

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

Université 20 Août 1955 -
Skikda
Faculté de Technologie
Département de Génie Civil

جامعة 20 أوت 1955 – سكيكدة
كلية التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية

N° Ordre : D012115006D

N° Série :



THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

En Génie Civil - Option: **Géomatériaux**

Par

Mr. DJEBIEN RACHID (*Master en Génie Civil*)

Intitulée :

Formulation et Propriétés du Béton de Sable à
Base de Fines Recyclées

Soutenue publiquement le : 07/06/2015, devant le jury composé de :

Dr. Badreddine SBARTAI	U. Skikda	Président
Pr. Mouloud BELACHIA	U. Skikda	Rapporteur
Pr. Hacène HOUARI	U. Constantine 1	Examineur
Pr. Mouloud MERZOUUD	U. Annaba	Examineur
Pr. A/Halim BENOUIS	U. Guelma	Examineur

Dédicace

A ceux qui se sont toujours dévoués et sacrifiés pour moi ; ceux qui m'ont encouragé et soutenu à combattre les aléas de la vie et donner le meilleur de moi ; en témoignage de mon éternelle reconnaissance je dédie essentiellement cette thèse à mes parents que dieu les protège

A toute ma famille

A ma fiancée

A mon encadreur

A tout mes collègues

A tout mes amis

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier en premier lieu DIEU miséricordieux qui m'a donné la volonté et la patience pour achever ce mémoire.

*Je tiens à exprimer toute mon estime et ma reconnaissance envers mon encadreur **Professeur Mouloud Belachia** (Professeur à l'université de Skikda) pour m'avoir donné la chance de réaliser cette thèse, pour la confiance qu'il a manifestée à mon égard, pour son aide précieuse, pour ses conseils très constructives et pour m'avoir soutenu et toujours encouragé. Il trouve ici le témoignage de ma haute considération et de mon profond respect.*

*Je remercie madame **Houria Hebhou** (docteure à l'université de Skikda) pour sa disponibilité, sa gentillesse et sa patience. Je ne suis pas prêt d'oublier les idées et les nombreux conseils que vous m'avez donnés.*

*Mes sincères remerciements s'adressent à monsieur **Sbartai Badreddine**, docteur à l'université de Skikda d'avoir accepté de juger ce travail et m'honoré de sa présidence du jury.*

*Je remercie très vivement Messieurs **Houari Hacène**, professeur à l'université de Constantine, **Merzoud Mouloud**, professeur à l'université d'Annaba, **Benouis Abdelhalim**, professeur à l'université de Guelma qui m'ont fait le grand honneur d'examiner mon travail, et de participer à ce jury, je leur en suis très profondément reconnaissant*

Mes remerciements vont également au personnel du laboratoire de Matériaux, Géotechnique, Habitat et Construction de l'université de Skikda en particulier madame Linda Boussalia et Amar Zabat.

Je remercie également l'ensemble des membres du laboratoire (LNHC) et en particulier monsieur Abderezzak Ouachame et monsieur Messoud Aïmat pour les moyens mis à disposition.

J'aimerais remercier aussi tout le personnel du laboratoire de Génie civil de l'université d'Annaba, et laboratoire d'analyse de la cimenterie de Hadjar el soud pour son aide.

Mes pensées vont également à toute ma famille et particulièrement à mes parents pour leur soutien et leur encouragement permanent.

Enfin, j'adresse mes remerciements à tout ceux qui ont participé de près ou de loin dans l'élaboration de ce mémoire, notamment mes collègues et mes amis, qui m'ont apporté leur soutien au cours de ces années de travail.

ملخص:

الخرسانة هي المادة الأكثر استعمالا في ميدان البناء، تمثل الحبيبات 75% من الخرسانة لذا فمن المناسب دراسة إمكانية تامين رمل الكثبان علما أن بلادنا تتوفر على كميات هائلة من هذا النوع من الرمل، و إعادة استعمال البقايا في صناعة الخرسانة، و ذلك للحفاظ على المصادر الطبيعية، التغلب على النقص في الحبيبات، حماية المحيط و الاستعمال الأنسب للطاقة.

هذا العمل يركز على تامين الخرسانات الرملية و إعادة استعمال بقايا الرخام في صناعة هذا النوع من الخرسانات.

من أجل تحقيق هذا الهدف قمنا بانجاز مخطط عملي يقضي بإدخال نسب مختلفة من دقائق بقايا الرخام في تركيبة الخرسانات الرملية.

هذه الخرسانات حددت خصائصها في حالة ما قبل التصلب و الحالة الصلبة و ذلك من أجل دراسة تأثير دقائق بقايا الرخام على خصائص الخرسانة الرملية.

نتائج هذه الدراسة أظهرت أنه يمكن صناعة خرسانات رملية باستعمال دقائق بقايا الرخام، هذه الدقائق تحسن كثيرا الخصائص الريولوجية و الميكانيكية و تجعل الخرسانة الرملية أقل امتصاصا.

الكلمات المفتاحية : خرسانة رملية، رخام، خصائص، دقائق، تركيبة، بقايا، تامين.

Résumé :

Le béton est le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction. Les granulats représentent environ 75% du volume du béton. À cet effet, il est opportun d'étudier la possibilité de valorisation de sable de dunes sachant que notre pays dispose d'énormes potentiels en ce type de sable, et la réutilisation de déchets dans la fabrication du béton afin de conserver les ressources naturelles, protéger l'environnement, surmonter le déficit en granulats et bien utiliser l'énergie.

Ce travail porte essentiellement sur la valorisation des bétons à base de sable, et la réutilisation de déchets de marbre dans la formulation de ce type des bétons.

Afin de répondre à cet objectif, une démarche expérimentale a été réalisée, elle a consisté à incorporer différents pourcentages de fines du marbre dans la formulation des bétons de sable. Ces bétons sont caractérisés à l'état frais et durci afin d'étudier l'effet d'ajout de ces fines sur les propriétés du béton de sable.

Les résultats de cette étude ont montré qu'il est possible de fabriquer des bétons de sable à base de fines de déchets de marbre. Celles-ci améliorent considérablement les propriétés rhéologiques et mécaniques et rend le béton de sable moins absorbant.

Mots clés: béton de sable, marbre, propriétés, fines, formulation, déchet, valorisation.

Abstract:

The concrete is the most material used in the construction field. The aggregates represent 75% of the concrete volume. Therefore, it is appropriate to study the possibility of valorization of dune sand knowing that our country has huge potential in dune sand, and wastes in the concrete manufactured in order to conserve natural resources, surmount the deficit on aggregates, protect the environment and reduce the consumption of energy sources.

This work focuses on the development of concrete made from sand, and the use of marble waste in the formulation of this type of concrete.

To meet this objective, an experimental approach was performed; it consisted to incorporate different percentages of marble fines in the formulation of sand concrete. These concretes are characterized in the fresh and hardened state to study the effect of addition of these fines on the properties of sand concrete.

The results of this study showed that it is possible to produce sand concretes based marble waste fines. They significantly improve the rheological and mechanical properties and make the sand concrete less absorbent.

Key words: Sand concrete, marble, properties, fines, formulation, waste, valorization.

Sommaire

Dédicace.....	
Remerciements.....	
Résumé.....	
Liste des tableaux.....	
Liste des figures.....	
Liste des photos.....	
Introduction générale.....	
Chapitre I : Etat de l'art sur les bétons de sable.....	4
I.1. Introduction.....	4
I.2. Historique des bétons de sable.....	4
I.2.1. Le Béton aggloméré "Coignet".....	4
I.2.2. Utilisation du béton de sable dans le monde.....	5
I.2.2.1. Les expériences Soviétiques.....	6
I.2.2.2. Le renouveau du béton de sable en France.....	7
I.2.2.3. Béton de sable en Golf d'Arabie.....	8
I.2.2.4. Béton de sable en Afrique du Nord.....	9
I.3. Composants des bétons de sable.....	9
I.3.1. Définition.....	9
I.3.2. Les sables.....	10
I.3.3. Le Ciment.....	10
I.3.4. L'eau.....	10
I.3.5. Les adjuvants.....	10
I.3.6. Les ajouts.....	11
I.3.6.1. L'addition.....	11
I.3.6.2. Les fibres.....	11
I.3.6.3. Les gravillons.....	11
I.3.6.4. Les colorants.....	12
I.4. Propriétés essentielles.....	12
I.4.1. Propriétés générales.....	12
I.4.1.1. Relation granulométrie et maniabilité.....	13
I.4.1.2. Relation granulométrie et résistance.....	13
I.4.2. Propriétés spécifiques.....	14
I.4.2.1. Maniabilité.....	14
I.4.2.2. Cohésion et absence de ségrégation.....	14
I.4.2.3. Petite granularité (0 à 6 mm).....	14
I.4.2.4. Beaux aspects de surface.....	14
I.4.3. Propriétés mécaniques.....	15
I.4.3.1. Résistance à la compression.....	15
I.4.3.2. Résistance à la traction.....	15
I.4.3.3. Module d'élasticité.....	15
I.4.4. Autres propriétés.....	15
I.4.4.1. Retrait.....	15

I.4.4.2. Fluage.....	16
I.4.5. Durabilité.....	17
I.5. Formulation du béton de sable.....	18
I.5.1. Approche de Guinez, Gluais et Delude en 1984.....	18
I.5.2. Approche de J.J.Chauvin en 1987.....	19
I.5.3. Méthode théorique pour la formulation des bétons de sable.....	19
I.5.3.1. Compacité et méthode de formulation des bétons de sable.....	19
I.5.3.2. Estimation du dosage en fines d'un béton de sable.....	20
I.5.3.3. Porosité et dosage en eau d'un béton de sable.....	20
I.5.3.4. Estimation du dosage en sable.....	21
I.5.3.5. Estimation de la résistance en compression.....	21
I.6. Avantage du béton de sable.....	23
I.7. Domaine d'emploi.....	24
I.7.1. Bâtiment.....	24
I.7.2. Routes.....	24
I.7.3. Béton non vibrés.....	24
I.7.4. Projection.....	24
I.8. Limites des bétons de sable.....	25
I.8.1. Limites inhérentes à la nouveauté.....	25
I.8.2. Contraintes de formulation.....	25
I.8.3. Economiquement.....	25
I.8.4. Techniquement.....	25
I.8.5. Les bétons de sable routiers compacté.....	26
I.9. Conclusion.....	26
Chapitre II. Les déchets dans le génie civil.....	27
II.1. Introduction.....	27
II.2. Recyclage des déchets.....	27
II.3. Intérêt du recyclage dans le génie civil.....	28
II.4. Utilisation des recyclâts.....	29
II.5. Différents recyclâts.....	31
II.5.1. Laitiers.....	31
II.5.1.1. Laitier de haut fourneau.....	31
II.5.1.2. Laitier d'acier.....	31
II.5.2. Sous-produits provenant des centrales thermiques.....	31
II.5.2.1. Mâchefer.....	32
II.5.2.2. Scories.....	32
II.5.2.3. Cendres volantes.....	32
II.5.3. Déchets provenant de l'exploitation de mines et de carrières.....	32
II.5.4. Déchets divers.....	33
II.5.4.1. Verre de récupération.....	33
II.5.4.2. Pneus usagers.....	33
II.5.4.3. Ciment durci.....	34
II.5.4.4. Résidus d'incinérateurs.....	34
II.5.4.5. Boues rouges.....	34

II.5.4.6. Argile cuite.....	35
II.5.4.7. Déchets de mines de charbon.....	35
II.5.5. Granulats recyclés	35
II.5.5.1. Granulats recyclés issus de déchets de démolition.....	35
II.5.5.2. Granulats de déchets de production de l'industrie du béton.....	35
II.5.5.3. Sables de fonderies.....	36
II.6. Déchets de marbre.....	36
II.6.1. Le marbre de la carrière de FIL-FILA.....	38
II.6.1.1. Provenance	38
II.6.1.2. Carrière à blocs.....	38
II.6.1.3. Carrière dérivée.....	39
II.6.2. Utilisation des déchets de marbre dans la construction.....	39
II.7. Conclusion.....	40
Chapitre III. Matériaux et procédures.....	41
III.1. Introduction.....	41
III.2. Matériaux.....	41
III.2.1. Ciment.....	42
III.2.2. Sable.....	42
III.2.3. Addition.....	43
III.2.4. Adjuvant.....	43
III.2.5. Eau.....	44
III.3. Composition.....	44
III.3.1. Formulation du béton de sable témoin B0.....	44
III.3.1.1. Détermination du dosage en ciment.....	44
III.3.1.2. Détermination du dosage en eau.....	44
III.3.1.3. Détermination du dosage en superplastifiant.....	44
III.3.1.4. Détermination du volume des vides.....	45
III.3.1.5. Détermination du dosage en sable.....	45
III.4. Fabrication et mise en place.....	46
III.4.1. Eprouvettes.....	46
III.4.2. Conservation.....	47
III.5. Essais expérimentaux.....	47
III.5.1. Essais à l'état frais.....	47
III.5.1.1. Affaissement.....	47
III.5.1.2. Densité.....	47
III.5.1.3. Teneur en air occlus.....	48
III.5.2. Essais à l'état durci.....	48
III.5.2.1. La résistance mécanique en compression uniaxiale.....	48
III.5.2.2. La résistance mécanique en traction par flexion 3 points.....	48
III.5.2.3. Le retrait.....	48
III.5.2.4. Essai d'absorption capillaire.....	49
III.5.2.5. Essai d'absorption d'eau par immersion.....	50
III.6. Conclusion.....	50

Chapitre IV : Influence des fines de déchet de marbre sur les performances du béton de sable.....	52
IV.1. Introduction.....	52
IV.2. Propriétés du béton de sable à l'état frais.....	52
IV.2.1. Maniabilité.....	52
IV.2.2. La densité.....	53
IV.2.3. La teneur en air occlus.....	54
IV.3. Propriétés du béton de sable à l'état durci.....	56
IV.3.1. Résistance à la compression.....	56
IV.3.1.1. Influence de l'âge.....	56
IV.3.1.2. Influence d'ajout de fines du marbre.....	57
IV.3.1.3. Influence du milieu de conservation.....	58
IV.3.2. Résistance à la traction par flexion.....	60
IV.3.2.1. Influence de l'âge.....	60
IV.3.2.2. Influence d'ajout de fines du marbre.....	61
IV.3.2.3. Influence du milieu de conservation.....	62
IV.3.3. Retrait.....	63
IV.3.3.1. Effet d'ajout de fines du marbre sur le retrait endogène.....	64
IV.3.3.2. Effet d'ajout de fines du marbre sur le retrait total.....	64
IV.3.3.3. Effet de rapport E/C sur le retrait endogène.....	65
IV.3.3.4. Effet de rapport E/C sur le retrait total.....	65
IV.3.4. Essai d'absorption d'eau par capillarité.....	66
IV.3.5. Essai d'absorption d'eau par immersion.....	67
IV.4. Conclusion.....	68
Conclusion générale et perspectives.....	70
Références bibliographique.....	73
Annexes.....	81

Liste des tableaux

Tableau III.1: Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment étudié.....	41
Tableau III.2: Caractéristiques chimique du ciment étudié.....	41
Tableau III.3: Composition chimique potentielle du ciment étudié.....	42
Tableau III.4: Caractéristiques physiques du sable étudié.....	42
Tableau III.5: Caractéristiques physico-mécanique du marbre utilisé.....	43
Tableau III. 6: Composition chimique du marbre étudié.....	43
Tableau III.7: Caractéristiques physiques d'adjuvant.....	44
Tableau III.8: Désignation des bétons testés.....	46
Tableau III.9: Formulations du béton de sable.....	46
Tableau IV.1: Valeurs de l'affaissement au cône d'ABRAMS.....	52
Tableau IV.2: Valeurs de la densité	53
Tableau IV.3: Valeurs de la teneur en air occlus.....	54
Tableau IV.4: Résistance à la compression.....	56
Tableau IV.5: Résistance à la traction par flexion.....	60
Tableau IV.6: Valeurs du retrait en fonction de taux de substitution.....	63
Tableau IV.7: Valeurs du retrait en fonction de rapport E/C.....	63
Tableau IV.8: Valeurs de l'absorption d'eau par capillarité.....	66
Tableau IV.9: Valeurs de la porosité.....	67

Liste des figures :

Figure I.1: Evolution de la maniabilité en fonction du module de finesse des sables.....	13
Figure I.2: Retrait total.....	15
Figure I.3: Fluage total	16
Figure I.4: Influence de la résistance sur le fluage total.....	17
Figure I.5: Distribution de la porosité en fonction du rayon de pores.....	17
Figure I.6: Effet de la nature et du dosage en fillers sur la résistance mécanique.....	19
Figure III.1: Courbe granulométrique du sable étudié.....	42
Figure IV.1: Influence de la substitution d'une partie de sable par les fines de marbre sur l'affaissement du béton de sable.....	53
Figure IV.2: Influence de la substitution d'une partie de sable par les fines de marbre sur la densité du béton de sable.....	54
Figure IV.3: Influence de la substitution d'une partie de sable par les fines de marbre sur la teneur en air occlus du béton de sable.....	55
Figure IV.4: Influence de l'affaissement au cône d'ABRAMS sur la teneur en air occlus du béton de sable.....	56
Figure IV.5: Evolution de la résistance mécanique en fonction du temps.....	57
Figure IV.6: Influence de la substitution d'une partie du sable par les fines de marbre sur la résistance à la compression du béton de sable conservé dans l'eau.....	57
Figure IV.7: Influence de mode de cure sur la résistance à la compression à 7 jours du béton de sable à base de fines du marbre.....	59
Figure IV.8: Influence de mode de cure sur la résistance à la compression à 28 jours du béton de sable à base de fines du marbre.....	59
Figure IV.9: Evolution de la résistance à la traction en fonction du temps.....	60
Figure IV.10: Influence de la substitution d'une partie du sable par les fines de marbre sur la résistance à la traction du béton de sable conservé dans l'eau.....	61
Figure IV.11: Influence de mode de cure sur la résistance à la traction à 7 jours du béton de sable à base de fines du marbre.....	62
Figure IV.12: Influence de mode de cure sur la résistance à la traction à 28 jours du béton de sable à base de fines du marbre.....	62
Figure IV.13: Valeurs du retrait endogène des bétons de sable étudiés en fonction du temps.....	64
Figure IV.14: Valeurs du retrait total des bétons de sable étudiés en fonction du temps	64

Figure IV.15: Valeurs du retrait endogène des bétons de sable étudiés en fonction du temps.....	65
Figure IV.16: Valeurs du retrait endogène des bétons de sable étudiés en fonction du temps.....	66
Figure IV.17: Valeurs de l'absorption d'eau par capillarité en fonction du temps.....	67
Figure IV.18: Valeurs de la porosité en fonction du dosage en fines du marbre.....	68

Liste des photos

Photo I.1: Phare de Port-Saïd (Egypte).....	5
Photo I.2: Voûte du métro de Saint-Petersbourg.....	6

Introduction générale :

Le béton est composé de granulats (sables, graviers), de ciment, d'eau et éventuellement d'adjuvants pour modifier ses propriétés. Lorsque les granulats utilisés se réduisent à des sables, on parle alors de mortier ou de béton de sable qui est un matériau utilisé bien antérieurement au béton traditionnel, beaucoup d'ouvrages et de structures témoignent de son existence, depuis au moins un siècle et demi sous l'appellation de "béton aggloméré", qui est l'ancêtre du béton de sable aujourd'hui, plusieurs facteurs font de ce dernier le thème préféré de la majorité des chercheurs à travers le monde, à cause de la rareté des granulats, sa technique d'utilisation facile, son coût réduit, etc.

Que ce soit en bâtiment ou en travaux publics, le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde, en raison de ses nombreuses qualités techniques et économiques. Pour améliorer sa résistance, des chercheurs ont, successivement mis au point des nouveaux bétons comme les bétons à hautes performances (BHP), les bétons à très hautes performances (BTHP). De même dans l'amélioration de la maniabilité, des chercheurs de l'université de Tokyo dans les années 1980 ont mis au point des bétons fluides qui peuvent être mis en œuvre sans vibration. Il s'agit des bétons autoplaçants (BAP) utilisés pour les coulages d'éléments verticaux (poteaux, voile) et des bétons autonivelants (BAN) destinés aux éléments horizontaux (dalles de compression, dallages, chapes flottantes).

Cette pression sur la ressource béton occasionne une exploitation intensive des carrières de granulats (concassage des roches) qui a entraîné à la longue un épuisement de cette ressource naturelle et des problèmes environnementaux.

L'évolution des mentalités et de la technique, avec les exigences en termes de protection de l'environnement de plus en plus contraignantes ainsi que la révision des repères économiques inspirés du développement durable font que le recyclage et la valorisation de sous produits industriels constituent désormais un souci qui s'impose à la planète entière.

C'est pourquoi le recyclage et la valorisation des déchets sont aujourd'hui considérés comme une solution d'avenir afin de répondre au déficit entre production et consommation et de protéger l'environnement.

Cette valorisation offrira dans un futur proche un débouché économique intéressant pour les entreprises fabricant ces produits. Cette approche qui participe au processus de développement durable fait partie des thématiques de recherche.

Depuis des années, une prise de conscience générale a permis le développement de concepts de gestion et de politiques orientés vers la protection de l'environnement et des ressources naturelles. Dans ces politiques, le recyclage tient une place importante. Ainsi, les granulats recyclés issus de déchets de démolition, de rebuts de fabrication de produits en béton et de déchets divers ne sont pas ou très peu utilisés dans l'industrie du béton voire du Génie Civil.

L'objectif du travail proposé est de trouver un substitut au granulats naturels (roche concassée) à travers l'utilisation du sable de dune (disponible en grande quantité dans notre pays) et l'incorporation de déchets non biodégradables (déchets de marbre) dans la formulation du béton de sable afin de pérenniser et préserver les ressources naturelles dans le cadre de l'assainissement de l'environnement et du cadre de vie. Pour cela, on va étudier l'influence de ces déchets disponibles en grande quantité du fait d'une importante activité industrielle sur les propriétés d'un béton de sable afin de les valoriser dans la fabrication de ce type de bétons.

Les déchets de marbre sont utilisés comme des fines d'ajout afin d'améliorer certaines caractéristiques du béton de sable. Et tout ça, dans le but d'obtenir un béton à la fois résistant et économique, sans oublier la préservation de l'environnement.

La thèse s'articule sur quatre chapitres :

Après une introduction générale, nous exposons dans le premier chapitre une synthèse bibliographique sur les bétons de sable, leurs méthodes de formulation ainsi que leurs propriétés et leurs avantages.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons une synthèse bibliographique regroupant le recyclage des déchets, leur intérêt et l'utilisation des différents recyclats en génie civil.

Le troisième chapitre est consacré à la caractérisation des matériaux utilisés dans notre étude ainsi que la démarche expérimentales adoptée pour atteindre notre objectif. Une étude complète des caractéristiques de ciment et des granulats utilisés est présentée.

Dans la quatrième et la dernière partie, nous intéressons à l'étude des propriétés des bétons de sable à base de fines de marbre recyclées à l'état frais et durci, pour pouvoir analyser le comportement de ce matériau, dont l'objectif final est d'établir le bilan de l'influence de ces fines sur son comportement.

Enfin, Nous terminerons par les conclusions et les perspectives de notre étude.

I.1. Introduction :

Le béton de sable se distingue d'un béton traditionnel par un fort dosage en sable et par l'absence ou par un faible dosage en gravillon. Il se différencie également des mortiers par un plus faible dosage en ciment et surtout par son domaine d'application. L'emploi de béton de sable en remplacement des bétons classiques peut constituer une variante de structure rigide intéressante sur le plan économique lorsque le sable est facilement accessible et à un coût moindre que les granulats courants (Eric et Stéphane, 2002).

I.2. Historique des bétons de sable :

Il ya à peine un siècle et demi, avant que n'apparaissent les moyens de transport motorisés et ne se développe le réseau de voies de communication, on construisait avec des matériaux trouvés sur place ou à proximité, principalement des pierres, du bois, des briques d'argile ... Il était en effet inconcevable de transporter sur des charrettes à traction animale et sur des dizaines ou des centaines de kilomètres, des matériaux d'origine lointaine. Pour lier entre eux les éléments de construction, de briques ou pierres, on préparait des mélanges de sable, de chaux, et d'eau. Progressivement, pour en diversifier l'usage, on incorpora à ces mortiers de pose, de la brique, de la tuile cassée puis du gravier, enfin de la pierre cassée: les premiers bétons étaient nés.

I.2.1. Le Béton aggloméré "Coignet" :

Le béton de sable est un matériau utilisé bien antérieurement au béton traditionnel. Selon Poitevin (Benmalek, 1992), ce matériau trouve ses origines dans les années 1850-1875 sous l'appellation de "béton aggloméré". Il était alors constitué de sable, ciment, chaux et eau.

Coignet qui est à l'origine de ce matériau construisit pour sa famille en 1851 à Saint Denis (Nord de Paris, France) une maison 60m de long et 7m de hauteur, du type R+2, avec mur de soutènement. Cet ouvrage fût entièrement édifié en béton aggloméré, des fondations jusqu'au toit (Sablocrete, 1994).

Poitevin rapporte encore qu'entre 1869 et 1872 un aqueduc de 40 km fut partiellement construit en béton aggloméré afin de relier Fontaine bleu à Orléans (France). Le mélange était constitué de 4parts de sable de Fontaine bleu, d'une part de liant (2/3 chaux, 1/3 ciments) et de 0.5 part d'eau (en poids), ce qui correspond approximativement à un dosage

en liant de 400 kg/m^3 , plus proche de celui des bétons de sable que des mortiers. Mis en service en 1869, le phare de Port-Saïd (Egypte) de 52 m de hauteur fut également construit en béton aggloméré composé de sable d'une plage avoisinante et de chaux importé de France (photo I.1).



Photo I.1: Phare de Port-Saïd (Egypte)

Coignet exporte sa technique jusqu'aux USA, où son entreprise 'New York and long island Coignet stone compagny' construit en 1871-1872 en blocs de béton aggloméré le pont de Brooklyn à New York (Benmalek, 1992).

Vers la fin du XIX^{ème} et au début du XX^{ème} siècle, marquant la période de l'apparition du béton utilisant des granulats de gros calibres ainsi que l'utilisation de ciment à la place de la chaux qui a engendré une augmentation de résistance (allant jusqu'à 20 MPa) furent facilement obtenus. A compter de là, le béton aggloméré ancêtre du béton de sable a cédé la place au béton connu jusqu'à nos jours (Chaouach, 1993).

La continuité dans le temps de ces ouvrages et qui sont en service jusqu'à nos jours est un témoignage des performances de ce matériau.

I.2.2. Utilisation du béton de sable dans le monde :

L'expérience de l'utilisation du béton de sable nous renseigne que ce dernier a été utilisé dans bien d'endroits de par le monde, dont on peut citer entre autre CEI (Communauté des Etats Indépendants), France, Nord Africain, Golf d'Arabie.

I.2.2.1. Les expériences Soviétiques :

Les pays du CEI sont les premiers à redécouvrir le béton de sable. Ceci peut être expliqué par le fait que ces pays sont très pauvres en granulats et leurs ressources sont mal réparties. Dans certaines régions les granulats doivent être transportés sur plus de 1000 km.

En 1918, une expérience très originale fut faite par Nicolas de Rochefort, à Saint-Petersbourg (Sablocrete, 1994). Elle consistait à broyer ensemble sable et clinker à parts égales, puis à mélanger ce produit à du sable dans le rapport de 1 (produit broyé) à 3 (sable).

Les résistances obtenues furent les mêmes que celles d'un mélange sable-ciment, beaucoup plus riche en ciment (1/3 de ciment pour 2/3 de sable).

Cette expérience fut reprise par le professeur académicien Rehbinder comme base de ses propres recherches sur le béton de sable qui a pensé, en 1954, qu'en broyant ensemble le ciment et pour une partie de sable et en vibrant intensément lors du malaxage, on pouvait obtenir un béton de porosité minimale et d'homogénéité maximale. La photo II.2 montre l'illustration de métro de Saint-Petersbourg. Voûte mince en béton de sable, préfabriquée, à double courbure.



Photo I.2: Voûte du métro de Saint-Petersbourg (Sablocrete, 1994)

L'ex URSS, riche en sable, mais pauvre en gravillons et roches massives sur de vastes étendues, ne cessa principalement depuis 1941, de faire du béton composé de sable et d'un ou deux liants (ciment et chaux) selon les opportunités. Les réalisations sont nombreuses. Certains parmi bien d'autres:

- routes et autoroutes (Serpukhov - Toula par exemple) ;
- pistes d'aérodromes militaires de Pevec et Arkangelsk ;
- bâtiments (toitures à plis, éléments divers préfabriqués dans la ville de Nadym en Sibérie par exemple).

1.2.2.2. Le renouveau du béton de sable en France :

L'une des premières utilisations en France des bétons de sable remonte à 1863, pour la construction dans la banlieue Nord de Paris d'un immeuble toujours visible. (De Larrard, 1999)

L'émergence de préoccupations nouvelles liées à l'exploitation des granulats et à leur utilisation rationnelle, en même temps qu'une prise en compte des problèmes d'environnement sont à l'origine de l'intérêt à nouveau porté au béton de sable, dans les années soixante dix, notamment dans le Sud-Ouest de la France.

A cette époque, on constate, en effet:

- que les sables tant alluvionnaires qui proviennent du concassage des roches massives sont excédentaires, et qu'il y a un déficit en gravillons (principalement 3/8 mm) ;
- que le secteur du bâtiment, principal consommateur de béton est aussi le principal consommateur de granulats de gros calibre dont l'utilisation n'est pas impérative si l'on tient compte du niveau modeste des résistances exigées dans la plupart des ouvrages du bâtiment.

Dans la même période, conscients que les extractions de granulats dans les lits de fleuves et des rivières compromettent les équilibres écologiques avec des conséquences irréversibles, les pouvoirs publics mettent progressivement en place une politique de réduction des autorisations d'exploitation de ces sites.

C'est dans ce contexte que s'ouvre la réflexion sur la formulation de nouveaux bétons de sable qui utiliseraient une ressource abondante et peu exploitée, et présenteraient, en raison de l'expérience des laboratoires et des avancées techniques dans le domaine, des caractéristiques comparables à celles des bétons traditionnels.

Mais l'expérience n'est pas tout à fait la même avec celle adoptée en CEI (ex URSS). Il ne s'agit plus de broyer ensemble le ciment et une partie de sable et de vibrer intensément lors

du malaxage, pour obtenir un béton de porosité minimale, mais d'apporter une correction granulaire en sable par adjonction d'un filler (Benmalek, 1992).

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: injections de ponts en sous œuvre, poutres, chaussées de lotissement, dalles-planchers.

Ces résultats partiels intéressants et disparates ont conduit le CEBTP (Centre Expérimental de recherche Etudes du Bâtiment et Travaux Publics), à établir en 1986 un document de synthèse sur le béton de sable hyper-compacté et dans la même année l'association CEBTP et LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), ont établi un autre document sur la synthèse des connaissances sur les bétons de sable (Chaouach, 1993)

A partir de l'élaboration de ces deux documents, un vaste programme de recherche développement sur l'utilisation optimale du sable pour les applications aux bétons de sable est lancé. Ce dernier confié à l'association SABLOCRETE qui est un projet de "recherche développement" qui regroupe en son sein les plus grands laboratoires français de génie-civil (publics ou privés) dans une mise en commun des connaissances théoriques, en principe d'utilisation, de formulation et de mise en œuvre

Les travaux de recherche et de développement sur l'utilisation du béton de sable organisés dans le cadre du projet national ont débouché sur des application diverses touchant à tous les domaines d'emploi du béton : construction routière, bâtiment, préfabrication, projection, reprises en sous œuvre, etc.

Une trentaine d'opération pilotes ont ainsi été réalisées entre 1989 et 1993 (Jean Paul et Pierre, 1995).

1.2.2.3. Béton de sable en Golf d'Arabie :

L'utilisation du béton de sable dans le Golf d'Arabie est purement économique, vu la rareté des gros agrégats, qui ne sont disponible qu'à des endroits très lointains. Le béton de sable dans cette région a été employé pour la construction de fondation, de murs de soutènement et de dalles de planchers. Ce béton de sable, en fait, était un mortier, puisque le rapport en volume de S/C est de 3/1, et sa densité était d'environ 2.15. Il n'a pas été constaté des fissures plus importantes que pour un béton normal placé dans les mêmes conditions (Chauvin et Grimaldi, 1988).

Aussi concernant le béton de sable utilisé dans le Golf d'Arabie, le phénomène de retrait n'est pas aussi important que celui d'un béton traditionnel (C.E.B.T.P, 1986).

I.2.2.4. Béton de sable en Afrique du Nord :

Le béton de sable a été utilisé pour la construction d'un brise lame en Egypte suite à une pénurie de gros granulats. La composition de ce béton a été retenue après une étude au laboratoire qui a permis de déterminer la relation entre la quantité de ciment en fonction du pourcentage d'agréats fins par rapport à la totalité des agrégats (Gotteicha, 1986). A titre d'exemple des ouvrages réalisés nous rappelons le phare de Port-Said (1869).

I.3. Composants des bétons de sable :

I.3.1. Définition :

Le 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.

Il est donc principalement constitué de sable, Son dosage en ciment est du même ordre que celui des bétons classiques soit entre 250 à 400 kg/m³. Cette similitude lui vaut, entre autre, le terme de "béton". Il se distingue du mortier par, notamment, son dosage en ciment, celui d'un mortier étant de 400 à 700 kg/m³, et par son domaine d'utilisation.

Les bétons de sable relèvent d'une autre approche elle consiste à faire la distinction entre les fines nécessaires à l'obtention d'une bonne compacité, et le ciment nécessaire pour une résistance suffisante pour l'usage envisagé.

Les bétons de sable ont donc les mêmes dosages en ciment que les bétons classiques (250 à 400 kg/m³) et la compacité optimale est atteinte par un ajout complémentaire de fines comme le calcaire, cendre volantes ... etc

I.3.2. Les sables :

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 a priori exigible pour réaliser un béton de sable. On peut bien utiliser un sable fin (type sable de dune) qu'un sable alluvionnaire moyen ou grossier ou un θ/D de concassage. D'ailleurs, des

programmes nationaux de recherche (SABLOCRETE en France, par exemple) s'efforcent de promouvoir l'utilisation de tous les types de sable.

En effet la seule restriction d'emploi des sables réside dans leur propreté. Il est plus prudent de se borner à l'utilisation de sables propres, tels qu'on peut les employer pour des formules de béton classique.

I.3.3. Le Ciment :

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 plus générale, de la composition du béton et de l'usage auquel on le destine. Notons que le dosage en ciment dans le béton de sable est du même ordre de grandeur que celui des bétons traditionnels: entre 200 et 400 kg/m³.

I.3.4. L'eau :

Les bétons de sable nécessitent une qualité d'eau de mouillage importante en raison de la proportion élevée en éléments fins qui génèrent une surface spécifique importante. Le rapport eau/ciment (E/C) est supérieur à celui des traditionnels et pour le réduire on a recours à des adjuvants.

I.3.5. Les adjuvants :

Ce sont des produits chimiques utilisés à faible dose, de la même façon et dans le même but que pour les bétons classiques (amélioration des performances mécaniques à court, moyen et long terme). Dans la technique du béton de sable, sont principalement utilisés des plastifiants permettant de réduire le dosage en eau et, par conséquent, d'augmenter la résistance et la compacité tout en amoindrissant les risques de retrait excessif. Cependant, les adjuvants améliorent ou facilitent aussi la mise en œuvre du béton (la maniabilité).

I.3.6. Les ajouts :

I.3.6.1. L'addition :

Par définition, le béton de sable contient une (ou plusieurs) addition (s). Leur rôle est de combler en partie les vides du sable (filler : to fill = remplir). Elles augmentent donc sa

compacité naturelle et créent une granulométrie aussi continue que possible. Mais les additions participent également à l'amélioration de l'enchevêtrement cristallin et de la cohésion du mélange. En outre, elles permettent aussi d'augmenter les performances sans augmenter le dosage en ciment évitant ainsi les risques de retrait et d'excès de rigidité provoqués par un surdosage en ciment; leur efficacité est, en ce domaine fonction de leur nature minéralogique, de leur finesse et de leur activité hydraulique ou pouzzolanique.

I.3.6.2. Les fibres :

(Polypropylène, acier, fonte amorphe) : elles peuvent constituer un renfort de structure, en particulier au jeune âge du béton. Leur rôle dépend de leur nature, leur dosage et leur longueur. Elles confortent la tenue du matériau. Elles influent notamment sur la vitesse et l'importance du retrait libre.

I.3.6.3. Les gravillons :

L'ajout de gravillons permet d'augmenter la compacité et à même dosage en ciment, la matrice de sable se trouve enrichie en ciment. En effet, il est possible de "raidir (augmenter le module d'élasticité) la formulation d'un béton de sable en y ajoutant des gravillons, dans un rapport gravillon/sable restant inférieur à 1 : il s'agit d'un béton de sable chargé, alors que ce rapport est compris entre 1,4 et 1,7 pour le béton classique.

I.3.6.3.1. Influence de l'ajout de gravillon :

L'idée d'incorporer des gravillons dans une composition de béton de sable peut surprendre ou paraître contradictoire avec la volonté d'utilisation de ce type de béton. Il faut savoir qu'un tel ajout ne modifie pas les propriétés spécifiques du béton de sable pour peu que le dosage en gravillon soit faible. Un tel ajout a par contre un effet bénéfique sur certaines caractéristiques, notamment le fluage. Il a paru intéressant de vérifier cet effet sur d'autres caractéristiques des bétons de sable.

I.3.6.3.1.1. Résistance aux chocs :

La particularité des bétons de sable a mieux résisté aux chocs, constatée expérimentalement a été attribuée à leur structure plus fine et plus homogène permettant de mieux répartir les impacts et, d'éviter les éclatements que l'on observe sur les bétons classiques.

Cette propriété a été mise en évidence par l'essai Los Angeles.

I.3.6.3.1.2. Resistance à l'attrition :

Quantifiée par l'essai Deval on peut constater comme il était possible que l'ajout de gravillons quelle que soit sa nature améliore sensiblement (jusqu'à 50 %) cette caractéristique. Au delà de $G/S = 0,5$ il n'y a plus d'amélioration.

I.3.6.3.1.3. Resistance à la compression :

Un ajout de gravillons avec $G/S = 0,25$ se révèle très valorisant, au delà l'influence sur la résistance à la compression est beaucoup moins significative.

I.3.6.3.1.4. Module d'élasticité :

De manière générale les matériaux granulaires 0/D ont des modules d'élasticité plus faibles que celui du béton classique. Ce module diminue lorsque D_{max} diminue. Un béton de sable ayant une résistance en compression de 24 à 30 MPa a généralement un module d'élasticité de l'ordre de 22 000 MPa (Sablocrete, 1994).

I.3.6.4. Les colorants :

Ce sont les mêmes que ceux utilisés pour les bétons classiques, seulement avec les bétons de sable un soin particulier doit être apporté à l'homogénéisation et à une formulation adéquate pour garder une stabilité de la teinte dans le temps.

I.4. Propriétés essentielles :

I.4.1. Propriétés générales :

I.4.1.1. Relation granulométrie et maniabilité :

Une des particularités des bétons de sable est de nécessiter davantage 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 $E/(C + F)$ (F = addition en fines), on obtient des valeurs

similaires aux bétons traditionnels. La granulométrie du sable jouera également sur le besoin en eau et la maniabilité s'améliore inversement par rapport au module de finesse M_f .

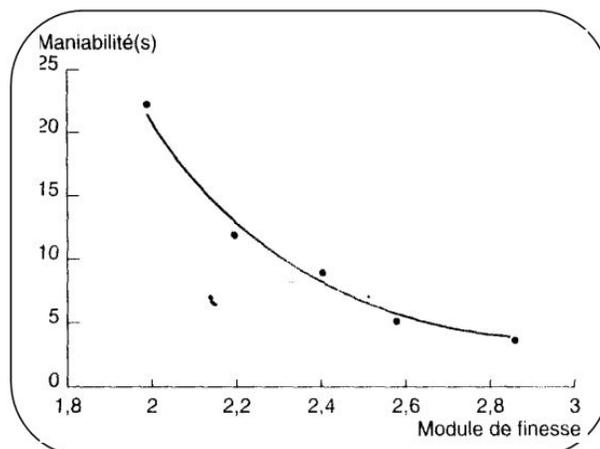


Fig.I.1. Evolution de la maniabilité en fonction du module de finesse des sables (Chanvillard et Basuyaux, 1996)

Donc il est clair, d'après la figure I.1, que plus le module de finesse augmente plus le temps d'écoulement diminue ce qui implique une amélioration de la maniabilité.

I.4.1.2. Relation granulométrie et résistance :

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

I.4.1.2.1. Finesse de l'addition :

Plus l'addition est fine (et bien défloculée), plus elle est efficace au niveau de l'amélioration de la compacité (et donc la résistance) ; ce résultat est valable quelle que soit la granulométrie du sable. En effet, à dosage en ciment constant et d'un sable donné à priori; une certaine quantité d'addition permettra d'obtenir une compacité et une résistance optimales: ce dosage dépendra de la nature et de la granularité respectives du sable et des fines d'ajout

I.4.1.2.2. Nature d'addition :

À dosage égale, on constate une différence de niveau de performance atteint selon la nature du filler. Les fillers les plus efficaces sont ceux qui, hydrauliquement actifs.

I.4.2. Propriétés spécifiques :

Si la résistance est un critère de performance plus facilement assuré par le béton traditionnel, il existe certains critères pour lesquels le béton de sable se révèle plus performant:

I.4.2.1. Maniabilité :

Mise en œuvre facilitée, énergie de mise en œuvre et de serrage réduite, pompabilité améliorée.

I.4.2.2. Cohésion et absence de ségrégation :

Meilleure résistance aux chocs, bétonnage aisé en site aquatique, coulage en place des pieux et micro-pieux facilité ...

I.4.2.3. Petite granularité (0 à 6 mm) :

Elle facilite des travaux d'injection et le bétonnage de pièces à forte densité de ferrailage. Cette propriété est appréciée en travaux de rénovation, d'autant plus que le béton de sable est plus léger que le béton classique.

I.4.2.4. Beaux aspects de surface :

Le souci esthétique et la qualité du "fine" étant de plus en plus pris en compte dans les constructions, les effets architecturaux et la qualité des parements que le béton de sable permet d'obtenir tendent à devenir des critères déterminants.

I.4.3. Propriétés mécaniques :

La résistance mécanique est l'une des caractéristiques majeures pour un béton. De ce fait, il est indispensable pour n'importe quelles études de prendre en considération les résistances à la rupture en traction ou en compression.

I.4.3.1. Résistance à la compression :

Concernant la résistance à la compression des bétons de sable, on peut dire que les bétons de sable présentent des résistances mécaniques relativement inférieures à celles des bétons ordinaires (Chaouch, 1993).

I.4.3.2. Résistance à la traction :

Diverses études ont été réalisées concernant la résistance à la traction des bétons de sable. Il a été constaté que la résistance à la traction des bétons de sable est relativement inférieure à celle du béton ordinaire. (Chaouch, 1993).

I.4.3.3. Module d'élasticité :

Le module d'élasticité du béton de sable de dune ($E = 2181.18 \text{ MPa}$) est faible par rapport à celui d'un béton ordinaire (compris entre 25000 et 45000 MPa). (Chaouch, 1993)

I.4.4. Autres propriétés :

I.4.4.1. Retrait :

Des essais ont permis de constater qu'en milieu étanche (isolé) le béton de sable présente des valeurs de retrait d'auto dessiccation voisines de celle du béton traditionnel. Par contre s'il est séché à l'air libre le béton classique présente des valeurs inférieures de moitié par rapport à celles du béton de sable (Figure I.2).

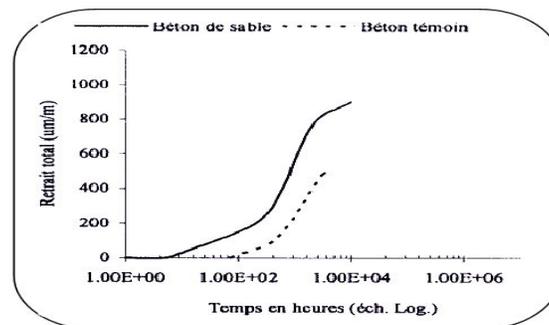


Fig. I.2. Retrait total (Benaïssa, 1992)

Enfin, la différence de retrait qui existe entre les deux matériaux (béton de sable et béton classique) est vraisemblablement liée à plusieurs paramètres, dont nous citons:

- l'influence du dosage en eau ;
- l'influence du dosage en ciment ;
- l'influence de la distribution et de la taille des vides, qui est largement influencée par la taille des grains de sable et la quantité des fines.

I.4.4.2. Fluage :

En matière de fluage, un phénomène analogue à celui d'un béton ordinaire est remarqué lié vraisemblablement à la structure du matériau, c'est-à-dire aux paramètres rentrant dans la composition des deux matériaux, ces derniers influent d'une manière systématique sur les valeurs de déformations, par conséquent sur leurs résistances, que confirme par ailleurs les

valeurs de module d'élasticité des bétons de sable plus faible par rapport à ceux des bétons classiques.

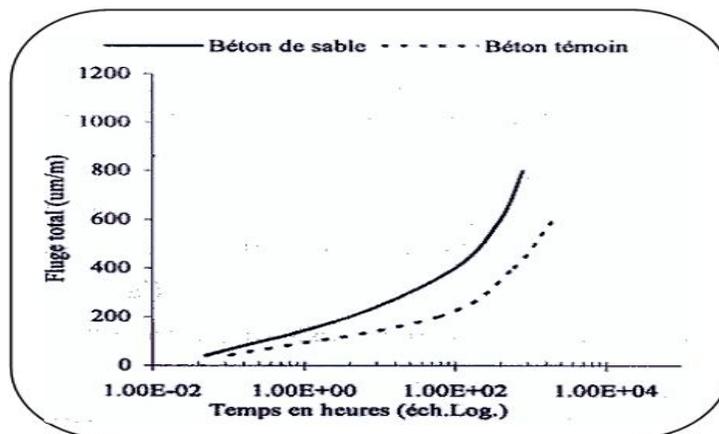


Fig. I.3. Fluage total (Sablocrete, 1994)

Enfin, le fluage varie d'une façon inverse avec la résistance. En effet, un béton ayant une résistance élevée présentera un fluage faible, qui sera par ailleurs proche de celui d'un béton courant. Donc on peut diminuer le fluage du béton de sable en augmentant sa résistance comme le montre la figure I.4.

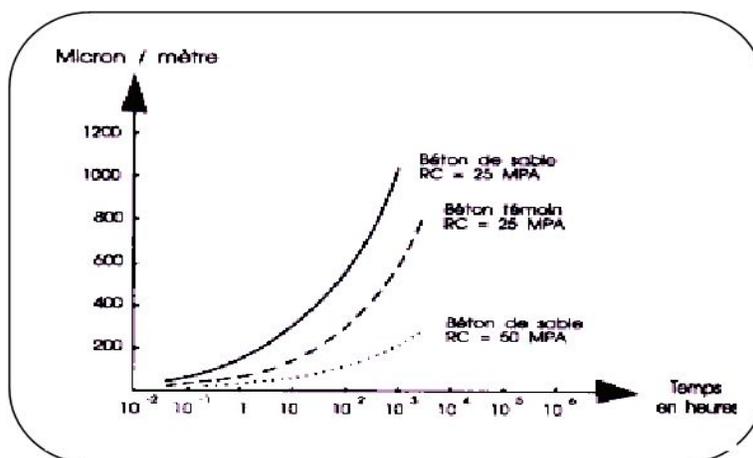


Fig. I.4. Influence de la résistance sur le fluage total (Sablocrete, 1994)

I.4.5. Durabilité :

La durabilité des bétons de sable comme pour les bétons courants, est souvent gouverné par la constitution physique de la matrice dont la porosité, la répartition géométrique des pores et la perméabilité. Outre ces paramètres, il y'a aussi l'influence des phénomènes interne tels que: l'alcali-réaction.

Le béton de sable se distingue des bétons classiques par un fort dosage en sable; de ce fait il contient généralement plus de pores homométriques et de faible taille, donc un taux de vide élevé par rapport aux bétons classiques. (Figure I.5).

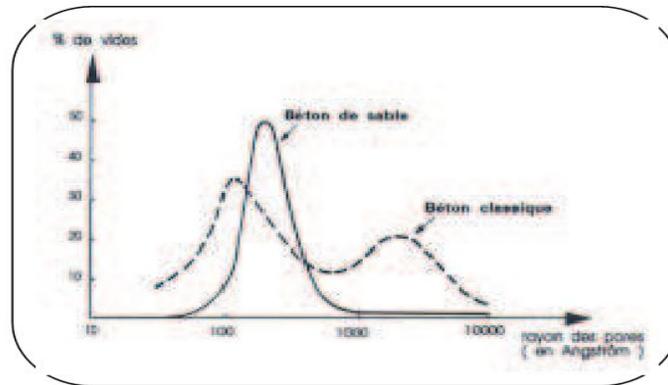


Fig. I.5. Distribution de la porosité en fonction du rayon de pores (Sablocrete, 1994)

Les conclusions suivantes ont été faites vis-à-vis des attaques physico chimiques (Sablocrete, 1994) :

- la perméabilité à l'eau est plus faible qu'un béton ordinaire ($2,5 \cdot 10^{-12}$ contre 10^{-10} m/s) ; quant à la perméabilité à l'air, elle conduit à des résultats inférieurs ou comparables pour des bétons de sable optimisés ;
- la profondeur de carbonatation en ambiance naturelle pourrait être importante ;
- le comportement à la pénétration des ions chlorures est comparable à celui des bétons traditionnels.

I.5. Formulation du béton de sable :

Dans un béton de sable, il convient de distinguer le dosage en ciment, nécessaire à l'obtention d'une résistance suffisante pour l'usage envisagé, et celui des fines d'ajout, nécessaires à l'obtention d'une bonne compacité, ce dosage va dépendre de la nature et de la granularité respective du sable et des fines d'ajout.

I.5.1. Approche de Guinez, Gluais et Delude en 1984 (Guinez et al, 1984) :

Cette approche est basée sur l'augmentation de la compacité du béton par l'adjonction d'un filler. L'étude a été menée sur un sable alluvionnaire 0/3 mm pour être ensuite étendue à

d'autres types de sable. L'objectif recherché était l'obtention d'une compacité maximale, pour que les caractéristiques physiques et mécaniques soient meilleures.

La première étape consistait à rechercher par tâtonnements un mélange de sable, ciment et eau (formulation de base) possédant une bonne maniabilité et une résistance à la compression voisine de celle des briques et des parpaings (autour de 8MPa). Cinq formules dosées respectivement de 450, 350, 300, 250 et 200 Kg de ciment au m^3 ont été soumises à des essais mécaniques.

La deuxième étape consistait à améliorer les performances de la formulation de base par la recherche de la meilleure correction granulaire possible, avec l'introduction du type de filler qui convient. Pour cela, trois types de fillers (calcaires), différents par leurs granulométries ont été utilisés à divers dosages. Les dosages en ciment et en eau ont été fixés à 300 Kg/m^3 et 240 l/m^3 respectivement. Les quantités de sable et de filler sont variables.

Les fillers employés avaient les caractéristiques granulométriques suivantes :

- filler V : le plus fin, 75% des grains inférieurs à 20 microns ;
- filler R : 62 % des grains inférieurs à 40 microns ;
- filler F : 20 % des grains inférieurs à 40 microns et 75 % inférieurs à 200 microns.

C'est la correction par le filler le plus fin (filler V) qui a donné les meilleurs résultats mécaniques et rhéologiques.

Dans la troisième étape, la quantité de ciment a été réduite à 250 Kg/m^3 et divers adjuvants (plastifiants) ont été utilisés.

1.5.2. Approche de J.J.Chauvin en 1987 (Chauvin, 1987):

Pour formuler ses bétons de sable, J.J.CHAUVIN s'était fixé au préalable le dosage en ciment à 350 kg/m^3 et 250 kg/m^3 respectivement ; Le dosage en eau a été choisi arbitrairement. Il a ensuite étudié les relations existant entre la nature et le dosage en fillers d'un côté, et les principales caractéristiques du béton de l'autre côté (résistance, compacité et maniabilité).

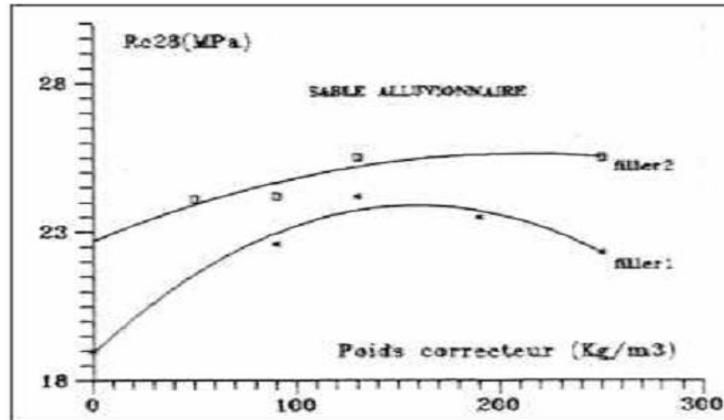


Fig. I.6. Effet de la nature et du dosage en fillers sur la résistance mécanique.
Filler 2 plus fin que filler 1

I.5.3. Méthode théorique pour la formulation des bétons de sable (Sablocrete, 1994) :

I.5.3.1. Compacité et méthode de formulation des bétons de sable :

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

Le problème de la formulation d'un béton se pose en terme d'optimisation de la compacité du squelette granulaire, par un choix judicieux de la proportion de sable et de gravillons puis par un comblement de la porosité de cet empilement avec la pâte afin d'obtenir l'ouvrabilité désirée.

En effet, au début du siècle, Caquot 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) :

$$V = v_0 (d / D)^{0,2} \quad \text{I.5.1}$$

Avec v_0 : constante expérimentale.

I.5.3.2. Estimation du dosage en fines d'un béton de sable

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

$$p_s = 0,75 (0,08 / D)^{0,2} \text{ (% volumique)} \quad \text{I.5.2}$$

Moyennant quelques hypothèses simplificatrices, en désignant par $[fines]$ le volume de l'ensemble des particules inférieures à $75 \cdot 10^{-6}$ m et $[v]$ le volume de vides associé à l'empilement de ces fines. Caquot a obtenu le résultat suivant:

$$[fines] = [v] \quad \text{I.5.3}$$

En combinant (I.5.2) et (I.5.3), le dosage volumique optimal en fines s'écrit:

$$[fines] = \frac{0,75}{2} (0,08 / D)^{0,2} \quad \text{I.5.4}$$

I.5.3.3. Porosité et dosage en eau d'un béton de sable :

Le squelette granulaire, y compris les fines, étant optimisé, il présente toujours une certaine porosité. Dans des conditions de mise en œuvre données, la compacité maximale, 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 de travaux sur la compacité de Caquot:

$$(e + v)_{min} = 0,8 (d / D)^{0,2} \quad \text{I.5.5}$$

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.

Dans le cas d'un mélange totalement défloculé, d peut être défini comme la moyenne harmonique de la dimension des grains du constituant le plus fin. Connaissant alors la surface spécifique f (surface de Blaine par exemple en cm^2/g) de ce constituant et sa densité p (exprimé en g/cm^3), le diamètre moyen des grains, assimilés à des sphères, est donné par la formule suivante:

$$d = \frac{60}{f \cdot p} \text{ en mm} \quad \text{I.5.6}$$

Pour estimer le dosage en eau, il faut préalablement évaluer la quantité d'air piégé. Dans le cas de nos bétons de sable, cette quantité est légèrement supérieure à celle des 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%.

$$[vides] = k[eau] \quad L/m^3 \quad I.5.7$$

avec k compris entre 0,2 et 0,25.

I.5.3.4. Estimation du dosage en sable :

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

$$[sable] = 1000 - [fines] - [eau] - [vides] \quad L/m^3 \quad I.5.8$$

I.5.3.5. Estimation de la résistance en compression :

La recherche d'une compacité maximale a permis de fixer les dosages des différents constituants: fines (particules $< 75.10^{-6}$ m), eau et sable. Il faut maintenant se pencher, sur l'évaluation de la résistance en compression d'un tel mélange. Cette estimation se fait par référence aux méthodes classiques adoptées pour les matrices cimentaires qui consistent à partitionner la contribution du squelette granulaire, de la nature du liant et des dosages des constituants de la pâte. Dans le cas des bétons formulés avec des fines potentiellement réactives, une généralisation de la formule de Ferret a été proposée:

$$Rb = \frac{Kf Rc}{\left(1 + \frac{3,1(e+v)}{c(1+K1+K2)}\right)^2} \quad I.5.9$$

Avec

- Kf : coefficient granulaire (ordre de grandeur 4,5 à 5) ;
- Rc : classe vraie du ciment (MPa) ;
- e : dosage en eau totale (l/m^3) ;
- v : air piégé (l/m^3) ;
- c : dosage en ciment (kg/m^3) ;
- Rb : résistance en compression du béton à 28 jours (MPa).

Et avec :

$$K1 = K_{CV} \frac{CV}{c} + K_{fs} \frac{fs}{c} \quad I.5.10$$

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

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

$$K1 \leq 0,5 \quad I.5.11$$

$$K2 = K_{fil} \frac{fil}{C} \quad I.5.12$$

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

$$K2 < 0,2 \quad I.5.13$$

Avec

- K1: coefficient pouzzolanique ;
 - K2 : coefficient d'activité du filler calcaire ;
 - K_{cv} , K_{fs} , K_{fil} : coefficient d'équivalence en ciment des différentes additions en fines ;
- cv, fs, fil: dosage en cendres volantes, fumée de silice et filler calcaire (kg/m^3).

I.6. Avantage du béton de sable :

Les principaux avantages des bétons de sable sont liés à :

- sa grande facilité de mise en place ;
- une susceptibilité quasi nulle à la ségrégation, ne nécessitant aucune correction de formulation ;
- un excellent aspect de décoffrage ;
- un lissage très facile ;
- sa composition granulaire de dimension faible, le béton de sable est surtout utilisé dans l'ornement et la finition des façades;
- bonne homogénéité et cohésion due à sa granulométrie ;
- des possibilités intéressantes d'adaptation à des réseaux d'armatures à mailles fines ou à des inclusions fibreuses ;

- utilisation des ressources locales en abondance dans la nature. Ce qui revient à préserver l'environnement, ainsi qu'une réduction du coût de revient ;

- une grande souplesse et une diversité des moyens de mise en œuvre notamment:

* le coulage ;

* le compactage ou l'hyper compactage ;

* le pompage ;

* l'injection sous pression ;

* l'extrusion.

I.7. Domaine d'emploi :

De ces nombreuses qualités le béton de sable comme matériau de construction est actuellement utilisé dans divers domaines d'application et avec divers procédés tels que

I.7.1. Bâtiment :

Presque toutes les applications en bâtiment sont réalisables en béton de sable, il est surtout utilisé pour son ouvrabilité excellente et son esthétique.

I.7.2. Routes :

L'utilisation du béton de sable dans la construction routière est une technique qui a vu le jour en Aquitaine (sud ouest de la France) dans la première moitié des années 90, elle a été développée dans un souci de préservation des ressources et de l'environnement dans les régions riches en sable (Eric et Stéphane, 2002), présente aussi un intérêt économique majeur.

I.7.3. Béton non vibrés :

Les bétons de sable sont souvent des bétons fluides, utilisés notamment pour :

- La fabrication de pieux forés ;

- La réalisation de dallages autocompactants ou autonivelants.

I.7.4. Projection :

La projection de béton de sable se fait d'une manière très pratique dans les travaux de réparation en génie civil et dans la stabilisation des talus.

Enfin, dans le cadre du projet national SABLOCRETE, en France, beaucoup de réalisations pilotes ont été faites dans les domaines des routes (dalles de chaussées rigides, bordures caniveaux), du bâtiment (dallage parpaings, poutres en béton précontraint et des ouvrages d'art (pieu foré à la tarière creuse, pieu foré sous bentonite).

En outre, nous notons des réalisations quasi centenaires en Union Soviétique : Pont de Chernavskif, l'aérodrome militaire de Pevek ...).

I.8. Limites des bétons de sable :

Dans l'état actuel des connaissances, les bétons de sable ne peuvent pas prétendre remplacer systématiquement les bétons classiques.

I.8.1. Limites inhérentes à la nouveauté :

La technologie du béton de sable étant récente, le savoir faire et l'expérience sont nécessairement à acquérir, de manière progressive par les utilisateurs habituels du béton

I.8.2. Contraintes de formulation :

Les performances d'un béton de sable sont extrêmement dépendantes:

- de la qualité de la formulation ;
- du respect de cette formulation.

Certaines formulations sont sensibles aux moindres fluctuations de la teneur en eau (cas des bétons de sable routiers compactes) et nécessitent un minimum de précautions lors du stockage des constituants, de la fabrication et du transport.

I.8.3. Économiquement :

Les limites se trouvent dans le fait que les bétons de sable les plus résistants sont ceux qui ont un fort dosage en ciment (supérieure ou égale à 450 kg/m^3) avec une série d'ajout plus ou

moins rare (fumée de silice, adjuvant plastifiant coûteux) ce qui rend leurs coûts voisins de ceux des bétons traditionnels.

I.8.4. Techniquement :

Des "zones d'ombres" existent sur la connaissance des caractéristiques et du comportement des bétons de sable :

- s'ils ont le même niveau de retrait que les bétons classiques leur module d'élasticité est par contre inférieur de 20 à 30 % à celui du béton ordinaire ;
- leur comportement en fluage peu connu l'exclut dans les cas des éléments de structure fortement sollicités ou précontraints ;
- même s'il existe des réalisations plus que centenaires (Aqueduc de la Vanne sur une section de 40 km à Paris, phare de Port-Said en Egypte, mur de retenue qui domine la place du Trocadéro à Paris ...), les données sur la durabilité sont peu nombreuses;
- il n'existe encore pas de normes universelles sur les bétons de sable.

I.8.5. Les bétons de sable routiers compactés

Les bétons de sable routiers compactés sont peu utilisés car les études sur les bétons de sable routiers compactés ne sont pas aussi poussées que celles portant sur les autres matériaux routiers. Cependant, les bétons de sable se prêtent bien à la technique de mise en place par compactage ou hyper-compactage qui permettent de réduire notablement les dosages réels en ciment. Il faut lors de la fabrication, maîtriser parfaitement la teneur en eau sinon la mise en œuvre deviendra très délicate voire impossible.

I.9. Conclusion :

L'utilisation des bétons de sable dans divers domaine d'emploi du béton possède des arguments technico-économique contribuant à favoriser son développement. Entre autre, sa facilité de bétonnage qui conduit à une bonne exécution des ouvrages et leurs bon façonnage, cela montre aussi l'aptitude du béton de sable à :

- assurer un bon remplissage de volume ;
- éviter la ségrégation et limiter le délavage ;

- assurer un bon enrobage des armatures.

Cependant, la majorité des auteurs s'accordent à dire que le béton de sable présente un retrait élevé et une résistance inférieure par rapport au béton ordinaires, du fait de sa granularité fine.

Chapitre 02 : recyclage des déchets

II.1. Introduction :

La réduction des réserves exploitables de granulats naturels et la prévision d'une diminution de la production de ces granulats ont pour conséquence, la recherche d'autres voies d'approvisionnement en granulats pour l'industrie du béton.

Notre objectif, dans ce deuxième chapitre, est de passer en revue les connaissances les plus pertinentes sur le recyclage et les granulats qui ont fait l'objet de recherche comme substitut de granulats naturels. Cette synthèse met en avant l'origine de ces granulats et aussi présente les performances des bétons confectionnés avec ces granulats recyclés.

II.2. Recyclage des déchets :

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. C'est une des activités économiques de la société de consommation. Certains procédés sont simples mais, à l'inverse, d'autres sont complexes, coûteux et peu rentables. Dans ce domaine, les objectifs des écologistes et ceux des consommateurs se rejoignent mais parfois divergent ; c'est alors le législateur qui intervient. Ainsi, en particulier depuis les années 70, le recyclage est une activité importante de l'économie et des conditions de vie des pays développés.

Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des trois R :

- réduire, qui regroupe tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets ;
- réutiliser, qui regroupe les procédés permettant de donner à un produit usagé un nouvel usage ;
- recycler, qui désigne le procédé de traitement des déchets par recyclage.

Le recyclage apporte une contribution importante à la baisse des quantités de déchets à éliminer par enfouissement et par incinération, mais il n'est pas suffisant pour contrer l'augmentation de la production des déchets ou y suffit à peine. Ainsi, dans le cas du Québec, l'importante hausse du taux de recyclage, passant de 18 % à 42 % entre 1988 et 2002, est allée de paire avec une augmentation de la quantité de déchets à éliminer par habitant, passant de

640 kg/an/personne à 870 kg du fait d'une augmentation de 50 % de la production par habitant durant cette même période. En France, le volume de déchets a doublé entre 1980 et 2005, pour atteindre 360 kg/an/personne.

La production de déchets ménagers est de l'ordre de 0,7kg/habitant/jour dans les grandes villes, contre 0,5kg/habitant/jour dans les villes plus moyennes (Saadani, 2006).

Pour lutter contre l'augmentation des déchets, le recyclage est donc nécessaire, mais il doit être inclus dans une démarche plus large.

II.3. Intérêt du recyclage dans le génie civil :

Actuellement, la plupart des granulats utilisés sur le marché sont des granulats naturels issus de carrières ou de l'extraction des lits des fleuves ou des fonds marins. Ces produits offrent l'avantage d'une qualité relativement constante et d'un approvisionnement continu.

Par exemple, la Belgique produit annuelle environ 72 millions de tonnes par an de granulats tous types confondus. La répartition des différents types de granulats s'effectue de la manière suivante :

- granulats naturels environ 43 millions de tonnes par an (+/- 58 %), la fabrication des bétons consomme à elle seule 15 millions de tonnes ;
- granulats marins environ 4 millions de tonnes par an (+/- 5,5 %) ;
- granulats artificiels environ 2 millions de tonnes par an (+/- 2,25 %) ;
- granulats recyclés 14 millions de tonnes par an (+/- 19,5 %).

Recycler des déchets dans une utilisation comme granulats pour les routes ou la construction permet:

- une économie de la ressource naturelle ;
- une réduction du transport des matériaux, donc une réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre ;
- une mise en œuvre rapide minimisant la gêne pour les habitants ;
- la réduction des quantités de matériaux mis en décharge.

Au niveau environnemental, le recyclage complet du béton contribue à minimiser l'impact CO₂ du fait que :

- pour les grandes agglomérations, l'utilisation des granulats recyclés permettra de diminuer une partie du CO₂ attribuée au transport de granulats ;
- le béton concassé est susceptible de piéger le CO₂ en se carbonatant (Thai-Hoa, 2009) ;
- la récupération des fines potentiellement utilisables, après traitement, dans la production d'un nouveau ciment ou autre liant hydraulique, a un impact sur la réduction de la production de CO₂ des cimenteries.

II.4. Utilisation des recyclâts :

Les domaines d'emploi des recyclâts sont diversifiés dont la confection de nouveaux bétons de bâtiment, les travaux de routes, la fabrication de ciment etc.

Pour confectionner de nouveaux bétons de bâtiment, le travail réalisé par (Raphaël, 2003) montre que les granulats de bétons concassés recyclés ont une absorption d'eau plus élevée, une masse volumique plus faible et une homogénéité moindre par rapport aux granulats naturels. Ces différences engendrent une perte d'ouvrabilité du béton frais, une résistance mécanique plus faible et une vitesse de carbonatation plus élevée des bétons durcis constitués des gravillons de bétons recyclés. Ces phénomènes sont encore accrus en présence d'une fraction de sable de bétons concassés (0/4 mm). Ces inconvénients sont plus ou moins compensés par l'ajout de 10 à 15 % de ciment supplémentaire et d'un fluidifiant.

De plus, Le retrait au séchage du béton constitué de béton récupéré est supérieur de 10 à 30% à celui du béton de référence. La tenue au gel/dégel du béton contenant des granulats de béton récupéré est semblable à celle d'une éprouvette de béton de référence contenant des granulats ordinaires (Ramachandran, 1981).

Les granulats recyclés dont la granulométrie est comprise entre 20 et 63 mm sont destinés aux terrassements ou aux chaussées. Pour la stabilisation de plates-formes et consolidation de sol les matériaux de recyclage de granularité 20/60 et 30/80 sont recommandés (IDRRIM, 2011).

Dans le domaine du génie civil, les pneus usagés sont utilisés entiers ou découpés pour constituer des parements ou renforcer les remblais allégés (techniques PNEUSOL, PNEURESIL).

La poudrette de caoutchouc est obtenue par broyage de pneus usagés non réutilisables (PUNR). Cette poudrette est utilisée dans la fabrication des revêtements de sols industriels et sportifs, la réalisation de matériaux d'isolation phonique, de membranes anti-fissures à usage routier ou de membranes anti-vibrations destinées aux plates- formes ferroviaires. Elle est également employée comme liant dans les bitumes.

Les boues rouges sont utilisées dans les domaines suivants:

- construction des routes à cause de leur solidité et de leur durabilité ;
- production du ciment à cause de leur résistance au gel et leur bas prix ;
- fertilisation des sols grâce à leur teneur élevée en potassium et en phosphate ;
- extraction des oxydes de fer, de scandium, de plomb et de titan;
- fabrication de céramique;
- neutralisation des eaux des mines et des sites contaminés.

De plus, la poudre de verre comme ajout cimentaire peut remplacer jusqu'à 30 % du ciment dans le béton. Cette initiative novatrice pour la récupération et le recyclage du verre en Amérique du Nord a plusieurs avantages. En plus d'offrir un débouché au recyclage du verre, elle améliore la qualité du béton de construction. Les intérêts ne sont pas seulement de nature environnementale puisque les propriétés de ce produit lui permettent de remplacer les ajouts cimentaire classiques en améliorant les performances des bétons.

Le laitier expansé est utilisé pour la fabrication du béton léger ayant une masse volumique apparente comprise entre 800 et 950 kg/ m³.

Les blocs de béton de laitier expansé sont utilisés pour la construction de murs porteurs et de murs non porteurs. Le béton de laitier expansé a une excellente résistance au feu et une conductivité thermique supérieure d'environ 75% de celle des autres bétons légers.

II.5. Différents recyclâts :

II.5.1. Laitiers :

II.5.1.1. Laitier de haut fourneau :

Le laitier de haut fourneau est un sous produit de la transformation du minerai de fer en fonte brute. Le laitier est ensuite refroidi lentement à l'air libre et donne un matériau cristallin et compact connu sous le nom de «laitier refroidi à l'air» ou bien il est refroidi rapidement et traité au moyen de jets d'eau pour obtenir un matériau léger désigné sous le nom «laitier expansé». La quantité de laitier expansé produit est bien plus faible que celle de laitier refroidi à l'air.

Le laitier refroidi à l'air est approprié comme granulats pour le béton. La comparaison entre la résistance à la compression du béton constitué de granulats de laitier de haut fourneau et celle du béton constitué de gravier et de calcaire concassé indique que le béton de laitier est plus résistant (Ramachandran, 1981). Les fines du laitier peuvent être utilisées pour remplacer sans inconvénient le sable. La stabilité volumique, la résistance aux sulfates et la résistance à la corrosion par les solutions de chlorure font que le béton de laitier armé convient pour plusieurs applications.

II.5.1.2. Laitier d'acier :

Ce laitier est formé par l'élimination des impuretés contenues dans la fonte brute. Il est riche en phosphate ou en calcium et contient du silicate bicalcique métastable; il est donc utilisé uniquement comme matériau de remblai pour les routes. Normalement, ce laitier est stocké en piles pendant une période allant jusqu'à un an avant d'être utilisé.

II.5.2. Sous-produits provenant des centrales thermiques :

La combustion du charbon aux fins de la production d'électricité donne plusieurs sous-produits. Dans les centrales électriques anciennes, les résidus de la combustion de la houille sont désignés sous le nom de «mâchefer». Dans les centrales modernes, on utilise du charbon broyé ou pulvérisé pour la production de vapeur. Les petites particules qui sont transportées par les gaz de combustion sont recueillies par précipitation électrostatique ou par un autre moyen quelconque. Ces particules sont appelées «cendres volantes». Certaines des particules de cendres forment des scories qui tombent au fond du four. Dans les fourneaux à température élevée, il se produit également des résidus fondus appelés laitier de charbon.

II.5.2.1. Mâchefer :

Le mâchefer contient une proportion considérable de charbon non brûlé et d'autres impuretés. Il est utilisé principalement pour la fabrication de blocs de béton. Etant donné que le mâchefer contient du sulfate et des chlorures, il n'est pas recommandé pour le béton armé. Ce matériau risque de devenir de plus en plus rare à mesure que les centrales électriques anciennes passent à la combustion de charbon pulvérisé.

II.5.2.2. Scories :

Ces résidus constituent environ 2,5 % de la production totale de cendres. On prévoit que plus le charbon sera utilisé, plus on aura de cendres. La composition chimique des scories de combustion américaines est semblable à celle des cendres volantes, sauf que les scories ont une plus forte proportion d'alcalis et de sulfates. Les scories de charbon et le laitier de charbon peuvent être utilisés comme granulats légers pour la fabrication de blocs de béton (Ramachandran, 1981).

II.5.2.3. Cendres volantes :

Les cendres volantes pourraient constituer de très bons granules légers, mais elles ne sont pas beaucoup utilisées.

Les cendres volantes de classe F contiennent moins de 10 % de CaO et sont utilisées pour la fertilisation des sols. Les cendres de classe C contiennent plus de 10 % de CaO et elles sont plus communément utilisées pour la fabrication du béton.

En Europe et selon les années, de 2 à 3 Mt de cendres volantes, sur une production totale de 43 Mt sont utilisées dans la construction de routes (Shkelzen, 2010).

II.5.3. Déchets provenant de l'exploitation de mines et de carrières :

L'exploitation des mines et des carrières produit de grandes quantités de déchets. Les déchets de minerais ne sont pas encore très utilisés étant donné qu'ils proviennent d'endroits très éloignés des régions peuplées. Ils pourraient cependant être utilisés pour la fabrication de briques, et de blocs de béton autoclavé ou à granules légers. Un des problèmes relatifs à l'usage de ces déchets découle de la diversité de leur composition.

II.5.4. Déchets divers :

II.5.4.1. Verre de récupération :

Des millions de tonnes de verre sont récupérées chaque année et une voie de recyclage du verre consiste à l'utiliser dans les matériaux de construction. En général, la résistance du béton contenant du verre est inférieure à celle du béton contenant du gravier (Saadani, 2006). La résistance est particulièrement faible lorsque du ciment à teneur alcaline élevée est utilisé. Le verre de récupération réagit en présence de granulats alcalins. Une dilatation élevée est produite lorsqu'il est en contact avec du ciment à teneur alcaline élevée, ce qui explique la faible résistance des bétons à base de verre. Par exemple, pour une période de 12 mois, la dilatation du béton contenant du gravier est de 0,018%, alors que celle du béton contenant du verre est d'environ 0,3%.

Le verre de récupération peut aussi servir à la fabrication de granulats légers. La production des granulats légers expansés d'une masse volumique de 528 kg/m³ par pelletisation d'un mélange de verre de récupération broyé, d'argile et de silicate de sodium chauffé à une température de 850°C. Le béton ainsi obtenu présente une résistance à la compression d'environ 17 MPa après une période de cure à la vapeur de 28 jours (Ramachandran, 1981).

Il est utilisé sous deux formes principalement : les granulats (taille > 4 mm) et les poudres (taille < 4 mm). Les granulats sont utilisés en remplacement des graves dans les bétons et lui procurent une résistance moindre. Les poudres (sables et fines) sont utilisées dans les mortiers en remplacement du sable mais aussi dans l'industrie du ciment pour fines.

II.5.4.2. Pneus usagers :

Les matériaux cimentaires ont une capacité de déformation très limitée ainsi qu'une faible résistance à la traction, ce qui les rend sensibles à la fissuration, notamment la fissuration due au retrait. A titre d'exemple, les dallages, les chaussées et plus généralement les éléments mis en place en grande surface se fissurent sous l'effet du retrait. Ainsi, l'incorporation de granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés dans un mortier confère au composite obtenu une plus grande capacité de déformation avant la localisation de la microfissure. Il en résulte que le composite cimentaire incorporant des granulats en caoutchouc a une grande résistance à la fissuration de retrait. Néanmoins, la résistance en compression est très faible ce qui limite aussi les applications. Malgré les limites en termes de résistance en compression, le composite incorporant des granulats en caoutchouc est donc

d'un intérêt évident dans toutes les applications où la lutte contre la fissuration due aux déformations est une priorité.

II.5.4.3. Ciment durci :

Dans le cas où un sac de ciment est en contact avec l'eau, la poudre se cristallise provoquant le durcissement du ciment. Il devient inutilisable comme liant sur le chantier. Le ciment ainsi durci devient automatiquement un déchet. Il peut être concassé et utilisé comme granulat de béton. Ce déchet est produit accidentellement ou par négligence, il est donc important d'éliminer le ciment durci et d'œuvrer pour empêcher sa production. Une cimenterie est très énergivore et productrice de gaz à effet de serre très néfaste pour l'environnement. Il est donc très important de ne pas gaspiller ce produit.

II.5.4.4. Résidus d'incinérateurs :

L'incinération des déchets domestiques et industriels entraîne la production de grandes quantités de résidus solides. Ces résidus comportent toutefois certaines matières délétères, ce qui compromet leur utilisation en tant que composants du béton. Ainsi, l'aluminium entraîne la dilatation par suite de l'évolution de l'hydrogène, les métaux ferreux font tacher le béton et les sels de plomb et de zinc solubles nuisent à la prise du ciment. La présence de verre entraîne aussi la dilatation des granulats alcalins (Ramachandran, 1981)

II.5.4.5. Boues rouges :

Les boues rouges sont des résidus industriels issus du processus d'extraction d'aluminium à partir de la bauxite (procédé de Bayer). Ces résidus selon (Shkelzen, 2010) ont un PH supérieur à 12 et sont produits à un taux de 2 t/t d'aluminium commercialisé. Les boues rouges sont stockées soit au fond des océans (France, Allemagne), soit près des usines comme au Canada.

La production des boues rouges en 2006 s'est chiffrée à 90 Mt dans le monde dont, 3 Mt au Canada et on prévoit une augmentation de production de 60 % par décennie. Les grandes alumineries peuvent en générer jusqu'à 675 000 tonnes par année. Elles sont de consistance assez plastique pour être formées en boules chauffées à des températures de 1260 à 1310°C, elles sont transformées en granulats denses et résistants pouvant entrer dans la composition de bétons de résistances convenables.

II.5.4.6. Argile cuite :

Selon la méthode utilisée pour la fabrication et la manipulation des briques, il y a toujours un certain pourcentage de briques cassées, trop cuites ou mal cuites. Les briques concassées et bien cuites conviennent bien à la fabrication des blocs de béton. Le béton contenant de tels granulats est plus perméable et si les briques contiennent des sels solubles, il peut y avoir corrosion et efflorescence dans le béton. Le béton contenant de l'argile cuite comporte une résistance au feu beaucoup plus élevée que celle du béton à base de gravier naturel (Ramachandran, 1981).

II.5.4.7. Déchets de mines de charbon :

Dans les opérations d'extraction du charbon, environ la moitié du matériau est rejetée sous forme de déchets. Ceux-ci servent principalement de matériau de remblai pour les routes et peuvent aussi être utilisés comme granulats pour le béton léger (Ramachandran, 1981).

II.5.5. Granulats recyclés :

II.5.5.1. Granulats recyclés issus de déchets de démolition :

Le béton constitue presque 75 %, en poids de tous les matériaux de construction. Il s'ensuit donc que la plus grande partie de rebuts de démolition est constituée de béton. Par ailleurs, les sinistres fournissent des millions de tonnes de débris de béton.

Aujourd'hui, les producteurs de granulats recyclés ont une politique de sélection des matériaux de démolition. Ainsi, on distingue cinq catégories de matériaux de démolition en fonction de leur nature :

- les bétons armés sans enduit ni plâtre ;
- les matériaux composés de briques, de tuiles, de graves, de pierres et de blocs rocheux ; etc;
- les matériaux mélangés avec une faible teneur en plâtre, bois, plastique ; etc;
- les mauvais matériaux avec une teneur en bois, plâtre, plastique : supérieure à 10 %;
- les autres matériaux n'entrant pas dans les catégories précédentes.

II.5.5.2. Granulats de déchets de production de l'industrie du béton :

Les granulats de déchets de production ont deux origines :

- les débris de béton générés tout au long des étapes de la production; ils résultent du nettoyage des installations de fabrication et du transport du béton frais (chutes de béton); il peut également s'agir de béton provenant de gâchées non utilisées ou non utilisables; ce type de déchets est produit en quantité variant de 0,2 à 1 % de la masse de béton produite selon les secteurs concernés ;
- les produits défectueux, mal formés, partiellement cassés ou d'aspect non conforme; à ces produits défectueux s'ajoutent les produits ayant fait l'objet d'essais de résistance à la rupture ; ce type de déchets est produit en quantité variant de 0,2 à 3 % selon les secteurs et selon les conditions imposées (Raphaël, 2003).

Lorsqu'ils ne sont pas mélangés avec d'autres déchets (emballages, chiffon, etc.), ces morceaux et débris de béton durcis et propres sont considérés comme des déchets inertes. Ils sont le plus souvent acceptés gratuitement par des entreprises de travaux publics pour constituer des remblais ou par des entreprises de traitement de déchets de chantier. Toutefois, pour certains secteurs de l'industrie du béton (planchers, ossatures, murs, assainissement), les produits défectueux fortement armés ou précontraints et volumineux posent des problèmes d'enlèvement.

II.5.5.3. Sables de fonderies :

Les sables de fonderie sont des sous-produits de l'industrie de la fonderie. Dans le procédé de moulage de pièces métalliques, les fonderies utilisent un sable fin siliceux associé à d'autres matériaux tels que l'argile ou des liants organiques (ex: résines phénoliques). Ce sable peut être recyclé mais le nombre de réutilisations de celui-ci est limité (Maillard, 1997). Quand le sable n'est plus réutilisable pour l'industrie de la fonderie, il est mis en décharge.

Les sables de fonderie sont donc susceptibles de constituer une matière première d'un coût assez faible pour la fabrication des bétons hydrauliques. Les sables de fonderie peuvent être utilisés pour la fabrication de produits à base de liants hydrauliques si leur teneur en phénol est inférieure à 5 mg/kg de sable rapporté à la matière sèche

II.6. Déchets de marbre :

Le marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire, existant dans une grande diversité de coloris, pouvant présenter des veines, ou marbrures (veines et coloris sont dus à des inclusions d'oxydes métalliques, le plus souvent).

Certains types de marbres portent des noms particuliers, par exemple le cipolin ou la griotte. Le marbre désigne un carbonate de calcium à tissu compact ou cristallin qui se laisse rayer et réagit aux acides plus ou moins siliceux ou argileux, il se présente en épaisseur homogène ou diversement mélangée à d'autres matières, sa densité est élevée en moyenne de 2,7.

La classification des marbres est fondée sur les teintes ou les dessins : outre le blanc ils existent des variétés, beiges, bleues, roses, gris, jaunes, rouges, vertes, violettes ou noires.

La production marbrière en France est faible et on constate une régression par rapport à des pays comme l'Italie, le Portugal et la Grande-Bretagne.

Les produits marbrières algérienne sont extraits et transformés conformément aux normes européennes : Italienne et françaises en particuliers. Les procédés utilisés en Algérie pour le travail du marbre sont ceux utilisés dans le monde :

- Sciage des masses au fil hélicoïdal, au fil diamanté et la haveuse pour l'abatage et le tranchage des masses brutes de marbres naturels en carrières ;
- Transformation en produits finis au moyen de lames et disques, débitages secondaires et ponçage avec des pierres ponces.

Le marbre en Algérie est exploité par l'entreprise nationale du marbre «ENAMARBRE» par dix unités de production dans cinq wilayas.

Durant l'année 2007, la production de marbre en blocs, par les filiales de l'entreprise ENAMARBRE, est de 10620 m³, en baisse de 33,96% par rapport à la production enregistrée en 2006 qui était de 16082 m³.

Les dérivés de marbre produits sont de l'ordre de 169954 tonnes pour l'année 2007, en hausse de 15,09 % par rapport à l'année 2006 qui était de 147674 tonnes. La production pour l'année 2007 est de :

- Marbre/ Blocs : Skikda 10399 m³, Oran 221 m³ ;
- Marbre/ Dérivés : Chlef 17222 t, Tlemcen 45581t, Tizi Ouzou 12445t, Skikda 82843t, Oran 11863t.

II.6.1. Le marbre de la carrière de FIL-FILA :

II.6.1.1. Provenance :

Le marbre est une roche métamorphique compacte provient de l'exploitation de l'entreprise nationale de marbre «ENAMARBRE» de la carrière de Fil-Fila qui se trouve à 25 Km à l'est de la ville de Skikda.

La carrière de Fil-Fila est divisée en deux carrières :

- Carrière à blocs ;
- Carrière dérivée.

II.6.1.2. Carrière à blocs :

II.6.1.2.1. Principe de fabrication :

L'exploitation se fait par sciage des masses par fils diamantés qui sont débités pour obtenir des blocs bruts naturels de marbre.

Les blocs bruts sont traités pour avoir une forme régulière (enlèvement de tranche extérieure) et transformer à l'usine en dalle et carreaux.

Le marbre de la carrière à blocs de Fil-Fila est divisé selon leurs caractéristiques en trois types

- Marbre blanc ;
- Marbre gris ;
- Marbre réséda vert.

II.6.1.2.2. Recyclage des déchets :

Les déchets de carrières à blocs sont les blocains, chutes et moellons ayant différentes formes géométriques, le taux de déchets est de 56% de la production pour l'année 2007 ; le stock jusqu'à la fin 2007 est de l'ordre de 5823 m³ (Saadani, 2006).

Le recyclage des déchets est limité sur une partie de blocs de marbre de la carrière à blocs, par une entreprise privée. Le produit de recyclage de déchets est un sous produit de marbre «granulats et poudre». Les déchets de l'usine de transformation sont exploités partiellement en revêtement de sol et en construction de carreaux de granito, en peinture pour la poudre de marbre. Les granulats obtenus par concassage et broyage des blocains et de chutes de blocs et

qui ont des répartitions granulométriques en mm (0/5- 5/10- 10/20) sont utilisés comme matière première pour la fabrication du carrelage et revêtement des surfaces.

II.6.1.3. Carrière dérivée :

II.6.1.3.1. Principe de fabrication :

L'exploitation de la carrière dérivée de Fil-Fila se fait par abattage à l'exploitation des moellons de dimension variant de (80-100 cm), qui sont concassées, broyées pour obtenir des granulats dont la granulométrie varie de 0-18 mm. La poudre de marbre est obtenue après broyage et pulvérisation du marbre de dimension variant de 02 à 30 microns.

Les dérivés de marbre sont deux types :

-Dérivés de marbre blanc ;

-Dérivés de marbre gris (à l'arrêt).

II.6.1.3.2. Recyclage des déchets :

Le déchet de la carrière dérivée est un tout venant (marbre de différentes classes granulaires), le taux de déchets est de 19 % de la production pour l'année 2007 ; le stock jusqu'à la fin de l'année 2007 est de l'ordre de 15740 tonnes.

Le tout venant de la carrière dérivée de Fil-Fila sont destiné à la construction des routes.

II.6.2. Utilisation des déchets de marbre dans la construction :

L'utilisation de la poudre de marbre pour la fabrication du ciment n'affecte pas le temps de prise de ciment (Aruntas et al., 2010), un taux de substitution de 10% de clinker par la poudre de marbre rend le ciment plus résistant et diminue le cout de fabrication.

(Corinaldesi et al., 2010) a montré que l'utilisation de la poudre de déchets de marbre dans la fabrication du béton et du mortier assure une bonne cohésion entre les différents composants de ces matériaux.

D'après les travaux des auteurs (Ergün, 2001, Baboo et al., 2011, Nutan et al., 2013, Vaidevi, 2013), l'incorporation de déchets de marbre dans la formulation du béton peut améliorer les performances mécaniques de ce matériau et réduit leur cout économique.

(Chaid et al., 2011 ,Binici et al., 2008) ont montré que les bétons qui contiennent des granulats de déchets de marbre ont une grande résistance contre les attaques sulfatique et que l'utilisation de déchets de marbre réduit la diffusion des ions chlorure de 70% de sa valeur.

Les déchets de marbre ne sont pas seulement utilisés pour la confection du béton, ils peuvent également être utilisés pour la fabrication d'autre type de matériaux de construction. L'étude menée par (Bilgin et al., 2012) a montré que la poudre de marbre a un effet positif sur les propriétés physiques et mécaniques des briques et peut rentrer dans la fabrication de ce matériau. (Karasahin et Terzi, 2007, Akbulut et Gürer, 2007) ont montré aussi que les déchets de marbre peuvent être utilisés pour la fabrication du béton bitumineux

II.7. Conclusion :

Les données extraites de ce chapitre démontrent la faisabilité technique d'utiliser les granulats recyclés (rebuts de production de l'industrie du béton et des déchets industriels) lors de la fabrication de nouveau béton et la construction en génie civil

Concernant l'utilisation des déchets de marbre pour la confection des bétons, il ressort que ces déchets présentent des caractéristiques qui en font des matériaux pouvant entrer dans la formulation d'un béton.

Chapitre 3 : Matériaux et procédures

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons présenter et discuter les résultats obtenus à la suite de la caractérisation des matériaux utilisés afin de mettre en évidence les propriétés essentielles et utiles qui ont motivé leur utilisation dans cette étude. Ensuite nous allons présenter la composition des bétons de sable, les procédures de malaxage et de conservation ainsi que les essais effectués sur les bétons formulés à l'état frais et durci

III.2. Matériaux :

III.2.1. Ciment :

Le ciment utilisé pour formuler les différentes compositions du béton de sable est un ciment portland artificiel CEM I 425, qui provient de la cimenterie Sotacib du gouvernorat de Kairouan (Tunisie). Ses différentes propriétés physiques et chimiques sont représentées ci-dessous :

Tableau III.1. Caractéristiques physiques et mécaniques du ciment étudié

Essais	Résultats
Début de prise (min)	76
Fin de prise (min)	180
Masse volumique absolue (g/cm^3)	3.125
Surface spécifique (Finesse de Blaine) (cm^2/g)	3155
Retrait à 28j ($\mu\text{m/m}$)	792
Résistance moyenne à la compression à 2j (MPa)	26.91
Résistance moyenne à la compression à 7j (MPa)	43,56
Résistance moyenne à la compression à 28j (MPa)	58.45
Résistance moyenne à la flexion à 2j (MPa)	5,086
Résistance moyenne à la flexion à 7j (MPa)	7,22
Résistance moyenne à la flexion à 28j (MPa)	8.81

Tableau III.2. Composition chimique du ciment étudié

Désignations	Résultats en %
--------------	----------------

CaO	61,38
Al ₂ O ₃	5,18
Fe ₂ O ₃	3,34
SiO ₂	19,97
MgO	0,99
Na ₂ O	0,2
K ₂ O	0,44
Cl ⁻	0,19
SO ₃	2,9
CaO libre	0,6
Perte à feu	3,71

Tableau III.3. Composition chimique potentielle du ciment étudié

Teneur en	Pourcentage
C ₄ AF	10,25
C ₃ A	8,08
C ₃ S	58,45
C ₂ S	13,24

Ces tableaux montrent que ce ciment a une prise demi-lente à cause de leur faible teneur en C₃A et une résistance à la compression au jeune âge un peu élevée due à leur teneur élevée en C₃S par rapport aux autres composants.

III.2.2. Sable :

Le sable est le composant principal du béton de sable puisqu'il constitue son squelette. Dans notre cas il s'agit d'un sable de dune siliceux à granulométrie continue prélevé de la sablière d'Oued Zhour, la région de Collo située au West de la Wilaya de Skikda. Les résultats expérimentaux obtenus sur le sable sont présentés ci-dessous dans le tableau III.4

Tableau III.4. Caractéristiques physiques du sable étudié

Essais	Résultats
--------	-----------

Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.459
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.598
Equivalent de sable (%)	75.89
Module de finesse	1.92
Teneur en fines (%)	0.48

La figure III.1 montre la distribution granulométrique du sable étudié

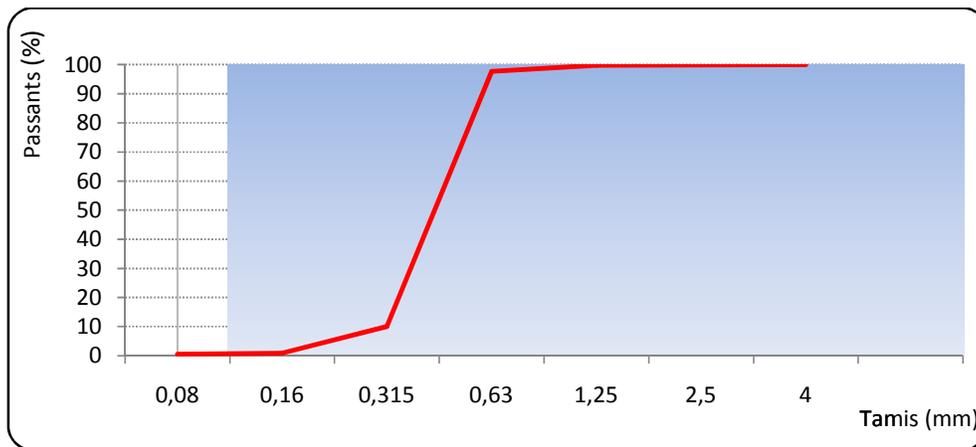


Fig III.1. Courbe granulométrique du sable étudié

III.2.3. Addition (déchet de marbre) :

Pour la formulation des bétons de sable, nous avons utilisé le marbre qui dérive des déchets de la carrière à bloc de Fil-Fila (Skikda). Les fines de ce matériau employés ont été obtenus par concassage suivi d'un broyage à l'aide un broyeur à boulet.

Les caractéristiques physico-mécanique ainsi que la composition chimique de ces fines sont indiqués dans les tableaux suivants :

Tableau III.5. Caractéristiques physico-mécanique des fines de marbre utilisées

Caractéristique physico-mécanique	
Apparence	Blanc
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.7227

Coefficient d'absorption d'eau (%)	0,39
Résistance à la compression à l'état sec (kg/cm ²)	961
Résistance à l'usure (g/cm ²)	1,82
Résistance au choc (kg/cm ³)	40

Tableau III. 6. Composition chimique du marbre étudié

Désignations	Résultats en %
CaO	53,85
Al ₂ O ₃	0,38
Fe ₂ O ₃	0,22
SiO ₂	1,11
MgO	2,81
Na ₂ O	0,15
K ₂ O	0,04
Cl ⁻	0,002
SO ₃	0
CaCO ₃	96,12

III.2.4. Adjuvant :

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant algérien de type GLENIUM 26. C'est un adjuvant liquide non chloré d'une nouvelle génération chimique à base d'étherpolycarboxylique modifié. Les caractéristiques de cet adjuvant sont indiquées dans Tableau III.7.

Tableau III.7. Caractéristiques physiques d'adjuvant

Aspect	liquide
--------	---------

Couleur	brun
Masse volumique	1,08 g/cm ³
Extrait sec	24%
PH	7

III.2.5. Eau :

L'eau utilisée pour la confection des matériaux est celle du robinet.

III.3. Composition :

Les bétons de sable étudiés sont confectionnés selon la méthode proposée par le projet Sablocrete (Sablocrete 1994).

Partant d'un sable donné et d'un dosage en ciment fixé a priori (400 kg), l'essentiel de l'étude est de déterminer le dosage en fines à ajouter pour obtenir une résistance maximale.

Dans un premier temps, nous avons choisi un rapport E/C égale à 0,66 et un dosage en superplastifiant égale à 1,5% du poids de ciment. Cependant, notre mélange était très raide et ne permet pas la préparation des éprouvettes. Ce fait est du au type du sable utilisé (sable fin).

Dans un second temps, nous avons augmenté le rapport E/C à 0,77 et le dosage en superplastifiant à 2% du poids de ciment.

III.3.1. Formulation du béton de sable témoin B0 (sans addition):

III.3.1.1. Détermination du dosage en ciment :

Le volume de fines égale au volume du ciment, La masse volumique absolue étant de 3125 kg/m³ et la masse du ciment est égal à 400 kg/m³. Le dosage volumique en ciment égale à :

$$[\text{fines}] = \frac{\text{Masse}}{\text{Masse volumique absolue}} = \frac{400}{3125} = 0,128 \text{ m}^3 = \mathbf{128} \text{ litres}$$

III.3.1.2. Détermination du dosage en eau :

Le rapport E/C est maintenu constant avec une valeur égale à 0,77 et le dosage en ciment étant de 400 kg/m³. Le dosage volumique en eau est égal donc à **308** litres

III.3.1.3. Détermination du dosage en superplastifiant :

La masse volumique du superplastifiant égale à 1080 kg/m^3 et la masse égale à 2% du poids de ciment. Le dosage volumique en superplastifiant est égal :

$$[\text{Superplastifiant}] = \frac{\text{Masse}}{\text{Masse volumique}} = 7,4 \text{ litres.}$$

III.3.1.4. Détermination du volume des vides :

$$[\text{vides}] = k[\text{ eau}] \text{ avec } k = 0,2.$$

Donc le volume des vides est égal $[\text{vides}] = 0,2 \times 308 = 61,6$ litre.

III.3.1.5. Détermination du dosage en sable :

D'après la formule exposée par la méthode Sablocrete le dosage volumique du sable égale à :

$$[\text{Sable}] = 1000 - [\text{ fines}] - [\text{ eau}] - [\text{ vides}] - [\text{ superplastifiant}] \quad \text{L/m}^3$$

$$[\text{Sable}] = 1000 - 128 - 308 - 61,6 - 7,4 = 495 \text{ litres.}$$

Sachant que la masse volumique absolue du sable est égale à $2597,8 \text{ kg/m}^3$, le dosage pondéral du sable égale donc à **1285,91 kg**.

Pendant la préparation des éprouvettes, on a constaté que le volume calculé est inférieur au volume réel. Cela est sûrement du à :

- le modèle utilisé pour le calcul du volume des vides qui surestime celui-ci.
- les valeurs de la masse volumique absolue ne sont pas des valeurs précises, elles entraînent une certaines erreurs dans le calcul du dosage en ciment et en sable.

Après l'ajustement de la formulation, on a trouvé un dosage en sable égale à **1445,91 kg**.

Pour les autres formulations, on a fait des substitutions volumiques du sable par les fines de marbre. Le Tableau III.8 montre les différentes formulations réalisées.

Tableau III.8. Désignation des bétons testés

B0	Béton de sable témoin sans ajout de fines de marbre
B2	Béton de sable avec 2% de substitution de sable par les fines de marbre
B4	Béton de sable avec 4% de substitution de sable par les fines de marbre
B6	Béton de sable avec 6% de substitution de sable par les fines de marbre
B8	Béton de sable avec 8% de substitution de sable par les fines de marbre
B10	Béton de sable avec 10% de substitution de sable par les fines de marbre
B12	Béton de sable avec 12% de substitution de sable par les fines de marbre

Les formulations de béton de sable et les additions effectuées sont présentées dans Tableau III.9.

Tableau III.9. Formulations du béton de sable

Béton	Ciment (kg/m ³)	Eau (l/m ³)	Sable (kg/m ³)	Marbre (kg/m ³)	% SP	E / C
B0	400	308	1445,91	0	2%	0.77
B2	400	308	1416,66	30,30	2%	0.77
B4	400	308	1388,07	60,61	2%	0.77
B6	400	308	1359,14	90,92	2%	0.77

B8	400	308	1330,24	121,22	2%	0.77
B10	400	308	1301,32	151,54	2%	0.77
B12	400	308	1272,37	179,14	2%	0.77

III.4. Fabrication et mise en place :

Le malaxeur utilisé pour la fabrication des bétons est un malaxeur à un axe de rotation horizontal.

La séquence de malaxage retenue a été la suivante :

- malaxage à sec pendant 60 secondes des constituants granulaires (ciment, sable, addition),
- introduction de 70% de l'eau de gâchage
- introduction de l'adjuvant avec le reste de l'eau de gâchage et malaxage pendant 2 minutes.

La mise en place a été effectuée dans les différents moules destinés aux échantillons correspondants aux essais programmés. Les bétons destinés pour la résistance à la compression ont été mis en place par piquage à l'aide d'une tige en acier.

Une fois coulés, les échantillons ont été recouverts d'un film plastique pour éviter l'évaporation de l'eau. Le démoulage a été effectué à un jour.

III.4.1. Eprouvettes :

Les diverses formes d'échantillons coulées pour chaque formulation étaient les suivantes :

- 6 cylindres 16x32cm : pour la résistance mécanique en compression à 7 et 28 jours ;
- 6 prismes 4x4x16 : pour la résistance à la traction à 7 et 28 jours ;
- 6 prismes 7x7x28 cm équipés de plots : pour le retrait endogène et total ;
- 3 prismes 7x7x28 : pour l'essai d'absorption d'eau par capillarité ;

- 3 éprouvettes cubiques 15x15x15 : pour l'essai d'absorption d'eau par immersion.

III.4.2. Conservation :

Le béton est un matériau vivant dont les propriétés mécaniques évoluent au cours du temps en fonction de l'environnement dans lequel il est conservé.

Pour étudier l'effet de l'environnement (effet de cure) sur les propriétés mécaniques du béton de sable, deux séries de béton ont été fabriquées et conservées en deux milieux différents :

- Conservation dans l'eau ($20^{\circ}\text{C}\pm 2$; 100% HR) ;
- Conservation à l'air libre à l'intérieur du laboratoire ($20^{\circ}\text{C}\pm 2$; 65%HR).

III.5. Essais expérimentaux :

III.5.1. Essais à l'état frais :

Pour caractériser le comportement des bétons de sable à l'état frais, nous avons réalisé les essais suivants :

III.5.1.1. Affaissement (Slump test) :

Cet essai appelé encore, essai au cône d'Abrams (le plus employé et le plus connu universellement), sert à mesurer la fluidité des bétons après le gâchage, il consiste à :

- Remplir le cône en trois couches, tassées avec une tige d'acier pointue de 16 mm de diamètre à raison de 25 coups par couche ;
- Soulever le moule avec précaution et mesurer l'affaissement en cm.

III.5.1.2. Densité :

Cet essai est très simple et nécessite peu de moyens. Il suffit de remplir un volume connu et le peser. La masse volumique du béton est le rapport entre la masse du béton et son volume.

III.5.1.3. Teneur en air occlus :

Cet essai se fait à l'aide de l'aéromètre à béton. Dans notre cas nous avons utilisé un aéromètre à colonne d'eau d'une capacité de 5 litres.

L'appareil est constitué d'un réservoir de forme évasée dans lequel on compacte le béton. Le couvercle, muni d'un tube gradué et d'un manomètre, est fixé hermétiquement sur le réservoir.

De l'eau est introduite dans le tube jusqu'à un repère zéro. Une pression est ensuite appliquée à l'aide d'une petite pompe manuelle. Le pourcentage d'air total est lu directement sur le tube gradué.

III.5.2. Essais à l'état durci :

III.5.2.1. La résistance mécanique en compression uniaxiale :

L'essai de compression est l'essai le plus connu des essais mécaniques. Il s'effectue sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 16 cm et de hauteur 32 cm. La résistance à la rupture par compression est mesurée par compression axiale des éprouvettes.

La presse utilisée est d'une capacité maximale de 3000 kN, asservie en force. La résistance en compression a été évaluée avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s.

III.5.2.2. La résistance mécanique en traction par flexion 3 points :

Cet essai est établi à l'aide d'un dispositif à rouleau utilisé en flexion comportant deux appuis à rouleau sur lesquels repose l'éprouvette prismatique et un troisième rouleau équidistant des deux premiers, transmettant une charge concentrée.

L'appareil utilisé est d'une capacité maximale de 228,88 bars, asservis en contraintes. La résistance à la traction par flexion a été évaluée avec une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s.

III.5.2.3. Le retrait :

L'objectif de cet essai est de mesurer, en fonction du temps, la variation de longueur due aux effets de l'hydratation et de la dessiccation des matériaux cimentaires.

Cet essai est réalisé sur matériau durci grâce à un rétractomètre permettant de mesurer les variations de longueur d'échantillons placés dans une salle climatisée à $20 \pm 1\text{C}^\circ$ et à $70 \pm 5\%$ d'humidité relative, selon deux conditions :

- Avec échange hydrique du matériau avec l'ambiance : on obtient le retrait total,

- Sans échange hydrique avec l'ambiance en enveloppant les éprouvettes dans une (ou deux) feuille (s) de papier aluminium autocollant : on mesure le retrait endogène.

Les mesures sont faites dans l'axe des éprouvettes, entre deux plots métalliques noyés dans le béton au coulage.

L'étalonnage du rétractomètre est effectué à l'aide d'une tige étalon en Invar qui sert de référence de mesure.

L'expression du retrait se traduit par le rapport de la variation de longueur de l'éprouvette (ΔL) en fonction du temps.

Les formulations retenues pour étudier l'effet d'ajout de fine de marbre sur le retrait du béton de sable sont les formulations B0, B4, B8, B12.

Pour étudier l'effet du rapport E/C sur le retrait du béton de sable, On a choisi un taux de substitution du sable par les fines de marbre égale à 8%.

III.5.2.4. Essai d'absorption capillaire :

L'essai d'absorption capillaire est également intéressant et facile à effectuer. Il renseigne globalement sur la structure et sur l'importance du réseau capillaire. Il est utilisé aussi en complément d'autres essais pour caractériser la durabilité du béton.

L'essai d'absorption capillaire a été réalisé conformément au mode opératoire de la norme européenne NF EN 480-5, il consiste à déterminer le taux d'absorption par remontée capillaire due à la force de succion d'une éprouvette prismatique de béton posé à sa base sur des petits supports de telle manière que seul les 2 à 5 premiers millimètre du bas de l'éprouvette soient immergées.

On mesure alors l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps (jusqu'à 90 minutes). À chaque échéance, l'éprouvette prismatique (7x7x28 cm) séchée préalablement à l'étuve jusqu'à masse constante, est sortie du récipient, essuyée légèrement puis pesée et replacée dans le récipient en position verticale.

Les formulations retenues pour étudier l'absorption d'eau par capillarité sont les formulations B0, B4, B8, B12.

III.5.2.5. Essai d'absorption d'eau par immersion:

L'absorption se mesure habituellement en faisant sécher une éprouvette jusqu'à masse constante, en l'immergeant dans l'eau et en mesurant l'augmentation de masse exprimée en pourcentage de la masse sèche (Neville, 2000).

L'essai d'absorption par immersion a été effectué effectivement sur des éprouvettes cubiques (15x15x15cm) du béton séchés à l'étuve jusqu'à masse constante, ensuite en l'immergeant totalement dans l'eau pendant 24 heures (jusqu'à saturation du matériau). L'essai a pour but de déterminer la porosité du béton de sable à base de fines du marbre recyclées.

$$\text{Porosité} = \frac{M_a - M_s}{\gamma_w \times V} \times 100 (\%)$$

Avec :

- M_a : Masse de l'éprouvette saturée d'eau ;
- M_s : Masse sèche de l'éprouvette ;
- γ_w : Masse volumique de l'eau ;
- V : volume de l'éprouvette.

III.6. Conclusion :

Ce chapitre traite les différentes caractéristiques des matériaux utilisés pendant la démarche expérimentale. L'étude des caractéristiques des constituants de ce matériau, a montré que le sable utilisé est un sable propre et fin dont la majorité des particules ont des dimensions situées entre 0,315 et 0,63 (Nafa, 2007).

En conclusion sur la caractérisation des matériaux utilisés pour la confection des bétons, il ressort que le sable et le ciment étudiés présentent des caractéristiques qui en font des matériaux pouvant entrer dans la formulation d'un béton.

Les différentes formulations retenues des bétons de sable nous ont donné un rapport E/C élevé. Ceci s'est expliqué par la nature du sable utilisé qui est un sable fin a une grande surface spécifique et une demande en eau élevée (Chanvillard et Basuyaux, 1996).

Chapitre 4 : Comportement du béton de sable à base de fines de marbre recyclées

IV.1. Introduction :

Les résultats présentés dans ce chapitre touchent d'un côté aux propriétés du béton de sable à l'état frais, à savoir la maniabilité qui s'est caractérisée par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams, la densité, la teneur en air occlus et d'un autre côté les propriétés à l'état durci à savoir la résistance mécanique en compression et en traction (et ses évolutions dans le temps), les déformations différées, autrement dit le retrait du béton durci et l'absorption.

Ces résultats découlent d'essais expérimentaux réalisés sur les différentes formulations de béton décrites en détail au chapitre 3, Plusieurs de ces essais sont exécutés ponctuellement à des échéances bien précises, comme la résistance mécanique en compression et en traction, alors que d'autres, comme le retrait nécessitent un suivi dans le temps

IV.2. Propriétés du béton de sable à l'état frais :

IV.2.1. Maniabilité :

Les résultats obtenus lors de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams sont montrés dans le Tableau IV.1.

Tableau IV.1: Valeurs de l'affaissement au cône d'ABRAMS

	Taux de substitution						
	0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%
Affaissement							
au cône	11,95	16,05	17,03	18,7	19,25	22,9	23,3
d'ABRAMS							

La figure IV.1 montre l'évolution du comportement rhéologique caractérisé par la mesure d'affaissement au cône d'ABRAMS en fonction du dosage en fines de marbre. Le dosage de ces fines est exprimé en pourcentage par rapport au volume du sable. Il est varié de 0 à 179 kg/m³.

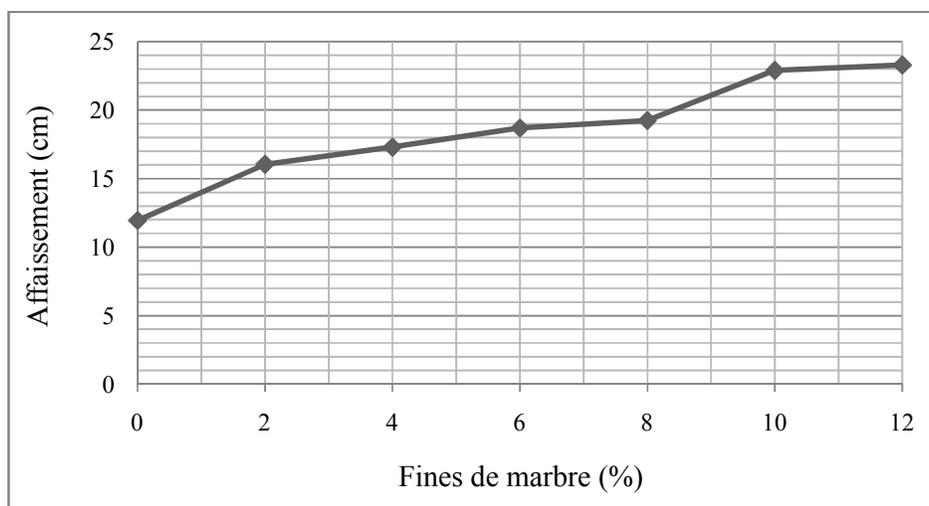


Fig IV.1: Influence de la substitution d'une partie de sable par les fines de marbre sur l'affaissement du béton de sable

On constate nettement que l'affaissement au cône d'ABRAMS augmente en augmentant le dosage en fines de marbre, un dosage de 12% de ces fines donne la plus grande valeur de l'affaissement. Cette augmentation est expliquée par la capacité plastifiante des fines qui

minimisent le frottement entre les grains du sable et confèrent au béton une cohésion qui assure l'homogénéité (absence de ségrégation) (Corinaldesi et al., 2010).

Ces constats concordent aussi avec les résultats trouvés par Bédirina (Bédirina et al., 2005) dans une étude expérimentale qui montre l'effet bénéfique des additions calcaire sur les propriétés du béton de sable.

D'après (Khayat et ollivier, 1996), la maniabilité du béton s'améliore sans augmenter le dosage en eau en optimisant le dosage en fines.

IV.2.2. La densité :

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau IV.2.

Tableau IV.2: Valeurs de la densité

	Taux de substitution						
	0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%
La densité	2,051	2,118	2,137	2,142	2,173	2,183	2,181

L'ajout de fines de marbre rend le béton de sable plus dense, ce qui est montré par la figure V.2. Plus le dosage en fines augmente, plus la densité du béton augmente jusqu'à une valeur optimale égale à environ 2,183 correspondant à un dosage en fines de marbre égale à 10%. Ces fines ont une masse volumique absolue supérieure à celle du sable et grâce à leur petite dimension pénètrent dans la porosité capillaire de l'empilement granulaire afin de diminuer le volume des vides qui se traduit par une augmentation de la densité du béton de sable.

Une fois les vides sont entièrement remplis, les fines commencent à occuper la place des grains de sable et par conséquent la densité du mélange diminue (diminution de la densité pour un dosage en marbre égale à 12%) (Bédirina et al., 2005).

On remarque aussi que malgré de son augmentation, la densité du béton de sable reste toujours inférieure à celle du béton ordinaire.

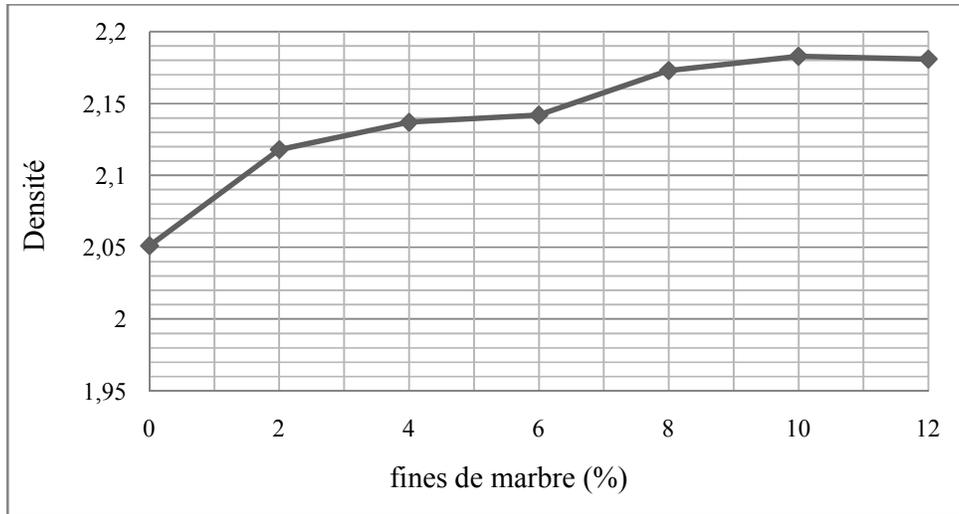


Fig IV.2: Influence de la substitution d'une partie de sable par les fines de marbre sur la densité du béton de sable

IV.2.3. La teneur en air occlus :

Le tableau IV.3 présente les valeurs de la teneur en air occlus.

Tableau IV.3: Valeurs de la teneur en air occlus

	Taux de substitution						
	0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%
Teneur en air occlus	5,1	4,9	4,8	4,8	1,8	1,7	1,7

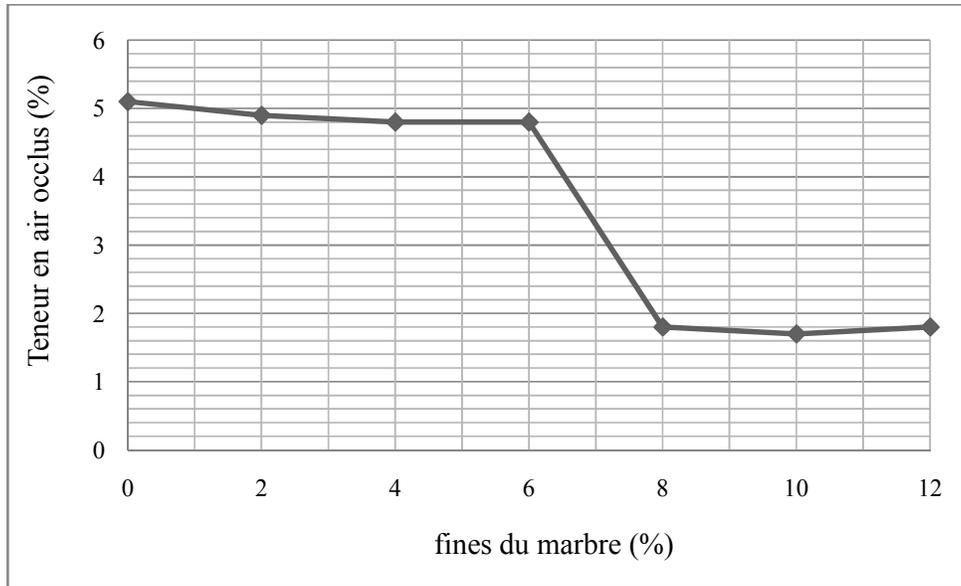


Figure IV.3: Influence de la substitution d'une partie de sable par les fines de marbre sur la teneur en air occlus du béton de sable

La figure IV.3 montre la variation de la teneur en air occlus en fonction du dosage en marbre. On remarque que la teneur en air occlus diminue légèrement lorsque le dosage en fines de marbre ne dépasse pas 6%, au-delà de cette valeur, la diminution devient considérable et la teneur en air occlus atteint des valeurs situées entre 1.7 et 1.8% qui sont comparable a celles du béton ordinaire. Le taux de diminution est égal à 64% pour un dosage en marbre égale à 10%.

On peut expliquer cette diminution par :

- L'effet filler que les fines du marbre jouent et qui conduit à la diminution de la porosité du mélange ;

- L'amélioration de la maniabilité du béton de sable par l'ajout des fines de marbre contribue à la diminution de la teneur en air occlus (figure IV.4). D'après (Khayat et ollivier, 1996), le volume d'air décroît de 40% lorsque la consistance passe de ferme à plastique et de 30% lorsque la consistance passe de plastique à très plastique.

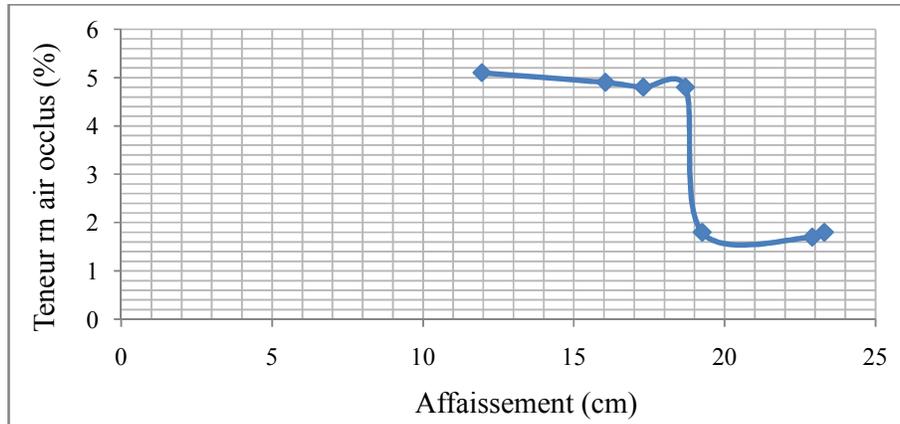


Fig IV.4: Influence de l'affaissement au cône d'ABRAMS sur la teneur en air occlus du béton de sable

IV.3. Propriétés du béton de sable à l'état durci :

IV.3.1. Résistance à la compression :

La résistance mécanique en compression est une caractéristique essentielle du matériau béton et l'un des paramètres fondamentaux de notre étude. Par conséquent, sa détermination et son évolution ont été suivies pour toutes les compositions de béton étudiées dans ce travail.

Pour chaque formulation, cette résistance mécanique a été calculée à différentes échéances par la moyenne des résistances d'une série de trois échantillons cylindriques 16x32 cm

Les valeurs des résistances mécaniques moyennes des différents bétons sont données dans le Tableau IV.4.

Tableau IV.4: Résistance à la compression

		B0	B2	B4	B6	B8	B10	B12
Résistance à la compression (MPa)	7 jours							
	A l'air libre	9,91	10,78	11,79	15,19	16,48	16,65	15,48
	A l'eau	10,808	12,07	12,235	16,311	16,799	16,073	16,57
	28 jours							
	A l'air libre	14,71	17	17,62	20,34	22,43	21,02	21,71
	A l'eau	15,55	17,29	19,53	21,14	23,26	24,941	22,8

IV.3.1.1. Influence de l'âge :

D'après la figure IV.5, on remarque que pour tous les bétons, la résistance à la compression augmente progressivement avec l'âge du béton. Ceci est expliqué par l'évolution de la réaction d'hydratation du ciment avec le temps en présence d'humidité suffisante. Durant les sept premiers jours, l'évolution de la résistance des bétons testés est beaucoup plus importante comparée à celle à long terme (le béton de sable atteint 70% de sa résistance finale dans les 7 premiers jours). Cela est expliqué par le fait que dès les premières heures de sa fabrication, le béton gagne davantage d'hydrates qui sont responsables de sa résistance à la compression (Bendjilali and Makhloufi, 2011, Benabed et al., 2005).

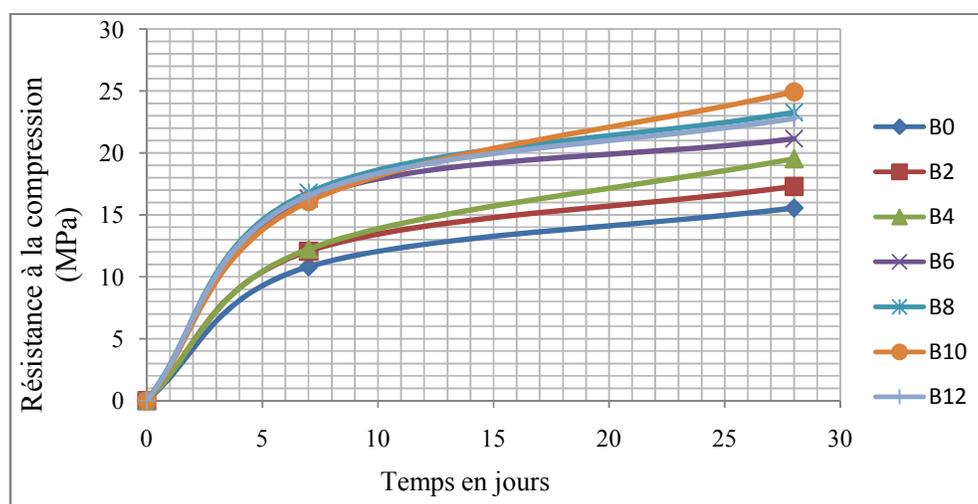


Figure IV.5: Evolution de la résistance mécanique en fonction du temps

IV.3.1.2. Influence d'ajout de fines du marbre :

Les figures IV.6 montrent l'évolution de la résistance mécanique à 7 et 28 jours en fonction du dosage en marbre.

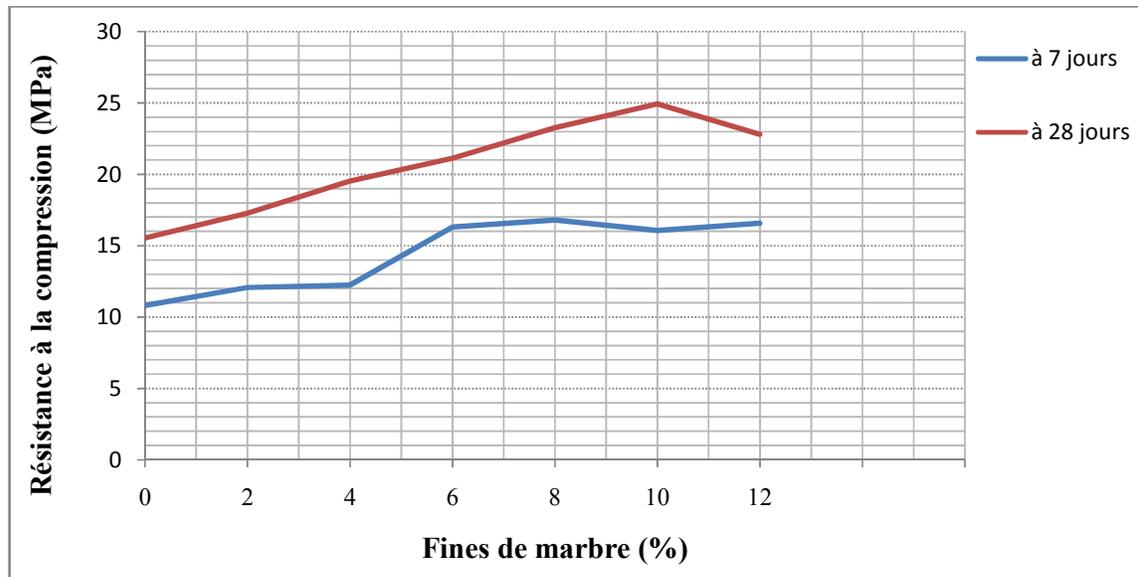


Figure IV.6: Influence de la substitution d'une partie du sable par les fines de marbre sur la résistance à la compression du béton de sable conservé dans l'eau

On remarque que la résistance à la compression augmente lorsqu'on augmente le dosage en fines de marbre. Un taux de substitution du sable de 10% fait augmenter la résistance à la compression de 48% à 7 jours et de 60% à 28 jours.

Ce gain de résistance est expliqué par :

- l'augmentation de la compacité du béton de sable due à l'ajout de fines de marbre, Ces fines et grasses à leur petite taille se glissent entre les grains du sable et augmentent ainsi la compacité et par conséquent la résistance (Baron, 1996) ;
- l'effet liant des fines du marbre qui se réagissent avec l'aluminate tricalcique du ciment, en donnant des carboaluminate de calcium qui ont par eux-mêmes une certaine capacité liante (De larrard, 1999, Baron, 1996, Hebhouh et al., 2014, Rai et al., 2011) ;
- l'accélération de la réaction d'hydratation due à la présence des fines du marbre de nature calcaire qui facilitent la production des silicates de calcium hydratés (De larrard, 1999, Ergün, 2011).

On remarque aussi qu'il ya une diminution de la résistance à la compression à 7 jours pour un dosage de 10% et à 28 jours pour un dosage de 12%. Cela peut être expliqué par l'effet de dispersion de l'empilement granulaire que les fines du marbre jouent.

IV.3.1.3. Influence du milieu de conservation (effet de cure) :

Les figures IV.7 et IV.8 montrent le taux de variation de la résistance du béton curé par rapport à la résistance du béton sans cure, respectivement pour l'âge 7 et 28 jours. Nous constatons que la cure par immersion dans l'eau est bénéfique pour la résistance à la compression des bétons testés. Pour un dosage en fines égal à 6%, la résistance à la compression a subi une augmentation de l'ordre de 7% à 7 jours et 4% à 28 jours.

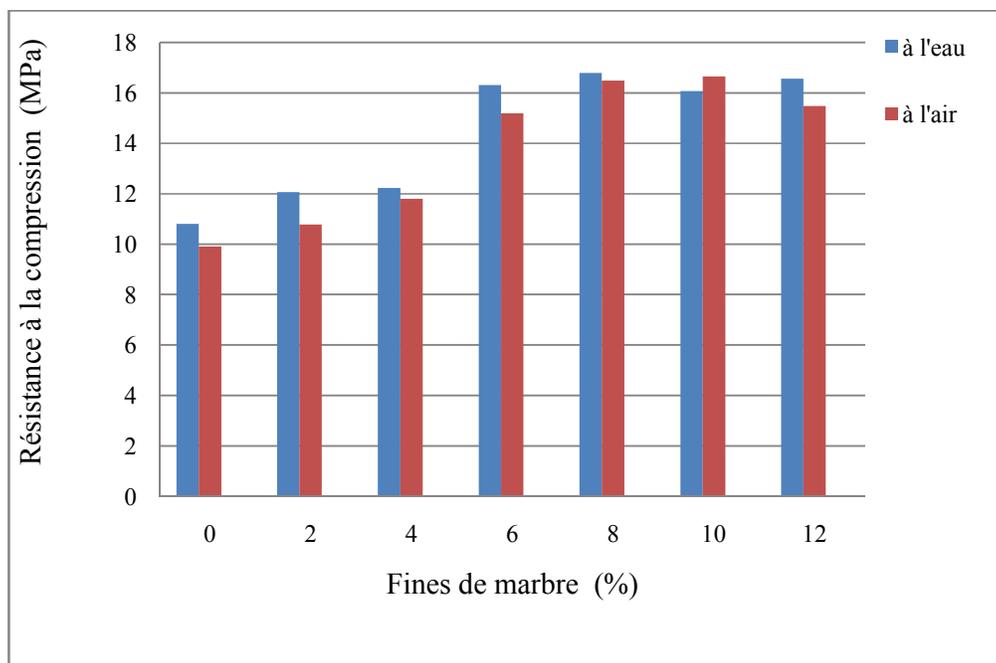


Figure IV.7: Influence de mode de cure sur la résistance à la compression à 7 jours du béton de sable .

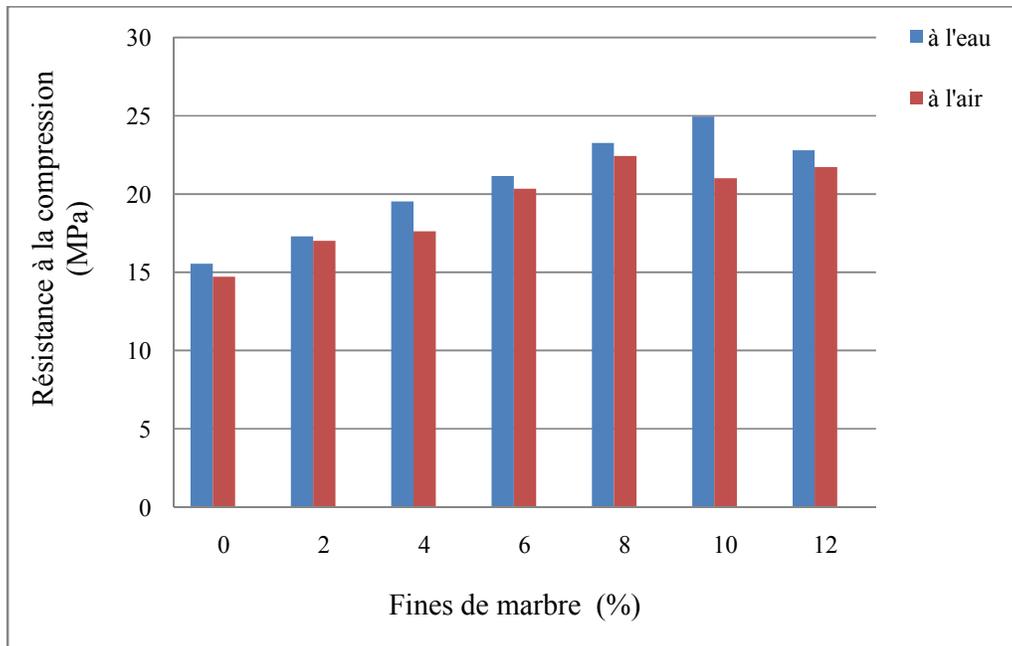


Figure IV.8: Influence de mode de cure sur la résistance à la compression à 28 jours du béton de sable.

La réduction de la résistance à la compression dans le cas des bétons curés à l'air libre est due à la dessiccation (l'appauvrissement en eau suite à son évaporation à l'air libre), qui entraîne un ralentissement de la cinétique d'hydratation, et engendrent des déformations nuisent la résistance mécanique du béton de sable.

Ces résultats se concordent avec les résultats trouvés par plusieurs auteurs (Aitcin et al., 1996, Safiuddin et al., 2007, Bendjillali and Makhloufi, 2011, Benabed et al., 2005), mais ils se contredisent avec d'autres résultats (Yurtdas, 2003, Burlion et al., 2005, Bartlett and MacGregor, 1994, Burlion, 2004).

IV.3.2. Résistance à la traction par flexion:

L'essai de traction par flexion est effectué en utilisant un dispositif de flexion 3 points. Trois éprouvettes sont testées pour chaque échéance d'âge. Les charges de rupture des éprouvettes obtenues sont rassemblées dans le tableau IV.5.

Tableau IV.5: Résistance à la traction par flexion

		B0	B2	B4	B6	B8	B10	B12
7 jours	A l'air libre	0,5	0,54	0,57	0,61	0,94	0,68	0,64

		A l'eau	0,6	0,67	0,72	0,7	0,74	0,79	0,68
Résistance à la traction (MPa)	28 jours	A l'air libre	0,57	0,71	0,79	0,73	0,77	0,86	0,68
		A l'eau	0,76	0,62	0,86	0,88	0,98	1,305	0,722

IV.3.2.1. Influence de l'âge :

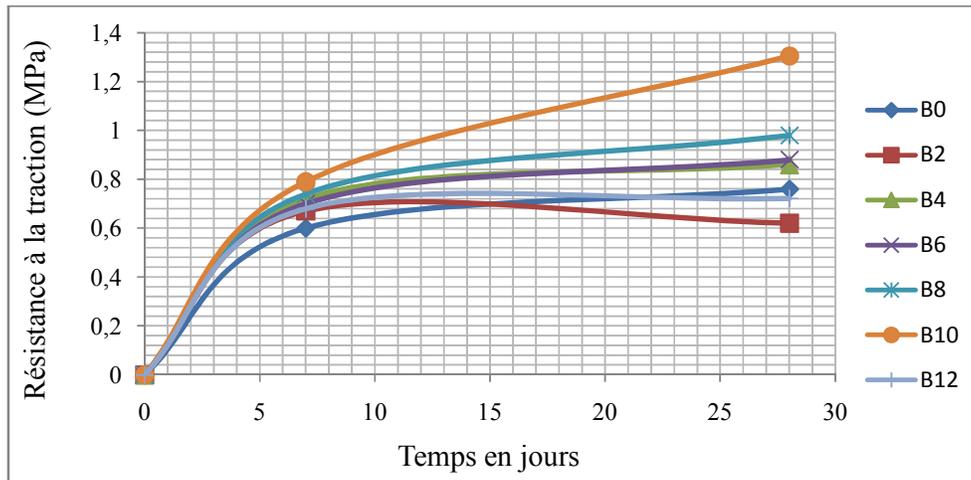


Figure IV.9: Evolution de la résistance à la traction en fonction du temps

Il est nettement clair selon la figure IV.9 que le gain de la résistance à la traction par flexion durant les sept premiers jours est très apprécié dans tous les bétons testés. Ce même comportement est observé dans la compression et qui est justifié par l'évolution rapide du phénomène d'hydratation et la précipitation élevée d'hydrates formées au jeune âge.

IV.3.2.2. Influence d'ajout de fines du marbre :

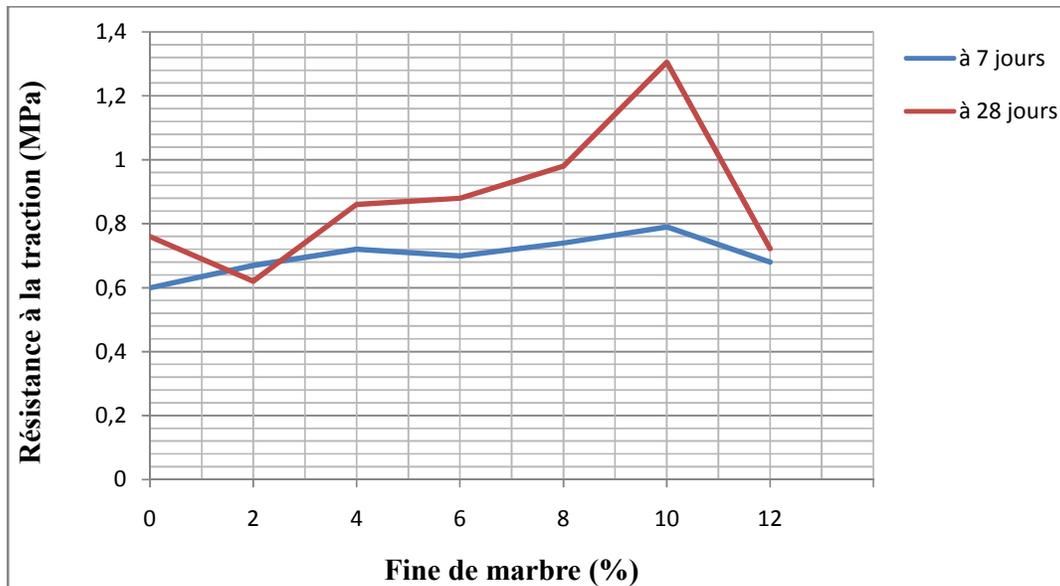


Figure IV.10: Influence de la substitution d'une partie du sable par les fines de marbre sur la résistance à la traction du béton de sable conservé dans l'eau

On remarque que la résistance à la traction augmente avec l'augmentation du dosage en fines de marbre (figure IV.10). Cette augmentation est due à l'amélioration de la compacité du mélange par l'ajout de fines qui remplissent les vides intergranulaires et qui ont certaine capacité liante.

On remarque qu'il ya une diminution de la résistance à la traction correspond à une substitution de 2%, cette diminution peut être expliquée par les imperfections liées à la méthode de confection des moules (l'homogénéisation de mélange) et la répartition non uniforme des contraintes de traction.

IV.3.2.3. Influence du milieu de conservation :

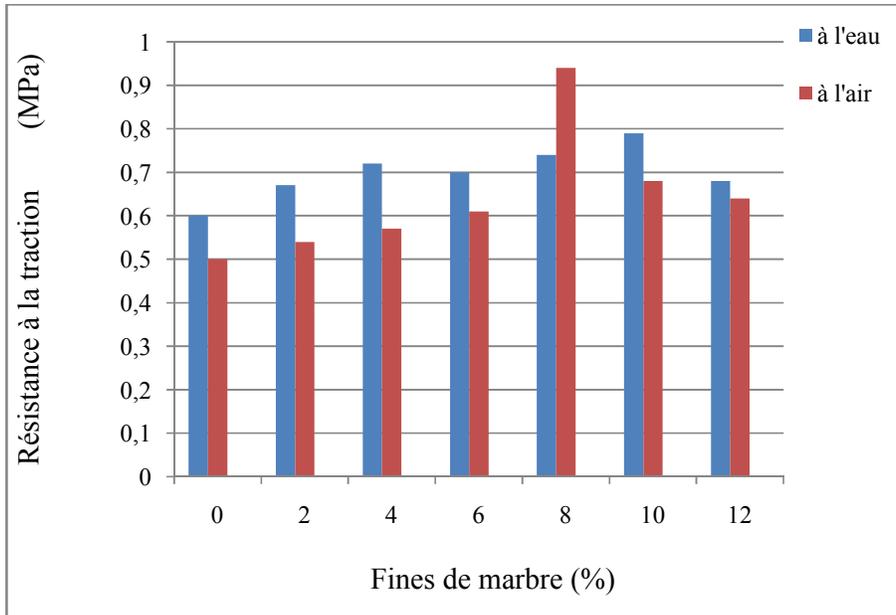


Figure IV.11: Influence de mode de cure sur la résistance à la traction à 7 jours du béton de sable à base de fines du marbre.

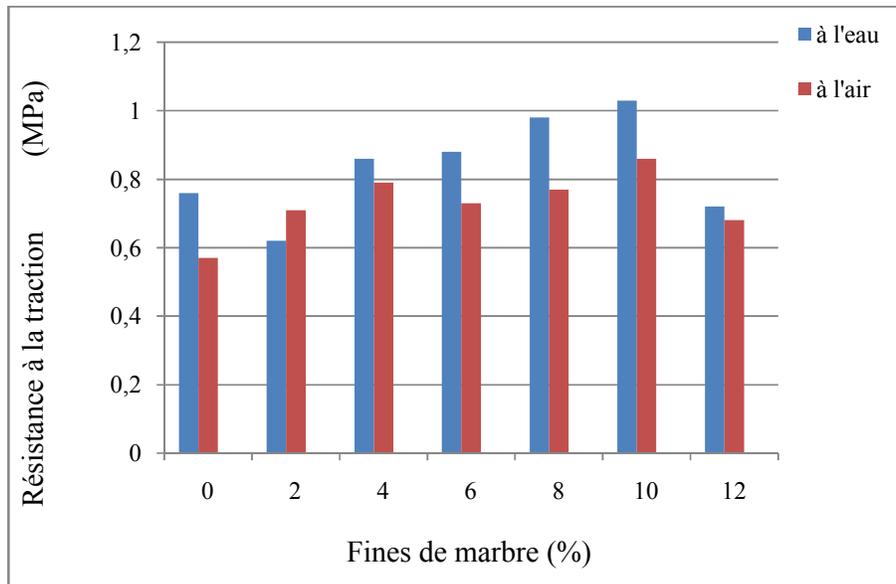


Figure IV.12: Influence de mode de cure sur la résistance à la traction à 28 jours du béton de sable à base de fines du marbre.

Les figures IV.11 et IV.12 montrent le taux de variation de la résistance à la flexion dans un béton recevant une cure par rapport à la résistance du même béton non curé respectivement pour l'âge 7 et 28 jours.

Comme dans le cas de la compression, l'effet du traitement de cure a un effet bénéfique sur la résistance à la traction. La réduction de la résistance à la traction est liée toujours au

phénomène de dessiccation qui engendre des déformations irréversibles nuisent les propriétés mécaniques du béton.

IV.3.3. Retrait :

L'étude du retrait des bétons consiste à analyser l'évolution des déformations de ces derniers au cours du temps lorsque il ne sont pas soumis à des forces extérieures.

Les résultats du retrait en fonction du temps sont présentés dans les tableaux IV.6 et IV.7, les valeurs indiquées correspondent à la moyenne des résultats obtenus sur trois éprouvettes différentes fabriquées à partir d'un même mélange

Tableau IV.6: Valeurs du retrait en fonction de taux de substitution

		Taux de substitution			
		0%	4%	8%	12%
Retrait endogène (μm)	7 jours	103	13	17	42
	14 jours	149	48	31	62
	28 jours	177	112	102	96
	90 jours	195	89	96	103
Retrait total (μm)	7 jours	118	120	39	49
	14 jours	234	157	84	91
	28 jours	241	266	181	162
	90 jours	273	281	180	179

Tableau IV.7: Valeurs du retrait en fonction de rapport E/C

		Rapport E/C		
		0,77	0,74	0,71
Retrait endogène (μm)	7 jours	17	44	85
	14 jours	31	62	109
	28 jours	102	85	103
	90 jours	96	101	147

	7 jours	39	80	96
Retrait total (μm)	14 jours	84	147	151
	28 jours	181	165	243
	90 jours	180	168	229

IV.3.3.1. Effet d'ajout de fines du marbre sur le retrait endogène du béton de sable :

Sur la figure IV.13 nous avons tracé les variations dimensionnelles des différents bétons de sable étudiés en fonction du temps.

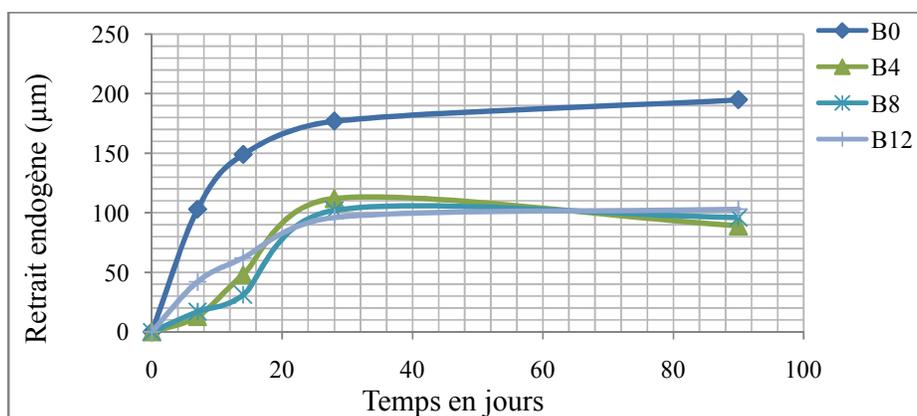


Figure IV.13: Valeurs du retrait endogène des bétons de sable étudiés en fonction du temps

Le retrait endogène résulte des déformations causées par les contraintes capillaires exercées par les ménisques d'eau dans les pores de la pâte de ciment.

D'après les résultats présentés sur la figure IV.13, nous constatons que les valeurs du retrait endogène diminuent en augmentant le dosage en fines de marbre, cette diminution est de l'ordre de 47% pour un dosage de 12% de fines. Ceci est expliqué par l'effet de nucléation ; l'incorporation de fines du marbre accélère la cinétique d'hydratation de ciment et l'augmentation de la résistance à la traction, qui a un rôle important dans la résistance contre les déformations causées par ce type de retrait (De larrard, 1999).

IV.3.3.2. Effet d'ajout de fines du marbre sur le retrait total du béton de sable :

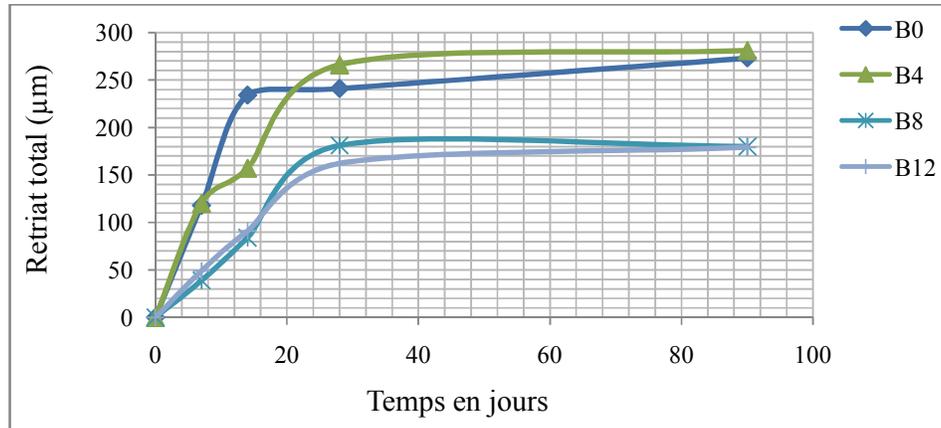


Figure IV.14: Valeurs du retrait total des bétons de sable étudiés en fonction du temps

Dans la figure IV.14 on remarque que le retrait total diminue avec l'augmentation du dosage en fines du marbre. Cette diminution est due à :

- l'effet de nucléation qui permet une augmentation rapide de la résistance à la traction ;
- l'augmentation de la compacité des mélanges qui se traduit par une baisse de transfert d'humidité entre le milieu intérieur (cœur du béton) et le milieu extérieur (Hadjouja et al., 2011).

IV.3.3.3. Effet de rapport E/C sur le retrait endogène du béton de sable :

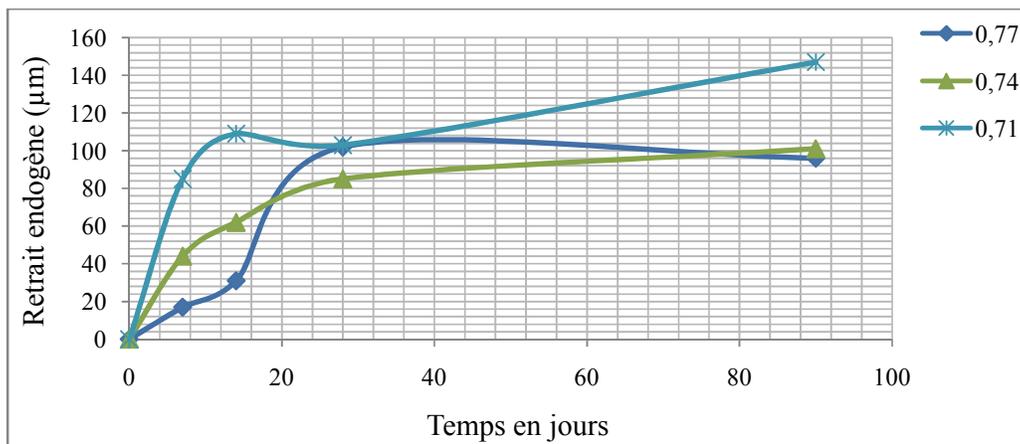


Figure IV.15: Valeurs du retrait endogène des bétons de sable étudiés en fonction du temps

On remarque sur la figure IV.15 qu'on atteint à 90 jours de retrait endogène des valeurs maximales correspondant au rapport E/C (0,71). Ceci est expliqué par la diminution de l'humidité interne du béton qui facilite la transition du matériau de l'état di-phasique (solide-eau) à l'état tri-phasique (solide- eau- air) et le développement des contraintes capillaire qui amorcent le processus de déformation (Benboudjema et al., 2005).

IV.3.3.4. Effet de rapport E/C sur le retrait total du béton de sable :

La figure IV.16 montre les variations des valeurs du retrait total des différents bétons étudiés en fonction du temps. On constate que la plus grande valeur obtenue correspond au rapport E/C (0,71). Ceci est expliqué toujours par la diminution de l'humidité interne et l'augmentation des valeurs du retrait endogène (De larrard et Acker, 1992).

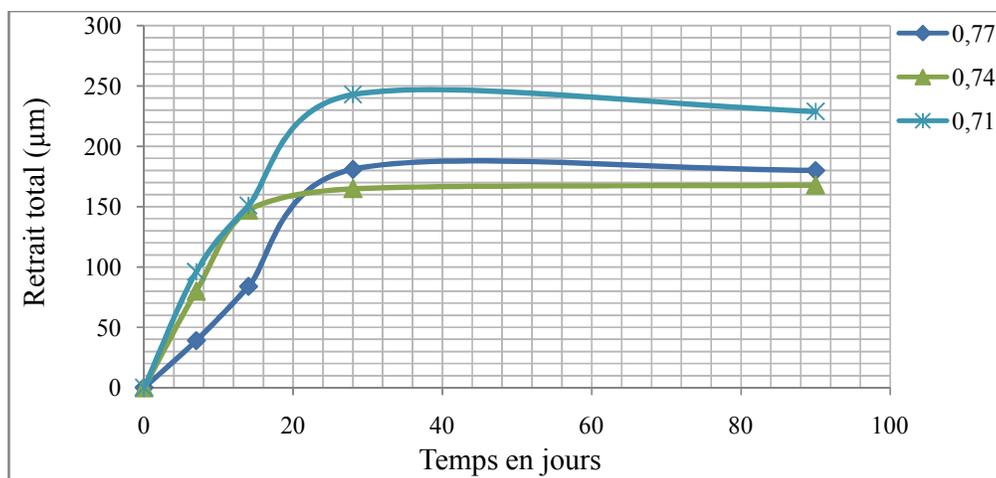


Figure IV.16: Valeurs du retrait endogène des bétons de sable étudiés en fonction du temps

IV.3.4. Essai d'absorption d'eau par capillarité :

L'essai est réalisé dans une durée de temps de 1heure et 30 minutes à 10 minutes d'intervalles. L'ensemble des résultats obtenus lors de cet essai sont rassemblés dans le tableau IV.8.

Tableau IV.8: Valeurs de l'absorption d'eau par capillarité

Temps (min)	Taux de substitution			
	0%	4%	8%	12%
10	18,33	16,66	15	15
20	26,66	23,33	20	20
30	28,33	25	21,60	25
40	31,66	30	25	25

50	35	35	26,66	28,33
60	36,66	35	30	30
70	38,33	38,33	30	31,66
80	41,66	38,33	31,66	33,33
90	41,66	40	31,66	35

La figure IV.17 montre l'évolution de l'absorption d'eau par capillarité des différents bétons de sable formulés en fonction du temps.

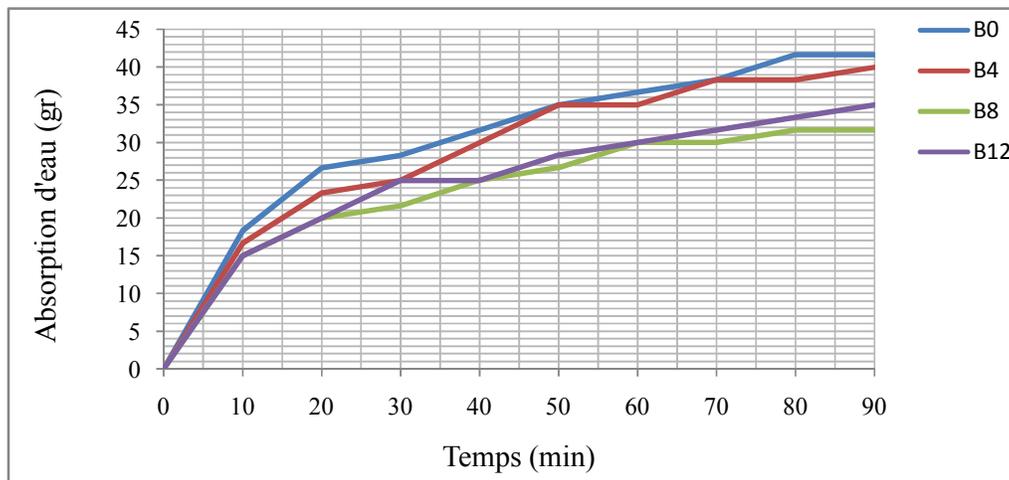


Figure IV.17: Valeurs de l'absorption d'eau par capillarité en fonction du temps

Il est nettement visible que l'absorption d'eau par capillarité diminue avec l'augmentation du dosage en fines du marbre, un dosage en fines de 8% diminue l'absorption du béton de sable de 24%. Cette diminution est sûrement due à l'augmentation de la compacité du béton de sable.

IV.3.5. Essai d'absorption d'eau par immersion :

Les résultats obtenus sur trois éprouvettes de chaque formulation du béton de sable sont exprimés en pourcentage sous la moyenne de trois valeurs mesurées. Ils sont donnés dans le tableau IV.9.

Tableau IV.9: Valeurs de la porosité

Béton	Porosité (%)
B0	19,33
B4	14,96
B8	17,18
B12	16,07

La figure IV.18 montre la variation de la porosité du béton de sable en fonction du dosage en fines du marbre.

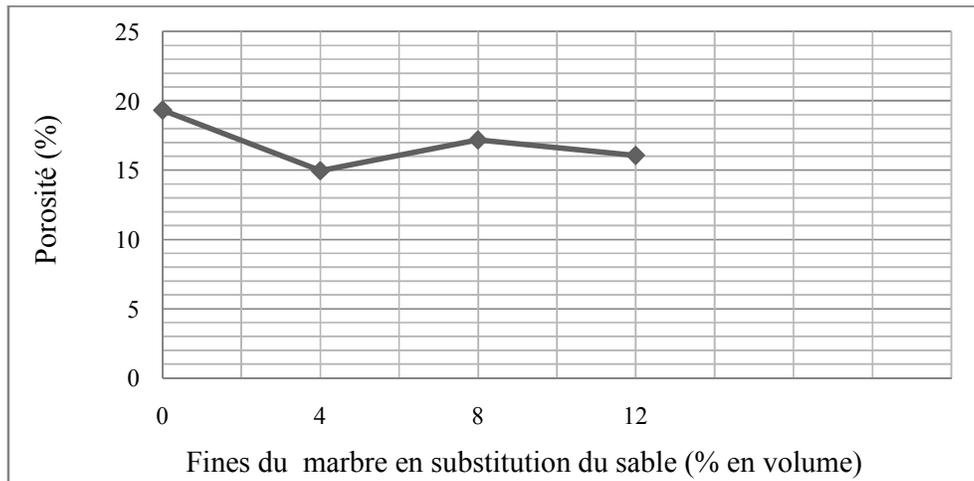


Figure IV.18: Valeurs de la porosité en fonction du dosage en fines du marbre

On constate que la porosité du béton de sable diminue lorsqu'on augmente le dosage en marbre. Cela confirme l'amélioration de la compacité du béton de sable par l'ajout de ces fines et l'effet filler que les fines du marbre jouent.

IV.4. Conclusion :

Ce chapitre renferme l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus lors des essais effectués sur les différents bétons de sable formulés. L'aboutissement à ces résultats, dont l'objectif est

de répondre sur la question si les fines de marbre utilisées dans cette étude, ont une influence favorable sur le comportement du composite; à cette question les résultats obtenus nous permet de statuer sur la contribution de ces derniers; en effet, les résultats montrent que l'introduction de ces fines dans la formulation du béton de sable améliore les propriétés de celui-ci.

L'étude des propriétés du béton de sable à base de fines de marbre recyclées à l'état frais et durci est analysée dans le but de donner des explications sur le comportement observé, ainsi que sur l'efficacité de ces fines dans l'amélioration de la résistance du composite. On se basant sur les résultats obtenus pour différents essais, nous avons conclu ce qui suit :

A' l'état frais :

- L'utilisation des fines de marbre améliore les propriétés du béton de sable grâce à leur rôle de remplissage. Elles confèrent au béton une cohésion et une homogénéité remarquable.

A' l'état durci :

- La résistance mécanique du béton de sable augmente de manière significative avec l'augmentation du dosage en fines de marbre ;

- L'immersion dans l'eau semble être le meilleur moyen de cure pour améliorer la résistance mécanique de tous les bétons de sable testés ;

- L'ajout de fines de marbre diminue les valeurs de retrait et réduit l'échange de l'humidité avec le milieu extérieur;

- L'ajout de fines de marbre rend le béton de sable moins absorbant et réduit la porosité de celui-ci ;

- Dans notre étude, le dosage optimal en fines de marbre est d'environ 10% correspondant à une résistance à la compression égale à 24.94 MPa.

Les résultats encourageants du point de vue mécaniques et rhéologique, nous permet de recommander l'incorporation de ces déchets dans la formulation du béton de sable afin de trouver une autre source d'approvisionnement en matériaux de construction et de préserver l'environnement.

Conclusion générale

Ce travail qui s'inscrit dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux de la région de Skikda a pour but d'étudier l'effet d'ajout de déchet de marbre sur les performances du béton de sable afin de valoriser ces déchets dans la confection du béton, et cela nous permet d'éliminer ces déchets par recyclage d'où protection de l'environnement et de trouver un autre source d'approvisionnement en matériaux de constructions.

Pour atteindre cet objectif, nous avons utilisé dans le cadre d'une valorisation, un sable de dune et les fines recyclées de déchets de marbre blanc provient de la carrière à bloc de Skikda.

Les données bibliographiques dont nous disposons au début de ce travail nous ont permis de définir les différentes propriétés du béton de sable. Il semble que celui-ci constitue une avancée pour la construction en béton et il offre en cela des avantages aussi bien d'ordre économique, technique qu'écologique. Leur développement permet de recentrer économiquement la consommation de granulats alluvionnaires en optimisant l'exploitation des gisements de sable. Ces qualités lui ouvrent de grandes possibilités d'utilisation dans la confection d'éléments de structures.

Nous avons pu constater aussi que le béton est souvent perçu comme un lieu potentiel pour l'utilisation des déchets en raison de sa nature composite et parce qu'il est largement utilisé. Ce qui signifie que si un déchet peut être utilisé dans le béton, alors certainement de grandes quantités de celui-ci peuvent être recyclées.

Pour la démarche expérimentale adoptée, nous avons commencé par définir les formulations des béton de sable, à partir de matériaux identiques en substituant partiellement un volume de sable par les fines de déchets de marbre et en gardant un rapport E/C fixe. Ces formulations qui sont caractérisées par un volume d'eau important et un dosage en superplastifiant élevé ont ensuite été étudiées à l'état frais et durci.

Nos premiers essais à l'état frais ont montré l'effet bénéfique de ces fines de marbre sur le comportement rhéologique du béton de sable. En effet, l'utilisation des fines de marbre améliore considérablement la maniabilité du béton de sable et lui donne une adhérence et une cohésion qui permettent d'éviter le phénomène de ségrégation. L'ajout de fines du marbre rend aussi le béton de sable plus dense, cependant les valeurs de sa densité restent inférieures à celles du béton ordinaire. L'amélioration de la maniabilité du béton de sable par l'ajout de fines du marbre est accompagnée par une diminution des valeurs de la teneur en air occlus, et on peut dire que pour un dosage en fines du marbre optimal, la valeur de la teneur en air occlus du béton de sable est comparable à celle du béton ordinaire.

Nous avons aussi évalué les effets de l'incorporation des fines de marbre dans la formulation du béton de sable sur leurs propriétés mécaniques. Dans tous les cas, par rapport aux résultats obtenus sur des éprouvettes, nous avons observé une augmentation des résistances mécaniques avec l'augmentation de la proportion des fines recyclées jusqu'à un dosage optimal égale à 10% environ. Nous avons observé aussi que la conservation des éprouvettes dans l'eau a permis dans la majorité des cas d'obtenir un certain gain de résistance (allant de 4 à 18%)

Concernant le retrait, nous avons constaté que l'incorporation des fines de marbre diminue celui-ci et abaisse le transfert de l'humidité au milieu extérieur. Cette diminution dépend du dosage en fines de marbre.

De point de vue durabilité de ce matériau composite, nous avons remarqué que l'ajout de ces fines diminue effectivement sa porosité et réduit son aptitude à absorber l'eau

Perspectives :

En perspective de ce travail, il est important de compléter cette étude par :

- L'analyse du comportement de ces bétons vis-à-vis du fluage ;
- La durabilité de ces bétons de sable à base de fines du marbre recyclées est à analyser comme la résistance au gel/dégel, la carbonatation, le coefficient de diffusion des ions chlorure et les attaques sulfatiques ;
- Etude économique comparative (étude de prix) entre les bétons de sable à base de ces fines recyclées et les bétons ordinaire couramment utilisés.

Références

- Aitcin, P.C., Baron, J. et Bournazel, J.P. (1996). Viser une résistance à la compression. In *Les bétons bases et données pour leur formulation* (edited by J. Baron and J. P. Ollivier), pp 277-305. Edition Eyrolles, Paris.
- Akbulut, H. et Gürer, C. (2007). Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements. *Building and Environment*, **42**, 21–1930.
- Amadou, G. (1996). Détermination de la teneur en eau optimale dans l'optique d'un béton de sable routier compacté. Mémoire d'ingénieur, Université Cheikh Anta Diop, Sénégal.
- Aliabdo, A.A., Abd Elmoaty, A.E.M. et Auda, E.M.Auda. (2014). Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. *Construction and Building Materials*, **50**, 28-41.
- Aruntas, H.Y., Guru, M., Dayi, M. et Tekin, I. (2010). Utilization of waste marble dust as an additive in cement production. *Materials and Design*, **31**(8), 4039- 4042.
- Ayachi, A.M. (2011). Etude des propriétés mécaniques du béton de sable de dunes. Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah d'Ouargla, Algérie.
- Bacarji, E., Toledo Filho, R.D., Koenders, E.A.B, Figueiredo, E.P. et Lopes, J.L.M.P. (2013). Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers. *Construction and Building Materials*, **45**, 1-10.

- Barkat, A. (2006). Valorisations des déchets de brique dans la réalisation des ouvrages en béton. Mémoire de magister, Université Kasdi Merbah d'Ouargla, Algérie.
- Baron, J. (1996). Les additions normalisées pour les bétons. In *Les bétons bases et données pour leur formulation* (edited by J. Baron and J. P. Ollivier), pp 47-57. Edition Eyrolles, Paris.
- Bartlett, F. M. et MacGregor, J. G. (1994). Effect of moisture condition on concrete core strengths, *ACI Materials Journal*, **91**, 227-236.
- Batata, A et Merouani, Z. Le béton de sable de dune: sa formulation et ses propriétés, Séminaire organisé par CNERIB, Biskra, Décembre 1991. Cité dans (Belferrag, 2006).
- Bederina, M., Gotteicha, M., Belhadj, B., Dheily, R.M., Khenfer, M.M. et Queneudec, M. (2012). Drying shrinkage studies of wood sand concrete – Effect of different wood treatments. *Construction and Building Materials*, **36**, 1066-1075.
- Bederina, M., Laidoudi, B., Goullieux, A., Khenfer, M.M., Bali, A. et Quéneudec, M. (2009). Effect of the treatment of wood shavings on the physico-mechanical characteristics of wood sand concretes. *Construction and Building Materials*, **23**, 1311-1315.
- Bederina, M., Makhloufi, Z. et Quéneudec, M. Allègement des bétons de sables locaux par l'ajout de copeaux de bois traités et non traités : caractérisation physico-mécanique et microstructure. 1st International conference on sustainable built environment infrastructures in developing countries, Oran, 12 au 14 Octobre 2009, 08 pages.
- Bederina, M., Marmoret, L., Mezreb, K., Khenfer, M.M., Bali, A. et Quéneudec, M. (2007). Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: Experimental study and modeling. *Construction and Building Materials*, **21**, 662-668.
- Bederina, M., Khenfer, M.M., Dheilly, R.M. et Queneudec, M. (2005). Reuse of local sand: effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concretes. *Construction and Building Materials*, **35**(6), 1172-1179.
- Belferrag, A. (2006). Valorisation des fibres métalliques issues des déchets pneumatiques dans les bétons de sable de dunes. Mémoire de magister, Université Kasdi Merbah d'Ouargla, Algérie.
- Bella, I.A., Asroun, A. et Bella, N. Influence des ajouts de type addition calcaire sur les caractéristiques mécaniques du béton de sable. 2^{ème} Séminaire international d'innovation et valorisation en génie civil et matériaux de construction, Rabat, 23 et 24 Mai 2011, 12 pages.
- Benabed, B., Azzouz, L. et Damene, Z. Comportement mécanique et durabilité des mortiers à base de sable de dune. Colloque CMEDIMAT, Oran, 06 et 07 Décembre 2005, 08 pages.
- Benaissa, A. (1992). Déformation différées d'un béton de sable. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, France. Cité dans (Belferrag, 2006).
- Benaissa, A. (1993). Microstructure du béton de sable. *Cement and Concrete Research*, **23**, 663-674.

Benaïssa, A., Kamen, A., Chouïcha, K. et Malab, S. Panneau sandwich au béton de sable projeté. 1st International conference on sustainable built environment infrastructures in developing countries, Oran, 12 au 14 Octobre 2009, 08 pages.

Benboudjema, F., Meftah, F., Heinfling, G., Lemaou, F. et Torrenti, J.M. (2005). Effets différés – Fluage et retrait. In *Comportement mécanique du béton* (edited by J.M. Reynouard and P.C. Gilles), 295- 361. Edition Hermès-Science, Paris.

Bendjillali, K. et Makhloufi, Z. Etude de l'effet de la nature des granulats sur le comportement mécanique du béton en zones chaudes et arides «Contribution de la cure». 2^{ème} Séminaire international d'innovation et valorisation en génie civil et matériaux de construction, Rabat, 23 et 24 Mai 2011, 06 pages.

Benkali, S. (2007). Caractérisation expérimentale des bétons autoplaçants obtenus par ajout de déchets de construction. Mémoire de magister, Université Mammeri Mouloud de Tizi-Ouzou, Algérie.

Benmalek, M.L. (1992). Contribution à l'étude des bétons de sables dunaires pour éléments de structures. Mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine, Algérie. Cité dans (Belferrag, 2006).

Binici, H., Kaplan, H. et Yilmaz, S. (2007). Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete. *Scientific Research and Essay*, **2**(9), 372-379.

Bilgin, N., Yeprem, H.A., Arslan, S., Bilgin, A., Günay, E. et Marsoglu, M. (2012). Use of waste marble powder in brick industry. *Construction and Building Materials*, **29**, 449-457.

Binici, H., Shah, T., Aksogan, O. et Kaplan, H. (2008) Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates. *Journal of Materials Processing Technology*, **208**, 299-308.

Bouchouïka, A. et Ooudjit, M.N. Influence du sable de dune finement broyé sur les propriétés physico-chimique et mécanique du béton. 1st International conference on sustainable built environment infrastructures in developing countries, Oran, 12 au 14 Octobre 2009, 08 pages.

Boulaares, S. (2009). Comportement d'éléments structuraux en béton de sable armé. Mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine, Algérie.

Brue, F. (2009). Rôles de la température et de la composition sur le couplage thermo-hydro-mécanique des bétons. Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, France.

Burlion, N. (2004). Quelques résultats sur le couplage séchage – comportement mécanique des matériaux cimentaires. Mémoire pour l'habilitation à diriger des recherches, Université de Lille, France.

Burlion, N., Bourgeois, F. et Shao, J.F. (2005). Effects of desiccation on mechanical behavior of concrete. *Cement and Concrete Composites*, **27**, 367-379.

Chaid, R., Jauberthie, R., Abadlia, M.T. et Talah, A. Effet des déchets de marbre sur la durabilité des bétons en milieu marin, XXIX^e rencontres universitaires de génie civil, Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011, 10 pages.

Chanvillard, G. et Basuyaux, O. (1996). Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, France. Cité dans (Ayachi, 2011).

Chaouach, A.A. (1993). Etude des caractéristiques du béton de sable de dunes. Mémoire de magister, Ecole National Polytechnique (ENP), Algérie. Cité dans (Ayachi, 2011).

Chauvin, J. J. (1987). Les sables ; guide pratique d'utilisation routière, I.S.T.E.D, Paris, France. Cité dans (Ayachi, 2011).

Chauvin, J.J. et Grimaldi, G. (1988) Les bétons de sable. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, France. Cité dans (Belferrag, 2006).

Corinaldesi, V., Giacomo, M. et Tarun, R. N. (2010). Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, **24**(1), 113-117.

C.E.B.T.P. (1986). Synthèse de connaissance sur le béton de sable. LRPC de Bordeaux, France. Cité dans (Belferrag, 2006).

De Larrard, F. (1999), Structures granulaires et formulation des bétons. *Modern Concrete Technology*, Londres.

De larrard, F. et Acker, P. (1992). Déformations libres des BHP. In *Les bétons à hautes performances : Caractérisation, durabilité, applications* (edited by Malier), pp 157-164. Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, France.

Diagne, M.B. (1996). Mis en évidence d'un optimum en fines dans les sables fillérisés. Mémoire d'ingénieur, Université Cheikh Anta Diop, Sénégal.

Dreux, G. et Festa, J. (1998). Nouveau guide du béton et ses constituants. Edition Eyrolles, Paris.

El Euch Khay, S., Neji, J. et Loulizi, A. (2010). Shrinkage properties of compacted sand concrete used in pavements. *Construction and Building Materials*, **24**, 1790-1795.

Eric, F. et Stephane, F. (2002). Le béton de sable appliqué aux chaussées routières. *Infrastructure, Crein*, Vol.9, Montréal, Canada. Cité dans (Belferrag, 2006).

Ergün, A. (2011). Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, **25**, 806-812.

Gameiro, F., De Brito, V. et Correia da Silva, D. (2014). Durability performance of structural concrete containing fine aggregates from waste generated by marble quarrying industry. *Engineering Structures*, **59**, 654-662.

- Gotteicha, M. (2005). Caractérisation des bétons de sable à base de copeaux de bois traités, Mémoire de Magister, université Amar Têlidji de Laghaout, Algérie. Cité dans (Belferrag, 2006).
- Guinez, R., Gluais, G. et Delude, P. (1984). Les bétons de sable. Ministre de l'urbanisation et du logement, laboratoires régionaux de Blois et de Bordeaux, France. Cité dans (Ayachi, 2011).
- Hadjouja, M. et Madani, B. Influence des fillers des déchets de briques sur la durabilité à l'eau du béton de sable de dune. Colloque CMEDIMAT, **Lieu**, 06 et 07 Décembre 2005, 10 pages.
- Hadjoudja, M., Mesbah, H.A. et Khenfer, M.M. Influence de l'ajout de fibres métalliques sur le retrait des bétons de sable de dune. XXIX^e rencontres universitaires de génie civil, Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011, 10 pages.
- Hameed, A. H. (2009). The effect of curing condition on compressive strength in high strength concrete. Diyala Journal of Engineering Sciences, 02 , 35-48.
- Hayri, U.N. et Bulent, B. (2011). The effect of curing temperature and relative humidity on the strength development of portland cement mortar. Scientific Research and Essays, **6**(12), 2504-2511.
- Hebhoub, H., Aoun, H., Belachia, M., Houari, H. et Ghorbel, E. (2010), Use of waste marble aggregates in concrete. Construction and Building Materials, **25**, 1167-1171.
- Hebhoub, H., Belachia, M. et Djebien, R. (2014). Introduction of sand marble wastes in the composition of mortar. Structure Engineering and Mechanics, **49**(4), 491-498.
- IDRRIM. (2011). Classification et aide au choix des matériaux granulaires recyclés pour leurs usages routiers hors agrégats d'enrobés, Institut des routes, des rues et des infrastructures pour la mobilité, France.
- Jean Paul, B. et Pirre, B. (1995). Etude expérimentale de pieux en béton de sable forés à la tarière continue et armé après bétonnage. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, France. Cité dans (Belferrag, 2006).
- Karasahin, M. et Terzi, S. (2007). Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete. Construction and Building Materials, **21**, 616-620.
- Kedjour, N.E. (2005). Le laboratoire du béton. Edition OPU, Algérie.
- Khady, N. (1993). Optimisation des formulations des bétons de sable. Mémoire d'ingénieur, Université Cheikh Anta Diop, Sénégal.
- Khatib, J.M. (2005). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. Cement and Concrete Research, **35**, 763-769.

- Khayat, K. et Ollivier, J.P. (1996). Viser une consistance adaptée aux moyens de mis en œuvre. In *Les bétons bases et données pour leur formulation* (edited by J. Baron and J. P. Ollivier), pp 187-221. Edition Eyrolles, Paris.
- Kim, J. K., Lee, C.S., Park, C.K. et Eo, S.H. (1997). The fracture characteristics of crushed limestone sand concrete. *Cement and Concrete Research*, 27, 1719-1729.
- Ltifi, M., Benjamaa, N., Belhadjali, N. et Akrouf, K. Etude comparative des bétons hydrauliques à base de sable siliceux et sable calcaire de concassage. Colloque CMEDIMAT, Oran, 06 et 07 Décembre 2005, 09 pages.
- Maillard, J.L. (1997). Evaluation de l'aptitude à l'emploi des sables de fonderie. Publication technique n°118 – CERIB, France. Cité dans (Serifou, 2013)
- Nafa, Z. (2007). Elements de matériaux de construction et essais. Agence de publication universitaire de Guelma, Algeria.
- Neville, A. (2000). Propriétés des bétons. Edition Eyrolles, Paris.
- Norme Européenne NF EN 12620. (2003). Granulats pour béton. Edition AFNOR, Paris.
- Norme Européenne NF EN 480-5. (1996). Adjuvants pour béton, mortier et coulis-Méthodes d'essai-Partie 5 : Détermination de l'absorption capillaire. Edition AFNOR, Paris.
- Norme Française P18-423. (1983). Béton ; mis en place par piquage. Edition AFNOR, Paris.
- Norme Française P18-427. (1996). Béton ; Détermination des variations dimensionnelles entre deux faces opposées d'éprouvettes de béton durci. Edition AFNOR, Paris.
- Norme Française P18-433. (2001). Essai pour béton durci ; Résistance à la flexion sur éprouvettes. Edition AFNOR, Paris.
- Norme Française P18-440. (1999). Essais pour béton frais ; Masse volumique. Edition AFNOR, Paris.
- Norme Française P18-443. (2001). Essais pour béton frais ; Teneur en air. Edition AFNOR, Paris.
- Norme Française P18-451. (1983). Béton ; Essai d'affaissement. Edition AFNOR, Paris.
- Norme Française P18-455. (2003). Essais pour béton durci ; Résistance à la compression des éprouvettes. Edition AFNOR, Paris.
- Norme Française P18-500. (1995). Béton ; Béton de sable. Edition AFNOR, Paris.
- Patel, N., Raval, A. et Pitroda, J. (2013). Marble waste: opportunities for development of low cost concrete. *Global research analysis*, 2(2), 94-96.

- Pereira, P., Evangelista, L. et De Brito, J. (2012). The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, **28**, 722-729.
- Rai, B., Naushad, H.K., Abhishek, Kr., Rushad, S.T. et Duggal, S.K. (2011). Influence of marble powder /granules in concrete mix. *International journal of civil and structural engineering*, **1**(4), 827-834.
- Ramachandran, V-S. (1981). Utilisation des déchets et sous-produits comme granulats du béton, CBD-215-F, conseil national de recherches, Canada. Cité dans (Saadani, 2006).
- Raphaël, B. (2003). Substitution des granulats alluvionnaires dans l'industrie du béton par les granulats marins, concassés ou recyclés. CERIB, Réf.DDE 27, France.
- Reynouard, J.M. et Gilles, P.C. (2005). *Comportement Mécanique du Béton*. Edition Hermès-Science, Paris, France.
- Saadani, S. (2006). *Comportement des bétons à base de granulats recyclés*. Mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine, Algérie.
- Sablocrete. (1994). *Béton de sable, caractéristiques et pratiques d'utilisation*. Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, France. Cité dans (Diagne, 1996)
- Saboya, F., Xavier, G.C. et Alexandre, J. (2007). The use of the powder marble by-product to enhance the properties of brick ceramic. *Construction and Building Materials*, **21**, 1950-1960.
- Safiuddin, Md., Raman. S.N. et Zain, M.F.M. (2007). Effect of different curing methods on the properties of microsilica concrete. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, **1**(2), 87-95.
- Sall, M. et Tkatchenko, G.A. Régulation des propriétés du béton de sable pour revêtement routier à l'aide d'additifs de composants poreux. 1st International conference on sustainable built environment infrastructures in developing countries, Oran, 12 au 14 Octobre 2009, 08 pages.
- SERIFOU, M. (2013). *Béton à base de recyclats : influence du type de recyclats et rôle de la formulation*. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, France.
- Shelke, V.M., Pawde, P.Y. et Shrivastava, R.R. (2012). Effect of marble powder with and without silica fume on mechanical properties of concrete. *Mechanical and Civil Engineering*, **1**, 40-45.
- Shirule, P.A., Rahman, A. et Gupta, R.D. (2012). Partial replacement of cement with marble dust powder. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, **1**, 175-177.
- Shkelzen, B. (2010). *Évaluation du potentiel de la séquestration minérale du CO₂ par des résidus et sous-produits industriels à pouvoir alcalin*. Mémoire pour l'obtention de la Maîtrise en génie de l'environnement, Université du Québec, Canada.

Thai-Hoa, V. (2009). Caractérisation de la phase solide et transferts de gaz dans les milieux poreux insaturés. Etude expérimentale et modélisation appliquées à la diffusion de l'hydrogène dans les matériaux cimentaires, Thèse de doctorat, Université de toulouse, France.

Vaidevi, C. (2013). Study on marble dust as partial replacement of cement in concrete. *Construction and Building Materials*, **4**(9), 14-16.

Yang, J., Du, Q. et Bao, Y. (2011). Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks. *Construction and Building Materials*, **25**, 1935-1945.

Yurtdas, I. (2003). Couplage comportement mécanique et dessiccation des matériaux à matrice cimentaire: étude expérimentale sur mortiers. Thèse de doctorat. Université des Sciences et Technologie de Lille, France.

Zri, A., Abriak, N.E. et Benzerzour, M. Etude de formulations d'un béton de sable à base de sable de dragage. Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime, Hammamet, 2 au 4 décembre 2009, 04 pages.

Zri, A., Abriak, N.E., Benzerzour, M. et Boudraa, S.E. Valorisation des sédiments dans le béton de sable à base du sable de dragage. 1st International conference on sustainable built environment infrastructures in developing countries, Oran, 12 au 14 Octobre 2009, 08 pages.

Annexe 1 : Analyse granulométrique du sable



UNITÉ : SKIKDA

Structure : Dépt. Laboratoire

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE PAR TAMISAGE
 Selon NF P 18-560 Septembre 1990

Matériel vérifié [

Dossier N°:	Client:	BC:	DU:
Matériaux : <i>Sable de Dame</i>	Provenance : <i>Sable QUAD ZHAR.</i>		

Échantillon pour teneur en eau				Échantillon pour Analyse granulométrique (Pesées avec récipients tarés)			
Tare N°	.....			Mh =	gr		
M _{ih} + Tare =	.....	gr		Avec lavage au tamis d	80 μm		
M _{is} + Tare =	.....	gr	1 ^{ère} pesée	M _{s1} =	.....	gr	1 ^{ère} pesée
M _{is} + Tare =	.....	gr	2 ^{ème} pesée	M _{s1} =	.....	gr	2 ^{ème} pesée
M _{is} + Tare =	.....	gr	3 ^{ème} pesée	M _{s1} =	.....	gr	3 ^{ème} pesée
Poids tare =	.....	gr					
M _{ih} =	.....	gr		Masse totale sèche calculée	$M_s = M_h \times \frac{M_{s1}}{M_n} = 1.200$	gr	
M _{is} =	.....	gr					
Wnat = $\frac{M_{ih} - M_{is}}{M_{is}} \times 100 =$	.....	%				

Tamis	Retenu cumulé (gr)	Retenu cumulé (%)	Passant (%)	Tamis	Retenu cumulé (gr)	Retenu cumulé (%)	Passant (%)
Ouverture (mm)				Ouverture (mm)			
80				8			
63				6,3			
50				5			
40				4			
31,5				2,50	0,68	0,04	99,93
25				1,25	2,12	0,16	99,83
20				0,63	35,92	2,96	97,60
16				0,315	1348,52	89,90	10,09
14				0,16	1496,86	99,10	0,90
12,5				0,08	1492,70	99,57	0,48
10				Fond de Tamis	7,3		

Observations : - DA = t/m3 - P.S = t/m3 - IM = % $H_f = 1,92$

M (en Kg) > 0.2 D (en mm)
 Refus maxi admissible sur chaque tamis : 100 gr si d < 1 mm ; 200 gr si 1 < d < 4 mm ; 700 gr si d > 4 mm

Validité de l'analyse granulométrique :

Refus cumulé au dernier tamis utilisé Rn = gr

Passant au dernier tamis utilisé Tn = gr

Rn + Tn = gr

$\frac{M_{s1} - (Rn + Tn)}{M_{s1}} \times 100 = < 2\%$

Teneur en fines = 0,48%

LE CHARGE D'ESSAI

LE RESPONSABLE D'ESSAI

	شركة الإسمنت لحجار السود	F01 - 1/500
	Résultats analyses chimiques		Page : Page 1 sur 1

Date :

RESULTATS D'ANALYSES

Sahla

Désignations	Résultats en %	Désignations	Résultats en %	Observations
CaO	51.36	MS		
Al ₂ O ₃	1.83	MA/F		
Fe ₂ O ₃	3.51	LSF		
SiO ₂	31.75	MH		
MgO	5.17	C ₃ S		
Na ₂ O	5.10	C ₂ S		
K ₂ O	0.43	C ₃ A		
Cl-	5.501	C ₄ AF		
SO ₃	5.04	Titre		
PAF		SSB		
R. Ins		IAC		
Total		Ph. L		
CaO libre		AW		
		E/A		

Analyste :

Chef SCE /chef labo

[Signature]

	شركة الإسمنت لحجار السود	F01 - 1/500
	Résultats analyses chimiques		Page : Page 1 sur 1

Date :

CIMENT CPA

RESULTATS D'ANALYSES

Désignations	Résultats en %	Désignations	Résultats en %	Observations
CaO	64,38	MS		
Al ₂ O ₃	5,18	MA/F		
Fe ₂ O ₃	3,34	LSF		
SiO ₂	19,97	MH		
MgO	0,99	C ₃ S		
Na ₂ O	0,20	C ₂ S		
K ₂ O	0,44	C ₃ A		
Cl-	0,19	C ₄ AF		
SO ₃	2,72	Titre		
PAF	3,71	SSB		
R. Ins		IAC		
Total		Ph. L		
CaO libre	0,6	AW		
		E/A		

Analyste :

Chef SCE /chef labo

Annexe 5 : Analyse chimique du marbre :

	شركة الإسمنت لحجار السود	F01 - 1/500
	Résultats analyses chimiques		Page : Page 1 sur 1

Date :

RESULTATS D'ANALYSES

Marbe

Désignations	Résultats en %	Désignations	Résultats en %	Observations
CaO	53,85	MS		
Al ₂ O ₃	0,38	MA/F		
Fe ₂ O ₃	0,22	LSF		
SiO ₂	1,11	MH		
MgO	2,81	C ₃ S		
Na ₂ O	0,15	C ₂ S		
K ₂ O	0,04	C ₃ A		
Cl-	0,002	C ₄ AF		
SO ₃	0,00	Titre CaCO ₃	96,12	
PAF		SSB		
R. Ins		IAC		
Total		Ph. L		
CaO libre		AW		
		E/A		

Analyste :

Chef SCE /chef labo



The Chemical Company

GLENIUM[®] 26

Superplastifiant haut réducteur d'eau pour béton à faible E/C, hautes performances et très long maintien d'ouvrabilité.

Description

Le GLENIUM[®] 26 est un adjuvant liquide non chloré d'une nouvelle génération chimique à base d'éther polycarboxylique modifié. Cet adjuvant a été développé pour l'utilisation dans l'industrie du béton où haute qualité, durabilité, performance et très longue ouvrabilité sont requises.

La nouvelle chimie du GLENIUM[®]

Le GLENIUM[®] se différencie des superplastifiants traditionnels par son action nouvelle et originale qui améliore de façon très significative le pouvoir dispersant sur le ciment.

Cette nouvelle structure chimique agit sur le grain de ciment par répulsion électrostatique et effet stérique, c'est à dire en créant un obstacle physique au rapprochement des particules de ciment. L'état dispersé est ainsi amélioré.

De plus, cette réaction est la combinaison de deux actions successives. Dès l'incorporation du GLENIUM[®] dans le mélange cimentaire, une première partie active agit immédiatement et la seconde est présente mais inactive.

L'hydratation du ciment, qui se déroule normalement, fait évoluer le pH du mélange vers la basicité, ce qui provoque la libération progressive des molécules complémentaires.

Celles-ci travaillent de la même manière que les premières et prolongent donc l'état de dispersion évitant ainsi la floculation et donc le raidissement précoce du mélange.

Domaines d'application

Le GLENIUM[®] 26 est particulièrement recommandé pour la fabrication de bétons à faible E/C, à très long maintien d'ouvrabilité et aux performances mécaniques élevées à jeune âge.

Le GLENIUM[®] 26 est donc adapté à l'industrie du béton prêt -à l'emploi et aux chantiers de Génie Civil.

Il sera particulièrement recommandé pour les usages suivants :

- Béton à très long maintien d'ouvrabilité.
- Fondations profondes (parois moulés, pieux...)
- Pompages longues distances.
- Bétons de bâtiment.
- BAP/BAN.
- Bétons de Génie- Civil (ouvrages d'art, tunnels).
- Bétons à faible E/C et long maintien d'ouvrabilité.

Propriétés

Le GLENIUM[®] 26 se différencie des autres adjuvants à base d'éthers polycarboxyliques, par sa structure spécifique qui lui confère un fonctionnement particulier avec le ciment. La cinétique d'adsorption sur les grains de ciment est différente, permettant ainsi un meilleur déroulement des premières réactions d'hydratation (dissolution, formation d'ettringite, dispersion). Il est donc possible de défloculer fortement les grains de ciment, de maintenir cet état dispersé afin d'obtenir une maniabilité très plastique ou fluide pendant plus de 2 heures avec un faible rapport eau/ciment et sans effet de retard de prise.

Caractéristiques

Aspect	liquide
Couleur	brun
Masse volumique	1,08 ± 0,02 g/cm³
pH	7,0 ± 1
Teneur en chlorures	< 0,1%
Extrait sec	24 ± 2 %
Na₂O eq	< 2 %
Transport	non classé
Etiquetage	Pas de symbole exigé



The Chemical Company

GLENIUM® 26

Mode d'emploi

Le GLENIUM® 26 est un adjuvant pour béton qui doit être incorporé isolément. L'effet optimal est obtenu par incorporation du GLENIUM® 26 dans le béton en différé, c'est-à-dire après l'addition de 70% de l'eau de gâchage dans le malaxeur. Toutefois il est possible d'incorporer le GLENIUM® 26 dans l'eau de gâchage. Eviter d'ajouter le GLENIUM® 26 sur les granulats.

Recommandations

En cas de gel, réchauffer le produit jusqu'à une température proche de + 30°C et agiter mécaniquement.

Compatibilité

Le GLENIUM® 26 est compatible avec la majorité des ciments.

Le GLENIUM® 26 n'est pas compatible avec certains plastifiants et superplastifiants. Consultez votre représentant local BASF CC pour toute synergie.

Il est utilisé en synergie avec :

- Micro-Air® 111.
- Pozzolith® 555
- Glenium® Activator
- Meyco® MS 610, Rheomac® SF 920
- Glenium® Stream, Rheomac® 885F
- Meyco® SA 160, 162, 167

Dosage

Plage normale d'utilisation:

0,3 à 2,0 % du poids du ciment, soit 0,28 à 1,90 litres pour 100 kg de ciment.

Pour d'autres utilisations, consultez votre représentant local BASF CC.

Conditionnement

Container de 1000 L, fût de 208 L, Bidon de 25 L ou vrac.

Stockage

Stocker le GLENIUM® 26 dans des conditions de températures supérieures à + 5°C.

Précautions d'emploi

Le GLENIUM® 26 ne contient aucune substance exigeant un label particulier.

Rapport de Qualité

Tous les produits élaborés par BASF ou importés par les sociétés filiales de BASF à travers le monde, sont certifiés conformes aux exigences des systèmes de gestion de qualité et d'environnement ISO 9001, ISO 14001 et OHSAS 18001.

09/09 BASF_CC-ALGERIA

* Les propriétés énumérées sont seulement à titre de conseils.

Sarl BASF Construction Chemicals Algeria.

Phone: +213 (0) 21.30.95.09 / 12
Fax: +213 (0) 21.30.95.19 / 12
Zone d'Activité de Baba Ali -Saoula-
Alger, ALGERIE.

BASF - The Chemical Company
www.basf-cc.com

Nos fiches techniques ont pour objectif de vous conseiller d'après nos connaissances les plus récentes, nous nous réservons donc le droit de modifier à tout moment le contenu de celles-ci. L'emploi des produits doit être adapté aux conditions spécifiques à chaque situation. Pour toute précision complémentaire, nous vous conseillons de prendre contact avec votre représentant BASF Construction Chemicals.

Comme toutes les fiches techniques de BASF-CC sont mises à jour de façon régulière, il est de la responsabilité de l'utilisateur d'obtenir la version la plus récente.

Annexe 07 : Béton de sable



Annexe 8 : Matériels utilisés



Aéromètre à béton



Rétractomètre



Malxeur à béton



Cône d'Abraham's



Eprouvettes prismatiques 7×7×28 cm équipées de plots



Etuve



Machine de traction



Machine de compression



Différentes formes d'éprouvettes utilisées

Annexe 9 : Carrière à blocs de Fil-Fila (Site de prélèvement)





