

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Mohammed Seddik Ben Yahia - Jijel
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil et Hydraulique

Mémoire de fin d'Etudes pour l'obtention de Diplôme de
MASTER Académique en Génie Civil
Option : Voies et Ouvrages d'Art

Thème

Etude des bétons de sable

Présenté par :

M^{elle} Belfriekh Ahlame

M^{elle} Talla Nadjat

Encadré par :

M^{elle} S. Ben Messaoud

Promotion : Juillet 2019.



Remerciements

Nous tenons, d'abord à remercier en premier lieu et avant tous le bon Dieu le tout puissant, qui nous donne la force, la volonté et la patience de mener à bien ce modeste travail

Nous remercions en particulier nos très chers parents pour leurs soutiens et leurs patiences.

*On souhaite adresser nos remerciements les plus sincères à notre encadreur Mlle **Ben Messaoudé Sabah** pour la confiance qu'elle nous a accordée, pour sa soutien constant ainsi que pour ses précieux conseils qu'elle nous a donnés tout au long de ce travail.*

Nos remerciements s'adressent aussi aux membres de jury pour l'honneur d'évaluer notre Travail.

Nous remercions également tous nos enseignants du département de Génie Civil et Hydraulique de l'Université de Jijel sans exception qui ont contribué à notre formation avec beaucoup de compétence et de dévouement.

Nos plus vifs remerciements s'adressent à toute personne ayant aidé de près ou de loin à la réalisation de ce travail

*À tous nos amies et collègues de notre promotion Master II 2019.
Merci enfin à tous ceux qui ont lu et liront ce mémoire...*

Dédicace

*D'un sentiment plein d'amour, de sincérité et
fidélité, je dédie ce travail :*

*A mes chers parents : ma mère Fatiha et mon
père Hocine*

A qui je dois ce qui je suis

*Pour votre amour, votre compréhension, votre
patience et votre tendresse sont toujours pour
moi sans limite, vous m'avez soutenu le long de
mes études et vous avez tout sacrifié pour ma
réussite, que Dieu vous garde en bon santé.*

A mes chères sœurs : Badiaa, Zohra et Chaima.

A mes chers frères : Moustafa et Samir.

*Pour leurs soutiens infinis et leurs aides
incessantes, à qui je souhaite un meilleur
avenir.*

*A tous les membres familles de Belfriekh et Ben
Hammada.*

*A mes très chères amies qui m'ont toujours
encouragé : Marwa, Zhor, Khaoula et mon
binôme Nadjat.*

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

À toute la promotion de génie civil 2019

Ahlame

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

*ALLAH le Tout Puissant qui m'a pourvu jusqu'à
ce jour de tout.*

*Mon très chère père Hocine : lui qui a instauré
l'intérêt pour moi d'aller à la recherche de la
connaissance.*

La lumière de mes yeux :

*Ma très chère mère, SAIDA, ma première
enseignante, qui m'a Soutenu toujours par son
amour, sa*

*compréhension et son encouragement, qu'elle
trouve ici l'expression de ma vive reconnaissance*

Mes très chères sœurs : Sabah, Zahra.

*Mes Frères : Tayeb et Nouraddine, que cette
œuvre soit votre honneur.*

*Mon cher Cousin Mehdi, pour son soutien
indéfectible et sa disponibilité.*

*tous les membres de la famille petits et grands.
tous ceux que j'aime et que m'aiment surtout
Mohamed, Fouad, Sara Meriem, Mona, Halima,
Ferial.*

*l'ensemble des étudiants de la promotion M2 de
l'année 2018/2019 surtout : Ahlem, Mohamed,
Rami.*

Tous mes amis de l'université sans exception.

Résumé

Les bétons de sable font partie des nouveaux matériaux de Génie civil permettant de valoriser des ressources naturelles en sable. Ce type de béton utilise une quantité de la fumée de silice qui lui confère ses performances très élevées. Le rôle essentiel des fumées de silices en substitution d'une partie du ciment, mais également en extension du squelette granulaire total, est mis en évidence.

L'objectif principal de cette étude est d'apporter une contribution pour optimiser la formulation du béton de sable par la méthode de l'université de Sherbrooke, mais aussi de diminuer les coûts de fabrication des Bétons de Sable, avec l'utilisation des ajouts (fumée de silice), afin d'améliorer la résistance à la compression.

Dans un premier temps, nous avons caractérisé les matériaux utilisés. Puis, nous avons procédé à la recherche d'une formulation de BS, adéquate en terme de mise en œuvre par la méthode de l'université de Sherbrooke, en utilisant un ciment (CPJ CEM/II A 42.5), une fumée de silice (MEDAPLAST HP), un superplastifiant (MEDAFLOW 30) et l'utilisation de trois rapports de E/C (0,45/0,50/0,55/0,60/0,92). Et puis l'étude de la résistance à la compression, de l'âge de 7, 14 et 28 jours et le contrôle de l'absorption et le ramollissement du béton de sable à 28 jours.

Néanmoins, la granulométrie du sable utilisées présente un handicap avec ses grains fins influant plus particulièrement sur les caractéristiques des bétons de sables. De ce fait, nous avons procédé à une correction de sa granulométrie par un sable siliceux naturel (0/1) en utilisant la proportion de (20% S1+ 80% S2). Le sable obtenu par cette correction présente une amélioration à la fois du module de finesse.

Enfin, nous montrons que des bétons ouvrables (facilité de mise en œuvre), l'absence de ségrégation, il faudra développer l'exploitation de ce type du béton et améliorer ses propriétés mécaniques.

Les résultats obtenus montrent une amélioration de la résistance mécanique du béton de sable. Cette amélioration est gouvernée par la correction granulométrique du sable utilisé et l'ajout de la fumée de silice. Les meilleurs résultats ont été obtenus par les mélanges préparés à base de (20% S1 et 80% S2) et de l'utilisation de 10% de la fumée de silice avec un rapport E/C de 0.50.

Mots clés : béton de sable, résistances mécaniques, formulation, correction granulométrique, fumée de silice.

Abstract

Sand concretes are one of the new civil engineering materials used to develop natural sand resources. This type of concrete uses a quantity of silica fume that gives it its very high performance. The essential role of the silica fumes in substitution of a part of the cement, but also in extension of the total granular skeleton, is highlighted.

The main objective of this study is to make a contribution to optimize the formulation of sand concrete by the method of the University of Sherbrooke, but also to reduce the manufacturing costs of sand concrete, with the use of additions (silica fume), to improve the compressive strength.

At first, we characterized the materials used. Then, we proceeded to search for a formulation of BS, adequate in terms of implementation by the method of the University of Sherbrooke, using a cement (CPJ CEM / II A 42.5 Mpa), a silica fume (MEDAPLAST HP), a superplasticizer (MEDAFLOW 30) and the use of three I / C ratios (0.45/0.50 / 0.55 / 0.60/0.92). And then the study of the compressive strength, the age of 7, 14 and 28 days and the control of the absorption and softening of sand concrete at 28 days.

Nevertheless, the granulometry of the sand used has a handicap with its fine grains having a particular influence on the characteristics of the sand concretes.

As a result, we proceeded to a correction of its granulometry by a natural siliceous sand (0/1) by using the proportion of (20% S1 + 80% S2). The sand obtained by this correction shows an improvement of both the fineness module.

Finally, we show that concrete concretes (ease of implementation), the absence of segregation, it will develop the exploitation of this type of concrete and improve its mechanical properties.

The results obtained show an improvement in the mechanical strength of sand concrete. This improvement is governed by the granulometric correction of the sand used and the addition of silica fume. The best results were obtained by the mixtures prepared based on (20% S1 and 80% S2) and the use of 10% of the silica fume with an E / C ratio of 0.50.

Key words: sand concrete, mechanical strength, formulation, granulometric correction, silica fume.

ملخص

الخرسانة الرملية هي واحدة من مواد الهندسة المدنية الجديدة المستخدمة لتطوير موارد الرمال الطبيعية. يستخدم هذا النوع من الخرسانة كمية من دخان السيليكا الذي يمنحه أداءً عاليًا للغاية. يتم إبراز الدور الأساسي لدخان السيليكا في استبدال جزء من الإسمنت، ولكن أيضًا في تمديد الهيكل العظمي الكلي.

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تقديم مساهمة لتحسين صياغة الخرسانة الرملية بطريقة جامعة شيربروك، ولكن أيضًا لتقليل تكاليف تصنيع الخرسانة الرملية، مع استخدام الإضافات (دخان السيليكا)، لتحسين قوة الضغط.

في البداية، وصفنا المواد المستخدمة. بعد ذلك شرعنا في البحث عن تركيبة الخرسانة الرملية، كافية من حيث التنفيذ بطريقة جامعة شيربروك، باستخدام الأسمنت (CPJ CEM / II A 42.5)، دخان السيليكا (MEDAPLAST HP) و الملدن المتفوق (MEDAFLOW 30) واستخدام ثلاث نسب E/C (0.45/0.50 / 0.55 / 0.60/0.92) ثم دراسة قوة الانضغاط، عمر 7 و 14 و 28 يومًا والتحكم في امتصاص وتليين رمل الخرسانة في 28 يومًا.

ومع ذلك، فإن حبيبات الرمل المستخدمة لها عائق مع وجود حبيباتها الرقيقة لها تأثير خاص على خصائص خرسانات الرمل.

نتيجة لذلك، شرعنا في تصحيح القياس الحبيبي بواسطة رمل سيليسي طبيعي (1/0) باستخدام نسبة

80 (S1 + 20%) / (S2) تظهر الرمال التي تم الحصول عليها بواسطة هذا التصحيح تحسنًا في كل من وحدة الصفاء.

أخيرًا، نظهر أن الخرسانة الملموسة (سهولة التنفيذ)، وغياب العزل، ستعمل على تطوير استغلال هذا النوع من الخرسانة وتحسين خواصها الميكانيكية.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها تحسنًا في القوة الميكانيكية للخرسانة الرملية. يخضع هذا التحسن للتصحيح الحبيبي للرمل المستخدمة وإضافة دخان السيليكا. تم الحصول على أفضل النتائج عن طريق التراكيب المحضرة على أساس (20% S1 + 80% S2) واستخدام 10% من دخان السيليكا مع E / C بنسبة 0.50.

الكلمات المفتاحية: رمل الخرسانة، القوة الميكانيكية، التركيب، التصحيح الحبيبي، دخان السيليكا.

Sommaire

Remerciements.....	i
Dédicace.....	ii
Résumé.....	iv
Abstract.....	v
ملخص.....	vi
Sommaire.....	vii
Liste des figures et liste des tableaux	xi
Liste des abréviations.....	xiv
Introduction générale.....	1

Chapitre I

Etude bibliographique

I.1. Introduction.....	2
I.2. Historique.....	2
I.3. Définition	4
I.4. Les composants de béton de sable	4
I.4.1. Les sables	4
I.4.1.1. Classification des sables	5
I.4.2. les fines d'ajout.....	6
I.4.2.1. Le filler calcaire.....	8
I.4.2.2. Fumé de silice	8
I.4.2.2. Les cendres volantes	9
I.4.3. Les ciments.....	9
I.4.3.1. Définition.....	9
I.4.3.2. Classification des ciments	9
I.4.4. L'eau de gâchage.....	10
I.4.4.1. Différents états de l'eau dans la pâte de ciment durcissant	11
I.4.5. Les adjuvants.....	11
I.4.5.1. Définition.....	11
I.4.5.2. Classification des adjuvants.....	11
I.4.6. Autres ajouts.....	13
I.4.6.1. Les fibres	13

I.4.6.2. Les gravillons	14
I.4.6.3. Les colorants	14
I.5. Propriétés de béton de sable	15
I.5.1. Propriétés générales	15
I.5.1.1. Granulométrie et maniabilité	15
I.5.1.2. Granulométrie et résistance	17
I.5.2. Propriétés spécifiques	19
I.5.2.1. L'adhérence aux armatures	19
I.5.2.2. Durabilité des bétons de sable	21
I.5.2.3. Phénomène de ségrégation des constituants	23
I.5. 2.4. Résistance au gel et au dégel	23
I.5. 2. 5. Retrait	24
I.5. 2. 6. Fluage	26
I.6. Domaine d'application du béton de sable	27
I.6.1. Les bétons non vibrés	27
I.6.2. Les bétons projetés	27
I.6.3. Les travaux d'injection	28
I.6.4. La préfabrication d'éléments destinés à rester apparents	29
I.7. Fabrication, transport, mise en œuvre, contrôle de béton de sable	31
I.7.1 Fabrication	31
I.7.2 Approvisionnement, stockage, manutention	32
I.7.3. Dosage des constituants	32
I.7.4. Malaxage	33
I.7.4.1. Durée du malaxage	33
I.7.4.2. Les paramètres du malaxage	33
I.7.4.3. Ségrégation	33
I.7.4.4. Modalités de malaxage	34
I.7.5. Transport	34
I.7.6. Mise en œuvre du béton de sable	35
I.7.6.1. Préparation des coffrages	35
I.7.6.2. Vibration	35
I.7.6.3. Mise en place particulières	35
I.8. Intérêts et limites des bétons de sable	36
I.8.1. Intérêt des bétons de sable	36
I.8.2. Limites des bétons de sable	36

I.9. Comparaison entre béton de sable (BS) et béton ordinaire (BO)	37
I.9.1. Composants	37
I.9.2. Qualités essentielles	37
I.9.3. Méthodes de formulation	37
I.9.4. Particularité du béton	38
I.9.5. Domaines d'emploi	38
I.10. Conclusion	39

Chapitre II

Matériaux et formulation des bétons d'étude

II.1. Introduction	40
II.2. Caractérisation et formulation	40
II.2.1. Caractéristiques des matières premières utilisées	40
II.2.1.1 : Ciment	40
II.2.1.2. Granulats	42
II.2.1.4. Fumée de silice	45
II.2.1.5. Eau de gâchage	46
II.2.2. Formulation des bétons d'étude	46
II.2.2.1. La méthode de formulation de l'université de Sherbrooke	46
II.2.2.3. Formules de calculs	50
II.2.2.4. Fabrication des bétons, mise en place et conservation	55
II.3. Conclusion	58

Chapitre III

Présentation et discussion des résultats

III.1. Introduction	59
III.2. Méthodologie adaptée pour les manipulations	59
III.3. Essai réalisé à l'état frais	59
III.3.1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams (mesure d'ouvrabilité)	59
III.4. Essai réalisé à l'état durcis	62
III.4.1. Essai de compression	62
III.4.2. Préparation et positionnement des éprouvettes	62
III.4.3. Essai d'absorption d'eau	68
III.4.4. Essai de ramollissement	69

III.5. Conclusion.....	69
Conclusion général.....	71
Liste des références.....	73
Annexe.....	75

Liste des figures

Figure I.1 :	phare de Port-Saïd, réalisé en béton aggloméré.....	4
Figure I.2 :	Effet de l'ajout du superplastifiant sur la dispersion des grains de ciment (Amélioration du rendement cimentaire).....	12
Figure I.3 :	Différence entre le béton de sable chargé et le béton ordinaire.....	15
Figure I.4 :	Maniabilité en fonction du module de finesse du sable.....	16
Figure I.5 :	Influence de la nature du sable sur la maniabilité (Avec fines d'addition calcaires).....	17
Figure I.6 :	Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance.....	18
Figure I.7 :	Influence de la nature de l'addition sur le niveau de résistance.....	18
Figure I.8 :	Montre l'effet de la granulométrie sur la résistance.....	19
Figure I.9 :	Variation de l'adhérence d'une armature en fonction de la formulation.....	20
Figure I.10 :	Influence de la résistance en traction du béton de sable sur l'adhérence des armatures.....	21
Figure I.11 :	Courbe de distribution de la porosité en fonction des rayons des pores.....	22
Figure I.12 :	Eprouvettes non vibrées, non piquées.....	23
Figure I.13 :	Le retrait.....	24
Figure I.14 :	Evolution du retrait dans le béton de sable.....	25
Figure I.15 :	Le fluage.....	26
Figure I.16 :	Evolution du fluage dans le béton de sable.....	27
Figure I.17 :	Le béton de sable en projection (Projection sur surface ancienne).....	28
Figure I.18 :	Réalisation d'une piscine	28
Figure I.19 :	Le béton de sable dans la préfabrication.....	29
Figure I.20 :	Métro de Saint-Petersbourg. Voute mince en béton de sable, préfabriquée, à double courbure.....	30
Figure I.21 :	Une abondante ressource locale en sable présente un réel intérêt économique, et même quelquefois esthétique lorsqu'il est possible de s'affranchir d'un revêtement de surface.....	30
Figure I.22 :	Déroulement d'un film polyane (cure).....	31

Figure II.1 :	Les sables d'étude.....	42
Figure II.2 :	Courbes d'analyse granulométrique des sables utilisées.....	43
Figure II.3 :	Superplastifiant (MEDAFLOW 30).....	44
Figure II.4 :	Fumée de Silice.....	45
Figure II.5 :	Organigramme de la méthode proposée pour formuler des BHP.....	47
Figure II.6 :	Abaque Relation proposée entre le rapport eau/liant et la résistance à la compression.....	48
Figure II.7 :	Détermination du dosage en eau.....	49
Figure II.8 :	Dosage en gros granulat.....	49
Figure II.9 :	Représentation schématique d'un super plastifiant.....	51
Figure II.10 :	Forme d'éprouvettes d'étude.....	56
Figure II.11 :	Préparation des moules avant le remplissage.....	57
Figure II.12 :	Conservation des éprouvettes.....	57
Figure III.1 :	Résultats d'essai d'affaissement.....	60
Figure III.2 :	Essai de résistance à la compression (laboratoire de RIZZANI DE ECCHER).....	62
Figure III.3 :	Résultat d'essai de compression.....	63
Figure III.4 :	L'évolution de la résistance à la compression en fonction des BS avec différents rapports E/C après 7 jours.....	64
Figure III.5 :	L'évolution de la résistance à la compression en fonction des BS avec différents rapports E/C après 14 jours.....	65
Figure III.6 :	L'évolution de la résistance à la compression en fonction des BS avec différents rapports E/C après 28 jours.....	65
Figure III.7 :	L'évolution de la résistance à la compression en fonction des BS testés avec différents rapports E/C après 7, 14 et 28 jours.....	66

Liste des tableaux

Tableau I.1 :	Donnant le dosage minimum en ciment en fonction du diamètre maximal (D) du granulat employé.....	6
Tableau I.2 :	Résistance à la compression des ciments.....	10
Tableau II.1 :	Composition minéralogique.....	41
Tableau II.2 :	Propriétés chimiques du ciment utilisé.....	44
Tableau II.3 :	Propriétés physiques du ciment.....	41
Tableau II.4 :	Résistance mécaniques du ciment.....	42
Tableau II.5 :	Analyse granulométrique par tamisage des granulats utilisés.....	43
Tableau II.6 :	Caractéristiques physiques et mécaniques des granulats utilisés.....	44
Tableau II.7 :	Caractéristiques MEDAFLOW 30.....	45
Tableau II.8 :	Caractéristiques fumée de silice.....	45
Tableau II.9 :	Composition des différentes BS testés.....	53
Tableau II.10 :	Composition des différentes BS de la série 01.....	54
Tableau II.11 :	Composition des différentes BS de la série 02.....	54
Tableau II.12 :	Composition des différentes BS de la série 03.....	55
Tableau II.13 :	Séquence de malaxage des bétons.....	55
Tableau III.1 :	Résultats d'essai d'affaissement des différents bétons de sables étudié.....	60
Tableau III.2 :	Résultats d'essai d'affaissement de la série testée.....	60
Tableau III.3 :	Résistance à la compression des différents séries testés.....	63
Tableau III.4 :	Résistance à la compression des différents bétons de sables étudié.....	63
Tableau III.5 :	Coefficient d'absorption des différents bétons de sable étudié.....	68
Tableau III.6 :	Coefficient de ramollissement des différents bétons de sable étudié.....	69

Liste des abréviations

BS : Béton de sable

BO : Béton ordinaire

ENPA : École Nationale Polytechnique (en Algérie)

CNERIB : Centre National d'Études et de Recherches Intégrées du Bâtiment (en Algérie)

LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

CEBTP : Centre Expérimentale de Recherches et d'Études

URSS : Union des Républiques Socialistes Soviétiques

CPA : Ciment Portland Artificiel

CPJ : Ciment Portland Composé

CHF: Ciment de Haut Fourneau

CPZ: Ciment Pouzzolanique

CLC: Ciment composé (ou ciment au laitier et aux cendres)

HA : Haute Adhérence

LCL: Laboratoire Central Lesage

E/C : Rapport massique de l'eau sur ciment

G/S : Rapport massique de gravillon sur sable

MF : Module de finesse

S1 : Sable de Dune (Oued Zhour)

S2 : Sable de carrière (Grouz-Mila)

S3 : Mélange de 20% S1 et 80% S2

S4 : Mélange de 50% S1 et 50% S2

S5 : Mélange de 25% S1 et 75% S2

FS : Fumée de Silice

BHP : Béton à Haute Performance

Rc : Résistance en Compression

C : Masse de ciment

E : Masse d'eau

Ab : Coefficient d'absorption

Kram : Coefficient de ramollissement

Introduction générale :

Le béton, depuis longtemps, a trouvé sa place d'application dans les différents types de construction à savoir : les constructions civiles, industrielles et hydrauliques, son intérêt réside de sa grande facilité de mise en œuvre, sa résistance en compression, sa durabilité, son ouvrabilité et son coût acceptable.

Toutefois, ces bétons sont encore peu employés et leurs mises en œuvre ont encore un caractère exceptionnel, essentiellement à cause de leurs coûts élevés liés à l'utilisation importante de composants onéreux (fumée de silice, ciment, superplastifiant, et, dans une moindre mesure, de sable siliceux fin et très pur).

Béton dans lequel le sable constitue le seul granulat. Sa composition diffère d'un mortier car il contient généralement plus de fines. Ce type de béton, utilisé pour valoriser les ressources naturelles locales en l'absence d'autres granulats, possède une résistance mécanique plus faible que les bétons courants.

L'objectif de ce travail, est de formuler des bétons de sable par la méthode de l'université de Sherbrooke et on vise à l'amélioration des caractéristiques du béton de sable par l'intégration du superplastifiant et la fumée de silice dans sa composition en tenant compte de l'aspect économique.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à la recherche bibliographique où sont traités l'ensemble des paramètres ayant trait aux constituants élémentaires des mélanges et les caractéristiques physiques et mécaniques des bétons de sable.
- Le deuxième chapitre fait le point sur les caractéristiques physiques et chimiques des matériaux utilisés (ciment, sable, adjuvants & ajouts).
- Le troisième chapitre décrit les résultats obtenus par des essais à l'états frais et durcis durant cette étude, et leurs interprétations.
- En fin, une conclusion générale reprend les principaux résultats dégagés lors de cette étude et rapporte les intérêts pratiques qui en découlent.

I.1. Introduction :

Dans ce chapitre on présentera un aperçu général sur les BS, ou on va exposer d'abord l'historique et l'origine des bétons de sable ainsi que leur définition. Ensuite, on donnera une description des constituants entrant dans la fabrication, on décrit les propriétés mécaniques et on donnera quelques exemples d'ouvrage réalisés par ce matériau. Finalement, on donne une comparaison entre BS et BO.

I.2. Historique :

Le béton de sable trouve ses origines en France dans le « béton aggloméré » confectionné par F. Coignet dans le 3ème quart de XIX siècle vers la fin du 19ème siècle. Ce mélange était constitué de sable, de ciment, de chaux et d'eau. Le mur de soutènement à Passy, la maison Coignet à Saint-Denis, constituent les premières applications de cette technique que l'on retrouve aussi dans la réalisation de la tour de Port Saïd en Egypte [52 mètres], et du pont de New-York. On le retrouve, sous sa formulation moderne, dans la construction du Port de Kaliningrad et du port CHERNAVSKIF à Voroney.

Les premières tentatives de correction granulaire restent l'apanage de F. Coignet qui, pour les besoins de réalisation de certaines parties de l'aqueduc de Vanne construit entre 1869 et 1872, mélangea un sable fin traditionnel à un sable non utilisé à l'époque car jugé impropre à la construction.

A la fin du second conflit mondial, le professeur académicien Rebinder a permis l'utilisation de ce matériau dans plusieurs domaines : (les chaussés, les pistes d'aviation, élément de remplissage, murs architecturaux, planchers, dalles, réhabilitation, etc.). Le développement de ce béton a autorisé son utilisation à grande échelle jusqu'à des volumes de 1 million de m³ par an.

En France, en raison de l'abondance de gros granulats, permettant d'obtenir plus facilement des résistances élevées, les bétons de sable ne connurent pas un réel développement jusqu'à la décennie 1970-1980. Cependant il convient en outre, de noter que les sables tant alluvionnaires que provenant de concassage des roches massives sont excédentaires et qu'il y a déficit en gravillon. Aussi le secteur du bâtiment principal consommateur de béton est donc le plus gros consommateur de granulats de gros calibre.

Au même moment, conscient que les extractions de granulats des lits des fleuves et des rivières compromettent l'équilibre écologique avec des conséquences irréversibles, les

pouvoirs publics mettent progressivement en place une politique de réduction des autorisations d'exploitation de ces sites. C'est alors que s'ouvre la réflexion sur la formulation de nouveaux bétons qui utiliseraient une ressource abondante et peu exploitée (le sable) et présenteraient en raison des expériences au laboratoire des caractéristiques comparables à celles des bétons traditionnels.

Les premières applications sont réalisées avec succès dans le début des années quatre-vingt à l'initiative du laboratoire régional des ponts et chaussées de Bordeaux. Ces expériences trouvent un écho auprès d'universitaires, de spécialistes de bétons et de laboratoires qui s'intéressent concomitamment au sujet [1].

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 [1].

Dans les dernières décennies, et vu l'insuffisance des résultats de son comportement mécanique, le béton de sable a fait l'objet de plusieurs recherches. Plusieurs entreprises et laboratoires, dans différents pays, ont lancé des programmes de recherches sur ce matériau comme par exemple :

- CNERIB et ENPA en Algérie,
- CEBTP et LRPC en France,
- Des laboratoires en URSS.

Au début, les recherches sont limitées à un béton de sable ordinaire sans aucune correction granulaire et sans adjuvants, puis elles s'étendent à la recherche d'une meilleure correction granulaire du sable dans sa partie fine par l'utilisation de filler (généralement calcaire) et à l'utilisation des adjuvants (plastifiant, réducteur d'eau). Plusieurs compositions de base ont été données, mais pour des matériaux bien déterminés. D'autres études ont essayé d'approfondir le sujet (retrait, fluage, adhérence aux armatures) mais les résultats obtenus restent toujours insuffisants [3].



Figure I.1 : phare de Port-Saïd, réalisé en béton aggloméré [1].

I.3. Définition:

Le béton de sable est un matériau constitué principalement de ciment, de sable d'eau et de filler naturel ou industriel, défini par la norme NF P 18-500, se distingue d'un béton traditionnel par un fort dosage en sable (s), l'absence ou le faible dosage en gravillons (rapport pondéral Gravillons/sable inférieur à 0,7).

I.4. Les composants de béton de sable :

Un béton de sable est composé de sable, de fines d'ajout, de ciment et d'eau, par rapport à cette composition de base et pour répondre aux besoins de certains usages, d'autres ajouts spécifiques peuvent être envisagés : gravillons, fibres, adjuvants... [1].

I.4.1. Les sables :

Par sables on entend tous granulats (0/D) conformes aux définitions des normes NF P 18-101 et NF P 18-301. Il peut s'agir soit d'un sable naturel alluvionnaire ou de ballastière, soit d'un sable de carrière issu du concassage d'une roche massive ou détritique.

Aucun critère granulométrique n'est à priori exigible pour réaliser un béton de sable : on peut utiliser aussi bien un sable fin même (homométrique, type sable de dune) qu'un sable alluvionnaire moyen ou grossier ou de type (0/D) de concassage. La seule restriction d'emploi des sables réside dans leur propreté ; si des études ont été faites sur les sables- pollués, aucune application n'a été réalisée avec de tels sables. Autant que la nature de la pollution, c'est aussi

sa variabilité à l'intérieur d'un gisement qui rend l'emploi de tels matériaux difficilement envisageable ; si on arrive, en effet, par l'emploi d'adjuvants à rendre utilisable un sable pollué, il n'est pas dit qu'une telle formule serait adaptée à l'ensemble du gisement, compte tenu de cette variabilité. Par ailleurs, les sables riches en fines naturelles nécessitent généralement beaucoup plus d'eau, ce qui entraîne une chute de résistance.

Dans la pratique actuelle, il est plus prudent de se borner à l'utilisation de sables propres, tels qu'on peut employer pour des formules de béton classique [1].

I.4.1.1. Classification des sables :

On peut classer les sables selon [2] :

a. La granularité : permet de séparer les sables en trois catégories sont: Sables fins ; Sables moyens ; Sables grossiers.

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

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

Sables siliceux ; Sables silico-calcaires ; Sables calcaires.

d. Leurs provenances : Selon leurs provenances [3], les sables peuvent être classés comme suit :

- **Sable de rivière :** il est obtenu par dragage des lits des cours d'eau. Il doit être dur et propre pour qu'on puisse l'utiliser dans les bétons.
- **Sable de mer :** il provient des côtes de la mer. Pour l'utiliser dans les bétons, il faut qu'il ne soit pas trop fin et qu'il soit lavé de son sel.
- **Sable de carrière :** Il contient souvent de l'argile qui enrobe les grains et les empêche d'adhérer aux liants. Il est donc à proscrire.
- **Sable artificiel :** il est obtenu par concassage des roches (calcaires durs, gré ...). Il est souvent plein de filler. Pour qu'il soit utilisable dans les bétons, il faut limiter le pourcentage des fines.
- **Sable de dune :** c'est une variété des sables de mer. Il est donc très fin. Les sables de dune se trouvent dans les régions sud du pays. Ils sont situés en zone présaharienne.

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

1.4.2.les fines d'ajout :

Une qualité essentielle du béton de façon générale est sa compacité. Les paramètres essentiels qui vont jouer sur la compacité sont :

- La granulométrie du mélange et sa teneur en eau.
- L'énergie de mise en place.

La différence entre le béton classique et le béton de sable réside principalement dans la différence granulométrie.

L'optimisation de la compacité, en relation avec la granulométrie, obéit à certaines règles, le principe est simple : les éléments les plus fins se logent dans les vides des éléments les plus gros ; c'est en quelque sorte le principe des tables gigognes.

Regardons le cas d'un béton classique, on part des éléments les plus gros (10 à 20 mm) ; ils créent des macrovides que l'on peut remplir par des sables et les vides du sable par des fines. Et ces fines sont du ciment, puisque la quantité nécessaire de ciment pour assurer la résistance coïncide avec celle qu'il faut en fines pour obtenir la bonne compacité. Cette concordance entre besoin en fines et le dosage en ciment se traduit par la règle bien connue de : [1]

$$C=550/\sqrt[5]{D} \text{ ou } C=700/\sqrt[5]{D} \text{ (selon l'usage du béton)}$$

Tableau I.1 : Donnant le dosage minimum en ciment en fonction du diamètre maximal (D) du granulat employé [1].

Granularité	$\sqrt[5]{D}$	$550/\sqrt[5]{D}$	$700/\sqrt[5]{D}$	
0/25	1,904	290	370	BETON
0/20	1,821	300	385	
0/16	1,741	315	400	
0/8	1,516	360	460	
0/6,3	1,445	380	480	
0/4	1,320	415	530	MORTIER
0/2	1,149	480	610	
0/1	1,000	550	700	

Lorsque la valeur de D diminue ($\leq 6\text{mm}$), et c'est le cas du béton de sable, lorsque le dosage en ciment devient très élevé ($> 400\text{ kg/m}^3$). En effet, les vides d'un sable sont plus petits, plus nombreux et, globalement, plus importants que ceux d'un granulat d/D ($D > 6\text{ mm}$). Il faut donc davantage de ciment pour les remplir : techniquement et économiquement cette règle n'est plus applicable ; il n'y a plus concordance entre dosage en fine et en ciment.

Dans le cas du béton de sable, on comble d'abord une partie des vides du sable par un filler, et on assure ensuite la rigidité du mélange par un complément en ciment correspondant aux dosages habituellement employés pour les bétons traditionnels. Dans ces conditions, la règle en $\sqrt[5]{D}$ peut encore s'appliquer, en première approximation, non plus au dosage en ciment seul mais à l'ensemble : ciment + fines[1].

Dans la conception de la composition du mélange, la quantité du filler est considérée comme un liant au même titre que le ciment et donc on peut ainsi parler non plus du rapport (E/C) (eau/ciment), mais plutôt $E/(C+kA)$ où C représente le dosage en ciment et le dosage en fillers ; k représente le coefficient prenant en compte la nature du filler.

On distinguera deux types de fines : les fines actives (laitiers moulu, cendre volantes, fumé de silice, pouzzolanes broyées...) et les fines inertes (fines calcaires, ou de broyage de roches massives...).

Les dosages en fines d'addition seront souvent importants : entre 70 et 200 kg/m^3 et même au-delà. Par voie de conséquence leurs caractères (nature géologique, forme, etc.) vont influencer grandement sur les caractéristiques de la formule employée. On peut constater que, à dosage constant en fines d'addition :

- La maniabilité est améliorée quand le rapport eau/ciment augmente.
- Pour un rapport eau/ciment fixé, la maniabilité dépend de la nature et du dosage en fines d'addition.

Le rôle principal des fillers est celui de charges minérales, ils présentent cependant une certaine activité physico-chimique. Ils jouent tout d'abord un rôle de site de nucléation vis-à-vis de l'hydratation du clinker, qu'ils accélèrent. Cet effet n'est cependant notable qu'au jeune âge. A long terme, les fillers siliceux peuvent contribuer faiblement à une réaction pouzzolanique, alors qu'en présence d'aluminates, les fillers calcaires conduisent à une formation rapide de composés appelés carbo-aluminates, ayant un certain pouvoir liant.

En tant que produits industriels, les fillers présentent de bonnes caractéristiques de régularité. D'autres part, leur couleur généralement claire les rend favorables à l'obtention de parements architectoniques [4].

Nous citerons trois types de fines (fillers): les fillers calcaires (fines inertes), la fumée de silice (fines actives) [1] et les cendres volantes.

I.4.2.1. Le filler calcaire :

Le filler calcaire est un matériau très finement broyé, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 μm , il a pour rôle de remplir les vides entre les sables et les graviers, tout en présentant une certaine activité physico- chimique en favorisant l'hydratation des silicates tricalciques [5].

I.4.2.2. Fumé de silice :

La fumée de silice est une nouvelle venue parmi les liants hydrauliques. A l'origine, elle a été présentée comme une pouzzolane. Cependant, son action dans le béton n'est pas seulement celle d'une pouzzolane très réactive, car elle présente d'autres qualités particulièrement bénéfiques pour les bétons. Ajoutons cependant que la fumée de silice est un matériau peu économique [6].

Les fumées de silice sont un sous-produit de l'industrie du silicium et de ses alliages. Elles sont formées de particules sphériques de très faible diamètre (de l'ordre de 0.1 μm). Pour entrer dans la composition d'un ciment en tant que constituant principal, elles doivent comporter au moins 85% (en masse) de silice amorphe et avoir une surface massique supérieur à 15 m^2/g [7].

La fumée de silice confère aux bétons les propriétés suivantes :

- Améliore les performances mécaniques à longs termes : résistances en compression, flexion et traction.
- Augmente le module d'élasticité.
- Réduit le fluage.
- Améliore la résistance à l'abrasion et à l'érosion.
- Améliore la durabilité en milieux agressifs.
- Diminue les risques d'expansion dus aux phénomènes d'alcali-réaction.
- Diminue la perméabilité aux gaz et aux liquides.
- Facilite le pompage de tous les bétons mêmes peu dosés en ciment.

- Réduit les risques de ségrégations.
- Réduit la teneur en hydroxyde de calcium, ce qui diminue le risque de lixiviation.

(D'après la Notice technique, Edition avril 2004 ; Sika France S.A.).

I.4.2.2. Les cendres volantes :

Elles sont récupérées dans les filtres des centrales thermiques à charbon qui produisent de l'électricité, leur taille varie de la micrométrie à quelque dizaine de micromètres. Selon le type de charbon et de chaudière ont des propriétés pouzzolanique. L'emploi de cendres volantes en quantité limitée, permet d'obtenir des bétons résistant aux ambiances agressives.

I.4.3. Les ciments :

I.4.3.1. Définition :

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

Comme pour le béton classique, le ciment utilisé pour la confection d'un béton de sable est conforme à la norme NF P15-301, le choix du ciment est fait à partir de sa classe de résistance, de ses caractéristiques d'hydratation, de l'agressivité du milieu... et, d'une façon générale, de la composition du béton et de l'usage auquel il est destiné [1].

Pour bénéficier pleinement de l'activité hydraulique des fines d'addition, on privilégiera souvent les CPA par rapport aux CPJ [1].

I.4.3.2. Classification des ciments :

➤ Classification des ciments en fonction de leur composition : [7]

Les ciments constitués de clinker et des constituants énumérés sont classés, en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P 15-301 et EN 197-1. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (l'ancienne notation française est indiquée entre parenthèses) :

- CEM I : Ciment Portland Artificiel (CPA).
- CEM II : Ciment Portland Composé (CPJ).
- CEM III : Ciment de Haut Fourneau (CHF).

- CEM IV : Ciment Pouzzolanique (CPZ).
- CEM V : Ciment composé (ou ciment au laitier et aux cendres : CLC).

➤ **Classification des ciments en fonction de leur résistance à la compression :**

La norme européenne [8] classes les ciments courant d'après leur résistance à la compression voir (Tableau I.2).

Tableau I.2: Résistance à la compression des ciments [9].

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

Les principaux composés du ciment portland sont :

- Le Silicate Tricalcique (Alite) : $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C3S).
- Le Silicate Bicalcique (Belite) : $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C2S).
- L'Aluminate Tricalcique : $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C3A).
- L'Alumino-Ferrite Tétracalcique : $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C4AF).

I.4.4. L'eau de gâchage :

Le "gâchage" est l'opération irréversible d'ajout de l'eau au ciment. Cette opération se poursuit par le malaxage.

L'eau utilisée pour la confection des bétons de sable est conforme à la norme NFP18-303.

L'eau efficace comprend, en plus de l'eau de gâchage, une quantité non négligeable d'eau apportée par les additions, adjuvants et autres ajouts, et surtout par les sables [1].

I.4.4.1. Différents états de l'eau dans la pâte de ciment durcissant :

Dès que l'eau entre en contact avec le gain de ciment anhydre, elle réagit pour se combiner peu à peu avec ce gain et conduire, au cours de la réaction d'hydratation, au ciment hydraté. A un moment donné, une partie de l'eau gâchée avec le ciment anhydre a donc été consommée par la réaction d'hydratation. On emploie l'expression eau liée pour désigner cette eau ; l'expression eau libre désigne l'eau non encore consommée [7].

I.4.5. Les adjuvants :

I.4.5.1. Définition :

Les adjuvants sont des matériaux actifs ajoutés en très petite quantité (souvent liquide) : moins de 5% de la masse de ciment. Ils ont pour but d'influencer certaines propriétés par une action chimique ou physique. Ils ne doivent pas modifier défavorablement la durabilité du béton ou toute autre propriété du béton armé.

Un adjuvant n'est pas un palliatif. 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. Ce n'est pas un produit capable de se substituer aux règles de la bonne technique [9].

I.4.5.2. Classification des adjuvants :

La norme [10] classe les adjuvants pour bétons, mortiers et coulis, suivant leur fonction principale. On peut distinguer trois grandes catégories d'adjuvants :

a. Les adjuvants modifiant l'ouvrabilité du béton :

Ces adjuvants modifient le comportement rhéologique des bétons, mortiers et coulis à l'état frais, avant le début de prise. Ils abaissent le seuil de cisaillement de la pâte et en modifient la viscosité [11].

- **Plastifiants - Réducteurs d'eau :** Ce sont des produits qui, sans modifier la consistance, permettent de réduire la teneur en eau du béton donné, ou qui, sans modifier la teneur en eau, en augmentent l'affaissement (ou l'étalement), ou qui produisent les deux effets à la fois [12].

- **Superplastifiants - Haut réducteurs d'eau** : Ce sont des produits qui, sans modifier la consistance, permettent de réduire fortement la teneur en eau du béton donné, ou qui, sans modifier la teneur en eau, en augmentent considérablement l'affaissement (ou l'étalement), ou qui produisent les deux effets à la fois [12].

Ce sont des produits plus récents qui permettent des réductions d'eau supérieures, de l'ordre de 20% à 30%.

Il en existe de trois types, naphthalène-sulfonate, résine mélamine et, plus récemment, éther polycarboxilique [7].

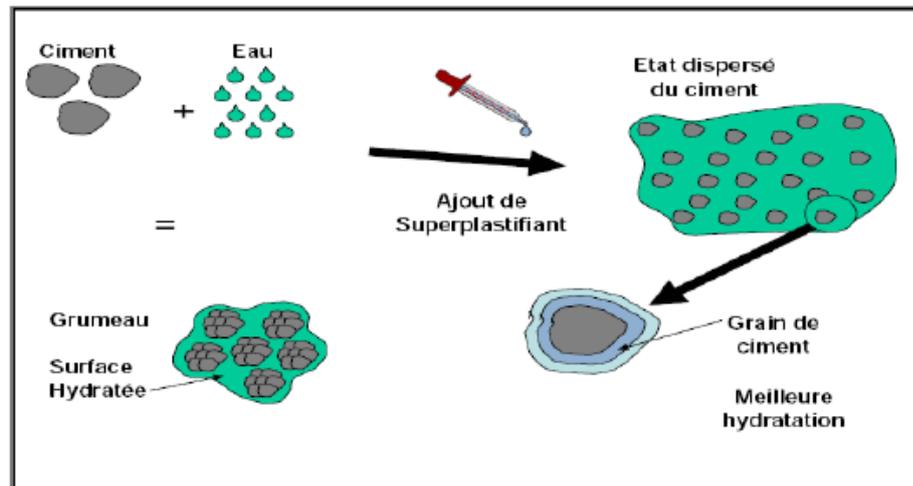


Figure I.2 : Effet de l'ajout du superplastifiant sur la dispersion des grains de ciment (Amélioration du rendement cimentaire) [3].

b. Adjuvants modifiant la prise et le durcissement :

Ces adjuvants modifient les solubilités des différents constituants des ciments et surtout leur vitesse de dissolution. Leur action se traduit par une évolution différente de la résistance d'un béton, mortier ou coulis adjuvanté comparée à celle du témoin [11]. On peut distinguer deux types d'adjuvants :

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

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

- **Retardateurs de prise** : Ces adjuvants augmentent le temps de début de transition du mélange, pour passer de l'état plastique à l'état rigide. Ils sont généralement utilisés par temps chaud. [12].

c. Adjuvants modifiant certaines propriétés du béton:

On peut distinguer deux types d'adjuvants :

- **Entraîneurs d'air** : On injecte des bulles d'air pour protéger le béton contre le gel. On augmente ainsi la résistance du béton contre le gel. Le gel va chasser l'eau dans la bulle d'air. Lors de l'utilisation d'entraîneurs d'air, la quantité d'espaces d'expansion n'est pas le seul critère important. La distance entre un point quelconque et une bulle d'air ne dépassera pas une certaine valeur, en général 200µm.
- **Hydrofuges de masse** : Ces adjuvants permettent de limiter la pénétration de l'eau dans les pores et les capillaires du béton, sans altérer ses qualités plastiques et esthétiques [12].

I.4.6. Autres ajouts :

I.4.6.1. Les fibres :

Elles sont surtout utilisées dans le but de réduire le retrait au premier âge : dosage et nature sont des paramètres très importants pour assurer l'efficacité de cet ajout [1].

On distingue 04 types de fibres :

- **Fibres de carbone** : Les fibres de carbone sont obtenues au moyen de la pyrolyse contrôlée d'un précurseur organique, lui-même fibreux et infusible [13].
- **Fibres naturelles** : Les fibres naturelles sont d'origine végétale, animale ou minérale. Les fibres naturelles sont concurrencées par les fibres synthétiques. Elles connaissent un nouvel essor comme résultat du prix du pétrole et les obligations de recyclage [13].

- **Fibres optiques :** Une fibre optique est constituée de deux matériaux transparents différents : le cœur d'indice n_i , et la gaine optique d'indice n_e , pour assurer le guidage de lumière, il faut $n_i > n_e$.

Les matériaux et la structure sont à déterminer selon l'usage de la fibre : éclairage, télécommunication, transmission IR pour l'instrumentation... [13].

- **Fibres polymères à haut module :** Les fibres d'aramide « kevlar » (nom déposé par DuPont) : le kevlar est un polymère à cristaux liquides de type lyotrope : les unités structurales ont tendance à s'aligner et former des mésophases en fonction de la concentration dans un solvant. Le solvant du kevlar est l'acide sulfurique concentré à chaud [13].

On utilise dans la plupart des cas des fibres organiques (polypropylène) pour contrecarrer les effets du retrait de prise et éviter la fissuration qui en résulte.

Si l'on veut améliorer la ductilité, on pourra utiliser des fibres d'acier ou des fibres de fonte amorphe [1].

I.4.6.2. Les gravillons :

On considère qu'un béton de sable peut contenir un certain pourcentage de gravillons et conserver sa dénomination de béton de sable. En effet, tant que les gravillons sont dispersés dans le sable, et ne constituent pas un squelette structuré, le comportement reste le même, l'ajout de gravillons en faible dosage peut améliorer sensiblement, certaines caractéristiques (le retrait, le fluage, résistance, maniabilité). D'une façon en pratique, on pourra considérer qu'on a affaire à un béton de sable tant que le rapport massique G/S (gravillon/sable) reste inférieur à 0,7 [1].

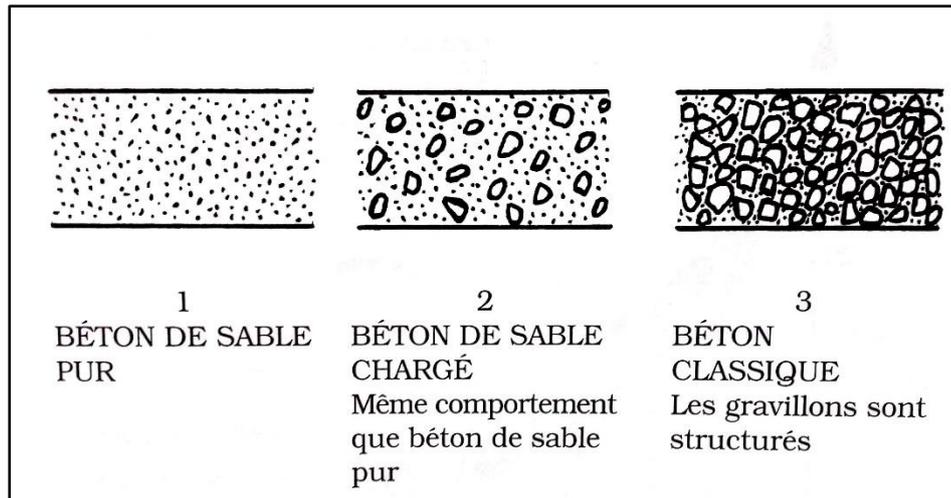


Figure I.3 : Différence entre le béton de sable chargé et le béton ordinaire [1].

I.4.6.3. Les colorants :

Les colorants habituellement utilisés dans les bétons traditionnels peuvent également être employés pour certains usages de bétons de sable : ils nécessitent toutefois un soin particulier dans l'homogénéisation et une formulation appropriée du béton de sable pour conserver une stabilité de la teinte au cours du temps.

Il est à signaler que l'emploi de sable naturels locaux, couplé notamment à l'utilisation de ciment blanc, procure souvent des teintes très intéressantes, susceptibles de s'insérer avantageusement dans l'environnement [1].

I.5. Propriétés de béton de sable :

I.5.1. Propriétés générales :

I.5.1.1. Granulométrie et maniabilité :

Une des particularités des bétons de sable est de nécessiter d'avantage d'eau que les bétons classiques ; ceci se traduit par des valeurs du rapport E/C (eau/ciment) systématiquement supérieures à 0,5 ; ce rapport se situant généralement entre 0,6 et 0,7. Cette particularité est due à une surface spécifique plus importante du mélange ; d'ailleurs, si l'on considère non plus le rapport E/C, mais le rapport E/C+A (A=addition en fines), on obtient des valeurs similaires aux bétons traditionnels. 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 module de finesse et maniabilité (Figure I.4).

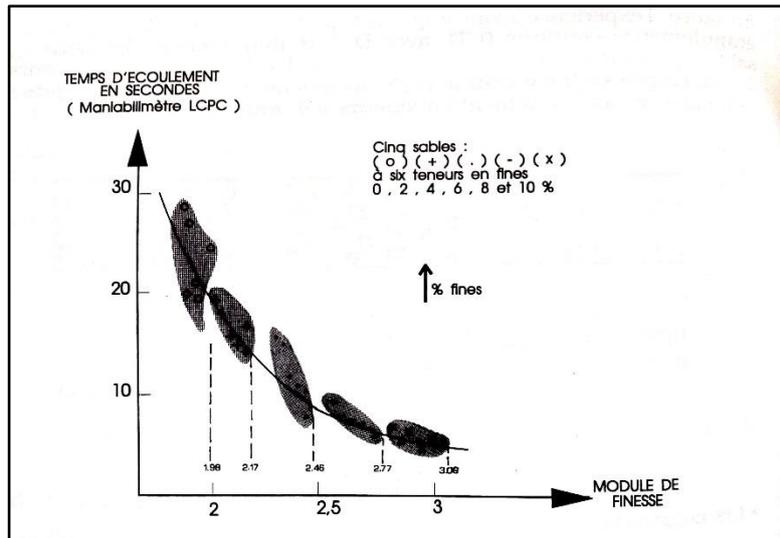


Figure I.4 : Maniabilité en fonction du module de finesse du sable [1]

La (figure I.4) montre l'effet des éléments grossiers sur la maniabilité du béton. Cinq sables ont été utilisés, chacun à des teneurs en fines variables entre 0 et 10 %.

D'un sable à l'autre présenté sur la (figure I.4), on a pu constater que l'augmentation du module de finesse entraîne une diminution du temps d'écoulement et donc une amélioration de maniabilité.

Pour chacun des sables, l'augmentation de la teneur en fines (diminution du module de finesse), et entraîne une maniabilité moins bonne. Ce phénomène n'a pas un caractère systématique, il dépend de la nature des fines incorporées logiquement l'ajout de fines de type sphérique, en diminuant la quantité de vides devrait rendre l'eau plus efficace et donc améliorer la maniabilité.

La relation dosage en fines - maniabilité peut dépendre aussi de la nature du sable. On constate en effet :

- Un comportement différent selon la granulométrie du sable ; les graphiques de la (figure I.5) montrent l'effet différent de fines calcaires sur un sable alluvionnaire 0/4 et un sable de dune, à teneur en eau constante ;
- Pour le sable de dune, l'ajout de fines entraîne jusqu'à 200 kg/m³ une chute de maniabilité ce qui n'est pas le cas pour le sable alluvionnaire (plus compact).

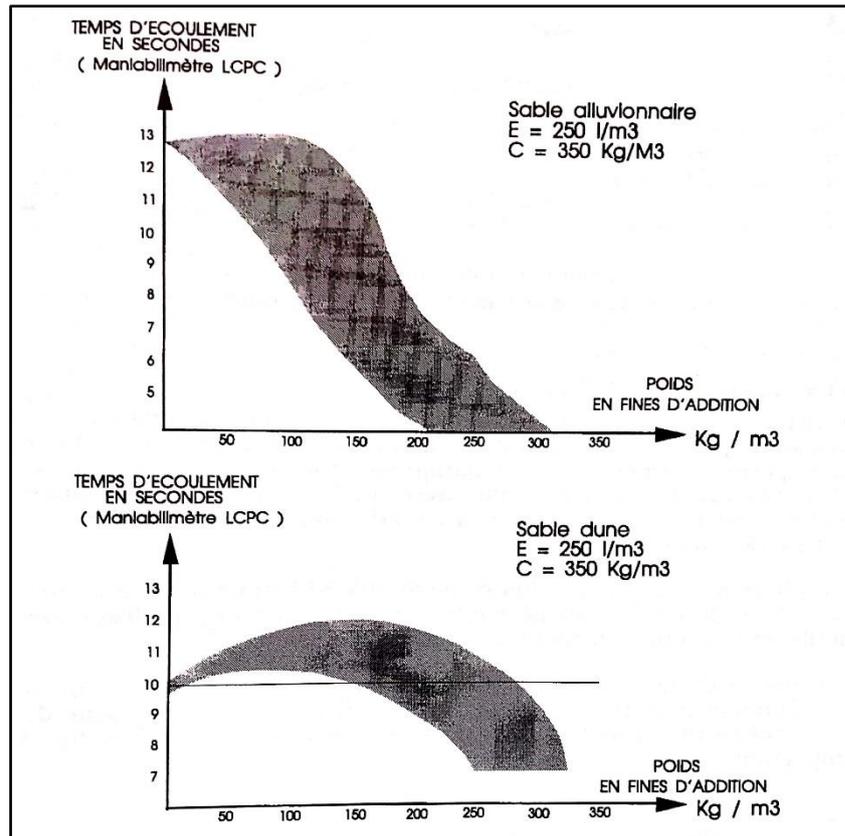


Figure I.5 : Influence de la nature du sable sur la maniabilité
(Avec fines d'addition calcaires) [1].

I.5.1.2. Granulométrie et résistance :

A dosage en ciment constant, la résistance peut être différente en fonction d'un certain nombre de paramètres et en particulier :

- **La finesse de l'addition :**

Plus l'addition est fine (et bien défloculée) plus elle est efficace au niveau du gain en compacité (et donc du gain en résistance) ; ce résultat est valable quelle que soit la granulométrie du sable ; on le constate avec des fines calcaires aussi bien sur un sable alluvionnaire que sur un sable de dune (figure I.6).

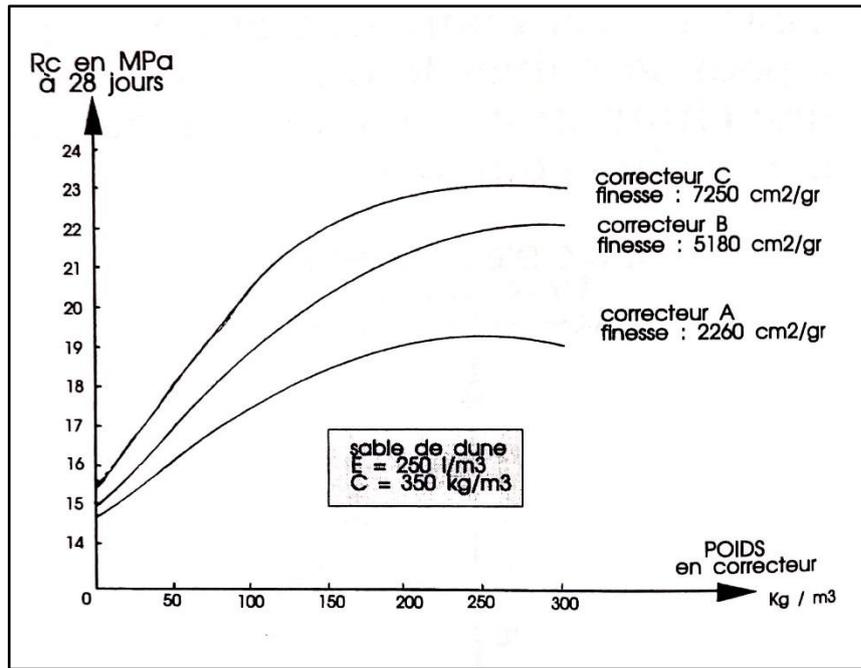


Figure I.6 : Effet du dosage et de la finesse de l'addition sur la résistance [1]

- **La nature de l'addition :**

A même dosage, selon la figure I.7, permet de constater l'extrême diversité du niveau de performance atteint selon la nature du filler ; si l'addition de fines permet d'améliorer systématiquement la résistance, ce gain est en effet très variable. (Figure I.7)

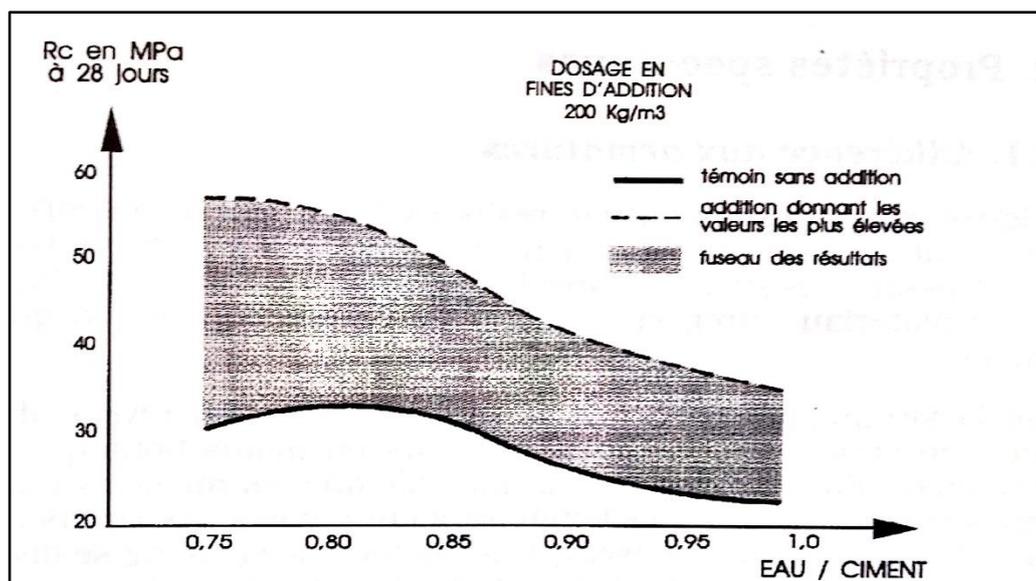


Figure I.7: Influence de la nature de l'addition sur le niveau de résistance [1].

- **La dimension du D_{max} :**

Pour une même valeur du rapport E/C (eau/ciment), on constate (figure I.8) que l'effet du diamètre D_{max} du plus gros granulats est peu important et, en tout état de cause, pas défavorable aux sables. Le seul problème tient à la maniabilité très différente selon les bétons : très maniable dans le cas d'un 0/20, on aura une maniabilité de type préfabrication dans le cas du sable.

A même dosage en ciment (figure I.8) mais à E/C différent, les différences sont beaucoup plus importantes. Les maniabilités étant identiques, il faudra beaucoup plus d'eau dans le cas des sables, ce qui aura pour conséquence une chute de la résistance. Là encore, on pourra minimiser cette chute par l'emploi d'un plastifiant réducteur d'eau.

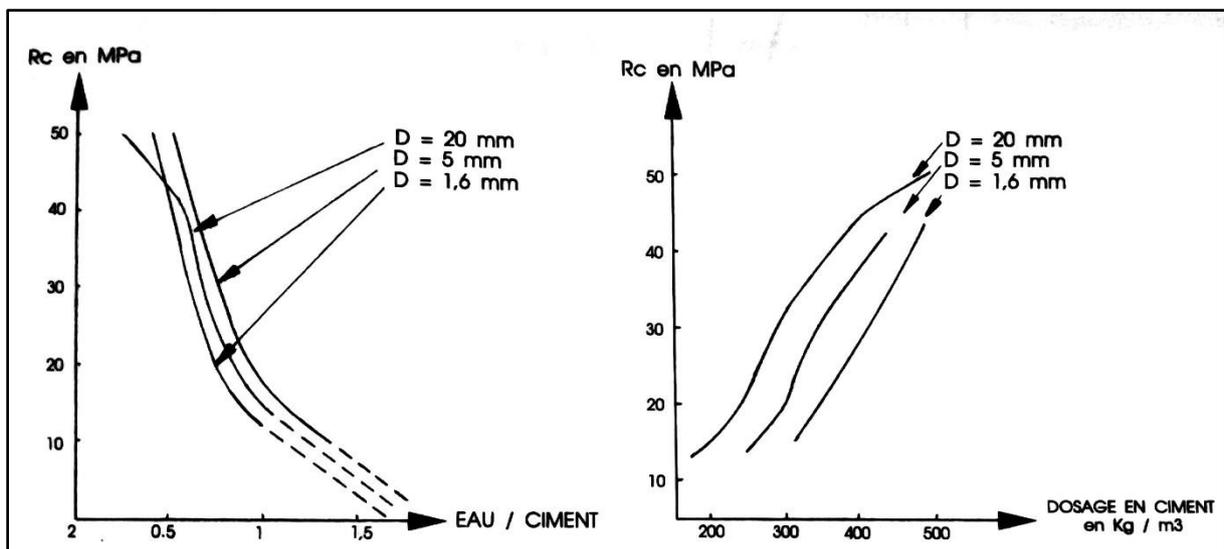


Figure I.8: Montre l'effet de la granulométrie sur la résistance [1].

I.5.2. Propriétés spécifiques:

I.5.2.1. L'adhérence aux armatures :

On désigne sous le nom d'adhérence les forces de liaison qui s'opposent au glissement des armatures par rapport au béton qui les enrobe.

Cette adhérence est principalement due:

- À des forces d'origine chimique correspondant à un "collage". Ces forces sont de valeur médiocre et peu fiables.

- À des forces de frottement dues aux irrégularités de surface naturelles de la barre. Ces forces, plus importantes, sont encore assez limitées. C'est le principal mode d'adhésion des barres lisses.
- À des forces d'engrènement mécanique dues aux saillies et aux aspérités des barres dites à haute adhérence HA (voir ci-contre). Ces forces mettent en jeu la résistance du béton en compression et au cisaillement à proximité de la barre [14].

Selon la formulation du béton de sable (donc son niveau de performance), on obtient des propriétés spécifiques à l'adhérence aux armatures plus ou moins bons que le béton de référence. Quelques comparaisons ont été réalisées entre différentes formulations de béton de sable et un béton témoin traditionnel à l'aide de l'essai pullout. Il s'agit de mesurer le déplacement d'une armature qui se trouve dans le matériau durci, en fonction de l'effort de traction qui lui est appliqué.

Sur la base des résultats de cet essai, on remarque que des variations de compositions appliquées au béton de sable mènent à des écarts du même ordre que les bétons traditionnels, ce qui a amené à penser que les bétons de sable ne se distinguent pas particulièrement sur cet aspect des bétons traditionnels classiques [3]. (Figure I.9)

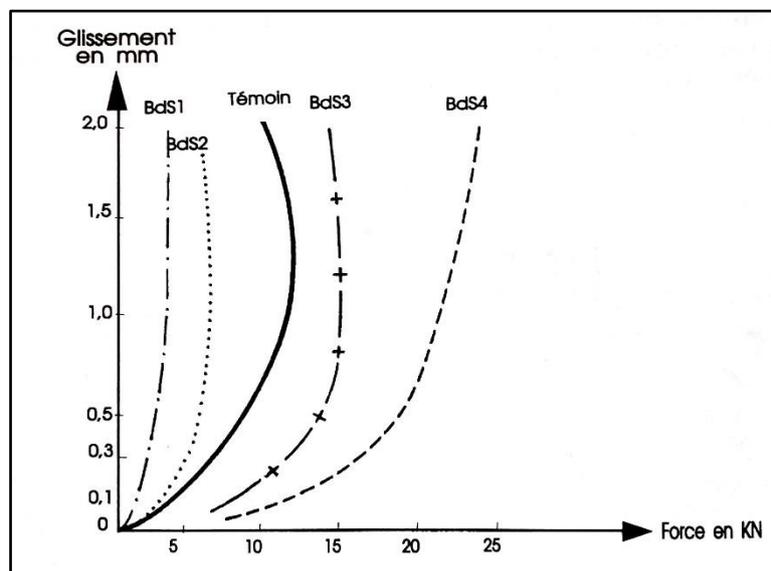


Figure I.9 : Variation de l'adhérence d'une armature en fonction de la formulation [1]

Dans le cas des petites déformations (partie initiale), on constate que la contrainte correspondant au même niveau de déformation (50 microns) est d'autant plus forte que la

résistance en traction du béton de sable est élevée. (Figure I.10) Le phénomène d'adhérence observé dans le béton de sable est pratiquement identique à celui des bétons traditionnels (contrainte ultime varie de 30 à 60 bars), alors qu'on peut dire que l'association béton de sable-acier engendre une adhérence suffisante entre les deux matériaux, ceci permet d'envisager l'utilisation du béton de sable comme béton de structure [3].

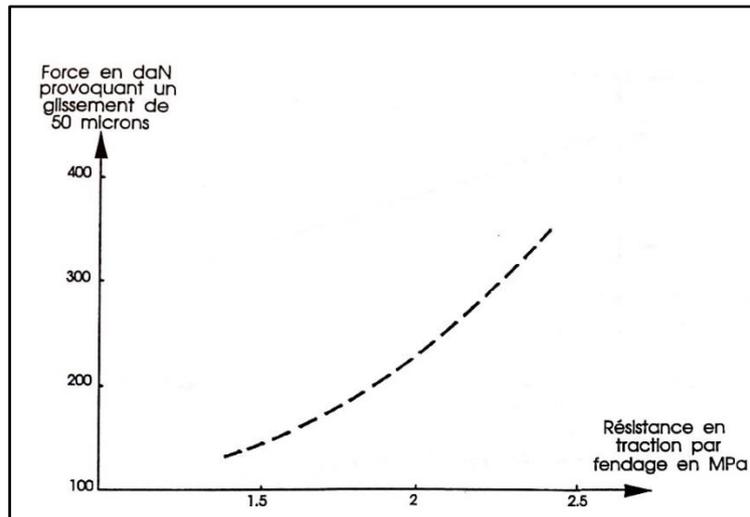


Figure I.10 : Influence de la résistance en traction du béton de sable sur l'adhérence des armatures [1].

I.5.2.2. Durabilité des bétons de sable :

Conventionnellement, 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 la porosité, l'organisation géométrique des pores et la perméabilité sont des paramètres physiques du premier ordre de la durabilité. De même, les phénomènes internes tels que l'alcalisation ou l'attaque sulfatique différée sont aussi des processus d'altération du béton accélérés par les échanges hydrauliques avec le milieu extérieur. La tenue du 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 urbain, régions montagneuses, milieu marin, ambiances agressives...etc.)

- Perméabilité à l'air et à l'eau ;
- Gel-dégel ;

- Carbonatation ;
- Pénétration des ions de chlorure.

Ces essais de durabilité, dont le but est de qualifier le béton vis-à-vis des attaques physico-chimiques exogènes ou internes, sont en général 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.

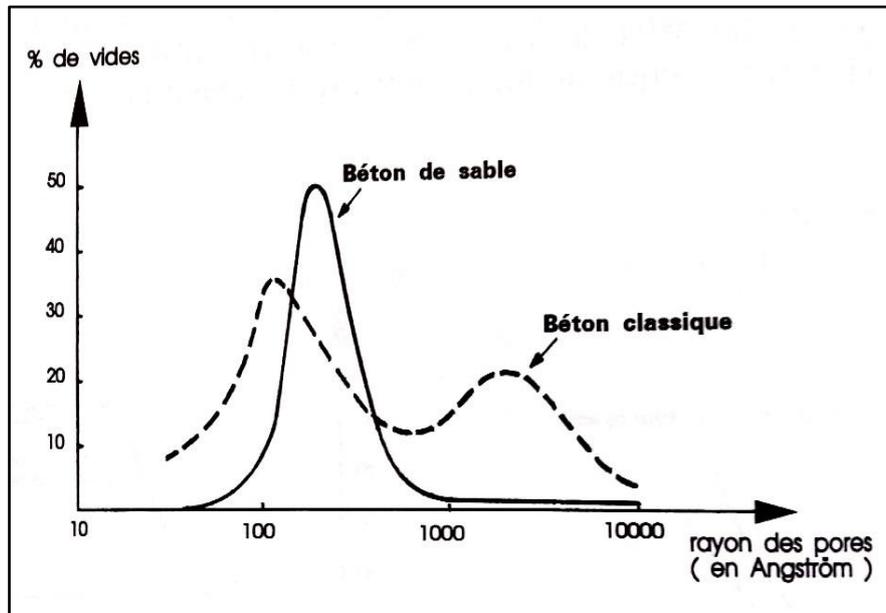


Figure I.11 : Courbe de distribution de la porosité en fonction des rayons des pores [1].

Cette distribution poreuse particulière, observée sur beaucoup de bétons de sable optimisés dans le cadre du projet national SABLOCRETE, contribue pour une bonne part à leur bon comportement vis-à-vis des essais de durabilité cités précédemment.

La perméabilité à l'eau est du même ordre de grandeur que celle du béton traditionnel ; quant à la perméabilité à l'air, elle conduit à des résultats globalement inférieurs ou comparables à ces mêmes bétons classiques. Toutefois, ces résultats ne sont pas généralisés à toutes les formulations de bétons de sable mais plutôt à des bétons de sable correctement

formulés, c'est-à-dire pour lesquels il y a eu optimisation des dosages en fines d'addition et en ciment. Dans ces conditions le comportement en carbonatation aussi bien naturelle qu'accélérée, et en gel-dégel, est satisfaisant voire excellent [1].

I.5.2.3. Phénomène de ségrégation des constituants :

Leur faible étendue granulométrique, et donc leur plus grande homogénéité, combinées à une bonne maniabilité, confèrent aux bétons de sable 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.

Les deux figures qui suivent montrent les différences d'aspect de la peau de deux éprouvettes, coulées sans action extérieure sur le serrage, à des consistances plastiques équivalentes (cône de 14 cm).



Béton ordinaire

Béton de sable

Figure I.12: Eprouvettes non vibrées, non piquées [1].

I.5.2.4. Résistance au gel et au dégel :

De même, la tenue au gel des bétons de sable formulés correctement est excellente. En effet, par comparaison à une étude menée sur un large éventail de formulations de bétons

traditionnels, les bétons de sable à formulation et performance équivalentes résistent mieux au gel que les bétons traditionnels correspondants. Certains bétons de sable, même sans ajout d'entraîneur d'air, présentent une résistance au gel équivalente aux bétons classiques les plus performants de ce point de vue. Cette bonne tenue aux cycles gel- dégel, quand elle ne résulte pas d'une formulation visant, soit une très faible porosité, soit une porosité bien répartie par l'emploi d'entraîneur d'air, s'explique par la microstructure particulière des bétons de sable, qui est en général, caractérisée par une bonne répartition de micropores [3].

I.5.2.5. Retrait:

Le retrait est un phénomène particulier au béton, dû à la diminution de la teneur en eau du béton, qui correspond à un raccourcissement évoluant sur 2 ou 3 ans, mais dont plus de la moitié est réalisée un mois après le bétonnage [15].

Le retrait chimique est dû au fait que le ciment hydraté occupe un volume plus petit que la somme des volumes du ciment et de l'eau.

Le retrait plastique est causé par l'évaporation de l'eau libre (c'est-à-dire qui n'a pas hydraté le ciment).

Le retrait de dessiccation (retrait hydraulique) résulte de l'évaporation de l'eau des pores du béton durci suivie de la contraction des pores par les forces capillaires [16].

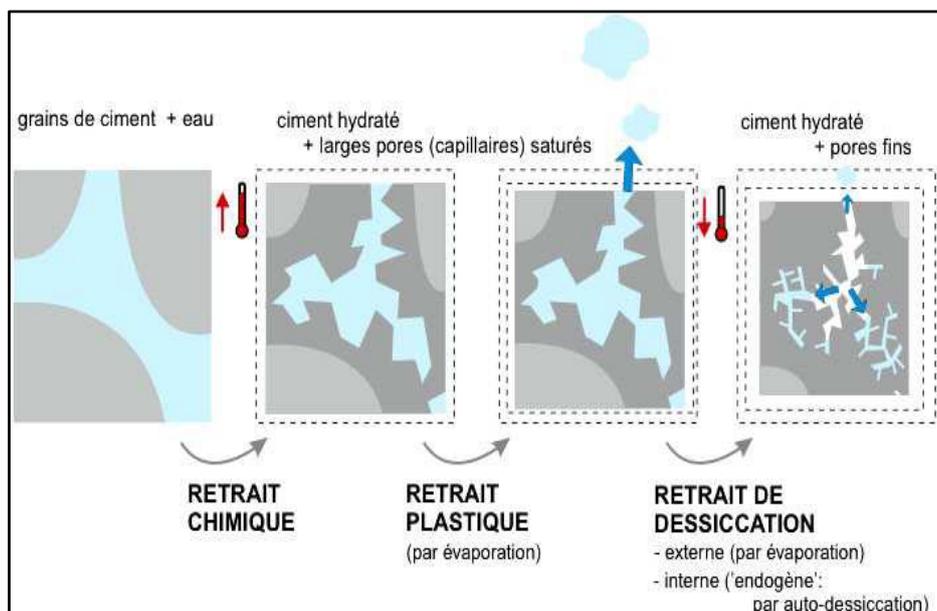


Figure I.13 : Le retrait.

➤ **Le retrait du béton de sable :**

Le retrait d'auto-dessiccation est caractérisé par une cinétique semblable à celle du béton classique. Une différence de l'ordre de 10% existe par rapport à ce dernier. Cette différence, couramment observée à l'intérieur même de la gamme des bétons, est due à une perte en masse plus rapide pour le béton de sable. Le rapport des déformations de retrait de dessiccation des deux bétons, en fin d'essai (6 mois), est égal à 1.6 correspondant globalement au rapport de perte en masse au même âge, soit 1.48 (figure I.14). En conclusion nous pouvons dire que le retrait est une fonction croissante de l'eau évaporable (taux de séchage). Notons que la valeur du retrait du béton de sable est voisine de celle du béton ordinaire s'il est conservé dans un milieu étanche. Si la conservation se fait dans un milieu sec, la valeur du retrait du béton de sable est double de celle du béton ordinaire [3].

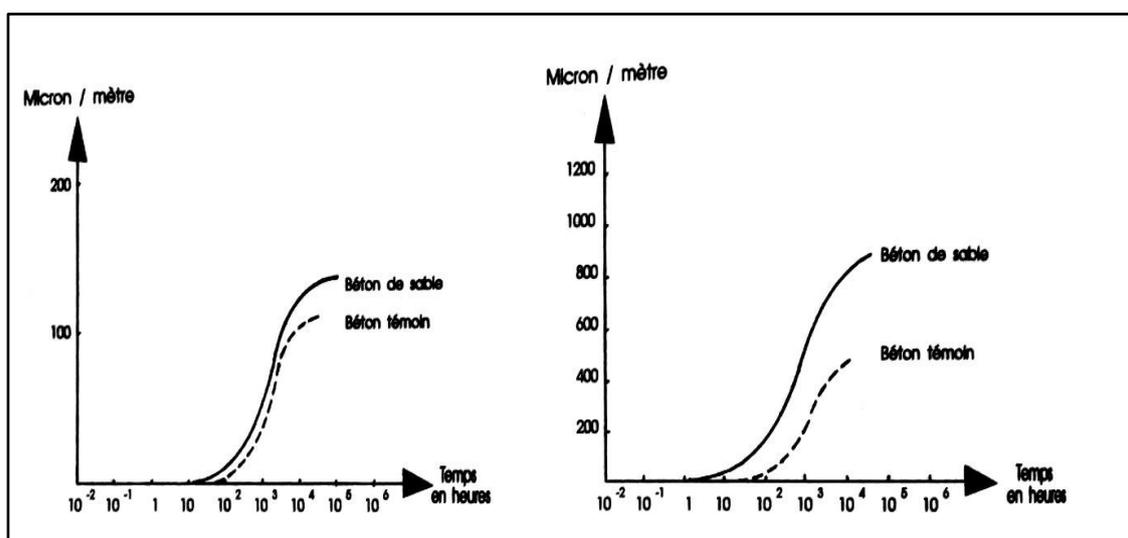
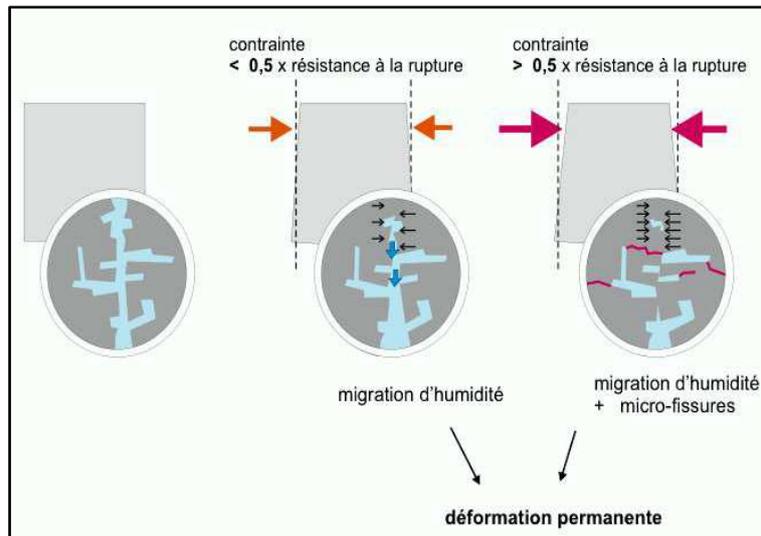


Figure I.14: Evolution du retrait dans le béton de sable [1].

I.5.2.6. Fluage:**Figure I.15 : Le fluage.**

Le fluage dépend également de la maturité du béton lors du premier chargement ainsi que de la durée et de l'intensité de la charge [15].

Le fluage dépend 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, alors que si cette charge dépasse 50% de la charge à la rupture, le fluage croît plus vite que la contrainte.
- Nature du béton: dans le cas d'un béton léger, dont les granulats poreux constituent une réserve d'eau, leur fluage est en générale inférieur à celui d'un béton ordinaire de même résistance.

On observe, en matière de fluage, un phénomène analogue, lié vraisemblablement à la structure du matériau, que confirment par ailleurs les valeurs de module d'élasticité, très différenciées entre béton de sable et béton classique (le module du béton de sable étant plus faible).

Il faut signaler toutefois que ces résultats comparatifs ont été faits à un niveau de résistance en compression de 25 MPa, et qu'en matière de fluage notamment, 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 puisque, en passant de 25 à 50 MPa, on divise le fluage par 5. Au même niveau de résistance, dans ce cas 50 MPa, le fluage du béton de sable n'est supérieur à celui d'un béton classique de même niveau de résistance que de 20% [1].

Donc pour éviter l'apparition de ces phénomènes, il faut minimiser la quantité de ciment c'est à dire remplir par des matériaux inertes et solides (granulats) [16].

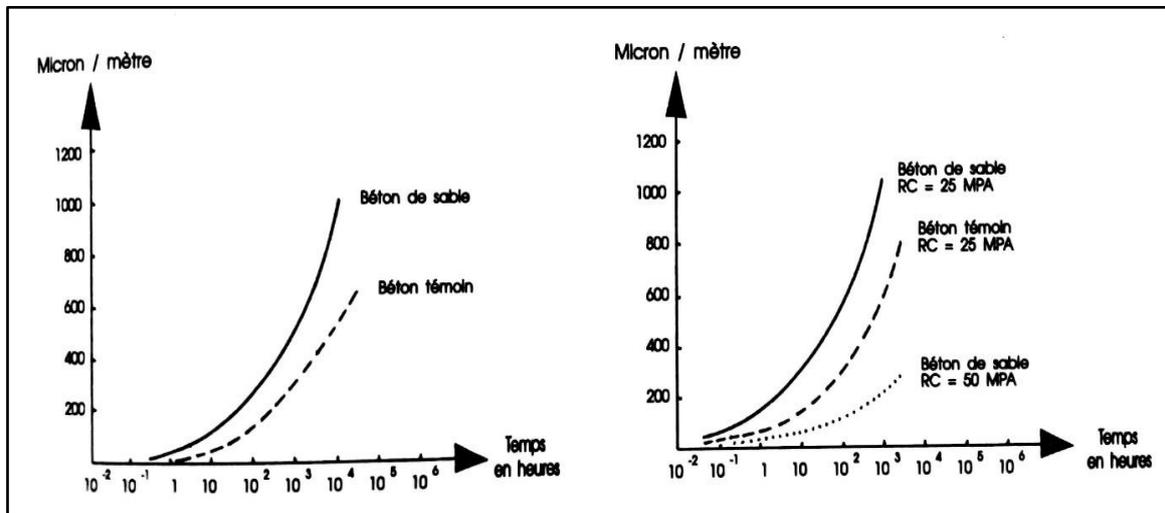


Figure I.16: Evolution du fluage dans le béton de sable [1].

I.6. Domaine d’application du béton de sable :

Le béton de sable peut être utilisé dans différents domaines, et sous plusieurs formes. 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. Tels que le bâtiment, les routes, les bétons vibrés et la projection.

I.6.1. 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.6.2. 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.

En général, le béton de sable peut être également utilisé en projection dans des travaux de rénovation, de ponts, d'égouts visitables et de bâtiments (figure I.17, I.18 et I.19).



Figure I.17 : Le béton de sable en projection (Projection sur surface ancienne) [17].



Figure I.18 : Réalisation d'une piscine [17].

I.6.3. 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.6.4. 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. Le béton de sable peut être utilisé dans la préfabrication pour des murs architecturaux, pour des mobiliers urbains, en bâtiment et en voirie (figure I.20).

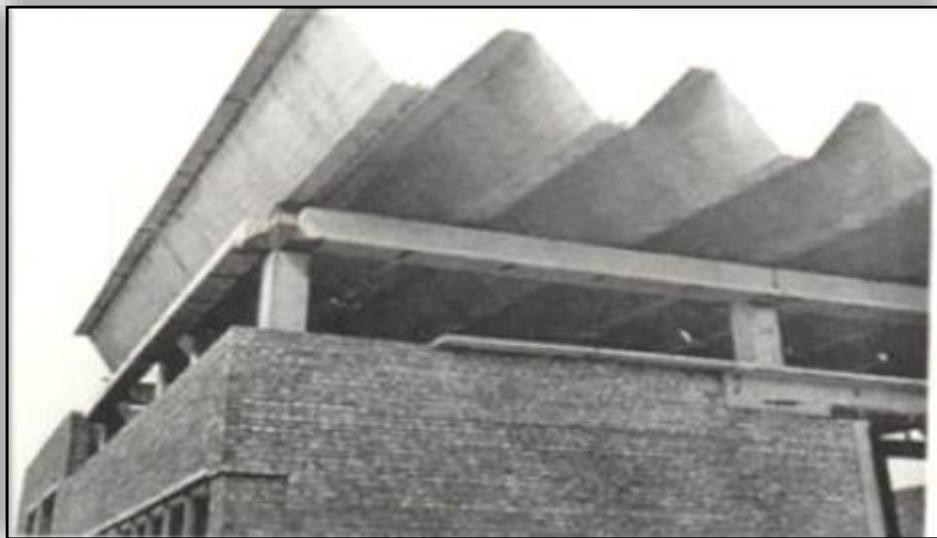


Figure I.19 : Le béton de sable dans la préfabrication.



Figure I.20 : métro de Saint-Petersbourg.

Voute mince en béton de sable, préfabriquée, à double courbure [1].

Béton de sable coulé : Il peut être coulé sur place dans les routes et autoroutes, dans les aérodromes et en bâtiment (figure I.21 et I.22).



Figure I.21: Une abondante ressource locale en sable présente un réel intérêt économique, et même quelquefois esthétique lorsqu'il est possible de s'affranchir d'un revêtement de surface [1].

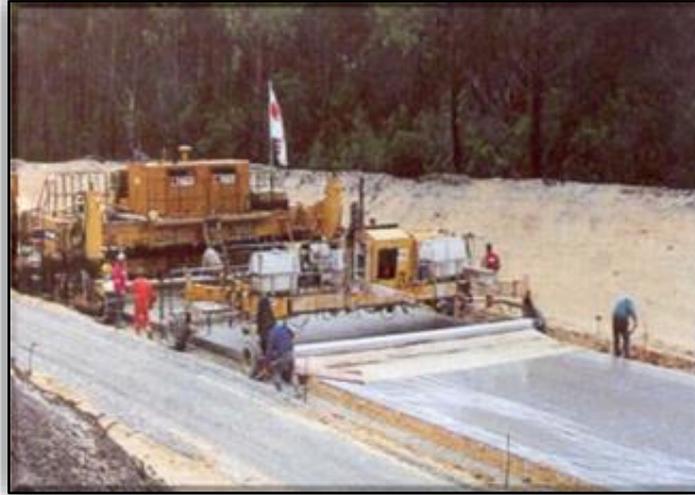


Figure I.22: Déroulement d'un film polyane (cure) [1].

I.7. Fabrication, transport, mise en œuvre, contrôle de béton de sable :

I.7.1 Fabrication : [18]

Avant d'aborder la fabrication du béton, il n'est pas inutile de rappeler qu'il s'agit d'un matériau obtenu en mélangeant un ensemble de constituants présentant des états et des caractéristiques très différents:

- Un liant: le ciment, poudre d'une très grande finesse.
- Des granulats de forme et de densité variées.
- Un liquide: l'eau de gâchage.
- Éventuellement des adjuvants soit liquides, soit en poudre.

Les méthodes de fabrication du béton sont adaptées à la nature du chantier et aux types de béton à réaliser. Le béton est fabriqué principalement dans des centrales de BPE, dans des centrales de chantier, dans des bétonnières pour les petits chantiers.

➤ Un matériau homogène :

Pour élaborer un béton, matériau homogène, il faut tenir compte au cours des phases de fabrication et de transport, de l'homogénéité de ses constituants. Il faut aussi réaliser un mélange efficace, qui ne puisse pas subir ensuite de ségrégation ou de décohesion.

I.7.2 Approvisionnement, stockage, manutention : [1]

- **Sables :**

Si un stockage primaire en tas de ou des sable(s) n'est pas à proscrire, il doit lui être préféré un stockage en trémies qui permet plus facilement d'éviter les risques de pollution et de ségrégation.

Toutes mesures propres à éviter les risques excessifs de ségrégation, notamment pour les sables fillérisés, seront prises.

- **Ciments, adjuvants :**

Les mêmes modalités que pour les bétons classiques sont à appliquer.

- **Additions :**

Les additions, qu'elles soient types fillers (calcaires ou siliceux) ou actives (cendres volantes, fumée de silice...), doivent toujours être stockées en silos comme les ciments et avec les mêmes équipements (vibreurs, systèmes anti-voute, systèmes de sécurité, détecteurs de niveaux...).

- **Eau :**

Dans l'état actuel des connaissances, les eaux recyclées doivent être évitées pour la confection de béton de structure, même en cas de stockage en cuve agitée en permanence.

I.7.3. Dosage des constituants :

Les sables, ciments et additions doivent être dosés pondéralement. L'eau et les adjuvants peuvent être dosés en poids ou en volume.

Dans tous les cas, les équipements et les diverses opérations de dosage doivent permettre de respecter les précisions spécifiées.

Les bornes qui peuvent être requises pour le dosage des matériaux constitutifs sont incluses dans la norme P 18-305.

Le ciment et les additions sèches doivent être dosés sur une ligne distincte de celles des sables. Lorsque les différents sables sont pesés sur un même instrument de pesage, ils le sont successivement, séparément, soit cumulativement.

Les différents types d'adjuvants ne peuvent être dosés sur le même appareillage que si toutes les précautions sont prises pour éviter les risques de contaminations.

I.7.4. Malaxage :

Le malaxage est une phase importante de la fabrication du béton, car il va conditionner la qualité de son homogénéité. Pour assurer la réussite de cette opération, il faut choisir un matériel adapté et déterminer un temps de malaxage suffisant [18].

I.7.4.1. Durée du malaxage : [1]

La durée du malaxage des bétons de sable comme de tout béton doit être suffisante pour obtenir l'homogénéité des constituants.

Certaines études ont démontré que cette durée n'a pas lieu d'être systématiquement plus élevée que celle adoptée pour les bétons traditionnels, car cela dépend essentiellement du matériel disponible. En effet, la dispersion des éléments fins s'effectue sans difficulté particulière dans les malaxeurs classiques. Il est même déconseillé d'augmenter la durée de malaxage, car un décaulage (microbullage interne, réduction des performances...). En général, la durée de malaxage en usine est de l'ordre de 60 secondes.

Toutefois, sur certains chantiers (routiers par exemple), la durée de malaxage du béton de sable a dû être augmentée.

I.7.4.2. Les paramètres du malaxage: [18]

Une fois déterminé l'appareil adapté au béton à réaliser, le malaxage, pour être efficace, doit prendre en compte certains paramètres:

- L'ordre d'introduction des composants.
- La vitesse de rotation de la cuve.
- Le temps de malaxage.

I.7.4.3. Ségrégation : [1]

Les risques de ségrégation lors du malaxage, par séparation des granulats de dimensions très différentes sont, par la nature même des bétons de sable, moindres que dans les bétons traditionnels.

Les malaxeurs pour lesquels le mélange est assuré par déplacement des matériaux les uns par rapport aux autres (palette, tournante...) sont préférables aux bétonnières où seule l'action de la pesanteur est utilisée.

I.7.4.4. Modalités de malaxage : [1]

Comme pour les bétons traditionnels, les constituants « actifs » (ciment, addition) doivent être introduits en dernier dans les mélangeurs, immédiatement avant mise de l'eau. Certaines techniques particulières comme la confection préalable d'un coulis introduit ensuite dans le mélange granulaire sont possibles, sous réserve de mises au point préalables.

Compte tenu de l'importance relative plus élevée que dans les bétons classiques de la quantité d'eau apportée par les sables et éventuellement les additions humides, il est essentiel de bien connaître cet apport d'eau.

Il en découle que dans les usines de préfabrication confectionnant toujours le même béton, il est judicieux d'employer des appareils de conduite permettant de contrôler en continu la consistance des bétons frais (wattmètre...).

Bien entendu, comme pour les bétons classiques, la faculté d'absorption d'eau dans les sables doit être connue pour pouvoir être maîtrisée.

I.7.5. Transport :

Le transport du béton de sable du lieu de production au lieu d'utilisation s'effectue par les mêmes moyens que les bétons classiques.

Bien que les bétons de sable soient généralement très plastiques, les risques de ségrégation pendant les transports sont faibles, compte tenu de l'homogénéité granulaire des matériaux [1].

Le transport du béton frais jusqu'au lieu de coulage fait appel à des matériels très différents, selon qu'il s'agit de parcourir de courtes distances sur un chantier ou qu'il doit être acheminé depuis une centrale de fabrication, parfois éloignée de plusieurs kilomètres [19].

I.7.6. Mise en œuvre du béton de sable :

I.7.6.1. Préparation des coffrages :

La dimension des granulats et les consistances généralement très plastiques voire fluides des bétons de sables nécessitent d'apporter un soin particulier à la préparation des coffrages, afin que les avantages des bétons de sable en ce qui concerne les parements soient bien obtenus.

La propreté et surtout l'étanchéité devront être strictement vérifiées [1].

I.7.6.2. Vibration :

Le but de serrage du béton est d'obtenir la plus haute masse volumique possible. La plus vieille méthode pour réaliser cet objectif est le pilonnage ou le damage, mais de nos jours cette technique est rarement utilisée. La méthode habituelle de compactage est la vibration.

Lorsque le béton frais est placé dans des coffrages, les bulles d'air peuvent occuper 5 % (pour les bétons de grand maniabilité) et 20% (pour les bétons à faible affaissement) du volume total. La vibration a pour effet de fluidifier le mortier de telle sorte que le frottement interne est diminué et permet aux gros granulats de se placer. L'objectif est d'atteindre une configuration serrée des gros granulats et la forme du granulat est alors d'une grande importance.

Une vibration continue permet d'éliminer la plus grande partie de l'air piégé, mais il est normalement impossible d'arriver à l'éliminer complètement.

La vibration doit être appliquée uniformément à toute la masse du béton, sinon certaines parties pourraient ne pas être serrées suffisamment alors que, dans d'autres parties, on pourrait avoir une ségrégation par sur-vibration [6].

I.7.6.3. Mise en place particulières :

➤ Préfabrication :

La confection d'éléments préfabriqués (blocs, pavés...) en béton de sable ne pose pas de problèmes différents de ceux existant pour les bétons avec gravillons.

Les mêmes avantages que les bétons coulés sur site sont conservés (facilité de mise en œuvre, aspect des parements...) [1].

Le béton frais, tel que délivré par la chaîne de fabrication et de transport, se présente comme un matériau triphasique, dont la teneur en air est d'autant plus importante que son dosage en eau est faible. La mise en place consiste à ramener ce volume d'air à une valeur d'un ou deux pour cent (objet du compactage, et à faire épouser au béton la forme de la structure qu'il doit constituer, en lui imposant une déformation de cisaillement. L'étude de cette dernière phase est l'objet de la rhéologie, science traitant du comportement mécanique des matériaux [4].

I.8. Intérêts et limites des bétons de sable: [3]

I.8.1. Intérêt des bétons de sable :

Dans de nombreux usages, le béton ne nécessite pas un niveau très élevé de résistance. Cependant il exige, parfois, des caractéristiques qui peuvent être mieux assurées par le béton de sable. Parmi ces caractéristiques :

- **La maniabilité** : Le béton de sable étant très maniable, sa mise en œuvre, sa capacité à remplir des moules avec une énergie de serrage moindre et sans préjudice pour les autres propriétés de matériau, constituent un atout significatif.

- **La cohésion et l'absence de ségrégation**: La variation entre les dimensions des grains n'étant pas trop importante, ce matériau présente une assez bonne cohésion, faible ressuage et surtout une absence totale du problème de ségrégation.

- **La petite granulométrie et la faible dimension des grains** : Le matériau serait utile dans les travaux d'injection, dans la mise en œuvre des structures à fortes densités de ferrailage, ainsi que, dans les travaux de rénovation de structures.

- **L'aspect de surface**: La granulométrie continue et serrée des bétons de sable permet la réalisation des effets architectoniques très esthétiques, soit sur la forme des éléments, ou bien sur l'aspect de surface. Cet aspect est un souci de plus en plus recherché pour toutes les constructions.

I.8.2. Limites des bétons de sable :

A l'heure actuelle, les connaissances sur le béton de sable ne permettent pas un remplacement systématique du béton classique, soit pour des raisons économiques, soit pour des raisons techniques.

- **Raisons économiques** : l'expérience a montré que, par l'utilisation des ajouts, on peut augmenter d'une façon considérable la résistance d'un béton de sable. Toutefois,

la multiplication des ajouts ou l'augmentation du dosage en ciment ne sont pas sans incidence sur le coût. Dans la mesure où ce béton n'apporte pas "un plus" dans l'usage envisagé, il est donc inutile de chercher des performances supérieures. Tout sera donc fonction du contexte local en matière de granulats et de l'usage envisagé.

- **Raisons techniques :** On n'a que peu de connaissances sur les caractéristiques et le comportement du béton de sable, comme le retrait, le fluage et la durabilité, ce qui exclut, peut-être, ce matériau des éléments fortement sollicités ou précontraints.

I.9. Comparaison entre béton de sable (BS) et béton ordinaire (BO) :

I.9.1. Composants :

- **Béton de sable :** [1]
 - Ciment
 - Sable
 - Filler
 - Eau : plus quantité d'eau.
- **Béton ordinaire :**
 - Ciment
 - Sable
 - Gravier
 - Eau : moins quantité d'eau.

I.9.2. Qualités essentielles :

- **Béton de sable :** [3]
 - Ouvrabilité moins : le module de finesse de mélange est plus faible.
 - Résistance faible : due à l'utilisation davantage de quantité d'eau dans la composition du BS pour mouiller toutes les particules fines.
- **Béton ordinaire :** [3]
 - Ouvrabilité plus : le module de finesse de mélange est plus grand.
 - Résistance forte : due à l'effet de présence de gravier dans la composition des BO.

I.9.3. Méthodes de formulation :

- **Béton de sable :** [1]

Méthode théorique et méthode expérimentale

- **Béton ordinaire** : [9]
 - Méthodes de Bolomey
 - Méthode de valette
 - Méthode de Faury
 - Méthode de Dreux-Gorisse

I.9.4. Particularité du béton :

- **Béton de sable** : [1]
 - Retrait plus que le BO
 - Fluage plus faible, voisin de celui d'un BO.
 - Élasticité : module d'élasticité : les bétons de sable ont des modules d'élasticité plus faibles que ceux des bétons classiques. C'est une donnée généralement des matériaux granulaires (0/D) pour lesquels le module diminue lorsque D_{max} diminue [3].
- **Béton ordinaire** :
 - Retrait moins que le BS
 - Fluage voisin de celui d'un BS
 - Elasticité : les bétons ordinaires ont des modules d'élasticité plus forts que ceux des bétons de sable.

I.9.5. Domaines d'emploi :

- **Béton de sable** : [1] [17]
 - Bâtiments
 - Fondations
 - Voiries
 - Aéroport
 - Travaux des réparations
 - Les ponts
 - La projection des surfaces
 - La préfabrication
 - Pieux forés et la réalisation de dallages
 - La réhabilitation de collecteurs d'assainissement

- La stabilisation de parois ou talus
- Les travaux d'injection :
 - Le comblement de cavités
 - La réparation de fondation et renforcement d'ouvrages portuaires

- **Béton ordinaire** : [3]
 - Bâtiments
 - Fondations
 - Voiries
 - Aéroports
 - Ouvrages d'art : les ponts
 - La préfabrication
 - Travaux des réparations

I.10. Conclusion :

Dans ce premier chapitre nous avons exposé une analyse bibliographique sur les bétons de sable. Nous avons donné un concept général, et d'après la description des constituants du BS, on a pu les définir, ensuite décrire leurs propriétés général et spécifiques (maniabilité et granularité ...). En effet le BS est un matériau non fissurant, cette hypothèse est expliquée par l'absence des gros granulats et du faible module d'élasticité, de plus son uniformité du séchage, et aussi par la porométrie et l'homogénéité de ce matériau BS.

II.1. Introduction :

Un béton de sable est un matériau composé essentiellement d'éléments naturels à savoir : le sable, le ciment et l'eau. Cependant, si on cherche à améliorer certaines de ses caractéristiques plus particulièrement son ouvrabilité, l'ajout des adjuvants comme les plastifiants ou les Superplastifiants seront d'une grande utilité, pouvant également jouer un rôle positif dans l'amélioration des caractéristiques mécaniques. D'autres ajouts, comme dans le cas de cette étude où de fumée de silice a été utilisée dans l'amélioration de la résistance du béton.

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

Pour cela on a réparti notre travail en deux parties :

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

La deuxième partie : nous expliquons la méthode de formulation utilisée, après avoir défini les différentes compositions des bétons étudiées.

II.2. Caractérisation et formulation :

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

II.2.1. Caractéristiques des matières premières utilisées :

II.2.1.1 : Ciment :

Le ciment utilisé dans cette formulation est un ciment Portland composé de type CPJ-CEM/IIA 42,5. De provenance de la Société Des Ciments D'El-HAMMA BOUZIANE Les différentes caractéristiques que soit chimiques, physiques ou mécaniques du ciment utilisé sont établies sur les fiches techniques élaborées au niveau des laboratoires de l'usine même. Les différentes caractéristiques sont présentées dans les tableaux suivants :

Tableau II.1: Composition minéralogique.

Composition minéralogique du ciment		
Eléments	Abréviation	Teneur (%)
Silicates tri calciques	C₃S	56.60
Silicates bi calciques	C₂S	22.98
Aluminates tri calciques	C₃A	9.87
Alumino-ferrites tetracalciques	C₄AF	8.25

Tableau II.2 : Propriétés chimiques du ciment utilisé.

Composition chimique du ciment									
Na₂O	CaO	SiO₂	Al₂O₃	FeO₃	MgO	K₂O	SO₃	Cl⁻	P.A.F
0.27	60.24	23.25	5.69	3.36	0.74	0.45	1.94	0.006	1.67

Tableau II.3: Propriétés physiques du ciment.

Propriétés physiques du ciment					
Temps de prise		Consistance normale	Masse volumiques (g/cm³)	Surface spécifiques (BLAINE)(cm²/g)	
Début de prise	Fin de prise	26.91	3.1	3891	
2h50min	4h06min				

Tableau II.4: Résistance mécaniques du ciment.

Résistance mécaniques du ciment (Mpa)			
Essais	Age		
	2 jours	7 jours	28 jours
Compression	13.6	24.6	42.6
Flexion	2.59	4.81	6.6

II.2.1.2. Granulats :

➤ Sable :

Dans notre travaille, on a utilisé 2 types de sable, un sable siliceux naturel (S1) de classe granulaire (0/1) avec un module de finesse MF1=1.92 (sable de dune d'Oued Zhour), un sable de carrière (S2) de classe granulaire (0/3) avec un module de finesse MF2=3.30 de la carrière de Grouz Wilaya de Mila, et un sable corrigée (S3) qui a été employé afin d'améliorer le module de finesse obtenu par le mélange de 20% du sable S1 et 80% du sable S2, avec un module de finesse MF3=2.81.

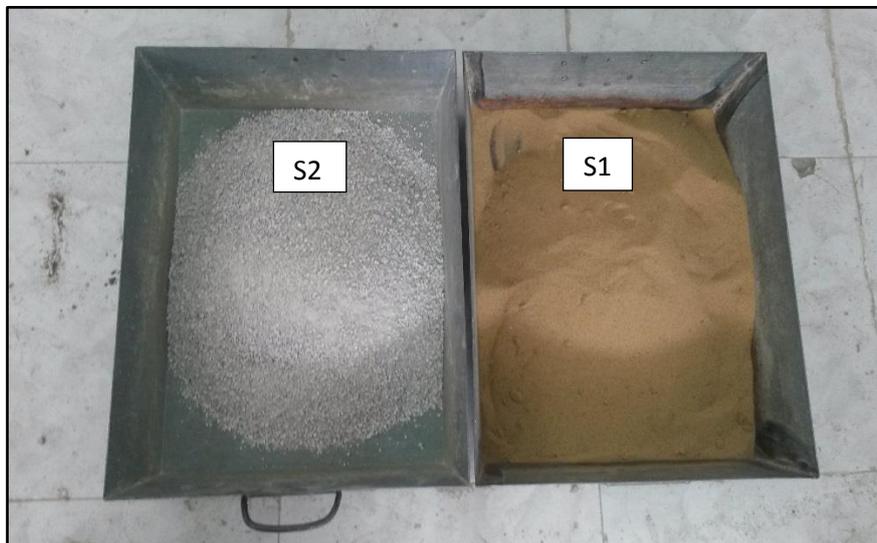


Figure II.1 : les sables d'étude.

Ces sables ont été caractérisé comme suit :

a) Caractéristiques granulométriques :

C'est la mesure de la distribution dimensionnelle des grains des granulats. La variation de la masse du passant en fonction de la dimension de la maille du tamis est représentée par une

courbe granulométrique. L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Cet essai est défini par la norme NF EN 933-1.

Les courbes et l'analyse granulométriques de mélange de sable utilisés sont présentées dans la Figure II.1 et Tableau II.5 si dessous :

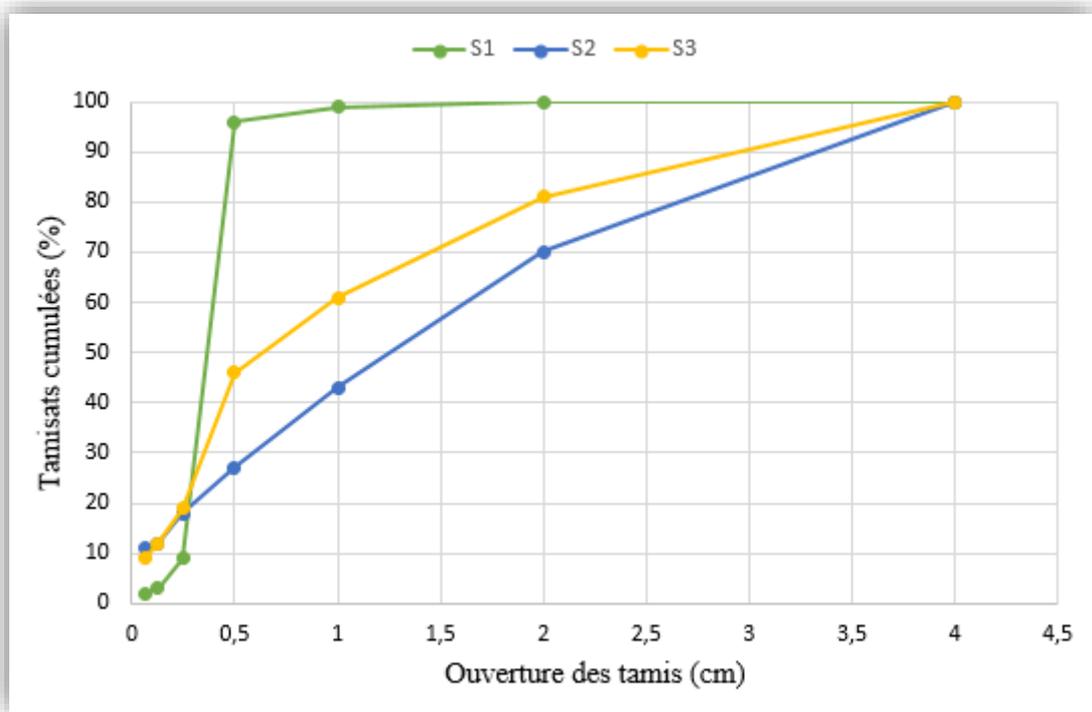


Figure II.2 : courbes d'analyse granulométrique des sables utilisées.

Tableau II.5 : Analyse granulométrique par tamisage des granulats utilisés.

tamis	matériaux		
	S1	S2	S3
4	100	100	100
2	100	70	81
1	99	43	61
0.5	96	27	46
0.25	09	18	19
0.125	03	12	12
0.063	02	11	9

b) Caractéristiques physiques et mécaniques :

Tableau II.6 : Caractéristiques physiques et mécaniques des granulats utilisés.

Caractéristiques	Matériaux		
	S1	S2	S3
Masse volumique absolue	2.66	2.66	2.66
Coefficient d'absorption	2.5	2.5	2.5
Module finesse	1.92	3.3	2.81

II.2.1.3. Superplastifiant :



Figure II.3 : Superplastifiant (MEDAFLOW 30).

Dans le cadre de notre étude, on a utilisé un superplastifiant haut réducteur d'eau à base de polycarboxylates d'Ether et de dénomination commercial Granitex MEDAFLOW 30. Les données techniques de super plastifiant sont présentées dans le tableau suivant:

Tableau II.7 : caractéristiques MEDAFLOW 30.

Caractéristiques techniques du super plastifiant						
Dénomination	Densité	pH	Extrait sec	Teneur en chlore	Aspect	Couleur
MEDAFLOW 30	1.07 ± 0.01	6 – 6.5	30%	< 0.1 g/l	Liquide	Brun clair

II.2.1.4. Fumée de silice :

Elle est à base de microsilice provenant de la société « **GRANITEX** » sous forme de poudre, cette fumée de silice est désignée par le nom « MEDAPLAST HP », il permet :

- D'obtenir des bétons durables à résistances mécaniques élevées.
- D'obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques et atmosphériques.



Figure II.4 : Fumée de Silice.

Ses caractéristiques physiques sont représentées au tableau suivant :

Tableau II.8 : caractéristiques fumée de silice.

Caractéristiques techniques du fumées de silice							
Aspect	Densité	Composition			Surface spécifique > 15 (m ² /gr)	Humidité par étuves à 105°C < 1 (1%)	Taille des particules < 0.1 (microns)
		SiO2 > 85(%)	SO3 < 2.5(%)	Cl- < 0.2(%)			
Poudre	0.5						

II.2.1.5. Eau de gâchage :

L'eau utilisée pour l'ensemble des essais est celle de l'eau potable base de vie ARAIR de lieu Laboratoire Rizzani De Eccher qui répond aux critères d'acceptabilité des normes en vigueur.

II.2.2. Formulation des bétons d'étude :

L'objectif de toutes les méthodes de formulations des bétons est de déterminer la combinaison de matériaux à utiliser pour produire le béton qui aura les propriétés désirées et qui sera le plus économique possible. Ainsi l'accroissement des performances mécaniques et la stabilité de béton obtenu par la réduction de la porosité. On devra rechercher un mélange compact, c'est-à-dire une haute compacité et une faible quantité d'eau de gâchage.

Nous utiliserons la méthode de l'université Sherbrooke ajustée pour la formulation des BS de notre étude.

II.2.2.1. La méthode de formulation de l'université de Sherbrooke : [19]

La méthode de formulation développée à l'université de Sherbrooke permet de formuler un BHP sans air entraîné, elle peut aussi être utilisée pour formuler un BHP à air entraînée à condition de tenir compte de la réduction de la résistance à la compression due à la présence du réseau de bulles d'air contenu dans le béton. Cette méthode très simple suit la même approche que la norme ACI 211-1(American Concrete Institute). Il s'agit d'une combinaison de résultats empiriques et de calculs basés sur la méthode des volumes absolus. La quantité d'eau contenue dans le super plastifiant est considérée comme faisant partie de la quantité d'eau de gâchage. L'organigramme de cette méthode est présenté dans la Figure suivante :

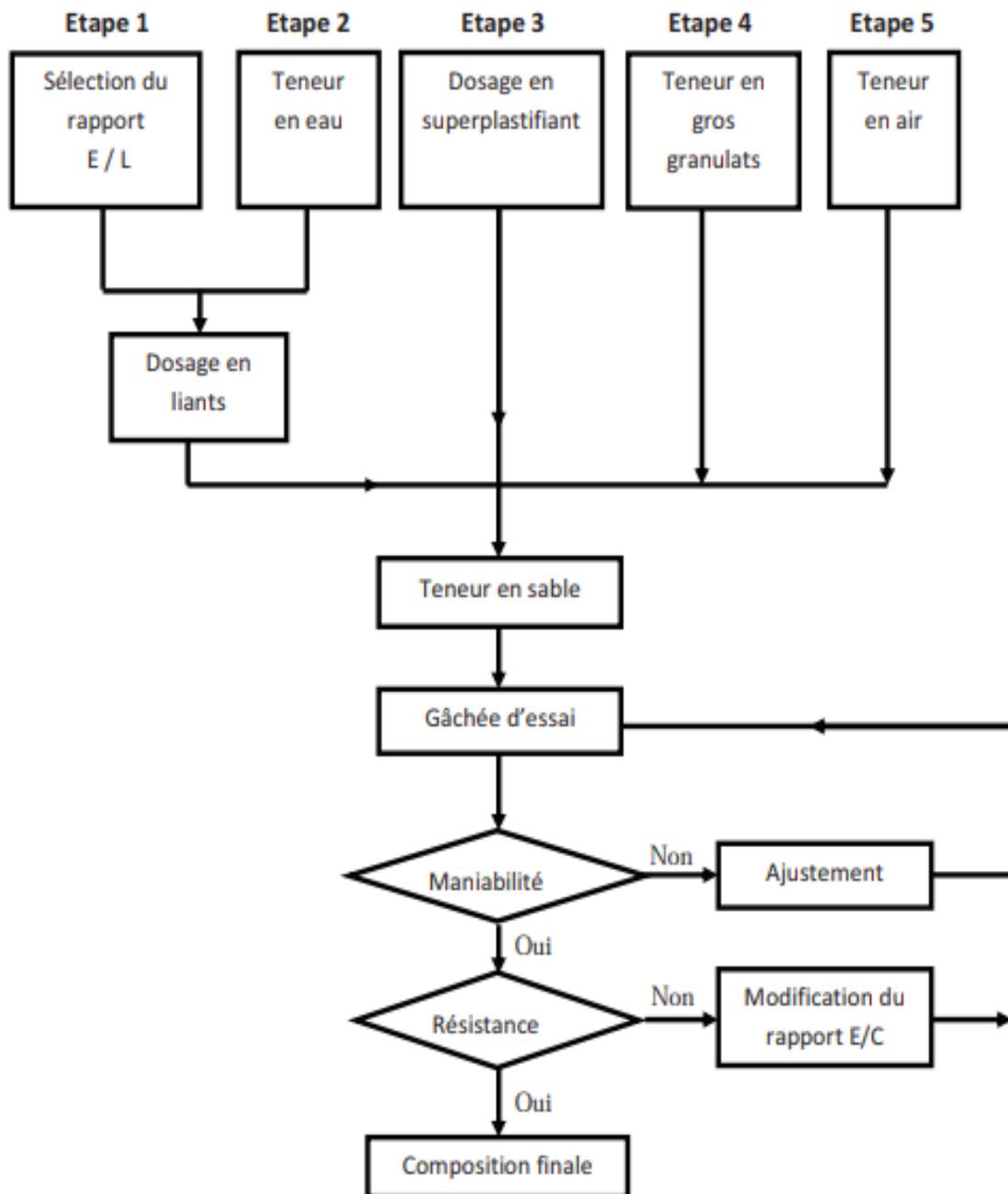


Figure II.5 : Organigramme de la méthode proposée pour formuler des BHP [19].

La procédure de formulation commence par le choix de cinq caractéristiques particulières du BHP ou des matériaux utilisés:

- ✓ Le rapport eau / liant.
- ✓ Le dosage en eau.
- ✓ Le dosage en superplastifiant.
- ✓ Le dosage en gros granulats.
- ✓ Le teneur en air.

➤ **Rapport eau/liant**

On peut trouver le rapport eau / liant en utilisant la Figure II.6 pour des bétons ayant une résistance à la compression donnée à 28 jours. Le fuseau de la Figure II.6 donne une gamme relativement étendue de rapport eau / ciment pour une résistance donnée. Si l'on ne connaît pas l'efficacité du liant que l'on utilise, on peut commencer par prendre la valeur moyenne donnée par ce fuseau.

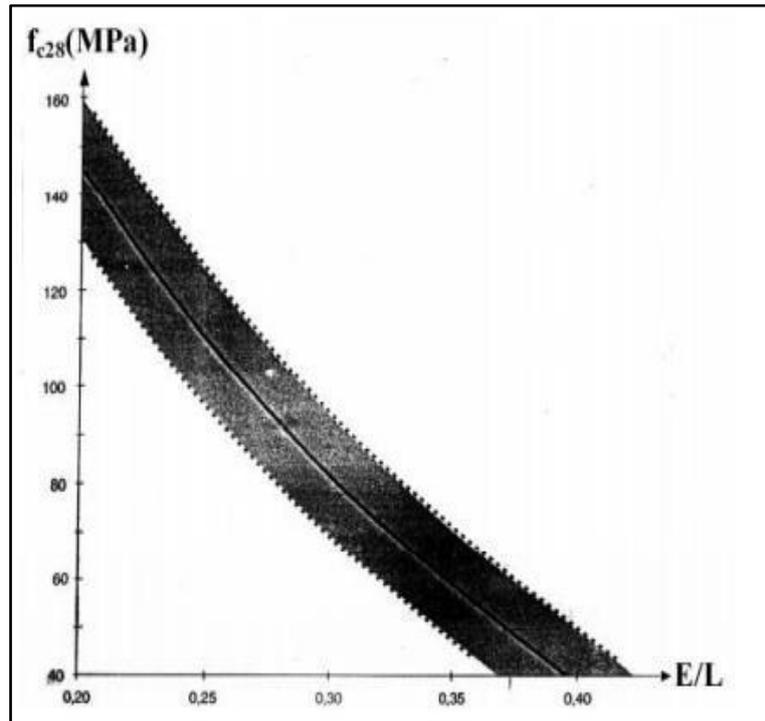


Figure II.6 : Abaque Relation proposée entre le rapport eau/liant et la résistance à la compression [19].

➤ **Dosage en eau :**

Une des plus grandes difficultés rencontrées lorsque l'on calcule la composition d'un BHP est de déterminer la quantité d'eau qu'il va falloir utiliser pour fabriquer un béton qui aura un affaissement de 200 mm plus d'une heure après son malaxage. En effet, la maniabilité d'un BHP est contrôlée par plusieurs facteurs: la quantité initiale d'eau, la réactivité du ciment, la quantité de superplastifiant et son degré de compatibilité avec ce ciment particulier.

La meilleure façon de trouver le bon rapport entre la quantité d'eau et la quantité de superplastifiant est d'utiliser un plan d'expérience. La Figure II.7 présente une approche

simplifiée, basée sur le concept de point de saturation. Pour calculer une formulation robuste, et lorsque le point de saturation du superplastifiant n'est pas connu, on suggère de commencer avec une quantité d'eau de malaxage égale à 145 l/m³.

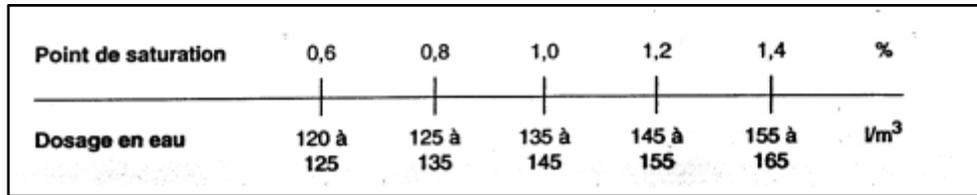


Figure II.7 : Détermination du dosage en eau [19].

➤ **Dosage en superplastifiant :**

Le dosage en superplastifiant se déduit du dosage au point de saturation. Si l'on ne connaît pas le point de saturation, on peut toujours commencer avec un dosage en superplastifiant égale à 1.0%.

➤ **Dosage en gros granulat :**

Le dosage en gros granulat peut être déduit de la Figure II.8 en fonction de la forme des granulats. S'il y a quelque doute sur la forme des granulats ou si on ne la connaît pas, on peut toujours commencer avec une quantité de gros granulats de 1000 kg/m³.

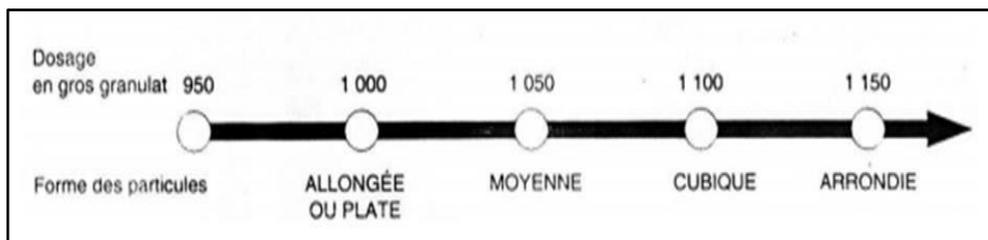


Figure II.8 : dosage en gros granulat [19].

➤ **Teneur en air :**

Les BHP qui sont utilisés dans des environnements où il n'y a pas de cycle de gel-dégel n'ont évidemment pas besoin de contenir de l'air entraîné, de telle sorte que la seule quantité

d'air que l'on retrouvera dans les BHP est le volume d'air piégé. Cependant, de façon à améliorer la manipulation et la mise en place des BHP.

Quand on fabrique des BHP qui ont de très faibles rapport eau/liant, on a souvent observé que les combinaisons ciment-superplastifiant n'entraînent pas toujours la même quantité d'air et que certains bétons ont tendance à entraîner beaucoup plus d'air que d'autres. L'expérience a démontré qu'il était assez difficile de fabriquer des BHP qui contiennent moins de 1% d'air piégé et que, dans les pires des cas, la teneur en air piégé peut être aussi élevée que de 3%. Par conséquent, certains auteurs suggèrent d'utiliser une valeur de 1.5% comme valeur initiale de la quantité d'air piégé et d'ajuster les résultats par la suite en fonction de ce qui est obtenu lors des gâchées d'essai.

II.2.2.3. Formules de calculs :

Les calculs nécessaires à la formulation de notre béton de sable d'étude sont :

- 1. Rapport E/C :** Reporter la valeur du rapport eau/liant telle que choisie dans la Figure II.6.
- 2. Dosage en super plastifiant :** on prend la valeur de 1.2% du poids de ciment.
- 3. Quantité d'eau nécessaire :** déduire la quantité d'eau nécessaire, selon le point de saturation montré dans la Figure II.7 (dans notre cas on prend 200 l/m³ d'eau avec le point de saturation 2%).
- 4. Dosage en liant :** D'après le rapport E/C et la quantité d'eau nécessaire on peut calculer la masse du liant, pour notre cas c'est le ciment CPJ 42.5.
- 5. Les valeurs relatives au superplastifiant (Figure II.9) :**

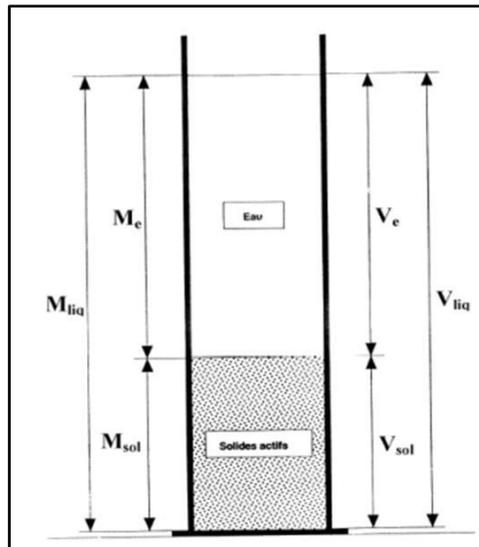


Figure II.9 : Représentation schématique d'un super plastifiant [1].

- a) Calculer la masse de solides dans le superplastifiant M_{sol} (kg):

$$M_{sol} = \frac{C \times D}{100}$$

Où :

C : La masse de liant.

D : Le dosage en super plastifiant (la masse de solides).

- b) Calculer le volume du superplastifiant liquide V_{liq} (l/m³) :

Le volume de super plastifiant liquide qui contient M_{sol} se calcule de la façon suivant :

$$M_{sol} = \frac{V_{liq} \times d_{sup}}{100}$$

M_{sol} : Masse des particules solides de super plastifiant.

d_{sup} : Densité du super plastifiant.

S : Teneur en solides de super plastifiant.

- c) Calculer le volume d'eau dans le super plastifiant V_e (l/m³):

$$V_e = \frac{V_{liq} \times d_{sup}}{100}$$

d_{sup} : Densité du super plastifiant.

V_{liq} : Volume de super plastifiant liquide.

S : Teneur en solides de superplastifiant.

d) Calculer le volume des solides contenus dans le superplastifiant **Vsol**(l/m³) :

$$V_{sol} = V_{liq} - V_e$$

6. Volume de ciment : en divisant la masse du ciment sur sa densité absolue (l/m³).

7. Quantité d'air piégé : Multiplier la quantité d'air par 10 pour obtenir le volume d'air piégée en l/m³, pour notre cas on a suggéré d'utiliser une valeur de 1.5%.

8. La somme de tous les volumes : c'est le taux des volumes calculés précédemment; volume d'eau + volume du ciment + volume d'air + volume des solides dans le superplastifiant.

9. Volume de granulats fin : calculer le volume de granulat fin (en l/m³) en sous trayant de 1000 litres, le volume précédent.

10. La masse de granulat sec : Maintenant que l'on connaît le volume de granulat fin, on peut calculer la masse de granulat fin en multipliant son volume par sa densité absolue(kg).

11. La masse volumique du béton : on doit additionner toutes les masses telles que, la masse d'eau, masse du ciment, masse de solides en SP, masse de granulats fin (kg/m³).

➤ **Test expérimental :**

Tableau II.9 : Composition des différentes BS testés.

Matériaux	Dosage en kg/m3			
	BS1	BS2	BS3	BS4
	E/C			
	0.92	0.45	0.55	0.55
Ciment	290	580	363.63	363.63
Eau	268	260.5	235.88	234.01
superplastifiant	2.9	5.8	7.27	4.36
S1	989	862.5	340.49	342.96
S2	989	862.5	1361.96	1371.87
Fumée de silice	-	-	-	-

• **Désignation des bétons utilisés :**

- **BS1 et BS2 :** béton de sable avec 1% de superplastifiant (S4 mélange de 50% du S1 et 50% du S2 avec MF3=2.49).
- **BS3 :** béton de sable avec 2% de superplastifiant (S5 mélange de 25% du S1 et 75 % du S2 avec MF3= 2.63).
- **BS4 :** béton de sable avec 1.2% de superplastifiant (S3 mélange de 20% du S1 et 80 % du S2 avec MF3= 2.81).

• **Composition du Béton de sable :**

L'étude a été menée sur 03 types des compositions des bétons. La démarche adoptée dans ce travail consiste à faire 30 séries d'éprouvettes immergées dans l'eau potable, le Tableau II.9 montre la composition des différents bétons étudiés :

➤ Série 01 :

Tableau II.10 : composition des différentes BS de la série 01.

matériaux	Dosage en kg/m ³		
	E/C		
	0.50	0.55	0.60
Ciment	400	363.63	333.33
Eau	232.19	234.01	235.57
superplastifiant	4.8	4.36	3.99
S1	337.44	342.96	347.48
S2	1349.76	1371.87	1389.95

➤ Série 02 :

Tableau II.11 : composition des différentes BS de la série 02.

Matériaux	Dosage en kg/m ³		
	E/C		
	0.50	0.55	0.60
Ciment	368	334.54	306.67
Eau	228.62	230.77	232.58
Superplastifiant	4.8	4.36	3.99
S1	310.78	318.69	325.29
S2	1243.14	1274.79	1301.16
Fumée de silice	32	29.09	26.66

➤ **Série 03 :**

Tableau II.12 : composition des différentes BS de la série 03.

Matériaux	Dosage en kg/m ³		
	E/C		
	0.50	0.55	0.60
Ciment	360	327.27	300
Eau	227.73	229.95	231.83
Superplastifiant	4.8	4.36	3.99
S1	297.25	312.64	319.73
S2	1189.01	1250.58	1278.93
Fumée de silice	40	36.36	33.33

➤ **Désignation des bétons utilisés :**

Série 01 : béton de sable avec 1.2% de superplastifiant.

Série 02 : béton de sable avec 1.2% de superplastifiant et 8% de fumée de silice.

Série 03 : béton de sable avec 1.2% de superplastifiant et 10% de fumée de silice.

II.2.2.4. Fabrication des bétons, mise en place et conservation :

➤ **Malaxage du béton**

Le gâchage consiste que tous les composants nécessaires sont préparés et que les granulats sont bien secs. Le malaxage des bétons a été effectué à l'aide d'une bétonnière d'une capacité de 50 litres.

Tableau II.13: Séquence de malaxage des bétons.

Temps (min)	Opérations
0	Mouillage de la paroi interne du malaxeur
1	Verser les constituants dans la cuve : d'abord demi quantité des

	sables, puis les fines et ensuite le reste des sables.
1.5	Malaxer à sec pendant 30s.
3	Ajouter l'eau pendant 1 min 30s, le malaxeur en marche
4	Le superplastifiant est mélangé dans un tiers d'eau après l'introduction des premiers tiers d'eau au cours du malaxage, ensuite on à introduire la quantité d'eau restante.
6	Malaxer pendant 2 min.

➤ **Forme des éprouvettes :**

Dans les essais réalisés pour l'étude des bétons, un seul type d'éprouvette (Figure II.10) a été utilisé (cubes 15*15*15 cm).



Figure II.10: Forme d'éprouvettes d'étude.

➤ **Remplissage et vibration :**

Après le malaxage qui dure environ 6 minutes, le béton est prêt à l'emploi. Le béton est introduit dans des moules déjà graissés par une huile pour faciliter le démoulage après 24heures de leur coulage (figure II.11). Le coulage est exécuté en deux couches vibrées jusqu'à la stabilisation de niveau du béton. Le but de la vibration est le remplissage parfait du moule. A la fin du coulage, il faut araser les éprouvettes à l'aide d'une règle.

La face supérieure de l'éprouvette doit être lisse et bien finie pour chaque gâchée et juste après le malaxage (Figure II.10), on procède à la mesure de la maniabilité, caractérisée par l'affaissement au cône d'Abrams.



Figure II.11: Préparation des moules avant le remplissage.

➤ **Conservation des éprouvettes :**

Les éprouvettes sont démoulées après 24 heures et conservées dans l'eau. Avant le démoulage les éprouvettes sont conservées dans un locale pendant $24h \pm 1h$. Pour cette étude on a adopté les conditions du chantier, c'est-à-dire que le mûrissement des bétons d'étude a eu lieu dans l'eau potable.

Après le démoulage, les éprouvettes sont conservées (Figure II.12) dans l'eau potable jusqu'à l'échéance déterminé (7 jours, 14 jours et 28 jours).



Figure II.12 : conservation des éprouvettes.

II.3. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté chacun des éléments constituant le béton de sable objet de notre étude, les méthodes utilisées pour la caractérisation de chaque constituant en prenant le soin de bien respecter les normes universellement reconnues ainsi que le mode de formulation du béton. Ainsi que le détail des différentes formulations a été présenté dans cette partie pour obtenir les différentes valeurs des caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques qui permettront d'optimiser la formulation du béton que nous allons utiliser pour l'étude de son comportement.

III.1. Introduction :

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

Cette partie portera sur la présentation et la discussion des résultats des essais expérimentaux obtenus sur les différents bétons testés, à savoir les essais à l'état frais : affaissement au cône d'Abrams, ainsi qu'à l'état durci : résistance mécanique à la compression, essai d'absorptions et essai de ramollissement.

III.2. Méthodologie adaptée pour les manipulations :

Rappelons que le but de notre travail est la formulation et la caractérisation d'un béton haute performance. Pour atteindre les objectifs on a adopté la méthodologie suivante :

- Il fallait préparer des gâchés pour confectionner 84 séries d'éprouvettes cubiques (15×15×15) cm³.
- La composition a été déterminée par la méthode de formulation de l'université de Sherbrooke.
- Les essais étant exécutés à : 1j, 7j, 14 j, et 28 jours.
- Les propriétés étudiées : l'affaissement, et la résistance à la compression, l'absorption et le ramollissement.

III.3. Essai réalisé à l'état frais :

III.3.1. Essai d'affaissement au cône d'Abrams (mesure d'ouvrabilité) :

L'essai d'affaissement est réalisé à l'aide du cône d'Abrams selon la norme NF P 18 -451 (décembre 1981).

Cet essai est très simple à mettre en œuvre, (il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40mm), consiste à mesurer l'affaissement d'un cône de béton frais sous l'effet de son propre poids (plus cet affaissement sera grand et plus le béton sera réputé fluide).

Le principe de l'essai est l'introduction du béton dans un moule tronconique, légèrement huilé, en trois couches d'égales hauteurs qui seront mises en place au moyen de la tige de piquage actionnée 25 fois par couche. Une fois le moule rempli, nous arasons son bord supérieur, puis le démoulage s'opère en soulevant le moule avec précaution.

Le béton s'affaisse suivant sa résistance caractéristique, cette hauteur est mesurée grâce au portique (figure III.1). C'est cette valeur qui nous donne la nature du béton formulé [ferme, plastique, très plastique ou fluide].

Les valeurs d'affaissement mesurées des bétons étudiés sont présentées dans le tableau III.1 :

Tableau III.1 : Résultats d'essai d'affaissement des différents bétons de sables étudiés.

Dénomination	Série 01			Série 02			Série 03		
	E/C			E/C			E/C		
	0.50	0.55	0.60	0.50	0.55	0.60	0.50	0.55	0.60
Affaissement (6 min)	15.5	7	7	23	22	13.5	23	7.5	11

Tableau III.2 : Résultats d'essai d'affaissement de la série testée.

Dénomination	BS1	BS2	BS3	BS4
	E/C			
	0.92	0.45	0.55	0.55
Mélange de sable (%)	50% S1+50% S2	50% S1+50% S2	25% S1+75% S2	20% S1+80% S2
Affaissement (6 min)	17	16	3	7



Figure III.1 : Résultats d'essai d'affaissement.

➤ **Commentaire :**

Après analyse des différents résultats de l'affaissement, on peut conclure que:

- Pour un même rapport E/C l'affaissement est différent.
- Les bétons de sables étudiés dans ce travail avec le rapport E/C = 0.55 sont classés comme des bétons plastique (classe S3 : affaissement entre 5 et 7 cm), conformément aux prescriptions de la norme française [NF EN 206-1], on remarque aussi que le rapport E/C = 0.50 pour chaque béton de sable (BS1, BS2 et BS3) est le rapport qui donne un béton de sable fluide, son affaissement est respectivement égal à 15.5, 23 et 23 cm.
- Si on augmente le dosage du superplastifiant, l'affaissement du béton diminue, cet affaissement ne passe pas de 3 cm pour un dosage de 2% de superplastifiant (BS3), ceci est due à l'augmentation de la quantité du sable qui a besoin beaucoup d'eau.
- L'affaissement passe de 15.5 cm à 23cm pour un même rapport (E/C = 0.50) donc on assiste à une amélioration de la maniabilité, ceci est due à l'action dispersante du superplastifiant qui augmente la maniabilité du béton et donne une meilleure distribution des grains de ciment et par conséquent, une meilleure hydratation.
- L'utilisation de la proportion de (20% S1+ 80% S2) pour la correction de la granulométrie des sables utilisées présente une amélioration à la fois du module de finesse, qui influe positivement sur la maniabilité, et facilite la mise en œuvre du béton de sable.
- L'utilisation de superplastifiant (réducteurs d'eau) permet la réduction du rapport E/C en s'opposant à la floculation des grains de ciment, donc nos bétons présentent un squelette granulaire conventionnel noyé dans une matrice de compacité accrue. Ainsi que la présence du superplastifiant est en outre essentielle pour éviter la formation de conglomérats. La compacité augmentée, ce qui améliore la durabilité.
- La fumée de silice réduit considérablement les deux phénomènes ségrégation et ressuage (perte d'eau) en consommant l'eau encore libre introduite au moment de l'humidification via la grande surface développée de la fumée de silice. En colmatant les pores du béton frais, il limite aussi la migration de l'eau vers la surface, et inversement la pénétration d'eau (salée par exemple) de la surface vers l'intérieur du béton au moment de la prise.

III.4. Essai réalisé à l'état durcis:

III.4.1. Essai de compression:

Les essais de compression sont réalisés sur des éprouvettes cubiques (15 x 15 x 15) cm³ pour chaque âge (7, 14 et 28 jours) dans le but de prendre une valeur moyenne. Les éprouvettes ont été obtenues par projection du béton dans les moules. Une fois arasées les éprouvettes ont été conservées à l'eau potable pour éviter tout échange d'eau avec l'extérieur, la température a été maintenue constante à 21°C ± 1°C, car l'évaporation précoce de l'eau peut interrompre rapidement l'hydratation du ciment. Le test de compression a été effectuées à l'aide d'une presse mécanique de capacité maximale de 2000 KN asservie en force avec une vitesse de chargement de 2.4 KN/Sec (Figure III.2).

III.4.2. Préparation et positionnement des éprouvettes:

Avant de passer à l'action d'écrasement, il faut tenir compte des recommandations suivantes :

- Essuyer toute humidité excessive de la surface de l'éprouvette avant de la positionner dans la machine d'essai.
- Tous les plateaux de la machine d'essai doivent être essuyés, et les corps étrangers situés à surface de l'éprouvette, doivent être retirés.
- Centrer l'éprouvette sur le plateau.



Figure III.2 : Essai de résistance à la compression

(Laboratoire de RIZZANI DE ECCHER).



Figure III.3 : résultat d’essai de compression.

Les résultats des séries des tests d’essais de compression sont donnés dans le Tableau III.3ci-après :

Tableau III.3: Résistance à la compression des différentes séries testés.

Jours	Résistance à la compression (MPa)			
	BS1	BS2	BS3	BS4
	E/C			
	0.92	0.45	0.55	0.55
7	7.48	/	15.19	17.72
14	8.56	/	17.67	20.00
28	9.66	44.70	22.22	21.88

Les résultats des séries d’essais de compression sont donnés dans le Tableau III.4 ci-après :

Tableau III.4: Résistance à la compression des différents bétons de sables étudié.

Jours	Résistance à la compression (MPa)								
	Série 01			Série 02			Série 03		
	E/C			E/C			E/C		
	0.50	0.55	0.60	0.50	0.55	0.60	0.50	0.55	0.60
7	21.4	17.72	13.93	22.63	17.47	14.92	23.88	17.71	14.96
14	21.73	20.00	16.27	29.61	20.09	16.60	29.80	20.18	16.72
28	27.15	21.88	21.08	31.68	25.21	21.19	34.05	25.65	21.50

Les résultats de ces essais pour les différents types de bétons sont représentés graphiquement ci-après :

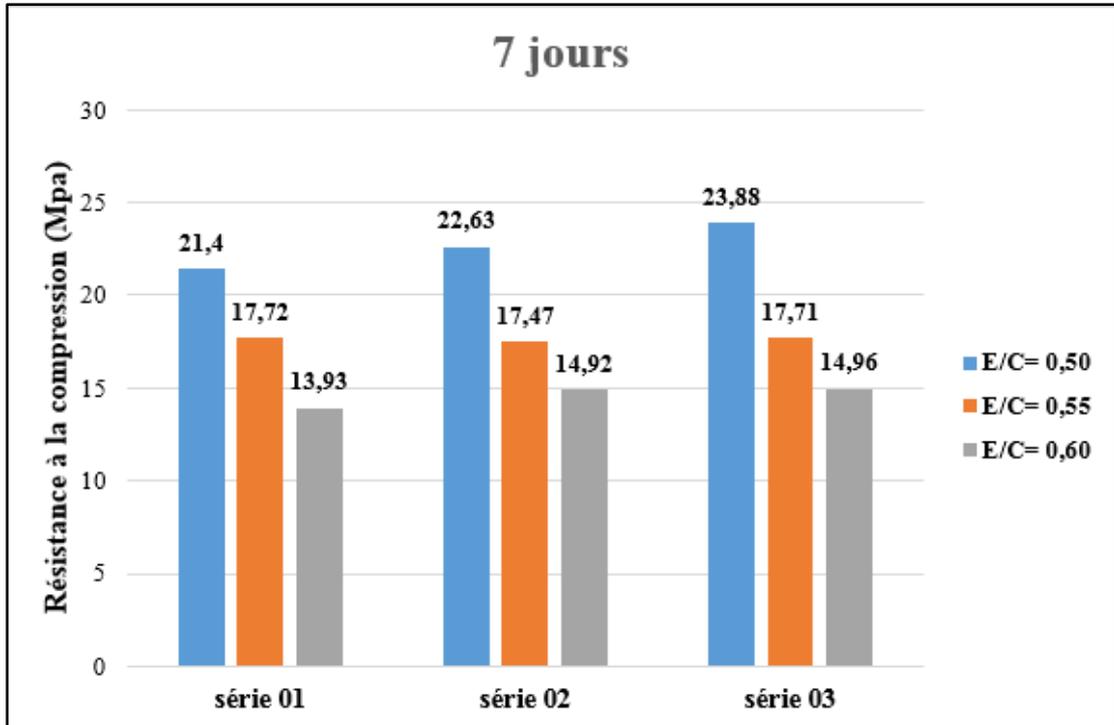


Figure III.4 : L'évolution de la résistance à la compression en fonction des BS avec différents rapports E/C après 7 jours.

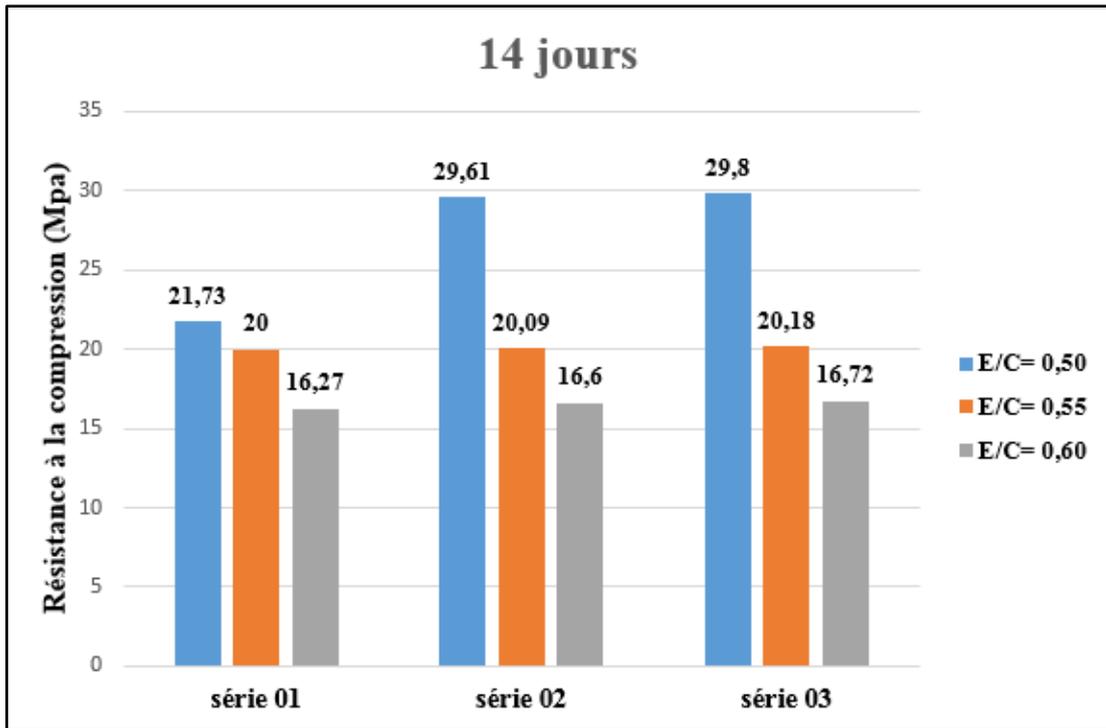


Figure III.5: L'évolution de la résistance à la compression en fonction des BS avec différents rapports E/C après 14 jours.

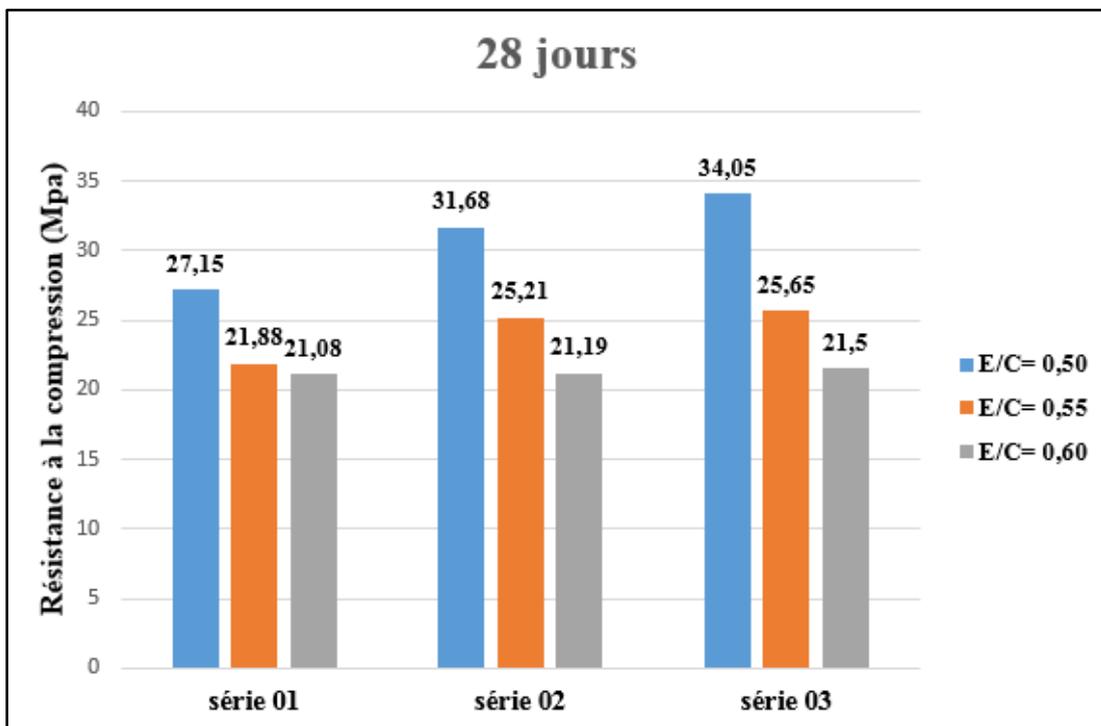


Figure III.6: L'évolution de la résistance à la compression en fonction des BS avec différents rapports E/C après 28 jours.

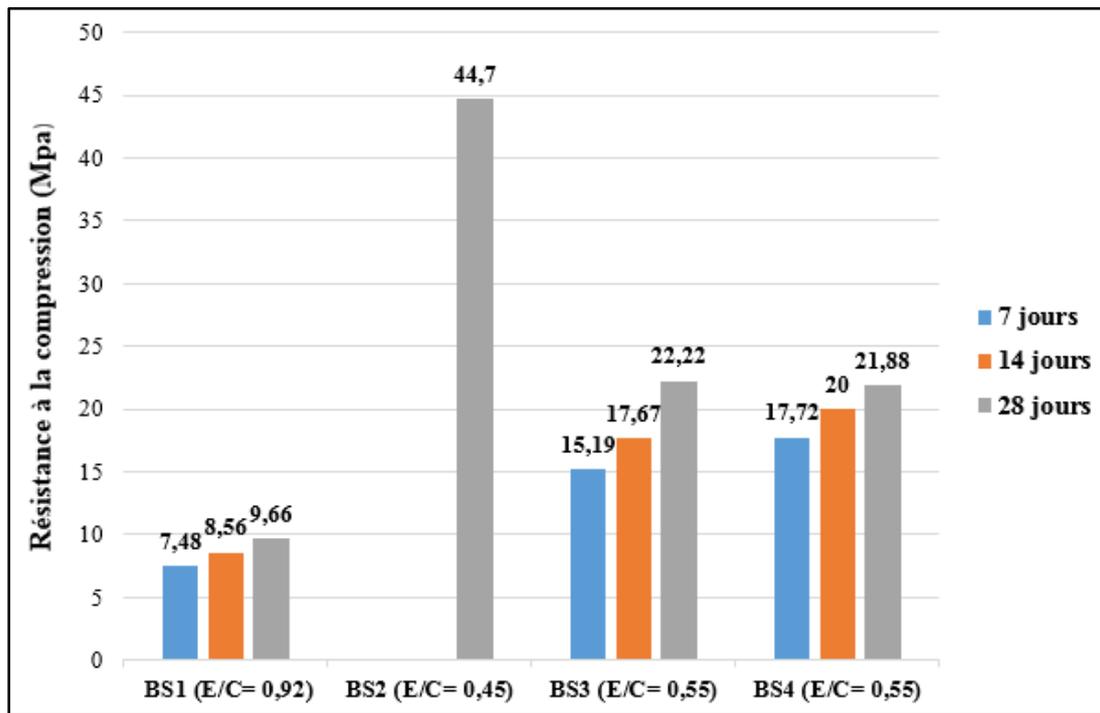


Figure III.7: L'évolution de la résistance à la compression en fonction des BS testés avec différents rapports E/C après 7, 14 et 28 jours.

➤ **Commentaire :**

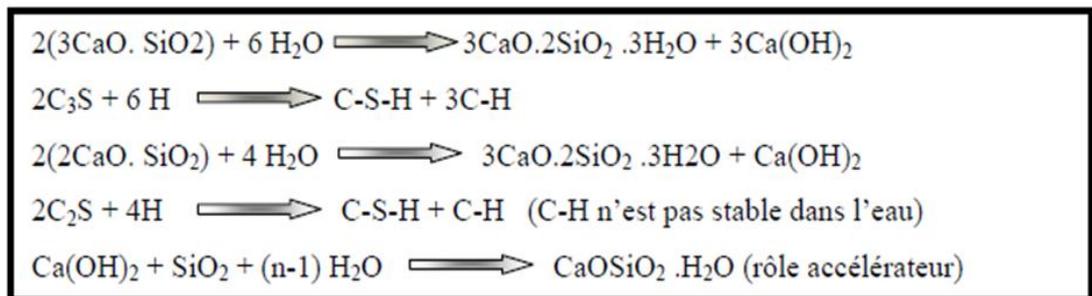
Dans ce travail, nous avons étudié la résistance des bétons à la compression avec et sans ajouts cimentaires. D'après les résultats présentés sur les histogrammes nous constatons que :

- Toutes les histogrammes ont la même allure.
- La résistance à la compression est d'autant plus élevée que le rapport E/C diminue et que l'âge du béton est plus grand, et ceci s'explique par la relation directe entre la résistance et la porosité de la pâte de ciment.
- Le rapport E/C réduit ce qui signifie que la quantité d'eau est très faible par rapport à la masse de ciment, les grains de ciment sont très près les uns des autres. Toute l'eau pourra réagir avec le ciment et il ne restera que très peu de porosité capillaire, la perméabilité du béton sera très faible et les propriétés mécaniques du béton seront très élevées.
- La résistance à la compression RC28 augmente de 18.9 %, lorsque E/C passe de 0.60 à 0.55, elle augmente de 25.66 %, lorsque E/C passe de 0.55 à 0.50, cela est

dû à la diminution du dosage d'eau et l'effet du superplastifiant qui contribuent à tous les deux à l'amélioration des résistances à la compression, d'après les 3 mélanges pour cette série, tout en notant que la meilleure résistance est donnée par la formulation (E/C= 0.50).

- A partir des histogrammes représentés dans les figures (III.4, III.5, III.6) on remarque une augmentation sensible de la résistance mécanique des échantillons élaborés avec l'ajout de la fumée de silice par rapport à l'échantillon sans fumée de silice, de résistance caractéristique à 28 jours supérieure à 30 MPa, La cinétique de montée en résistance notée est plus rapide, cela peut être expliqué par le double rôle de la fumée de silice :

Il y a d'abord l'effet pouzzolanique correspondant à l'association partielle ou totale des fines avec l'eau et la chaux libérée par l'hydratation du ciment, la fumée de silice fixe la portlandite hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂) en une combinaison peu soluble, selon les réactions :



- D'après les histogrammes présentés à la figure (III.6), on constate une évolution de la résistance à la compression en fonction du temps. On a pu avoir le meilleur résultat qui est de 34.05 MPa à l'âge de 28 jours, avec un pourcentage de 10 % de la fumée de silice correspond à un rapport E/C de 0.50.
- A partir des histogrammes représentés dans les figures (III.7) on remarque que BS1 donne des résistances très faibles avec une cinétique d'hydratation plus lente, ce qui peut être expliqué par la forte quantité d'eau et de faible dosage de ciment par contre le BS2 qui a la meilleure résistance (44.7 Mpa) avec un dosage de 580 kg/m³ de ciment et ça ne peut pas être économique.

III.4.3. Essai d'absorption d'eau :

Dans cette essai on a conservée deux éprouvettes de chaque série avec un E/C=0.50 dans l'eau potable pendant 28 jours on va peser ces éprouvettes (saturées), après on met les éprouvettes dans l'étuve à 40 C° et de les peser après 2 heures.

Le coefficient d'absorption d'eau est déduit de la formule suivante :

$$Ab (\%) = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sec}} \times 100$$

M_{sec} : masse de l'éprouvette sèche (après séchage).

M_{sat} : masse de l'éprouvette saturée.

Les résultats de cette essai sont présentés dans le tableau III.5 suivant :

Tableau III.5: Coefficients d'absorptions des différents bétons étudiés.

	Essai d'absorption d'eau		
	Série 01	Série 02	Série 03
coefficient d'absorption d'eau (%)	0.37	0.54	0.27

➤ **Commentaire :**

Les coefficients d'absorptions obtenus sont inférieurs à 5% ce qui signifie que notre béton est un très bon béton selon la norme NBN B 15-211 (1989).

Il est nettement visible que les bétons à base de 10% de FS sont moins poreux que les bétons à base de 8% de FS et sans FS, notre BS a des coefficients d'absorptions réduits en raison de la porosité qui est réduite (selon la composition : 10% FS) et qui améliore les performances du béton de sable, cela accroît considérablement la durabilité du béton qui conditionne la durée de vie des ouvrages.

On montre sur le tableau III.5 la variation de coefficient d'absorption des différents bétons de sables étudié. Sur ce tableau, l'influence de la taille et la quantité des grains sur l'absorption du béton de sable sont significatives. La série 02 absorbe plus que la série 03 et 01, elle contient une grande quantité de sable que les autres. De plus les granulats fins

possèdent une surface spécifique plus élevée. Donc, plus le granulat est fin, plus la quantité d'eau adsorbée à sa surface par unité de volume sera grande.

III.4.4. Essai de ramollissement :

Dans cette essai on utilise 02 éprouvettes (15×15×15) cm³de chaque série avec un E/C=0.50, une éprouvette conservée dans l'eau potable et l'autre à l'air libre pendant 28 jours à une température de 21±1 C°.

Le coefficient de ramollissement est le rapport de la résistance à la compression d'un matériau saturé d'eau "R_{sat}" à la résistance à la compression du matériaux sec "R_{sec}".

Le coefficient de ramollissement est déduit de la formule suivante :

$$K_{ram} = \frac{R_{sat\ 28j}}{R_{sec\ 28j}}$$

Tableau III.6: Coefficients de ramollissement des déférents bétons étudié.

	Essai ramollissement		
	Série 01	Série 02	Série 03
K_{ram}	1.06	1.09	1.21

➤ **Commentaire :**

Le coefficient de ramollissement caractérise la résistance à l'eau des matériaux, l'essai est réalisé à 28 jours.

Nous constatons d'après les résultats obtenus, que les bétons à base de 10% de FS se comportent à l'eau mieux que les bétons à base de 8% FS et sans FS.

III.5. Conclusion :

L'étude de l'ensemble des résultats concernant les caractéristiques physiques, mécaniques et rhéologique des bétons de sable, nous a permis de dégager l'essentiel de ce que nous pouvons retenir comme résultats de ce chapitre :

- ✓ Le sable de notre étude présente une granulométrie très serrée et discontinue ; nécessitant une correction de sa granulométrie ;

- ✓ Une plus grande quantité d'eau a été utilisée pour les bétons fabriqués avec (50% S1+ 50% S2) par rapport aux autres mélanges de (25% S1+ 75% S2) et (20% S1+ 80% S2), en raison de sa granulométrie très fine ;
- ✓ La maniabilité du béton diminue avec l'augmentation du E/C à cause d'augmentation de la quantité de sable ;
- ✓ La fumée de silice permet d'obtenir des mélanges avec une cohésion très forte avec très peu de ressuage, pour les deux dosages de la FS, due à la finesse de celle-ci, car le diamètre des grains est plus petit que celui des petits grains de ciment ;
- ✓ L'effet du rapport E/C et la variation du dosage de FS dans les formulations des bétons étudiés sur la résistance à la compression est remarquable ;
- ✓ La résistance à la compression est une fonction croissante de tous les bétons de sables étudié, elle augmente régulièrement avec l'âge du béton ;
- ✓ La meilleure formulation est celle de 10% FS et avec un E/C =0.50 ;
- ✓ Les coefficients d'absorptions obtenus sont inférieurs à 5% ce qui signifie que notre béton est un très bon béton ;
- ✓ Les bétons à base de 10% de FS se comportent à l'eau mieux que les bétons à base de 8% FS et sans FS ;

Conclusion générale :

La formulation d'un béton de sable présente une difficulté majeure par rapport à celle d'un béton traditionnel. En effet, il n'est pas possible d'optimiser séparément les compacités, d'une part, du squelette granulaire et, d'autre part, de la pâte en vue de satisfaire des critères d'ouvrabilité et de résistance.

L'étude de l'influence des paramètres de composition du béton de sable est certainement très utile pour mieux maîtriser la formulation du béton du béton de sable. Dans cette recherche, nous avons présenté qualitativement l'influence de deux paramètres: un adjuvant fluidifiant (superplastifiant), et un ajout (fumée de silice). Les propriétés testées pour notre béton d'étude sont : l'affaissement, la résistance à la compression, l'absorption d'eau et le ramollissement

Nous tenons à rappeler que l'objectif principal de notre travail est d'apporter une contribution pour optimiser la formulation du béton de sable par la méthode de l'université de Sherbrooke, la caractérisation des bétons de sable (à l'état frais et durci), l'influence de la correction des sables sur le comportement mécanique du béton de sable à l'état durci.

Les résultats trouvés après l'élaboration de différentes formulations réalisées par la correction des sables, nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- ✓ En premier lieu, un béton à base de (50% S1 + 50% S2) pour l'étude des caractéristiques mécaniques a été réalisé. Suite aux résultats obtenus, nous nous sommes aperçus que ce mélange de sable, présente des anomalies dues plus particulièrement à la résistance mécanique. De ce fait, une correction de la granulométrie du sable a été adoptée suite à une série de tests qui s'est soldée par le choix de deux proportions à savoir : (25% S1 + 75% S2) et (20% S1 + 80% S2), les sables obtenus montrent une amélioration du module de finesse. En deuxième lieu, plusieurs mixtures à la base de ces proportions ont été confectionnées principalement pour l'évaluation de la résistance à la compression.
- ✓ L'utilisation de la proportion (20% S1 + 80% S2) pour les bétons de sables étudiés améliore l'affaissement et le maintien d'ouvrabilité.

- ✓ Il est préférable d'utiliser un réducteur d'eau (plastifiant ou un superplastifiant ou autre produit) dans le but de réduire la quantité d'eau demandée par les fines de sables qui peuvent réduire les résistances des bétons.
- ✓ On remarque que la résistance à la compression est une fonction croissante de tous les bétons de sables étudié, elle augmente régulièrement avec l'âge et ne présente aucune chute.
- ✓ Les meilleures résistances mécaniques sont celles du béton de sable avec fumée de silice avec un taux de 10%. Donc, la présence d'une quantité importante de la fumée de silice, offre au béton une résistance très remarquable.
- ✓ Cette étude a démontré l'utilisation de la fumée avec un superplastifiant ont un effet positif sur le comportement mécanique du béton de sable par rapport au béton sans fumée de silice.

En fin, on a cité quelques ouvrages réalisés en béton de sable, ou on a constaté que le béton de sable est un bon matériau pour la construction ou des applications de réhabilitation et réparation des différents ouvrages, et d'après notre recherche bibliographique on peut dire que le caractère non fissurant, ouvre au béton de sable de grands espoirs d'utilisation dans divers domaines notamment la réhabilitation ou la réparation des ouvrages dégradés.

Références bibliographiques

- [1] **SABLOCRETE, (1994)**. Béton de sable, Presse de l'école nationale des ponts et des chaussées, Paris, France.
- [2] **H. AZZOUZ, (2009)**. Etude des bétons à base des sables de dune, Mémoire de Magister; Université Mohamed Khider, Biskra.
- [3] **S. Rezzig**, Optimisation de la formulation du béton de sable dans le cadre de valorisation des matériaux locaux, Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider, Biskra.
- [4] **François de LARRARD, (2002)**. Construire en béton, l'essentiel sur les matériaux, Presse de l'école nationale des ponts et des chaussées, Paris, France.
- [5] **NF P 18-508**: Aditions pour béton hydraulique. Aditions calcaire-spécification et critères de qualité: indice de classement P 18-508.
- [6] **Adam. M. Neville, (2000)**. Propriétés des bétons, édition EYROLLES, Paris, France2000.
- [7] **R. DUPAIN, R. LANCHOR, et J.C. SAINT-ARROMAN, (2004)**. Granulats, sols, ciments et bétons, caractéristique des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire.
- [8] **NF EN 196-1**: Méthodes d'essais des ciments-détermination des résistances Mécaniques: indice de classement P 15-471.
- [9] **G. DREUX & J. FESTA, (1998)**. Nouveau guide du béton et de ses constituants, Edition Eyrolles, 8^{ème} édition.
- [10] **NF EN 934-2**: Adjuvants pour béton, mortier et coulis, Définition, exigences, conformité, marquage et étiquetage, indice de classement: P 18-342.
- [11] **CIMBETON, (2006)**. Les constituants des bétons et des mortiers, chapitre 2, les adjuvants, Paris.
- [12] **NF EN 934-2**: Adjuvants pour béton, mortier et coulis, Définition, exigences, conformité, marquage et étiquetage, indice de classement: P 18-338.
- [13] **SIRGE ETINNE et al, (2008)**. Matériaux de A à Z, Belgique.

[14] **Ir. P. Boeraeve, (2000).** Adhérence des armatures In : Eurocode 2 et cours de béton armé, J. P. Guissart, Institut Gramme.

[15] **Renarrd Favre et al, (1990).** Dimensionnement des structures en béton, Suisse.

[16] **Ir. P. Boeraeve, (Janvier 2010).** Cours de béton armé.

[17] **CHAUVIN, J. J, (Juillet-Aout 1991).** Béton de sable en Union Soviétique, Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC), n° 174.

[18] **Centre d'information sur le ciment et ses applications, (2013).** Les bétons: formulation, fabrication et mise en œuvre, Paris.

[19] **P.C Aitcin, (janvier 2001).** Béton à haute performance, Édition Eyrolles ISBN 2-212-01323-X, Paris, France, 660p.

Annexe

Les méthodes de formulation [1] :

1. Introduction :

Formuler un béton, c'est trouver les proportions des différents constituants, permettant de satisfaire à un cahier des charges, répondant à des critères techniques et économiques, à partir de matériaux donnés.

Nous présentons deux types d'approche, une approche théorique qui constitue une base de formulation de bétons de sable et une approche expérimentale basée sur la réalisation de gâchées successives.

2. Approche théorique de la formulation des bétons de sable :

Les granulats d'un béton jouent un rôle d'ossature, dans laquelle la pâte assure dans un premier temps un rôle rhéologique (cohésion et écoulement) puis un rôle de colle permettant de développer les propriétés mécaniques et de durabilité du matériau durci. Dans le cas des bétons ordinaires, la pâte est constituée d'un mélange d'eau et de ciment, les granulats regroupant généralement deux classes distinctes, le sable et les gravillons.

Formuler un béton ordinaire consiste alors à optimiser le 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 afin d'obtenir l'ouvrabilité désirée, cette pâte étant elle-même 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 d'un terme d'optimisation de la compacité du squelette granulaire. Cette compacité définie comme le rapport du volume solide sur le volume total et correspond au complément à l'unité de la porosité. Rechercher l'optimum de compacité d'un mélange granulaire relève, aujourd'hui encore, de développements complexes et fait l'objet de modélisation poussées, afin de tenir compte des interactions existantes entre les grains dans la perfection de l'empilement.

Au début du siècle, Caquot [3] a pu établir, à partir des résultats expérimentaux, une relation mathématique entre le volume des vides (v) d'un mélange granulaire et son étendue granulaire (d/D) :

$$V=V_0 (d /D)^{1/5} \quad (1)$$

avec v_0 : Constante expérimentale.

Cette formule sous-entend que le mélange défini par son étendue granulaire est optimisé, Elle est à la base de nombreuses méthodes de formulation des bétons qui consistent

généralement à définir une courbe granulaire de référence. Nous citerons pour exemple les méthodes de Bolomey, Faury, Dreux.

2.1. 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, ces constituants sont séparés en deux fractions, les fines regroupant l'ensemble des grains de tailles inférieures à 80 μm et le sable couvrant l'étendue granulaire 80 $\mu\text{m}/D$ (D étant défini ici comme le diamètre maximal du sable).

Les fines sont alors constituées du ciment, de la fine d'addition et de la fraction du sable inférieur à 80 μm . Si la fine d'addition comporte des grains de taille supérieurs à 80 μm , provenant des fines d'ajout. Cette fraction se retrouve intégrée.

Considérant l'étendue granulaire du sable, il est alors admis qu'i présente une porosité (p_s) définie par la formule de Caquot, soit :

$$P_s = 0.75 (0.08/D)^{1/5} (\% \text{ volumique}) \quad (2)$$

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

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

$$[\text{fines}] = [v] \quad (3)$$

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

$$[\text{fines}] = 0.38 (0.08/D)^{1/5} (\% \text{ volumique}) \quad (4)$$

Il est clair que la constante 0.38 n'a pas ici de caractère absolu mais relatif, une précision de $\pm 10 \%$ étant tout à fait raisonnable. Cette formule montre que le dosage en fines augmente et devient que plus le diamètre D diminue, plus le dosage en fines augmente et devient rapidement excessif en terme de ciment seul ; il faut nécessairement avoir recours à l'utilisation de fines de remplissage type fillers.

2.2. Dosage en eau d'un béton de sable :

Le squelette granulaire, y compris, il présente toujours une certaine porosité. Dans des conditions de mise en œuvre donné, cette compacité optimale, conduisant à une porosité minimale, ne sera atteinte que si la consistance le permet.

En admettant que la porosité du squelette granulaire se décompose en la somme d'un volume d'eau (e) et d'un volume de vides piégés (v), la porosité minimale théorique du béton est donnée par la relation suivante, issue une nouvelle fois des travaux sur la compacité de Caquot (équation 1) :

$$(e + v)_{\text{Min.}} = 0.8 (d/D)^{0.2} \quad (5)$$

Avec : d/D l'étendue granulaire y compris les fines.

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 effet de floculation dans l'eau le cas du mélange totalement défloculé (chaque particule élémentaire agit indépendamment) est donnée par la formule suivante :

$$d = \frac{60}{f \cdot \rho} \text{ mm.} \quad (6)$$

A titre d'exemple, pour le ciment, le diamètre moyen des grains tels que défini précédemment est de l'ordre de 5 à 7 μm .

Cette première définition de d n'est valable que dans le cas des mélanges totalement défloculés, c'est -à-dire que chaque particule élémentaire agit indépendamment des autres. Cette définition de d ne peut pas être retenue pour les mélanges floculés, la dimension moyenne des floccs étant alors la limite inférieure de l'étendue granulaire.

Il devient dans ce cas impossible de fixer une valeur précise, la dimension des floccs relevant de considération 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 solution pour la réduction de la porosité théorique minimale théorique. (Figure I.23)

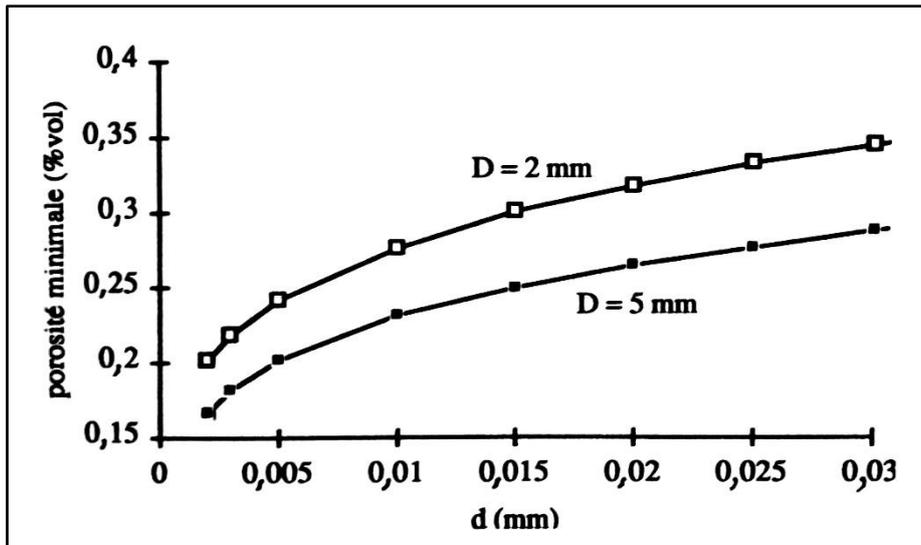


Figure.1 : Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles D du sable [1].

En pratique, il n'est pas toujours souhaitable de produire des bétons ayant la stricte quantité d'eau correspondant à la porosité minimale pour des raisons d'ouvrabilité. Par suite, conformément à la figure I.24, pour des quantités d'eau inférieures à la quantité d'eau permettant d'obtenir l'ouvrabilité optimale (ouv. Opt), le mélange piégera 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.

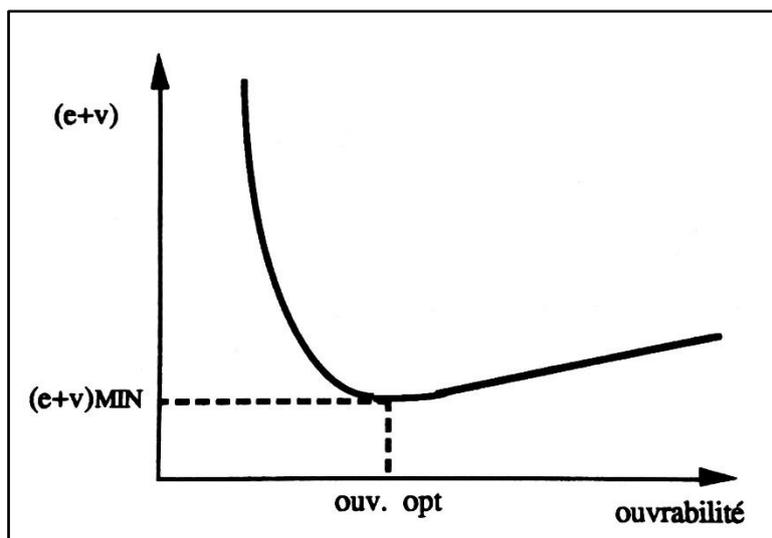


Figure.2 : Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice pour une mise en œuvre donnée [1].

Par contre, si l'on augmente la quantité d'eau à partir de la valeur conduisant $(e+v)_{\text{Min}}$, la quantité d'air piégée sera stable et l'ouvrabilité augmentera de façon linéaire. (Figure I.24)

Finalement, pour estimer le dosage en eau, il faut préalablement évaluer la quantité d'air piégée. Dans le cas des bétons de sables cette quantité est légèrement supérieure à ce qu'elle est dans les bétons ordinaires. 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%.

$$[\text{vides}] = k [\text{eau}] \text{ (l/m}^3\text{)} \quad (7)$$

Avec : k compris entre 0.2 et 0.25.

2.3. Dosage en sable :

Il suffit de compléter au mètre cube la somme des dosages des constituants fines, eau et vides. Nous avons alors tout simplement :

$$[\text{Sable}] = 1000 - [\text{fines}] - [\text{eau}] - [\text{vide}] \text{ (l/m}^3\text{)} \quad (8)$$

Il est important de rappeler ici que le dosage en sable estimé par cette formule inclut toutes les particules de taille supérieure à 80 μm , ce qui peut être le cas d'une certaine fraction des fines d'addition. De plus dans le cadre de cette formulation théorique, le sable est considéré dans un état saturé, superficiellement sec.

2.4. Estimation de la résistance en compression :

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 de Feret a été proposée récemment.

$$R_b = \frac{KF R_c}{\left(1 + \frac{3.1(e+v)}{C(1+K_1+K_2)}\right)^2} \quad (9)$$

Avec :

KF: coefficient granulaire ordre de grandeur 4.5 à 5.

R_c : classe vraie du ciment (MPa).

e : dosage en eau totale (l/m³).

V : air piégée (l/m³).

C : dosage en ciment (kg/m³).

Rb : résistance du béton à 28 jours (MPa).

et avec :

$$K_1 = K_{cv} \frac{CV}{c} + K_{fs} \frac{FS}{c} \quad (10)$$

$$0.2 < K_{cv} < 0.4 \quad 2 < K_{fs} < 3.3 \quad \text{et} \quad K_1 \leq 0.5 \quad (11)$$

$$K_2 = K_{fil} \frac{FIL}{c} \quad 0 < K_{fil} < 0.4 \quad \text{et} \quad K_2 < 0.2$$

Avec :

K₁ : coefficient pouzzolanique

K₂ : coefficient d'activité du filler calcaire.

K_{cv}, F_s, K_{fil} : coefficients d'équivalence en ciment des différentes additions en fines.

CV, FS, FIL : dosage en cendres volantes, fumée de silice et filler calcaire (kg/m³).

Cette formule ne peut être utilisée que par une identification précise de l'activité des additions par le biais des coefficients K_{cv}, K_{fs} et K_{fil}. Les valeurs données pour les différents coefficients d'activité ont ici un caractère essentiellement indicatif, D'autres additions peuvent être également utilisées telles que les fillers siliceux, généralement considérées inertes et les fillers de laitier qui peuvent présenter un caractère hydraulique, non pris en compte dans la formule précédente.

Ainsi d'autres paramètres pourraient également jouer un rôle sur l'activité liante des fillers tels que la répartition granulaire, la forme des grains ou leur porosité. L'activité de filler calcaire présente un optimum au-delà duquel, la contribution de l'activité de filler ne participe plus aux développements de performances mécaniques. (Figure I.25).

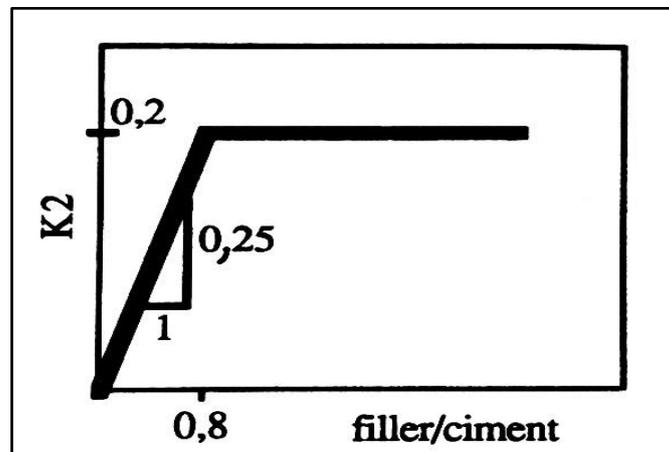


Figure.3 : Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle) [1].

Dans le cas des bétons de sable, cette dernière remarque est critique. En effet, le dosage total en fines a pu être estimé en terme de compacité et est donc imposé vis-à-vis de la résistance. Ces fines regroupent principalement le ciment, l'addition (filler calcaire, cendres volantes ...) et la fraction du sable inférieur à 80 µm, ainsi, l'optimum de résistance serait atteint pour des dosages en ciment et en addition, solutions du système suivant :

$$\begin{aligned} \text{ciment} + \text{addition} &= [\text{fines}] \\ \text{addition} / \text{ciment} &= \text{optimum d'activité} \end{aligned}$$

Cette formulation théorique simple et performante donne la possibilité au formulateur de jouer sur certains paramètres en restant à la compacité maximale, elle constitue une bonne base pour la mise au point d'une formulation de béton de sable. Elle ne peut être utilisée que dans un cadre limité, ceci est dû aux nombreuses hypothèses qui la jalonnent, c'est aussi pour cela que cette approche ne sera acceptée qu'après passage à l'expérience qui la confirme [3].

On peut résumer toutes les étapes de la formulation théorique sous forme d'organigramme.

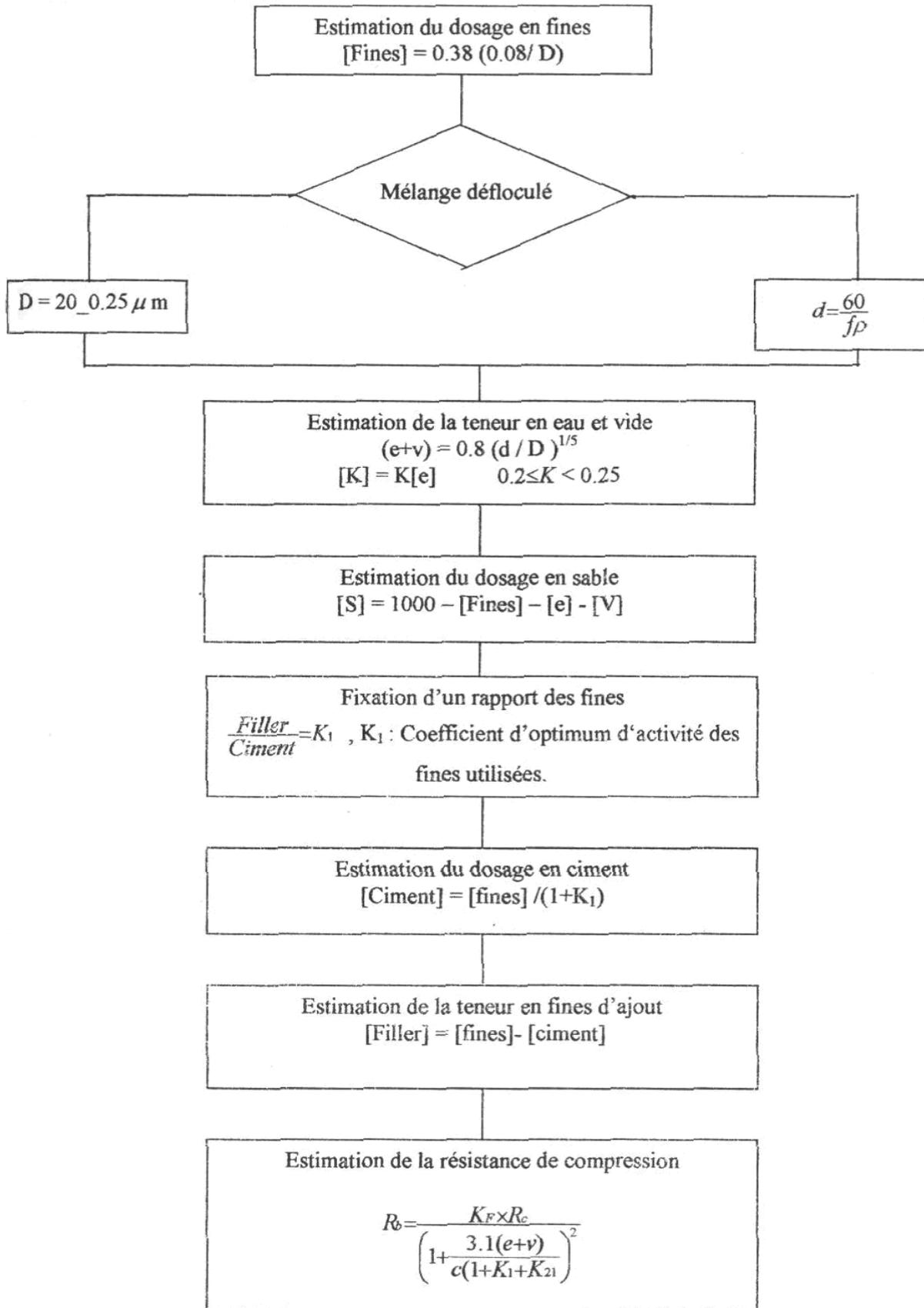


Figure.4 : Organigramme de la méthode théorique [19].

3. Approche expérimentale de la formulation d'un béton de sable :

3.1. Présentation générale de la méthode expérimentale :

La méthode, expérimentale, doit permettre de formuler un béton de sable mais son objet 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, toutefois, l'objectif reste le même : formuler un béton qui soit le plus compact possible en accord avec les autres caractéristiques recherchées (pompabilité, faculté de moulage, aptitude à la projection...).

Nous travaillerons à dosage en ciment fixé, de manière à mieux répondre aux prescriptions contractuelles ou normatives qui imposent bien souvent un dosage minimum.

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, 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. et ont donné toute satisfaction.

3.1. 1. Les différentes étapes de la formulation :

Après avoir rendu compte des matériaux entrant dans la composition du béton par une identification précise, l'obtention du mélange doit satisfaire à l'ordonnancement suivant :

a. Détermination d'une formule de base sans fines d'addition :

Dans cette partie de la méthode, nous chercherons à déterminer une formule d'un mètre cube, constituée de ciment, d'eau, de sable et d'adjuvant, ayant une maniabilité de 7 à 10 secondes au maniabilimètre LCL.

1. Le dosage en ciment :

Les prescriptions contractuelles ou normatives imposent très souvent un dosage minimum en ciment par mètre cube de béton, en fonction des parties d'ouvrage ou bien de l'agressivité du milieu. Nous avons donc choisi de travailler à partir d'un dosage en ciment fixé qui ne variera pas tout au long de l'étude. Nous noterons C (kg/m^3).

2. Dosage en eau :

A ce stade de la méthode, une valeur approximative du dosage en eau, $E(l / m^3)$, suffit. Pour estimer ce dosage, les praticiens s'appuient sur l'expérience. (À titre indicatif, on peut prendre 220 l d'eau pour 350kg de ciment, 250l d'eau pour 400Kg de ciment).

Faute d'expérience, on peut utiliser les étapes 2 et 3 de la méthode théorique de formulation. Celle-ci permettent d'évaluer le dosage en eau en fonction de la porosité du squelette granulaire.

$$E = \frac{800}{1 + \alpha} * \left(\frac{d}{D}\right)^{\frac{1}{5}}$$

Avec :

α compris entre 0.1 et 0.15.

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

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

b. Détermination du dosage en sable :

Dans cette formule, il faut introduire un fluidifiant réducteur d'eau, au dosage normal préconisé par le fabricant (N % du poids des éléments $< 80 \mu m$ en extrait sec), qui permettra de défloculer les fines, D'autre part, un béton contient toujours un volume d'air, V_{air} . La teneur en air des bétons est de l'ordre 3% en volume. Cette valeur est supérieure pour le béton de sable et se situe entre 5 et 7 %.

Les quantités de ciment, d'eau, d'adjuvant, d'air sont connues, nous devons donc compléter la formule par du sable de manière à obtenir un mètre cube de béton ce qui donne la relation suivante.

$$V_c + V_e + V_{adj} + V_{air} + V_{sable} = 1000$$

(Les volumes sont exprimés en litres).

Soit :

$$\frac{\text{Masse de ciment}}{\text{Masse vol. du ciment}} + \frac{\text{Masse d'eau}}{\text{Masse vol. de l'eau}} + \frac{\text{Masse d'adj.}}{\text{Masse vol. de l'adj.}} + \text{vol d'air} + \frac{\text{Masse de sable}}{\text{Masse vol. du sable}} = 1000$$

$$\text{Masse de sable} = \left[1000 - \left(\frac{\text{Masse de ciment}}{\text{Masse vol. de l'adj.}} + \text{vol. d'air} \right) \right]$$

* Masse vol. du sable

Ce qui donne une masse de sable S (kg / m³).

La somme des masses de chacun des constituants : ciment (C), eau (E), adjuvant (C * N %), sable (S) donne la masse volumique apparente théorique (MVAT) de la formule en supposant que le volume total occupé par ces constituants, y compris le volume d'air, soit égal à un mètre cube.

c. Réglage de la maniabilité et du rendement de la formule :

Nous allons réaliser un gâchées à partir de la formule que nous venons de déterminer et :

- Mesurer son temps d'écoulement t au maniabilimètre à mortier (norme NF P 18 452).
- Déterminer la masse volumique apparente réelle du béton, MVAR.

L'objectif est d'obtenir une formule de un mètre cube (c'est-à-dire faire tendre la masse volumique apparente théorique vers la masse volumique apparente réelle et un temps d'écoulement de 7 à 10 S.

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

$$S_i = S_{i-1} - (MT_{i-1} MA_{i-1}) \pm V \times \text{Masse vol. du sable} \quad (1)$$

MT et MA représentent la masse théorique et la masse apparente d'un mètre cube de béton.

Si le temps d'écoulement au maniabilimètre est inférieur à 7 s, il faut retrancher un volume V d'eau (+V dans l'équation); si le temps d'écoulement est supérieur à 10 s, il faudra rajouter un volume V d'eau de manière à rendre le béton plus maniable (- V dans l'équation).

Après chaque correction, la MVAT devra comparée à la MVAR.

En ajustant le dosage en eau et en sable, conformément à ce principe, le dosage E devient définitif. Le temps d'écoulement est alors compris entre 7 et 10 s, et la formule « fait le mètre cube ».

3.1.2. Détermination du dosage en fines d'addition :

Il faut maintenant introduire dans la formule les fines d'addition et en définir le dosage optimal, à rapport E / C constant. Pour cela, il est nécessaire de réaliser des gâchées de béton de sable avec 5 à 6 dosages en fines dans la plage d'emploi usuelle de ces fines.

Dans la formule précédent l'incorporation de fines doit permettre d'augmenter la compacité du béton, en remplissant les vides. En théorie, il y a trois cas possibles :

- Les fines remplissent les vides sans changement de volume ($MVAR = MVAT$).
- L'addition de fines s'accompagne d'une augmentation de volume ($MVAR < MVAT$).
- L'addition de fines s'accompagne d'une diminution de volume ($MVAR > MVAT$).

Le premier cas est l'objectif que l'on cherche à atteindre. Le troisième cas, lui, est peu probable.

Pour chaque gâchée, 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 de la correction sur le sable s'effectue à l'aide de la formule suivante :

$$S_i = S_{i-1} - (MT_{i-1} - MA_{i-1}) \quad (2)$$

Jusqu'à obtenir l'égalité entre les masses volumiques.

Connaissant les maniabilités et les masses volumiques pour chaque dosage en fines d'addition, on trace les courbes correspondantes. L'optimum de ces courbes définit le dosage en fines d'addition F et en sable S. La formule obtenue est la plus compacte et la plus maniable. Toutefois, Pour des raisons économiques ou l'ajout de fines n'améliore que très peu les caractéristiques, le dosage en fine peut être pris avant l'optimum.

3.1.3. Adaptation de la maniabilité à la mise en œuvre :

Une bonne mise en œuvre du béton de sable nécessite une consistance de béton adaptée aux moyens utilisés sur chantier. La maniabilité sera réglée en faisant varier la quantité d'adjuvant conformément à la notice technique de ce produit.

3.1.4. Evaluation de la résistance :

On effectue des essais mécaniques, les résistances peuvent être modifiées en augmentant ou en réduisant le dosage en eau et/ou en adjuvant pour un ciment donné. Si les résistances obtenues ne correspondent pas aux résistances souhaitées, il est possible de refaire une étude à partir d'un ciment différent.

4. Conclusion :

La méthode expérimentale présentée formalise la démarche de ceux qui ont eu à formuler des bétons de sable dans le cadre du projet national SABLOCRETE : suivant l'expérience du formulateur en charge de l'étude, elle à réaliser un nombre de gâchées en général important.

Le recours préalable à une approche théorique permet de réduire le nombre de gâchées à réaliser en laboratoire : ainsi par exemple, la méthode théorique développée en première partie du présent chapitre constitue-t-elle un outil très utile et efficace avant d'entreprendre toute étude pratique.