

1/04

Ecole Nationale Polytechnique
Département génie civil
Laboratoire de construction et d'environnement



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie civil

Promotion 2004

Thème :

**FORMULATION ET COMPORTEMENT D'UN BETON
DE SABLE DE DUNES POUR STRUCTURES**

Proposé et dirigé par :

Mme R. KETTAB
Enseignant chercheur à l'ENP

Réalisé et présenté par :

Abdelkarim AMIRAT

الموضوع : تركيب وسلوك خرسانة رمل الكثبان للمنشآت.

الملخص: الهدف من هذه الدراسة التجريبية هو تركيب صنفين من خرسانة الرمل هما خرسانة برمل الكثبان، خرسانة رمل الكثبان المعبأ بمادتي الرمل المفتت والحصىات. خرسانة رمل الكثبان الموجه لأحد مكانة بين عائلة الخرسانات ولما لا لخلافة الخرسانة الكلاسيكية في ميدان المنشآت والبناء عليه أن يضمن نتائج جيدة مقاومة نوعية ديمومة دوام وخاصة ثابت المرونة مشابه لخرسانة عادية.

الكلمات المفتاحية: خرسانة رمل الكثبان، خرسانة رمل الكثبان المعبأ، رمل الكثبان، التركيبة، سهولة الاستعمال، المقاومة النوعية وثابت المرونة.

Sujet: Formulation et comportement d'un béton de sable de dunes pour structures

Résumé: Cette étude expérimentale a pour objectif de formuler deux types de bétons de sables à savoir un béton de sable de dunes seul et un béton de sable chargé où deux matériaux correcteurs (sable concassé et gravillon) sont ajoutés aux constituants de base. Le béton de sable destiné à remplacer le béton classique en éléments structuraux doit garantir de bonnes performances: résistance à la compression, durabilité et surtout un module d'élasticité similaire à celui des bétons classiques.

Mots clés: Béton de sable de dunes, béton de sable chargé, sables de dunes, formulation, maniabilité, résistance caractéristique et module d'élasticité.

Topic: Formulation and behavior of a concrete of sand of dunes for structures

Summary: This experimental survey has for objective to formulate two types of concretes of sands to know a concrete of sand of dunes only and a loaded sand concrete where two corrective materials (ground sand and gravel) are added to the constituent of basis. The concrete of sand intended to replace the classic concrete in structural elements must guarantee good performances: resistance to the compression, durability and especially a module of springiness similar to the one of the classic concretes.

Keywords: Concrete of sand of dunes, loaded sand concrete, sands of dunes, formulation, maneuverability, characteristic impedance and module of springiness.

Remerciements

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à ma promotrice madame R. KETTAB pour ses conseils, son suivi et orientation qui m'ont été utile tout au long 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.

J'exprime également mes sincères reconnaissances aux personnes qui m'ont aidé du Centre National d'Etudes et de la Recherche Intégrée du Bâtiment et le Laboratoire Centrale des Travaux Publics tout au long de l'exécution de mon travail.

En fin, je remercie Mr Mounir Maache pour son aide et toute personne qui a contribué de près ou de loin, par un conseil ou un geste, pour achever ce travail trouve ici mes sincères reconnaissances et gratitudes.

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Historique	3
Chapitre I : Caractéristiques des bétons de sable.	
I.1- Définition.....	5
I.2- Les composants des bétons de sables.....	7
I.2.1- Les sables.....	7
I.2.2- Les ciments.....	7
I.2.3- Les fines d'addition.....	8
I.2.4- L'eau de gâchage.....	10
I.2.5- Les adjuvants.....	10
I.2.6- Autres ajouts.....	11
a- les colorants.....	11
b- les fibres.....	11
c- les gravillons.....	12
I.3- Propriétés des bétons de sable.....	12
I.3.1- Maniabilité- granulométrie.....	12
I.3.2- Résistance- granulométrie.....	15
a- la finesse de l'addition.....	15
b- la nature de l'addition.....	15
c- le diamètre du plus gros granulat.....	16
I.4- Interaction armatures-béton de sable.....	17
I.5- Phénomène de ségrégation.....	18
I.6- Phénomène de ressuage.....	19
I.7- Résistance au gel.....	19
I.8- Durabilité des bétons de sable.....	19
I.9- Principaux essais sur bétons de sable.....	21
I.9.1- Malaxage.....	21
I.9.2- Serrage des bétons de sable.....	21
I.9.3- Protection contre la dessiccation.....	22
I.9.4- La maniabilité.....	22
I.9.5- Essai de prise.....	23
I.9.6- Essai sur la masse volumique.....	23
I.10- Domaine d'emploi des bétons de sable.....	24
I.10.1- Les bétons non vibrés.....	24
I.10.2- Les bétons projetés.....	24

I.10.4- La préfabrication d'éléments destinés à rester apparents.....	25
I.11- Désignation des bétons de sable.....	25

Chapitre II : Méthodes de formulation des bétons de sable.

II.1- Introduction.....	26
II.2- Approche théorique de formulation des bétons de sable.....	26
II.2.1- La compacité et les méthodes de formulation des bétons.....	26
II.2.2- Estimation du dosage en fines d'un béton de sable.....	27
II.2.3- Porosité et dosage en eau d'un béton de sable.....	29
II.2.4- Estimation de l'air occlus.....	31
II.2.5- Evaluation du dosage en sable.....	31
II.2.6- Estimation de la résistance en compression.....	31
II.3- Approche expérimentale de formulation.....	33
II.3.1- Présentation de l'approche.....	33
II.3.2- Les différentes étapes de la formulation.....	33
II.3.2.1- Détermination d'une formule de base (sans fines d'addition).....	33
- Réglage de la maniabilité et du rendement de la formule.....	35
II.3.2.2- Détermination du dosage en fines d'addition.....	36
- Résistance.....	36
II.4- Conclusion.....	36

Chapitre III: Correction granulométrique des bétons de sable.

III.1- Introduction.....	37
III.2- Correction par l'apport d'un sable concassé.....	37
III.3- Correction par l'ajout de gravillon.....	38
III.3.1- Spécification des gravillons pour bétons hydrauliques.....	38
III.3.1-a- Forme des gravillons.....	38
III.3.1-b- Propreté des gravillons.....	38
III.3.1-c- Adhérence des gravillons.....	39
III.3.1-d- Cohésion et dureté des gravillons.....	39
III.3.2- Principaux essais sur gravillons.....	40
III.3.2.1- Résistance à l'usure.....	40
III.3.2.2- Résistance aux chocs.....	40
III.4- Dosage en gravillons.....	41
III.5- Influence de l'ajout de gravillons sur les bétons de sable.....	41
III.5.1- La résistance aux chocs.....	42
III.5.2- La résistance à l'attrition.....	42
III.5.3- La résistance à la compression.....	43
III.5.4- Le module d'élasticité.....	43
III.6- Conclusion.....	44

III.5.4- Le module d'élasticité.....	43
III.6- Conclusion.....	44

Chapitre IV : Comportement des bétons de sable.

IV.1- Introduction.....	45
IV.2- Compression simple.....	45
IV.2.1- Essai de compression simple.....	46
IV.2.2- Principales dispositions du mode opératoire.....	47
IV.2.3- Comportement du béton en compression.....	47
a- Module d'élasticité en compression.....	47
b- Coefficient de poisson.....	48
c- Relation module d'élasticité-résistance caractéristique du béton.....	48
IV.3- Traction simple.....	48
IV.3.1- Les différents essais, liens entre eux.....	49
IV.3.2- Comportement en traction.....	50
IV.4- Fluage.....	51
IV.4.1- Description d'une loi de fluage.....	51
IV.5- Fatigue.....	52
IV.6- Retrait.....	53

Chapitre V : Les sables de dunes.

V.1- Introduction.....	55
V.2- Caractéristiques physiques des sables dunaires.....	55
V.2.1- Granulométrie.....	55
V.2.2- Masses volumiques et densités.....	57
V.2.3- propreté.....	58
V.3- Composition minéralogique des sables dunaires.....	59
V.4- Analyses chimiques des sables dunaires.....	59
V.5- Choix d'un sable de dunes	60

Chapitre VI : Identification des matériaux utilisés.

VI.1- Introduction.....	62
VI.2- Sable de dunes.....	65
VI.2.1- Caractéristiques physiques.....	65
VI.2.2- Analyse chimique.....	68
VI.3- Sable concassé.....	69
VI.3.1- Caractéristiques physiques.....	69
VI.3.2- Analyse chimique.....	71

VI.4- Gravillon.....	72
VI.4.1- Caractéristiques physiques.....	72
VI.4.2- Analyse chimique.....	74
VI.5- Conclusion.....	74

**Chapitre VII : Formulation d'un béton de sable de dune et
Choix d'une composition optimale.**

VII.1- Introduction.....	76
VII.2- Confectionnement du béton de sable.....	76
- Malaxage.....	77
- Serrage.....	77
VII.3- Eprouvettes utilisées.....	77
VII.4- Formulation de base.....	78
VII.4.1- Dosage en ciment.....	78
VII.4.2- Dosage en adjuvant.....	78
VII.4.3- Dosage en eau.....	79
VII.4.4- Teneur en air.....	79
VII.4.5- Dosage en sable.....	79
VII.5- Formulation optimale.....	81

**Chapitre VIII : Comportement d'un bétons de sable de
dunes.**

VIII.1- La résistance à la compression.....	82
VIII.2- La résistance à la traction.....	83
VIII.3- Loi de comportement.....	83
VIII.3.1- Courbes contrainte-déformation longitudinale.....	84
VIII.3.2- Module d'élasticité.....	86

Conclusion générale.....	88
---------------------------------	-----------

Introduction générale

A partir des années 50, le souci d'allègement des bétons n'a fait que croître. Le béton est devenu le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Les granulats qui constituent 70% de la masse des bétons courants sont extraits soit des plaines alluviales, soit des massifs de roches compactes, calcaires ou éruptives.

Dans un contexte d'épuisement progressif des ressources en granulats de gros calibre, il était alors aisé d'entrevoir, dès l'origine, l'intérêt tant économique qu'écologique que pourrait présenter la valorisation des sables naturels ou concassés, peu ou pas exploités, pour la fabrication des bétons dont ils seraient les constituants principaux.

Les spécialistes du domaine ont recouru à la recherche de matériaux économiques destinés à remplacer le béton classique. A titre indicatif, le béton de terre stabilisé (BTS) : constitué essentiellement de tuf et environ 10% de ciment ; malgré les études, les expériences et les différents documents techniques expliquant la technologie de fabrication des blocs en BTS ainsi leurs mis en œuvre ce matériau n'a pas eu la réussite attendue.

Dans la même gamme, un autre matériau, qui paraît intéressant, a refait surface, il s'agit du béton de sable : constitué essentiellement de sable (environ 70%) formant son squelette solide, un liant hydraulique (ciment) dont le dosage est similaire à celui d'un béton classique et une quantité d'eau de gâchage. Ce matériau retrouve de nos jours un intérêt certain du fait de ces propriétés spécifiques et permet de valoriser des ressources naturelles en sables.

En plus de la valorisation des matériaux disponibles localement, l'idée de promouvoir la technologie et l'utilisation des bétons de sable dans de nombreux pays est née de plusieurs constatations telles que l'économie dans l'utilisation de certaines constructions peu ou pas étagées, l'esthétique apporté aux constructions à cause de sa petite granularité, le coût de transport de granulats dans certains pays pauvres en granulats ou ayant des ressources mal réparties.

Les recherches sur le béton de sable à travers le monde n'a fait que croître vu les articles publiés (Russie [ex-Union Soviétique], France, Allemagne, Afrique du nord, le golf d'Arabie,...etc) et fait même d'objet d'une norme AFNOR (P18-500). L'expérience Soviétique constitue une excellente référence dans le domaine des applications possibles des bétons de sable (chaussées routières, aéroportuaires, tunnels et métros, travaux de rénovation et ouvrages d'arts... etc). Les soviétiques considèrent le béton de sable comme les autres bétons, en intégrant ses limites, mais aussi en utilisant ses possibilités spécifiques. L'emploi de filler n'est pas une partie intégrante de la technique. [6]

La plupart des études effectuées précédemment en Algérie utilisent les fillers calcaires pour combler les vides inter-granulaires des sables de dunes qui présentent une grande porosité. Le centre national d'études et de recherche intégrée du bâtiment (CNERIB) en collaboration avec des laboratoires et centres de recherches français ont effectué des recherches tout à fait intéressantes, mais on n'a pas encore abouti jusqu'à présent à des méthodes de formulation alliant maniabilité et résistance ; le comportement de ce béton reste mal connu.

Notre objectif, est de formuler un béton de sable de dunes de la région de Boussâada et un béton de sable optimisé à 50% du sable dunaire où deux matériaux sont ajoutés (sable concassé et gravillons) pour créer une granulométrie étalée, et en se basant sur les critères de maniabilité et de compacité afin d'étudier leurs comportements et de les comparer à ceux des bétons classiques.

Le matériau dénommé récemment béton de sable était connu bien avant le 19^e siècle. Il trouve ces origines depuis les ciments et bétons de Rome.

Il y a plus de deux mille ans, les romains utilisaient comme liant la chaux vive obtenue par le chauffage du calcaire. Ils employèrent cette chaux mélangée à du sable après avoir constaté que lorsque ce sable était d'origine volcanique, ils obtenaient un produit très résistant, durable et capable de faire prise avec l'eau. De grands monuments tels le « Panthéon », le « Colisée » et le « ponts du gard » témoignent de la durabilité du premier matériau composite de l'histoire des techniques industrielles.

Avec la fin de cette époque, le secret du matériau se perdit face au retour de la maçonnerie de pierres, découpées et assemblées, caractéristique de la construction au moyen âge et durant les siècles qui suivirent.

Au milieu du 19^e siècle, l'ancienne composition revient sous une autre appellation qui est le béton aggloméré. Il s'agissait d'un mélange sans cailloux, de cendres de scories, de charbon brûlé, de terre argileuse cuite et pilée, de chaux hydraulique naturelle et d'eau en faible quantité. [17]

François COIGNET qui est à l'origine de ce matériau, construit pour sa famille en 1851 une vaste maison à Saint-Denis qui fut entièrement édifiée en béton aggloméré. Par la suite, plusieurs ouvrages ont été édifiés. citons à titre indicatif :

- ◆ Un aqueduc de 40 km reliant Fontainebleu à Orléans fut construit en béton aggloméré vers le début des années 1870.
- ◆ Le phare de Port-Saïd, en Egypte, fut construit en 1869, en béton composé de sable de plage et de chaux importée de France.

Cette technique a été exportée aux USA où le pont de Brooklyn fut construit en bloc de béton aggloméré.

En 1918, une expérience très originale fut faite par Nicolas DE ROCHEFORT à Saint-Petersbourg. Elle consistait à broyer ensemble sable et clinker à parts égales, puis à

mélanger ce produit à du sable dans le rapport de 1 (produit broyé) à 3 (sable). Les résistances obtenues furent les mêmes que celles d'un mélange sable-ciment, beaucoup plus riche en ciment (1/3 de ciment pour 2/3 de sable).

Cette expérience fut reprise par le professeur académicien REHBINDER, comme base de ses propres recherches sur le béton de sable. Il conclut que le broyage du mélange sable-clinker libérait des surfaces physico-chimiquement actives tant qu'elles sont fraîches, sur lesquelles se fixe le liant.

Il semble que cette technique soit tombée en sommeil en URSS, comme en Europe occidentale, vers les années 1920; elle va redevenir d'actualité au cours de la deuxième guerre mondiale.

Dans les années 1970, on constatait que les sables provenant du concassage des roches massives sont excédentaires, alors les extractions de granulats dans les lits des fleuves et des rivières compromettent les équilibres écologiques avec des conséquences irréversibles.

En Algérie, avec l'intérêt que pourrait apporter ce matériau au pays, des initiatives du CNERIB et de l'école nationale polytechnique datent de 1988; elles n'ont pas été élaborées en un solide programme de travail comme c'est le cas du projet national SABLOCRET en France. Mais promouvoir le développement de l'usage courant des bétons de sable nécessite de regrouper les initiatives et d'élaborer un solide programme de travail permettant d'enrichir les connaissances sur le matériau, son comportement et ses modes de mise en œuvre.

Chapitre 1 : **Caractéristiques des bétons de sable**

I.1- Définition :

Un béton de sable est un béton, constitué de sable, de ciment, d'eau et/ou de fines d'ajout. Par rapport à cette composition de base et pour répondre aux besoins de certains usages, d'autres ajouts peuvent être envisagés tels que : des adjuvants, des fibres, des gravillons, ...etc. Comme son nom l'indique, ce mélange est composé de sable comme élément majoritaire, au lieu des granulats de gros calibres.

Ce qui distingue les bétons de sable des bétons classiques réside essentiellement en leur faible dosage ou non en gravillons tandis que le dosage en ciment similaire aux bétons, entre 300 et 400 kg/ m³ et leur destinations, les distingues des mortiers destinés à la réalisation des joints et des enduits.

Ce béton est destiné à réaliser des éléments structuraux, dans le domaine du bâtiment et du génie civil, il doit avoir une résistance caractéristique suffisante, qui est liée à la compacité des constituants mélangés.

En diminuant le diamètre du plus gros granulat d'un mélange, on doit augmenter, pour garder une compacité maximale, la quantité de ciment, cela se traduit par la formule proposée par J. BARON et R.LEZASE :[14]

$$C = (730 \pm 50) / (D)^{1/5}$$

Cette formule a été raffinée par la norme NF P18-305 qui donne le dosage en ciment suivant le diamètre des plus gros grains : [3]

$$C = (250 \pm 10 f_{ck}) / (D)^{1/5}$$

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

D : diamètre du plus gros granulat (mm)

f_{ck} : résistance caractéristique (MPa)

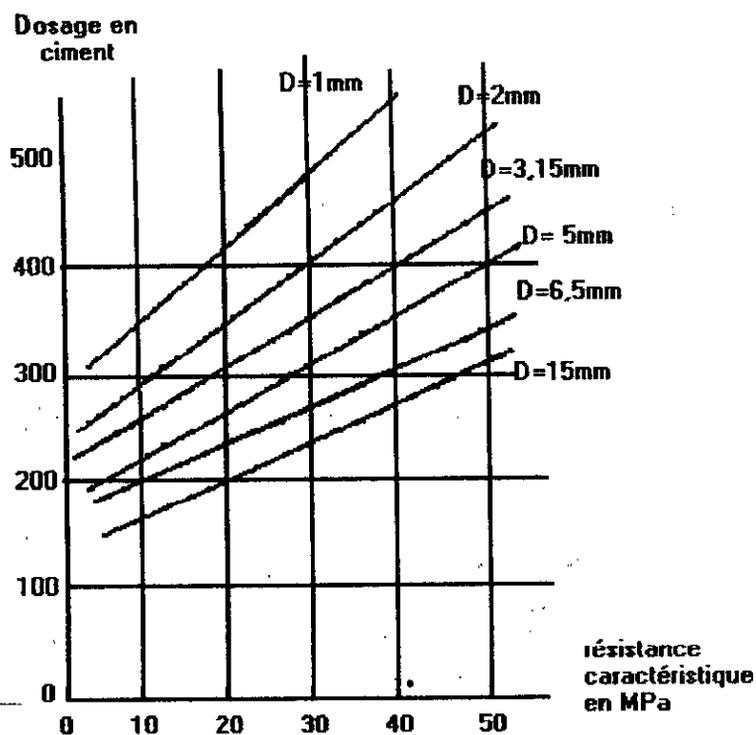


Figure I.1 : Relation entre dosage en ciment et la résistance caractéristique pour divers diamètres de gros grains. [11]

I.2- Les composants des bétons de sable :

I.2.1- Les sables :

Les sables comprennent tous les éléments refusés au tamis de $80\mu\text{m}$ et passant à travers le tamis de 5mm. Dans le sens le plus courant, on entend par sable tous granulats 0/D conformes aux définitions des normes NFP 18-101 et NFP 18-301. [17] (Avec $D=5\text{mm}$).

On distingue :

- Les sables issus d'une chaîne d'élaboration mécanique (concassage, criblage) dits aussi sables artificiels.
- Les sables naturels existant en abondance dans la nature sous forme de dépôts géologiques et résultant d'un processus d'érosion et de décomposition de roches.

La classification des sables est faite à partir de plusieurs paramètres tels que la granulométrie (sable fin, moyen ou grossier), la propreté, la nature minéralogique (siliceuse, calcaire, ...) et la teneur en fines...etc.

La réalisation d'un béton de sable n'exige pas un critère granulométrique des sables. On peut utiliser aussi bien un sable fin (même homométrique, type sable de dune) qu'un sable alluvionnaire moyen ou grossier ou un 0/D de concassage [17]. La seule restriction d'emploi des sables réside dans leur propreté, où il est plus prudent de se limiter à l'utilisation de sables propres tels qu'on peut les employer pour des bétons classiques malgré les études effectuées sur des sables pollués qui n'ont jamais été mis en application.

Par ailleurs, les sables riches en fines naturelles nécessitent généralement beaucoup plus d'eau, ce qui entraîne une chute de résistance.

I.2.2- Les ciments :

Ce sont des poudres fines obtenues par la cuisson à haute température (vers 1450C°) et le broyage d'un mélange (calcaire + argile en général).

Ces poudres constituées de sels minéraux anhydres instables (en particulier silicates et aluminates de chaux) forment avec l'eau une pâte capable par «hydratation» de faire prise et

durcir progressivement d'où le nom de liants hydrauliques par opposition aux «liants aériens» (à base de chaux grasse et maigre) qui ne peuvent durcir qu'au contact de l'air.

Les ciments utilisés doivent être conformes à la norme NFP15-301. Le choix du ciment se fait à partir de sa classe de résistance, ses caractéristiques d'hydratation, l'agressivité du milieu et d'une manière générale de la composition du béton et l'usage auquel il est destiné.

Pour un béton de sable, les ciments type CPA (ciment portland artificiel qui contient au moins 97% de clinker, le reste étant du filler) sont utilisés pour bien exploiter l'activité hydraulique des fines d'ajout. [13]

1.2.3- Les fines d'addition :

La distinction entre béton de sable et un béton classique se fait selon la gamme granulaire, cette dernière (plus une teneur en eau et une énergie de mise en place) donne au béton une de ces qualités essentielles qui est la compacité : c'est le rapport entre le volume des solides et le volume total du mélange.

Pour les bétons classiques, l'idée d'optimiser la compacité se fait de telle sorte que les grains de ciment se logent dans les pores créés par les grains de sable qui à leur tour se logent dans les macro-vides des gravillons (éléments les plus gros) ; dans ce cas, la quantité nécessaire de ciment pour assurer la résistance mécanique coïncide avec celle qu'il faut en fines pour obtenir une bonne compacité ; Cela se traduit par la règle suivante : [17]

$$C = 550 / (D)^{1/5}$$

ou (selon l'usage du béton)

$$C = 700 / (D)^{1/5}$$

Où :

C : dosage en ciment (Kg/m³).

D : diamètre du plus gros granulat (mm).

Dans le cas d'un béton de sable, l'absence de gros granulats, et le dosage en ciment similaire à un béton classique (nécessaire à la rigidité) nécessitent une addition autre que le ciment pour combler le nombre important des pores créés par les grains de sable. La règle précédente

demeure applicable non plus au dosage en ciment seul, mais à l'ensemble (ciment + fines) et qui introduit la notion de liant équivalent (C+KA) où :

C : dosage en ciment (Kg/m^3).

A : dosage en fines d'addition (kg/m^3).

K : un coefficient de prise en compte lié à la nature des fines.

On parle ainsi non plus du rapport E/C (Eau/Ciment) mais de $E/(C+KA)$.

Cette addition ou les fillers sont des poudres minérales dont le diamètre maximal n'excède pas $80\mu\text{m}$ améliorant la compacité et permettant l'augmentation des performances du béton de sable.

On distingue les fillers inertes (fines calcaires, fines siliceuses) issues du broyage de roches massives qui n'ont aucune action chimique sur les ciments en présence d'eau et les fillers actifs (les cendres volantes, laitiers moulus, pouzzolanes broyées...) qui apportent un complément d'hydraulicité au mélange, la maniabilité dépend de la nature géologique et du dosage en fines d'addition pour un rapport E/C fixé, elle s'améliore lorsque le rapport E/C augmente.

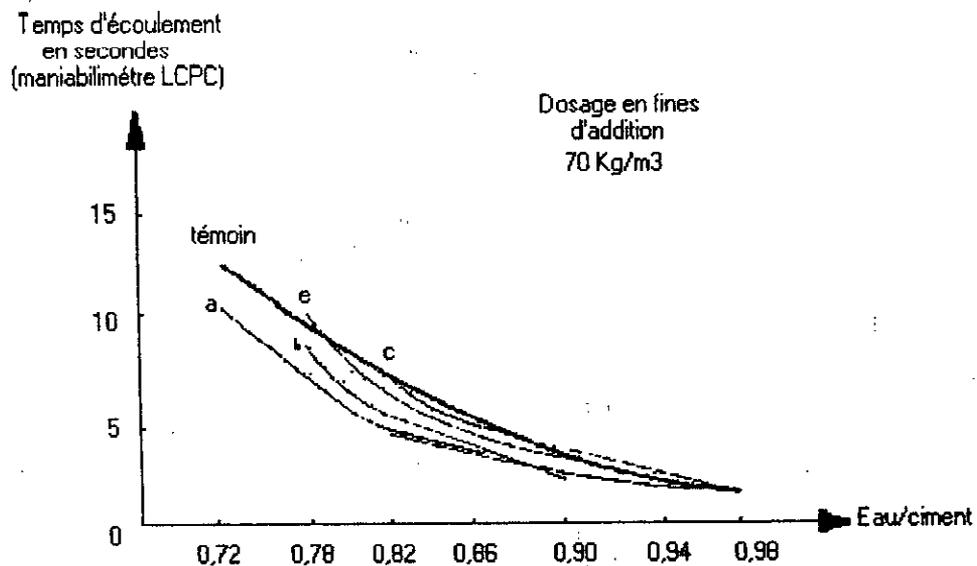


Figure I.2 : Influence de la nature et du dosage en addition sur la maniabilité. [17]

Pour des mêmes dosages en ciment, la résistance d'un béton à la compression dépend directement de la finesse des fines d'addition.

On obtient une bonne maniabilité avec des valeurs eau /ciment plus faibles avec des particules sphériques (réductrices d'eau) qu'avec des particules anguleuses, dont leur usage conduit à un dosage supérieur en eau.[17]

1.2.4- L'eau de gâchage :

L'eau admise sert à l'hydratation du ciment et doit permettre le mouillage complet des agrégats, sans lequel, il n'aurait pas d'adhérence. Le minimum d'eau nécessaire dépend de la nature du liant utilisé, de la quantité du liant, de sa finesse et de la surface (spécifique) offerte par les agrégats ainsi de la maniabilité désirée pour les bétons.

Pour les bétons de sable, l'eau utilisée est la même que celle utilisée pour la confection des bétons classiques, qui doit être conforme à la norme européenne ENV1008 «eau de gâchage pour bétons», qui a permis de préciser à quelles conditions une eau est utilisable. Ces conditions sont d'ordre sensoriel (olfactif ou visuel), chimique ou mécanique (dans ce dernier cas, l'eau est jugée d'après les résultats obtenus sur des éprouvettes de mortier ou béton normalisées).

Il est rappelé qu'une eau de gâchage inadéquate peut ralentir la prise, réduire les résistances mécaniques, favoriser la corrosion des armatures ou les câbles de précontrainte de béton ou entraîner des actions négatives sur la compacité ou la liaison pâte-granulats.

1.2.5- Les adjuvants :

On entend par «adjuvant» un produit (sous forme liquide ou pulvérulent) qui, ajouté au béton en faibles quantités, permet d'améliorer certaines propriétés ou qualités souhaitées soit sur béton frais, soit sur béton durci. Il n'a ni pour mission ni pour effet de faire un bon béton à partir d'un mauvais dosage ou d'une mise en œuvre défectueuse.

Il existe plusieurs types d'adjuvants dont la classification est la suivante : [15]

- Adjuvants modifiant la prise et le durcissement : accélérateurs et retardateurs de prise.

- Adjuvants modifiant la résistance aux actions physiques et chimiques : hydrofuges de masse et produits de cure (les produits de cure sont des produits qui ne rentrent pas dans la fabrication du béton mais ils sont utilisés après la mise en œuvre du béton).
- Adjuvants modifiant la rhéologie et la teneur en air : réducteurs d'eau plastifiants, super plastifiants et entraîneurs d'air.

Le dosage à utiliser varie non seulement en fonction de la nature et la concentration de l'adjuvant mais aussi de la nature du ciment, du volume de la gâchée du béton et du dosage en ciment. Les erreurs du dosage ainsi que l'utilisation simultanée d'adjuvants incompatibles peuvent conduire à des effets plus faibles ou même opposés à ceux qui étaient attendus.

Les adjuvants privilégiés à l'utilisation pour le béton de sable sont les réducteurs d'eau plastifiant et superplastifiant qui lui confèrent une meilleure plasticité, améliorant sa maniabilité et augmentant sa résistance par suite d'une réduction de la teneur en eau. [17]

1.2.6- Autres ajouts :

a- Les colorants :

La recherche d'effets esthétiques particuliers peut conduire à envisager l'utilisation de bétons de sable colorés. La coloration s'obtient soit par ajout lors du malaxage de produits colorants (dont le dosage ne dépasse pas 3% du poids de ciment) soit par utilisation de sables dont la couleur, combinée à l'emploi de ciment blanc, rappelle des couleurs naturelles.

Il conviendra cependant d'assurer une homogénéisation du collant au malaxage et une stabilité de la teinte au cours du temps.

b- les fibres :

Elles sont utilisées dans le but de réduire le retrait au jeune âge, l'efficacité de cet ajout est assurée par sa nature et sa quantité.

Il est préférable d'utiliser des fibres d'acier pour améliorer la ductilité d'un béton ou des fibres organiques (polypropylène, polyester...) sont utilisées pour s'opposer aux effets du retrait de prise et s'abstenir aux fissurations qui en résultent.

c- Les gravillons :

Un béton de sable chargé est un béton de sable dont on a ajouté un certain pourcentage de gravillons pour améliorer certaines caractéristiques telles que la maniabilité, le retrait, la résistance mécanique et notamment le fluage.

En effet, tant que les gravillons sont dispersés dans le sable et ne constituent pas un squelette structuré (figure I.3) le comportement du béton de sable reste le même.

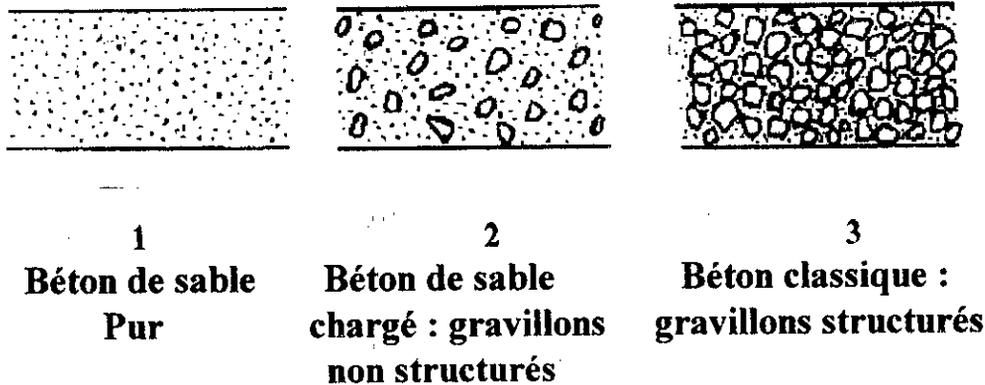


Figure I.3 : Structures des bétons de sable.

I.3- Propriétés des bétons de sable :

I.3.1- Maniabilité-granulométrie :

Une bonne maniabilité procure à la fois une garantie de mise en œuvre satisfaisante et une garantie de qualité du béton durci par la maîtrise du dosage en eau.

Les bétons de sable nécessitent davantage d'eau que les bétons classiques, cette particularité se traduit par des valeurs du rapport eau/ciment comprises généralement entre 0.6 et 0.7 (qui est due à une surface spécifique plus importante du mélange).

Par contre, on obtient des valeurs similaires aux bétons classiques lorsqu'on considère le rapport $E/(C+F)$ au lieu du rapport E/C où C et F sont respectivement le dosage en ciment et en filler.

La granulométrie du sable jouera également sur le besoin en eau : plus le sable est riche en éléments grossiers, plus la maniabilité s'améliore, ceci se traduit par une relation entre le module de finesse du sable et la maniabilité. (figure I.4)

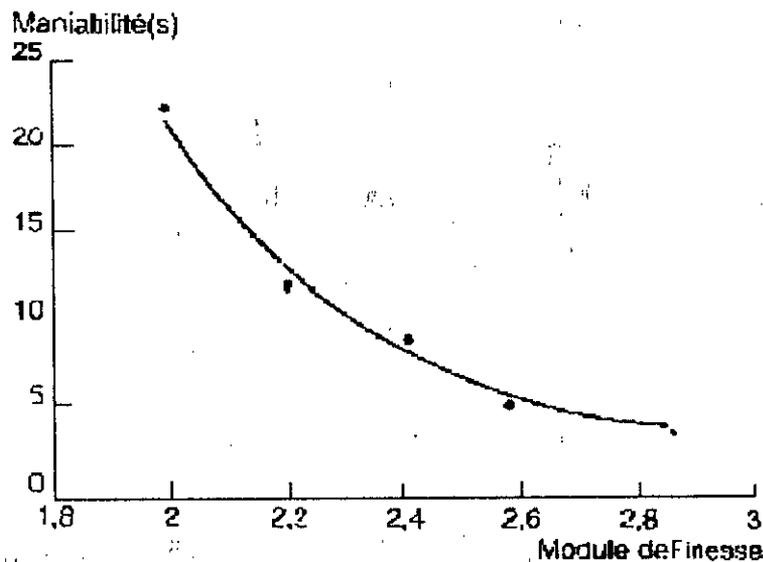


Figure I.4 : Relation entre maniabilité et module de finesse du sable[4]

L'augmentation de la teneur en fines (diminution du module de finesse) entraîne une augmentation du temps d'écoulement et donc une maniabilité moins bonne. Ce phénomène n'a pas un caractère systématique, il dépend de la nature des fines, telle que l'incorporation de fines de type sphérique devrait rendre l'eau plus efficace et donc améliorer la maniabilité.

La relation dosage en fines-maniabilité dépend aussi de la nature du sable et sa granulométrie. La figure (I.5) indique l'effet différent des fines calcaires sur un sable de dune et un sable alluvionnaire 0/4.

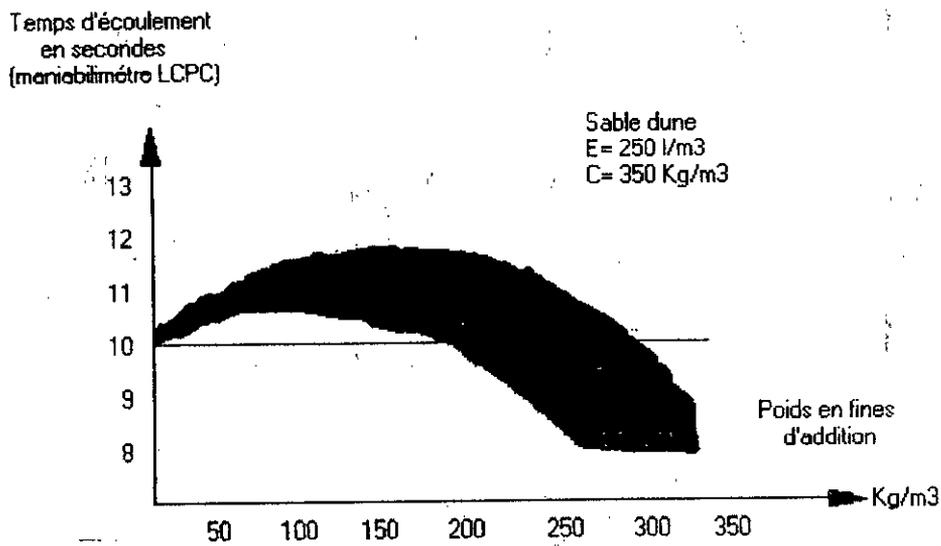
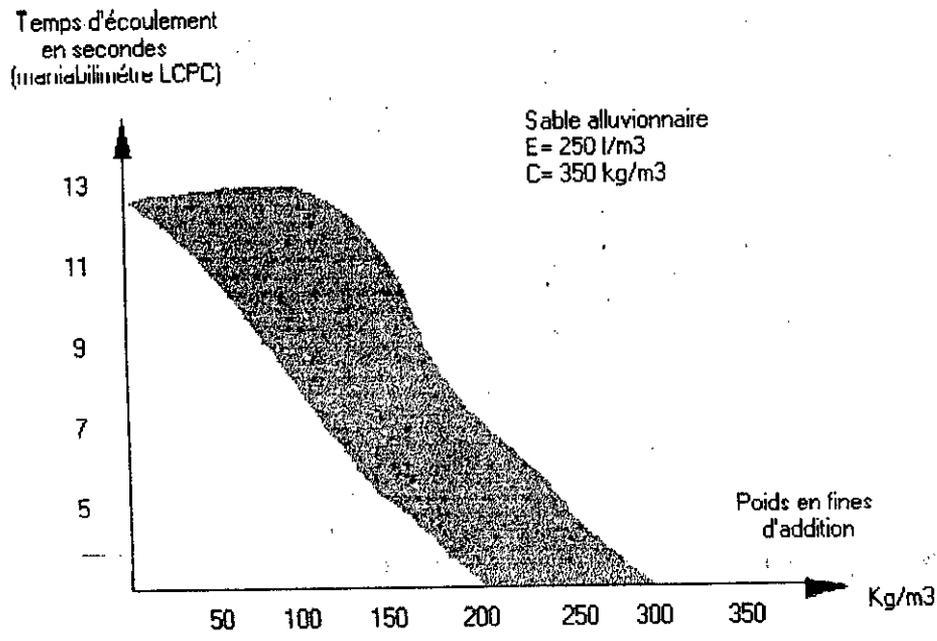


Figure I.5 : Influence de la nature du sable sur la maniabilité. [17]

Pour un sable de dune, l'ajout de fines jusqu'à 200 kg/m³ entraîne une chute de maniabilité ce qui n'est pas le cas pour le sable alluvionnaire 0/4.

I.3.2- Résistance-granulométrie :

Un béton de sable est caractérisé par sa résistance à la compression et à la traction. Pour un dosage en ciment fixe, cette résistance peut dépendre d'un certain nombre de paramètres tels que :

a-La finesse de l'addition :

Le gain en résistance est obtenu avec une addition fine qui, défloculée dans le mélange, augmente sa compacité. Ce résultat est valable quelle que soit la granulométrie et la nature du sable (sable dunaire, sable alluvionnaire,.....).

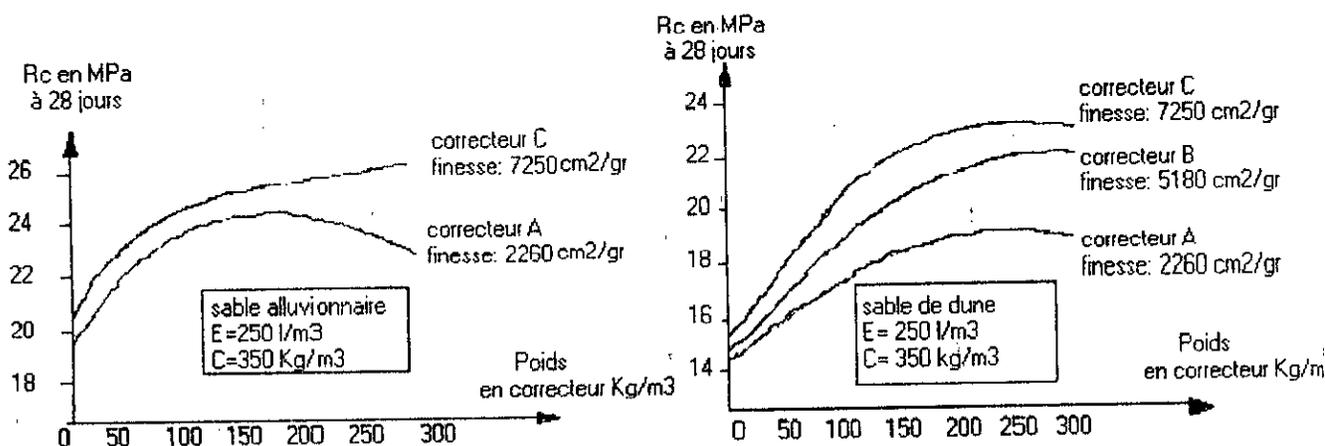


Figure I.6 : Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance.[17]

b-La nature de l'addition :

A même dosage, la nature de l'addition permet d'obtenir une diversité au niveau des performances des bétons de sable.(figure I.7).

Si on se fixe un rapport E/C égal à 0,75 la résistance à la compression varie de 30 MPa (sans addition) à 57 MPa (avec une addition donnant les valeurs les plus élevées).

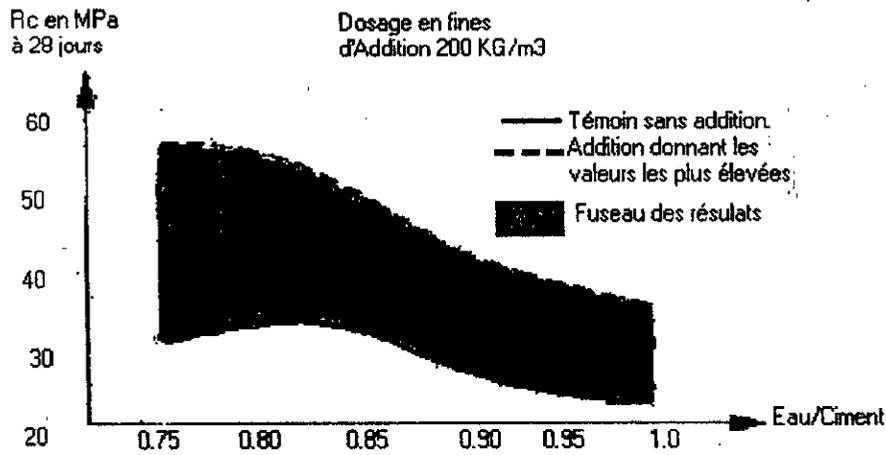


Figure I.7 : Influence de la nature de l'addition sur le niveau de résistance.[17]

Si l'on se place à maniabilité constante, les fillers les plus efficaces sont ceux qui, hydrauliquement actifs, entraînent une réduction d'eau.

c-Le diamètre du plus gros grain de sable :

Pour une même valeur du rapport E/C, on constate que l'effet du diamètre maximal du plus gros granulat est peu important et pas défavorable aux sables (figure I.8.a), le problème tient à la maniabilité qui est très différente selon les bétons : très maniable pour un 0/20mm et maniabilité de type préfabrication pour un sable 0/5mm.

A dosage similaire en ciment mais à rapport E/C différent, l'effet du diamètre maximal est important. Les maniabilités étant identiques, les sables nécessitent beaucoup plus d'eau ce qui entraîne une chute de résistance. L'emploi d'un plastifiant-réducteur d'eau permet de minimiser cette chute (figure I.8.b).

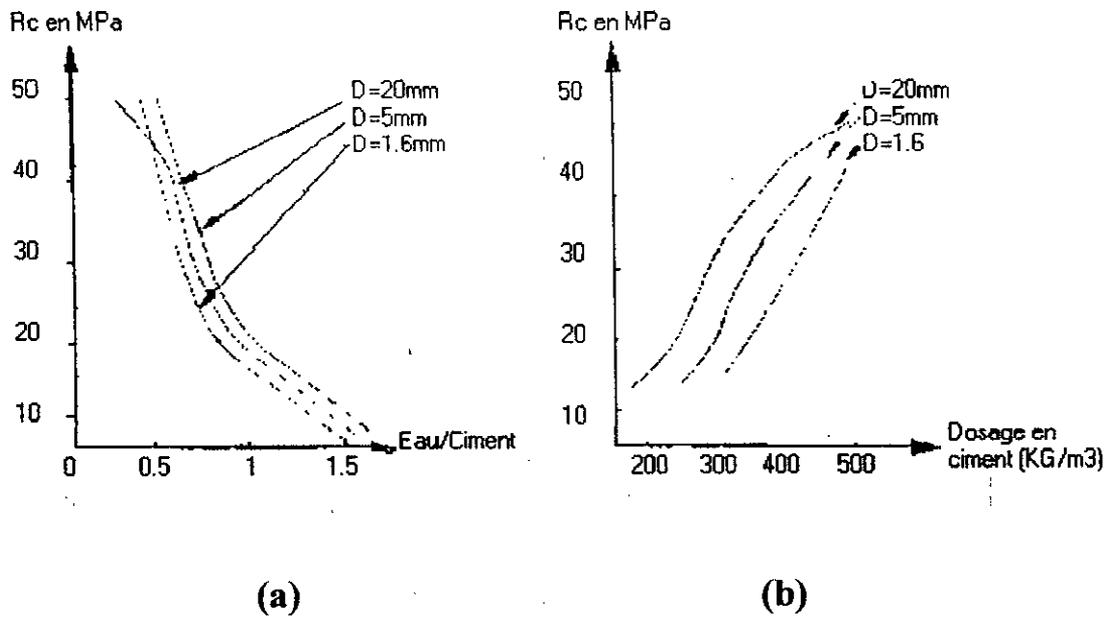


Figure I.8 : Effet de la granularité sur la résistance. [17]

I.4- Interaction armatures-béton de sable :

Une comparaison a été réalisée entre une formulation de béton de sable et un béton classique à l'aide d'un essai qui consiste à noyer une tige d'acier dans une éprouvette ($H=32\text{cm}$, $\varnothing=16\text{cm}$) et lui faire subir un effort de traction F à 28 jours.

On constate que le diamètre des aciers, la longueur d'ancrage et la nature de l'acier influent sur les efforts d'arrachement. [8]

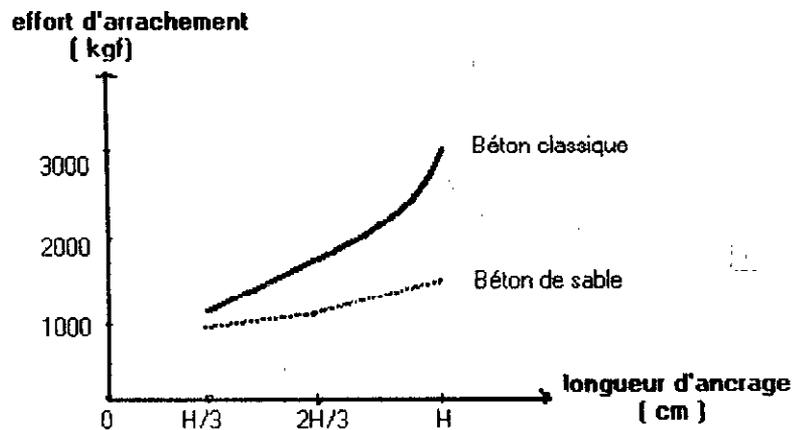


Figure I.9 : Effort d'arrachement en fonction de la longueur d'ancrage d'une tige lisse de diamètre $\varnothing = 10 \text{ mm}$. [8]

L'adhérence béton de sable-armatures reste dans le domaine de l'acceptable, mais elle n'est comparable à celle des bétons classiques que dans le cas des aciers à faibles diamètres (figure I.9).

La granularité du béton de sable n'est pas un élément essentiel, puisque, à même niveau de résistance, l'adhérence avec un sable dunaire homométrique a été supérieure à celle obtenue avec un sable alluvionnaire. [17]

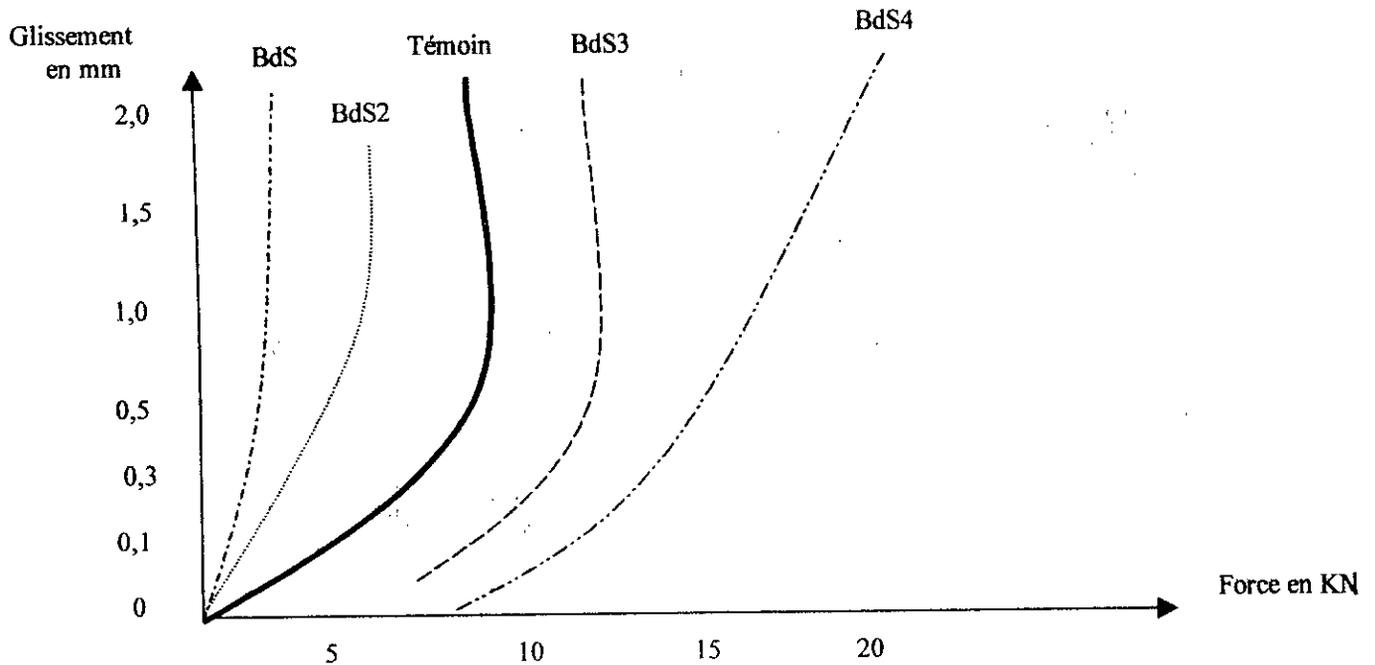


Figure I.10 : Variation de l'adhérence d'une armature en fonction de la formulation. [17]

I.5-Phénomène de ségrégation :

La ségrégation est définie comme la perte d'homogénéité d'un mélange à différents constituants. Les bétons de sable, caractérisés par leurs faibles étendues granulaires et donc par leur plus grande homogénéité, présentent un meilleur comportement que les bétons traditionnels vis-à-vis des phénomènes de ségrégation. Cette faculté a pu être mise en évidence à travers des expériences comparatives sur des bétons de sable et des bétons classiques équivalents, avec des plasticités et des modes de mise en œuvre variables.

I.6-Phénomène de ressuage :

Le ressuage est le résultat d'un tassement progressif du béton frais, sous l'effet de son poids propre, après la mise en place et avant le début de prise. Une floculation modérée maintient les grains fins dans un état instable où la porosité de l'assemblage est supérieure à celle qui résulterait des simples contacts géométriques. Chaque fois qu'une liaison d'origine électrique est momentanément rompue, le grain libéré tombe vers une position plus stable et, ainsi de suite, la porosité du béton frais diminue et, par conséquent, le volume apparent [1]. Un mélange de grains totalement défloculé, grâce à un superplastifiant, ne ressue pas au sens ainsi décrit. Par contre, les grains indépendants sont susceptibles de sédimenter, chacun pour son propre compte, si le rapport E/C est élevé.

I.7-Résistance au gel-dégel :

La résistance au gel est le pouvoir d'un matériau saturé d'eau de supporter le gel et le dégel alternatif, sans risque apparent de destruction ni perte sensible de résistance mécanique. Elle dépend de la densité et la porosité du mélange, du degré de saturation en eau et de la structure et dimension des pores qui est la plus importante.

L'altération due au gel du béton n'apparaît que lors des dégels, car la résistance mécanique (traction et compression) d'un béton complètement gelé est très supérieure à celle du béton avant que le gel se manifeste. [11]

C'est le cycle gel-dégel et l'état de fatigue qui s'ensuit (décollement des granulats de la pâte ou décollement des fers) qui causent le plus de dégâts. Il est par conséquent nécessaire de composer des bétons de sable à la fois avec le maximum de compacité et le minimum d'éléments fins et d'utiliser la technique du béton à entraînement d'air surtout si on associe à l'entraîneur d'air, un plastifiant et un accélérateur de prise.

I.8- Durabilité des bétons de sable :[17]

La durabilité d'un béton est définie comme étant le pouvoir de résister à l'action commune des facteurs atmosphériques et autres (variations de températures ou d'humidité, l'action du gel,.....).

Par convention, la durabilité d'un béton est reliée à ses capacités d'échange avec le milieu extérieur.

De ce fait, il est évident que les paramètres tels que porosité, organisation géométrique des pores et perméabilité sont des paramètres physiques de premier ordre de la durabilité. De même les phénomènes internes tels que l'alcali réaction ou l'attaque sulfatique différée sont aussi des processus d'altération du béton accélérés par les échanges hydrauliques avec le milieu extérieur. La tenue d'un béton vis-à-vis des phénomènes d'échange dépend aussi de l'environnement de celui-ci, raison pour laquelle l'estimation de la durabilité s'effectue généralement par un ou plusieurs essais selon l'environnement prévisible du matériau (milieu marin, montagneux, urbain,).

Ces essais de durabilité, dont le but est de qualifier le béton vis-à-vis des agressions physiques, physico-chimiques et chimiques qu'elles soient d'origine interne ou exogène, sont généralement des essais accélérés qui permettent d'obtenir rapidement des informations comparatives. D'une façon générale, les bétons de sable sont plus poreux que les bétons traditionnels ; s'ils ont davantage de vides, la taille et le nombre de ces vides se distinguent de ceux du béton traditionnel ; ils sont plus nombreux, plus petits et davantage monodimensionnels. Leur nombre plus élevé entraîne une probabilité de colmatage plus fréquente et plus aisée compte tenu de leur faible taille (figure I.11).

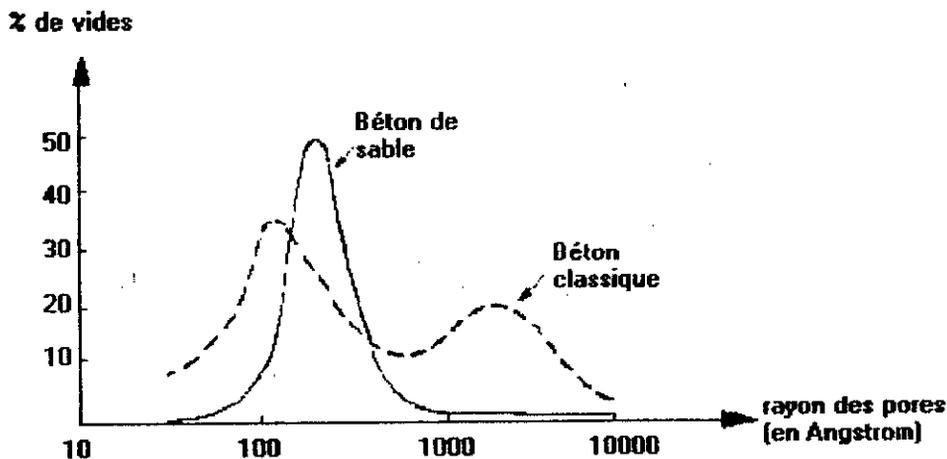


Figure I.11 : Courbe de distribution de la porosité en fonction du rayon des pores. [17]

I.9- Principaux essais sur béton de sable frais :

I.9.1-Malaxage :

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 : Que ce soit pour bétons de sable ou pour tout béton 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 (microbullage 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.

Une stabilité du mélange parfaitement homogénéisée, favorable non seulement au point de vue de la maniabilité mais aussi au point de vue résistance qui, après prise et durcissement, sera uniformément répartie dans toute la masse.

I.9.2- Serrage des bétons de sable :

Cette opération consiste à accroître la compacité du béton de sable frais et maintenir sa cohésion lors de sa mise en place. Plusieurs techniques peuvent être utilisées : damage, picage, compression et vibration. Cette dernière semble la plus efficace pour les bétons, elle s'effectue par la paroi des moules et des coffrages, et sert à diminuer le frottement interne entre grains eux-

mêmes, grains-paroi du moule et grains-armatures pour les bétons armés. Elle diminue la teneur en air et augmente la fluidité du béton, ce qui permet une mise en place facile.

I.9.3- Protection contre la dessiccation :

La dessiccation est l'action d'enlever au béton durci l'humidité qu'il renferme suite à un séchage naturel qui débute dès qu'une surface est soumise à une humidité relative externe inférieure à celle régnant dans le réseau poreux. Le flux d'humidité, qui entraîne une évaporation de l'eau à la surface (départ de l'eau vers l'extérieur), est induit par le déséquilibre d'humidité relative qui va engendrer une perte relative de masse et une apparition des micro-fissures à la surface du béton. La cure des surfaces du béton est réalisée soit par humidification, soit par application d'un produit de cure (adjuvant) ou d'une feuille de matière plastique.

I.9.4- La maniabilité :

La maniabilité d'un béton est une qualité aussi importante que sa compacité. Le choix d'un moyen de mesure de la maniabilité est la plupart du temps dicté par la particularité du mélange (c'est-à-dire le diamètre maximal des grains).

L'essai slump-test (ou affaissement au cône d'Abrams) ne peut pas être adopté pour la mesure de la maniabilité des bétons de sable, parce qu'il est destiné à tester les bétons dont la taille des gros granulats est, au minimum, égale à 15 mm. [3]

Pour une meilleure approche de cette qualité, la maniabilité des bétons de sable peut être mesurée par un appareil mis au point au Laboratoire des Ponts et Chaussées par LEZY et LESAGE :

Le béton est testé à l'aide de l'appareil LCPC, constitué par un récipient prismatique séparé par une cloison en deux volumes. L'essai consiste à mesurer en quel temps le béton frais, introduit dans le premier volume, arrive à un repère gravé dans la paroi du second volume du récipient et ceci après l'enlèvement de la cloison séparatrice et fonctionnement du vibreur fixé sur l'appareil (figure I.12).

Alors, le béton, sous l'action de la vibration s'écoule en un temps plus ou moins long dans le deuxième volume, suivant sa maniabilité. En fin de compte, c'est juste le temps d'écoulement

qu'il y a lieu de mesurer, car pratiquement, ce temps correspond au temps réel de mise en place du béton.

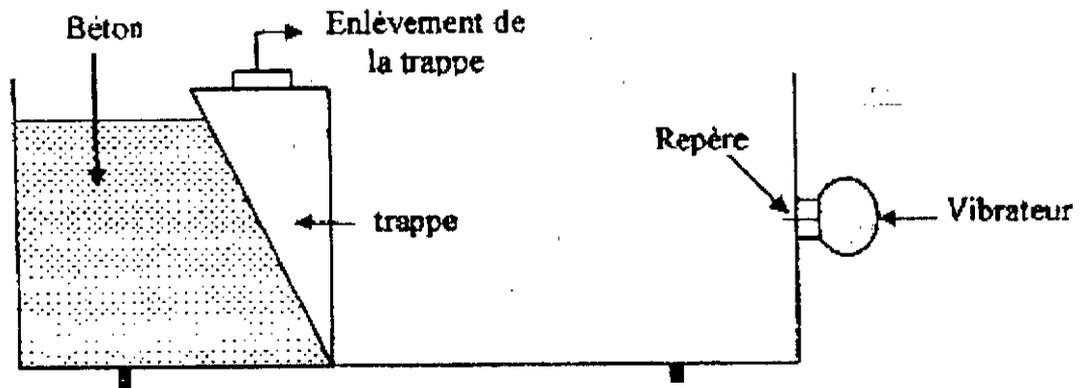


Figure I.12 : L'essai de maniabilité au maniabilimètre LCPC. [11]

I.9.5- Essai de prise :

Des phénomènes chimiques, physico-chimiques et mécaniques interviennent dans les premières heures qui suivent le gâchage. Leur manifestation la plus importante est la prise : c'est la propriété qu'ont les liants hydrauliques de passer d'une consistance fluide à une consistance solide quand ils sont associés à l'eau. Le temps de prise, qui est le temps écoulé entre la fin de gâchage et le début de prise, est mesuré à l'aide de l'aiguille de Vicat. On dit qu'il y a 'début de prise' lorsque l'aiguille n'est pas capable de transpercer la totalité de la pâte mais s'arrête au moins à 2,5 mm du fond du moule : des aiguilles d'ettringite apparues. [16]

La 'fin de prise' se situe au moment où l'aiguille de Vicat s'arrête à 2,5 mm du niveau supérieur, une faible quantité de l'anhydre a été hydratée et la résistance en compression continue à accroître au fur et à mesure que l'hydratation progresse.

I.9.6- Essai sur la masse volumique :

Effectuée sur du béton frais, la masse volumique est la masse d'un échantillon de ce béton occupant l'unité de volume, tous vides inclus.

Cette caractéristique est très importante, elle indique la qualité en terme de compacité et par conséquent en terme de résistance mécanique. Les mélanges dont la masse volumique est relativement grande ont des résistances élevées. La masse volumique des bétons de sable de dune varie autour de 2100 kg/m^3 [14], contre une masse volumique de 2500 kg/m^3 pour les bétons classiques.

I.10- Domaine d'emploi des bétons de sable :

La plupart des applications actuelles du béton de sable tiennent davantage à ses propriétés spécifiques, par rapport au béton traditionnel, qu'à l'économie qu'il pourrait représenter en remplaçant celui-ci. [5]

Pour ses qualités d'ouvrabilité (bon garnissage des moules, bon enrobage des aciers même en cas de ferrailage dense), son absence de ségrégation et principalement sans doute pour ses qualités d'aspect qui autorisent de séduisants effets architectoniques.

I.10.1-Les bétons non vibrés :

Ces bétons sont souvent des bétons fluides utilisés notamment, lorsque la vibration est impossible, pour la fabrication des pieux forés et la réalisation de dallages autocompactants ou autonivelants.

I.10.2-Les bétons projetés :

Ils se sont révélés particulièrement intéressants, techniquement et économiquement et se prêtent au renforcement de structure par projection, exemple :

- La réhabilitation de collecteurs d'assainissement.
- La stabilisation de parois ou talus.

I.10.3-Les travaux d'injection :

A cause de sa petite granularité et sa maniabilité, le béton de sable est favorable aux techniques de reprise en sous-œuvre par injection ou coulage gravitaire :

- le comblement de cavités.
- la réparation de fondation et renforcement d'ouvrages portuaires.

I.10.4-La préfabrication d'éléments destinés à rester apparents :

Le souci esthétique est de plus en plus pris en compte dans toutes les constructions ; les bétons de sable permettent la réalisation d'effets architectoniques tant sur la forme que sur l'aspect.

I.11- Désignation d'un béton de sable :

La désignation abrégée dans laquelle le symbole «**BS**» signifie «béton de sable» respecte toutes les spécifications des caractères normalisés et les éventuels caractères complémentaires définis à la commande ; ce symbole est suivi d'une classe de résistance caractéristique en MPa et de classe d'ouvrabilité.

Pour un béton de sable chargé, la granularité de la charge n'est indiquée qu'en caractère complémentaire. On a par exemple :

- **BS 15- TP – NA- CPJ45** : Désigne un béton de sable sans gravillon, de classe de résistance 15 MPa, de consistance très plastique, non armé et confectionné avec un ciment de type et de nature CPJ 45.
- **BS 25 3/8- FL- BA** : désigne un béton de sable chargé par un granulat 3/8, de classe de résistance 25 MPa, de consistance fluide, béton armé.

Chapitre II : Méthodes de formulation des bétons de sable

II.1- Introduction :

La formulation des bétons consiste à trouver les proportions des différents constituants répondant à des critères techniques et économiques.

Nous présentons dans ce chapitre deux types d'approche de formulation :

- Une approche théorique basée sur l'optimisation de la compacité du squelette granulaire et qui constitue une base de formulation des bétons de sable.

- Une approche expérimentale basée sur la réalisation de gâchées successives.

II.2- Approche théorique de la formulation des bétons de sable : [17]

II.2.1- La compacité et les méthodes de formulation des bétons :

Les granulats d'un béton jouent le rôle d'ossature, dans laquelle la pâte assure dans un premier temps un rôle rhéologique (cohésion, fluidité) puis un rôle de colle permettant de développer les propriétés mécaniques et de durabilité du béton durci.

La formulation d'un béton classique consiste à optimiser son squelette granulaire, par un choix judicieux de la proportion de sable et de gravillons, puis à combler la porosité de cet empilement avec la pâte (ciment+eau) afin d'obtenir l'ouvrabilité désirée. Cette pâte est déterminée par le rapport eau/ciment pour viser une résistance et une durabilité données.

Le problème de la formulation d'un béton se pose alors en terme d'optimisation de la compacité du squelette granulaire. La compacité est définie comme le rapport du volume des grains solides sur le volume total et correspond au complément à l'unité de la porosité.

CACQUOT a pu, au début du 20ème siècle, établir à partir des résultats expérimentaux, une relation mathématique donnant le volume des vides (V) d'un mélange granulaire en fonction de son étendue granulaire (d/D) :

$$V=V_0 (d/D)^{0,2} \dots\dots\dots(1)$$

tel que :

V_0 : constante expérimentale qui prend une valeur de l'ordre de 0,5

D : diamètre correspondant à la dimension du tamis retenant 10% du granulat

d : diamètre correspondant à la dimension du tamis retenant 90% du granulat

Cette formule sous-entend que le mélange défini par son étendue granulaire est optimisé, c'est-à-dire que la répartition des grains à l'intérieur de cette étendue est telle que le mélange présente une porosité minimale. Plusieurs méthodes de formulation des bétons consistent à définir une courbe granulaire de référence telles que les méthodes de Bolomey, Faury, Dreux, ...etc, sont basées sur cette formule.

Le sable, le ciment ainsi que les fines d'addition sont les éléments solide d'un béton de sable. Les fines d'addition (filler, cendres volantes...) étant de dimensions voisines de celles du ciment, alors il faut adapter la démarche de formulation pour ces bétons en repartant principalement de la formule de Cacquot car l'application directe des méthodes de formulation adaptées aux bétons ordinaires conduit généralement à des estimations du dosage des constituants aberrantes.

II.2.2- Estimation du dosage en fines d'un béton de sable :

Dans un premier temps, il convient d'optimiser la compacité des constituants solides du béton de sable. Pour ce faire, les constituants sont séparés en deux fractions, le sable couvrant l'étendue granulaire $80\mu\text{m}/D$ (D est le diamètre maximal du sable) et les fines regroupant l'ensemble des grains de tailles inférieures à $80\mu\text{m}$.

Le ciment, la fine d'addition ainsi que la fraction du sable inférieur à $80\mu\text{m}$ constituent les fines. Il est à noter que les additions comportant des grains de taille supérieure à $80\mu\text{m}$ sont intégrées au sable .

En définissant l'étendue granulaire par les dimensions extrêmes du granulat, des valeurs de l'ordre de 0,7 à 0,8 pour la constante expérimentale permettent d'obtenir une bonne estimation de la porosité (PS) du mélange granulaire :

$$PS = 0,75(0,08/D)^{0,2} \quad (\text{en \% volumique}) \dots\dots(2)$$

Le dosage volumique optimal en fines cherchera à combler cette porosité afin d'optimiser la compacité du mélange. A ce niveau, les fines complètent l'étendue granulaire du squelette que l'on peut considérer comme borné inférieurement par la coupure à 80µm. En effet, il est impossible de prendre en compte la distribution de la taille des particules pour ces fines, l'assemblage géométrique relevant surtout de forces électriques intergranulaires.

Moyennant quelques hypothèses simplificatrices, en désignant par [fines] le volume de l'ensemble des particules inférieures à 80µm et [V] le volume de vides associé à l'empilement de ces fines, Caquot a obtenu le résultat suivant :

$$[\text{Fines}] = [V] \dots\dots\dots(3)$$

Ainsi, le dosage volumique optimal en fines s'écrit, en combinant (2) et (3) :

$$[\text{Fines}] = 0,38 (0,08/D)^{0,2} \quad (\text{en \% volumique}) \dots\dots(4)$$

Il est clair que la constante 0,38 n'a pas ici de caractère absolu mais relatif, une précision de ±10% est tout à fait raisonnable.

Cette formule montre que le dosage en fines dépend surtout de la dimension du plus gros granulat (D). Plus le diamètre D diminue, plus le dosage en fines augmente et devient rapidement excessif en terme de ciment seul.

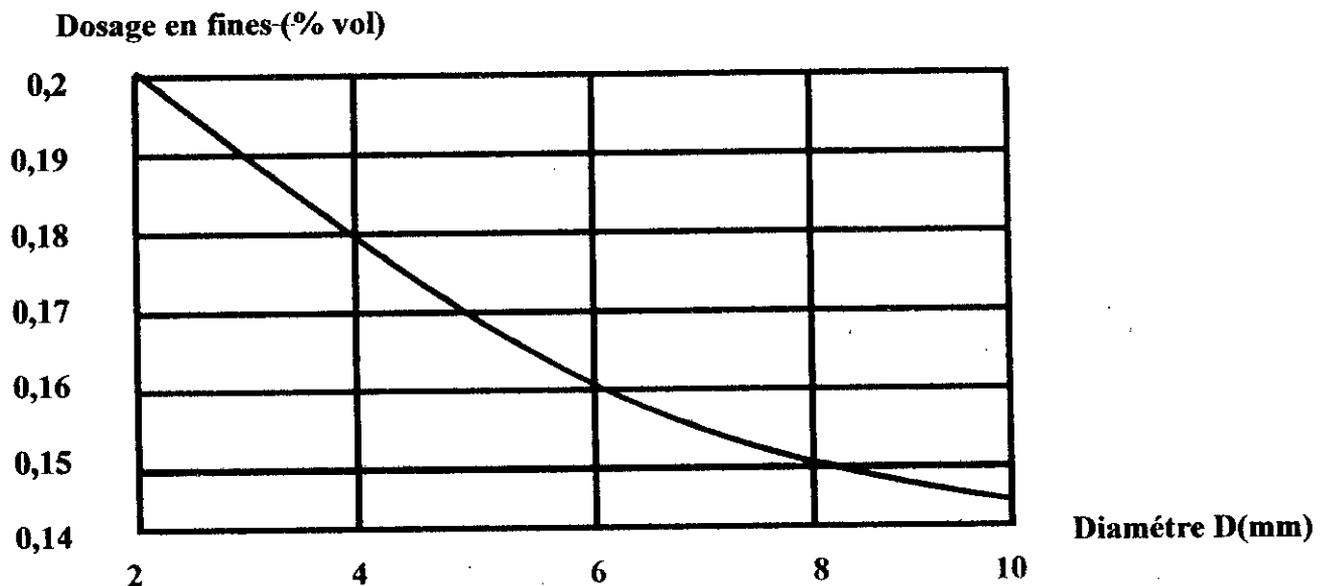


Figure II.1 : Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines [17]

II.2.3- Porosité et dosage en eau d'un béton de sable :

Malgré une optimisation du squelette granulaire, une certaine porosité est toujours présente. Dans des conditions de mise en œuvre données, cette compacité optimale, conduisant à une porosité minimale, ne sera atteinte que si la consistance le permet.

Sachant que la porosité d'un mélange granulaire est la somme d'un volume d'eau (e) et d'un volume d'air (vides piégés) (v), la porosité minimale théorique du béton est donnée par la relation suivante :

$$(e+v)_{\min}=(ps)_{\min}=0,8(d/D)^{0,2} \dots\dots\dots(5)$$

Le calcul de la porosité minimale requiert la valeur de "d", borne inférieure de l'étendue granulaire. L'estimation de cette valeur est délicate, compte tenu des effets de floculation dans l'eau qui peuvent se produire à l'échelle des fines particules. Ainsi, dans le cas de mélange totalement défloculé, 'd' peut être défini comme la moyenne harmonique de la dimension des grains du constituant le plus fin. Alors, le diamètre moyen des grains, assimilés à des sphères, est donné par la formule suivante :

$$d = 60/f.\rho \text{ (en mm).....(6)}$$

avec:

f: la surface spécifique du constituant (finesse Blaine exprimée en cm²/g)

ρ : la densité du constituant exprimée en g/cm³

Cette définition de 'd' n'est valable que dans le cas des mélanges défloculés, c'est-à-dire que chaque particule élémentaire agit indépendamment des autres.

Dans la pratique, cette défloculation ne peut être obtenue que par le recours à des agents défloculants, classiquement des adjuvants superplastifiants ou fluidifiants. Cette définition de 'd' ne peut pas être retenue pour les mélanges floculés, la dimension moyenne des floes étant alors la limite inférieure de l'étendue granulaire.

Il devient dans ce cas impossible de fixer une valeur précise, la dimension des floes relevant de considérations physico-chimiques très complexes.

Un ordre de grandeur peut être avancé de l'ordre de 20 à 25 μm pour le diamètre. Ainsi, il est clair que la défloculation, par l'élargissement de l'étendue granulaire, est le seul recours pour la réduction de la porosité minimale théorique. (figure II.2)

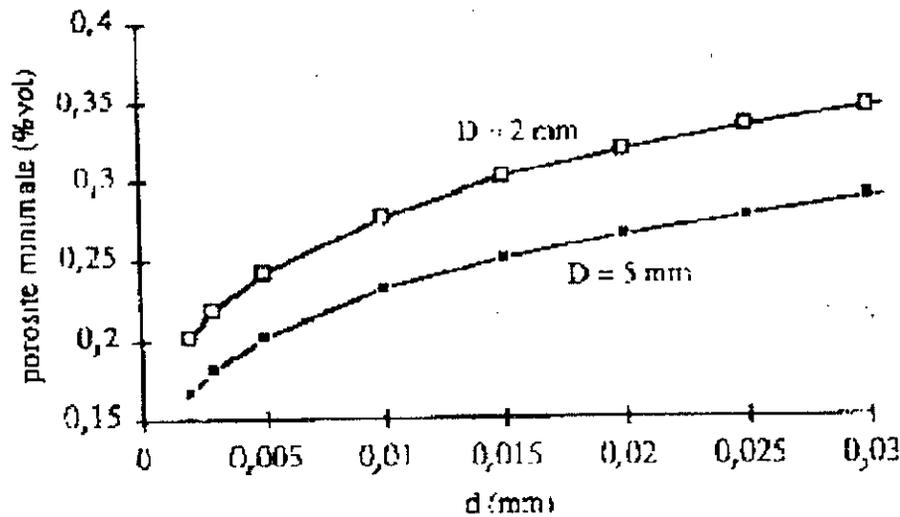


Figure II.2 : Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles D de sable. [17]

En pratique, il est toujours souhaitable de produire des bétons ayant une stricte quantité d'eau correspondant à la porosité minimale pour des raisons d'ouvrabilité. D'après la figure (II.3), pour des quantités d'eau inférieures à la quantité d'eau permettant d'obtenir l'ouvrabilité optimale (ouv. opt.), le mélange piègera une forte quantité d'air, quels que soient les moyens de serrage utilisés, et présentera finalement une porosité $(e+v)$ supérieure à $(e+v)_{\min}$.

Par contre, si l'on augmente la quantité d'eau à partir de la valeur conduisant à $(e+v)_{\min}$, la quantité d'air piégée sera stable et l'ouvrabilité augmentera de façon linéaire.

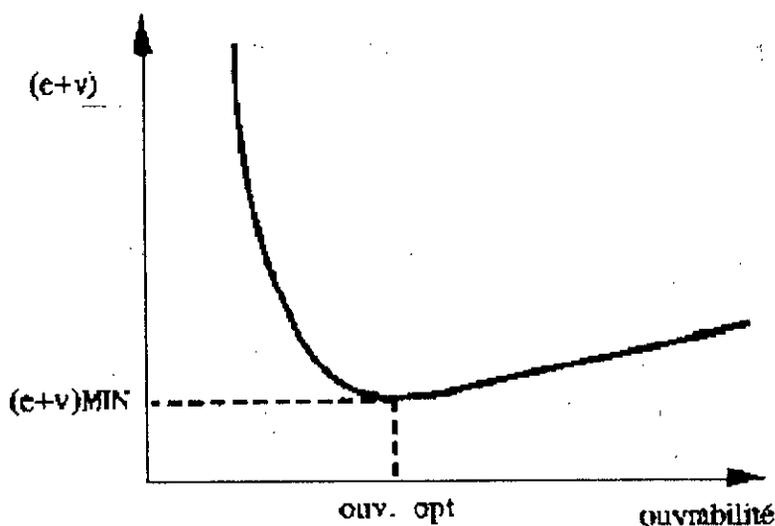


Figure II.3 : Relation entre l'ouvrabilité et le dosage $(e+v)$ d'une matrice pour une mise en œuvre donnée. [17]

Il est donc fondamental de bien estimer la quantité d'eau nécessaire pour atteindre l'optimum de compacité du béton. Par suite, par sécurité, il sera préférable de mettre en œuvre un dosage en eau légèrement supérieur au dosage théorique obtenu au minimum de porosité.

II.2.4- Estimation de l'air occlus :

Il faut préalablement évaluer la quantité d'air piégée pour bien estimer la quantité d'eau utilisée. Dans le cas des bétons de sable, l'air occlus (piégé) est légèrement supérieur à ce qu'il est dans les bétons classiques. Un ordre de grandeur peut être obtenu par la formule suivante, qui conduit à des teneurs en air de l'ordre de 3 à 5%.

$$[\text{Vides}] = k[\text{eau}] \quad (\text{exprimé en l/m}^3) \dots\dots\dots(7)$$

avec :

K : compris entre 0,2 et 0,25.

II.2.5- Evaluation du dosage en sable :

Le dosage en sable s'obtient par complément au mètre cube de la somme des dosages des constituants : fines, air occlus et eau. Cela se traduit par l'expression suivante :

$$[\text{sable}] = 1000 - [\text{fines}] - [\text{air}] - [\text{eau}] \quad (\text{exprimée en l/m}^3) \dots\dots(8)$$

Il est à noter que dans le cadre de cette formulation théorique, le sable est considéré dans un état saturé, superficiellement sec.

Remarque :

Dans une démarche de formulation, le dosage en eau conditionne de façon majeure l'ouvrabilité du béton, en couplage avec la présence ou non d'adjuvants rhéologiques. En suivant les règles de formulation précédentes, basées sur une optimisation complète de la compacité, les bétons de sable doivent présenter une bonne ouvrabilité, de l'ordre de 7 à 10 secondes au maniabilimètre à mortier LCL.

II.2.6- Estimation de la résistance en compression :

Après avoir fixé les dosages des différents constituants du béton de sable : [fines (ciment+addition), eau, sable] pour atteindre une compacité optimale, il faut évaluer la résistance en compression de ce mélange.

Cette estimation se fait par référence aux méthodes classiques adoptées pour les matrices cimentaires qui consistent à partitionner la contribution du squelette granulaire, de la nature du liant et des dosages des constituants de la pâte. Dans le cas des bétons formulés avec une fine potentiellement réactive, une généralisation de la formule Feret a été proposée récemment :

$$R_b = K_f R_c / [1 + 3,1(e+v) / C (1 + K_1 + K_2)]^2 \dots\dots\dots(9)$$

Avec :

R_b : résistance du béton à 28 jours (exprimée en MPa)

R_c : classe vraie du ciment (MPa)

K_f : coefficient granulaire (ordre de grandeur 4,5 à 5)

C : dosage en ciment (Kg/m^3)

$(e+v)$: porosité du mélange en (l/m^3) (eau totale+ air piégé)

K_1 : coefficient pouzzolanique qui est inférieur ou égal à 0,5.

K_2 : coefficient d'activité du filler calcaire strictement inférieur à 0,2.

tels que : $K_1 = K_{cv} CV/C + K_{fs} FS/C \dots\dots\dots(10)$

$$0,2 < K_{cv} < 0,4$$

$$2 < K_{fs} < 3,3$$

$$K_2 = K_{fil} \frac{Fil}{C} \dots\dots\dots(11)$$

$$0 < K_{fil} < 0,4$$

CV, FS, FIL : sont respectivement le dosage en cendres volantes, fumées de silice et filler calcaire (en kg/m^3).

K_{CV} , K_{fs} , K_{fil} : sont les coefficients d'équivalence en ciment des différentes additions en fines.

Cette formule permet de prendre en compte l'activité pouzzolanique des additions telles que les cendres volantes ou les fumées de silice et l'activité des fillers calcaires au niveau des résistances en compression.

Une identification précise de l'activité des additions par le biais des coefficients K_{CV} , K_{fs} , K_{fi} nous permet de bien utiliser cette formule.

Il est à noter que d'autres additions peuvent être utilisées telles que les fillers siliceux, généralement considérés inertes et les fillers de laitier moulu qui peuvent présenter un caractère hydraulique non pris en compte dans la formule précédente.

II.3- Approche expérimentale de formulation : [17]

II.3.1- Présentation de l'approche :

La méthode expérimentale, doit permettre de formuler un béton de sable mais son but n'est pas d'expliquer ou de formaliser les phénomènes qui entrent en jeu dans la formulation des bétons.

D'autres méthodes existent, elles peuvent différer en fonction des approches théoriques et des habitudes de travail, toute fois, l'objectif est le même : formuler un béton qui soit le plus compact possible en accord avec les caractéristiques recherchées et qui ait de bonnes performances. Cette méthode est une adaptation de la méthode dite BARON-LESAGE, elle est itérative et basée sur la réalisation de gâchées légères. Les gâchées sont caractérisées par des mesures de la maniabilité, au maniabilimètre à mortier LCL et de la masse volumique apparente. Différentes formulations de bétons de sable ont déjà été réalisées par cette méthode : bétons de pieux, bétons routiers, bétons de projection ...etc.

Dans cette approche expérimentale, on fixe le dosage en ciment de manière à mieux répondre aux prescriptions contractuelles ou normatives qui imposent bien souvent un dosage minimum.

II.3.2- Les différentes étapes de la formulation :

II.3.2.1- détermination d'une formule de base (sans fines d'addition) :

Dans cette partie, il faut se pencher sur la détermination d'une formule de un mètre cube constitué de ciment, d'eau, de sable et d'adjuvant, ayant une maniabilité de 7 à 10

seconds au maniabilimètre à mortier LCL ; cette consistance correspond au temps d'écoulement d'un mortier normal au sens de la norme NF EN 196-1.

- dosage en ciment :

Les prescriptions contractuelles ou normatives imposent très souvent un dosage minimum en ciment par mètre cube de béton en fonction de la composition du béton et l'usage auquel il est destiné. Il convient de rappeler qu'on travaillera à dosage en ciment fixé qui ne varie pas tout au long de l'étude, et noté C (kg/m³).

- dosage en eau :

A ce stade de la méthode, une valeur approximative du dosage en eau, E (l/m³) suffit. L'estimation de ce dosage est obtenue à partir de l'expérience. A titre indicatif, on peut prendre 220 l d'eau pour 350 kg de ciment, 250 l d'eau pour 400 kg de ciment.

On peut évaluer, à partir de l'approche théorique de formulation, le dosage en eau en fonction de la porosité du squelette granulaire :

$$E = (d/D)^{0,2} \cdot 800/(1+\alpha)$$

Avec :

α : compris entre 0,1 et 0,15

d : la borne inférieure de la phase solide du béton (mm)

D : la borne supérieure de l'étendue granulaire du sable (mm)

La valeur de 'd' est obtenue pour un mélange défloculé par l'utilisation d'un adjuvant par la formule :

$$d = 60 / (f \cdot p)$$

Avec :

f : la finesse Blaine du ciment (cm²/g)

P : la masse volumique du ciment (g/cm³)

Si le mélange n'est pas défloculé, alors il faut prendre pour 'd' une estimation de la dimension des floccs entre 20µm et 25 µm.

Cette estimation du dosage sera ajustée, par la suite, de manière à obtenir une formule de base sans fines ayant une maniabilité comprise entre 7 et 10 secondes.

- Détermination du dosage en adjuvant et en air occlus-

Il faut introduire dans cette formule un fluidifiant réducteur d'eau, au dosage normal préconisé par le fabricant (N% du poids des éléments inférieurs à 80µm en extrait sec), qui permettra de défloculer les fines.

D'autres part, un béton contient toujours un volume d'air noté V_{air} . La teneur en air des bétons classiques est de l'ordre de 3% en volume, cette valeur est comprise entre 5 et 7 % pour les bétons de sable.

- Détermination du dosage en sable :

Après avoir déterminé les quantités de ciment, d'eau, d'adjuvant et d'air, nous devons compléter la formule par du sable de manière à obtenir un mètre cube de béton. Ce qui donne la relation en volumes :

$$V_{\text{sable}} = 1000 - (V_c + V_e + V_{air} + V_{adj}) \quad (\text{en litre})$$

Connaissant la masse volumique de chaque constituant, on pourra évaluer la masse de sable utilisée, noté S (kg/m^3).

- Réglage de la maniabilité et du rendement de la formule :

Il s'agit là de mesurer le temps d'écoulement 't' au maniabilimètre à mortier LCL d'une gachée ainsi formulée, et déterminer la masse volumique apparente réelle du béton (MVAR).

On veut obtenir un temps d'écoulement de 7 à 10 secondes et faire tendre la masse volumique apparente théorique (MVAT), qui est la somme des masses de chacun des constituants ciment (C), sable (S), eau (e), adjuvant (C x N%), vers la masse volumique apparente réelle.

La formule de béton doit alors être corrigée à l'aide de l'équation itérative suivante :

$$S_i = S_{i-1} - (MAVT_{i-1} - MVAR_{i-1}) \pm V \times MV_{\text{sable}}$$

Avec :

V : volume d'eau en litre.

MV_{sable} : masse volumique du sable.

- Remarque :

Si le temps d'écoulement au maniabilimètre est inférieur à 7 secondes, il faut retrancher un volume d'eau (+V dans l'équation itérative) ; si le temps d'écoulement est supérieur à 10 secondes, alors on rajoute un volume d'eau (- V dans l'équation itérative).

Après chaque correction, on compare la masse volumique apparente théorique à la masse volumique apparente réelle.

II.3.2.2-Détermination du dosage en fines d'addition :

Il faut maintenant introduire dans le mélange les fines d'addition et en définir le dosage optimal, à rapport E/C (eau/ciment) équivalent. Pour cela, il est nécessaire de réaliser des gachées de bétons de sable avec 5 à 6 dosages en fines dans la plage d'emploi usuelle de ces fines. L'incorporation des fines doit permettre d'augmenter la compacité du béton, en remplissant les vides sans changement de volume ($MVAR = MVAT$). Pour chaque gachée, on détermine la maniabilité ainsi que la masse volumique apparente réelle ($MVAR$) que l'on compare à la masse volumique apparente théorique ($MVAT$) de la formule.

Si besoin, la correction sur le sable s'effectue à l'aide de la formule suivante :

$$S_i = S_{i-1} - (MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1})$$

jusqu'à obtenir l'égalité entre les deux masses volumiques apparentes.

- Résistance :

Les résistances sont obtenues à partir des essais mécaniques. Elles peuvent être modifiées en jouant sur le dosage en eau et/ou adjuvant pour un dosage en ciment donné. Sinon on refait l'étude à partir d'un ciment différent pour atteindre les résistances souhaitées.

II.4-Conclusion :

Le problème de la formulation des bétons de sable a été abordé en repartant de la base, à savoir optimiser la compacité du béton et estimer ensuite ses performances potentielles. La méthode théorique de formulation se révèle relativement simple et performante mais, bien sûr, présente des limitations du fait des nombreuses hypothèses qui la jalonnent. Elle doit être validée et ajustée expérimentalement.

Ainsi une méthode expérimentale de formulation conduit à réaliser un nombre de gachées important. Ce dernier peut être réduit par un recours préalable à une approche théorique.

Chapitre III : Correction granulométrique des bétons de sable

III.1- Introduction :

Le sable constitue la plus grande quantité du squelette granulaire des bétons de sable (environ 70%). Il arrive que certains critères relatifs aux sables tels que la granulométrie, l'angularité n'assurent pas aux mélanges composés les objectifs recherchés notamment une compacité aussi optimale que possible qui qualifie les bétons de sable à l'utilisation dans les domaines de la construction. Pour cela, on procède à une correction granulométrique soit par l'apport d'un sable concassé ou naturel en visant une granulométrie aussi étalée et continue que possible, soit par l'ajout de gravillons en faibles quantités pour réduire d'un côté le dosage en ciment et bénéficier d'un autre côté de certaines caractéristiques notamment le fluage.

Il est à noter que, les deux matériaux (sable concassé, gravillon) peuvent être ajoutés simultanément pour aboutir à des résultats plus intéressants et améliorer les performances des bétons de sable.

III.2- Correction par l'apport d'un sable concassé :

Ce matériau qui est très souvent l'excédant de production d'une carrière ou d'une ballastière, de gros granulats (gravillons et graviers) peut être l'élément constitutif du squelette des bétons de sable [19], ou bien utilisé (en proportions définies) simultanément avec un autre sable pour corriger certaines de ses propriétés incomplètes.

La correction peut être effectuée sur un sable pauvre en fines (moins de 10%) par l'apport d'un sable broyé de granularité 0/2 mm ou 0/5 mm contenant jusqu'à 30% de fines ; les caractéristiques de ce sable peuvent être adaptées et doivent être définies selon la nature du sable corrigé afin de déterminer le dosage en sable correcteur.

Les sables mal gradués peuvent être aussi corrigés par un sable concassé. C'est le cas des sables provenant de l'écrêtage de graves naturelles, qui sont un mélange de sable roulé 0/6,3mm et de gravillons de tailles moyennes (10 à 30 mm) en faibles proportions.

III.3- Correction par l'ajout de gravillons :

III.3.1- Spécifications des gravillons pour bétons hydrauliques :

Les gravillons sont utilisés dans les bétons hydrauliques comme éléments d'ossature destinés à donner plus de compacité à l'ensemble.

III.3.1.a- Forme des gravillons :

La forme des grains est un élément important au point de vue des caractéristiques d'utilisation. On distingue trois formes principales :

- les gravillons cubiques (ou cuboïdes), à forme ramassé.
- les gravillons en plaquettes.
- les gravillons en aiguilles.

Les gravillons destinés aux bétons hydrauliques peuvent être arrondis ou anguleux, ils ne doivent pas contenir d'éléments de forme défectueuse (forme en plaquettes ou aiguilles).

Il est à noter que les granulats roulés sont plus recherchés pour les bétons hydrauliques parce qu'ils donnent des produits plus maniables et un meilleur arrangement des grains, surtout dans le béton armé. [11]

Or, une mauvaise forme nuit à la maniabilité, ce qui risque d'être compensé par un accroissement du dosage en eau, et favorise la ségrégation et l'apparition des défauts d'aspects.

Pratiquement, la forme des grains est jugée à partir d'une mesure de la quantité d'éléments plats et allongés, il s'agit d'un coefficient dit coefficient d'aplatissement des gravillons. D'après les spécifications normatives sur les gravillons pour bétons hydrauliques, la valeur de ce coefficient est inférieure à 34%. [1]

III.3.1.b- Propreté des gravillons :

Les gravillons, destinés à la fabrication des bétons, doivent être rigoureusement propres. Ils doivent être dépourvus de gangue superficielle, même d'une pellicule argileuse ou d'une farine minérale pouvant nuire à l'adhérence des grains avec la pâte du ciment.

Aucune poussière ou matière étrangère ne doit former un film continu à moins que ce film ne favorise l'adhésivité, or, une poussière du matériau lui même (filler) n'est pas

indifférente, mais peut être tolérée, si sa quantité est faible et si elle ne provient pas d'éléments altérés (exemple, altération par kaolinisation du feldspath).

Il existe des impuretés qui ne s'éliminent ni par lavage à l'eau, ni au tamisage, ni par frottement sec ; il s'agit des impuretés colloïdales, de nature humique ou argileuse, qui sont adsorbées en surface (granite kaolinisé par exemple).

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.

III.3.1.c- Adhérence des gravillons :

La propriété des gravillons n'est nullement une condition suffisante pour une bonne adhérence, cette dernière dépend aussi de l'affinité des grains pour les liants hydrauliques (ciment) qui varie avec la nature, la composition, l'origine et l'altération éventuelle des roches, d'où sont tirés les gravillons.

Elle dépend partiellement du grain de la surface et de sa rugosité, mais beaucoup aussi à la fraîcheur de la cassure et, bien entendu, de sa nature chimique eu égard à la composition chimique du liant.

Pour le béton de ciment, l'adhérence dépend aussi de l'affinité, généralement chimique, de la paroi des grains pour les produits d'hydratation du ciment, alors la liaison est d'ordre "épitaxiale" à l'interface : c'est le cas, par exemple, des sables de laitier granulé, qui donnent plus rapidement une adhérence meilleure si la surface des grains a été décapée par attrition.[11]

III.3.1.d- Cohésion et dureté des gravillons :

La cohésion des gravillons est étudiée en général par des essais de résistance à la compression des roches d'où sont tirés ces agrégats.

Pour les bétons hydrauliques, il n'est pas indispensable que les gravillons soient beaucoup plus résistants à l'écrasement que le mortier à base de ciment.

On se contente d'éliminer, à priori, des éléments réputés trop tendres par leur nature ou leur origine, mais cette méthode qualitative n'est pas toujours sûre. Certains granites à gros grains par exemple donnent souvent des résistances insuffisantes, alors que certains calcaires durs ne sont pas à dédaigner.

La dureté des gravillons est liée, à la fois à leur résistance à la compression et à l'angle de frottement interne de la pierre. L'usure par frottement dépend de la dureté des

matériaux. Cette propriété est d'une grande importance pour le traitement d'un matériau, surtout si celui-ci est utilisé pour les planchers ou les revêtement routiers.

III.3.2- Principaux essais sur gravillons :

Lors de la fabrication du béton, le malaxage est source de frottements intenses entre grains. Si ceux-ci ne sont pas assez résistants, ils peuvent se casser en produisant des éléments de forme défectueuse. Il est alors nécessaire de procéder à des essais de résistance aux chocs et de résistance à l'usure qui sont les plus importants essais sur gravillons pour les bétons hydrauliques.

III.3.2.1- Résistance à l'usure :

Cette résistance est caractérisée par l'essai micro-Deval. Il consiste à mesurer dans des conditions normalisées l'usure des granulats produite par frottement mutuel, en présence d'eau et d'une charge abrasive.

L'opération consiste à introduire dans un cylindre standard 500 grammes de gravillons, après avoir rajouté une charge abrasive et une quantité d'eau, le cylindre se met en rotation à l'aide d'un dispositif électrique, tout en effectuant 12000 tours pendant deux heures. Le refus au tamis 1,6 mm est étuvé à 105°C jusqu'à l'obtention d'une masse sèche constante, notée M (exprimée en grammes). La résistance à l'usure s'exprime par le coefficient micro-Deval noté MD :

$$MD = 100 * [(500-M) / 500]$$

Ce résultat, est un nombre sans dimension et correspond soit au coefficient micro-Deval sec (MDs) soit au coefficient micro-Deval humide (MDe). On peut obtenir le coefficient Deval par la relation suivante :

$$D = 80 / MD$$

III.3.2.2- Résistance aux chocs :

Cette résistance est caractérisée par l'essai Los-Angeles. Il consiste à mesurer la masse d'éléments inférieurs à 1,6 mm, produits par la fragmentation d'une quantité de gravillons (5000 grammes) aux chocs de boulets normalisés, dans un cylindre standard de la machine Los-Angeles en 500 rotations.

Si M est la masse sèche des refus au tamis 1,6 mm (exprimée en grammes), la résistance à la fragmentation aux chocs est donnée par le coefficient Los-Angeles noté LA tel que :

$$LA = 100 * (5000 - M) / 5000$$

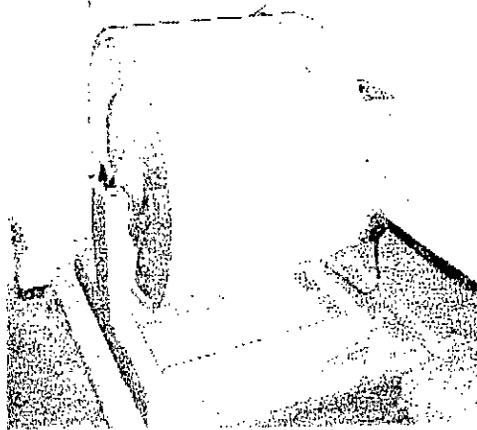


Figure III.1 : Appareil Los-Angeles.

III.4- Dosage en gravillons :

On peut également augmenter la compacité des bétons de sable par l'emploi de gravillons : on parlera dans ce cas de bétons de sable chargés ; il ne s'agit évidemment pas de redécouvrir les bétons classiques, cette dénomination n'est-elle valable que lorsque le rapport massique G/S (gravillon sur sable) est inférieur à 0,7. Cette notion sous-entend une forte discontinuité entre le diamètre maximum du sable $0/D_1$ et le diamètre minimum du gravillon d_2/D_2 : $D_1 \ll d_2$. En outre, l'expérience montre que l'on peut considérer des matériaux à granulométrie continue $0/D$, avec $D \geq 8$ mm, comme des bétons de sable à partir du moment où le dosage pondéral d'éléments supérieur à 4 mm (noté G) satisfait la règle précédente $G/S < 0,7$ où

S : est la quantité des éléments inférieurs à 4 mm.. [17]

III.5- Influence de l'ajout de gravillons sur les bétons de sable :

Un tel ajout ne modifie pas les propriétés spécifiques des bétons de sable et a, par contre, un effet bénéfique sur certaines caractéristiques, notamment le fluage. Il a paru

intéressant de vérifier cet effet sur d'autres caractéristiques telles que la résistance aux chocs, la résistance à l'attrition, la résistance à la compression,...etc. Pour cela, une étude a été faite au laboratoire sur des bétons de sable chargés avec trois natures chimiques différentes de gravillons. Les quantités de gravillons ajoutés ont volontairement été limitées à des taux faibles de telle sorte que le rapport G/S varie de 0 à 1 avec un pas de 0,25, dans cet intervalle la charge en gravillons ne constitue pas un squelette structuré. La formulation et le comportement de tels bétons de sable chargés restent ceux d'un béton de sable et non ceux d'un béton classique pour lequel le rapport pondéral G/S est en général supérieur à 1,5. Les caractéristiques des bétons de sable où cette influence d'ajouts de gravillons a été la plus sensible sont :

III.5.1-La résistance aux chocs :

Les bétons de sable caractérisés par leurs structures homogènes et plus fines leur permettent de mieux répartir les impacts et d'éviter les éclatements sous l'effet du choc. Cette particularité de mieux résister aux chocs, constatée empiriquement, a été étudiée à l'aide de l'essai Los-Angeles sur des cubes obtenus par sciage.[17]

L'influence de l'ajout de gravillons, n'est favorable, d'après la figure (III-2), que jusqu'à un rapport gravillon sur sable (G/S) égal à 0,25, au-delà de cette valeur, le gain est peu sensible ; l'influence est même négative à partir d'un rapport G/S égal à 0,75 où la teneur en gravillons commence à avoir le même effet que sur un béton classique.

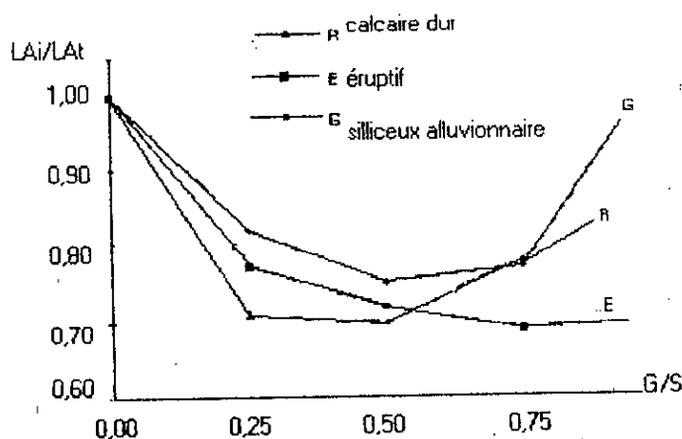


Figure III.2 : Influence de l'ajout de gravillons sur la résistance au choc.[17]

III.5.2- La résistance à l'attrition :

A l'aide de l'essai Deval, on peut constater que, d'après la figure (III-3) suivante, l'ajout de gravillons jusqu'à un rapport G/S égal à 0,5 améliore sensiblement cette caractéristique et ceci quelque soit la nature de l'ajout (calcaire dur, éruptif, siliceux alluvionnaire). En dépassant cette valeur, l'amélioration n'est pas évidente.

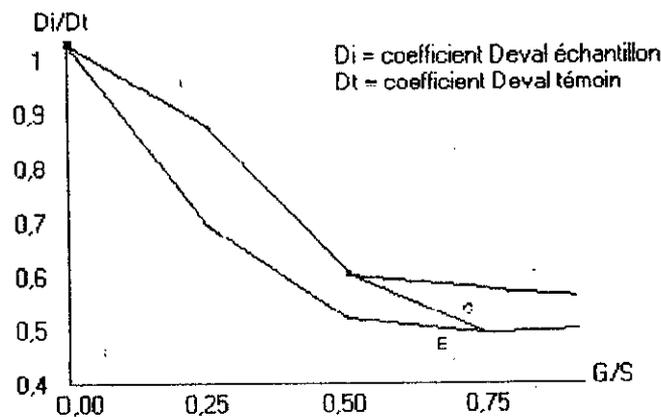


Figure III.3 : Influence de l'ajout de gravillons sur la résistance à l'attrition. [17]

III.5.3- La résistance à la compression :

C'est une des plus importantes caractéristiques recherchées pour les bétons de sable destinés aux éléments structuraux. Quelque soit la nature de l'ajout de gravillons, le gain en résistance est valorisant pour un rapport G/S égal à 0,25, au-delà de cette borne l'influence est beaucoup moins significative (figure III-4).

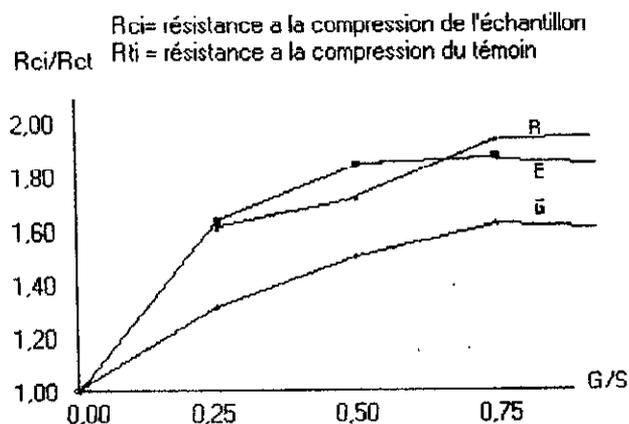


Figure III.4 : Influence de l'ajout de gravillons sur la résistance à la compression. [17]

III.5.4- Le module d'élasticité :

Les bétons de sable ont des modules d'élasticité plus faibles que ceux des bétons classiques [17] : c'est une donnée générale des matériaux granulaires 0 /D pour lesquels le module diminue lorsque le diamètre maximal des grains (D_{max}) diminue. Un béton de sable ayant une résistance en compression de 24 à 30 MPa à 28 jours a généralement un module d'élasticité de l'ordre de 22000 MPa.

En passant d'un rapport G/S de 0 à 0,25, le gain étant plus net et varie de la même façon que la résistance en compression (figure III-5) et l'absence d'influence encore plus grande au-delà de cet intervalle.

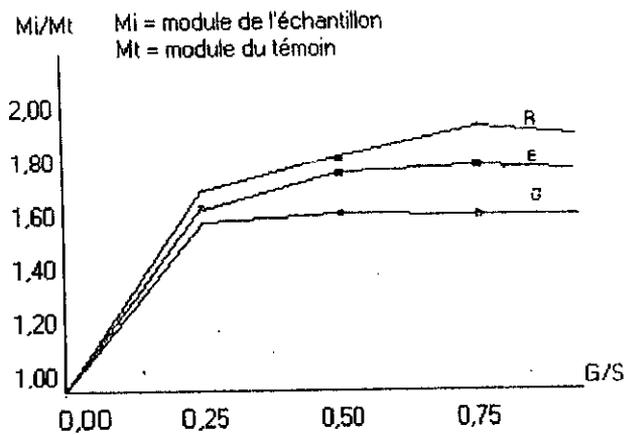


Figure III.5 : Influence de l'ajout de gravillons sur le module d'élasticité.[17]

III.6- Conclusion :

On peut conclure que l'ajout d'un gravillon jusqu'à un rapport G/S inférieur à 0,5 est suffisant pour améliorer les performances du béton de sable.

Pour un rapport compris entre 25% et 50%, les propriétés testées des bétons de sable sont améliorées, notamment la résistance à la compression et le module d'élasticité. Ces deux caractéristiques, si elles sont similaires à celles des bétons classiques, permettent l'utilisation du béton de sable chargé en éléments structuraux sollicités.

Chapitre IV : Comportement des bétons de sable

IV.1- Introduction :

La maniabilité, la durabilité et la résistance à la compression sont les propriétés systématiquement visées par une étude de formulation du béton. Mais il arrive aussi que l'on se préoccupe d'autres propriétés du béton durci comme le retrait, la résistance à la traction, le fluage, le module d'élasticité...etc.

Le comportement mécanique du béton sous des actions quasi-instantanées n'a fait l'objet, jusqu'à présent, que d'études très partielles. Les réponses à des sollicitations de compression et de flexion ont donné lieu à beaucoup d'essais, les réponses à des sollicitations de traction, de cisaillement et de torsion ont été moins étudiés. [16]

Par «quasi-instantané» nous entendons une durée de chargement suffisamment longue pour qu'on puisse considérer que le phénomène est de type statique et suffisamment courte pour qu'on puisse négliger les effets d'hydratation, de fluage ou de relaxation.

Il existe deux causes principales de déformations résiduelles après déchargement, la consolidation sous la dépendance de la compression qui diminue la porosité et la microfissuration suite à des contraintes de traction locales qui l'augmente.

IV.2- Compression simple :

La résistance en compression simple est la caractéristique essentielle du comportement du béton durci. On la mesure en général à 28 jours non pas parce que les réactions d'hydratation seraient terminées à cet âge mais parce que c'est une échéance raisonnable pour estimer la résistance finale du matériau. Ce que l'on peut en tirer de l'essai de compression (résistance, module d'élasticité, loi de comportement) est le lien entre le comportement expérimental et la réglementation.

IV.2.1- Essai de compression simple :

C'est le plus connu des essais mécaniques et qui est dans l'état actuel des connaissances et de la technologie en la matière, le plus significatif pour caractériser la qualité générale du béton.

L'essai de compression s'effectue au moyen d'une presse sur des éprouvettes normalisées. Le corps d'épreuve est placé entre les plateaux de la presse (figure IV.1). Ces derniers vont gêner la déformation transversale en créant des contraintes tangentes par frottement entre eux et les surfaces du corps d'épreuve en contact.

Ces contraintes tangentes vont à leur tour s'opposer au gonflement (déformation transversale) de l'éprouvette ce qui correspond à un frettage localisé qui entraîne une augmentation de résistance.

Si l'effort est correctement centré et uniformément réparti, les premières fissures apparaissent dans la région centrale et elles sont parallèles au sens de l'effort.

S'il apparaît une fissuration longitudinale il y aura une rupture par glissement ou par éclatement. Ces phénomènes se retrouvent surtout dans les bétons à hautes résistances.

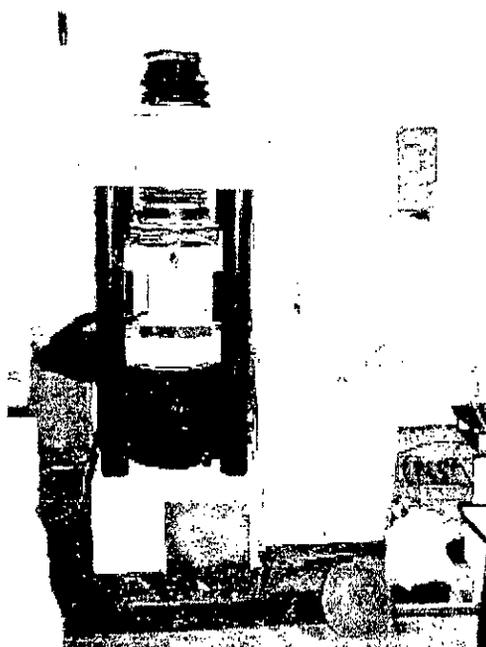


Figure IV.1 : Presse pour l'essai de compression.

IV.2.2- Principales dispositions du mode opératoire :

Les résultats de ce type d'essai dépendent notablement des conditions opératoires. Pour obtenir les résultats les plus significatifs, il conviendra de maîtriser au maximum les points suivants :

- Choix des dimensions des éprouvettes.
- Conservation des éprouvettes (cure au jeune âge et jusqu'au jour d'essai de compression).
- Confection des éprouvettes.
- Rectification des éprouvettes (soufre, graisse spéciale, ...).
- Choix et réglage de la presse.
- Centrage de l'éprouvette.
- Vitesse et montée en charge.

IV.2.3- Comportement du béton en compression :

a- Module d'élasticité en compression :

Il existe des relations plus ou moins empiriques entre le module de Young et la résistance à la compression. La mesure demeure cependant nécessaire dans bien des cas, surtout depuis l'avènement des bétons légers. [16]

Comme cette mesure s'accompagne presque toujours de la détermination d'une courbe contrainte-déformation jusqu'à rupture, il est donc possible de connaître également la déformation relative du béton pour une contrainte quelconque située au-delà de la phase élastique jusqu'à la contrainte de rupture.

Pour un même béton, le module d'élasticité varie de quelques pourcents avec la vitesse de montée en charge. Le module croît suivant une loi logarithmique avec le temps de durcissement, il varie également avec la composition du béton.

On définit parfois des modules sécants : pentes des droites joignant l'origine à un point donné de la courbe contrainte-déformation.

En compression, les écarts avec le module d'élasticité vrai ne sont pas significatifs jusqu'à 10% de la charge de rupture ; ils restent faibles jusqu'à 40% environ de cette dernière puis deviennent rapidement très sensibles.

b- Coefficient de poisson :

Sur la même éprouvette que celle utilisée pour la détermination du diagramme contrainte-déformation longitudinale, il est possible de procéder simultanément à la détermination du diagramme contrainte-déformation transversale. Le rapport de la déformation transversale à la déformation longitudinale, sous une même contrainte de compression, donne la valeur du coefficient de poisson.

La valeur du coefficient de poisson aux faibles charges décroît avec l'âge du béton, jusqu'à des valeurs de 0,20 à 0,15.

La mesure des déformations transversales se réalise assez bien à l'aide de deux jauges à fil résistant collées en vis à vis et perpendiculairement à l'axe du cylindre.

c- Relation module d'élasticité-résistance caractéristique du béton :

Les différentes règles proposent une relation en puissance 1/3 de la résistance à la rupture. Les règles BAEL 91 s'appliquent aux bétons de sable lorsque le dosage en CPA est supérieur à 300 kg/m³. Les bétons de sable sont plus déformables que les bétons classiques, le module de déformation instantanée peut être évalué au moyen de la formule :

$$E_{ij} = 8100 \times f_{cj}^{1/3} \quad (\text{en MPa})$$

Au lieu de $E_{ij} = 11000 \times f_{cj}^{1/3}$ pour un béton classique, où « j » représente l'âge du béton.

On déduit alors le module différé donné par la formule :

$$E_{vj} = 1/3 \times E_{ij} = 2700 \times f_{cj}^{1/3} \quad (\text{en MPa})$$

IV.3- Traction simple :

La mesure de la résistance en traction est beaucoup plus rare que celle de la résistance en compression parce que dans les règlements actuels, le béton tendu est généralement négligé. De plus cette résistance en traction étant faible, une estimation à partir de la résistance en compression est souvent suffisante.

Il peut par contre devenir nécessaire de connaître la résistance réelle (expérimentalement) et le comportement du béton en traction au travers de sa déformabilité ou d'une notion comme l'énergie de fissuration.

IV.3.1- Les différents essais, liens entre eux :

Il existe différents essais permettant d'atteindre la résistance en traction. On peut pratiquer un essai de traction directe, en général sur un échantillon cylindrique ou prismatique dont les faces terminales sont collées aux appuis de chargement de la presse. Un tel essai demande cependant une préparation importante pour que ce ne soit pas la résistance du collage que l'on mesure.

L'essai le plus courant permettant d'estimer la résistance en traction des bétons est l'essai de traction par fendage appelé aussi essai brésilien (NF P18-408). Le principe de l'essai est simple ; l'éprouvette cylindrique est couchée entre les deux plateaux d'une presse de compression afin de solliciter en compression deux génératrices opposées. Dans le but de bien répartir la charge sur les génératrices, deux réglettes de contre-plaqué de 5 mm d'épaisseur sont disposées entre l'éprouvette et les deux plateaux de chargement. Il ne donne cependant qu'une valeur indicative de la résistance en traction :



Figure IV. 2 : Essai de traction par fendage.

$$F_t (\text{fendage}) = 20 \times F / (\pi \times a \times h)$$

h : longueur de l'éprouvette cylindrique (cm).

a : diamètre de l'éprouvette (cm).

F : effort de rupture en KN.

On peut enfin estimer la résistance en traction au moyen d'un essai de flexion (NF P18-407). Cet essai est réalisé sur des éprouvettes prismatiques soumises à deux charges égales symétriques.

$$F_t \text{ (flexion)} = 3 \times F/a^2$$

F : effort de rupture en N.

a : coté de l'éprouvette prismatique (cm).

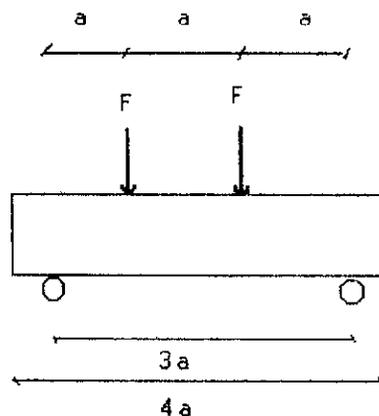


Figure IV. 3 : Essai de traction par flexion

Cet essai présente un fort effet d'échelle et surestime la résistance, les résultats obtenus sont très optimistes dans un rapport pouvant varier de 1 à 1,6. Donc il faut tenir compte de la plastification de la zone tendue dans la phase de pré rupture :

$$F_t = 0,6 \times F_t \text{ (flexion)}$$

$$F_t = 1,8 \times F/a^2$$

IV.3.2- Comportement en traction :

Le comportement est quasi-linéaire et réversible presque jusqu'à la rupture, le module d'élasticité étant le même qu'en compression.

La microfissuration se développe perpendiculairement au chargement et aboutit à une surface de rupture unique, c'est-à-dire qu'il y a là aussi localisation des déformations.

La déformation au pic de l'effort de traction est très limitée et correspond à une contrainte faible en regard de la résistance en compression (la loi réglementaire valable pour $f_{cj} < 60$

M Pa est : $f_{tj} = 0,6 + 0,06 f_{cj}$). Ceci explique pourquoi le béton tendu est en général négligé dans les calculs.

IV.4- Fluage :

Lorsque le béton est soumis à une charge extérieure permanente, outre une déformation instantanée au moment du chargement et une déformation de retrait, il subit une part supplémentaire de déformation différée : le fluage. Cette part supplémentaire est loin d'être négligeable et peut être plus importante que la déformation instantanée.

Le fluage dépend essentiellement d'un certain nombre de paramètres en particulier :

- La charge appliquée : sous des charges modérées, on peut considérer qu'il est proportionnel à la charge appliquée ; si la charge est limitée à environ 30% de la contrainte de rupture, la vitesse de fluage diminue avec le temps. Si elle dépasse 50% de la contrainte de rupture, le fluage croît plus vite que la contrainte.
- La nature du béton : le module d'élasticité du béton est en général un bon indicateur. Un béton dont le module d'élasticité est faible (cas d'un béton de sable) flue plus qu'un béton à grand module.

IV.4.1- Description d'une loi de fluage :

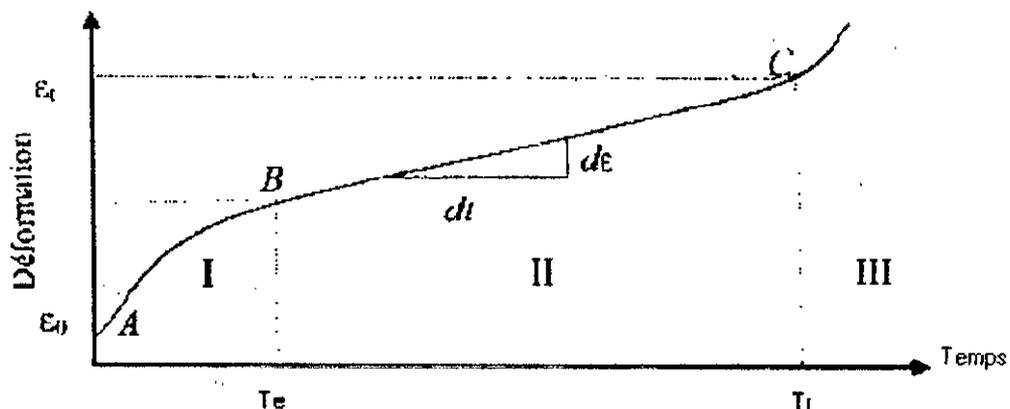


Figure IV. 4 : Courbe idéale de fluage.[18]

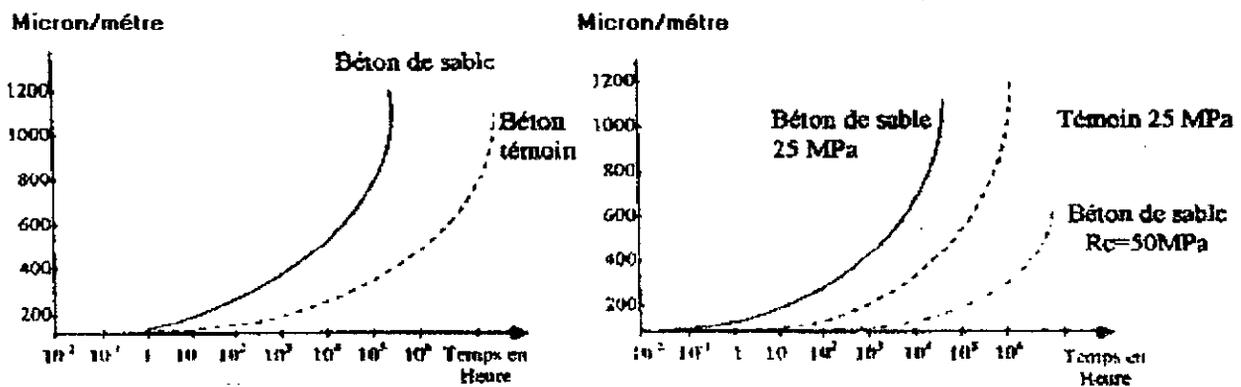
On distingue de cette courbe :

- ◆ Une déformation élastique instantanée qui apparaît lors de l'application de la charge. Celle-ci est dépendante du module d'élasticité.

- ♦ Un fluage primaire (partie AB) : qui est une réponse visco-élastique, cette phase de fluage démarre dès que l'échantillon se déforme élastiquement. Elle est caractérisée par une vitesse de déformation croissante et un phénomène de durcissement.

Les résultats comparatifs de fluage entre un béton de sable et un béton classique ont été faits à un niveau de résistance en compression de 25 M Pa, un béton de sable flue plus qu'un béton classique. Par contre, un béton de sable plus résistant n'a pas le même comportement : fluage plus faible, voisin de celui d'un béton classique.

Des essais ont confirmé cette hypothèse (figure IV. 5) Puisqu'en passant de 25 à 50 M Pa, on divise le fluage par cinq (05). Au même niveau de résistance, à 50 M Pa, le fluage d'un béton de sable n'est supérieur à celui d'un béton classique de même niveau de résistance que de 20%.



a- fluage d'auto-dessiccation

b- fluage total

Figure IV.5 : fluage des bétons de sable.

IV.5- Fatigue :

On appelle « fatigue » l'altération mécanique du matériau sous l'effet de sollicitations répétées. Cette sollicitation peut être favorable (consolidation du matériau sous des charges de compression) ou défavorable (dommage). Elle peut entraîner la rupture après un plus ou moins grand nombre de répétitions et ceci, même si le niveau de la sollicitation répétée est inférieur à la sollicitation de rupture dans un chargement unique de courte durée. [16]

Le comportement des bétons de sable en fatigue est important à connaître pour le dimensionnement des chaussées. L'essai de fatigue est réalisé sur des éprouvettes trapézoïdales encastrées à leurs bases et sollicitées en têtes à différents niveaux de contraintes afin de déterminer ce dimensionnement.

A chaque niveau de contrainte σ correspond un nombre N de sollicitations provoquant la rupture de l'éprouvette et correspondant à sa durée de vie : c'est la courbe de fatigue (linéaire en coordonnées logarithmique).

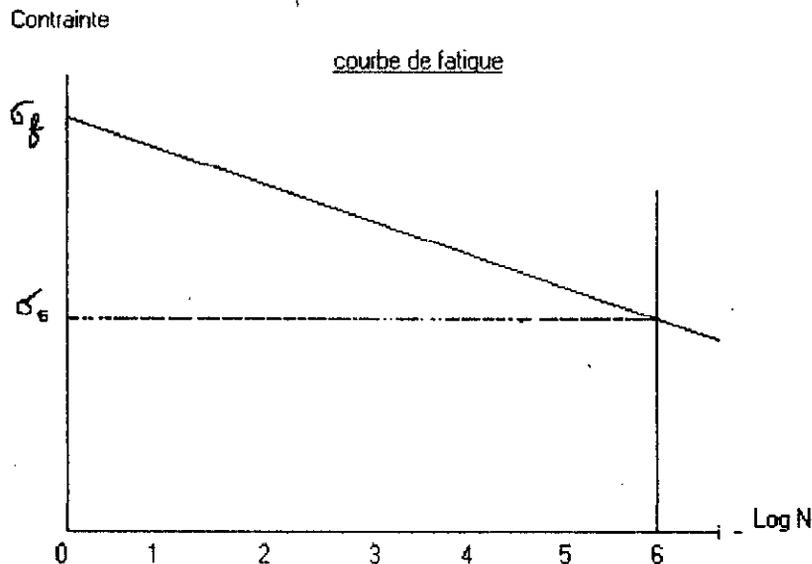


Figure IV. 6 : Courbe de fatigue. [17]

De cette courbe on déduit la valeur de la contrainte σ_6 qui permet de calculer la contrainte admissible pour le matériau, et par là, l'épaisseur à adopter.

Les mesures réalisées ont permis de constater que le béton de sable avait un comportement analogue à celui des matériaux traités aux liants hydrauliques pour assises de chaussées. [17]

IV.6- Retrait :

En absence de toute charge mécanique extérieure, le béton subit en général une déformation plus ou moins importante lorsqu'il serait dans un milieu environnant à humidité différente de celle du béton.

Les échantillons de bétons laissés à l'air libre subissent des déformations volumétriques (diminution des dimensions initiales). Cette diminution de dimensions est due essentiellement à l'évaporation d'eau (départ d'eau vers l'extérieur de l'échantillon).

Il existe plusieurs sortes de retrait :

- ◆ Le retrait d'hydratation (retrait de dessiccation inerte) ;
- ◆ Le retrait d'évaporation avant prise ;
- ◆ Le retrait hydraulique après prise ;
- ◆ Le retrait thermique ;

Plusieurs facteurs influent sur ce phénomène : l'humidité relative et la variation de la température du milieu, alors que le retrait dépend d'une grande partie du dosage en ciment, sa finesse Blaine et de la fraction fines-granulats.

Des essais de retrait ont été réalisés sur béton de sable en comparaison avec un béton classique. La figure (IV. 7) a permis de constater que lorsqu'on isolait le matériau de l'extérieur (milieu étanche), le retrait du béton de sable est voisin de celui d'un béton classique, il s'agit ici d'un retrait dit d'autodessiccation. Si on laisse le matériau sécher (milieu non étanche) le retrait du béton de sable peut atteindre des valeurs doubles de celles d'un béton classique, il s'agit d'un retrait total.

Le phénomène de retrait est lié à une distribution et une taille des vides différentes entre les deux matériaux. Le matériau dont les grains sont grands subissent un retrait moins important que les matériaux à grains fins.

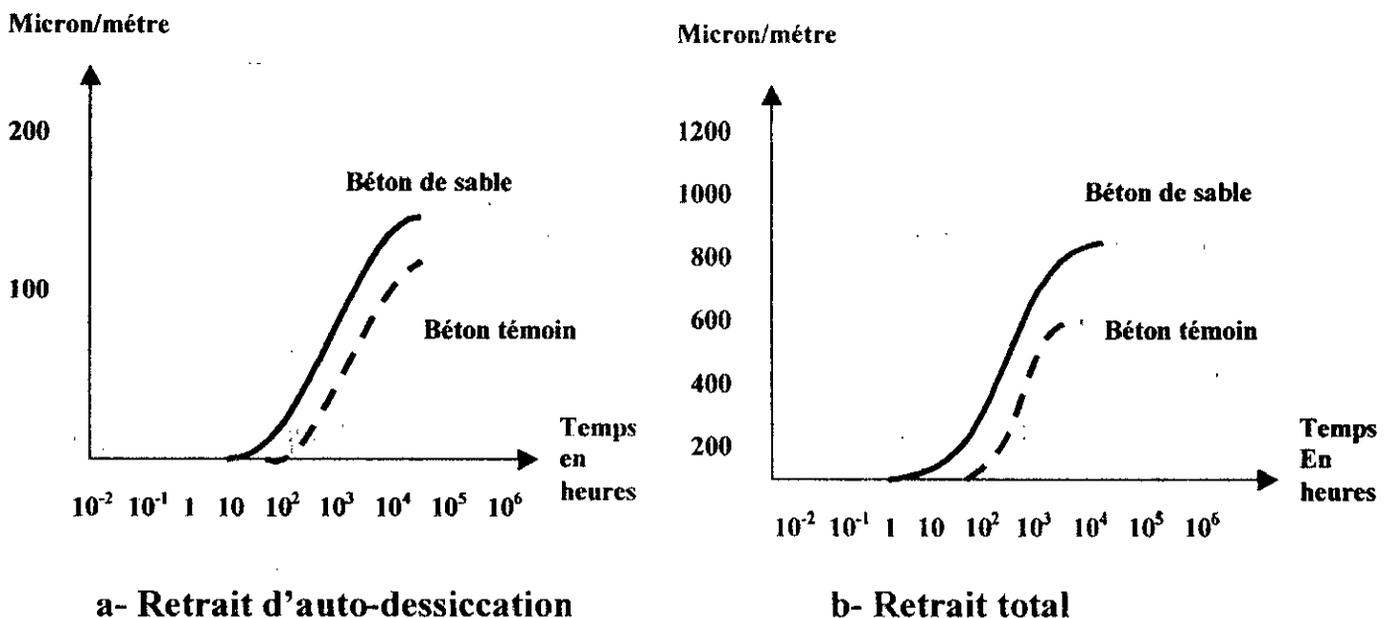


Figure IV.7 : Retrait des bétons de sable.

Chapitre V : Les sables de dunes

V.1- Introduction :

Le sable entre dans la composition des bétons de sable en une proportion importante. Il en est même l'élément principal puisqu'il forme son squelette granulaire.

Les performances de ces bétons vont dépendre, donc en partie, de la qualité du sable attribuée à leurs caractéristiques physico-chimiques. [3]

Le sable dunaire constitue en Algérie un formidable gisement, il couvre près de 60% du territoire. Cette quantité quasi-inépuisable peut être adoptée en tant que matériau de construction si ses caractéristiques physico-chimiques répondent aux spécifications normatives des sables entrant dans la formulation des bétons classiques.

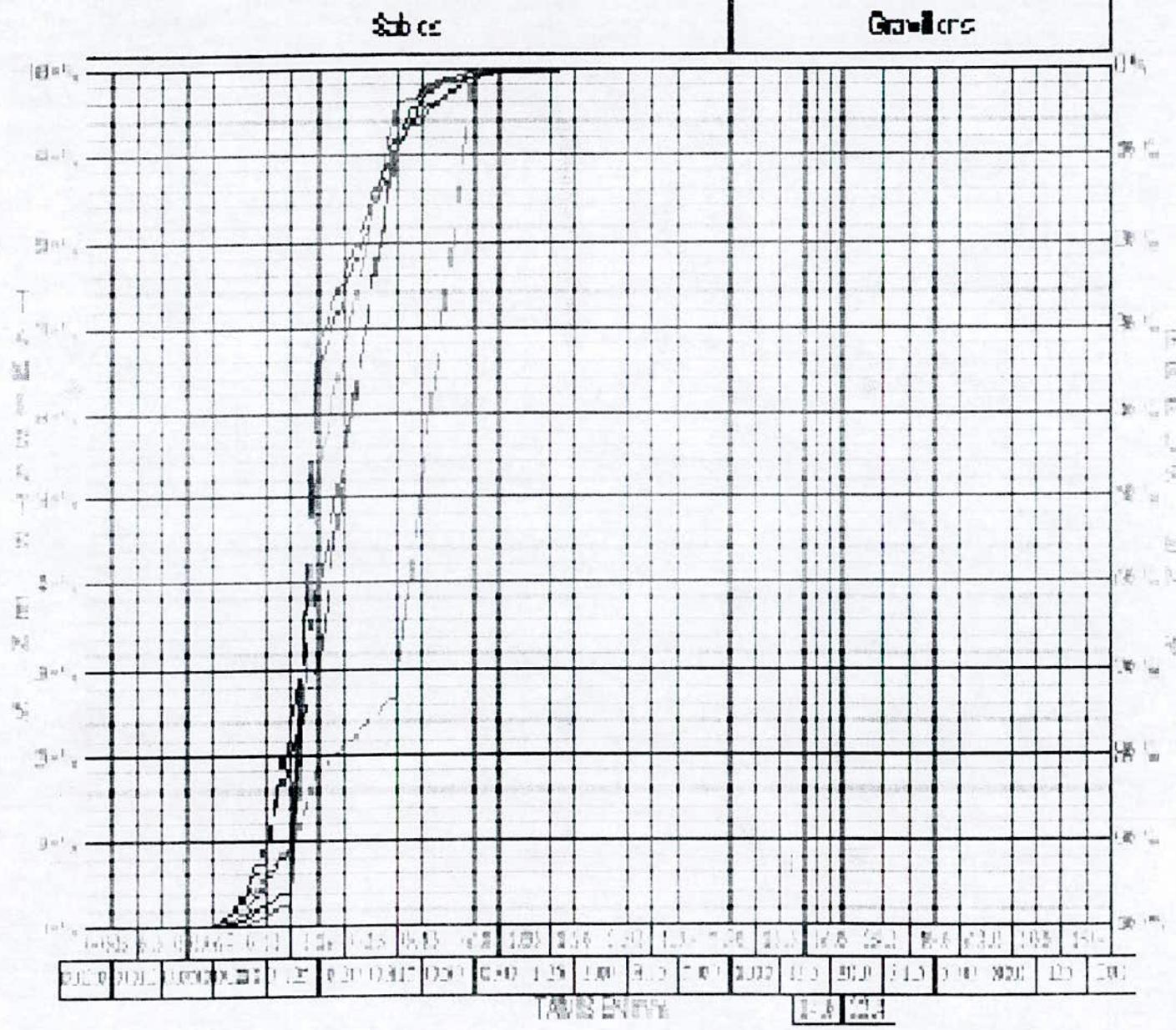
Pour cette raison, nous allons déterminer les caractéristiques des sables dunaires de quelques régions sahariennes du pays et chercher leurs qualités et défauts afin de pouvoir éventuellement les qualifier comme matériaux aptes à l'emploi en construction.

V.2- Caractéristiques physiques des sables dunaires :

V.2.1- Granulométrie :

Les sables, que l'on trouve dans les dunes mouvantes, sont composés de particules siliceuses pratiquement de même taille et de petites dimensions. Les courbes granulométriques des sables de dunes de différentes régions du Sahara Algérien présentées dans la (figure V.1) sont similaires, continues et montrent qu'il s'agit de sables très fins (sables homométriques).

Figure V.1: Courbe granulométrique de quelques sables de dunes



Leur module de finesse qui ne dépasse pas en général 1,5 confirme à son tour le manque de grains moyens et gros : (tableau V.1)

Tableau V.1 : Les valeurs des modules de finesse de quelques sables dunaires

Région	Ouargla	El-Golea	Ghardaia	Ain-Safra	Hassi Berkine	El-Oued
Module de finesse M_f	0,78	1,55	1,10	0,5	0,72	0,5

Il est à noter que les courbes granulométriques des différents sables de dunes se situent au-dessus des fuseaux limites proposé par DREUX [9], de même leurs modules de finesse n'atteignent pas les limites proposées pour un bon sable de béton qui sont compris entre 2,2 à 2,8.

V.2.2- Masses volumiques et densités :

Les masses volumiques apparentes et absolues déterminées selon les méthodes classiques (masse d'un certain volume de sable et éprouvette graduée) sont regroupées dans le (tableau V.2).

Deux caractéristiques très importantes vis-à-vis de la résistance mécanique du béton de sable : la compacité et la porosité, sont liées intimement à ses deux masses volumiques. La compacité est le résultat du quotient entre les deux masses volumiques apparente et absolue, exprimée en pourcent ; la porosité est le complément à l'unité de la compacité.

Tableau V.2 : Les masses volumiques apparentes et absolues des sables Dunaires

Région	Ouargla	El-Golea	Ghardaia	Ain Safra	Hassi Berkine	El-Oued
Masse volumique apparente Kg/m ³	1500	1590	1520	1485	1523	1420
Masse volumique absolues Kg/m ³	2560	2500	2764	2660	2640	2610
Compacité (%)	58,6	63,6	55	55,8	57,7	54,4
Porosité (%)	41,4	36,4	45	44,2	42,3	45,6

Rappelons que DREUX [9] admet pour les sables des bétons hydrauliques des compacités de l'ordre de 60% à 70%. Dans ce cas, les sables de dunes cités ci-dessus ne présentent pas de bonnes compacités.

V.2.3- Propreté :

Les sables de dunes ne contiennent pratiquement pas de traces d'argiles. Ils ont un équivalent de sable noté (Es) supérieur à 70% et une valeur au bleu de méthylène notée (VBm) de l'ordre de 0,1.

Tableau V.3 : Propreté des sables de dunes

	Ouargla	El-Golea	Ghardaia	Ain Safra	Hassi Berkine	El-Oued
Es à vue (%)	87,25	93	88	—	93,85	—
VBm	0,03	0,09	0,1	—	0,05	—

Les spécifications exigent pour la propreté des sables (d'après la norme P 18-541 [1]) les valeurs suivantes :

- Es (à vue) $\geq 75 \%$
- Es (piston) $\geq 70 \%$
- VBm ≤ 1

On constate que les sables dunaires sont des sables très propres et par conséquent, peuvent être utilisés en construction.

V.3- Composition minéralogique des sables dunaires :

La composition minéralogique des sables de dunes de différentes régions sahariennes est donnée comme suit :

- Le quartz forme plus de 85% du sable, les grains sont généralement arrondis et parfois anguleux.
- La calcite se manifeste par des grains de couleurs différentes n'excédant pas les 10% et variant autour de 5%.
- Le gypse se trouve sous forme de grains fins, de couleur blanchâtre avec des pourcentages ne dépassant pas les 3%.

On peut trouver dans certains gisements le feldspath où son pourcentage ne dépasse pas les 4%.

V.4- Analyses chimiques des sables dunaires :

Se sont des sables dont la composition chimique est simple : plus de 90% de silice (SiO_2), de 1 à 2% de calcaire et des traces de différents oxydes.

Du fait de cette composition, le sable a une couleur blanche jaunâtre et ocre ; il se dessèche et perd facilement sa cohésion en surface.

Tableau V.4 : Composition chimique de sables dunaires

Région Elément (%)	Ouargla	El-Golea	Ain Safra	Béchar	Hassi Berkinne	El-Oued
SiO ₂	98,24	94,88	96,86	90,46	98,31	86,85
Al ₂ O ₃ et Fe ₂ O ₃	1,04	1,82	1,28	1,25	0,82	1,55
Sulfates	Traces	Traces	Traces	Traces	Traces	Traces
Chlorure NaCl	0,18	0,04	0,03	0,23	0,29	0,04
Carbonates CaCO ₃	1,71	0,97	0,66	4,23	1,69	5,81
Anhydre carbonique CO ₂	0,75	—	—	1,86	0,74	—
Pert au feu 1050°C	0,82	1,00	—	4,00	0,85	4,60
Matières organiques	Néant	Néant	néant	néant	Néant	Néant

Cette analyse concerne la détermination des proportions de matières organiques, sulfates, sulfures et chlorures contenus dans les sables. Ses éléments présents au-delà d'un certain seuil peuvent être nuisibles aux propriétés des bétons formulés avec ces sables.

V.5- Choix d'un sable de dunes :

Le choix d'un sable comme matériau de construction entrant dans la formulation des bétons a recours à des prescriptions normatives. En se référant à ses dernières, on peut classer les sables de dunes hors-normes :

- Granulométries fines.
- Modules de finesse très petits.

- Faibles compacités et grandes porosités.

Par contre, ces sables présentent des critères exploitables qui peuvent les qualifier pour l'emploi en construction et en particulier pour les bétons de sables :

- Courbes granulométriques continues.
- Sables propres (très bon équivalent de sable)
- Présence insignifiante d'éléments nocifs.

V.6- conclusion :

Nous pouvons conclure que les sables de dunes du Sahara possèdent pratiquement les mêmes caractéristiques physico-chimiques avec quelques différences relatives entre eux. En profitant de quelques qualités (propreté, composition chimique, friabilité,.....), ces sables peuvent former le squelette granulaire des bétons de sables afin que leurs majeurs inconvénients, la porosité, soit réglée par l'une des deux solutions :

- L'ajout de gravillon en faibles proportions et/ou l'apport d'un sable correcteur.
- L'ajout d'un filler pour optimiser la compacité du mélange.

Chapitre VI : Identification des matériaux utilisés

VI.1- Introduction :

L'identification des matériaux entrant dans la composition des bétons est indispensable. La connaissance des caractéristiques physico-chimiques de chaque matériau à part, par des analyses et essais normalisés effectués au laboratoire, nous permet de faire l'interprétation des résultats obtenus par les essais sur la composition de ces matériaux.

Au cours de ce travail, les essais et analyses effectués sur trois matériaux (sable de dunes, sable de concassage et gravillon) sont donnés comme suit :

-Analyse granulométrique :

C'est la mesure de la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.(voir annexe A)

La variation de la masse du passant en fonction de la dimension de la maille carrée du tamis est représentée par une courbe granulométrique.

-Module de finesse :

C'est un nombre caractérisant le forme des grains de sable ; il est égal au centième de la somme des refus aux modules de (23),(26),(29),(32),(36) correspondant respectivement au tamis de (0.16), (0.315), (0.63), (1.25) et (2.5)mm.

Plus le sable est fin, plus son module de finesse est petit. Il est à noter que les sables entrant dans la composition des bétons hydrauliques doivent avoir un module de finesse compris entre 2.20 et 2.80.

-Equivalent de sable :

Résultat de l'essai du même nom caractérisant la propreté d'un sable d'origine naturelle ou artificielle.(voir annexe B)

La valeur de cet essai (noté Es) est le rapport, multiplié par 100, de la hauteur de la partie sableuse sédimentée à la hauteur totale de flocculat et de la partie sableuse sédimentée.

Les sables doivent satisfaire aux exigences de la norme NF P18-541 données par le tableau ci-dessous :

Sable roulé	Sable concassé
Es \geq 75 %	Es \geq 65 %

-Essai au bleu de méthylène :

Cet essai a le même but que l'essai précédent, son avantage est d'être à la fois quantitatif et qualitatif. (voir annexe C)

-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 forte.

Les valeurs de bleu au méthylène sont données par le tableau ci-dessous :

Sable roulé	Sable concassé
VBm \leq 1	VBm \leq 1

-Friabilité des sables :

Cet essai est aux sables ce qu'est l'essai micro-Deval pour les gravillons. Il consiste à déterminer la résistance des sables à l'attrition (voir annexe D).

Une valeur élevée du coefficient de friabilité des sables (FS > 60 %) indique de fortes proportions d'éléments tendres ou friables nuisibles à l'aspect des parements et à la durabilité des bétons.

-Masses volumiques apparente et absolue :

La masse volumique apparente est la masse du matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides. Il ne faut pas la confondre avec 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.

Elles sont exprimées en Kg/m^3 et déterminées selon les méthodes classiques, respectivement masse d'un certain volume de matériau et éprouvette graduée (ou bien le pycnomètre).

-Compacité et porosité :

La compacité est définie comme le rapport du volume des grains solides par unité de volume de granulat.

$$C = V(\text{grains solides}) / V(\text{apparent})$$

La porosité est définie comme le rapport du volume des pores remplis d'eau ou d'air par unité de volume du granulat. C'est le complément à l'unité de la compacité.

$$P = 1 - C = V(\text{vide}) / V(\text{apparent})$$

-Coefficient d'aplatissement des gravillons :

C'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 : $G/E > 1,58$.

-Analyse chimique:

Cette analyse concerne la détermination des éléments chimiques majoritaires, qui donnent aux matériaux leurs caractéristiques chimiques, ainsi des proportions de matières nuisibles telles que les sulfates et sulfures, les chlorures et les matières organiques qui, présents au-delà d'un certain seuil, peuvent provoquer la perturbation des performances du béton étudié.

VI.2- Sable de dune :

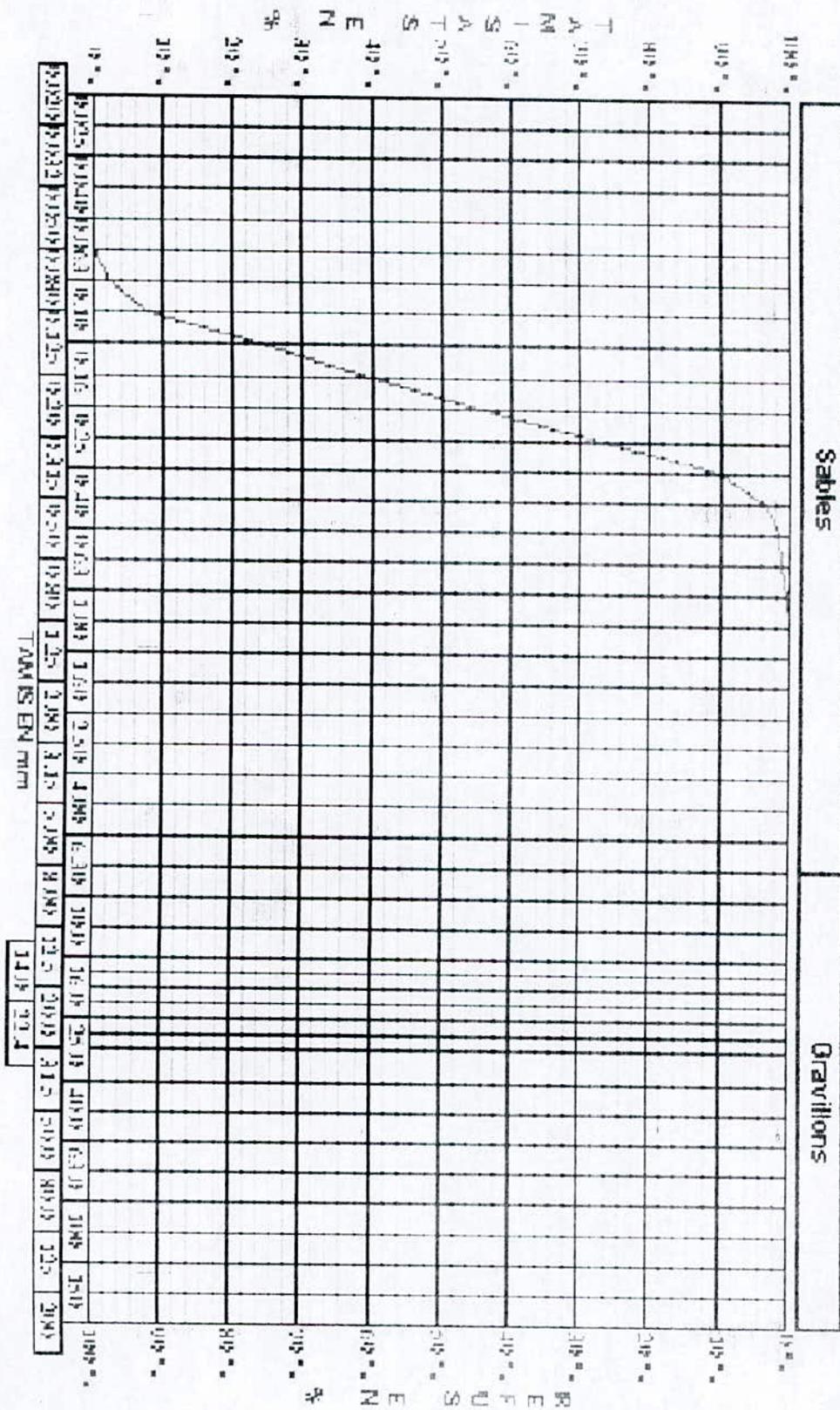
Au cours de cette expérimentation, on a utilisé un sable dunaire dont le prélèvement s'est fait à Boussaâda, ses caractéristiques physico-chimiques sont présentées ci-dessous :

VI.2.1-Caractéristiques physiques :

-analyse granulométrique :

Tamis (mm)	Tamisât (%)
2	100
1	99,98
0.63	98,85
0.5	98,64
0.4	96,45
0.315	90,15
0.2	56,04
0.16	38,75
0.1	7,85
0.08	2,37

Figure VI.1 : Courbe granulométrique du sable de dunes de BOUSSAADA.



- Module de finesse : $M_f = 0,72$.
- Equivalent de sable : $E_s = 88,56 \%$.
- Valeur au bleu de méthylène : 0,16.
- Friabilité : 13,43 %.
- Masse volumique apparente : 1432 kg/m^3 .
- Masse volumique absolue : 2591 kg/m^3 .
- Compacité : $C = 55,27 \%$.
- Porosité : $P = 44,73 \%$.

VI.2.2- Analyse chimique :

Matières ou éléments	Proportion (%)
Insolubles (silice SiO_2 +silicates)	94,60
Oxyde de fer (Fe_2O_3) et oxyde d'alumine (Al_2O_3)	0,78
Chlorures (Na Cl)	0,23
Sulfates ($\text{CaSO}_4, 2 \text{ H}_2\text{O}$)	Traces
Carbonates (CaCO_3)	5,13
Anhydride Carbonique (CO_2)	2,34
Perte au feu à 1050 °C	2,38
Eau de constitution (H_2O)	0,50

VI.3-Sable concassé :

Ce matériau provient de la carrière Jobert, issu d'une roche sédimentaire (calcaire), ses caractéristiques physico-chimiques sont présentées ci-dessous :

VI.3.1- Caractéristiques physiques :

- Analyse granulométrique :

Tamis (mm)	Tamisât (%)
6.3	100
5	100
4	100
2.5	96,25
2	80,52
1.25	61,25
1	50,49
0.63	38,33
0.5	36,00
0.4	29,39
0.315	25,41
0.2	19,44
0.16	17,50
0.1	14,83
0.08	13,76

- Module de finesse : $M_f = 2,56$
- Equivalent de sable : $E_s = 77,98 \%$
- Valeur au bleu de méthylène : 0,10.
- Friabilité : 57 %.
- Masse volumique apparente : 1330 Kg/m^3 .
- Masse volumique absolue : 2618 Kg/m^3 .
- Compacité : $C = 50,80 \%$.
- Porosité : $P = 49,20 \%$.

VI.3.2- Analyse Chimique :

Matières ou éléments	Proportion (%)
Insolubles (silice SiO₂+silicates)	8,34
Oxyde de fer (Fe₂O₃) et oxyde d'alumine (Al₂O₃)	2,13
Chlorures (NaCl)	0,47
Sulfates (CaSO₄, 2 H₂O)	Traces
Carbonates (CaCO₃)	85,96
Anhydride Carbonique (CO₂)	37,82
Perte au feu à 1050 °C	41,53
Eau de constitution (H₂O)	3,71

VI.4-Gravillon :

Le gravillon utilisé provenant de la carrière JOBERT est issu d'une roche sédimentaire (calcaire), ses caractéristiques physico-chimiques sont présentées ci-dessous :

VI.4.1- Caractéristiques physiques :

- Analyse granulométrique :

Tamis (mm)	Tamisât (%)
16	100
12.5	100
10	99.77
8	93.16
6.3	48.49
5	37.77
4	16.99
2	1.40
1	0.76
0.5	0.70
0.4	0.67
0.315	0.66
0.2	0.64
0.1	0.55
0.08	0.52

- Coefficient d'aplatissement : $CA = 33.23 \%$.

- Micro-Deval : $MDE = 31,4 \%$.

- Los-Angeles : $LA = 30,54 \%$.

- Masse volumique apparente : 1283 Kg/m^3 .

- Masse volumique absolue : 2615 Kg/m^3 .

- Compacité : $C = 49,10 \%$.

- Porosité : $P = 50,90 \%$.

VI.4.2- Analyse chimique :

Matières ou éléments	Proportion (%)
Insolubles (silice SiO₂+silicates)	9.43
Oxyde de fer (Fe₂O₃) et oxyde d'alumine (Al₂O₃)	1.18
Chlorures (NaCl)	0.35
Sulfates (CaSO₄,2H₂O)	Traces
Carbonates (CaCO₃)	86.84
Anhydride Carbonique (CO₂)	38.21
Perte au feu à 1050 °C	38.25
Eau de constitution (H₂O)	0,94

VI.5- Conclusion :

En se référant aux prescriptions normatives sur les sables pour bétons, le sable de dunes de Boussaâda est classé hors-normes : granulométrie fine, faible module de finesse ainsi une grande porosité (faible compacité). Par contre, certaines qualités de ce sable telles que une granulométrie continue, un bon équivalent de sable et une composition chimique siliceuse avec absence de matières nuisibles permettent son utilisation en bétons de sable afin de minimiser sa porosité par l'ajout d'un filler.

L'utilisation simultanée d'un sable dunaire et d'un sable de concassage conduit à une correction mutuelle de leurs inconvénients.

VI.5- 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 32,5 (similaire au CPJ 45) utilisé dans la quasi-totalité des chantiers en Algérie.

Il est enveloppé dans des sacs de 50 Kg, de fabrication récente au moment des essais. Il possédait donc toute sa capacité liante. Ce ciment provient de la cimenterie Raïs Hamidou dont les caractéristiques sont présentées dans l'annexe (1).

VI.6- L'eau de gâchage :

C'est une eau courante du robinet qui a été utilisée pour la confection du béton de sable. Cette eau est dépourvue d'excès de matières nuisibles telles que les sels, les sulfates et les acides.

VI.7- L'adjuvant :

Nous avons utilisé un MEDAFLOW 30 ; un superplastifiant haut réducteur d'eau qui permet d'obtenir des bétons et mortiers de très hautes qualités.

Une fiche technique, identifiant cet adjuvant, est présentée dans l'annexe (2).

Chapitre VII : Formulation d'un béton de sable de dunes et choix d'une composition optimale

VII.1- Introduction :

Nous avons étudié deux types de bétons de sable à savoir : un béton de sable de dunes seul noté BS0 et un béton de sable chargé noté BSG où deux matériaux correcteurs sont ajoutés aux constituants de base. Nous avons ensuite comparé leurs performances (résistance de traction et compression) et comportements à ceux des bétons classiques.

La formulation de ces compositions est testée à deux principaux essais des bétons frais :

- **Maniabilité :**

On essaie d'avoir un temps d'écoulement du béton de sable au maniabilimètre LCPC compris entre 7 et 10 secondes ce qui correspond à un béton plastique.

- **Masse volumique :**

Il s'agit ici de déterminer la masse volumique apparente du béton de sable frais après chaque essai de maniabilité. Le quotient de la masse d'un volume de béton frais par le volume occupé par ce dernier nous donne la masse volumique apparente réelle (MVAR) alors que la masse volumique apparente théorique n'est que la somme des masses de chacun des constituants (MVAT).

VII.2- Confectionnement du béton :

Le béton de sable doit être soigneusement confectionné et correctement mis en place afin que les résultats obtenus soient significatifs.

Les deux principales procédures pour la fabrication du béton sont :

- **Malaxage :**

Dans le but d'avoir une bonne adhérence et une homogénéité entre les grains du mélange hétérogène, on commence le malaxage des granulats (généralement les sables dans le cas des bétons de sable). Le ciment est incorporé en deuxième étape pour que les grains de sable soient bien entourés par le ciment. Enfin, on introduit la quantité d'eau, mélangée à un adjuvant en respectant le mode d'emploi de ce dernier, nécessaire pour le mouillage complet des constituants.

L'opération est effectuée à l'aide d'un malaxeur à axe vertical d'un volume égal à 30 litres environ.

- **Serrage :**

Cette opération est effectuée grâce à une vibration moyenne par piquage ; la masse du béton frais est piquée avec une tige de fer qui pénètre à travers les couches, détruisant la stratification et aidant à l'évacuation de l'air.

VII.3- Eprouvtes utilisées :

Nous avons utilisé au cours de cette expérimentation trois types d'éprouvettes pour chacune des deux formulations :

- Les éprouvettes prismatiques de dimensions 4 x 4 x 16 cm sont testées à l'essai de traction par flexion à 7 et 28 jours.
- L'essai de compression est effectué à 7 et 28 jours par l'écrasement de cubes de dimensions (10 x 10 x 10) cm et des éprouvettes cylindriques d'élancement 2 : ($\varnothing=16$ cm).
- Ces éprouvettes cylindriques sont utilisées pour déterminer la loi de comportement des bétons de sable (contrainte-déformation, module d'élasticité, coefficient de poisson, ..) afin de la comparée à celle d'un béton classique.

VII.4- Formulation de base :

Elle consiste à trouver les proportions des différents constituants : ciment, adjuvant, eau de gâchage et sable de dunes (qui va remplacer les granulats).

VII.4.1- Dosage en ciment :

Le ciment qui convient le mieux aux bétons de sable est le Ciment Portland Artificiel (CPA) mais cela n'empêche pas d'utiliser un Ciment Portland composé (CPJ).

Le CPJ est composé de 85% de Clinker Portland, type CPA et ayant une classe vraie équivalente majorée d'environ 18% par rapport à celle du CPJ, le complément à 100% est considéré comme constituants secondaires (fillers calcaires). Donc le dosage en CPJ est fonction de notre dosage en CPA que nous avons fixé à 320 Kg/m³.

$$[\text{CPA}] = 0,85 \times [\text{CPJ}] \quad \Rightarrow \quad [\text{CPJ}] = [\text{CPA}] / 0,85$$

$$[\text{CPJ}] = 376,4 \text{ Kg} / \text{m}^3$$

Le dosage en CPJ est pris égal à 375 Kg/m³. Sachant que la masse volumique du ciment est de 3145 Kg/ m³, le dosage volumique du ciment est pris égal à 119,3 litres par m³ de béton.

On déduit le dosage en fines d'ajouts (filler calcaire) à partir des 15 % du CPJ :

$$[\text{filler}] = 56,5 \text{ Kg} / \text{m}^3$$

Ces fillers (de nature calcaire) sont capables de créer des liaisons épitaxiales avec le ciment, c'est-à-dire qu'ils sont susceptibles de s'intégrer dans la pâte du ciment, elle-même constituée d'environ 80% de calcaire. [3]

VII.4.2- Dosage en adjuvant :

Cet adjuvant, dosé à 0,5% du poids du ciment, permet de diminuer la teneur en eau du béton de sable de dunes d'une façon remarquable.

$$[\text{adj}] = (0,5 / 100) \times 375 \quad \Rightarrow \quad [\text{adj}] = 1,87 \text{ Kg} / \text{m}^3$$

Etant donné la densité de ce produit égal à 1,07 le dosage volumique sera égal à **1,75** litre par m³ de béton.

VII.4.3- Dosage en eau :

D'après des expériences faites aux laboratoires, les praticiens ont fixé des valeurs forfaitaires des quantités d'eau de gâchage suite à des dosages fixes en ciment ; des bétons de sable dosés à 350 et 400 Kg/m³ de ciment nécessitent respectivement 220 et 250 litres d'eau par mètre cube de béton et cela suivant la nature des sables utilisés.

Au cours de cette expérimentation, on a commencé par une quantité d'eau égale à **230** litres par m³ de béton, cette valeur n'est pas choisie arbitrairement mais issue d'une formulation de béton de sable [14], à base de sable de dunes qui a des caractéristiques physico-chimiques équivalentes à celles du sable qu'on a utilisé.

Cette quantité doit être révisée lors de la réalisation des gâchées suite à un essai de maniabilité (7 à 10 secondes au manjabilimètre LCPC) qui nous permet d'avoir la quantité d'eau nécessaire.

VII.4.4- Teneur en air :

La teneur en air des bétons de sable est comprise, généralement, entre 5 et 7% par m³ de béton. On en déduit alors la teneur en air de notre béton de sable qui sera estimée à **60** litres par mètre cube de béton.

VII.4.5- Dosage en sable :

Il suffit de retrancher de un mètre cube de béton les quantités volumiques des différents constituants : ciment, adjuvant, eau et air occlus :

$$[\text{Sable de dunes}] = 1000 - (119,3 + 1,75 + 230 + 60)$$

$$[\text{Sable de dunes}] = 589 \text{ l/m}^3$$

Etant donné la masse volumique réelle de ce sable de dunes égale à 2591 kg/m³, le dosage massique en sable de dunes est estimé à 1526 kg/m³.

On obtient donc une formulation théorique du béton de sable à base de sable dunaire :

Ciment (CPJ) :375 kg /m³
 Superplastifiant :1,87 kg /m³
 Eau de gâchage :230 l /m³
 Sable de dunes :1526 kg /m³

E / C	Temps d'écoulement (secondes)	Masse volumique apparente théorique (kg/m ³)	Masse volumique apparente réelle (kg/m ³)
0,61	20	2132,90	2094,76

On remarque que la quantité d'eau admise n'est pas suffisante pour avoir un béton de sable maniable ; ceci est dû essentiellement à la finesse du sable utilisé.

On doit donc rajouter de l'eau jusqu'à avoir un mouillage complet des grains et aboutir à la maniabilité recherchée.

On procède à la correction de la formulation théorique par l'équation itérative (Chapitre II, §3.2.1) :

$$S1 = 1526 - (2132,90 - 2094,76) - 2,591 \times 7$$

$$S1 = 1469,86 \text{ kg/m}^3$$

E / C	Temps d'écoulement (secondes)	Masse volumique apparente théorique (kg/m ³)	Masse volumique apparente réelle (kg/m ³)
0,63	12,5	2139,87	2108,50

$$S2 = 1469,86 - (2139,87 - 2108,50) - 2,591 \times 2$$

$$S2 = 1433,21 \text{ kg/m}^3$$

E / C	Temps d'écoulement (secondes)	Masse volumique apparente théorique (kg/m ³)	Masse volumique apparente réelle (kg/m ³)
0,64	9,70	2142	2120,20

Pour rappel, la composition du béton de sable de dunes, corrigée expérimentalement, et la suivante :

Ciment	375 kg/m ³
Superplastifiant	1,87 kg/m ³
Eau de gâchage	239 l/m ³
Sable de dunes	1433,21 kg/m ³

VII.5- Composition optimale :

Une étude a été faite sur un béton de sable de dunes pour quantifier ces effets avec ajouts de gravillon 3/8 mm et de sable concassé 0/3 mm. La moitié de la quantité de sable dunaire obtenue lors de la formulation de base, est remplacée par ces deux matériaux à des proportions complémentaires à 50% et variant par pas de 10%. Parmi ces compositions, celle qui a paru la plus intéressante : résistance relative en traction et en compression plus grandes, est composée de 30% de gravillon et 20% de sable concassé. La composition adoptée pour la suite de notre formulation est celle optimisée à 50% de la formulation de base avec 30% de gravillons et 20% de sable concassé, on va ensuite étudier son comportement.

Ciment	375 kg/m ³ .
Superplastifiant	1,8 kg/m ³ .
Sable de dunes	716,6 kg/m ³ .
Sable concassé	286,64 kg/m ³ .
Gravillon	430 kg/m ³ .
Eau	216,8 l/m ³ .

E/C	G/S	Temps d'écoulement (secondes)
0,58	0,43	10,8

Chapitre VIII : Comportement d'un béton de sable de dunes

VIII.1- La résistance à la compression :

La mesure de la résistance à la compression est faite selon un essai dit de compression simple où l'effort d'écrasement appliqué est uni axial. On a effectué l'essai sur deux types d'éprouvettes (10x10x10)cm et ($\varnothing=16$, H=32)cm et pour les deux formulations BS0 et BSG.

Les valeurs moyennes des résistances obtenues sur trois éprouvettes à 7 et 28 jours sont données dans le tableau suivant :

	Résistance à la compression (MPa)			
	Cube (10x10x10) cm		Cylindre (16 \varnothing , 32) cm	
	7 jours	28 jours	7 jours	28 jours
BS0	7,34	11,27	6,12	10,93
BSG	14,02	18,38	13,47	25,25

On remarque clairement que notre composition optimale (BSG) présente une bonne résistance à la compression, comparable à celle des bétons classiques. Ceci est dû essentiellement à l'augmentation de la compacité suite à la correction granulométrique par l'apport du sable concassé et du gravillon.

Il faut noter aussi la bonne adhérence du mélange ; la nature calcaire des deux matériaux correcteurs créerait une liaison épitaxique avec le ciment (constitué essentiellement de clinker).

La résistance à la compression du béton de sable BS0 est faible, cette chute de résistance est due à une grande porosité du sable dunaire utilisé ainsi qu'un rapport E/C supérieur à 0,5.

Il ne fait pourtant pas de doute qu'un tel effet d'échelle existe sur un matériau hétérogène comme le béton et que la résistance en compression diminue lorsque la taille des pièces augmente. Le rapport des résistances (cube/ cylindre) est proche de la valeur de 1,04.

VIII.2- La résistance à la traction :

On a effectué un essai de traction par flexion sur des éprouvettes prismatiques de dimensions (4x4x16) cm dont les résultats (moyenne de trois (03) essais) sont présentés dans le tableau ci dessous :

	Résistance à la traction (MPa)			
	7 jours		28 jours	
	F (N)	Rt (MPa)	F(N)	Rt (MPa)
BS0	1150	1,29	1325	1,49
BSG	2350	2,64	2955	3,32

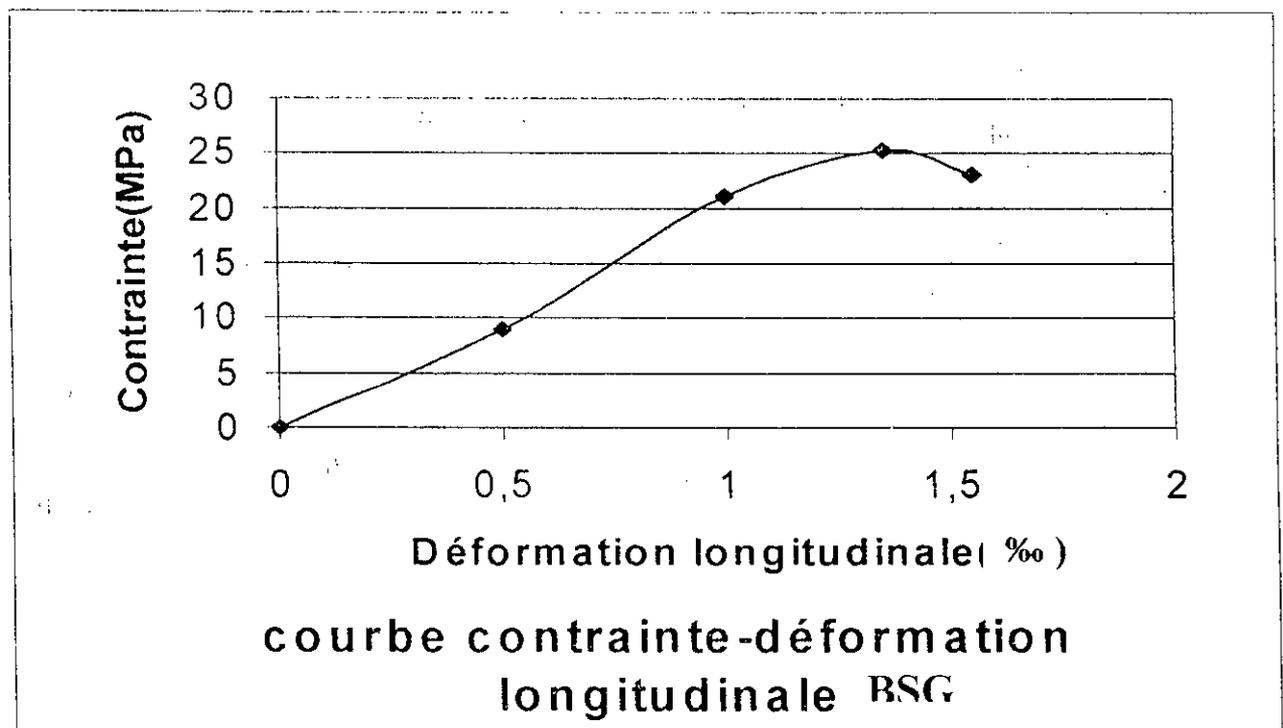
VIII.3- Loi de comportement :

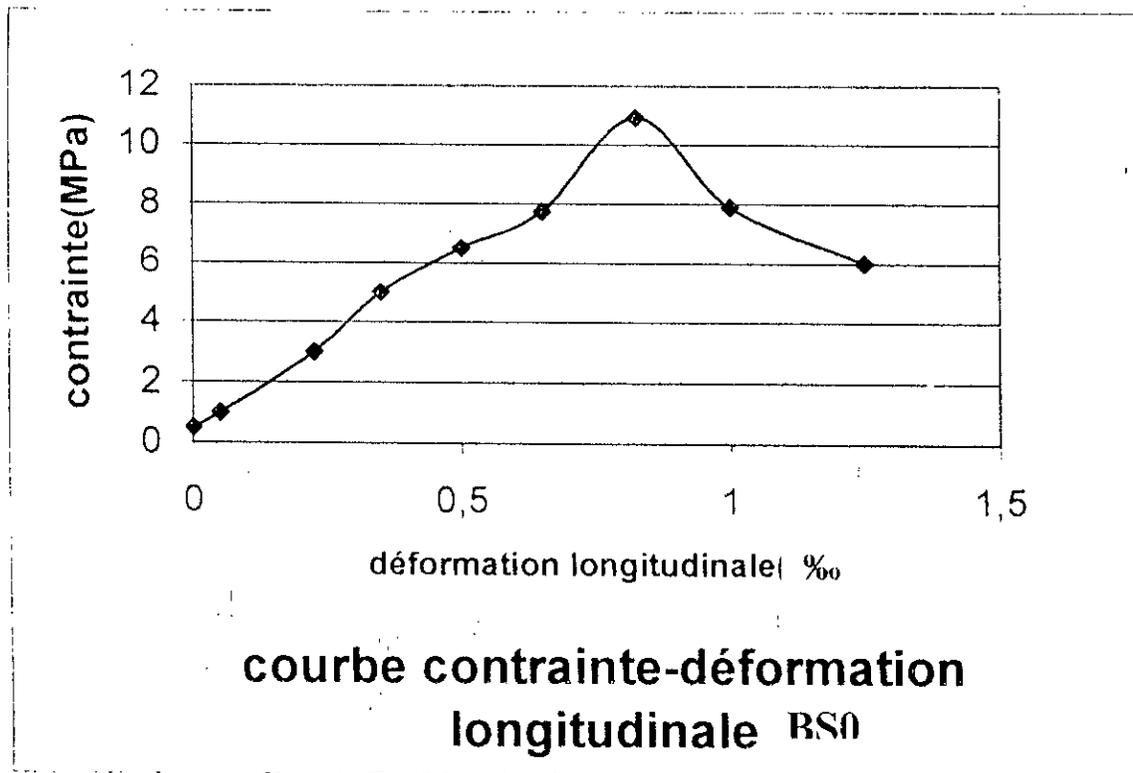
Les deux compositions étudiées sont soumises à des essais de comportement pour mieux les caractériser (courbes contrainte-déformation).

Pour cela on a essayé de réaliser un essai d'extensométrie sur des éprouvettes cylindriques d'élancement 2 ($\varnothing=16\text{cm}$) qui nous permet de mesurer la déformation dans les deux sens (longitudinale et transversale), mais malheureusement l'extensomètre n'était pas disponible au niveau du CNERIB

Après avoir effectué un essai de compression simple sur les mêmes éprouvettes, on a obtenu des courbes contrainte-déformation longitudinale à l'aide d'un logiciel, la lecture des valeurs de déformations transversales était impossible sur le comparateur placé au milieu de la surface latérale de l'éprouvette, vu que le temps d'écrasement était très court (8secondes).

VIII.3.1- Courbes contrainte-déformation longitudinale :





La courbe contrainte-déformation longitudinale n'est pas linéaire, elle comporte trois (03) phases :

- **1^{ère} phase** : Un comportement élastique quasi-linéaire du béton.

Pour le béton de sable chargé, cette phase s'étend jusqu'à une déformation élastique $\epsilon_{el}=0,50\%$ qui correspond à $\sigma = 9$ MPa (35% de la contrainte uni-axiale) alors que pour le béton de sable elle ne dépasse pas une déformation $\epsilon_{el}=0,25\%$. La pente à l'origine de cette courbe (droite) est le module de déformation longitudinale à l'origine. (loi de HOOK $\sigma = E \times \epsilon$)

$$E_{b0} = \text{tga}_0 = \text{cst}$$

- **2^{ème} phase** : Cette phase est caractérisée par une allure parabolique sur la courbe contrainte-déformation longitudinale jusqu'à un seuil correspondant à la contrainte maximale de chaque échantillon. Le béton a un comportement plastique où on observe le développement de la microfissuration jusqu'à la rupture, dans ce cas on définit le module d'élasticité sécant ; pentes des droites joignant l'origine à un point donné de l'allure parabolique.

La fin de cette phase correspond pour le béton de sable chargé à la déformation relative $\varepsilon = 1,35\%$ et pour le béton de sable à $\varepsilon = 0,85\%$ alors que pour des bétons classiques cette déformation est de l'ordre de 2% (diagramme contrainte-déformation des bétons classiques).

- **3^{ème} phase** : Caractérisée par une fissuration généralisée, propagation de la rupture et développement des surfaces de fractures. La déformation augmente en même temps que la contrainte de rupture diminue. On observe ce phénomène sur la courbe contrainte-déformation longitudinale des deux échantillons comme pour le béton classique par une branche descendante. La pente descendante de cette branche montre le caractère fragile plus ou moins accentué du béton. Le béton de sable chargé est moins fragile puisque cette pente est quasi-horizontale alors qu'il est quasi-verticale pour le béton de sable se qui traduit sa fragilité.

VIII.3.2- Module d'élasticité :

Le module de déformation longitudinale à l'origine est donné par la tangente de la courbe contrainte-déformation longitudinale, Ce module présente une grande utilité, mais elle est quand même limitée. On peut déterminer un module tangent en tout point de la courbe contrainte-déformation, mais ce module ne s'applique qu'à de très petites variations de la charge aux alentours du point considéré.

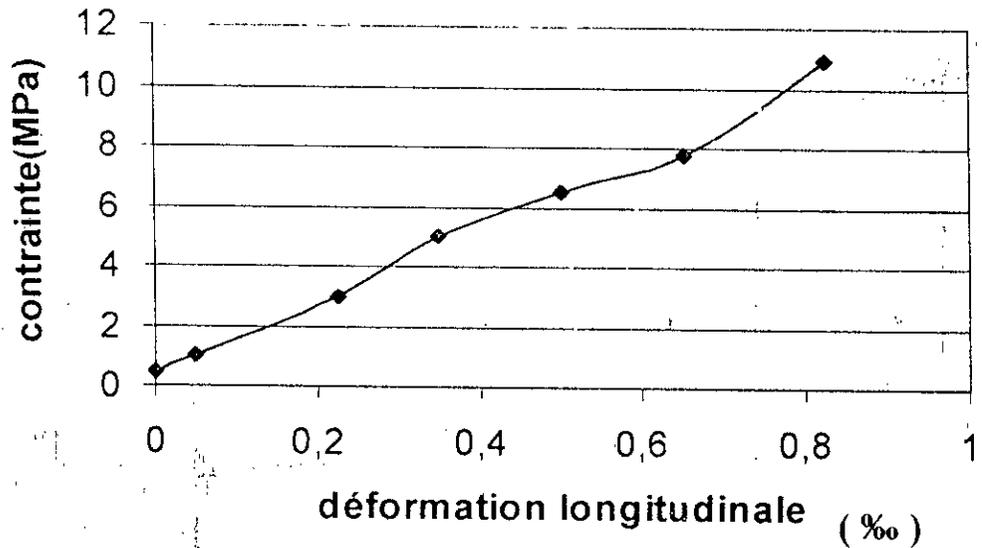
Pour un intérêt pratique, on détermine le module d'élasticité sécant. On peut se contenter de la courbe contrainte-déformation longitudinale puisqu'on n'a pas besoin de la branche descendante de cette courbe, le module d'élasticité tangent à l'origine :

- ◆ Pour le béton de sable chargé : **$E (14 \text{ MPa}) = 18\ 666 \text{ MPa}$** .
- ◆ Pour le béton de sable : **$E (8 \text{ MPa}) = 12\ 307 \text{ MPa}$** .

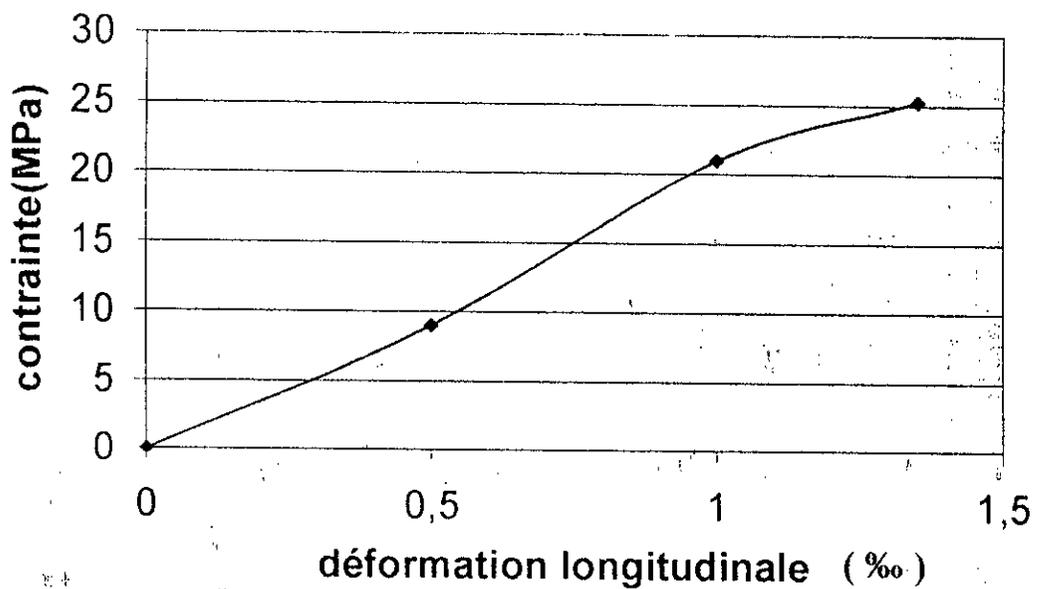
La valeur du module d'élasticité du béton de sable est faible par rapport à celle du béton de sable chargé. Celui-ci présente un module d'élasticité intéressant de l'ordre de $20\ 000 \text{ MPa}$.

Un béton de sable ayant une résistance à la compression entre 24 et 30 MPa a également un module d'élasticité égal à 22 000 MPa à 28 jours [17] alors que pour des bétons classiques ce module varie de 20 à 50 GPa (selon la composition du béton).

En augmentant le diamètre des plus gros grains on obtient une amélioration du module d'élasticité.



**courbe contrainte-déformation
longitudinale tronquée BS0**



**courbe contrainte-déformation
longitudinale tronquée BSG**

Conclusion générale

L'objectif de cette étude était de trouver une formulation de béton de sable de dunes capable de prendre une place parmi les bétons classiques destinés aux structures dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux.

En formulant notre béton, on a adopté une approche expérimentale présentée dans le chapitre II, qu'on a ensuite tiré à partir d'elle une formulation optimale, de telle sorte que 50% du sable de dunes est remplacée par un sable concassé et un gravillons à des proportions égales respectivement à 20% et 30%.

Lors de l'écrasement des éprouvettes de béton de sable de dunes (BS0) au laboratoire, on a remarqué que la structure (interne) de ce dernier présente un nombre important de vides, cela se traduit par la grande porosité du sable dunaire ainsi qu'un dosage insuffisant en fines (qui n'est autre que le ciment). C'est pour cela qu'on a obtenu des résistances à la compression faibles.

Par ailleurs, le béton de sable chargé a donner des résistance à la compression très intéressantes du fait de l'optimisation de sa compacité par l'ajout des deux matériaux correcteurs. Malgré le dosage faible en gravillons ($G/S < 0,5$) on peut parler du phénomène d'occupation des vides inter-granulaire : les gravillons créent des macrovides que l'on peut remplir par du sable concassé et les vides de ce dernier par le sable de dunes qui est très fin et enfin le ciment se loge dans les microvides de ce dernier.

Il faut noter aussi, la relation épitaxique que peut exister entre deux matériaux correcteurs de nature calcaire et le ciment qui contient un grand pourcentage de calcaire.

En traçant les courbes contrainte-déformation des deux bétons étudiés, on constate que leur comportement, comme tout autre matériau à base de ciment est analogue à celui des bétons classiques vis-à-vis de la forme de la courbe contrainte-déformation. On a obtenu un module d'élasticité du béton de sable chargé de l'ordre de 20 000 MPa. Sachant que pour des bétons de sable ayant des modules d'élasticité égale à 21 000 MPa pour des résistances en compression entre 24 et 30 MPa et le module d'élasticité des bétons de

sable classiques compris entre 20 000 et 50 000 MPa. On peut adopter le béton de sable chargé comme matériaux de construction puisqu'il possède des caractères intéressants et qu'il est considéré comme matériau économique et rentre dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux.

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 grossier. 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 lavante :

La solution lavante 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 lavante, 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 lavante 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 :

Eprouvettes 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 règle ;
- 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 muni 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, muni 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 lavante 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 lavante.

En descendant le tube lavant dans l'éprouvette, rincer les parois de l'éprouvette avec la solution lavante, 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.

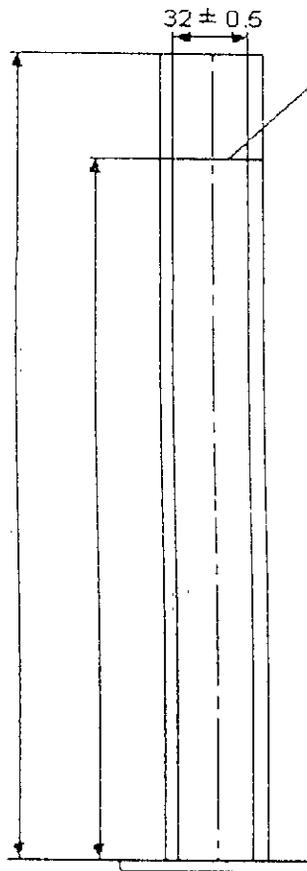


Figure 1: Eprovette d'équivalent de sable

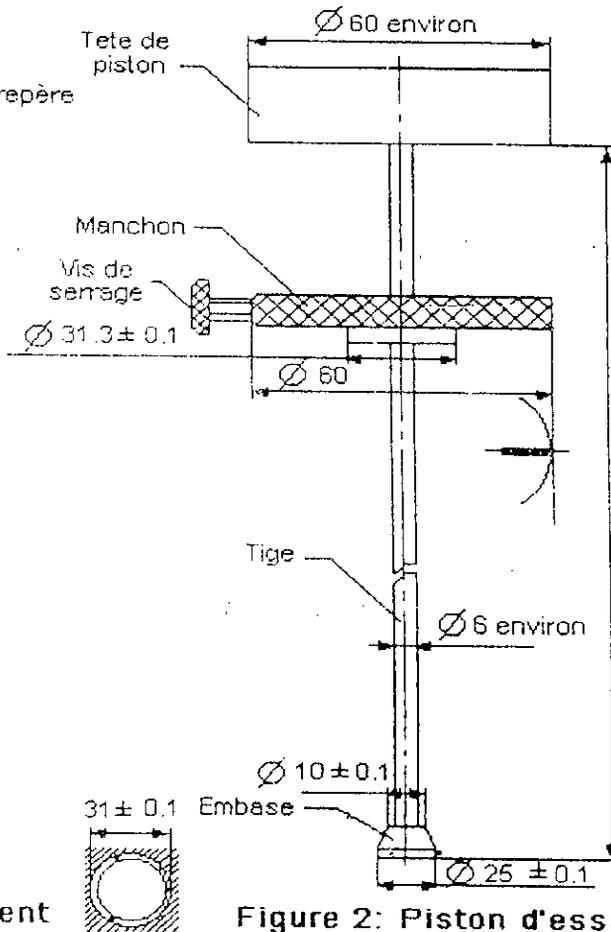


Figure 2: Piston d'essai

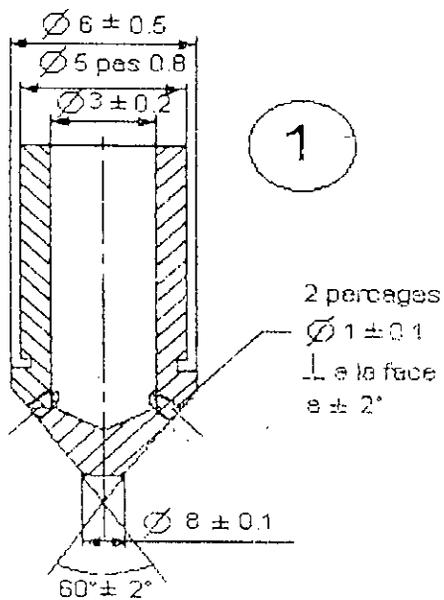


Figure 4. Détail de l'embout

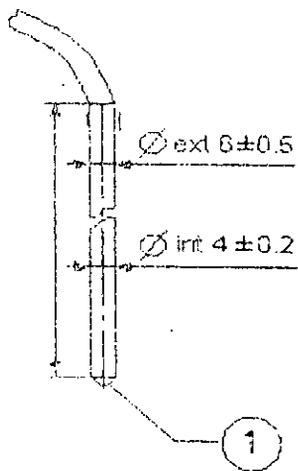


Figure 3: Tube iaveur

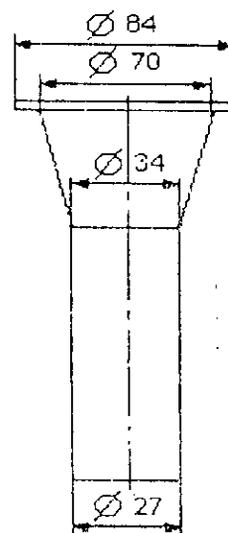


Figure 5: Entronoir

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 celcius (0°C à 100°C) ;
- Chronomètre (secondes) ;
- Enseinte 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 $2,5 \text{ cm}^3$ des volumes de solutions de bleu et de connaître la quantité totale injectée à $\pm 1 \text{ cm}^3$;
- 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 cm^3 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/ cm^2 , 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 $10 \text{ g/l} \pm 0,1 \text{ g/l}$ 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 $m > 200 D_{\text{max}}$.
- 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 près) 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 ± 10 cm³) d'eau déminéralisée et dispersée à l'aide de l'agitateur à ailettes (700 tr/min ± 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 1) 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'argilosité estimée du matériau (10 cm³ pour les matériaux très argileux). Au bout de 1 min ± 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'argilosité du matériau.

Chaque addition est suivie d'essai effectués 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 la 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 :

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

V. Appareillage :

V.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 égal à 0,05 mm :

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

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

Ciment

Le ciment utilisé, est un ciment de portland CPJ CEM II/A 32,5, il est livré par la société de distribution sodismac, dans des sacs de 50 kg ;

Définition

Le ciment Portland composé CPJ CEM II A 32.5 résulte de la mouture : D'au moins 80% de CLINKER PORTLAND, du complément à 100% d'un ou plusieurs constituants secondaire : (Laitier, filer calcaire,...) ;

De sulfate de calcium sous forme de gypse en tant que régulateur de prise.

CARACTERISTIQUES PHYSICOMECHANIQUES

Les résistances à la compression du *CPJ CEM II A 32.5* font l'objet d'un contrôle statistique faisant apparaître

Une valeur moyenne des résultats obtenus à 28 jours voisine de 450 Bars (45 MPa). La majorité des résultats obtenus se situe entre (32.5 et 52.5 MPa).

Ces deux dernières valeurs sont les limites inférieure et supérieure de la classe de résistance du *CPJ CEM II A 32.5*. En tout état de cause, les valeurs minimales garanties sont :

- ✓ 175 Bars (17.5 MPa) à 7 jours.
- ✓ 325 Bars (32.5 MPa) à 28 jours.
- ✓ Le temps de début de prise à 20°C,
- ✓ Mesuré sur pâte pure est supérieur à 90.

Le retrait à 28 jours du mortier normal est Inférieur à 800 µm/m. L'expansion mesurée à chaud et à froid, sur éprouvette de pâte pure est inférieure à 10 mm.

CARACTERISTIQUES CHIMIQUES

- La **proportion** des sulfates (S03) dans le Ciment est inférieure à 4% ;
- La teneur en chlorures (Cl-) est inférieure à 0.10% ;

L'addition des sels solubles tels que chlorures ou sulfates est interdite.

EMPLOIS COURANTS

- ✓ Maçonnerie
- ✓ Béton courant (non armé ou faiblement armé : remplissage fondations, portées réduites, décoffrage différé) ;
- ✓ Béton armé sollicité : structure porteuse, etc... ;
- ✓ Produits préfabriqués en béton non armé (blocs, hourdis, etc..) ; Stabilisation des sols et graves ciment ;

- ✓ Bétons routiers ;
- ✓ Travaux en grandes masses moyennement sollicités qui exigent une chaleur d'hydratation modérée ;
- ✓ Travaux de fondation en milieu non agressif.

CONTRE-INDICATION

- ✓ Ouvrages en milieux agressifs (eaux salines, eaux séléniteuses,...). Travaux souterrains, fondations importantes en milieux agressifs.
- ✓ Liants incompatibles.
- ✓ Lorsque l'aspect entre en ligne de compte (béton apparent p.ex.) ; il convient de prêter une attention particulière aux constituants qui peuvent modifier la teinte.

RECOMMANDATIONS ET CONSEILS

Il convient de s'attacher plus particulièrement :

a) Lors de la préparation du béton :

- ✓ Au choix du ciment pour lequel il convient de s'assurer qu'il satisfait à l'essai de stabilité.
- ✓ Au dosage en ciment : un excès provoque une tendance à la fissuration, une insuffisance un manque d'homogénéisation dans la résistance.
- ✓ A la propreté des granulats et à l'élimination des sables et granulats argileux.
- ✓ A limiter la quantité d'eau en fonction des moyens de serrage.

b) Lors de la mise en œuvre :

- ✓ A ne pas couler le béton au contact d'éléments poreux secs.
- ✓ A éviter toute ségrégation du béton (éviter les grandes hauteurs de chute,...).
- ✓ A atteindre la compacité maximale compatible avec les moyens de mise en œuvre.
- ✓ A lier au mieux les gâchées successives en s'attachant notamment à vibrer convenablement la zone de transition entre les gâchées.

c) Pendant le durcissement :

- ✓ A éviter la dissiccation rapide des zones superficielles en maintenant le béton humide ou en employant des produits de cure.
- ✓ Bien que l'évolution des caractéristiques du béton permette des décoffrages rapides, il faut toutefois éviter qu'ils ne soient prématurés afin de conserver au mieux les résistances à long terme.

FICHE TECHNIQUE

MEDAFLOW 30

Superplastifiant - haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le MEDAFLOW 30 est un superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération. Il est conçu à base de polycarboxylates qui améliorent considérablement les propriétés des bétons.

Le MEDAFLOW 30 permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable. Le MEDAFLOW 30 ne présente pas d'effet retardateur.

CARACTERISTIQUES

- Forme Liquide
- Couleur Jaunâtre
- pH 6 - 6,5
- Densité $1,07 \pm 0,01$
- Teneur en chlore < 1 g/L

PROPRIETES ET EFFETS

Grâce à ses propriétés le MEDAFLOW 30 permet :

Sur béton frais :

- l'obtention d'un E/C très faible
- l'amélioration considérable de la fluidité - une très bonne maniabilité
- un long maintien de l'ouvrabilité
- d'éviter la ségrégation de faciliter la mise en oeuvre du béton

Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme
- de diminuer la porosité

- d'augmenter la durabilité
- de diminuer le retrait et le risque de fissuration

Les renseignements donnés dans cette fiche sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour 11 est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier

GRANITEX NOUVEAUX PRODUITS

Zone Industrielle - B.P. 85 - 16270 Tél.
021.51.66.81 & 021.51.65.55 Fax
021.51.64.22 / 021.51.65.23

e-mail : info@granitex.dz

site web : www.granitex.dz

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto-plaçants
- Bétons auto-compactants
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux

DOSAGE

Plage de dosage recommandée : 0,5 à 2,0 % du poids de ciment

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

MODE D'EMPLOI

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le MEDAFLOW 30 est conditionné en bidons de 10 l, fûts de 56 et de 225 litres.

Délai de conservation : 12 mois dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur

($5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$).

Oued-Smar - Alger

Le MEDAFLOW 30 est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

Références bibliographiques

- [1] **BARON J. et OLLIVIER J.P.** , 1999 , Les bétons- Bases et données pour leur formulation, Edition EYROLLES, Paris—France.
- [2] **BEN DHIA M.H.** , jan-fév. 1998 , Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière en milieu saharien, Bull. Lab. Ponts et Ch., N°213-réf 4159, Paris—France.
- [3] **BENMALEK M.** , 1992 , Contribution à l'étude des bétons de sable dunaire pour éléments de structure, Thèse de magistère, ENP, Alger—Algérie.
- [4] **CHANVILLARD G. et BASUYAUX O.** , sept-oct. 1996 , Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées, Bull. Liaison Lab. Ponts et Ch., N°205-réf 4047, Paris—France.
- [5] **CHAUVIN J.J. et GRIMALDI G.** , sept-oct. 1988 , Les bétons de sable, Bull. Liaison Lab. Centrale Ponts et Ch., N°157-réf 3336, Paris—France.
- [6] **CHAUVIN J.J.** , juill-août 1991 , Les bétons de sable en Union Soviétique, Bull. Liaison Lab. Centrale Ponts et Ch., N°174-réf 3589, Paris—France.
- [7] **CHEMROUKH M.** , juin 2000 , Le béton de sable :Identification et utilisation du matériau, Conférence internationale de géoengineering IGC/USTHB, Alger—Algérie.
- [8] **CNERIB** , 1991 , Colloque maghrébin sur les actions pour le développement de la construction en matériaux locaux, Biskra—Algérie.
- [9] **DREUX G.** , 1985 , Nouveau guide du béton, Edition EYROLLES, Paris—France.

- [10] **DUPAIN R. et LANCHON R.** , 1999 , Granulats, sols, ciments et bétons : caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire, réf p0050 B99, Paris—France.
- [11] **DURIEZ M. et ARRAMBIDE J.** , 1961 , Nouveau traité de matériaux de construction-tome 1, Edition DUNOD, Paris—France.
- [12] **DE LARRARD F. et DELLOC A.** , jan-fév. 1999 , L'influence du granulat sur la résistance à la compression des bétons, Bull. liaison Lab. Centrale Ponts et Ch., N°219, Paris—France.
- [13] **GHRIB A.** , mars 2003 , Etude d'un béton de sable de dune pour pistes aéronautiques, Thèse de magistère, ENP, Alger—Algérie.
- [14] **GUENNOUN R.** , juin 2003 , Etude et formulation d'un béton de sable de dune, P.F.E., ENP, Alger—Algérie.
- [15] **PAILLERE A.M.** , 1982 , " Les adjuvants " in béton hydraulique, Presse de l'ENPC, Paris—France.
- [16] **SAUTEREY R. et BARON J.** , 1982 , Les bétons hydrauliques, connaissance et pratique, Presse de l'ENPC, Paris—France.
- [17] **SABLOCRETE** , 1994 , Bétons de sable, caractéristiques et pratiques d'utilisation, ENPC, Paris—France.
- [18] **SETRA et LCPC** , 1985 , Réalisation des assises de chaussées en sables traités aux liants hydrauliques, Presse du LCPC, Paris--France.
- [19] **NAFA A. et BATATA A.** , juin 1989 , Béton de sable de concassage, P.F.E. , ENP, Alger--Algérie.