de méthylène pouvant s'absorber sur la prise d'essai. Cette valeur est rapportée par proportionnalité directe à la fraction 0/5 mm du sol. La valeur de bleu du sol est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol, laquelle est avant tout régie par l'importance et l'activité des matériaux argileux présents dans la fraction fine du sol.

Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu et en contrôlant l'absorption après chaque ajout. Pour ce faire, on prélève une goutte de la suspension que l'on a déposée sur papier filtre, ce qui provoque la création d'une tache. L'absorption maximale est atteinte lorsqu'une auréole bleue claire persistante se produit à la périphérie de la tache.

III. Appareillage et matériels d'essai :

III.1. Appareillage courant :

- Balances dont les portées sont compatibles avec les masses à peser et permettant de faire les pesées avec une incertitude relative de 0,1% de la valeur mesurée ;
- Thermomètre gradué en degré calculs (0°C à 100°C) ;
- Chronomètre (secondes) ;
- Enceinte thermique ou appareil de séchage pour déterminer la teneur en eau des sols selon une méthode normalisée.

III.2. Appareillage spécifique :

- Un dispositif de dosage permettant d'injecter par pas de 2,5 cm³ des volumes de solutions de bleu et de connaître la quantité totale injectée à ± 1 cm³ ;
- Un agitateur mécanique à ailettes tournant entre 400 et 700 tr/ min, le diamètre des ailettes est compris entre 70 mm et 80 mm ;
- Un récipient cylindrique (en verre, en plastique ou métal inoxydable) d'une capacité de 3000 cm³ et un diamètre égal à 155 mm ;
- Une baguette de verre de (8 ± 1) mm de diamètre ;
- Un papier filtre blanc avec teneur en cendres inférieur à 0,01%, de masse surfacique 95 g/ cm², d'épaisseur 0,2 mm, de vitesse de filtration égale à 75 et de diamètre de rétention 8 mm ;
- Un tamis à mailles carrées de 5 mm et 50 mm, conforme à la norme NF ISO 565.

III.3. Produits :

- Solution de bleu de méthylène de qualité médicale de 10 g/l $\pm 0,1$ g/l de fabrication récente (moins de 30 jours) et conservée dans un flacon bouché à l'abri de la lumière ;
- Eau distillée ou déminéralisée

VI. Préparation de l'échantillon :

- Si le diamètre maximal du matériau (D_{max} exprimé en mm) est inférieur à 50 mm ; prélever une masse (m exprimée en gr) du matériau à sa teneur en eau naturelle telle que $m > 200 D_{max}$.
- Si D_{max} est supérieur à 50 mm ; prélever 10 kg de sa fraction 0/50 mm.
- Si D_{max} de l'échantillon prélevé est supérieur ou égal à 5 mm :
 - Séparer par tamisage, si nécessaire par lavage, la fraction 0/5 mm contenue dans cet échantillon ;
 - Déterminer la proportion pondérale C de la fraction 0/5 mm (sèche) contenue dans le matériau (ou dans sa fraction 0/5 mm). Cette proportion peut être lue sur la courbe granulométrique du matériau si elle est connue par ailleurs ou bien déterminée sur un autre échantillon représentatif du matériau.

Quarter et homogénéiser la fraction 0/5 mm ainsi séparée (ou la totalité de l'échantillon prélevé si $D_{max} < 5$ mm) de manière à préparer trois prise d'essai de masses sensiblement égales (5 gr prés) et de l'ordre de :

- 30 gr à 60 gr dans le cas des sols argileux et très argileux ;
- 60 gr à 120gr pour les sols peu et moyennement argileux.

1. La première prise d'essai de masse (m_1) est introduite dans le récipient de 300 cm³, mise en suspension dans (500 cm³ \pm 10 cm³) d'eau déminéralisée et dispersée à l'aide de l'agitateur à ailettes (700 tr/min \pm 100 tr/min) durant 5 min au minimum et dans tous les cas jusqu'à disparition visuelle de tout agglomérat de particules d'argile dans la suspension.
2. La deuxième prise d'essai de masse (m_2) est utilisée pour déterminer la teneur en eau de chacune des prises d'essai.
3. La troisième prise d'essai est conservée dans un sac ou récipient hermétique en prévision de l'éventualité où l'essai devait être renouvelé (mauvaise estimation des incréments de solution de bleu ajoutés après chaque teste).

V. Mode opératoire :

La prise d'essai étant mise en imbibition comme décrit précédemment, on procède au dosage du bleu de méthylène comme suit :

A l'aide du dispositif de dosage, introduire dans la suspension, maintenue en agitation permanente à 400 tr/min, 5 à 10 cm³ de solution de bleu selon l'angulosité estimée du matériau (10 cm³ pour les matériaux très argileux). Au bout de 1min \pm 10 sec, on procède à l'essai à la tache sur papier filtre de la manière suivante :

- Prélever à l'aide de la baguette de verre une goutte de suspension et la déposer sur papier filtre. La tache ainsi formée se compose d'un dépôt central de matériau coloré de bleu sombre, entouré d'une zone humide incolore ;
- La goutte prélevée doit former un dépôt central compris entre 8 et 12 mm de diamètre.
- Procéder à des injections successives par pas de 5 cm³ de solution de bleu jusqu'à l'apparition d'une auréole claire dans la zone humide périphérique de la tache, l'essai

est dit alors positif. A partir de ce moment, laisser se poursuivre l'absorption de bleu et effectuer des essais, de minute en minute, sans ajout de solution.

Si l'auréole bleue claire disparaît avant la cinquième minute, on procède à de nouvelle injection de bleu avec pas de 2 cm³ à 5 cm³, selon l'angulosité du matériau.

Chaque addition est suivie d'essai effectué de minute en minute. Ces opérations sont renouvelées jusqu'à ce que l'essai devienne positif pendant cinq minutes consécutives. Le dosage est alors terminé et l'on détermine le volume total de solution de bleu (V) nécessaire pour atteindre l'absorption totale.

Le récipient et les accessoires en contact avec la suspension de sol et le bleu de méthylène sont lavés et abondamment rincés à l'eau claire si des produits nettoyant ont été utilisés.

VI. Calculs et expressions des résultats :

Les grandeurs à mesurer au cours de cet essai sont :

m_1 : la masse humide de l'échantillon constituant la première prise d'essai (gr).

m_2 : la masse humide de l'échantillon séché à l'étuve (gr).

m_3 : la masse sèche de l'échantillon séché à l'étuve (gr).

V : le volume de la solution de bleu de méthylène (cm³).

On calcul alors :

- la teneur en eau de l'échantillon soumis à l'essai (0/5 mm) :

$$w = (m_2 - m_3) / m_3$$

- la masse sèche de la prise d'essai :

$$m_0 = m_1 / (1 + w)$$

- la masse de bleu introduit (gr) :

$$B = V \times 0,01$$

- la formule donnant la valeur du bleu pour 100 gr de sol sec :

$$VBs = B \times 100 / m_0$$

Pour les matériaux dont $D_{max} > 5$ mm on aura :

$$VBs = C (B \times 100 / m_0)$$

Avec : C proportion de la fraction 0/5 mm dans la fraction 0/50 mm du sol sec.

ESSAI DE FRIABILITE DES SABLES

I. Objet :

L'essai qui est bien sûr normalisé (NF P 18-572) a pour but de définir le mode opératoire pour la détermination de la résistance à la fragmentation des sables.

II. Domaine d'application :

Cet essai s'applique aux sables d'origines naturel ou artificiel, afin de déterminer le coefficient de friabilité qui est un paramètre important pour ce qui concerne la qualité des bétons hydrauliques principalement.

III. Généralités :

III.1. But de l'essai :

On réalise l'essai micro-Deval avec un sable 0,1/2 mm de masse M et une charge de billes d'acier de 2500 g et 1500 rotations en présence d'eau.

III.2. Définition :

L'évolution granulométrique sera caractérisée par la quantité d'éléments inférieurs à 0,05 mm notée 'm' produite au cours de l'essai.

Par définition, le coefficient de friabilité du sable est donnée par l'expression suivante :

$$\text{FS} = 100 \times \frac{\mathbf{m}}{\mathbf{M}}$$

IV. Appareillage :

IV.1. Appareillage spécifique :

- Appareil micro-Deval ;
- Une charge abrasive constituée par des billes d'acier inoxydable normalisées de diamètres 30 mm, 18 mm et 10 mm à 0,5 mm près.

IV.2. Appareillage d'usage courant :

Le matériel nécessaire pour effectuer l'échantillonnage du sable et une analyse granulométrique par tamisage dont une série de tamis : 0,05 – 0,1 – 0,2 - 2 – 8 mm .

V. Matériau pour essai :

V.1. Prise d'échantillon :

La masse initiale du sable est de 2000 g ; l'essai sera effectué sur un granulat de 0,1/2 mm et suivant les prescription de la norme NF P18-553.

V.2. Préparation de l'échantillon pour essai :

- Tamisage de la masse initiale par voie humide sur les tamis de 0,1 et 2 mm ;
- Laisser le matériau séché à l'étuve (105°C) jusqu'à avoir une masse constante ;
- Peser une masse de 500g pour l'essai ;
- Préparer la charge abrasive ; des billes d'acier de diamètre différents 30 mm, 18 mm, et compléter la charge par des billes de diamètre 10 mm jusqu'à arriver à 2500 g de masse.

VI. Exécution de l'essai :

- Introduire la charge dans le cylindre micro-Deval en premier lieu, et ajouter la masse de l'échantillon de sable de 500g ;
- Ajouter ensuite la quantité d'eau estimée à 2,5 l et mettre le couvercle ;
- Mettre le cylindre en rotation pendant 15 min et 1500 tours ;
- Verser le contenu du cylindre dans un bac d'eau et laver soigneusement le son intérieur pour éviter la perte de matériau ;

- Verser ensuite le contenu du bac dans la colonne de trois tamis 8mm, 0,2 mm et 0,05 mm respectivement pour recueillir la charge abrasive, soulager le tamis de 0,05 mm et garder les refus au dernier tamis ;
- Laver l'ensemble avec de l'eau jusqu'à ce qu'elle devienne claire puis récupérer les billes d'acier au tamis 8 mm ;
- Mettre le refus au tamis de 0,05 mm à l'étuve jusqu'à avoir une masse constante ;
- Peser au gramme près la masse sèche de l'échantillon ainsi étuvé ;

VII. Expression du résultat :

Le coefficient de friabilité est obtenue à partir de la masse sèche des grains inférieurs ou égaux à 0,05 mm :

$$\mathbf{FS = 100 \times \frac{500 - m}{M}}$$

Où m : est la masse des refus au tamis de 0,05 mm.



La balance électrique



L'appareille de l'étuvage



Les tamis



L'appareille de surfaçage des moules



Les moules cubique de traction par flexion



Essai de l'équivalent de sable