

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE 20 AOUT 1955- SKIKDA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة
كلية التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية

N° Ordre : D0121200010D
N° Série :



THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

DOCTORAT en SCIENCES en Génie Civil

Option: GéoMatériaux

« CONTRIBUTION A L'ETUDE DU COMPORTEMENT DES
ELEMENTS EN BETONS DE SABLE RENFORCES DE FIBRES DE
FONTE AMORPHE : Influence du taux et de l'élancement »

Présentée par **Mr BENHALILOU Mohammed Ichem**

Devant le jury composé de :

Président :	Pr. MESSAST Salah	Université 20 Août 1955 - Skikda
Rapporteurs :	Pr. BELACHIA Mouloud	Université 8 Mai 1945 - Guelma
	Pr. HOUARI Hacène	Université Mentouri - Constantine
Examineurs :	Pr. MERZLOUD Mouloud	Université Badji M. - Annaba
	Pr. BENOUIS Abdellhalim	Université 8 Mai 1945 - Guelma

Année Universitaire 2019/2020

DEDICACE

A la Mémoire de mes Parents

J'aurais souhaité votre présence en ce moment pour partager ma joie. Vous m'avez toujours fait preuve d'amour et d'affection. Vous êtes toujours présents dans mon esprit et dans mon cœur. Aussi dans ce moment de joie, vous avez toutes mes pensées !!!

Tous les mots ne pourraient témoigner de ma gratitude, je vous dédie cette thèse comme fruit de votre dévouement et l'expression de mon profond amour.

Remerciements

*Mes vifs remerciements s'adressent en premier lieu à **Monsieur Le Professeur Mouloud BELACHIA** pour avoir suivi et encadré mes recherches durant ces années, et de m'avoir accepté dans son laboratoire..*

*Je souhaite exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements, à mon frère et ami, mon Directeur de thèse **Monsieur Hacène HOUARI**, Professeur Emérite des universités :UFM Constantine, pour son aide précieuse, son soutien incessant, sa gentillesse et sa disponibilité, m'ont beaucoup aidé à progresser et à franchir tous les obstacles.*

J'ai beaucoup appris à ses cotés à ses conseils avisés, sa patience, son immense expérience dans le domaine et sa compétence professionnelle. Il m'a appris les qualités nécessaires dans le déroulement des essais expérimentaux, ainsi que le sens des interprétations.

Le travail sous sa direction a représenté pour moi une expérience très enrichissante et pleine d'intérêt. Je 'oublierai jamais les énormes efforts qu'il a apportées à ce mémoire tant au niveau de la rédaction qu'au niveau des travaux expérimentaux. J'ai beaucoup bénéficié de son esprit scientifique et de ses idées, l'importance qu'il accorde à la précision, à la rigueur et à la perfection du travail.

*Je souhaite aussi lui témoigner toute ma reconnaissance par ses encouragements permanents, son soutien et sa confiance durant toutes ces années de recherche. Ce travail ne serait jamais achevé sans sa collaboration, sa ténacité sa gentillesse et ses connaissances enrichissantes. **MERCI PROFESSEUR.***

Aux membres de jury

Grand Merci aux Membres de jury, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de participer au jury de ma thèse. Je tiens à les assurer de ma profonde reconnaissance pour l'intérêt qu'ils portent à ce travail, pour le temps consacré à la lecture et les remarques judicieuses qu'ils m'ont indiquées.

*Je remercie tout particulièrement **Dr AMOURI C.** pour ses conseils et qui malgré ses nombreux engagements n'a jamais compté son temps pour m'orienter et je suis très reconnaissant à son équipe et plus particulièrement **Dr BENSALÉM Sara et Dr BELKADI Raouf** pour leur aide, leur patience, leur disponibilité et leur gentillesse.*

*De même je voudrais remercier **Dr HEBHOUB Houria,** pour sa collaboration et son concours de m'avoir accepté dans son équipe de recherche à Skikda. Merci à toute l'équipe et en particulier **ABDELWAHAD A.***

***Aux Chefs de Département,** des deux universités (Skikda et Batna), je les remercie pour leur aide dans les démarches administratives.*

***Aux Doyens et vice doyens ,** des deux universités (Skikda et Batna), je les remercie pour leur aide dans les démarches administratives.*

***A mes Professeurs** Aït Mokhtar K. de La Rochelle et Lahbari de Batna, Mr Aïssa Siari, Mr Abdou Chabane, Mr Allaoua Rebai, Mr Ali Bouchteb, Mr Zermane M.*

Soyez assurés de ma haute considération.

***Aux Techniciens des différents laboratoires** où j'ai effectués mes essais LMDC Constantine, LTP Est, LGMHU Skikda, CETIM qui m'ont accueilli chaleureusement et m'ont transmis leur savoir en caractérisation des matériaux*

très utile lorsque l'on débute. Grand Merci aux Masters2 qui m'ont accompagné durant ce parcours du combattant.

A mes amis (es) et Collègues,

Les années et toujours la même amitié, Merci beaucoup.

A mes frères et sœurs,

Quelle chance de vous avoir à mes côtés!

Affectueuse et sereine sont pour moi les adjectifs qui définissent notre relation

A ma femme,

Tu m'as encore prouvée combien je peux compter sur toi.

Il ne fait aucun doute que ta force m'a permis d'avancer et de ne pas baisser les bras.

A mes enfants

Viendra le jour pour comprendre tous les tracas de thèse, mais vous l'avez ressenti avec mes absences. Mon cœur est rempli d'amour et tendresse pour vous.

A mes beaux parents (belle famille)

Je vous remercie pour tous les encouragements et pour l'aide précieuse que vous nous avez apporté au long des années.

Résumé

Dans ce travail nous cherchons à apporter à travers une démarche de recherche utile et soulever des points essentiels pour élargir le champ d'application des bétons de sable par l'élaboration d'un béton de sable renforcé de fibres de fonte amorphe (FM) à base de matériaux locaux de la région

Le but principal de ce présent travail de thèse est alors axé sur deux thèmes majeurs :

Le premier thème consiste à récupérer les déchets de marbre (SM) comme sable en remplacement partiel d'un sable de dune (SD) dans la formulation d'un béton de sable fillerisé avec des pourcentages de 0% 5%, 10%, 15% et 20% . Le comportement de ces bétons à l'état frais ainsi les propriétés essentielles à l'état durci et la durabilité d'attaque chimique par des solutions (HCl et H₂SO₄), ont été étudiés.

Le second thème est l'évaluation de la résistance au gel-dégel du béton de sable fillerisé à base de sable de dune (SD) et de sable concassé (SC) en vue d'élargir les possibilités d'utilisation de ces matériaux aux régions sous des conditions hivernales rigoureuses. À cet effet, sept bétons ont été préparés avec la variation de la teneur en SC (0%, 20%, 40%, 50%, 60% ,80% et 100%) et la teneur en eau. L'étude est basée sur une analyse des résultats des essais de résistance à la compression et en flexion résiduelles. Les variations pondérales et dimensionnelles (changements de poids et de longueur) du béton, à différents temps de cycles gel-dégel, ont également été mesurées.

L'influence de l'introduction des fibres métalliques (fonte amorphe) avec deux longueurs (15 et 30 mm) et deux taux (0,5 et 1%) sur le comportement des BS a été analysée.

D'après les résultats trouvés on peut conclure que la substitution du sable ordinaire (de dune) par le sable de déchets de marbres donne des résultats acceptables du point de vue rhéologie, résistances mécaniques et attaques chimiques. Le sable concassé donnait les meilleures performances de résistance aux cycles gel/dégel que le sable dunaire. Ils ont également révélé que les matériaux contenant plus de 20% de sable de dunes ont un effet négatif sur la résistance au gel-dégel des bétons de sable fillerisé. Cela permet d'optimiser la conception du mélange avec 20% de sable de dunes. Les fibres de fonte amorphe limitent le retrait des bétons de sable fillerisé et augmente les résistances à la flexion.

Mots clés : Bétons de sable, éléments minces, fillers calcaires, sable dunaire, sable concassé, déchets de marbre, fibres de fonte amorphe, caractérisation, attaques chimiques, gel/dégel.

Summary

In this work we seek to bring through a useful research approach and raise essential points to widen the field of application of sand concretes by the development of a concrete of fillerized sand based on local materials of the region.

The main goal of this thesis work is then focused on two major themes:

The first theme consists of recovering marble waste as sand as a partial replacement for dune sand in the formulation of concrete with fillerized sand with percentages of 5, 10, 15 and 20%, by studying the behavior of these concrete in the fresh state, the essential properties in the hardened state and the durability of chemical attack by solutions (HCl and H₂SO₄).

The second theme is the evaluation of the freeze-thaw resistance of fillerized sand concrete based on dune sand and crushed sand with a view to widening the possibilities of using these materials to regions under severe winter conditions. For this purpose, seven concretes were prepared with the variation of the SC content (0%, 20%, 40%, 50%, 60%, 80% and 100%) and the water content. The study is based on an analysis of the results of the residual compressive and flexural strength tests. Weight and dimensional variations (changes in weight and length) of the concrete, at different freeze-thaw cycle times, were also measured.

The influence of the introduction of metallic fibers (amorphous cast iron) on the behavior of BS was analyzed. From the results found, it can be concluded that the substitution of ordinary sand (dune) by marble waste sand gives acceptable results from the point of view of rheology, mechanical resistance and chemical attack. Crushed sand gave better performance in resistance to freeze / thaw cycles than dune sand. They also revealed that materials containing more than 20% dune sand have a negative effect on the freeze-thaw resistance of concrete fillerized sand. This optimizes the design of the mixture with 20% dune sand. The fibers of amorphous cast iron limit the shrinkage of fillerized sand concretes and increase the flexural strengths.

Key words: Sand concrete, limestone fillers, dune sand, crushed sand, marble waste, rheology, mechanical performance, chemical attacks, freeze / thaw.

ملخص

في هذا العمل ، نسعى إلى جلب نهج بحثي مفيد وإثارة النقاط الأساسية لتوسيع مجال تطبيق الخرسانة الرملية من خلال تطوير الخرسانة الرملية المعبأة على أساس المواد المحلية في المنطقة

يركز الهدف الرئيسي من هذه الرسالة على موضوعين رئيسيين

يتكون الموضوع الأول من استعادة نفايات الرخام كالرمل كبديل جزئي لرمال الكثبان الرملية في صياغة الخرسانة بالرمل المحشو بنسبة 5 و 10 و 15 و 20% من خلال دراسة سلوك هذه الخرسانة في الحالة الطازجة ، والخصائص الأساسية في الحالة المتصلبة ومثانة الهجوم الكيميائي بواسطة المحاليل

الموضوع الثاني هو تقييم مقاومة التجميد للذوبان في الخرسانة الرملية المعبئة على أساس رمال الكثبان الرملية والرمل لهذا الغرض ، تم تحضير سبعة . المسحوق بهدف توسيع إمكانيات استخدام هذه المواد للمناطق في ظروف الشتاء القاسية استندت الدراسة إلى (و 100%) ومحتوى الماء (80% ، 60% ، 50% ، 40% ، 20% ، 0) SC خرسانة بتنوع محتوى كما تم قياس اختلافات الوزن والأبعاد (التغيرات في الوزن والطول) . تحليل نتائج اختبارات الضغط والانضغاط المتبقية للخرسانة ، في أوقات دورة التجميد المختلفة للذوبان

تم تحليل تأثير إدخال الألياف المعدنية (الحديد الزهر غير المتبلور) على سلوك خرسانة الرمل من النتائج الموجودة ، يمكن استنتاج أن استبدال الرمال العادية (الكثبان الرملية) برمال نفايات الرخام يعطي نتائج مقبولة أعطى الرمل المسحوق أداءً أفضل في مقاومة دورات . من وجهة نظر الريولوجيا والمقاومة الميكانيكية والهجوم الكيميائي كما كشفوا أن المواد التي تحتوي على أكثر من 20% من الكثبان الرملية لها تأثير . التجميد / الذوبان من الرمل الكثبان هذا يحسن من تصميم الخليط مع 20% من الكثبان الرملية . سلبي على مقاومة ذوبان الرمل المملوء بالتجمد وذوبان الجليد . تقلل ألياف الحديد الزهر غير المتبلور من انكماش خرسانة الرمل المعبأة وتزيد من قوة الانثناء

الكلمات الرئيسية: خرسانة رملية ، حشوات من الحجر الجيري ، رمال الكثبان الرملية ، رمل مكسر ، نفايات رخام ، ريولوجيا ، أداء ميكانيكي ، هجمات كيميائية ، تجميد / ذوبان

Liste des Tableaux

Tableau II.1	Propriétés des sables utilisés	53
Tableau II.2	Analyse granulométrique du sable de déchet de marbre	54
Tableau II.3	Analyse granulométrique du sable de dune	54
Tableau II.4	Analyse chimique de l'eau de gâchage	55
Tableau II.5	Propriétés mécaniques de CPA-CEMI	56
Tableau II.6	Composition chimique et minéralogique du ciment CEM I 42,5	56
Tableau II.7	Les caractéristiques physiques et chimiques	57
Tableau II.8	Caractéristiques de superplastifiant	58
Tableau II.9	Compositions des mélanges retenus	59
Tableau II.10	Les résultats de l'essai de la densité	67
Tableau II.11	Les résultats de l'essai de l'étalement	69
Tableau II.12	Résultats de l'essai teneur en l'air	70
Tableau II.13	Les résultats de la résistance à la compression	72
Tableau II.14	Résultats de l'essai de la traction par flexion	75
Tableau II.15	Résultats de l'essai d'absorption d'eau par immersion	77
Tableau II.16	Résultats de l'essai de perte en poids	78
Tableau II.17	Résultats de l'essai de retrait total	79
Tableau II.18	Résistance chimique dans le milieu agressif (HCL)	81
Tableau II.19	Résistance chimique dans le milieu agressif (H ₂ SO ₄)	81
Tableau III.1	Propriétés physiques des sables utilisés	91
Tableau III.2	Analyse chimique du ciment utilisé	93
Tableau III.3	Composition minéralogique du ciment	93
Tableau III.4	Les caractéristiques physiques du ciment CEM I	93
Tableau III.5	Composition chimique des fillers calcaires	94
Tableau III.6	Les caractéristiques de superplastifiant	94
Tableau III.7	Caractéristiques des fibres de fonte amorphe	95
Tableau III.8	Composition BS de référence dans 1 m ³	98
Tableau III.9	Les différents mélanges des BS (Kg/m ³)	98
Tableau III.10	Les résultats de la résistance à la compression de tous les mélanges	109
Tableau III.11	Résultats de la résistance à la flexion des mélanges	110
Tableau III.12	Les valeurs du retrait total des mélanges étudiés à 28 jours	114
Tableau III.13	Les résultats de la porosité capillaire	115
Tableau III.14	Les résultats de la résistance à la compression des BSF	120
Tableau III.15	Les résultats de la résistance à la flexion des BSF	124
Tableau III.16	Les valeurs de retrait total des mélanges étudiés à 28 jours	128
Tableau III.17	Les résultats de la porosité capillaire	129
Tableau IV.1	Composition des mélanges de BS dans 1 m ³	142
Tableau IV.2	Les propriétés physiques à l'état frais et durci	144
Tableau IV.3	Observation visual des éprouvettes après des cycles	149

Liste des figures

Figure I.1	Maison de François Coignet à Saint-Denis réalisée en béton aggloméré renforcé de barres métalliques	11
Figure I.2	Phare de Port-Said	11
Figure I.3	Métro de Saint-Petersbourg	12
Figure I.4	Relation entre le dosage de ciment et le pourcentage de granulats fins dans un béton	16
Figure I.5	Schéma explicatif de l'apparence du BS pur, BS chargé et du béton traditionnel	17
Figure I.6	Evolution de la maniabilité en fonction de module de finesse du sable	21
Figure I.7	Schéma explicatif de la notion d'épaisseur de pâte	21
Figure I.8	Evolution du facteur d'extension granulaire en fonction de la maniabilité des BS	23
Figure I.9	Maniabilité en fonction du module de finesse du sable : Influence de la teneur en fines	26
Figure I.10	Evolution de la porosité en fonction du module de finesse des sables	27
Figure I.11	Effets du dosage et de la finesse de l'ajout sur la résistance à la compression du béton de sable	29
Figure I.12	Effet de la granularité sur la résistance	29
Figure I.13	Panneau 3D en BS projeté	36
Figure I.14	Types des fibres	41
Figure I.15	Fibre de fonte amorphe	41
Figure II.1	Courbes granulométriques des sables	55
Figure II.2	Ciment portland CEM I d'Ain El Kebira	56
Figure II.3	Eprouvettes avant le démoulage	61
Figure II.4	Démoulages des éprouvettes	61
Figure II.5	Essai de traction par flexion	63
Figure II.6	Essai de résistance en compression	
Figure II.7	Etuves pour l'essai d'absorption par immersion	65
Figure II.8	Bac de conservation d'éprouvettes à température contrôlée	65
Figure II.9	Eprouvettes immergées dans 5% Hcl	66
Figure II.10	Eprouvettes immergées dans 5% H ₂ SO ₄	66
Figure II.11	Pesée des échantillons (balance de précision à 0.01g)	67
Figure II.12	Les éprouvettes cubiques dans les solutions	67
Figure II.13	Variation de la densité en fonction du taux de substitution	68
Figure II.14	Variation de l'ouvrabilité en fonction du taux de substitution	69
Figure II.15	Variation de l'air occlus en fonction du taux de substitution	70
Figure II.16	Influence du taux de substitution sur la résistance en compression	73
Figure II.17	Influence de l'âge sur l'évolution de la résistance en compression	73
Figure II.18	Influence du taux de substitution sur la résistance en traction par flexion	76
Figure II.19	Influence de l'âge sur l'évolution de la résistance en traction par flexion	76
Figure II.20	Variation de l'absorption par immersion en fonction du taux de substitution	78
Figure II.21	Influence du taux de substitution sur la perte en poids	79
Figure II.22	Influence du taux de substitution sur le retrait	80

Figure II.23	Variation de la perte en poids en fonction de la période d'immersion en HCl	82
Figure II.24	Variation de la perte en poids en fonction de la période d'immersion en H ₂ SO ₄	83
Figure III.1	Analyses granulométriques des sables utilisés	91
Figure III.2	Justification du choix du dosage en ciment	96
Figure III.3	Les étapes de la réalisation des bétons de sable	99
Figure III.4	Les résultats de la maniabilité	106
Figure III.5	Variation du pourcentage d'air occlus	107
Figure III.6	Variation de la densité	107
Figure III.7	Evolution de la résistance à la compression des différents mélanges	110
Figure III.8	Résistances à la flexion des différentes compositions	111
Figure III.9	Corrélation entre la résistance à la traction et à la compression	113
Figure III.10	La porosité capillaire des différents mélanges	116
Figure III.11	Eprouvettes soumises après l'essai de la porosité capillaire pour SD 60%	116
Figure III.12	La maniabilité des BSF	117
Figure III.13	Variation du pourcentage d'air occlus des BSF	118
Figure III.14	Variation de la densité des BSF	119
Figure III.15	Les résultats de la résistance à la compression des BSF	120
Figure III.16	Les résultats de la résistance en compression selon le taux (a) 15mm, (b) 30 mm	121
Figure III.17	Les résultats de la à la compression selon la longueur pour (c) un taux de 0.5% (d) un taux de 1%	123
Figure III.18	Les résultats de la résistance à la flexion des BSF	124
Figure III.19	Mode de rupture d'une éprouvette à la flexion du BS avec et sans fibres	125
Figure III.20	Les résultats de la résistance à la flexion selon le taux pour (a) une longueur de 15 mm (b) une longueur de 30 mm	127
Figure III.21	Les résultats de la Porosité capillaire	
Figure IV.1	Aspect visuel typique d'un élément de béton sévèrement endommagé par la fissuration due à l'action des cycles de gel-dégel	136
Figure IV.2	Surface du béton avec air entraîné après 200 et 400 cycles gel-dégel	137
Figure IV.3	Aspect visuel typique d'un élément de béton attaqué par l'écaillage en présence de sels fondants	139
Figure IV.4	Enceinte climatique	142
Figure IV.5	Programmation de l'enceinte climatique	143
Figure IV.6	Le cycle Gel/Dégel	143
Figure IV.7	Variations dimensionnelles des échantillons de béton de sable fillerisé en fonction du nombre de cycles de gel-dégel.	146
Figure IV.8	Résistance à la compression des différentes compositions	147
Figure IV.9	Résistance à la flexion des mélanges	148
Figure IV.10	Dégradation d'une éprouvette de DS 50% après 100 cycles de gel-dégel	151

TABLES DES MATIERES

Résumés	V
Liste des tableaux	VIII
Liste des figures	IX
Table des matières	XI

Introduction Générale	1
------------------------------	---

CHAPITRE I

PARTIE A - ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES BETONS DE SABLE

PARTIE B – GENERALITES SUR L’INTRODUCTION DES FIBRES DANS LES BETONS DE SABLE

PARTIE A : ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES BETONS DE SABLE	9
I.1. Introduction	9
I.2. Historique	10
I.3. Définition	14
I.4. Intérêts d’utilisation et limites des bétons de sable	15
I.4.1. Intérêts des bétons de sable	15
I.4.2. Limites des bétons de sable	15
I.5. Particularités des bétons de sable	16
I.5.1. Quantité de pâte élevée	16
I.5.2. Peu ou pas de gros granulats	17
I.5.3. Simple mise en place	17
I.5.4. Faible tendance a la ségrégation	17
I.6. Formulation	18
I.6.1. Approches théoriques	19
I.6.1.1. Formulation par optimisation de la compacité	19
I.6.1.2. Formulation a maniabilité fixée	20
I.6.2. Méthode expérimentale	24
I.6.2.1. Mélange sans fines	24
I.6.2.2. Détermination de dosage en fines	24
I.7. Propriétés recherchées	25
I.7.1. A l’état frais	25
I.7.1.1. Maniabilité	25
I.7.1.2. Compacité	26
I.7.2. A l’état durci	28
I.7.2.1. Comportement mécanique	28
I.7.3. Adhérence aux armatures	30
I.7.4. Module d’élasticité	30
I.7.5. Retrait	31
I.7.6. Fluage	31
I.7.7. Durabilité	32
I.7.7.1. Absorption capillaire	32
I.7.7.2. Perméabilité	32
I.7.8. Comportement thermique	33

I.7.9. Microstructure et fissuration	33
1.8. Domaines d'utilisation des BS	33
I.8.1. Fondations profondes	34
I.8.2. Bâtiment	34
I.8.3. Routes	35
I.8.4. Autres applications	35
I.8.5. Techniques particulières	36
I.8.5.1. Béton de sable projeté	36
I.8.5.2. Béton de sable fluide	37
PARTIE B : GENERALITES SUR L'INTRODUCTION DES FIBRES DANS	38
LES BETONS DE SABLE	
I.9. Introduction	38
I.10. Historique	38
I.11. Connaissance du matériau	39
I.12. Avantages et inconvénients des BRF	39
I.13. Définition des fibres	39
I.14. Les différents types de fibres	40
I.14.1. Fibres de fonte amorphe	41
I.14.1.1. Définition	41
I.15. L'influence des fibres sur le béton	42
I.15.1. Influence des fibres sur le béton a l'état frais	42
I.15.2. Influence des fibres sur le béton a l'état durci	42
I.16. Conclusion	43
I.17. Références	46

Chapitre II

INFLUENCE DE LA SUBSTITUTION DES SABLES DE DUNE PAR DES DECHETS DE MARBRE SUR LA DURABILITE DES BETONS DE SABLE FILLERISES

II.1. Introduction	51
II.2 Caractérisation des matériaux testés et Méthodologie d'essais	53
II.2.1. Matériaux utilisés	53
II.2.1.1. Sables	53
II.2.1.2. Eau de gâchage	55
II.2.1.3. Ciment	55
II.2.1.4. Fillers calcaires	56
II.2.1.5. Adjuvant	57
II.3. Programme expérimental	57
II.3.1. Formulation du béton de sable témoin bs (100%sd)	58
II.3.1.1. Détermination du dosage en ciment	58
II.3.1.2. Détermination du dosage en eau	58
II.3.1.3. Détermination du dosage en superplastifiant	58
II.3.1.4. Détermination du volume des vides	58
II.3.1.5. Détermination du dosage en sable	58
II.3.2. Notation des mélanges retenus	59
II.3.3. Confection des mélanges retenus	59
II.3.3.1. Corps d'épreuves	60
II.3.3.2. Conservation	60

II.4. Méthodologie des essais	62
II.4.1. Essais effectués sur le béton frais	62
II.4.1.1. Affaissement	62
II.4.1.2. Densité	62
II.4.1.3. Air occlus	62
II.4.2. Essais effectués sur le béton durci	62
II.4.2.1. Résistance à la traction par flexion	63
II.4.2.2. La résistance mécanique en compression	63
II.4.2.3. Le retrait et perte de masse	64
II.4.2.4. Essai d'absorption par immersion	64
II.4.2.5. Attaques chimiques	65
II.5. Résultats et discussions	67
II.5.1. Densité	67
II.5.2. Ouvrabilité	69
II.5.3. Air occlus	70
II.5.4. Performances mécaniques	71
II.5.4.1. Résistance en compression	71
II.5.4.2. Résistance à la traction par flexion	74
II.5.4.3. Absorption par immersion	77
II.5.4.4. Variations pondérales et dimensionnelles	78
II.5.5. Durabilité	81
II.5.5.1. Attaques chimiques par acide chlorhydrique et acide sulfurique	81
II.6. Conclusion	83
II.7. Références	86

CHAPITRE III

COMPORTEMENT DES VARIETES DE BETONS DE SABLE FILLERISES : INFLUENCE DU TAUX DE SUBSTITUTION ET DE L'INTRODUCTION DES FIBRES METALLIQUES

III.1. Introduction	89
III.2. Matériaux testes et méthodologie d'essais	90
III.2.1. Constituants de base utilisés	90
III.2.1.1. Sables	91
III.2.1.2. Eau de gâchage	92
III.2.1.3. Ciment	93
III.2.1.4. Filler calcaire	94
III.2.1.5. Adjuvant	94
III.2.1.6. Fibres métalliques (fonte amorphe)	94
III.3. Formulation des bétons de sable (approches adoptées)	95
III.4. Confection des bétons de sable	98
III.4.1. Corps d'épreuves	100
III.4.2. Conservation des corps d'épreuves	101
III.5. Méthodologie des essais	101
III.5.1. Essais effectués sur le béton frais	101
III.5.1.1. Essai d'écoulement	101
III.5.1.2. Mesure de la quantité d'air occlus	101
III.5.2. Essais effectués sur béton durci	102
III.5.2.1. Résistance à la traction par flexion (flexion 3 points)	102

III.5.2.2. Résistance à la compression	102
III.5.2.3. Variations dimensionnelles et pondérales	103
III.5.3. Essais physico-chimiques	103
III.5.3.1. Absorption d'eau par capillarité	103
III.6 résultats et discussions	104
III.6.1 Notation des mélanges retenus	104
III.6.2. Caractérisation des BS fillerisés sans fibres à l'état frais	106
III.6.2.1. La maniabilité	106
III.6.2.2. L'air occlus	106
III.6.2.3. La densité	107
III.6.3. Caractérisation des mélanges bs fillerisé à l'état durci	108
III.6.3.1. La résistance à la compression	108
III.6.3.2. La résistance à la flexion	110
III.6.3.3. La corrélation entre la résistance à la traction et à la compression	112
III.6.3.4. Variations dimensionnelle et pondérale	114
III.6.3.5. La porosité	115
III.7. Bilan : BS sans fibres	116
III.8. Caractérisation des BS avec fibres	117
III.8.1. Caractérisation du BSF à l'état frais	117
III.8.1.1. La maniabilité	117
III.8.1.2. L'air occlus	118
III.8.1.3. La densité	118
III.8.2. Caractérisation du BSF à l'état durci	119
III.8.2.1. La résistance à la compression	119
III.8.2.2. La résistance à la flexion	123
III.8.2.3. Le retrait	128
III.8.2.4. La porosité	128
III.9. Conclusion	130
III.10. References	132

Chapitre IV

COMPORTEMENT DES VARIETES DE BETONS DE SABLE FILLERISES SOUS L'EFFET DES CYCLES GET/DEGEL : influence du taux de substitution

IV.1. Introduction	135
IV.2. Généralités sur le phénomène de gel/dégel	136
IV.2.1. Gel dégel	136
IV.2.1.1. Fissuration interne	136
IV.2.1.2. Les principaux paramètres d'influence sur la fissuration interne	137
IV.2.1.3. Écaillage	140
IV.2.1.3.1. Les principaux paramètres d'influence sur l'écaillage	140
IV.2.2. Mécanisme du cycle gel dégel	141
IV.2.2.1 Autres composants influant sur cycle gel dégel	141
IV.3. Constituants de base et méthodologie d'essai	142
IV.3.1. Rappels sur la méthode de formulation retenue	142
IV.3.2. Méthodologie d'essai	143
IV.4. Résultats et discussion	145
IV.4.1. Propriétés des bétons de sable fillerisés à l'état frais et durci	145
IV.4.2. Cycles gel/dégel	147
IV.4.2.1. Variation dimensionnelle	147

IV.4.2.2. Résistance à la compression résiduelle	148
IV.4.2.3. Résistance à la flexion résiduelle	149
IV.4.2.4. Visual observation	149
IV.5. Conclusion	153
IV.6. References	154
Conclusion générale et perspectives	157

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est un matériau en continuelle évolution, il se présente actuellement en plusieurs types variés (mortiers, bétons ordinaires et bétons spéciaux). Qui ont différentes formulations et divers comportements. Cette diversification est associée par l'introduction de nouveaux composants, lui conférant des propriétés visées pour chaque type d'application.

La synthèse des recherches et études réalisées sur les bétons de sables ont pu démontrer que le béton de sable renforcé de fibres de fonte amorphe pour ses performances physiques et mécaniques qui offre, peut présenter une solution très intéressante dans plusieurs domaines de la construction et dans plusieurs régions.

Plusieurs travaux de recherches ont été réalisés sur l'effet de la nature des sables, fillers et sur la valorisation des matériaux dans les bétons ordinaires et les bétons de sable. Ces travaux ont permis de combler beaucoup de lacunes concernant les bétons à base de sable des dunes. La plupart de ces travaux ont été le résultat des recherches effectuées aux laboratoires du Sud Algérien

Les multiples travaux de recherche montrent que la mise en œuvre, des Bétons de sable fillériés et des bétons de sable renforcés par des fibres, est souvent difficile et a toujours posé de problèmes pour la conception des éléments minces (bordures, toitures, tuyaux, mobilier urbain, voutes en voiles, caissons de plafond, cloisons, . . .).

À travers les résultats trouvés en littérature qui sont souvent en contradiction.

L'analyse bibliographique des travaux traitant ces thèmes soulevés et en particulier les problèmes de durabilité aux cycles de gel des bétons de sable a montré qu'un béton de sable fillerisé présente une plus grande sensibilité à l'action du gel qu'un béton ordinaire correspondant. Cette sensibilité est attribuée au volume de pâte élevé qui conduit à une porosité totale élevée et une perméabilité réduite des bétons de sable.

L'utilisation d'additions minérales (ou l'incorporation des fibres métalliques) peut fournir un moyen d'améliorer la résistance à la fissuration interne et à l'écaillage des bétons de sable en raison de leurs effets sur la maturité du béton et sur la structure de la porosité capillaire. Par ailleurs, leur influence sur la tenue au gel est variable en fonction du type d'addition (ou fibres) et du taux de substitution du ciment.

De nombreuses études tendent à démontrer qu'en générale, les fumées de silices, les cendres volantes et les laitiers n'améliorent pas significativement la résistance à la fissuration

interne du béton. La revue de la littérature a montré que la résistance au gel-dégel (ou aux attaques chimiques) des bétons contenant des composants de sable de marbre, fillers calcaires et des fibres a fait l'objet d'un nombre d'étude très limité.

Ce qui nous ramène à l'un des objectifs principaux de cette étude, à savoir, l'évaluation du comportement des bétons de sable fillerisés contenant des matériaux locaux soumis aux cycles de gel-dégel et aux attaques chimiques.

Problématique :

Le concept, qui est l'élaboration d'un béton à base de fillers calcaires, est un dérivé du concept de l'utilisation de fillers pour améliorer le comportement des matériaux fragiles.

Néanmoins il existe un manque de connaissances sur le comportement des bétons de sable fillerisés sous les conditions climatiques sévères ainsi les variations dimensionnelles comme le retrait, le comportement différé tel que le fluage et les problèmes de durabilité, ce qui rend difficile la maîtrise de l'utilisation de bétons de sable dans le domaine de la préfabrication des éléments minces.

L'un des objectifs de cette étude est non seulement de lever la crainte d'utiliser des sous-produits disponibles localement mais aussi d'étudier l'influence du remplacement total des sables de dune couramment utilisés, par les déchets de marbre recyclés en tant que sable et par des sables calcaires issus de concassage très abondants dans les hauts plateaux sur les propriétés des Bétons de sable, sur leur comportement (durabilité) aux attaques chimiques et sous conditions environnementales rigoureuses (cycles de gel-dégel et séchage/mouillage).

Notre travail s'inscrit dans cette optique de la valorisation des matériaux locaux. Ce domaine de recherche a pour but de définir les applications des bétons de sable renforcés de fibres de fonte amorphe et les critères qui en devraient orienter la démarche, tout en tenant compte des propriétés optionnelles de ce matériau innovant.

Dans les travaux antérieurs il a été montré la possibilité d'introduire les fines selon une formulation adaptée.

C'est cette voie que nous avons choisie d'explorer.

La vulgarisation du béton de sable fillerisé ne vise pas à substituer les bétons traditionnels performants mais plutôt à être une nouvelle source de béton de qualité, ainsi cette vulgarisation va s'inscrire dans le cadre de la valorisation des ressources locales abondantes

(sable de dune dans le Sud et Sable issus de concassage et fillers calcaires dans les Hauts Plateaux) et du développement des techniques innovantes.

Les bétons de sable exigent généralement une teneur élevée en fines. D'où la nécessité de l'utilisation des additions minérales inertes ou pouzzolaniques.

Ces deux types d'additions ont été largement utilisés dans les différents types de bétons. Presque tous les bétons hautes performances (BHP), autoplaçants (BAP). . . . et de sable (BS) inclus soit un mélange binaire ou ternaire de ciment avec des additions pouzzolaniques pour améliorer les propriétés à l'état frais, contrôler la résistance, réduire l'élévation de température et le risque de l'ASR et améliorer les propriétés à l'état durci.

En Algérie, les fillers calcaires sont les additions couramment utilisée. Cependant, la quantité de ces matériaux surabondantes et posent des problèmes de stockage suffisantes pour couvrir leur demande croissante ainsi éviter l'épuisement et la dégradation de leurs ressources naturelles (sable dunaire et alluvionnaire).

Parmi les additions, la poudre de marbre et les fillers calcaires sont abondants dans la plupart des régions du pays comme des sous-produits industriels qui doivent être inactivés de manière appropriée sans polluer l'environnement.

Les objectifs :

Dans ce travail nous ne cherchons pas à être exhaustif, mais apporter à travers une démarche de recherche utile et soulever des points essentiels de la recherche pour valoriser et vulgariser ce type de matériaux.

Dans ce cadre, notre stratégie est donc attachée à l'élaboration d'un béton de sable renforcé de fibres de fonte amorphe à base des matériaux locaux de la région d'application.

Le but de cette contribution de cette thèse est alors axé sur trois majeurs objectifs :

Objectif Scientifique : L'élaboration d'un béton de sable fibré ainsi de mettre en évidence leur champs d'application dans le domaine de la construction et en particulier pour les éléments minces. Ce travail permet non seulement de capitaliser les expériences techniques mais aussi à contribuer à la caractérisation des matériaux locaux qui va enrichir la banque de données de ces matériaux dans notre pays indispensables pour orienter les industriels et les praticiens du matériau « béton ».

Objectif économie : L'industrie du bâtiment et de la construction en générale consomme une quantité très importante de ressources naturelles. C'est donc une occasion pour

augmenter la gamme des matériaux pour l'utilisation des produits valorisés et locaux pour réduire le coût de transport en élaborant des bétons à base des matériaux de base de la région où est implanté le chantier.

Objectif environnemental : Etudier l'efficacité et les gains apportés par l'incorporation des matériaux locaux (sables de dune, sables issus de concassage et fillers calcaires) dans la confection des bétons. Les premiers résultats sont encourageants de la substitution des gros granulats

Travail accompli :

- Détermination des caractéristiques intrinsèques de chaque composant dans la chaîne de production des bétons (matériaux locaux utilisés dans ce travail)
- Vérification des caractéristiques rhéologiques et mécaniques des mélanges ainsi élaborés
- Qualification et critère de choix des bétons de sable fillerisés à base de matériaux locaux du point de vue durabilité (sous conditions hivernales rigoureuse de la région Est et aux attaques chimiques externes).
- Valorisation et vulgarisation des matières locales disponibles en abondance sans transformation coûteuse en un matériau économique comme un matériau de construction.

Organisation du mémoire :

Pour cela dans le **Premier chapitre** à caractère bibliographique. Il donne un état de l'art sur les bétons de sables pour montrer le manque d'informations sur la substitution totale ou partielle des sables dunaires a été exposé, suivi des généralités sur l'influence de l'introduction des fibres métalliques sur le comportement de ces bétons. Ce chapitre présentera aussi un état des connaissances (généralités) sur les matrices cimentaires renforcées de fibres et en particulier les fibres métalliques. (Les principaux résultats ou connaissances existantes et les difficultés rencontrées avec ce type de matériaux sont exposés)

Ces deux thèmes d'impacts et de retombées importantes seront développés dans les deux prochains chapitres (**II et III**) abordant les aspects expérimentaux, par deux études indépendantes de deux sables dunaires (SD1 et SD2) s'appuyant sur deux vastes investigations expérimentales à savoir :

- L'élaboration de deux formulations de référence des bétons de sable fillerisés respectivement à base de SD1 (avec E/C constant) et SD2 (avec maniabilité constante)..
- La substitution partielle des sables dunaires SD1 par des sables recyclés de déchets marbre SM rentrant dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux et des sous produits de la région.
- Le remplacement partiel ou total des sables de dune SD2 par des sables calcaires issus de concassage SC dans le but de la préservation et la sauvegarde de l'environnement par la vulgarisation des bétons de sables fillerisés à base des sables calcaires de la région des hauts plateaux.

Les bétons de sable sont des bétons anciens utilisés grâce à son excellente maniabilité, sa bonne cohésion sans ségrégation et l'utilisation des ressources locales en abondance dans la nature mais une faible résistance à la traction et des fissures causées par le retrait. Ces inconvénients peuvent être limitées avec un renforcement par des fibres de fonte amorphe car ces dernières apportent un caractère ductile et améliorent le comportement et la capacité portante résiduelle post-fissuration ainsi qu'une résistance à la traction.

L'incorporation des fibres dans les bétons améliore d'une manière positive leurs propriétés à la fois physiques, mécaniques et rhéologiques, du fait que les fibres possèdent des caractéristiques mécaniques généralement élevées, ainsi qu'une adhérence appropriée, favorisant l'augmentation de la densité et la résistance à la traction ainsi une amélioration de la cohésion et la ductilité.

Donc une question s'impose :

- Quelle est l'influence de l'introduction de ces fibres (fonte amorphe) sur le comportement des bétons de sable fillerisés à l'état frais et durci?

Dans notre travail, par analogie aux travaux antérieurs, on a choisi des fibres de fonte amorphe pour renforcer notre béton de sable fillerisé à base de SC qui feront l'objet du **chapitre III** (à caractère expérimental).

C'est dans ce contexte que s'insère le quatrième chapitre (**Chapitre IV**) qui exposera un état de connaissances sur un des phénomènes de durabilité touchant les bétons de sable soumis à des conditions climatiques sévères (hiver rigoureux) où il y a un manque dans la littérature, nous nous intéressons de près à l'étude sur le comportement des bétons de sable

fillerisés soumis aux cycles de gel/dégel dans le but de les qualifier et orienter les industriels et les praticiens aux critères de choix des matériaux de base.. (Les décisions à prendre)

Les paramètres d'étude (ou les facteurs d'influences) retenus dans cette contribution sont :

- Le taux de substitution totale, du sable dunaire par des sables calcaires
- L'incorporation des fillers calcaires dans la formulation des bétons de sable.

A partir de cette synthèse bibliographique, on a pu constater un manque des informations et des recommandations pour pallier et mieux maîtriser le comportement des bétons de sable fillerisés face aux cycles gel dégel et aux attaques chimiques externes, néanmoins certaines études ont pu montrer que chacun des constituants du béton de sable peuvent présenter une source d'influence sur la durabilité de ces derniers.

Ce qui nous a poussés à vouloir étudier leurs comportements vis-à-vis des conditions climatiques extrêmes et des milieux agressifs.

Pour vulgariser l'utilisation des bétons de sable fillerisés dans notre pays qui se caractérise par sa diversité climatique, ainsi sa richesse notamment en sable de dune au sud et au sable de carrière au nord sans oublier le recyclage des sous produits ou déchets industriels.

Conclusion

Pour cette raison et dans ce cadre que s'insère notre contribution même partielle aux progrès, du savoir et de la science par l'étude de l'influence non seulement du type de sables (de dune, calcaire ou déchets de marbre) mais aussi de l'introduction des fibres de fonte amorphe sur les comportements des bétons de sable vis-à-vis des conditions climatiques extrêmes et d'attaques chimiques externes. Dans la même thématique nous avons essayé d'analyser les effets apportés par l'introduction des fibres métalliques de type fonte amorphe (avec deux taux et deux élancements) aux bétons de sable.

Afin de mener au mieux cette étude, une grande partie a été consacrée à la présentation des constituants (caractéristiques intrinsèques) du béton de sable et à sa formulation ainsi qu'aux tests de caractérisation à l'état frais et durci afin de nous permettre de mieux entamer les différentes investigations expérimentales.

Les phénomènes de gel/dégel et d'attaques chimiques externes sont des phénomènes un peu plus complexes et qui nécessitent la compréhension de plusieurs paramètres susceptibles de les influencer

Après toute cette présentation qui nous laisse découvrir ces intérêts, une conclusion sur les principaux résultats obtenus lors de cette étude suivie d'une réflexion (contenue dans les perspectives) à été proposée sur l'étude du passage d'un béton de sable BS à un béton de sable autoplaçant BSAP afin d'améliorer ces techniques qui sont basées sur la propriété auto-plaçante.

Nous voulons montrer et mettre en évidence en lui consacrant cette section, pour favoriser les propriétés auto-plaçantes et ses avantages sur le béton.

CHAPITRE I :

**PARTIE A - ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES BETONS DE
SABLE**

**PARTIE B – GENERALITES SUR L'INTRODUCTION DES FIBRES
METALLIQUES DANS LES BETONS DE SABLE**

PARTIE A : ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES BETONS DE SABLE

I.1. INTRODUCTION

Actuellement le choix des bétons, dans la construction d'ouvrages, est presque exclusivement lié au coût du matériau. De ce fait, une grande importance est donnée à la valorisation des matériaux locaux dans le béton et en particulier les bétons de sable.

Les travaux antérieurs à travers le monde ont montré un grand intérêt d'un tel matériau, aussi bien sur le plan technologique, que sur le plan environnemental [Sablocrete, 1994 ; Chanvillard, 2000]. Le béton de sable (BS) a fait également l'objet de différentes recherches et de nombreuses applications [Benaissa et coll., 1992 ; Breysse et coll., 1997 ; Hadjoudja, 2001 ; Bederina et coll., 2005 ; Bouziani et coll., 2012] et fait même l'objet d'une norme expérimentale P18-500 [AFNOR, 1995].

Il a été montré que pour certains usages, le béton de sable peut concurrencer le béton traditionnel. En effet, il possède des propriétés spécifiques intéressantes, telles que la résistance, une absence de ségrégation, un bel aspect de surface et une faible taille de granulats, qui favorisent son utilisation dans certaines structures.

L'introduction de ce matériau peut soulager davantage le domaine de la construction de bâtiments et contribuer au développement des régions des hauts plateaux très riches en sable calcaire issu de concassage. Le matériau béton de sable sera appelé à remplacer le béton de structure et non pas le mortier destiné aux enduits superficiels.

L'idée de promouvoir la vulgarisation des bétons de sable dans la fabrication des bétons est d'une grande importance économique dans les régions Telliennes du Nord.

En Algérie, l'intérêt à la valorisation des sables calcaires issus de concassage notamment dans les bétons de sable est bénéfique du point de vue environnemental pour sauvegarder les sables de dune (écologie et paysage).

L'objectif principal de cette étude est non pas seulement de remplacer partiellement ou totalement les sables de dune par des sables calcaires issus de concassage ou essayer de les substituer par des sous produits (dans notre cas par des déchets de marbre) dans la confection

des bétons de sables mais aussi de les qualifier du point de durabilité pour les vulgariser dans les régions du Nord et plus particulièrement les Haut plateaux telliens.

Ce chapitre à caractère bibliographique est une synthèse des recherches bibliographiques s'appuyant sur une riche documentation variée et diversifiée sur les bétons de sable. Il expose d'abord l'historique du béton de sable, leur formulation et leur comportement ainsi que leurs domaines d'applications, suivi par une étude bibliographique sur les performances de durabilité et de déformabilité.

I.2. HISTORIQUE

Nous essayons d'exposer par ordre chronologiques le développement de ce matériau

➤ **Fin du XIXième siècle :**

Le béton de sable trouve ses origines dans «le béton aggloméré» mis au point par F. Coignet vers la fin du XIXième siècle. Ce matériau était alors constitué de sable, de ciment, de chaux et d'eau.

Le mur de soutènement à Passy et la maison Coignet (voir Figure I.1) à Saint Denis de type R+2 constitue la première application de cette technique que l'on retrouvera aussi dans la réalisation d'un aqueduc de la Vanne (1600 m de long) entre 1869 et 1872 à Moret-sur-Loing dans la forêt de Fontainebleau (France), ainsi que la tour Port-Saïd en Egypte (h = 52 m) (voir Figure I.2). La durabilité de ces ouvrages qui sont encore en service de nos jours est un témoignage des bonnes performances de ce matériau.

Le pays le plus connu pour l'utilisation de cette technique est l'ex-URSS, pauvre en gros granulats et roches massives et dont les ressources sont mal réparties sur son vaste territoire. Des pistes d'aérodromes militaires, bâtiments, tunnels et autres réalisations ont pu voir le jour prouvant la crédibilité du ce matériau.



Figure I.1 : Maison de François Coignet à Saint-Denis réalisée en béton aggloméré renforcé de barres métalliques [SABLOCRETE, 1994].



Figure I.2 : Phare de Port-Said [SABLOCRETE, 1994].

➤ **Au XXIème siècle :**

En 1918, une expérience très originale fut faite par NICOLAS DE ROCHEFORT [Sablocrete, 1994], à Saint-Petersbourg. Elle consistait à broyer un mélange de sable et de clinker à parts égales, puis à mélanger ce produit avec du sable dans le rapport de 1/3. Les résistances obtenues furent les mêmes que celle d'un mélange sable-ciment, beaucoup plus riche en ciment (1/3 de ciment pour 2/3 sable). Cette expérience fut reprise par le Pr Chercheur REHBINDER 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 figure I.3 montre l'illustration de métro de Saint-Petersbourg avec une voûte mince en béton de sable, préfabriquée, à double courbure.

D'autres études très intéressantes ont été réalisées également en Afrique Occidentale (Sénégal, Congo, Sierra Léone), en Afrique du nord, et au Golfe d'Arabie par K.THOMAS.



Figure I.3 : Métro de Saint-Petersbourg [SABLOCRETE, 1994].

La possibilité d'obtenir des niveaux élevés de résistance avec l'utilisation des gros granulats a fait tomber, à une certaine époque, le béton de sable dans l'oubli. A la fin de la deuxième guerre mondiale, le béton de sable revient en force grâce à ses propriétés spécifiques, à la pénurie des gros granulats dans certaines régions et bien entendu à la disponibilité de gros gisements de sable [Benaissa et coll., 1992].

Dans les années soixante-dix, et dans le sud-ouest de la France. 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 [Sablocrete, 1994].

Mais l'expérience n'est pas tout à fait la même que celle adoptée en CEI. 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 [Sablocrete, 1994]. Des résultats partiels intéressants et disparates ont conduit le Centre Expérimental de recherche Etudes du Bâtiment

et Travaux Publics (CEBTP), a établi en 1986 un document de synthèse sur le béton de sable hyper-compacté. Dans la même année l'association CEBTP et le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), ont établi un autre document sur la synthèse des connaissances sur les bétons de sable [Ahmed Chaouche, 1993].

A partir de l'élaboration de ces deux documents, un vaste programme de recherche et développement sur l'utilisation optimale du sable pour les applications de bétons de sable est lancé. Ce dernier est confié à l'association SABLOCRETE.

Les travaux de recherche et de développement sur l'utilisation du béton de sable organisés dans le cadre du projet national SABLOCRETE (France) sont lancés dans le cadre des opérations encouragées et cofinancées par le ministère de l'Equipement, gérées par l'association pour la promotion et le développement des bétons de sable. Ils ont débouché sur des applications diverses touchant à tous les domaines d'emploi du béton : construction routière, bâtiment, préfabrication, projection, reprises en sous œuvre, etc... Une trentaine d'opérations pilotes ont ainsi été réalisées entre 1989 et 1993.

Dans les dernières décennies, étant donné l'insuffisance des connaissances sur son comportement mécanique, le béton de sable a fait l'objet de plusieurs recherches. Plusieurs entreprises et laboratoires, dans différents pays, ont lancé des programmes de recherches sur ce matériau. Dans ce cadre l'Algérie, en relation avec l'abondance de sable de dune disponible dans le sud, plusieurs recherches ont été établies (Bali, Kenai; Houari, Benaissa, Benmalek, Bédérina, Bouziani, Kriker,).

La première étude a été lancée par le CNERIB qui a engagé une série de travaux de recherche pour la valorisation de ce matériau. Une étude conjointe en 1992 avec Houari H. [Houari et al., 1993] sur la valorisation des fines calcaires dans les bétons de sable.

Une recherche présentée par BATATA A [Batata, 1994] cherche à formuler un béton de sable de dune pour l'obtention d'une compacité maximal. Suivant ces recherches et leurs résultats encourageants, d'autres chercheurs ont envisagés l'incorporation des armatures. Dans ce but Benmalek. M [Benmalek et coll., 1997] a mené une étude sur des éléments de structure en béton de sable de dune avec le sable de la région de BOUSAADA ayant un module de finesse égal 1,2.

I.3. DEFINITION

Le béton de sable est un béton fin, constitué d'un mélange de sable(s), de ciment, d'addition(s) et d'eau ; pour répondre aux besoins de certains usages, d'autres ajouts spécifiques (adjuvants, fibres, colorants...etc.) peuvent être introduits dans cette composition de base [Chauvin et coll., 1988]. Il se distingue d'un béton traditionnel par un fort dosage en sable et par l'absence ou un faible dosage de gravillons. Il se différencie également des mortiers par un plus faible dosage en ciment et surtout par sa destination.

L'incorporation de gravillon d/D autorise l'appellation « béton de sable » tant que le rapport G/S reste inférieur à 0.7 (G = gravillon ; S = sable) on parle alors de béton chargé [Ilham Aguida, 2007, AFNOR, 1995].

Il s'agit d'un matériau de construction connu bien avant le béton traditionnel d'aujourd'hui comme en témoignent certains ouvrages, mais il a été complètement abandonné après la découverte du béton à gros granulats qui donne de meilleures performances.

Du fait de la raréfaction des stocks de gros granulats dans certaines régions du sud algérien, d'autres solutions doivent être envisagées. Disposant d'un important gisement de sable sous forme de dunes et des ergs, un matériau complètement abandonné et insuffisamment utilisé et dont les technologies d'exploitation et de mise en œuvre sont maîtrisables rapidement ce qui nous a incité à l'utiliser dans un but de vulgarisation des matériaux locaux en tant que matériau seul ou corrigé pour béton de structures.

Les précédents travaux menés dans le cadre du Projet National Sablocrete ont montré l'intérêt d'un tel matériau, aussi bien sur le plan technologique, que sur le plan environnemental [Sablocrete, 1994 ; Chanvillard, 2000]. Le béton de sable (BS) a fait également l'objet de différentes recherches et de nombreuses applications [Benaïssa et coll., 1992 ; Breyse et coll., 1997 ; Hadjoudja, 2001 ; Bederina et coll., 2005 ; Bouziani et coll., 2012] et fait même l'objet d'une norme expérimentale P18-500 [AFNOR, 1995].

Norme :

Le BS a fait l'objet d'une norme française NF P 18-500 ; c'est un béton fin constitué par un mélange de sable(s), de ciment, d'addition(s) et d'eau ; outre ces composants de base, le BS comporte habituellement un (ou plusieurs) adjuvant.

I.4. INTERETS D'UTILISATION ET LIMITES DES BETONS DE SABLE

I.4.1. Intérêts des bétons de sable

De nos jours, le béton ne nécessite pas un niveau très élevé de résistance. Par contre il exige parfois des caractéristiques qui peuvent être mieux assurées par le béton de sable. Parmi ces caractéristiques, on peut citer [Chauvin et coll., 1988] : l'excellente maniabilité et la bonne cohésion sans ségrégation. D'autre part, l'aspect de parement et l'esthétique des ouvrages sont plus assurés par l'utilisation d'un béton de sable, dont le poids est plus faible et adapté aux structures fortement armées.

En plus de ces propriétés spécifiques, un autre intérêt incite à utiliser le béton de sable, c'est l'abondance de la matière première dans certaines régions, et la raréfaction des gros granulats.

I.4.2. Limites des bétons de sable

A l'heure actuelle, les connaissances sur le béton de sable ne permettent pas un remplacement systématique du béton classique, soit pour des raisons économiques, soit pour des raisons techniques [Chauvin et coll., 1988] :

- Raisons économiques: Des études ont montrés que, par l'utilisation des ajouts, on peut augmenter d'une façon considérable la résistance d'un béton de sable. Toutefois, la multiplication des ajouts ou l'augmentation du dosage en ciment n'est pas sans incidence sur le coût. Dans la mesure où ce béton n'apporte pas « un plus » dans l'usage envisagé il est donc inutile de chercher des performances supérieures. Tout sera donc fonction du contexte local en matière de granulats et de l'usage envisagé.

- Raisons techniques : Le peu de connaissances sur les caractéristiques et le comportement du béton de sable (comme le retrait, fluage, etc...) les exclut dans l'immédiat comme des éléments de structure fortement sollicités ou précontraints; de plus, les données sur la durabilité sont encore peu nombreuses, quoi que rassurantes.

I.5. PARTICULARITES DES BETONS DE SABLE

I.5.1. Quantité de pâte élevée

Le BS se distingue d'un béton traditionnel par une quantité élevée de pâte et un fort dosage de sable au détriment du dosage de gravillons. Lorsque le diamètre maximal des granulats diminue, le dosage de ciment dans un BS devient relativement important par rapport à celui dans un béton traditionnel. La Figure I.4 montre la relation entre le dosage de ciment et le pourcentage de granulats fins dans un béton.

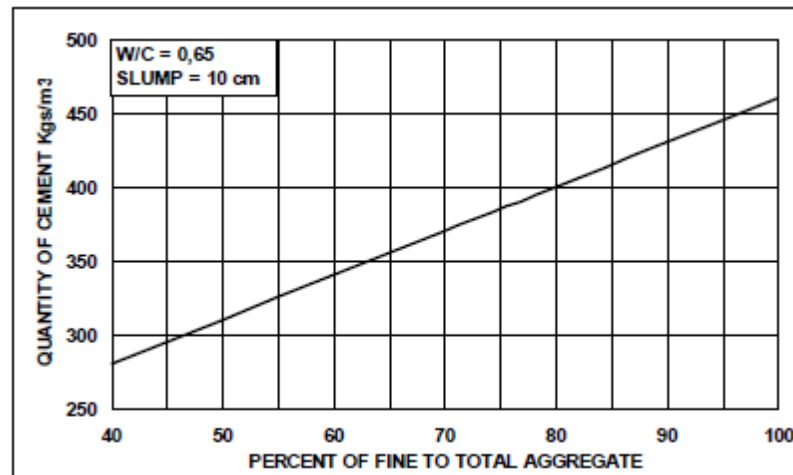


Figure I.4 : Relation entre le dosage de ciment et le pourcentage de granulats fins dans un béton [Stamatopoulos, 1971].

Pour éviter un dosage élevé de ciment, une addition de granulométrie voisine de celle du ciment doit être introduite. Les éléments fins jouent un rôle important dans la rhéologie de la pâte de ciment. Des études ont montré qu'au-delà d'une certaine teneur, les fines jouent le rôle de lubrifiant et cela est d'autant plus important qu'elles sont finement broyées [CNERIB, 1992]. Ainsi, que l'ajout d'une addition, permet de diminuer le coût de béton et d'améliorer considérablement sa compacité.

Dans le cas du BS, le dosage d'additions est souvent important, généralement entre 70 et 220 kg/m³ et parfois plus. Alors, le choix du type et de la finesse d'une addition doit s'effectuer soigneusement, car il va influencer considérablement sur les caractéristiques du BS.

I.5.2. Peu ou pas de gros granulats

La différence entre un BS et un béton traditionnel réside principalement dans la différence granulométrique. Un BS peut contenir un certain pourcentage de gravillons (Figure I.5), on l'appelle dans ce cas, béton de sable chargé; l'ajout de gravillons en faible quantité peut améliorer certaines performances (maniabilité, retrait, résistance, fluage).

Pour qu'un BS chargé se distingue d'un béton traditionnel, une condition doit être satisfaite : rapport massique Gravillons/Sable (G/S) reste inférieur à 0.7 [SABLOCRETE, 1994].

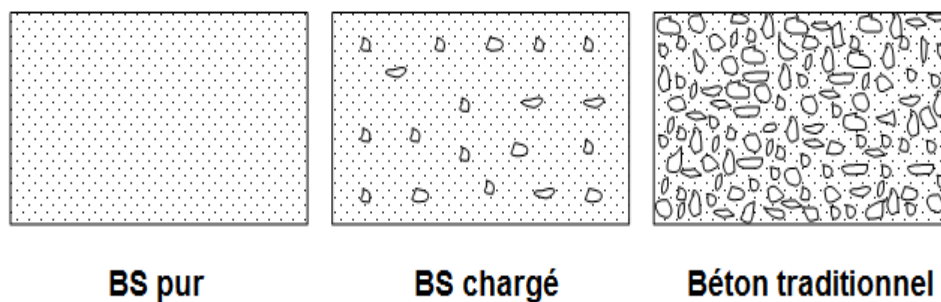


Figure I.5 : Schéma explicatif de l'apparence du BS pur, BS chargé et du béton traditionnel [SABLOCRETE, 1994].

I.5.3. Simple mise en place

La granulométrie fine et la consistance plastique et très plastique du BS, lui favorisent une simple mise en place notamment dans les zones très ferrillées, par rapport au béton traditionnel. L'utilisation d'additions dans le BS améliore la compacité de son squelette granulaire et joue un rôle important dans son comportement rhéologique, en lui conférant plus de fluidité. En plus, l'aspect de parement et l'esthétique des ouvrages sont plus assurés par l'utilisation d'un BS.

I.5.4. Faible tendance à la ségrégation

La quantité élevée d'éléments fins dans un BS et l'absence de gravillons, et donc sa plus grande homogénéité, confèrent à ce dernier un meilleur comportement que les bétons traditionnels vis-à-vis du phénomène de ségrégation. De Larrard a trouvé qu'un dosage élevé de gravillons ou de superplastifiant et un rapport E/C élevé dans un béton favorisent le risque

de ségrégation, par contre une distribution bien équilibrée de la structure granulaire minimise ce risque [De Larrard, 1999].

I.6. FORMULATION

Dans la formulation des bétons traditionnels, on cherche généralement d'obtenir les propriétés essentielles : l'ouvrabilité et la résistance mécanique, à partir d'une combinaison de leurs constituants (sable, gravillon, ciment et eau). Dans ce cas, il existe plusieurs méthodes de formulation permettant de viser ces propriétés, en se fixant généralement la taille des plus gros granulats sur la base de considérations technologiques [Chanvillard, 1996].

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

Dans le cas des bétons ordinaires, le jeu de constituants se réduit au minimum à un gravillon, un sable, un ciment et de l'eau. Aujourd'hui la gamme de constituants disponibles pour formuler des bétons s'est étendue avec les adjuvants et les ajouts (fillers, fibres,.....etc). Les méthodes de formulation traditionnelles présentent alors des limitations évidentes [De Larrard, 1993]. Il existe de nombreuses méthodes de formulation permettant de viser les deux propriétés essentielles : l'ouvrabilité et la résistance, en se basant généralement sur la taille des plus gros grains des granulats

Dans le cas du BS (caractérisés par sa granulométrie fine), l'application directe des méthodes de formulation adaptées aux bétons traditionnels conduit généralement à des dosages très élevés en ciment. A cet effet, les pâtes de ces bétons contiennent toujours, en supplément du ciment et de l'eau, des ajouts et des adjuvants, afin de minimiser le dosage de ciment.

En ce qui concerne les bétons de sable, qui font partie des nouveaux bétons aux propriétés spécifiques intéressantes (finesse granulométrique, ouvrabilité...), la démarche de formulation demeure très empirique. Différentes approches ont été envisagées pour appréhender les caractéristiques de résistance des bétons de sable. Par contre la prise en compte de l'ouvrabilité comme critère de formulation demeure compliqué.

Deux types d'approches de formulation sont présentées : une approche théorique, basée essentiellement sur l'optimisation de la compacité du BS en partant de la relation de Caquot et une méthode expérimentale, basée sur la réalisation de gâchées [SABLOCRETE, 1994].

I.6.1. Approches théoriques

I.6.1.1. Formulation par optimisation de la compacité

Caquot a donné une relation entre le volume des vides (V) dans un empilement de grains à partir de son étendue granulaire (d/D) :

$$V = V_0 (d/D)^{0,2} \quad \text{(I-1)}$$

Où: V_0 est une constante expérimentale, qui varie entre 0.7 et 0.8.

Le principe est d'estimer le dosage en fines à partir de la compacité des constituants solides du BS, d'une façon à les séparés en deux parties : fines ($<80\mu\text{m}$) et sable ($80\mu\text{m}/D$). Donc, ce dernier représente une porosité (P_s) définie selon la relation de Caquot, soit :

$$P_s = V_0 (0,08/D)^{0,2} (\% \text{ volumique}) \quad \text{(I-2)}$$

Pour estimer le dosage volumique en fines (les fines dans ce cas regroupent le ciment et l'addition) correspondant au comblement de la porosité, donnée par la relation (I-2) et nécessaire pour l'obtention de la compacité optimale du mélange, Caquot a supposé que le volume de l'ensemble des particules inférieures à $80\mu\text{m}$ égal au volume du vide associé à l'empilement de ces fines :

$$\text{Fines} = 0,5V_0 (0,08/D)^{0,2} (\% \text{ volumique}) \quad \text{(I-3)}$$

La porosité du mélange granulaire (en présence de fines) se décompose en la somme d'un volume d'eau (e) et d'un volume de vides (v). D'après la formule (I-1) de Caquot, la porosité minimale est donnée par la relation suivante :

$$(e + v)_{\min} = V_0 (d/D)^{0,2} \quad \text{(I-4)}$$

(d/D) représente l'étendue granulaire y compris les fines.

Une estimation de la valeur de (d) est nécessaire pour calculer la porosité minimale. Dans le cas d'un mélange fluidifié d est donné par la formule suivante :

$$d = 60/(f \cdot \rho) \text{ (mm)} \quad \text{(I-5)}$$

Où :

f est la surface spécifique de fines (cm^2/g),

ρ est la densité de fines.

Dans le cas d'un mélange non fluidifié, le diamètre moyen des floes est pris de l'ordre de 20 à 25 μm .

Dans les BS, le volume d'air piégé est légèrement supérieur à celui dans le cas des bétons ordinaires. Le dosage en eau est estimé en fonction du volume d'air piégé. Un ordre de grandeur peut être obtenu par la formule suivante, qui donne des teneurs en air de l'ordre de 2.5 à 5%.

$$v = k \cdot e \text{ (l/m}^3\text{)} \quad \text{(I-6)}$$

k est une constante prise entre 0,1 et 0,25.

Finalement pour estimer le dosage de sable, il suffit de compléter au mètre cube la somme des dosages des constituants fines, eau et vides :

$$\text{sable} = 1000 - \text{fines} - e - v \text{ (l/m}^3\text{)} \quad \text{(I-7)}$$

1.6.1.2. Formulation à maniabilité fixée

Les travaux réalisés par Chanvillard *et al.* (1996) portant sur la formulation des BS ont pu établir l'influence de la distribution granulométrique du sable, pour ensuite proposer une méthode de formulation.

Les auteurs ont trouvés que la compacité d'un mélange granulaire, donnée par la formule (I-1) de Caquot ne dépend pas seulement de l'étendue granulaire d/D , mais aussi de sa distribution granulométrique. La Figure I.6, qui a été obtenue par des mélanges identiques et de même étendue granulaire mais de différents modules de finesse du sable, montre l'influence de la distribution granulométrique du sable (caractérisée par le module de finesse) sur la maniabilité.

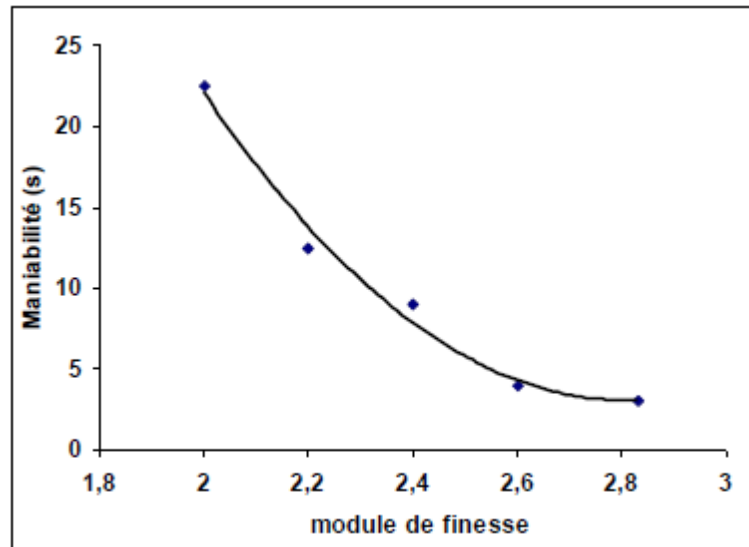


Figure I.6 : Evolution de la maniabilité en fonction de module de finesse du sable.

[Chanvillard, 1996]

Ils ont expliqué la relation entre le module de finesse et la maniabilité par la notion d'épaisseur de pâte. Le volume de pâte dans un BS, peut être décomposé en un volume de remplissage (V_r), comblant les vides entre les grains de sable et un volume d'écartement (V_e), assurant l'ouvrabilité du BS (Figure I.7).

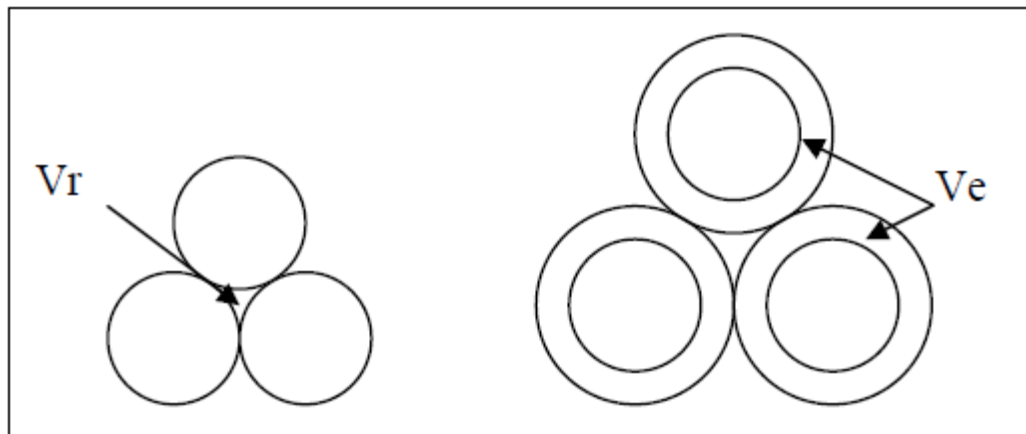


Figure I.7 : Schéma explicatif de la notion d'épaisseur de pâte. [Chanvillard, 1996]

Cette relation est caractérisée par un coefficient K , appelé « facteur d'extension granulaire », qui s'exprime par le volume de pâte de remplissage V_r et le volume du sable V_s :

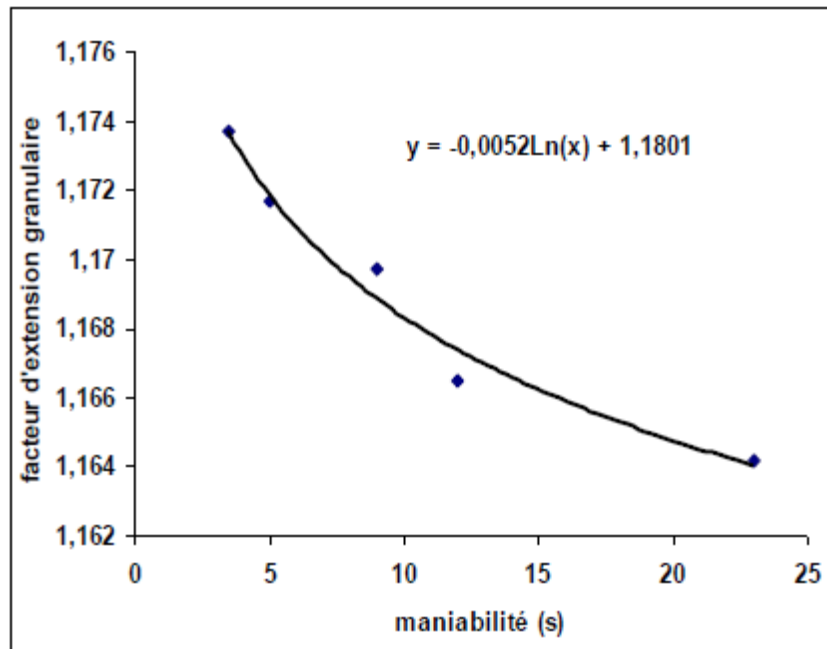


Figure I.8 : Evolution du facteur d'extension granulaire en fonction de la maniabilité des BS. [Chanvillard, 1996]

En fonction de la compacité, le dosage des fines peut être estimé :

$$\text{fines} = c_f \cdot V_p \quad (\text{I-13})$$

c_f – compacité du mélange de fines.

V_p – volume de la pâte, où :

$$V_p = 1000 - V_s \quad (\text{I-14})$$

Le volume des fines est décomposé en la somme de volume du ciment et volume d'additions.

Finalement, le volume de l'eau (e) est calculé à partir du volume des vides (v) :

$$e = V_p - \text{fines} - v \quad (\text{I-15})$$

I.6.2. Méthode expérimentale

Dans la méthode expérimentale le but de formulation reste le même, c'est pouvoir formuler un BS avec un squelette granulaire le plus compact possible. Elle est basée sur la méthode dite Baron- Lesage [SABLOCRETE, 1994].

Les différentes étapes de formulation sont les suivantes :

I.6.2.1. Mélange sans fines

Le but de cette étape est de réaliser un mélange de ciment, d'eau, de sable et d'adjuvant pour avoir une maniabilité de 7 à 10 secondes au maniabilimètre LCL.

- Choix de dosage du ciment

Généralement, le dosage minimal en ciment est imposé par les normes, en fonction des exigences d'un cahier de charge donné. Soit c le volume du ciment.

- Fixation de dosage en eau

Le volume en eau (e) est souvent choisi selon l'expérience (généralement 220 l d'eau pour 350 kg de ciment, 250 l pour 400 kg de ciment) et il sera ajusté, si nécessaire en fonction de la maniabilité désirée.

- Estimation de dosage du sable

Par l'introduction d'un adjuvant fluidifiant, nécessaire pour défloculer le mélange, en volume connu Va (proposé par le fabricant) et sachant qu'un BS contient toujours un volume d'air v de l'ordre de 2.5 à 5%, nous pouvons donc déduire le volume de sable de manière à avoir un mètre cube du béton voulu, soit :

$$c + e + Va + v + \text{sable} = 1000 \text{ (litres)} \quad \text{(I-16)}$$

I.6.2.2. Détermination de dosage en fines

Pour déterminer le dosage en fines d'addition, il faut réaliser plusieurs gâchées à un rapport E/C constant et de différents dosages en fines. Pour chaque gâchée, on compare la masse volumique apparente réelle avec la masse volumique apparente théorique et on détermine sa maniabilité.

L'objectif est de corriger le dosage en sable dans un mètre cube de béton par la relation (I.16), jusqu'à obtenir une maniabilité désirée et avoir l'égalité entre les masses volumiques apparentes théorique et réelle. La maniabilité sera réglée en fonction de l'adjuvant utilisé selon les besoins de la mise en œuvre du BS sur chantier.

Les résistances mécaniques devront être contrôlées par des essais mécaniques. Si les résistances obtenues ne sont pas satisfaisantes on peut modifier les dosages d'eau et/ou d'adjuvant, ou on refait l'étude en changeant le dosage en ciment.

I.7. PROPRIETES RECHERCHEES

I.7.1. à l'état frais

I.7.1.1. Maniabilité

En général, la maniabilité d'un béton dépend essentiellement de la quantité d'eau utilisée. Le béton de sable, où les granulats sont caractérisés par une grande surface spécifique, nécessite plus d'eau que le béton classique, ceci se traduit par des valeurs du rapport E/C systématiquement supérieures à 0,5 et se situe généralement entre 0,6 et 0,7. Cependant si l'on considère le rapport $E/(C+F)$ (eau/ciment+filler), on obtient des valeurs similaires à celles des bétons classiques [Sablocrete, 1994].

a) Effet des Fillers

En général, selon la granulométrie du sable, la maniabilité s'améliore avec l'augmentation du dosage en fines (ciment ou addition minérales) [Hadjoudja, 2001 ; Guoxue et coll , 2006]. Pour certains sables dunaires par contre, elle chute, mais après un certain optimum, elle commence à s'améliorer [Ahmed Chaouche, 1993]. La maniabilité dépend aussi de la nature des fines incorporées. Logiquement, l'ajout de fines de type sphérique, en diminuant la quantité des vides intergranulaires, permet de rendre l'eau disponible et donc d'améliorer la maniabilité [Sablocrete, 1994].

b) Effet de la granulométrie du sable

La maniabilité dépend du module de finesse de sable, elle s'améliore avec le module de finesse (M_f) [Chauvillard et coll, 1996 ; Bederina, 2000 ; Bederina et coll, 2006]

La figure I.9 montre que plus le module de finesse augmente plus le temps d'écoulement diminue ce qui implique une amélioration de la maniabilité.

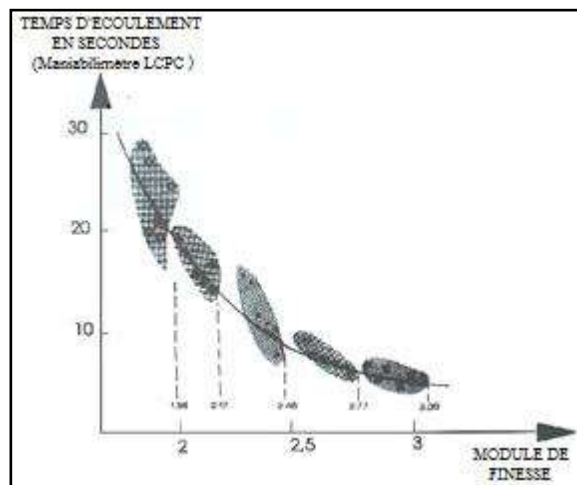


Figure I.9 : Maniabilité en fonction du module de finesse du sable

Influence de la teneur en fines [Sablocrete, 1996]

c) *Effet du rapport E/C*

Pour un dosage égal en ciment, la maniabilité dépend (comme pour les autres bétons) du rapport E/C ou E/(C+F). Elle s'accroît généralement avec l'augmentation du rapport E/C [Benmalek et coll., 1997 ; Hadjoudja, 2001 ; Bederina et coll., 2005].

1.7.1.2. Compacité

La compacité d'un granulat est définie comme le rapport du volume solide sur le volume total et correspond à un complément à l'unité de la porosité. C'est l'un des paramètres qui influe sur les performances du béton. Elle est bien sûr complémentaire à la porosité [Dreux, 2002]. Dans un mélange granulaire, plus le diamètre du plus gros grain diminue, plus la porosité augmente.

C'est le cas des granulats des bétons de sable, où le diamètre ne dépasse pas 5 mm. Bien que dans ce cas-là cet inconvénient soit compensé par l'ajout de fines, le béton de sable reste toujours moins compact qu'un béton ordinaire [C.E.B.T.P, 1986].

a) Effet de la granulométrie du sable

Plus la porosité initiale du sable est importante, plus le besoin en fines va être élevé. Or la porosité dépend de la distribution granulométrique du sable, qui, elle-même, dépend de la nature du sable. A titre d'exemple, un béton de sable dunaire ($D_{\max} < 1 \text{ mm}$) nécessite plus de fines qu'un sable alluvionnaire ($D_{\max} \leq 5 \text{ mm}$).

Dans la plage de module de finesse comprise entre 1.9 et 2.9 (Fig.I.10), on observe un accroissement de la porosité avec l'augmentation du module de finesse. Cela est expliqué par le fait que le sable passe d'un excès en fines à une distribution normale.

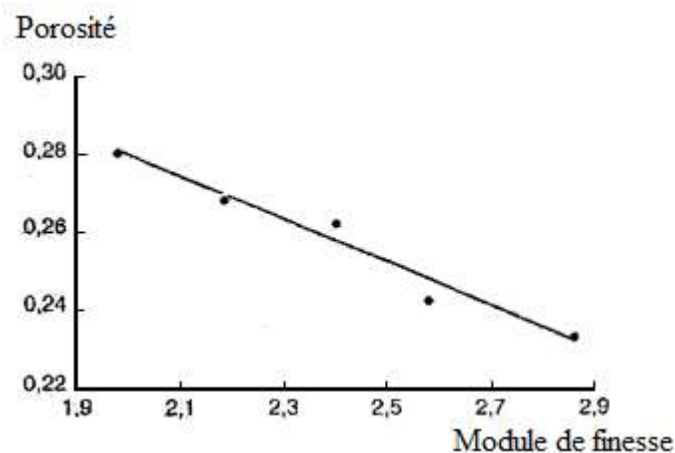


Figure I.10 : Evolution de la porosité en fonction du module de finesse des sables
[Chauvillard, 1996]

b) Effet des Fillers

Ils sont destinés pour le remplissage des vides des sables, dans le but d'augmenter la compacité par création d'une étendue granulaire continue [Chauvin, 1988 ; Benaïssa et coll., 1992]. Mais, il faut noter qu'il existe un dosage optimal à partir duquel la compacité commence à diminuer [Bederina, 2000 ; Bederina et coll., 2005]. D'autre part, Plus la finesse des fillers est grande, plus ce dosage optimal en fillers est important et la compacité du béton est plus élevée [Sablocrete, 1994].

c) Effet des gravillons

Dans le but d'améliorer certaines caractéristiques mécaniques et rhéologiques (résistance, maniabilité, retrait,...), il est possible d'utiliser des granulats 0/15 comme constituants dans le béton de sable à condition que le rapport massique G/S ne dépasse pas 1 alors que ce rapport est compris entre 1,4 et 1,7 pour le béton classique [Benaïssa et coll., 1992]. On mentionne alors un béton de sable chargé.

d) Les fibres

Les fibres (polypropylène, acier, fonte amorphe...) sont utilisées comme renfort au sein d'une matrice afin de contribuer à l'amélioration de la résistance à la traction et pour diminuer le phénomène du retrait au jeune âge. Leur rôle dépend de leur nature, leur dosage et leur longueur. (Houari 1993)

I.7.2. à l'état durci

I.7.2.1. Comportement mécanique

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 et en compression.

a) Effet des fillers

La résistance mécanique en compression peut être différente en fonction de certains nombres de paramètres et en particulier le dosage, la finesse et la nature des fines [Sablocrete, 1994]. Un dosage optimal et une plus grande finesse des ajouts permet d'augmenter la compacité et par conséquent la résistance (Fig. I.11) [Bederina et coll., 2005; Guoxue et coll., 2006]. En ce qui concerne la nature des fines, différentes natures ont été essayées et comparées. Le résultat obtenu est que les fines calcaires sont les plus réactives avec le ciment et donnent les meilleures résistances [Coquillat, 1992 ; Tsivilisa et coll., 2000].

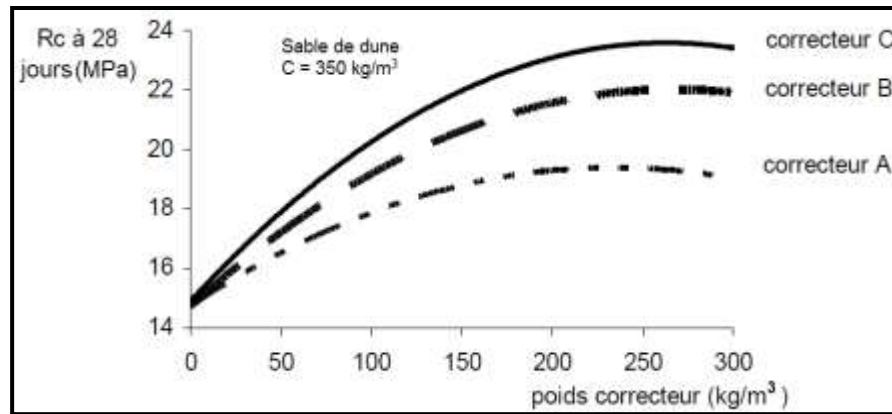


Figure I.11 : Effets du dosage et de la finesse de l'ajout sur la résistance à la compression du béton de sable [Boudaoud et coll., 2003]

b) Effet de la granulométrie du sable

On constate pour une même valeur du rapport E/C, que la résistance n'est pas trop influencée par le diamètre maximal des grains de sable (D_{max}) (Fig I.12). Mais la maniabilité s'améliore avec l'augmentation de D_{max} . Par contre à des rapports E/C différents et à une maniabilité constante, la résistance diminue avec la diminution de D_{max} . Ceci est dû, comme nous l'avons déjà vu, au besoin plus élevé en eau. Notons qu'à une même maniabilité, la résistance du béton de sable dunaire est nettement inférieure à celle du béton de sable alluvionnaire [C.E.B.T, 1986].

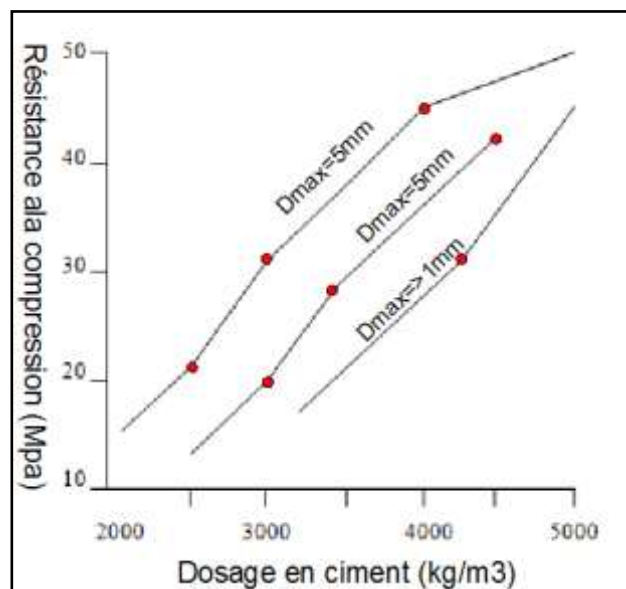


Figure I.12 : Effet de la granularité sur la résistance [Sablocrete, 1994].

c) Effet du rapport E/C

Comme pour les bétons classiques, la résistance du béton de sable diminue avec l'augmentation du rapport E/C.

Pour des compositions avec un dosage en ciment de 250 à 450 kg/m³, la résistance est atteinte par adjonction de fines (calcaires généralement) et de plastifiant ; la résistance à la compression à 28 jours se situe entre 12 et 60 MPa selon la composition, l'adjuvant et le mode de la mise en œuvre.

I.7.3. Adhérence aux armatures

Le phénomène d'adhérence observé dans le béton de sable est pratiquement identique à celui du béton ordinaire, ce qui permet d'envisager l'utilisation de ce béton comme un béton structurel [Batata, 1994]. La contrainte d'adhérence moyenne a des valeurs proches par rapport à celles des bétons traditionnels [Benmalek et coll., 1997]. La granularité du béton de sable n'est pas un élément essentiel puisque à même niveau de résistance, l'adhérence mesurée pour un sable dunaire (très fin) est supérieure à celle obtenue pour un sable alluvionnaire [Sablocrete, 1994]. La nature des aciers (lisse ou tors) ainsi que leur diamètre ont aussi une influence sur la valeur de l'adhérence [Amrani, 1991].

I.7.4. Module d'élasticité

Le comportement du béton de sable est similaire à celui des bétons classiques. La valeur du module d'élasticité du béton de sable est voisine de celles des bétons de GORISSE [Gorisse, 1972], elle est plus faible que celle d'un béton classique ce qui donne au béton de sable une grande déformabilité et donc une moindre fissuration.

Les travaux de GORISSE [Gorisse, 1972] sur les micro-bétons ont montré qu'il existe une relation entre le module d'élasticité et le diamètre maximal des grains. Ce dernier propose la formule suivante pour le calcul du module d'élasticité :

$$E_i = 10^3 (6 \log D + 25) \quad (\text{I-17})$$

Avec :

D = diamètre maximal des grains (mm)

E_i = module d'élasticité (MPa)

Il obtient de ce fait :

$E_i = 22.000 \text{ Pa}$ pour $D_{\max} = 1.6 \text{ mm}$

$E_i = 26.000 \text{ Pa}$ pour $D_{\max} = 5 \text{ mm}$

I.7.5. Retrait

Des études expérimentales sur les retraits des bétons de sable ont conclu que le retrait d'auto-dessiccation est caractérisé par une cinétique semblable à celle du béton classique. Une différence de l'ordre de 10% existe par rapport à ce dernier. Cette différence, couramment observée à l'intérieur même de la gamme des bétons, est due à une perte de la masse plus rapide pour le béton de sable. Le rapport des déformations de retrait de dessiccation des deux bétons (aussi bien de sable et qu'ordinaire) en fin d'essai (6 mois) est égal à 1.6 correspondant globalement au rapport de perte de la masse au même âge, soit 1.48. En conclusion nous pouvons dire que le retrait est une fonction croissante de l'eau évaporable (taux de séchage) [Ahmed Chaouche, 1993 ; Benaïssa et coll., 1992]. Notons que la valeur du retrait du béton de sable est voisine de celle du béton ordinaire s'il est conservé dans un milieu étanche. Si la conservation se fait dans un milieu sec, la valeur du retrait du béton de sable peut atteindre le double de celui d'un béton classique.

I.7.6. Fluage

La cinétique du fluage propre du béton de sable est plus rapide que celle du béton classique. Les différentes études menées sur les bétons de sable ont montré que les valeurs de fluage propre du béton de sable sont deux fois plus importantes que celles du béton classique.

Notons que ces résultats correspondent à un niveau de résistance en compression de 25 MPa. Un béton de sable plus résistant n'aura pas le même comportement (un fluage plus faible) [A Chaouche, 1993 ; Benaïssa et coll., 1992]. (Houari 1993)

I.7.7. Durabilité

La durabilité des bétons de sable comme pour les bétons classique, est souvent gouvernée par la constitution physique de la matrice ainsi que la porosité, la répartition géométrique des pores et la perméabilité. D'une façon générale, les bétons de sable sont plus poreux que les bétons ordinaires. Leurs pores sont plus nombreux, plus petits et davantage monodimensionnels.

Cette distribution poreuse particulière contribue pour une bonne part à leur bon comportement vis à vis des essais de durabilité [SABLOCRETE, 1994]. La profondeur de carbonatation en ambiance naturelle pourrait être importante du fait de la faible dimension des pores ($<10 \mu\text{m}$) et de l'importance de l'absorption initiale. Des résultats expérimentaux laissent apparaître une quasi-proportionnalité entre profondeur carbonatée et l'absorption initiale [SABLOCRETE, 1994]. Cependant la carbonatation ne présente pas un danger pour le béton armé et pour les zones suffisamment éloignées des armatures puisqu'elle a tendance à boucher les pores par la formation de CaCO_3 . Si la cure d'eau est bien faite, elle favorise alors l'hydratation qui a tendance de colmater les capillaires existants.

I.7.7.1. Absorption capillaire

L'absorption dépend essentiellement du taux et de la continuité des petits pores : un matériau qui présente un taux élevé de petits pores continus aura une absorption capillaire très élevée, et par conséquent une durabilité plus faible. Par contre s'il présente un taux élevé de petits pores discontinus, l'absorption capillaire sera moins élevée et la durabilité s'améliore, c'est le cas d'un béton de sable bien compacté.

I.7.7.2. Perméabilité

Bien que le béton de sable soit plus poreux qu'un béton traditionnel, Il est moins perméable. La taille et la répartition des pores ne facilitent pas la migration de la vapeur à travers le béton. C'est une donnée importante dans le domaine d'isolation des bâtiments.

Cette distribution poreuse particulière, observée sur les bétons de sable optimisés dans le cadre du projet SABLOCRETE, contribue en bonne partie à leurs bons comportements vis-à-vis des essais de durabilité [SABLOCRETE, 1994].

D'autres part, la perméabilité à l'eau est du même ordre de grandeur que celle du béton traditionnel ; quant à la perméabilité à l'air, elle conduit à des résultats globalement inférieurs ou comparables à ces mêmes bétons classiques [Benmalek, 1997].

I.7.8. Comportement thermique

La comparaison entre un béton de sable et un béton classique montre que ces deux types de béton ont un comportement thermique équivalent. La chaleur massique d'un béton étant égale à la somme des chaleurs massiques de ses constituants, il est normal de trouver une valeur similaire pour les deux types de béton. La conductivité thermique des bétons traditionnels varie de 1.4 à 1.8 W/m/°C. Les conductivités thermiques mesurées sur béton de sable sont légèrement inférieures. Le béton de sable est alors plus isolant. Ce résultat s'explique par la porosité plus importante du béton de sable.

Les coefficients d'échange thermique sont supérieurs pour le béton de sable et le coefficient de dilatation est du même ordre de grandeur [SABLOCRETE, 1994].

I.7.9. Microstructure et fissuration

A une certaine échelle, la microstructure du béton de sable est continue, homogène et compacte. La pâte de ciment durcie est amorphe et dépourvue de fissures notables. Les observations au MEB établissent que l'hydratation se développe de façon normale et la morphologie de l'interface pâte-granulats ou auréole de transition n'est pas caractérisée par une texture particulière [SABLOCRETE, 1991]. Le caractère peu fissuré du matériau est corroboré par les travaux de Benaïssa. A [Benaïssa, 1992]. Par ailleurs, il a été montré la bonne homogénéité due à l'absence de ségrégation [SABLOCRETE, 1991].

1.8. Domaines d'utilisation des BS

Les applications qui ont concerné des domaines aussi larges que le bâtiment et le génie civil ont mis en évidence l'intérêt que peut présenter l'utilisation de BS, tant techniquement qu'économiquement [Gluais, 1993].

Il existe plusieurs domaines où les propriétés particulières du BS en font le matériau convenable [SABLOCRETE, 1994].

I.8.1. Fondations profondes

Le béton utilisé dans le bétonnage des pieux profonds doit présenter des spécificités par rapport au béton traditionnel utilisé dans les fondations superficielles. Ainsi, des règles et recommandations énoncent les caractéristiques fondamentales suivantes des bétons pour pieux exécutés en place [LCPC, 1979]:

- Fluidité et mise en place sans vibration ;
- Résistance à la ségrégation et au délavage ;
- Prise lente et contrôlée ;
- Compacité élevée ;
- Bonnes performances mécaniques.

Le Béton de Sable, de par sa conception et sa composition répond à la majorité des conditions évoquées ci-dessus.

Dans le domaine des fondations, le BS, de par ses caractéristiques, permet notamment la construction de pieux à grande profondeur, les injections et reprises en sous-œuvre, d'autant que ces travaux se font le plus souvent en milieu subaquatique et doivent éviter tout délavage; de cela, il facilite tous les travaux délicats ou difficiles à réaliser avec des bétons courants.

I.8.2. Bâtiment

Le secteur de bâtiment est le gros consommateur de béton. Plusieurs familles de bétons sont apparues pour faire une grande diversité d'usage dans ce secteur. Le BS prend sa place dans ces familles et présente des caractéristiques spécifiques qui lui permettent d'en faire un matériau recherché pour un usage donné. L'avantage d'utiliser le BS dans le secteur de bâtiment est généralement du à ses qualités d'aspect (bon garnissage des moules, bon enrobage des aciers même en cas de ferrailage dense).

Dans le domaine de préfabrication, le Béton de Sable garantit, par sa finesse granulométrique, un aspect de surface excellent des éléments préfabriqués par rapport au béton traditionnel. Contrairement aux bétons traditionnels, cette finesse rend aussi le BS accessible aux cotes minimales des pièces préfabriquées, ce qui permettra de mouler des pièces de formes très complexes avec des ferrailages denses.

L'introduction de sable de dunes a permis d'obtenir un BS d'une structure granulaire plus compact et de confectionner des blocs plus légers tout en montrant des résistances mécaniques comparables par rapport aux bétons traditionnels [Bouziani, 2011-a].

I.8.3. Routes

Dans le domaine des routes, les BS peuvent être utilisés dans la réalisation des structures de chaussées pour améliorer leur résistance à l'usure et dans la production des équipements de voirie extrudés (ex : caniveaux, bordures, séparateurs, etc.).

L'utilisation de BS dans ce domaine se trouve en premier lieu justifiée par l'économie sur le coût des matériaux, la facilité de mise en oeuvre et la qualité esthétique des produits. Dans le cas des structures de chaussées ou des dallages utilisant le BS, une étude de dimensionnement est nécessaire. Les calculs doivent être réalisés en respectant les normes et les règles en vigueur, notamment celles des performances mécaniques.

I.8.4. Autres applications

L'utilisation du BS peut s'étaler aux applications spéciales telles que : les ouvrages d'art, l'enrochement artificiel et les accessoires de VRD (Voiries, Routes et Divers). Le BS peut constituer une réponse technique et économique avantageuse pour certains domaines d'ouvrages d'art privilégiant les qualités de maniabilité et d'esthétique. La réalisation des ouvrages d'art nécessite des bétons de hautes performances et très hautes performances. Formuler un BS de hautes performances est évidemment contrarié par l'absence partielle ou totale de gravillons.

Dans le domaine d'enrochements artificiels, le choix de BS se fera en fonction des considérations économiques et esthétiques plutôt que techniques. Les enrochements artificiels sont généralement destinés le plus souvent au milieu marin, donc sont exposés à l'agressivité de l'eau de mer et aux chocs des corps étrangers transportés par les vagues.

Dans le domaine de préfabrication d'accessoires de VRD, le BS est plus convenable notamment dans la préfabrication de tuyaux, de regards et tout accessoires utilisés dans les canalisations étanches d'assainissement destinés à l'évacuation des eaux usées ou des eaux pluviales.

Toutefois, il existe encore d'autres applications qui pourraient trouver intérêt à utiliser le BS tels que : les travaux souterrains (tunnels, galeries, collecteurs,...), les barrages et les travaux portuaires [SABLOCRETE, 1994].

Cependant, presque toutes les applications du béton traditionnel sont également réalisables en BS. Seuls les critères technico-économiques font la différence de choix.

I.8.5. Techniques particulières

Les applications citées précédemment, ont privilégié dans certains cas l'utilisation des BS par rapport aux bétons traditionnels. Dans certaines techniques de mises en œuvre, l'utilisation du BS répond parfaitement à la solution de quelques problèmes, qui restent à nos jours, mal résolus par le béton traditionnel. C'est le cas des techniques de projection de béton et de bétons fluides.

I.8.5.1. Béton de sable projeté

Le domaine d'application de la projection de béton comprend la réparation et les renforcements des ouvrages en béton et en maçonnerie ainsi que les constructions de formes complexes.

La projection de BS est une technique intéressante spécialement dans le cas des réhabilitations des structures d'ouvrages souterraines. Par sa finesse granulométrique, le BS représente une alternative aux bétons traditionnels, particulièrement dans le cas de présence des ferraillements denses (figure 1.13).



Figure I.13 : Panneau 3D en BS projeté [Benaissa, 2008]

1.8.5.2. Bétons de sable fluides

Les bétons fluides ont été développés récemment afin d'améliorer les conditions d'exécution et la productivité des chantiers ainsi que la qualité et la durabilité des ouvrages. Ces bétons ont trouvé un grand intérêt dans certaines conditions d'utilisation telles que : l'absence de vibration, la faible accessibilité aux zones ferraiées et aux formes complexes des coffrages et le besoin de pomper le béton à des distances importantes. Le concept du BS s'adapte parfaitement aux conditions particulières citées ci-dessus. En plus, l'absence totale ou partielle des gros granulats dans le BS minimise le risque de ségrégation [Ambroise, 1993-a].

La fluidité doit être assurée par l'utilisation des adjuvants superplastifiants afin d'éviter l'ajout excessive et incontrôlé de l'eau, qui entraîne une diminution des performances physico-mécaniques et de la durabilité. Pour que les bétons de sable fluides soient homogènes et stables vis-à-vis du phénomène de ségrégation et de ressuage, l'utilisation des éléments fins ou d'un adjuvant de viscosité est obligatoire.

PARTIE B : GENERALITES SUR L'INTRODUCTION DES FIBRES METALLIQUES DANS LES BETONS DE SABLES

I.9. INTRODUCTION

L'utilisation des fibres dans la construction remonte à plusieurs siècles. Depuis les trente dernières années, l'intérêt pour leur utilisation ne cesse de croître pour la fabrication du béton de sable, béton autoplaçant et du béton projeté.....etc [Houari, 1993].

Fabriquées à partir de la fonte, de plastique, de verre et de matériaux naturels (cellulose) ou autres, les fibres sont disponibles en diverses formes (rondes, plates, gaufrées et déformées), dont la longueur varie généralement entre 6 mm et 150 mm et dont l'épaisseur est comprise entre 0,005 à 0,75 mm. Elles sont ajoutées au béton durant le malaxage.

Les fibres apportent au béton de nombreux avantages, notamment sur le comportement mécanique sous sollicitation de traction. Leur utilisation nécessite néanmoins la connaissance des mécanismes d'action ainsi que les précautions de mise en œuvre.

I.10. HISTORIQUE

La première fois d'utilisation de fibre métallique dans le béton a été en 1910 dans l'optique d'améliorer les performances mécaniques du béton. Le développement moderne de fibre métallique a commencé dans le début des années 1960, les fibres polymères ont été entrées en exploitation commerciale dans la fin des années 1970, les fibres de verre ont été expérimentées pour l'utilisation dans les années 1980, et la fibre de carbone a attiré beaucoup d'attention dans les années 1990. Les fibres sont ajoutées dans la matrice, pour améliorer la résistance à la traction par flexion du béton, et surtout pour le but de contrôler la fissuration, d'empêcher la coalescence des fissures et de changer le comportement du matériau renforcé de fibres en cousant les fissures. Cependant, le béton renforcé de fibres métalliques (BRFM), en tant que matériau dans les applications industrielles, a vu le jour aux Etats-Unis au début d'années 60 suite aux travaux de Romualdi et Baston 1963 conduisant au dépôt d'un brevet. Il était produit en utilisant du ciment hydraulique classique, des granulats (sable et gravier), de l'eau et de fibres. Afin d'améliorer la maniabilité et la stabilité du béton renforcé de fibres, un super plastifiant peut également être ajouté dans le mélange. Ce béton n'est pas considéré comme un substitut du béton ordinaire, mais comme un matériau de type différent [Houari, 1993].

I.11. CONNAISSANCE DU MATERIAU

Le béton renforcé de fibres métalliques (BRFM) est un matériau composite dont les propriétés mécaniques résultent de la combinaison des propriétés du béton, des fibres et de l'interface entre les matériaux.

L'ajout de fibres dans le béton modifie ses propriétés. Largement utilisées pour assurer la pérennité des ouvrages, certaines sont capables de couvrir les macros fissures. Une pièce en béton renforcé par des fibres permettrait d'augmenter la résistance au feu (par limitation des ouvertures des fissures et aussi protègent les armatures traditionnelles) [Houari, 1993].

I.12. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES BRF

Les améliorations suivantes des propriétés des bétons de fibres sont considérées comme acquises [Houari, 1993] :

- Résistance aux chocs et la dureté.
- Résistance à la fatigue
- Résistance à l'impact plus élevée.
- Amélioration de la ductilité.
- Comportement différent à la fissuration.
- Entraînant un retard notable de la fissuration.

Mais il a été remarqué certains inconvénients dus à l'utilisation de fibres:

- Réduction de la maniabilité en fonction de volume et longueur de fibre.
- Pendant la livraison, les fibres sont enchevêtrées, d'où la formation d'oursins lors du malaxage implique la difficulté de mise en place.
- Actuellement le prix des fibres est relativement très élevé et de ce fait le prix de revient du m³ de béton de fibre peut paraître excessif par rapport à celui du béton traditionnel.

I.13. DEFINITION DES FIBRES

Le terme "Fibre" il se rapporte à un corps solide flexible, de forme sensiblement cylindrique, d'un diamètre de quelque centimètre dont la longueur égale à quelques milliers de fois ce diamètre. Ce terme est généralement aussi utilisé pour définir le constituant élémentaire

des structures textiles. Par ailleurs, on distingue la fibre de longueur réduite ou fibre courte, de 20 à 150 mm, de la fibre de grande longueur ou filament continu.

Les fibres ont pour rôle principal de maîtriser la fissuration et de reprendre les efforts au droit des fissures éventuelles. Elles confèrent au béton des performances et des propriétés liées à leur nature, leurs formes et à leurs caractéristiques mécaniques [Houari, 1993].

I.14. LES DIFFERENTS TYPES DE FIBRES

Les fibres sont ajoutées aux matériaux cimentaires afin d'améliorer leurs caractéristiques à l'état durci. Les fibres utilisées dans la confection des bétons sont classées en quatre grandes familles selon leurs caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques :

- ❖ **Les fibres métalliques :**
 - Acier
 - Inox
 - Alliage amorphe.
- ❖ **Les fibres organiques :**
 - Polypropylène
 - Polyéthylène
 - Polyamide (nylon)
 - Acrylique
 - Polyester
 - Mélange polypropylène/polyéthylène
 - Aramide (kevlar)
 - Alcool polyvinylique.
- ❖ **Les fibres minérales :**
 - Verre
 - Carbone
- ❖ **Les fibres naturelles :**
 - Hévéa
 - Sisal

Chaque famille de fibres présente des caractéristiques mécaniques et physiques et des propriétés spécifiques.

Les fibres les plus couramment utilisées dans le béton de sable sont présentées dans la figure 1.14.



Les fibres métalliques.

Les fibres polypropylènes.

Les fibres de fonte amorphe.

Figure I.14 : Types des fibres. [Houari, 1993]

I.14.1. Fibres de fonte amorphe



Figure I.15: Fibres de fonte amorphe.

I.14.1.1. Définition

Ces types de fibres sont obtenus par refroidissement brusque, d'un alliage métallique à base de fer, sont constituées de petits rubans de 1 à 3 mm de largeur, contribuent à la limitation des fissures sous chocs.

Ces fibres métalliques sont constituées d'un alliage de fer et de chrome (obtenu par trempe rapide d'un jet de métal liquide qui permet de constituer une structure amorphe).

Elles offrent une résistance mécanique importante en traction (résistance en traction 1

700 MPa) et une très grande résistance à la corrosion. Elles se présentent sous forme de rubans minces très fins, souples et flexibles (1 à 1,6 mm de largeur, 5 à 30 mm de longueur, 0,25 à 0,30 mm d'épaisseur). La surface spécifique élevée de chaque fibre favorise le renforcement du béton et la maîtrise de la fissuration. (Houari, 1993).

Les dosages courants sont de l'ordre de 15 à 40 kg/m³.

Leurs domaines d'emploi et d'utilisation privilégiés sous forme de béton, de béton projeté et de mortier sont vastes :

- Travaux de voirie : scellement d'éléments de voirie, de mobilier urbain.
- Travaux de dallages et de chapes.
- Produits préfabriqués.
- Ouvrages hydrauliques.
- Travaux souterrains [Houari, 93].

I.15. L'INFLUENCE DES FIBRES SUR LE BETON

I.15.1. Influence des fibres sur le béton à l'état frais

L'utilisation des fibres se traduit par des améliorations relatives a :

- ❖ La cohésion du béton frais (la compacité).
- ❖ La facilité de moulage ou de mise en place dans le coffrage.
- ❖ Une facilité et rapidité de mise en œuvre (la maniabilité)

I.15.2. Influence des fibres sur le béton à l'état durci

- ❖ La déformabilité avant rupture.
- ❖ La résistance à la traction par flexion.
- ❖ La ductilité et la résistance post-fissuration.
- ❖ La limitation de la fissuration due au retrait.
- ❖ La répartition homogène de la fissuration.
- ❖ La résistance aux chocs.
- ❖ La résistance à la fatigue.
- ❖ La résistance à l'usure.
- ❖ La résistance à l'abrasion.

- ❖ La tenue au feu.
- ❖ La capacité à absorber de l'énergie

I.16. CONCLUSION

La synthèse des recherches et des études réalisées sur les bétons de sables ont pu démontrer que le béton de sable pour ses performances physiques et mécaniques qui offre, peut présenter une solution très intéressante dans plusieurs domaines de la construction et dans plusieurs régions.

Plusieurs travaux de recherches ont été réalisés sur l'effet de la nature des sables et sur la valorisation de sables des dunes dans les bétons ordinaires et les bétons de sable. Ces travaux ont permis de combler beaucoup de lacunes concernant les bétons à base de sable des dunes. La plupart de ces travaux ont été le résultat des recherches effectuées aux laboratoires du Sud Algérien

Les multiples travaux de recherche montrent que la mise en œuvre des Bétons de sable renforcés ou non par des fibres. est souvent difficile et a toujours posé de problème.

À travers les résultats trouvés en littérature qui sont en contradiction.

Néanmoins il existe un manque de connaissances sur le comportement des bétons de sable sous les conditions climatiques sévères ainsi les variations dimensionnelles comme le retrait et le comportement différé tel que le fluage, ce qui rend difficile la maîtrise de l'utilisation de bétons de sable.

La vulgarisation du béton de sable ne vise pas à substituer les bétons traditionnels performants mais plutôt à être une nouvelle source de béton de qualité, ainsi cette vulgarisation va s'inscrire dans le cadre de la valorisation des ressources locales abondantes (sable de dune dans le Sud et Sable calcaire dans les Hauts Plateaux) et du développement des techniques innovantes.

Pour cela dans ce premier chapitre un état de l'art sur les bétons de sables pour montrer le manque d'informations sur la substitution totale ou partielle des sables dunaires a été exposé, suivi des généralités sur l'influence de l'introduction des fibres métalliques sur le comportement de ces bétons de sable. Ce chapitre a présenté un état des connaissances sur les matrices cimentaires renforcées de fibres et en particulier les fibres métalliques.

Ces deux thèmes d'impacts et de retombées importantes seront développés dans les deux prochains chapitres (**II et III**) par deux études indépendantes s'appuyant sur deux vastes investigations expérimentales à savoir :

- L'élaboration de ceux formulations de bétons de sable fillerisés à base de sable dunaire respectivement SD1 et SD2.
- La substitution partielle des sables dunaires par des sables recyclés de déchets marbre rentrant dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux et des sous produits de la région.
- Le remplacement partiel ou total des sables de dune par des sables calcaires issus de concassage dans le but de la préservation et la sauvegarde de l'environnement par la vulgarisation des bétons de sables à base des sables calcaires de la région des hauts plateaux.

Les bétons de sable sont des bétons anciens utilisés grâce à son excellente maniabilité, sa bonne cohésion sans ségrégation et l'utilisation des ressources locales en abondance dans la nature mais une faible résistance à la traction et des fissures causées par le retrait. Ces inconvénients peuvent être limitées avec un renforcement par des fibres car ces dernières apportent un caractère ductile et améliorent le comportement et la capacité portante résiduelle post-fissuration ainsi qu'une résistance à la traction [Houari, 1993].

L'incorporation des fibres dans les bétons améliore d'une manière positive leurs propriétés à la fois physiques, mécaniques et rhéologiques, du fait que les fibres possèdent des caractéristiques mécaniques généralement élevées, ainsi qu'une adhérence appropriée, favorisant l'augmentation de la densité et la résistance à la traction ainsi une amélioration de la cohésion et la ductilité

Dans notre travail, par analogie aux travaux antérieurs, on a choisi des fibres de fonte amorphe pour renforcer notre béton de sable qui feront l'objet du chapitre III.

Donc une question s'impose, quelle est l'influence de l'introduction de ces fibres (fonte amorphe) sur les bétons de sable à l'état frais et durci? Et leurs comportements aux cycles de gel/dégel.

C'est dans ce contexte que s'insère le quatrième chapitre qui exposera un état de connaissances sur un des phénomènes de durabilité touchant les bétons de sable soumis à des conditions climatiques sévères ou modérées (hiver rigoureux), où il y a un manque dans la

littérature), suivi d'une contribution à l'étude des bétons de sable soumis aux cycles de gel/dégel dont le but est de les qualifier aux conditions climatiques extrêmes.

Les paramètres d'étude (ou les facteurs d'influences) retenus dans cette contribution sont :

- Le taux de substitution totale, du sable dunaire par des sables calcaires
- L'effet de l'introduction des fibres métalliques (de fonte amorphe) avec deux élargissements et deux teneurs.

A partir de cette synthèse bibliographique, on a pu constater un manque des informations sur le comportement des bétons de sable face aux cycles gel dégel.

Ce qui nous a poussés à vouloir étudier leurs comportements vis-à-vis des conditions climatiques extrêmes et aux attaques chimiques externes.

Pour vulgariser l'utilisation des bétons de sable dans notre pays qui se caractérise par sa diversité climatique, ainsi sa richesse notamment en sable de dune au sud et au sable de carrière au nord sans oublier le recyclage des sous produits ou déchets industriels.

Pour cette raison et dans ce cadre que s'insère notre contribution même partielle aux progrès, du savoir et de la science par l'étude de l'influence du type de sables (de dune, calcaire ou déchets de marbre) sur les comportements des bétons de sable vis-à-vis des conditions climatiques extrêmes et/ou des attaques chimiques, et dans la même thématique nous avons essayé d'analyser les effets apportés par l'introduction des fibres métalliques de types fonte amorphe aux bétons de sable.

Les phénomènes de durabilité retenus tels que l'attaque chimique, le gel/dégel et l'humidification/séchage sont des phénomènes un peu plus complexes et qui nécessitent la compréhension de plusieurs paramètres susceptibles de les influencer

Après toute cette présentation qui nous laisse découvrir ces intérêts, une réflexion (dans les perspectives) a été proposée sur l'étude du passage d'un béton de BS à un BSAP afin d'améliorer ces techniques qui sont basées sur la propriété auto-plaçante.

Nous voulons montrer et mettre en évidence en lui consacrant cette section, pour favoriser les propriétés auto-plaçantes et ses avantages sur le béton.

I.17. REFERENCES

[AFNOR, 1994] AFNOR, NF P 18-433, Liants hydrauliques – Technique des essais – Détermination du retrait et du gonflement, février 1994.

[AFNOR, 1995] AFNOR Standard NF P 18-500, Bétons de sables, 12 p, Juin 1995.

[Ahmed Chaouche, 1993] Ahmed Chaouche Ali. (1993) : "Etude des caractéristique des bétons de sable de dune", Mémoire de magister ; ENP Alger. p.108.

[Ambroise, 1993-a] Ambroise J. "Bétons de sable fluides. Propriétés mécaniques et physiques". Rapport de recherche, Institut National des Recherches Appliquées, INSA, Lyon, Mars1993.

[Ambroise, 1993-b] Ambroise J., Prea J. et Sari M. "L'adjuvantation des bétons de sable", Rapport de recherche, Institut National des Recherches Appliquées, INSA, Lyon, Septembre 1993.

[Amrani, 1991] Amrani, Y. (15-17 oct. 1991) : "Béton de sable : expérience marocaine"; Actes du colloque Franco-Maghrébin ' Construire en matériaux locaux ' ; Marseille, pp. 133-152 .

[Batata, 1994] Batata A. et Merouani Z. "Le béton de sable de dune : sa formulation et ses propriétés ", Séminaire International sur la Qualité du béton en Climat Chaud. Institut du Génie Civil, Université du Blida et CTC Sud. Ghardaia, Algérie, 1994, pp. 346-355.

[Bederina, 2000] M. Bederina, Caractérisation mécanique et microstructure des bétons de sables locaux: effets des filler et de la nature des sables sur le comportement mécanique du matériau., Mémoire de Magister, Université A.tledji de Laghouat, Algérie, pp110, Octobre 2000.

[Bederina, et coll., 2005] Bederina M., Khenfer M. M., Dheilily R. M. and Quéneudec M. "Reuse of local sand: effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concretes", Cement and Concrete Research, Vol.35 (2005): 1172-1179.

[Bederina et coll., 2006] Bederina M., Marmoret L., K. Mezreb, Khenfer M.M., Bali A., Queneudec M.,(2006): Effect of the addition of wood shavings on the thermal conductivity of the sand concretes -experimental study and modelling, Construction and Building Materials, Vol. n°21, 3 February 2006, pp. 662–668

[Bederina, 2007] BEDERINA M., (2007), Caractérisation mécanique et physique des bétons de sables à base de déchets de bois, Thèse de doctorat, ENP, Algérie.

[Benaïssa et coll., 1992] Benaïssa, A. ; Morlier, P. ; Viguier, C. ; Cauvin, J.J., (juin 1992) : "Cinétique de dessiccation et retrait du béton de sable" ; Annales de L'ITBTP. N°504.

[Benaïssa, 2008] Benaïssa A., Kamen A., Chouicha A., et Malab S., " Panneau 3D au béton de sable ", Matériaux et Structures, 41 (2008):1377-1391.

[Benmalk et coll., 1997] Benmalek, M. ; Bali A. (01-03 juin 1997): "Le béton de sable de dune, un matériau de construction performant pour le monde arabe"; C.A.M, à Damas, Syrie.

[Boudaoud, 1993] Z.Boudaoud, Etude des mortiers, des micro-bétons et des bétons de sable à base de sable fin de Boussaada , Mémoire de Magistère, université Med Boudiaf.

[Boudaoud et coll., 2003] Z. BOUDAUD, Z. RAHMOUNI, D. BREYSSE. Etude des effets du cobroyage d'un clinker et du sable dunaire sur la broyabilité des liants et des caractéristiques d'un béton de sable. Actes du séminaire international GEOMAT'02. M'sila, Algérie 2003.

[Bouziანი, 2011-a] Bouziანი T., Lamara M., et Bédérina M. " Valorisation de sable des dunes dans la préfabrication des blocs de béton ", 1er Séminaire National de Génie Civil sur les Matériaux et Protection de l'Environnement, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, 14 &15 Mars 2011.

[Bouziანი, 2011-b] Bouziანი T., Benmounah A., Bédérina M. and Lamara M. "Effect of Marble Powder on the Properties of Self-Compacting Sand Concrete", The Open Construction and Building Technology Journal, 5 (2011): 25-29.

[Bouziანი, 2012] Bouziანი T., Bédérina M., and Hadjoudja M., " Effect of Dune Sand on the Properties of Flowing Sand Concrete (FSC) ". International Journal of Concrete Structures and Materials, 6 (2012) 1: 59-64.

[Breysse et coll., 1997] Breysse D., Alain D., Attar A., Chauvin J.J., Contribution des granulats au comportement mécanique des bétons de sable chargés , Revue française de génie civil. Vol.1, pp 89-114, 1997.

[Chanvillard, 1996] Chanvillard G. et Basuyaux O., "Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées", Bulletin de Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, LCPC, Paris, 205 (1996): 49-63.

[Chanvillard et coll., 2000] Chanvillard G. Giraudon G. et Roque O., "Panneaux préfabriqués de façades en béton de sable renforcé de fibre de fonte amorphe", Fibre-Reinforced Concretes (FRC), 5ème Symposium International -RILEM, Lyon, sept. 2000.

[Chauvin et coll., 1988] Chauvin, J.J. ; Grimaldi, G., (Sept. 1988) : "Les bétons de sable"; Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC) ; N°157, pp.9-15.

[C.E.B.T.P, 1986] C.E.B.T.P, Dec. (1986) : "Synthèse de connaissance sur le béton de sable" ;Opération 52 G 119 ; LRPC de bordeaux.

[CNERIB, 1992] CNERIB, Centre National d'Etudes et Recherches Intégrées du Bâtiment, "Bétons de Sable ", Rapport de recherches. Tipaza, Algérie, Décembre 1992.

[Coquillat, 1988] Coquillat. G. betons de sable hypercompacts. Rapport interne C.E.B.T.P, Annee 1988.

[Coquillat, 1992] Coquillat G., "Béton de sable à haute performance", Centre Expérimental de Recherches et d'Etudes du BTP (CEBTP), Rapport de recherche. Bordeaux, Juin 1992.

[De Larrard , 1993] DE LARRARD FRANÇOIS "optimisation of high performances concrete, Micromechanic of concrète and cementitious composites", Press poly et univ, Romandes, Lausanne, 1993

[Dreux, 1986] DREUX. G., Technique générale de construction « composition du béton » C2 220 /1986

[Dreux, 2002] DREUX G, FESTA J., (2002), Nouveau guide du béton et de ses constituants, Huitième édition, Edition Eyrolles.

[Hadjoudja, 2001] Hadjoudja.M, "Contribution à l'étude physico-mécanique du béton de sable de dunes", Mémoire de Magister, Université A.tledji de Laghouat, Algérie, pp168, Octobre 2001.

[Houari, 1993] Houari. H, « Contribution à l'étude du comportement des bétons renforcées de fibres méttaliques sous l'action des charges maintenus et cycliques », Thèse de Doctorat, Université INSA de Lyon, Paris, pp 244, 1993

[Gluais, 1993] Gluais G. et Bru J. P., "Confortement d'une digue en enrochements par injection de béton de sable", Bulletin de liaison, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, LCPC, Paris1993, N° 183- NIT 3697, pp. 91-95.

[Gorisse, 1972] F.GORISSE, (1972), Etudes des micro-bétons pour modèle de structures, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics N° 291, France,

[Gorisse, 1978] GORISSE. F., (1990), Essais et contrôle des bétons, Édition EYROLLES, vol.200, Paris, 1978.

[Guoxue et coll., 2006] Guoxue Z., (2006), Jianxia Song, Jiansen Yang, Xiyuan Liu, (2006): Performance of mortar and concrete made with a fine aggregate of desert sand, Building and Environment, 41 (6) 1478-1481.

[Ilham Aguida, 2007] B. Ilham Aguida. "sand concrete, optimal composition and the humidity and the temperature effect on the compressive strength." Mémoire de magister, université de Bechar, Algérie., 2007.

[LCPC, 1979] Rapport de Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. "Les pieux forés : recueil des règles de l'art", Décembre 1979.

[SABLOCRETE, 1994] SABLOCRETE, Projet National de Recherche et Développement, "Bétons de sable : caractéristiques et pratiques d'utilisation", Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris 1994, pp. 237.

[SABLOCRETE, 1996] SABLOCRETE. "Sand Concrete National Research & Development Project". ENPC Press, France, 1996.

[STAMATOPOULOS, 1971] Stamatopoulos A. C. and Kotzias P. C., " Concrete without coarse aggregate ", ACI Journal, Septembre 68 (1971): 704-711.

[Tsvilisa et coll., 2000] Tsvilisa S., Batisa G., Chaniotakis E., Grigoriadis Gr., Theodossisa D., (2000): Properties and behavior of limestone cement concrete and mortar, Cement and Concrete Res, 30, 1679-1683.

[Tsvilis et coll., 2003] S.Tsvilis, J. Tsantilas, G. Kakali, E. Chaniotakis and A. Sakellariou, . The permeability of portland limestone cement concrete. , Cement and Concrete Research, Vol. n°33, 2003, pp.1465-1471.

Chapitre II

INFLUENCE DE SUBSTITUTION DES SABLES DE DUNE PAR DES DECHETS DE MARBRE SUR LA DURABILITE DES BETONS DE SABLE FILLERISES

II.1. INTRODUCTION

Les bétons de sable fillerisés sont composés essentiellement de mélange en proportions convenables de sable (un ou plusieurs), de fines, de ciment, d'eau et d'autres additions, ils peuvent présenter une bonne alternative pour remplacer les bétons classiques dans la confection de certains éléments de construction, Melais and Achoura 2011. Ce type de béton, utilisé pour valoriser les ressources naturelles locales en l'absence d'autres granulats, possède des propriétés spécifiques intéressantes, telles que la résistance, l'absence de ségrégation, le bel aspect de surface et la petite granularité, qui favorisent son utilisation dans certaines structures, Gendouz, Kadri E H, 2015.

Le constituant principal en tant que squelette de ces bétons est le sable. Afin de préserver l'environnement (protection) des dégradations et/ou épuisements dues à l'exploitation intensive du sable dunaire et du sable de concassage, le rôle des chercheurs est de trouver d'autres ressources par la valorisation des sous produits industriels.

Le développement durable fait que le recyclage et la valorisation de sous produits industriels constituent désormais un souci qui s'impose.

La réutilisation des différents déchets, qui constituent une gêne environnementale, dans ce type de béton a fait l'objet de nombreux travaux, Bederina, Kenfer 2010. Parmi ces travaux, on peut citer l'introduction des déchets de plastique comme granulats, les déchets de béton de démolitions, déchets de briques et les déchets de marbres.

La valorisation de ces types des déchets est devenue une solution nécessaire aux problèmes économiques des pays vu l'épuisement progressif des granulats et minimiser l'impact environnemental. C'est dans ce contexte que s'ouvre la réflexion sur l'élaboration des bétons de sable fillerisés utilisant des ressources abondantes et en particulier les déchets de marbre et les fillers calcaires. 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.

Ce travail vise à étudier la possibilité d'utiliser les déchets de marbre (poudre jetée exposée aux intempéries) de la carrière de Fli-fila (à l'Est de l'Algérie) comme sable dans la formulation d'un béton de sable fillerisé. Les déchets de cette carrière ont été récupérés dans plusieurs matériaux de construction, comme ajout dans les matériaux cimentaires, comme granulats dans les bétons et mortiers et comme sable dans un béton de sable.

Berdoudi et al., 2017 ont élaboré une étude qui porte sur l'utilisation des fillers de déchets de marbre comme ajout dans le ciment, ils ont trouvé une amélioration de la consistance de la pâte de ciment, une augmentation du temps de début et fin de prise et les meilleures performances en compression et en traction par flexion sont données par les mortiers de 5% de taux de substitution, le retrait augmente avec l'augmentation du taux de substitution mais reste dans les normes.

L'introduction de sable de déchets de marbre dans la composition des mortiers a été étudié par Hebhouh et al., 2014; ce travail montre que ce déchet diminue l'ouvrabilité et augmente la densité et les résistances au jeune âge. Le même type de déchet a été introduit comme sable dans la composition d'un béton hydraulique et remplace partiellement un sable de mer avec des taux de remplacement de 25, 50, 75 et 100%, dans cette étude la densité maximale et obtenue pour un taux de 25%, une diminution l'ouvrabilité et l'air occlus et les meilleurs performances mécaniques sont données par les bétons substitués partiellement.

Le travail réalisé par Hebhouh et Houari 2010 sur l'utilisation des granulats de déchets de marbre dans la composition de béton montre une amélioration significative des performances mécaniques pour les mélanges substitués partiellement et une augmentation considérable de la cohésion, les mêmes résultats ont été confirmés par Belachia et Hebhouh, 2018.

Djebien et al., 2018 ont incorporé le sable de déchets de marbre dans la formulation d'un béton auto-plaçant avec des taux de 25 à 100%, ils ont conclu que le sable de déchets de marbre augmente la cohésion et la résistance à la ségrégation du béton auto-plaçant. Le sable de déchets de marbre a été introduit dans la composition d'un béton de sable à base de fibres végétales dans le travail réalisé par Rihia et al, 2019; les résultats indiquent une amélioration de l'ouvrabilité, réduction de la teneur en air occlus, augmentation des résistances initiale en compression et en traction par flexion. L'absorption capillaire et par immersion sont réduites jusqu'à un taux de 10%. Djebien et al.2015 ont utilisé les fines de déchets de marbre de la carrière de Fil-fila qui remplace partiellement les fines calcaires dans un béton de sable, ils ont constaté une amélioration des propriétés à l'état frais et durci en fonction de l'augmentation du taux de fines.

Dans ce chapitre, nous présentons une étude expérimentale pour quantifier l'apport des sables des déchets de marbre SM sur les propriétés des bétons de sable dunaire fillerisés ainsi élaborés, de façon à préciser ses domaines spécifiques d'utilisation et définir les données nécessaires aux critères de dimensionnement.

Nous allons discuter les résultats obtenus des bétons formulés à l'état frais et durci, à la suite d'une présentation des informations sur les caractéristiques intrinsèques des matériaux rentrant dans la composition des bétons de sable afin de les relier aux propriétés essentielles et utiles..

Les procédures de conception de ces bétons (malaxage et de conservation) seront aussi détaillées.

Ainsi sont examinées les propriétés physiques, mécaniques et durabilité, en fonction de diverses compositions de bétons de sable, ceci pour cinq taux de substitution. (0%, 5%, 10%, 15% et 20%).

II.2 Caractérisation des matériaux testés et Méthodologie d'essais

II.2.1. Matériaux utilisés

II.2.1.1. Sables

Dans cette étude deux types de sables sont utilisés, il s'agit d'un sable naturel de dune siliceux à granulométrie continue de provenance de Biskra (noté SD1 de classe 0/3) et un sable recyclé de déchets de marbre broyé de la carrière de Fli-fla (Skikda) (noté SM).

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 sables de ce matériau employés ont été obtenus par concassage suivi d'un broyage à l'aide un broyeur à boulet.

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

Les résultats expérimentaux obtenus sur le sable sont présentés ci-dessous dans le tableau II.1

Tableau II.1 : Propriétés des sables utilisés

Properties	SD1	SM
Masse vapp g/cm^3	1.29	1.50
Mvabs g/cm^3	2.580	2.750
Vb %	1	0.35
Es %	89	67
MF %	1.30	1.66
Teneur en fines %	2	8
Ab	1.37	2.40
CaCO ₃	--1.69	98.67
CaO	--	55.29
Al ₂ O ₃	0.50	0.14

Fe ₂ O ₃	0.75	0.09
SiO ₂	95.11	0.53
MgO	0.15	0.2
Na ₂ O	0.23	0.00
K ₂ O	0.200	0.01
Cl ⁻	0.00	0.025
SO ₃	0.01	0.04
PF	4	43.40
R. Insoluble	--	0.035

L'analyse granulométrique du sable de déchet de marbre est donné par le tableau II.2

Tableau II.2 : Analyse granulométrique du sable de déchet de marbre SM

Tamis en mm	Refus cumulés (%)	Tamisât en (%)
4	0,3	99,7
2	4,1	95,9
1	20,28	79,72
0.5	34,02	65,98
0.25	44,68	55,32
0.125	62,15	37,85
0.063	98	2
M _s (g)	375	
T _n	1,2	
Perte (%)	0,96	
MF	1,66	

L'analyse granulométrique du sable de dune est donnée dans le tableau II.3

Tableau II.3 : Analyse granulométrique du sable de dune SD1

Tamis en mm	Tamisât en (%)
4	100
2	96
1	92
0.5	77
0.25	66
0.125	34
0.063	2
MF	1.36

Les analyses granulométriques des deux sables sont présentées sur la figure II.1.

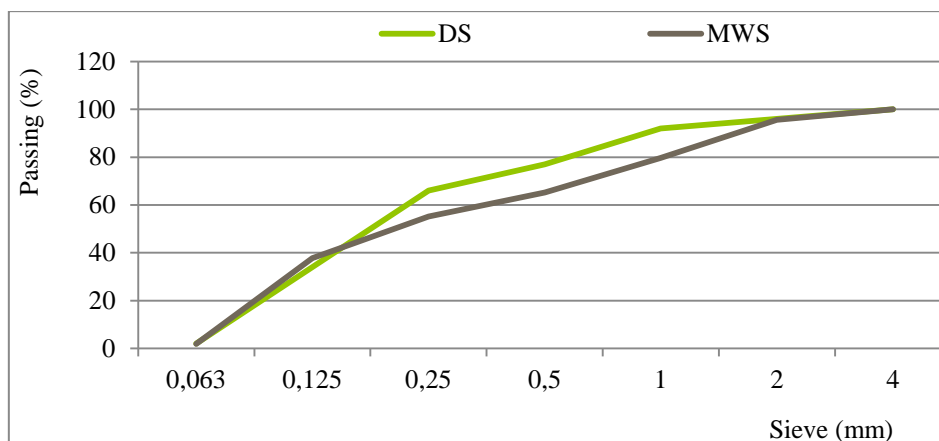


Figure II.1 : Courbes granulométriques des sables

III.2.1.2. Eau de gâchage

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

Sa température est de 28°C. L'analyse chimique est représentée dans le tableau II.4, les résultats montrent qu'elle répond à toutes les prescriptions des normes NF P18-404.

Tableau II.4 : Analyse chimique de l'eau de gâchage

Paramètres	Résultat	Unité	Observation
T°	28	C°	Turbidité: 1,44ntu Eau de bonne qualité chimique
Ph	7.5	--	
Cl	0.1	Mg/l	
TDS	297	Mg/l	
Conductivité	541	Us/cm	
Salinité	0.2	_____	

III.2.1.3. Ciment

Ciment CPA-CEM I 42.5N provenant de la cimenterie d'Ain el Kebira-Sétif (figure II.2), a une masse volumique absolue 3.22 g/cm³ et une surface spécifique de Blaine de 3100 cm²/g. (Caractéristiques voir fiche technique).



Figure II.2: Ciment portland CEM I d'Ain El Kebira

Les propriétés mécaniques du ciment CEM I sont présentées dans le tableau II.5.

Tableau II.5: Propriétés mécaniques de CPA-CEMI

Ages	2 jours	7 jours	28 jours
Résistance en traction par flexion en MPa	5,01	6,45	8,97
Résistance en compression en MPa	19,60	37,48	54,91
La prise	Début de prise	Fin de prise	/
	4h 6min	5h 6min	/

L'analyse chimique se fait par fluorescence par rayon X et par la méthode classique. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment sont présentées dans le Tableau II.6.

Tableau II.6 : Composition chimique et minéralogique du ciment CEM I 42,5

Désignation	Résultats en %	Désignation	Résultats en %
CaO	65.85	CaO Libre	0.5
Al ₂ O ₃	4.13	MS	2.43
Fe ₂ O ₃	4.16	MAF	0.88
SiO ₂	21.31	C ₃ S	72.25
MgO	1.34	C ₂ S	8.83
Na ₂ O	0.16	C ₃ A	3.14
K ₂ O	0.25	C ₄ AF	14.7
Cl ⁻	0.003	-	-
SO ₃	2.13	-	-

II.2.1.4. Fines calcaires

Fines calcaires F de la carrière de Ben Azzouz-Est de l'Algérie a une masse volumique absolue de 2.74 g/Cm³.

Passant au tamis 0.08mm supérieure a 79%

Tableau II.7 : Les caractéristiques physiques et chimiques

Designations	Fines calcaires
Masse volumique apparente	1.055
Masse volumique absolue	2.740
CaCO ₃	84,60
CaO	55,80
SO ₄ ⁻	-
Cl ⁻	0,21
Al ₂ O ₃	0,01
Fe ₂ O ₃	0,01
SiO ₂	0,14
MgO	-
Na ₂ O	0,01
K ₂ O	0,01

II.2.1.5. Adjuvant

Super plastifiant SP sous la forme d'un liquide, conforme à la norme EN 934-2.

L'adjuvant utilisé est super plastifiant utilisés dans cette étude est : Poly flow SR 5400 (haut réducteur d'eau conforme a la norme NFEN-2), est un super plastifiant haut réducteur d'eau nom chloré a base de poly carboxylate modifiés qui se présente sous la forme d'un liquide marron clair.

Les caractéristiques de l'adjuvant sont présentées dans le tableau II.8.

Tableau II.8 : Caractéristiques du superplastifiant

Désignations	Couleur	Densité	PH	Teneur en ions CL	Teneur Na ₂ O éq	Extrait Sec
Résultats	marron	1,07 ±0,02	5±1	≤ 0,1%	≤ 2,5 %	30± 1 %

II.3. PROGRAMME EXPERIMENTAL

L'objectif de ce travail est d'étudier les modifications apportées sur un béton de sable par le remplacement volumique partiel avec des taux de 5, 10, 15 et 20% d'un sable dunaire SD1 par un sable de déchets de marbre SM (blocs jetés exposés aux changements climatiques).

Nous abordons le problème par analogie avec les très nombreuses études menées sur les bétons de sable.

La formulation du mélange du béton témoin (BS0) a été obtenue a l'aide de la méthode de SABLOCRETE (SABLOCRETE, 1994) avec les paramètres fixes, le rapport E/C, le dosage en ciment, le dosage en fines et le dosage en adjuvant. Les compositions des mélanges (BS5,

BS10, BS15 et BS20) ont été obtenues en remplaçant le sable dunaire par 5, 10, 15 et 20% des taux de sable de déchets de marbre.

II.3.1. Formulation du béton de sable témoin BS (100%SD1)

II.3.1.1. Détermination du dosage en ciment

Le volume de fines égale au volume du ciment, La masse volumique absolue étant de 3220 kg/m³ et la masse du ciment est égale à 400 kg/m³.

II.3.1.2. Détermination du dosage en eau

Le rapport E/C est maintenu constant avec une valeur égale à 0,68 et le dosage en ciment étant de 400 kg/m³.

II.3.1.3. Détermination du dosage en superplastifiant

La masse volumique du superplastifiant égale à 1080 kg/m³ et la masse égale à 2% du poids de ciment. Le dosage volumique en superplastifiant est égal : 5,556 l/m³.

II.3.1.4. Détermination du volume des vides

[vides] = k[eau] avec k = 0,2. Donc le volume des vides est égal [vides] = 0,2×308 = 61,6 litre.

II.3.1.5. Détermination du dosage en sable

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

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

Sachant que la masse volumique absolue du sable est égale à 2580 kg/m³, le dosage pondéral du sable égale donc à 1207,8 kg.

Après l'ajustement de la formulation, on a trouvé un dosage en sable égale à 1277,21 kg.

Le Tableau II.9 montre les différentes compositions réalisées.

Tableau. II. 9 : Compositions des mélanges retenus

Mélanges	Taux de substitution (%)	E /C	SP (l/m ³)	CEMI (Kg/m ³)	F (Kg/m ³)	SD1 (Kg/m ³)	SM (Kg/m ³)

BS0	0%	0,68	5,556	400	98,64	1277,21	0
BS5	5%	0,68	5,556	400	98,64	1213,35	68,07
BS10	10%	0,68	5,556	400	98,64	1149,50	136,137
BS15	15%	0,68	5,556	400	98,64	1085,628	204,205
BS20	20%	0,68	5,556	400	98,64	1021,768	272,274

II.3.2. Notation des mélanges retenus

Dans cette section, on va essayer d'étudier premièrement l'influence de l'incorporation du sable de déchets de marbre sous différents dosages (0%,5%,10%,15%,20%) remplaçant le sable de dune sur le comportement des BS à l'état frais et à l'état durci afin de déterminer le mélange optimal. Ainsi on va déterminer les altérations observées de ces : mélanges dans un milieu agressif par des attaques chimiques

La notation des mélanges effectués comme suit :

BS : béton de sable à base de sable de dune.

SD1 : sable de dune.

SM : sable de déchet de marbre.

BS0 Béton de sable avec 00% de substitution (témoin)

BS5 Béton de sable avec 5% de substitution du sable SD1 par SM

BS10 Béton de sable avec 10% de substitution du sable SD1 par SM

BS15 Béton de sable avec 15% de substitution de sable SD1 par SM

BS20 Béton de sable avec 20% de substitution de sable SD1 par SM

II.3.3. Confection des mélanges retenus

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

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 24 heures.

II.3.3.1. Corps d'épreuves

Les corps d'épreuves ont été choisis selon les essais à réaliser de diverses formes et dimensions en conformité avec les normes en vigueur.

Les résultats, obtenus sur trois éprouvettes de chaque composition de même gâchée, du béton de sable, sont exprimés sous la moyenne de trois valeurs mesurées.

- 120 demi-prismes 4x4x16 cm : pour la résistance à la compression à 2, 7, 28 et 90 jours ;
- 60 prismes 4x4x16 cm: pour la résistance à la traction indirecte à 2, 7, 28 et 28 jours;
- 60 prismes 4x4x16 cm équipés de plots : pour les variations dimensionnelles et pondérales (retrait et perte de masse) et absorption d'eau par immersion;
- 60 cubes 5x5x5 cm : pour l'essai de durabilité Résistances chimiques (Attaques).

II.3.3.2. Conservation

Avant le démoulage (Figure II. 3) toutes les éprouvettes ont été conservées pendant 24 heures dans la condition ambiante du laboratoire.



Figure II. 3 : Epreuves avant le démoulage

Après 24 heures, les échantillons ont été démoulés (Figure II. 4), nous sélectionnons chaque éprouvette avec un crayon résistant à l'eau et introduit les éprouvettes pour les essais de compression, traction par flexion dans un bain d'eau a température $20^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$.



Figure II. 4 : Démoulage des éprouvettes

Les éprouvettes d'absorption par immersion sont conservées à l'air 28 jours ensuite elles sont immergées totalement dans l'eau à 20°C pendant une durée de 24 heures ensuite elles sont conservées dans l'étuve à 105°C .

Après 28 jours d'immersion dans l'eau, les éprouvettes $5 \times 5 \times 5 \text{cm}$ destinées à l'attaque chimique sont conservées dans les solutions citées ci-dessous:

- 5% d'acide chlorhydrique (HCL),
- 5% d'acide sulfurique (H_2SO_4),

II.4. METHODOLOGIE DES ESSAIS

II.4.1. Essais effectués sur le béton frais

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

II.4.1.1. Affaissement

Affaissement au cône d'Abrams (NF EN 12350-2). Cet essai appelé encore, essai Slump test 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.

II.4.1.2. Densité

Densité a l'état frais selon la norme NF EN 12350-6. 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.

II.4.1.3. Air occlus

Air occlus mesuré par un aéromètre à béton (NF EN 12350-7). 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.

II.4.2. Essais effectués sur le béton durci

Les essais sur béton durci visent à vérifier l'homogénéité des propriétés du matériau en place et qualifier les mélanges retenus.

Résistances en traction par flexion et en compression à l'âge de 2, 7, 28 et 90 jours mesurées respectivement sur éprouvettes prismatiques et demi prismes de dimensions 4x4x16 cm³ conservées dans l'eau conformément à la norme NF EN 12390-5.

II.4.2.1. Résistance à la traction par flexion

L'essai mécanique en traction par flexion (3 points) 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 (Figure II.5) est machine asservie en contraintes. La résistance à la traction par flexion a été évaluée avec une vitesse d'application du chargement de 0,1 MPa/s.



Figure II. 5 : Essai de traction par flexion

II.4.2.2. La résistance mécanique en compression

La résistance à la rupture par compression est mesurée par compression axiale des éprouvettes.

La presse utilisée (figure II.6) est asservie en force. La résistance en compression a été évaluée avec une vitesse d'application du chargement de 0,5 MPa/s.



Figure II. 6 : Essai de la résistance en compression

II.4.2.3. Le retrait et Perte de masse

L'objectif de cet essai est de mesurer, en fonction du temps, les variations dimensionnelles et pondérales due aux effets de l'hydratation et de la dessiccation des matériaux cimentaires. (NF P 18 – 433).

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

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 ($\Delta L/L$) en fonction du temps.

Parallèlement à ces mesures des variations dimensionnelles (retrait), l'évolution dans le temps des variations pondérales (perte des masses) des éprouvettes a été également suivie.

II.4.2.4. Essai d'absorption par immersion

L'essai d'absorption capillaire (Figure II.7) est également intéressant et facile à effectuer. Il renseigne globalement sur la structure et sur l'importance du réseau de porosité. Il est utilisé aussi en complément d'autres essais pour caractériser la durabilité du béton.

L'essai d'absorption par immersion a été réalisé conformément au mode opératoire de la norme européenne NF EN 480-5.



Figure II. 7 : Etuves pour l'essai d'absorption par immersion

Les éprouvettes d'absorption par immersion sont conservées à l'air 28 jours ensuite elles sont immergées totalement dans l'eau à 20°C pendant une durée de 24 heures ensuite elles sont conservées dans l'étuve à 105 °C.

II.4.2.5. Attaques chimiques

L'attaque chimique a été effectuée selon ASTM standard.

Les éprouvettes destinés à l'essai de la résistance chimique sont conservées après décoffrage dans l'eau pendant 28 jours (figure II.8) à une température de 20 ± 2 °C ensuite les éprouvettes seront pesées pour déterminer leur poids initial avant l'attaque chimique, puis immergées dans les solutions à:

- ✓ 5% HCL acide chlorhydrique (figure II.8)
- ✓ 5% H₂SO₄ acide sulfurique (figure II.9)



Figure II.8 : Bac de conservation d'éprouvettes à température contrôlée.

Les éprouvettes seront pesées avec une balance de précision de 0.01g après les avoir nettoyées trois fois avec l'eau de robinet pour éliminer le béton altéré et laissées sécher pendant

30 mn, cette opération de mesure de pesées sera effectuée aux échéances 1, 2, 7, 14, 21, 28, 56 et 90 jours, la solution d'attaque est renouvelée à sa totalité chaque 14 jours (selon les valeurs de pH).



Figure II.9 : Eprouvettes immergées dans 5% Hcl



Figure II.10 : Eprouvettes immergées dans 5% H₂SO₄

L'évaluation s'effectuera en mesurant la variation de la masse des échantillons suivant la formule:

$$\text{Variation de la masse (\%)} = [(M1 - M2) / M1] \times 100$$

M1 : masse de l'éprouvette avant immersion

M2 : masse de l'éprouvette nettoyée et séchée après immersion



Figure II.11 : Pesée des échantillons (balance de précision à 0.01g)



Figure II.12 : Les éprouvettes cubiques dans les solutions agressives

II.5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les valeurs indiquées correspondent à la moyenne des résultats obtenus sur trois éprouvettes différentes fabriquées à partir du même mélange (même gâchée). Les courbes moyennes sont représentées.

II.5.1. Densité

Tableau II.10 : Les résultats de l'essai de la densité

Types de béton	BSM 0%	BSM 5%	BSM 10%	BSM 15%	BSM 20%
La densité (g/cm ³)	2,140	2.190	2.216	2.314	2.279

La figure II.13 montre que l'augmentation du taux de substitution du sable de déchets de marbre SM entraîne une augmentation de la densité jusqu'à un taux de 15%, au-delà de ce

taux l'effet s'inverse. L'augmentation de la densité est expliquée par la plus forte densité du sable de déchets SM (Djebien et al., 2015, Rihia et al., 2019, Buyuksagis et al., 2017).

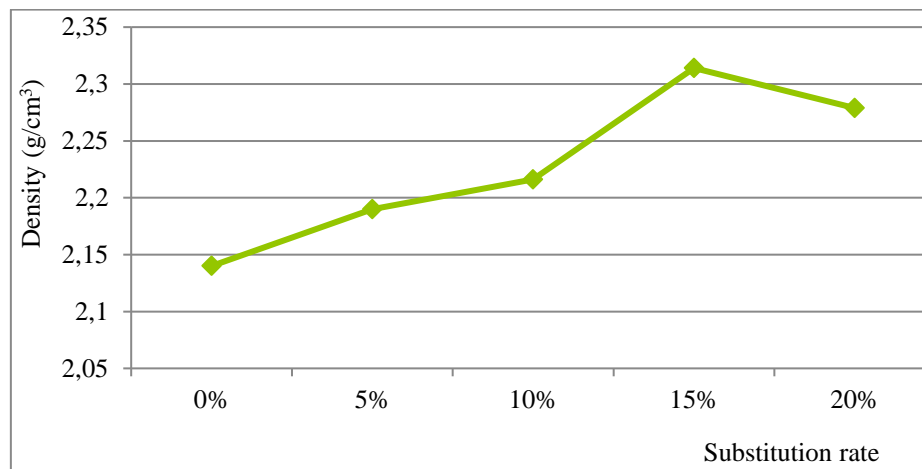


Figure II.13 : Variation de la densité en fonction du taux de substitution

L'introduction du sable de marbre rend le béton de sable plus dense, ce qui est montré par la figure II.13. Plus le taux de substitution en sable de marbre SD augmente, plus la densité du béton de sable augmente jusqu'à une valeur optimale égale à environ 2,321 correspondant à une teneur de remplacement dosage en SD de marbre égale à 15%.

Ces sables avec une teneur en fines plus élevée et une masse volumique absolue supérieure à celle du sable dunaire 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 son augmentation, la densité du béton de sable reste toujours inférieure à celle du béton ordinaire.

II.5.2. Ouvrabilité

Tableau II.11 : Les résultats de l'essai de l'étalement

Types de béton	BSM 0%	BSM5%	BSM 10%	BSM 15%	BSM 20%
Affaissement (cm)	20,6	21.35	21.35	22.25	22.50

L'introduction de sable de déchets de marbre (figure II.14) conduit à accroître l'ouvrabilité du béton témoin BSM0%, ceci peut être expliqué par la présence des éléments fins du sable de déchets de marbre SM qui influent positivement sur l'ouvrabilité et que le sable de déchets de marbre facilite la dispersion des grains de la pâte de ciment en conséquence d'effet de remplissage des vides du béton (Rihia et al., Noha, 2013).

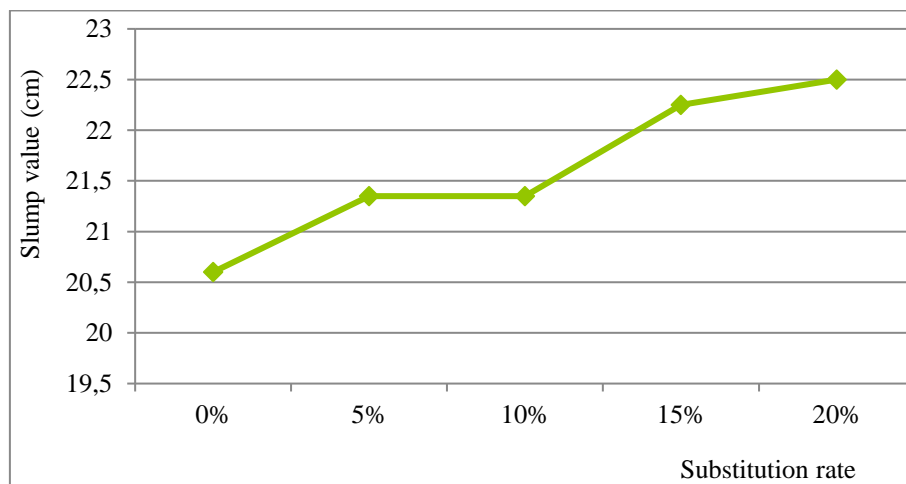


Figure II.14 : Variation de l'ouvrabilité en fonction du taux de substitution

La figure II.14 montre l'évolution du comportement rhéologique caractérisé par la mesure d'affaissement au cône d'ABRAMS en fonction du taux de substitution en sable de marbre. Le dosage en sable est exprimé en pourcentage par rapport au volume du sable. Ce dosage varie de 0 à 272,27 kg/m³.

On constate nettement que l'affaissement au cône d'ABRAMS augmente en augmentant le taux en sable de marbre SM, un taux de 20% de ce sable donne la plus grande valeur de l'affaissement. Cette augmentation est expliquée par la capacité plastifiante des fines contenues dans le SD 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.

II.5.3. Air occlus

Tableau II.12 : Résultats de l'essai teneur en l'air

Types de béton	BSM 0%	BSM 5%	BSM 10%	BSM 15%	BSM 20%
Teneur en l'air (%)	6.70	4.40	3.20	5.00	6.00

La figure II.15 montre la variation de la teneur en air occlus en fonction du taux de remplacement en sable de marbre.

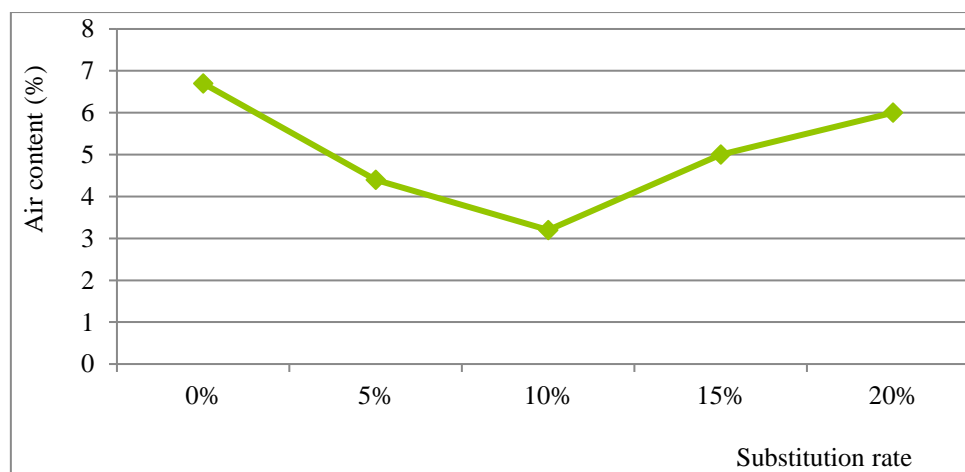


Figure II.15 : Variation de l'air occlus en fonction du taux de substitution

La teneur en air occlus diminue en fonction de l'augmentation du taux de substitution jusqu'à un taux de 10%, cette diminution est due à l'augmentation de la cohésion (Hebhoub et al) d'une part et à l'augmentation de la capacité de la résistance à la ségrégation d'autre part (Corinaldesi et al 2010). Au delà de 10% l'effet s'inverse et la teneur en air occlus reste inférieure à celle du béton témoin.

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 contenues dans le sable de marbre contribue à la diminution de la teneur en air occlus. 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.

II.5.4. Performances mécaniques

II.5.4.1. Resistance en compression

La résistance mécanique en compression est une caractéristique essentielle du matériau béton et l'un des paramètres fondamentaux de notre étude. Pour chaque formulation, cette résistance mécanique a été calculée à différentes échéances par la moyenne des résistances d'une série de six échantillons demi prismes 4x4x16 cm.

A 2 jours, l'introduction de 5%, 10% et 15% de sable de déchets de marbre conduit à une diminution de la résistance en compression (Figure II.16), au de-là de 15% l'ajout de sable de déchets de marbre entraîne une augmentation des résistances mécaniques en compression pour atteindre une valeur maximale de 6.20 MPa à 20% de taux de substitution (Tab II.13). Cette augmentation est expliquée par la présence du CaO dans le sable de déchets de marbre qui offre beaucoup de C2S qui donne des résistances initiales élevées conforme avec ceux trouvés par Hebhou et al., 2014.

Tableau II.13 : Les résultats de la résistance à la compression

Types de béton	Résistance à la compression (MPa)			
	2 jours	7 jours	28 jours	90 jours
BSM 0%	6,11	16,59	26,57	39,60
BSM 5%	5.41	17.31	24.69	50.27
BSM 10%	5.26	18.31	31.30	49.64
BSM 15%	5,73	18,93	28,17	43,13
BSM 20%	6,20	16,94	32,22	46,11

a) Influence du taux de substitution sur la résistance à la compression

A 7 jours, l'introduction de sable de déchets de marbre engendre une augmentation des résistances en compression du béton témoin ceci est du à la teneur élevée du CaO qui augmente la cohésion au jeune âge (Hebhoub et al., 2014, Djebien et al., 2018). La valeur maximale est donnée par le mélange de 15% de taux de substitution.

A 28 et 90 jours, les bétons à base de sable de déchets de marbres donnent les meilleures performances en compressions en comparaison avec le béton témoin. On peut expliquer ces résultats par la nature calcaire du sable de déchet de marbre qui offre un bon collage matrice granulats (Dreux et Festa 1995) et que le sable de déchets de marbre et le ciment sont capables de former des produits plus résistants qui contribuent à l'amélioration de la résistance à la compression (Khyaliya et al., 2017).

D'après les résultats obtenus (Figure II.16), nous constatons que l'évolution de la résistance à la compression des bétons étudiés, augmente régulièrement avec l'âge et ne présente aucune chute jusqu'à l'âge de 90 jours, entre 2, 7 et 28 jours les courbes sont rapprochées, ils présentent le même comportement qu'à 2 et 7 jours. La variation entre 28 et 90 jours est très remarquable, les courbes sont distinctes.

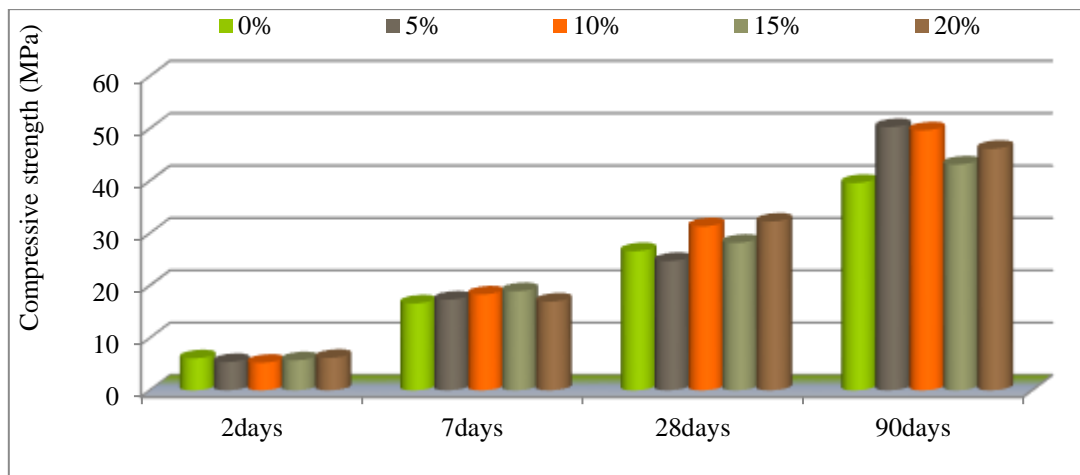


Figure II.16 : Influence du taux de substitution sur la résistance en compression

b) Influence de l'âge sur la résistance à la compression

D'après la figure II.17, 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 responsable de sa résistance à la compression (Bendjillali and Makhloufi, 2011, Benabed et al., 2005).

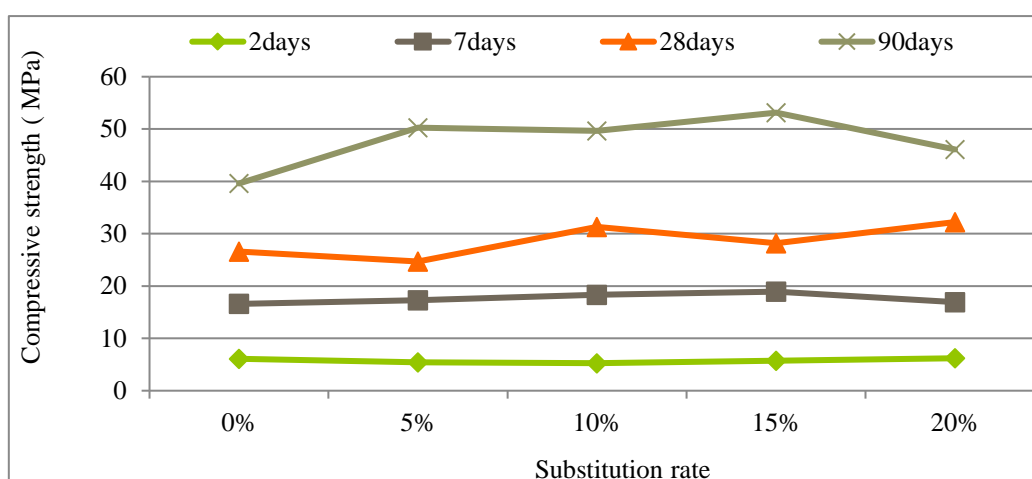


Figure II.17 : Influence de l'âge sur l'évolution de la résistance en compression

c) Influence du type et du taux de sable de marbre :

La figure II.17 montre l'évolution de la résistance mécanique à 2, 7, 28 et 90 jours en fonction du Taux de substitution en sable de marbre.

On remarque que la résistance à la compression augmente lorsqu'on augmente la quantité de sable de marbre. Un taux de substitution du sable de 10% fait augmenter la résistance à la compression de 15% à 7 jours et de 20% à 28 jours.

Ce gain de résistance est expliqué par :

- l'augmentation de la compacité du béton de sable due aux fines contenues dans le sable de marbre, Ces fines et grâce 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, Hebhoub 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).

II.5.4.2. Résistance à la traction par flexion

L'essai de traction indirecte (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 II.12.

Les résultats de l'essai de résistance à la traction par flexion illustrés (Tableau II.12), montrent des tendances similaires à la résistance en compression

Tableau II.14 : Résultats de l'essai des résistances de la traction par flexion

Types de béton	Résistance à la traction (MPa)			
	2 jours	7 jours	28 jours	90 jours
BSM 0%	1,69	4,63	5.94	5,99
M 5%	1.56	4.60	6.49	7.00
BSM 10%	1.54	4.56	7.28	8.13
BSM 15%	2,07	5,48	7,17	8,59
BSM 20%	1,64	5,26	7,89	9,53

A jeune âge (2 jours), on constate une légère diminution des résistances des bétons à base de sable de déchets de marbre par rapport au béton témoin sauf pour le mélange de 15% de taux de substitution (Figure II.12 – Tab II.14). Les résistances des bétons à base de sable de déchets de marbre ont triplés leur valeur à 7 jours et la valeur maximale est donnée par le béton de 15% de taux de substitution (présence du CaO qui augmente les résistances au jeune âge). L'effet de l'introduction du sable de déchets de marbre est plus marqué à 28 et 90 jours, la valeur maximale de la résistance est donnée par le béton de 20% de taux de substitution. L'augmentation du taux de substitution conduit à accroître la quantité du CaO dans les mélanges qui augmente la cohésion et donne un bon collage matrice /granulats (Dreux et Festa 1995, Hebhouh et al., 2010, Hebhouh et al., 2014).

a) Influence du taux de substitution sur la résistance à la flexion

Les résultats de l'essai de résistance à la traction par flexion illustrés (figure II.18), montrent des tendances similaires à la résistance en compression. On note une évolution des résistances à la traction qui augmentent régulièrement avec l'âge et ne présentent aucune chute jusqu'à l'âge de 90 jours. La variation entre 2 et 7 jours est plus marquée en comparaison avec 7 et 28 jours (Figure II.18). Les courbes sont très rapprochées entre 28 et 90 jours en particulier entre 0% et 10%.

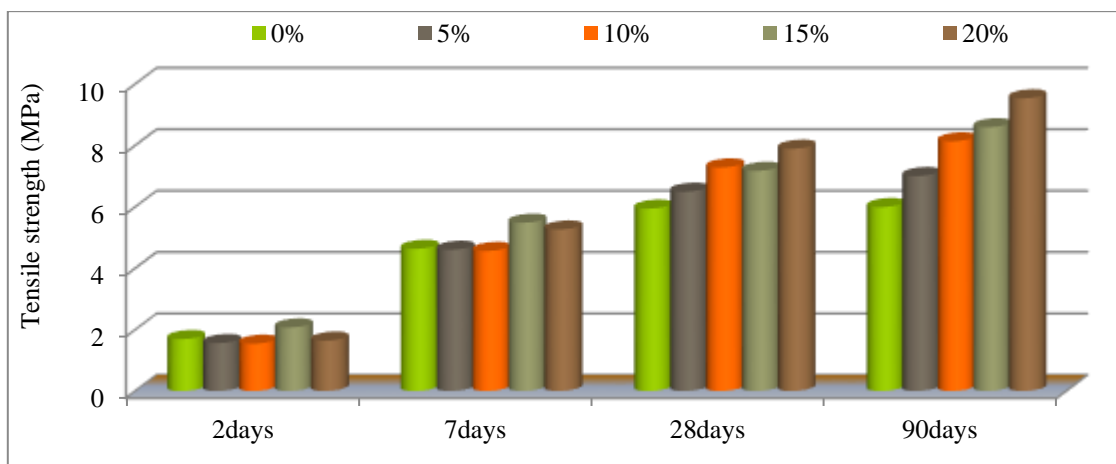


Figure II.18 : Influence du taux de substitution sur la résistance en traction par flexion

b) Influence de l'âge sur la résistance à la flexion

Il est nettement clair selon la figure II.19 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.

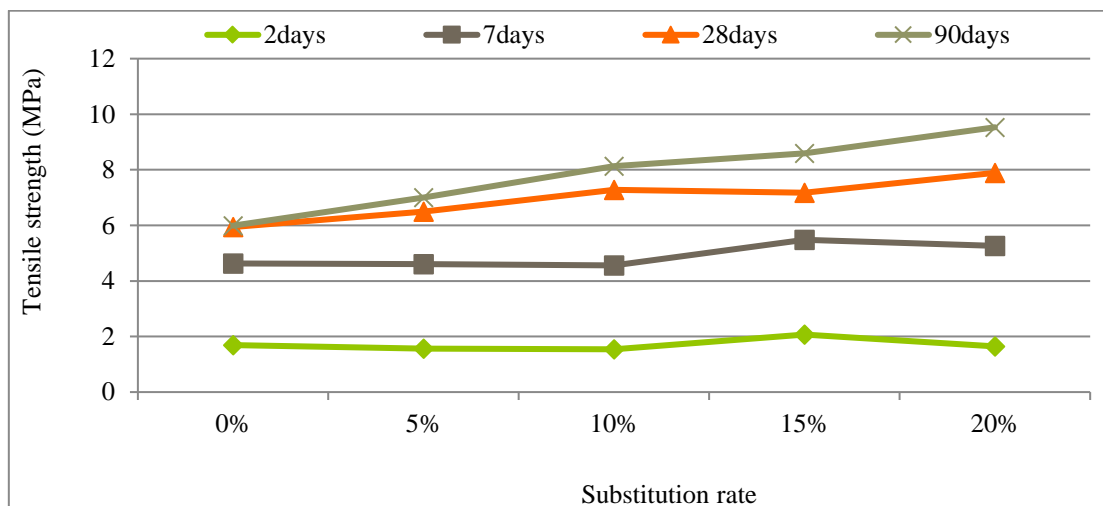


Figure II.19 : Influence de l'âge sur l'évolution de la résistance en traction par flexion

c) Influence du sable de déchets du marbre :

On remarque que la résistance à la traction augmente avec l'augmentation du taux de remplacement en sable de marbre. Cette augmentation est due à l'amélioration de la compacité du mélange par l'ajout de fines contenues dans le qui remplissent les vides intergranulaires et qui ont une certaine capacité liante.

II.5.4.3. Absorption 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 II.15.

L'analyse des résultats obtenus montre que les bétons à base de sable de déchets de marbre présentent des coefficients d'absorptions élevés par rapport au béton témoin.

Tableau II.15 : Résultats de l'essai d'absorption d'eau par immersion

Types de béton	Absorption d'eau en %
BSM 0%	9,69
BSM 5%	9,99
BSM 10%	10,32
BSM 15%	10,30
BSM 20%	10,39

Cette augmentation est expliquée par le coefficient d'absorption élevé et à la rugosité du grain de sable de déchets de marbre qui influe sur la compacité (Gameiro *et al.*, 2014). L'augmentation du taux de sable de déchets de marbre provoque une augmentation de la porosité (Buyuksagiset al., 2017, Vardhan et al., 2015).

La figure II.20 montre la variation de l'absorption par immersion du béton de sable en fonction du taux de substitution en sable de déchets de marbre.

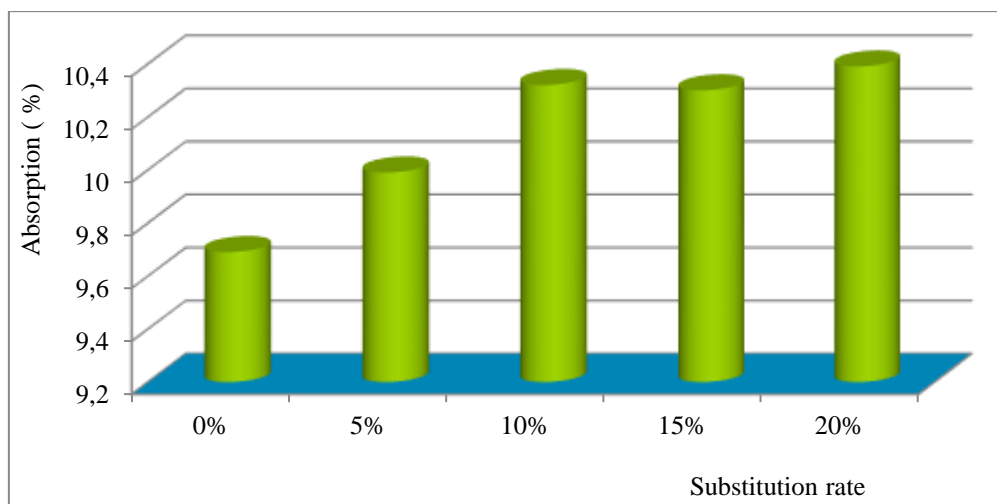


Figure II.20 : Variation de l'absorption par immersion en fonction du taux de substitution

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 contenues dans le SM et l'effet filler que les fines du marbre jouent

II.5.4.4. Variations pondérales et dimensionnelles

a) Perte en poids

Tableau II.16 : Résultats de l'essai de perte en poids

Types de béton	La perte de poids en g/kg						
	2 j	7 j	14 j	21 j	28 j	56 j	90 j
BSM 0%	14,829	26,896	30,606	32,462	31,541	31,527	31,527
BSM 5%	14.020	24.860	28.825	30.300	32.083	30.301	30.301
BSM 10%	12.59	24.790	29.691	31.372	31.00	29.960	30.600
BSM 15%	12,589	24,282	28,779	31,476	38,67	30,578	29,677
BSM 20%	13,533	26,158	30,674	32,478	41,481	32,478	32,478

Durant les 14 premiers jours, on constate une diminution des pertes en poids de tous les bétons de sable (Figure II.21), au-delà du 14eme jour la perte en poids maximale est donnée par le béton de 20% de taux de substitution. Les courbes des variations pondérales (Figure II.21)

présentent le même comportement et la perte en poids maximale est enregistrée à l'âge de 28 jours pour toutes les compositions.

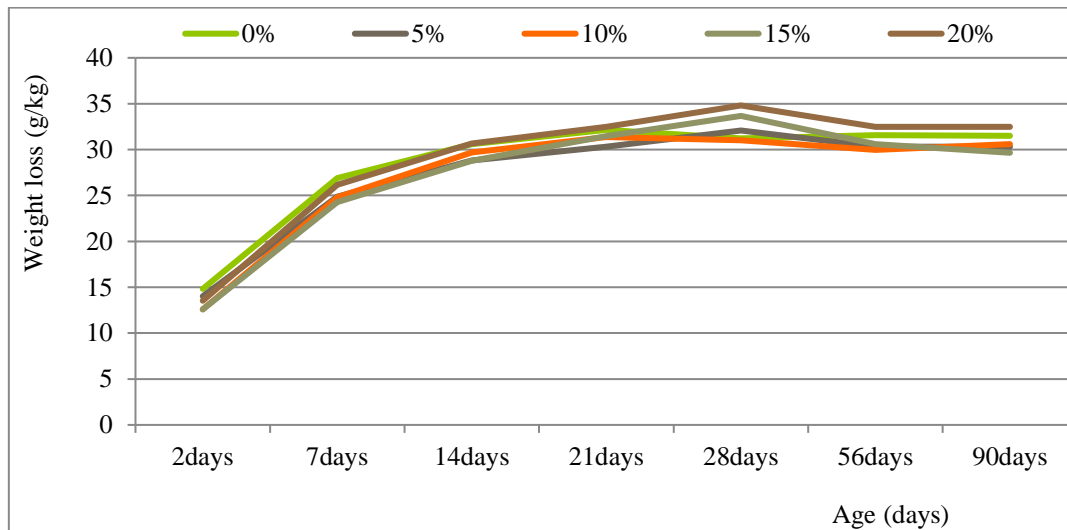


Figure II.21 : Influence du taux de substitution sur la perte en poids

b) Retrait

L'étude du retrait des bétons consiste à analyser l'évolution des déformations de ces derniers au cours du temps lorsqu'ils ne sont pas soumis à des charges.

Les résultats du retrait en fonction du temps sont présentés dans le tableau II.17, les valeurs indiquées correspondent à la moyenne des résultats obtenus sur trois éprouvettes différentes fabriquées à partir d'un même mélange.

Tableau II.17 : Résultats de l'essai de retrait total

Types de béton	Retrait total en $\mu\text{m}/\text{m}$						
	2 J	7 J	14 J	21 J	28 J	56 J	90 J
M 0%	165.62	196.87	230.20	302.87	412.5	600.03	800.33
M 5%	306.25	340.62	403.12	463.43	478.12	672.96	993.75
M 10%	371.87	455.50	522.34	643.75	741.80	898.38	1003.12
M 15%	406.25	582.20	625.96	700.00	800.05	996.87	1040.62
M 20%	605.25	681.25	750.00	888.88	913.90	1020.63	1100.00

L'analyse des résultats des variations dimensionnelles dues au retrait (Figure II.22), montre que les bétons à base de sable de déchets de marbre, présentent un retrait plus élevé que celui enregistré pour le béton témoin à cause de leur absorption élevée et leur forte teneur en fines (Kou et al., 2009). Le retrait augmente avec l'augmentation du taux de sable de déchets de marbre mais reste inférieur à 2000 $\mu\text{m}/\text{m}$, la cinétique de variation à 90 jours est moins importante en comparaison avec celle de 2 jours.

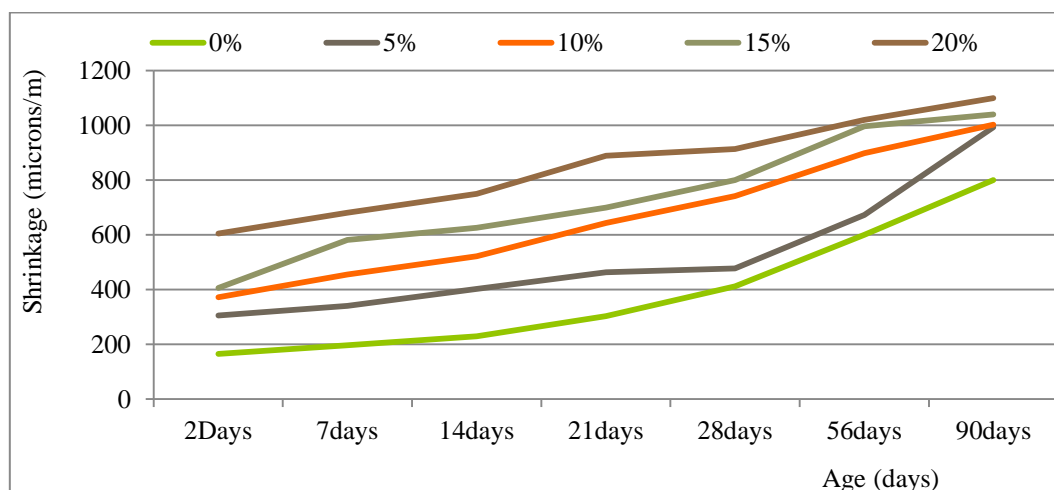


Figure II.22 : Influence du taux de substitution sur le retrait

Dans la figure II.22 on remarque que le retrait total augmente avec l'augmentation du taux de substitution en sable de 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.

II.5.5. Durabilité

II.5.5.1. Attaques chimiques par acide chlorhydrique et acide sulfurique

Les résultats sont regroupés dans les tableaux II.18 et II.19.

➤ Attaque par HCl

Tableau II.18 : Résistance chimique dans le milieu agressif (HCL)

Types de béton	Perte de masse en %						
	1 j	7 j	14 j	21 j	28 j	56 j	90 j
BSM 0%	0,275	0,404	1.280	1.416	1,470	1,931	3,293
BSM 5%	0.44	0.52	1.241	1.290	1.483	2.020	2.854
BSM 10%	0.39	0.71	1.303	1.550	1.684	2.130	3.101
BSM 15%	0,461	0,835	1,723	1,847	1,971	2,523	3,570
BSM 20%	0,538	0,938	1,668	1,859	1,876	2,554	3,785

➤ Attaque par H₂SO₄

Tableau II.19 : Résistance chimique dans le milieu agressif (H₂SO₄)

Types de béton	Variation de la masse en %						
	1 j	7 j	14 j	21 j	28 j	56 j	90 j
M 0%	-0,630	3,137	4,923	10,296	11,432	28,976	52,471
M 5%	-0.562	3.422	5.801	9.832	11.160	29.093	51.362
M 10%	-0.505	2.950	5.122	9.459	10.550	28.586	50.830
M 15%	-0,601	2,013	3,822	7,538	8,883	26,099	47,614
M 20%	-0,577	2,751	4,906	9,077	9,779	25,026	45,758

Au bout de la première semaine (Figure II.22), on observe d'une manière générale une diminution des pertes de masses pour tous les mélanges étudiés. En revanche, au-delà du 7ème jour de conservation une augmentation des pertes de masse a été constatée pour les dites compositions. La résistance chimique du béton témoin est meilleure que celles des bétons

contenant du sable de déchets de marbre au jeune âge, ceci est expliqué par la forte teneur en CaCO_3 dans SM.

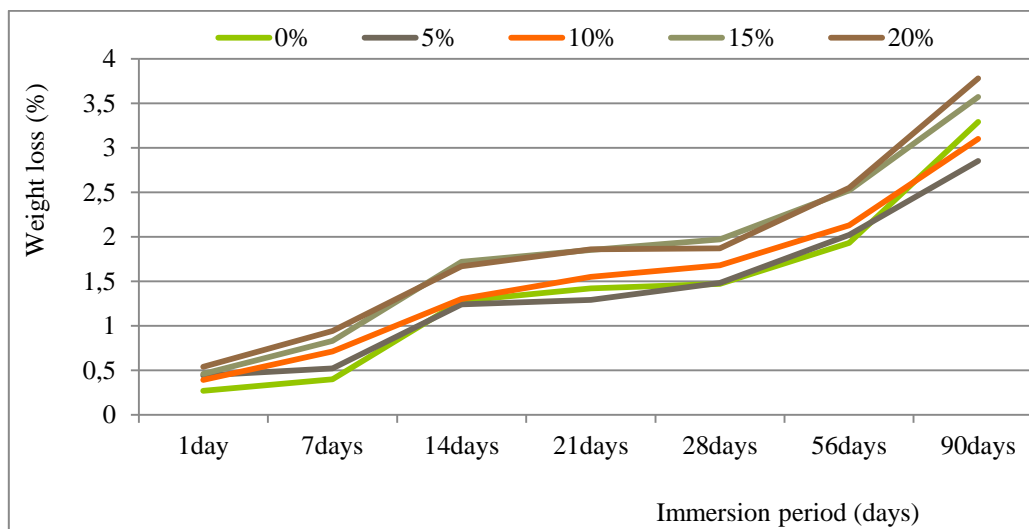


Figure II.23 : Variation de la perte en poids en fonction de la période d'immersion en HCl

Le béton avec 5% de taux de substitution de sable de déchets de marbre, résiste mieux à l'attaque de l'acide chlorhydrique par rapport aux autres bétons.

Les mauvaises résistances à l'attaque chimique sont données par les bétons de 15 et 20% de taux de substitution. La variation est très rapprochée entre 0 et 10% en comparaison avec 10 et 20% de taux de substitution.

Les courbes de la figure II.23, présentent la même allure quelque soit le taux de substitution et l'âge. La meilleure résistance à l'attaque par l'acide sulfurique est donnée par le béton de 15% de taux de substitution entre 1 et 28 jours, au-delà de 28 jours le béton à base de 20% de taux de substitution présente la meilleure résistance chimique. L'inclusion du sable de déchets de marbre a rendu les mélanges relativement inertes à tout changement de résistance à la compression (khyaliya et al., 2017).

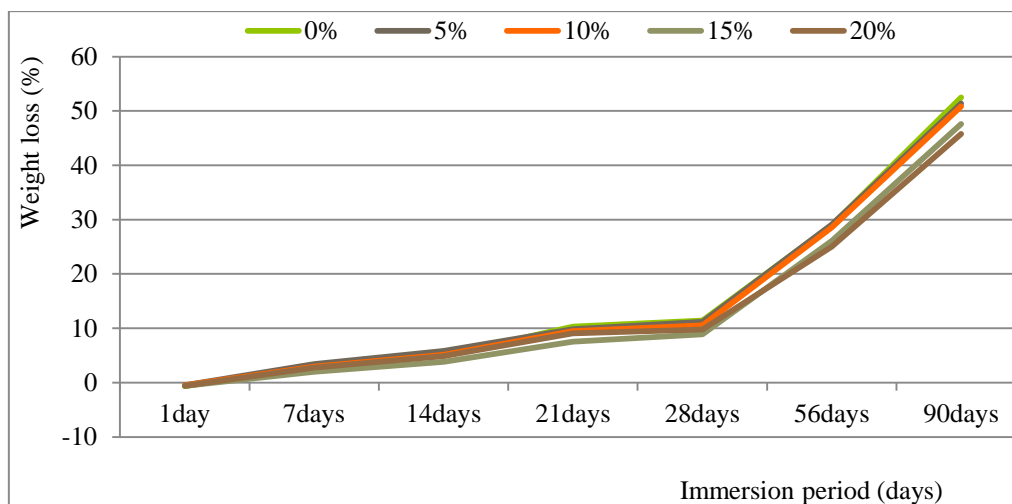


Figure II.24 : Variation de la perte en poids en fonction de la période d'immersion en H_2SO_4

II.6. 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 la substitution partielle des sables dunaires par des déchets de marbre en tant que sable dans ce premier programme expérimental, 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 ce sable contenant plus de 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 sable de marbre recyclés 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 sables recyclés à base de déchets de marbre dans l'amélioration de la résistance du composite. On se basant sur les résultats obtenus pour différents essais, nous avons conclu ce qui suit :

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

- Le sable de déchets de marbre augmente la densité et diminue la teneur en air occlus.

-Le remplacement partiel du sable ordinaire (de dune) par le sable de déchets de marbre améliore l'ouvrabilité.

- La résistance mécanique du béton de sable augmente de manière significative avec l'augmentation du taux de substitution en conséquence par le dosage en sable de marbre.

- L'ajout de sable de déchets de marbre augmente les valeurs de retrait

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

-La résistance en compression maximale est donnée par le béton de 20% de taux de substitution à l'âge 28 jours.

- Les meilleures performances en compression et en traction par flexion sont données par les mortiers à base de sable de déchets de marbre à 28 et 90 jours.

En conclusion on peut dire :

-Le sable de déchets de marbre augmente la cohésion.

-Les bétons substitués partiellement par le sable de déchets de marbre absorbent plus d'eau que le sable ordinaire.

-Le retrait augmente avec l'augmentation du taux de sable de déchets de marbre mais reste dans les normes.

-Le béton contenant 5% de taux de substitution de sable de déchets de marbre donne une meilleure, résistance à l'acide chlorhydrique.

-La meilleure résistance à l'attaque par l'acide sulfurique est donnée par le béton de 15% de taux de substitution.

- Dans notre étude, le dosage optimal en sable contenant fines de marbre est d'environ 10 % correspondant à une résistance à la compression égale à 31,30 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.

Nous pouvons dire actuellement que l'introduction de déchets de marbre dans le béton de sable améliore les caractéristiques rhéologiques de la matrice. Nous avons montré les difficultés qu'il y avait à quantifier ces améliorations. Conscient que cette étude s'insère dans un cadre limité, elle s'est attachée à préciser les principales propriétés (notamment l'augmentation de la cohésion). Les résultats obtenus sont susceptibles d'élargir le champ des applications de ces bétons de sable à base de déchets de marbre.

II.7. REFERENCES

Bederina, M, Bouziani, T and Khenfer, M. M 2011. Absorption de l'eau et son effet sur la durabilité des bétons de sable allégés par ajout de copeaux de bois, INVACO2: séminaire international, innovation & valorisation en génie civil & matériaux de construction, Rabat – Maroc / 23-25 Novembre 2011, 1-6.

Belachia, M and Hebhouh, H 2018, Valorization of marble waste in the manufacture of concrete, 14th International Conference on Concrete Engineering and Technology, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 431 032005, doi:10.1088/1757-899X/431/3/032005

Berdoudi, S, Hebhouh, H and Djebien, R 2017 .Valorization and recycling of quarries waste as an addition in cement. **Journal of Applied Engineering Science. 15(2), 122-127. DOI: [10.5937/jaes15-12743](https://doi.org/10.5937/jaes15-12743).**

Buyuksagis, I.S, Uygunoglu, T, Tatar, E 2017. Investigation on the usage of waste marble powder in cement-based adhesive mortar. *Const. Build. Mater.*, 154, 734–742.

Corinaldesi, V, Giacomo, M and Tarun, RN 2010. Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. *Const. Build. Mater.*, 24(1), 113-117.

Djebien, R, Hebhouh, H, Belachia, M, Berdoudi, S and Kherraf, L 2018. Incorporation of marble waste as sand in formulation of self-compacting concrete, *Struct. Eng and Mech.*, 67(1), 87-91. DOI: <https://doi.org/10.12989/sem.2018.67.1.087>.

Djebien, R, Belachia, M and Hebhouh, H 2015. Effect of marble waste fines on rheological and hardened properties of sand concrete. *Struct. Eng. Mech.*, 53(6), 1241-1251.

Dreux, G. and Feasta, J. 1995, “Nouveau guide du béton et de ses constituants”, Édition Eyrolles, Paris, France.

Gameiro, F, de Brito, J and Correia da Silva, D 2014. Durability performance of structural concrete containing fine aggregates from waste generated by marble quarrying industry. *Eng. Struct.*, 59, 654-662.

Guendouz, M, Debieb, F and Kadri, EL. H, 2015 Formulation et caractérisation d'un béton de sable à base de déchets plastiques, 33èmes Rencontres de l'AUGC, ISABTP/UPPA, Anglet, 27 au 29 mai 2015, 1-8.

Hebhouh, H, Belachia, M and Djebien, R 2014. Introduction of sand marble wastes in the composition of mortar. *Struct. Eng. Mech.*, 49(4), 491-498.

Hebhouh, H and Belachia, M 2011. Introduction de sable de déchet de marbre dans le béton hydraulique. *Nature & Technologie*, 4, 41-46.

Hebhouh, H, Aoun, H, Belachia, M., Houari, H. and Ghorbel, E 2011. Use of waste marble aggregates in concrete. *Const. Build. Mater.*, 25, 1167-1171.

Khyaliya, R.K, Kabeer, K.I.S.A, Vyas, A.K 2017. Evaluation of strength and durability of lean mortar mixes containing marble waste, *Const. Build. Mater.*, 147, 598–607

Kou, S.C and Poon, C.S 2009, Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates, *Constr.Build. Mater.* 23 2877–2886, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.009>.

MELAIS, F.Z AND ACHOURA, D 2011. Formulation et propriétés des bétons de sable renforcé de fibres de polypropylène, XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29au 31 Mai 2011,439-449.

Noha, MS 2013. Effect of using marble powder in concrete mixes on the behavior and strength of R.C. slabs. *Int. J. of Current Eng. Technol.*, 3(5), 1863-1870.

Rihia, C, Hebhouh, H, Kherraf, L, Djebien, R and Abdelouahed, A 2019 , Valorization of waste in sand concrete based on plant fibers, *Civil and Environmental Engineering Reports*, 29 (4), 041-061. DOI: 10.2478/ceer-2019-0043

Sablocrete 1994. Bétons de Sable: Caractéristiques et Pratiques d'Utilisation. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.

Vardhan, K, Goyal, S, Siddique, R and Singh, M 2015, Mechanical properties and microstructural analysis of cement mortar incorporating marble powder as partial replacement of cement, *Const.Build.Mater.*, 96, 615–621

CHAPITRE III.

COMPORTEMENT DES VARIETES DE BETONS DE SABLE FELLERISES : INFLUECE DU TAUX DE SUBSTITUTION ET DE L'INTRODUCTION DES FIBRES METALLIQUES

III.1. INTRODUCTION

L'idée de promouvoir la technologie et l'utilisation du béton de sable de dunes est née de plusieurs constatations:

- Abondance de la matière première: le sable dunaire est un matériau très abondant. En Algérie par exemple, il couvre environ 60% du territoire.

- Tendances pour les granulats alluvionnaires et de carrière à la raréfaction et donc au surcoût: Si on sait que les granulats entrent dans la composition du béton classique dans une proportion de 75%, on réalise nettement l'augmentation du prix de revient du béton.

- Coût du transport des granulats: Les constructeurs devant la pénurie en granulats et l'isolement des chantiers par rapport aux lieux d'approvisionnements en granulats (des centaines de km) ont dû se rabattre avec succès sur les sables de désert pour éviter le surcoût que le transport pouvait engendrer et le retard dans les délais de réalisation.

- Economie dans l'utilisation: certaines constructions peu ou pas étagées, sont peu sollicitées mécaniquement; le béton de sable pourrait remplacer avantageusement le béton classique onéreux.

- Esthétique: à cause de sa petite granularité, le béton de sable permet la réalisation d'effets architectoniques et donne de beaux aspects de surface.

Le béton de sable fillerisé apparaît donc comme un matériau opportun de substitution dans les régions du Nord Algérien, pour peu que sa formulation donne les caractéristiques rhéologiques et mécaniques équivalentes à celles des bétons classiques pour les usages envisagés.

Pour la préservation de l'environnement et le paysage du Sud Algérien, et de promouvoir la vulgarisation des bétons de sable dans les régions des Hauts Plateaux où l'abondance des sables et fillers calcaires issus de concassage

Objectifs de cette deuxième étude de cette vaste investigation expérimentale :

Les principaux objectifs de ce deuxième programme peuvent être classés comme suit:

- Vulgarisation des bétons de sable dans les régions du Nord, par l'élaboration d'un béton de sable fillerisé.

- Evaluer l'influence du taux de substitution partielle ou totale de sable de dune SD2 par un sable calcaire SC issu de concassage sur les caractéristiques du béton de sable fillerisé des mélanges suivants :
 - 100% sable de dune SD2 et 0% sable calcaire SC
 - 80% sable de dune SD2 et 20% sable calcaire SC
 - 60% sable de dune SD2 et 40% sable calcaire SC
 - 50% sable de dune SD2 et 50% sable calcaire SC
 - 40% sable de dune SD2 et 60% sable calcaire SC
 - 20% sable de dune SD2 et 80% sable calcaire SC
 - 0% sable de dune SD et 100% sable calcaire SC
- Etudier le comportement des bétons de sable fillerisés (rhéologie, propriétés physiques, mécaniques et de durabilité)
- Quantifier l'apport de l'introduction des fibres métalliques de fonte amorphe sur le comportement des bétons de sable : influence du taux et de l'élançement des fibres (fibres de fonte amorphe de longueur de 30 et 15 mm et avec des taux de 0.5% et 1%)

Ce chapitre III, exposant notre deuxième programme expérimental, s'intéresse plus particulièrement à l'identification et la caractérisation des matériaux de base exploités dans notre étude sur le comportement de ces bétons fillerisés à l'état frais et durci dans les régions des hauts plateaux telliens, où l'abondance des granulats concassés et des fillers calcaires en remplaçant les sables de dune.

La caractérisation, de tous les constituants rentrant dans la composition des bétons de sable, est faite d'un point de vue physique (la masse volumique apparente et absolue, l'analyse granulométrie, la propreté,...etc), chimique et minéralogique (diffraction rayon au X). Ces informations permettraient de bien connaître les différents paramètres qui vont influencer les propriétés physiques et mécaniques des mélanges de ces matériaux retenus.

Les essais d'identification des matériaux utilisés ont été effectués au sein des laboratoires des Travaux Publics (LTP Est) unité de Constantine, LMDC Constantine et CETIM de Boumerdès, Laboratoires Cimenteries, Laboratoire ENG.

III.2. MATERIAUX TESTES ET METHODOLOGIE D'ESSAIS

III.2.1. Constituants de base utilisés

Dans cette partie, on s'intéresse à la localisation, l'identification et la caractérisation des matériaux anhydres, rentrant dans la confection des bétons de sable fillerisés, qui ont été testés au cours de cette étude.

III.2.1.1. Sables

On entend par sable la fraction des granulats pierreux dont les grains ont des dimensions comprises entre 0,080 mm et 5 mm; il s'agit d'une définition globale, dont les bornes varient d'une classification à une autre. Ce sont aussi les matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 6,3 mm et dont le passant à 80 microns n'excède pas 30%.

Deux types de sables ont été utilisés: du sable des dunes SD2 provenant de la région de Biskra (Algérie), d'une dimension maximale de 0,63 mm et du sable de calcaire (SC) d'une classe 0/3 mm, de l'ENG utilisé en substitution du sable de dune. La distribution granulométrique des deux sables est illustrée à la figure III.1 et le tableau III.1 donnant les caractéristiques des granulats.

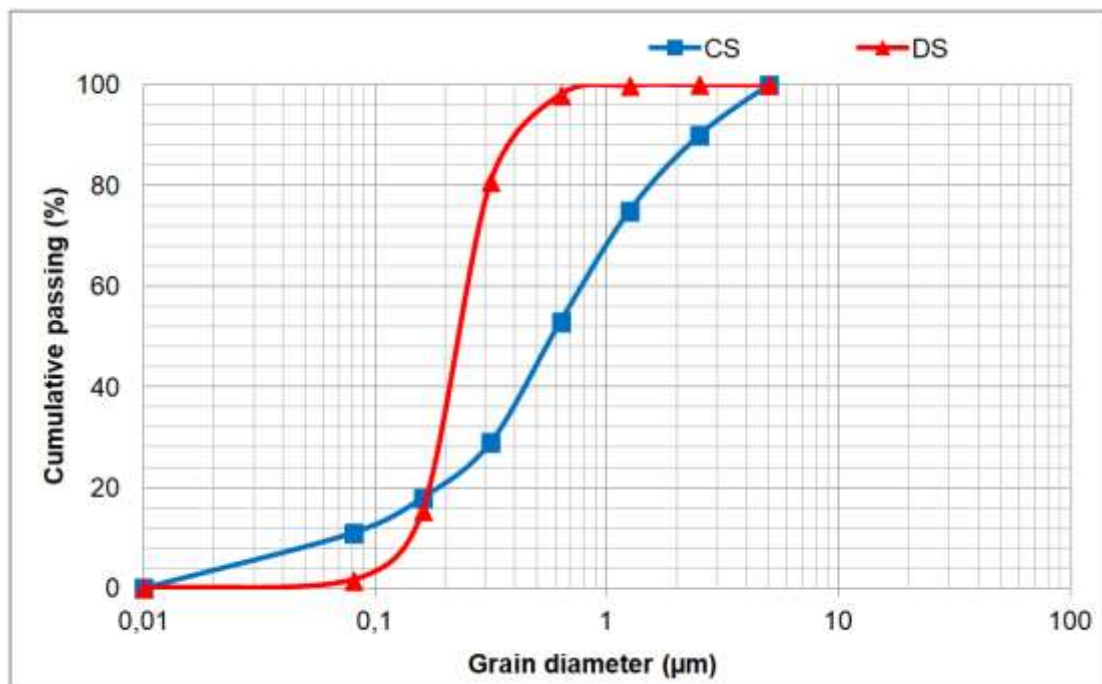


Figure III.1: Analyses granulométriques des sables utilisés

Tableau III.1: Propriétés physiques des sables utilisés.

	SC	SD2	References
Specific density (kg/m ³)	2680	2600	NF P 18-555
Fineness modulus	2.35	1.08	NF P 18-540
Visual sand equivalent (%)	72.1	81.5	NF P 18-598
Absorption coefficient (%)	3.9	2.1	NF P 18-555

Le sable de dune SD2 étudié présente des taux de propreté de l'ordre de 80%, ce qui indique que ce sable est propre, et par conséquent il est convenable pour une utilisation courante. Le sable calcaire SC étudié donne un équivalent de sable à vue supérieur à 72%, et celui au piston supérieur à 84%, ce qui confirme que ce sable est très propre, et parfaitement convenable pour des mélanges cimentaires de qualité (bétons et mortiers).

Les sables sont très propres, dépourvus de poussières ou d'éléments argileux.

L'analyse chimique a montré de son côté que ce sable contient très peu de sulfates, de sulfures, de chlorures et de matières organiques.

D'après les courbes granulométriques des sables étudiés, on remarque que la granulométrie correspondant au sable calcaire (SC) est clairement plus étalée que celle de sable de dune (SD2). Cela nous laisse à préjuger que le sable SC pourrait donner des performances mécaniques meilleures que le sable SD2

L'analyse granulométrique de sable de dune (SD2) montre clairement que 90% d'éléments sont inférieurs à 0,5 mm, ce qui indique que ce sable peut être classé d'un point de vue granulaire comme un sable fin.

Sa granulométrie est très serrée ; près de 90 % des grains ont une dimension comprise entre 0,1 mm et 0,5 mm. Cela nous laisse supposer que le sable seul ne pourra pas avoir une compacité suffisamment grande, et par la suite des performances mécaniques (résistance en compression et en traction, portance...) non adéquates. L'utilisation d'un correcteur granulaire se révélera certainement nécessaire

L'analyse granulométrique de sable calcaire (SC) montre que moins de 20 % des éléments sont supérieurs à 2 mm et plus de 50 % des éléments supérieurs à 80 microns sont compris entre 0.2 et 2 mm, ce qui montre que ce sable est moyen.

Pour le sable de dune (SD2), la valeur de module de finesse est faible, elle confirme que le sable de dune utilisé vacante de grains moyens et grossiers. Pour le sable calcaire (SC), la valeur de module de finesse montre que ce dernier est nettement plus grossier que le sable dunaire.

III.2.1.2. Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la totalité de nos essais de formulation de béton de sable, est une eau courante de robinet, dépourvue des excès de sels, de sulfates et d'acides.

L'eau de gâchage est une eau potable, pH ~ 7.5.

III.2.1.3. Ciment

. Le ciment utilisé dans notre étude est de classe CEM I 42.5 Ain Kébira - Sétif, de fabrication récente. Ce ciment est composé de 97% de clinker et 3% de gypse.

L'analyse chimique par la spectrométrie de fluorescence X (SFX) réalisée au laboratoire de la cimenterie a donné les résultats récapitulés dans le tableau III.2.

Tableau III.2 : Analyse chimique du ciment utilisé

Eléments	SiO₂	AL₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO
(%)	22,49	4,51	5,02	63,78	1,15
Eléments	SO₃	Na₂O	K₂O	CL	CaO libre
(%)	1,38	0,12	0,44	0,01	1,10

La composition minéralogique du clinker a été déterminée en utilisant la formule de BOGUE qui permet d'estimer la proportion de chaque minéral du ciment à partir de sa composition chimique pondérale.

Les résultats de calcul sont résumés dans le tableau III.3.

Tableau III.3 : Composition minéralogique du ciment

Minéraux	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
(%)	47,33	28,97	3,64	15,28

Le tableau III.4 donne les caractéristiques physiques du ciment utilisé.

Tableau III.4 : Les caractéristiques physiques du ciment CEM I

Caractéristiques physiques	
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,96
Masse volumique absolue (g/cm ³)	3,11
Refus au tamis 40 μ (%)	26 ± 0,48
Refus au tamis 80 μ (%)	4 ± 0,26

La surface spécifique (Norme NF P 15 – 442) est caractérisée par la surface spécifique des grains de ciment, exprimée en (cm²/g).

La surface spécifique de Blaine du ciment utilisé est de 3100 cm²/g

III.2.1.4. Filler calcaire

Le filler calcaire utilisé pour la formulation des BS, UF 20, est conforme à la norme NF P 18-508, fabriqué et fourni par la carrière ENG BenBadis Constantine.

Les principales caractéristiques physiques et chimiques que nous présentons proviennent des fiches techniques élaborées au niveau des laboratoires de l'ENG. La surface spécifique et le poids spécifique étaient de 3900 cm²/g et 2.74 g/cm³ respectivement. Le tableau III.5 présente la composition chimique des fillers calcaires:

Tableau III.5 : Composition chimique des fillers calcaires.

Composant	CaCO ₃	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	PH	PAF
Teneur en %	99	55,88	0,01	0,01	0,14	0,01	0,01	9,24	43,9

III.2.1.5. Adjuvant

Les adjuvants sont des produits solubles dans l'eau qui incorporés aux bétons à des doses qui doivent être inférieures ou égales à 5% du poids de ciment permet d'améliorer certaines de ses propriétés.

Un superplastifiant de type Medaflow 145 à base de d'éther polycarboxylique modifié a été employé pour assurer une fluidité satisfaisante pour les différentes formulations. Il appartient aux familles des superplastifiants réducteurs d'eau. Les différentes caractéristiques sont présentées dans le tableau III.6 :

Tableau III.6 : Les caractéristiques de superplastifiant.

Forme	Couleur	Masse volumique	Teneur en chlorures	PH
Liquide	Brun	7,0±1	1,05±0,02 g/cm ³	< 0,1%

III.2.1.6. Fibres Métalliques (Fonte amorphe)

Les fibres Fibraflex sont des fibres en fonte amorphe, qui se présente sous la forme de rubans et qui sont obtenues par hypertrempe d'un jet de métal en fusion tombant sur une roue en rotation. La composition de l'alliage est (Fe, Cr)80 (P,C,Si)20.

La roue est munie d'encoches régulières qui permettent d'obtenir des fibres de différentes tailles. Le faible diamètre du jet associé à la grande vitesse de rotation de la roue permet de fabriquer des rubans de faible épaisseur avec une vitesse de trempe de l'ordre d'un

million de degrés Celsius par seconde. Grâce à cette hypertrempe, la cristallisation n'a pas lieu et l'alliage conserve une structure amorphe.

Dans notre recherche, on a utilisé les types suivants avec des dosages différents :

- Fibraflex FF30L6, de longueur 30 mm
- Fibraflex FF15E0, de longueur 15 mm

Les caractéristiques des fibres sont présentées dans le tableau III.7.

Tableau III.7 : Caractéristiques des fibres de fonte amorphe

FIBRAFLEX	FF30L6	FF15E0
Densité (Kg/m ³)	7100	7100
Longueur (mm)	30,8	15,2
Largeur w (mm)	1,6	1
Diam. éq. d (mm)	0,245	0,18
Elancement	126	84

III.3. FORMULATION DES BETONS DE SABLE (APPROCHES ADOPTEES)

Les méthodes de formulation des bétons sont nombreuses de par le monde et il n'est pas utile de chercher à les énumérer ici. Disons simplement que les techniciens ont recours généralement à des méthodes de formulations empiriques basées le plus souvent sur une courbe granulaire de référence, de type Faury, ou Dreux-Gorisse.

La méthode utilisée pour la formulation du béton de sable est la méthode théorique de SABLOCRETE [1]. Dans son ouvrage, SABLOCRETE propose deux types d'approche : une qui constitue une base de formulation de béton de sable et une approche expérimentale basée sur la réalisation de plusieurs gâchées successives.

Donc l'étude de formulation consiste à trouver le mélange optimal qui répond aux critères techniques et économiques fixés par la norme. Compte tenu de la granularité de ce matériau, les méthodes utilisées pour la formulation du béton usuel qui consistent généralement à définir une courbe granulaire de référence ne sont pas applicables.

En raison de l'absence d'une formulation mondiale unifiée, les bétons de sable sont l'objet de plusieurs recherches et d'études visant à faire de cette dernière un matériau industriel.

Dans notre travail, nous avons préparé la composition centrale qui est à la base du sable de dune, selon la méthode de formulation théorique des bétons de sable, basée sur l'optimisation de la compacité [1] : L'approche théorique commence par l'estimation du dosage en fines qui s'inspire principalement de la formule de Caquot [1] :

Pour minimiser ce volume d'air dans le béton de sable pour les deux types de sable et éviter un surdosage en ciment, nous avons fixé le dosage en ciment de 390 kg/m³ (voir figure III.2). Ce choix va permettre en fonction du rapport E/C (0,51 à 0,69) d'avoir un volume d'air inférieur à 13 % contrairement à un dosage en ciment à 300 kg/m³ qui implique un volume d'air compris entre 16 % à 21%.

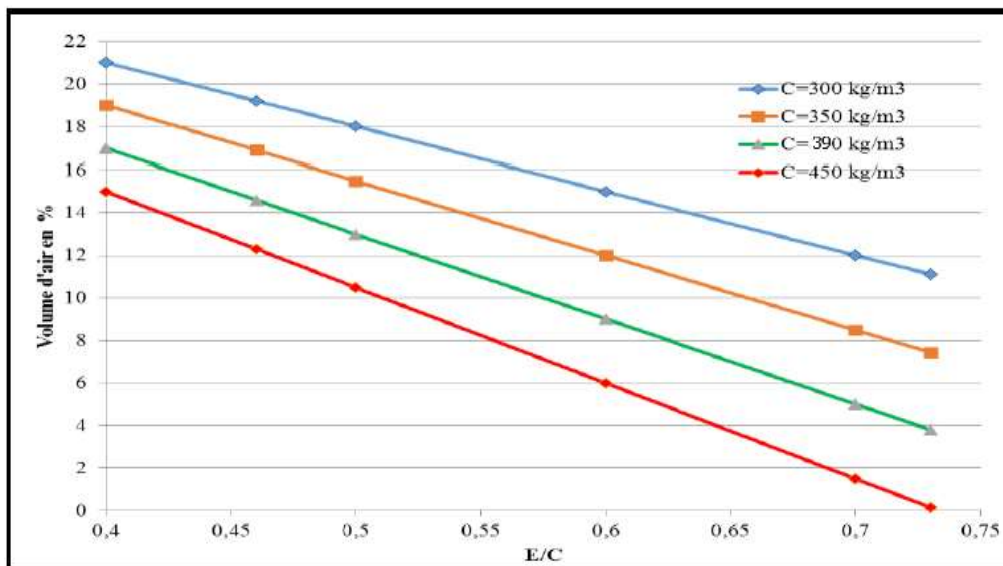
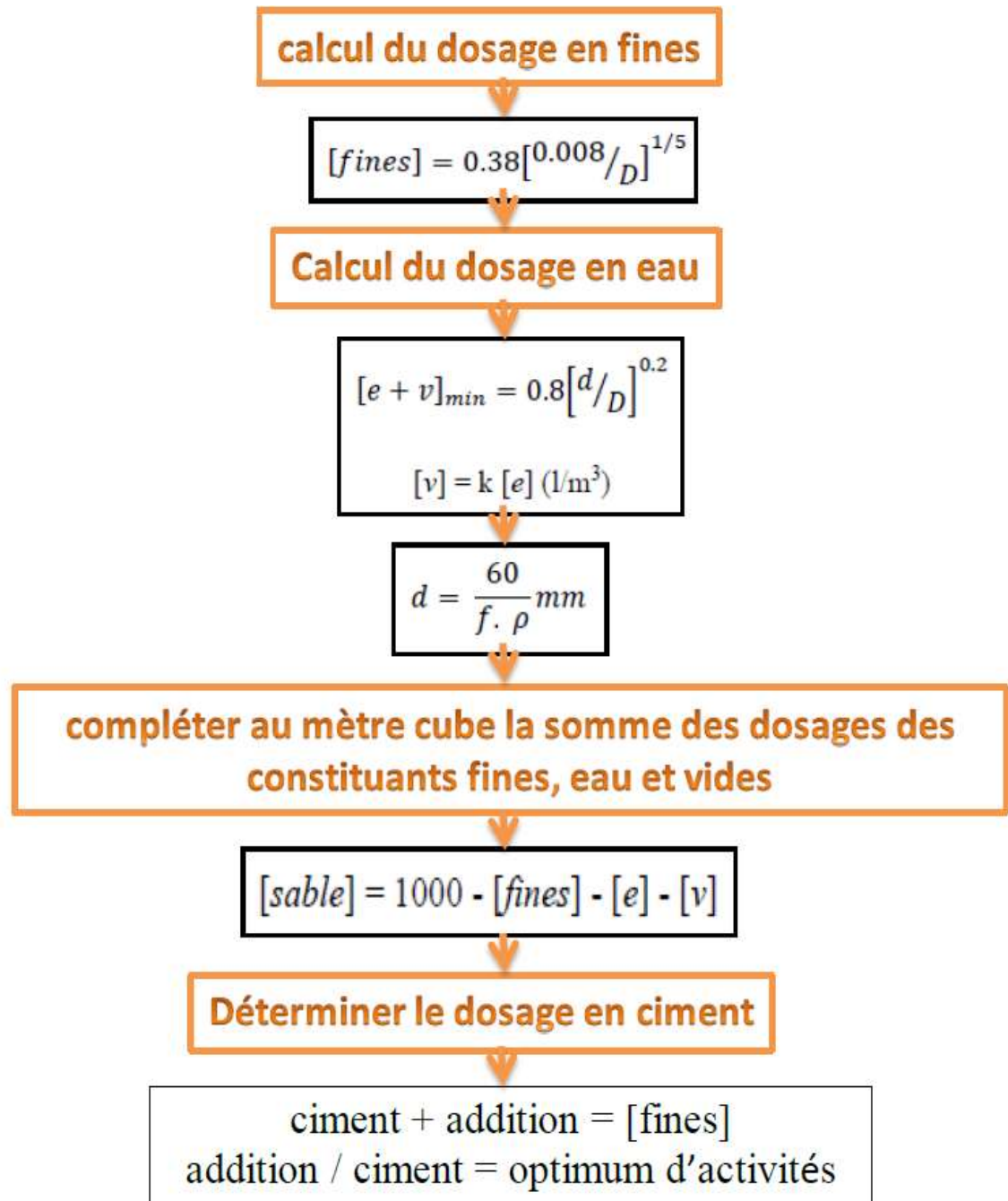


Figure III.2 : Justification du choix du dosage en ciment [2].

Le dosage en fines a pu être estimé en termes de compacité et donc imposé vis-à-vis de la résistance. Ces fines regroupent principalement le ciment, l'addition (filler calcaire) et la fraction du sable inférieur à 80 μ m souvent mineur pour les sables traditionnels. Ainsi, l'optimum de résistance serait atteint pour des dosages en ciment et en addition, solution du système dans l'organigramme ci-dessous.



Les principales étapes de formulation

La formulation centrale à base du sable de dune est donnée dans le tableau ci-dessous (tableau III.8) :

Tableau III. 8 : Composition BS de référence dans 1 m³

Ciment (C)	390
Eau (E)	269,1
Sable de dune (SD2)	1380
Fillers calcaires (F)	157,14
E/C	0,69
SP	11,7

Le Tableau III.9 expose les compositions des différents mélanges, après ajustement de la quantité d'eau (et SP) pour avoir la maniabilité désirée (retenue constante comme variable fixe) en fonction du taux de substitution.

Tableau III.9 : Les différents mélanges des BS (Kg/m³)

	BS 00% SC	BS 20% SC	BS 50% SC	BS 80% SC	BS 100% SC
Ciment	390	390	390	390	390
Sable dune SD2	1380	1104	761	310,461	0
Sable calcaire SC	0	270	761	1241,847	1581,372
Filler calcaire	157,14	157,14	157,14	157,14	157,14
Eau	269,1	253,5	220,333	209,333	202,333
SP	11,7	11,7	11,5	11,5	11,5
E/C	0,69	0,65	0,56	0,53	0,51

III.4. CONFECTION DES BETONS DE SABLE

Les bétons de sable sont fabriqués au laboratoire LTP-Est Constantine, toutes les compositions des BS étudiées ont été confectionnées suivant le même mode opératoire, avec des moyens matériels identiques et coulées dans les mêmes géométries de moules dans des conditions similaires.

Selon les besoins, deux malaxeurs de capacités différentes ont été utilisés, un de capacité de 10 litres pour les gâchées destinées aux essais à l'état frais (maniabilité) et un second d'une capacité de 100 litres pour les éprouvettes (celles pour la caractérisation mécanique, les essais du retrait, perte de masse et celles des cycles gèle dégel).

Dans tous les cas, nous avons scrupuleusement respecté les séquences de fabrication des bétons :

- Pesée des différents constituants (ciment, sable, filler, superplastifiant et eau) ;

- Préparation du mélange eau/super plastifiant ;
- Humidification du malaxeur au moyen d'une éponge ;
- Introduction des granulats du plus gros au plus fin : sable de dune, ciment et filler
- Malaxage des constituants à sec pendant 1 minute ;

Les étapes de la réalisation des bétons de sable sont présentées dans la figure III.3

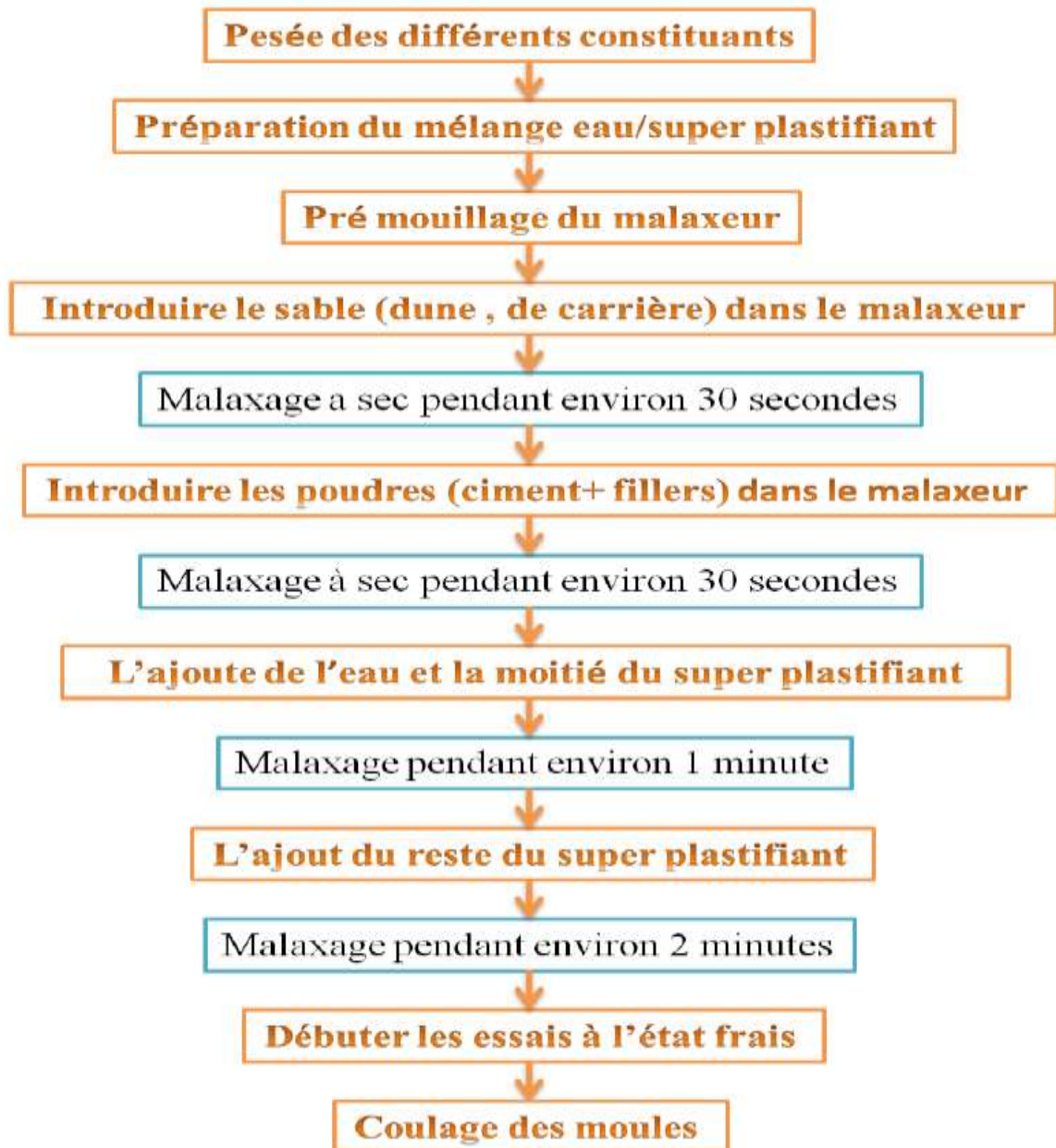


Figure III.3 : Les étapes de la réalisation des bétons de sable

Réalisation des bétons de sables fibrés

Pour les bétons de sables fibrés, on a suivi les mêmes procédures que celles des bétons de sable seulement l'introduction des fibres se fait à l'état sec avant le malaxage (avant l'ajout de l'eau), un malaxage à sec est utilisé afin d'assurer une homogénéité.

Le malaxage des bétons a été effectué à l'aide d'un malaxeur à cuve horizontale tournante d'une capacité de 100 litres. Le but recherché est de répartir, dans la masse, le plus régulièrement possible, chaque constituant afin de rendre le mélange homogène, et d'obtenir ainsi les mêmes propriétés, qu'une quantité identique prise en un endroit différent. La vitesse du malaxeur combinée à l'action des couteaux et du rotor interne ont permis une bonne dispersion du liant et une homogénéisation du mélange.

La séquence d'introduction des différents matériaux à ± 2 seconde près, est faite comme suit :

- On verse le sable (dune, de carrière) dans le malaxeur puis pour homogénéiser on malaxe pendant environ 30 secondes ;
- On verse les poudres (ciment+ fillers) à sec dans le malaxeur et on malaxe pendant 1 ;
- Introduction par partie des fibres durant le malaxage à sec pendant 3-5 minutes
- On ajoute de l'eau et la moitié du super plastifiant et on malaxe pendant 1 minute ;
- On ajoute enfin le reste de super plastifiant et on malaxe pendant 2 minutes ;
- On commence les essais de maniabilité et de l'air occlus immédiatement.

III.4.1. Corps d'épreuves

Les faces intérieures des moules doivent être mouillées par de l'huile minérale pour éviter tout risque d'adhérence qui pourrait se produire entre les moules et le béton.

Des moules prismatiques en polycarbonate de 40×40×160 mm ont été utilisés pour la confection des échantillons destinés aux mesures des résistances mécaniques aux conditions normales et aux celles soumises à d'autres essais.

Dés moules cubiques de 100×100×100 mm destinés aux mesure de la porosité capillaire.

A l'aide des plots, des moules prismatiques en polycarbonate de 40×40×160 mm percés par des trous, ont été utilisés pour la confection des échantillons destinés aux mesures des retraits libres, aux conditions normales et aux celles soumises au gel dégel.

NB : lors du coulage on a utilisé une table vibrante pendant 15 secondes.

III.4.2. Conservation des corps d'épreuves

Après démoulage, les éprouvettes ont été conservées dans l'eau à une température de $(20 \pm 2^\circ\text{C})$ jusqu'au moment des essais.

III.5. METHODOLOGIE DES ESSAIS

Cette partie est consacrée à une vaste investigation expérimentale, du deuxième programme, afin de caractériser et étudier les comportements des bétons retenus du point de vue de leurs performances rhéologiques, mécaniques et de durabilité. Les essais expérimentaux de cette étude ont été exclusivement réalisés au laboratoire LTP-EST et LMDC Constantine Algérie.

III.5.1. Essais effectués sur le béton frais

Lors de la fabrication, la caractérisation des BS est nécessaire, cela consiste à connaître leur comportement à l'état frais à partir des tests simples et reproductibles. Les principaux tests réalisés sont empiriques, et ont pour objectif de vérifier rapidement la fluidité du matériau. Pour cela on a du faire 3 mesures sur 3 gâchées différentes pour chaque essai.

III.5.1.1. Essai d'écoulement

Le temps d'écoulement a été mesuré à l'aide d'un maniabilimètre à mortier conformément à la norme AFNOR [NF P 18-452, 1988]. Il s'agit du temps nécessaire à un volume de mortier pour atteindre un repère tracé sur le maniabilimètre sous l'effet des vibrations déclenchées par un moteur.

III.5.1.2. Mesure de la quantité d'air occlus

Suivant la norme AFNOR [NF EN 12350-7, 2001], on peut évaluer la quantité d'air occlus dans un béton frais à l'aide d'un aéromètre à béton (ou à mortier) d'une capacité au moins égale à 1 litre. L'essai consiste à appliquer à un volume connu de béton une pression donnée qui va comprimer le volume d'air occlus (loi de Mariotte). La teneur en air du béton est lue directement sur l'affichage gradué de l'aéromètre.

III.5.2 Essais effectués sur béton durci

Les essais sur béton durci visent à vérifier l'homogénéité des propriétés du matériau en place et qualifier les classes des mélanges retenus.

III.5.2.1. Résistance à la traction par flexion (flexion 3 points)

Le comportement mécanique de tous les BS a été étudié en flexion simple (3 points) sur des éprouvettes prismatiques 40×40×160 mm conformément à la norme NF P. 18-407. A chaque échéance, trois échantillons sont testés en flexion simple sur le bâti de flexion de la même presse utilisée pour la compression de la marque Control modèle MCC8, asservie en force, suivant une vitesse de chargement de 0,1MPa/s.

III.5.2.2. Résistance à la Compression

Les mesures de résistance à la compression à différentes échéances (3, 7, 14, 28 jours) et celles des essais de durabilité ont été effectuées au laboratoire sur des demis prismes 40x40x160 mm des différents mélanges fabriquées, d'abord mis à l'essai de flexion. Les extrémités d'un tel prisme sont intactes après rupture en flexion et, le prisme ayant généralement une section carrée, un cube (équivalent) ou (modifié) peut être obtenu par application d'une charge au moyen d'un dispositif de compression. Permettant de réaliser correctement un tel essai. L'éprouvette doit être placée de façon que la face supérieure du prisme, non coffrée lors du coulage, ne soit en contact avec aucune des deux plaques. Cet essai est décrit dans les normes BS 1881 : partie 119 : 1983 et ASTM C 166-90. La norme ASTM autorise l'utilisation de prisme de section rectangulaire. La résistance obtenue lors d'un essai sur cube modifié est à peu près la même que celle d'un cube normalisé de même dimension.

L'essai est réalisé conformément à la norme [NF P 18-406, 1988]. Chaque éprouvette a été laissée sécher à l'air libre avant qu'elle ne soit soumise à une charge normative P croissante sous une presse jusqu'à la rupture.

La machine de compression utilisée est une presse CONTROL modèle MCC8, asservie en force. Elle est constituée par deux plateaux qui sont relié à un piston exerçant une force axiale croissante P. Cette presse est commandé par un ordinateur. Un PC enregistre directement la contrainte à la compression. La charge P est appliquée à vitesse constante de 0,5 MPa/s jusqu'à la rupture.

III.5.2.3. Variations dimensionnelles et pondérales

Le retrait des matrices cimentaires est un processus relativement complexe, que l'on a pris pour habitude de décomposer en cinq types différents : les retraits plastiques, de séchage, thermique, de carbonatation et d'endogène. Ces cinq composantes du retrait total d'une matrice cimentaire sont cumulatives, mais elles ont des cinétiques très différentes.

L'étude concernera le retrait dit total dit hydraulique (le retrait du béton durci au-delà de 24 heures) en condition de dessiccation. Les déformations différées que subit le matériau béton, bien que non chargé, débutent dès l'instant de sa mise en place et continuent tout au long de sa durée de vie.

Cet essai est réalisé sur un matériau durci grâce à un rétractomètre permettant de mesurer les variations de longueur d'échantillons placés dans une salle à $20 \pm 2\text{C}^\circ$ et à $55 \pm 5\%$ d'humidité relative, selon la norme NF P15-433.

Après démoulage (à 24 heures), les mesures de retrait total sont effectuées sur trois éprouvettes prismatiques de dimension 40x40x160 mm. Elles sont exécutées à des échéances très courtes au début, la périodicité de mesure augmentant en suite avec le temps (les éprouvettes sont disposées de manière à ce que chacune d'elles soit distante des voisines d'au moins 1 cm, et qu'elle soit entourée d'air sur toutes ses faces). Les mesures sont faites dans l'axe des éprouvettes, entre deux plots métalliques noyés dans le béton au coulage (ou collés sur les faces rectifiées des éprouvettes). L'étalonnage du rétractomètre est effectué à l'aide d'une tige étalon en Invar qui sert de référence de mesure. Parallèlement à ces mesures au rétractomètre, l'évolution dans le temps des masses des éprouvettes est également suivie.

III.5.3. Essais Physico-chimiques

II.5.3.1. Absorption d'eau par capillarité

L'absorption par capillarité est le phénomène physique susceptible de faire pénétrer des substances agressives extérieures à l'intérieur du béton. En effet, le béton est un matériau qui possède des pores capillaires dont la dimension varie suivant les caractéristiques de composition (rapport E/C, additions minérales, etc.). Lorsqu'un liquide se retrouve en contact avec ce type de pore, des tensions de surface font remonter ce liquide à l'intérieur du capillaire. Le liquide monte d'autant plus haut que le diamètre du capillaire est petit (loi de Jurin). Les pores capillaires ouverts sur le milieu extérieur vont donc conduire, dans certaines conditions (principalement d'humidité), à laisser s'infiltrer par succion des liquides pouvant contenir des espèces chimiques potentiellement préjudiciables au bon fonctionnement et à la durée de vie du matériau.

Les essais d'absorption d'eau par capillarité ont été réalisés à température ambiante (procédure AFREM). L'essai consiste à mesurer la masse d'eau absorbée par une éprouvette de béton de sable.

Après démoulage, les échantillons de forme prismatique 100×100×100 mm sont conservés jusqu'à l'âge de 28 jours dans l'eau à $20 \pm 2^\circ\text{C}$, selon la norme [NF P 18-404] (trois échantillons par composition). Avant les mesures de l'absorptivité les échantillons seront pré-conditionnés dans l'étuve à environ $105 \pm 2^\circ\text{C}$, jusqu'à ce que la variation de masse entre deux pesées espacées de 24 heures soit inférieure à 0,1%.

Les échantillons ont été exposés à l'eau sur une face en les plaçant dans un récipient. Sa surface latérale est alors recouverte de papier aluminium autocollant pour éviter l'évaporation latérale de l'eau absorbée durant l'essai.

L'essai d'absorption capillaire est réalisé à la suite de ce pré-conditionnement. Une pesée initiale M_0 de l'éprouvette est effectuée dans l'air après imperméabilisation de la surface latérale.

Les éprouvettes sont ensuite immergées dans l'eau du récipient sur une hauteur maximale de 5 mm à l'aide de cales.

A chaque échéance, les éprouvettes sont sorties du récipient, essuyées à l'aide d'une éponge humide, pesées puis replacées dans le récipient. Les échéances sont les suivantes : 0h, 0,25h, 0,3h, 1h, 2h, 4h, 7h, 24h. L'essai doit être terminé après 24 heures.

Les valeurs du coefficient d'absorption capillaire sont calculées pour les échéances suivantes : 1 heure, 2 heures et 24 heures.

III.6 RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.6.1 Notation des mélanges retenus

Dans cette section, on va essayer d'étudier premièrement l'influence de l'incorporation du sable de carrière sous différents dosages (0%, 20%, 40%, 50%, 60%, 80% et 100%) remplaçant le sable de dune sur le comportement des BS à l'état frais et à l'état durci afin de déterminer le mélange optimal. Ainsi on va déterminer les altérations observées de ces mélanges dans un milieu agressif un climat hivernal modéré en suivant son comportement sur l'effet des cycles gel/dégel.

La notation des mélanges effectués comme suit :

➤ **BS : béton de sable fillerisé sans fibres.**

SD2-0% : béton de sable fillerisé avec 100% du sable de carrière SC

SD2-20% : béton de sable fillerisé avec 20% du sable de dune et 80% du sable de carrière SC

SD2-40% : béton de sable fillerisé avec 40% du sable de dune et 60% du sable de carrière SC

SD2-50% : béton de sable fillerisé avec 50% du sable de dune et 50% du sable de carrière SC.

SD2-60% : béton de sable fillerisé avec 60% du sable de dune et 40% du sable de carrière.

SD2-80% : béton de sable fillerisé avec 80% du sable de dune et 20% du sable de carrière.

SD2-100% : béton de sable fillerisé avec 00% du sable calcaire SC.

➤ **BSF : béton de sable fillerisé avec fibres à 100%SC**

BST : béton de sable fillerisé témoin (béton de sable avec 100% du sable calcaire).

BSF (15mm ; 0,5%) : béton de sable fillerisé fibré avec une longueur de 15mm et un taux de 0,5% de fonte amorphe.

BSF (15mm ; 1%) : béton de sable fillerisé fibré avec une longueur de 15mm et un taux de 1% de fonte amorphe.

BSF (30mm ; 0,5%) : béton de sable fillerisé fibré avec une longueur de 30mm et un taux de 0,5% de fonte amorphe.

BSF (30mm ; 1%) : béton de sable fillerisé fibré avec une longueur de 30mm et un taux de 1% de fonte amorphe.

III.6.2. Caractérisation des BS fillerisés sans fibres à l'état frais

La caractérisation à l'état frais du BST sans fibres se limite aux essais suivants en fonction du taux de substitution des 7 mélanges :

III.6.2.1. La maniabilité

Les résultats d'essai de la maniabilité du BS fillerisé sont représentés dans la figure III.4.

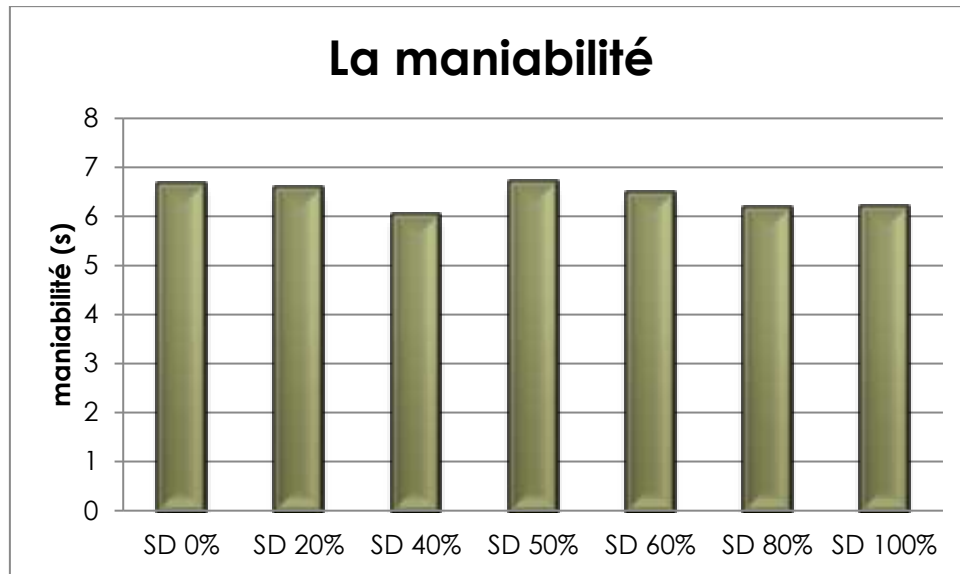


Figure III.4 : Les résultats de la maniabilité.

D'après la figure III.4, on remarque que la maniabilité est comprise entre les valeurs de 6,2 à 6,8 s. Ce qui vérifie notre choix en fixant l'ouvrabilité comme variable constante, obtenue en ajustant la quantité d'eau (et SP) par rapport à la composition du témoin de référence BS à base de SD2.

III.6.2.2. L'air occlus

Les résultats obtenus de l'essai d'air occlus sont illustrés dans la figure III.5.

Selon la figure III.5, on note que le pourcentage d'air occlus augmente avec l'augmentation du dosage de sable dunaire SD2, ainsi que l'augmentation du rapport E/C. Cette augmentation est de l'ordre de 5.66%, 9.09%, 10.71%, 13.79%, 16.66% et 18.03% respectivement pour les dosages 0%, 20%, 40%, 50%, 60%, 80% et 100% de sable de dune SD2.

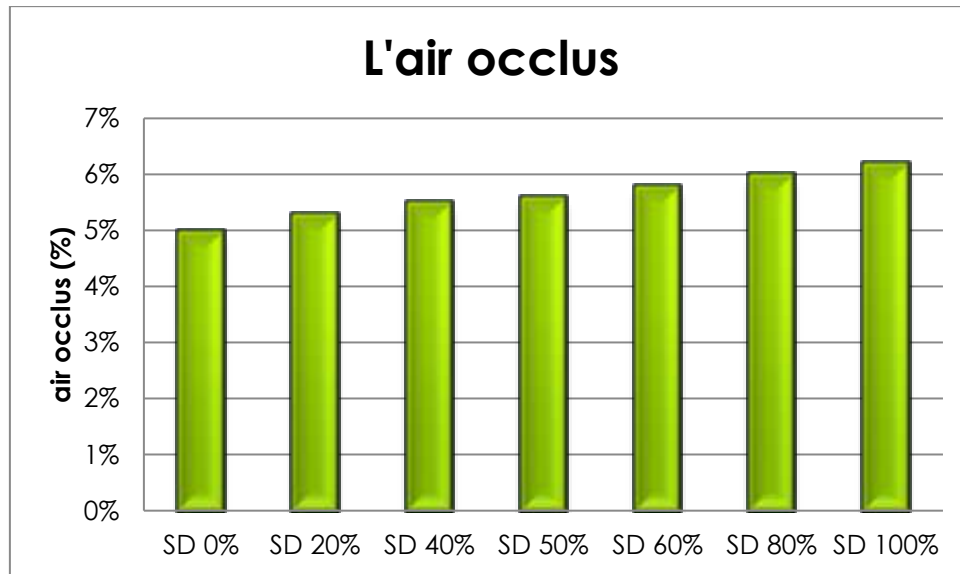


Figure III.5 : Variation du pourcentage d'air occlus

III.6.2.3. La densité

La figure III.6 représente les résultats obtenus par l'essai de la densité.

D'après la figure III.6, on observe une diminution de la densité avec l'augmentation du dosage du sable de dune SD2. Cette diminution est de l'ordre de 1.49%, 4.15%, 5.12%, 5.89%, 8.39% et 13.64% respectivement pour les dosages 0%, 20%, 40%, 50%, 60%, 80% et 100% à cause de la légèreté du sable de dune avec une quantité d'eau élevée.

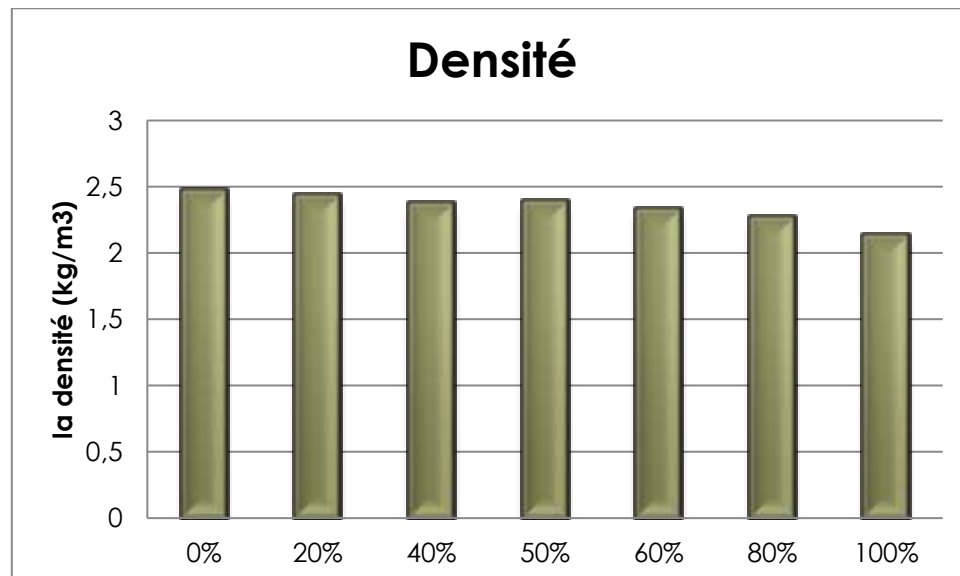


Figure III.6 : Variation de la densité

Selon les résultats, une diminution du taux en sable calcaire conduit à une augmentation de la teneur en eau pour atteindre l'ouvrabilité visée. La forme sphérique des particules de SD peut être bénéfique pour l'ouvrabilité du béton de sable fillerisé mais la taille très fine des particules et la grande surface spécifique de SD rendent le béton cohésif nécessitant plus d'eau pour répondre à l'ouvrabilité appropriée [3]. Plus d'eau couplée à une densité plus faible de SD entraîne une diminution de la densité à condition que le taux SD dans le béton de sable fillerisé augmente.

III.6.3. Caractérisation des mélanges BS fillerisé sans fibres à l'état durci

Pour chacune des compositions retenue, On a réalisé expérimentalement l'étude des propriétés suivantes :

- la résistance à la compression à différentes échéances de 3, 7, 14 et 28 jours.
- la résistance à la traction par flexion à 3, 7, 14 et 28 jours.
- le retrait total et perte de masse à moyen terme (28 jours).
- la porosité capillaire

III.6.3.1. La résistance à la compression

D'après le tableau III.9, on remarque que, pour tous les BS fillerisés, la résistance moyenne à la compression augmente progressivement avec l'âge de béton (Ceci peut s'expliquer par le développement du phénomène d'hydratation du ciment dans les BS en fonction du temps en présence d'humidité suffisante) et diminue avec l'augmentation de dosage de SD2.

Ces résultats montrent que les résistances moyennes à la compression à 28 jours sont comprises entre 10,05 et 30,05 MPA .On constate d'après ces résultats que la résistance à la compression la plus élevée est celle de la composition avec un dosage de 0 % SD2 (à 28 jours). Nous notons aussi que la résistance à la compression à 28 de 100% SD2, est la plus faible.

La résistance à la compression RC28 augmente de 18,1 %, lorsqu'E/C passe de 0.537 à 0.518, elle augmente de 46.18 %, lorsqu'E/C passe de 0.565 à 0.518.

Dvorkin [4] confirme que cette amélioration est due à l'influence du super plastifiant sur les grains du ciment, car en s'adsorbant à la surface des grains de ciment les super plastifiants diminuent les forces d'attraction entre elles et donnent naissance à des forces de répulsion empêchant ces grains de ciment de flocculer à l'âge du béton de sable.

On constate, d'après le tableau III.10, que la résistance à la compression augmente en fonction de l'âge pour tous les mélanges.

Tableau III.10 : Les résultats de la résistance à la compression de tous les mélanges

	3j	7j	14j	28j
BS SD2 100%	10,05	10,07	11	12,5
BS SD2 80 %	11	14	16,5	17,5
BS SD2 60 %	11,5	14,25	17,25	20
BS SD2 50%	12,75	16	18,5	20,5
BS SD2 40 %	14,5	20	22	24,5
BS SD2 20 %	15,5	22,75	24	28,75
BS SD2 00 %	19	26	27,75	30,05

Pour l'ensemble des mélanges, que la résistance à la compression à 7 jours atteint au moins 70% de la résistance à 28 Jours.

Le béton de sable fillerisé à base de sable dunaire (SD2 100%) présente la plus faible résistance de compression initiale à 3 jours avec une valeur de 10,05 MPa Cette dernière augmente avec l'augmentation du taux de substitution pour atteindre 30,05 MPa pour le mélange à 100% sable calcaire avec un gain de 50%.

L'effet du taux de substitution sur la résistance à la compression s'accroît en fonction de l'âge avoisinant les 15% (pour passer de 90% à 3 jours à 150% à 28 jours avec un taux de 100%).

La figure III.7 représente les différentes résistances à la compression selon le taux de substitution du sable de dune SD2 :

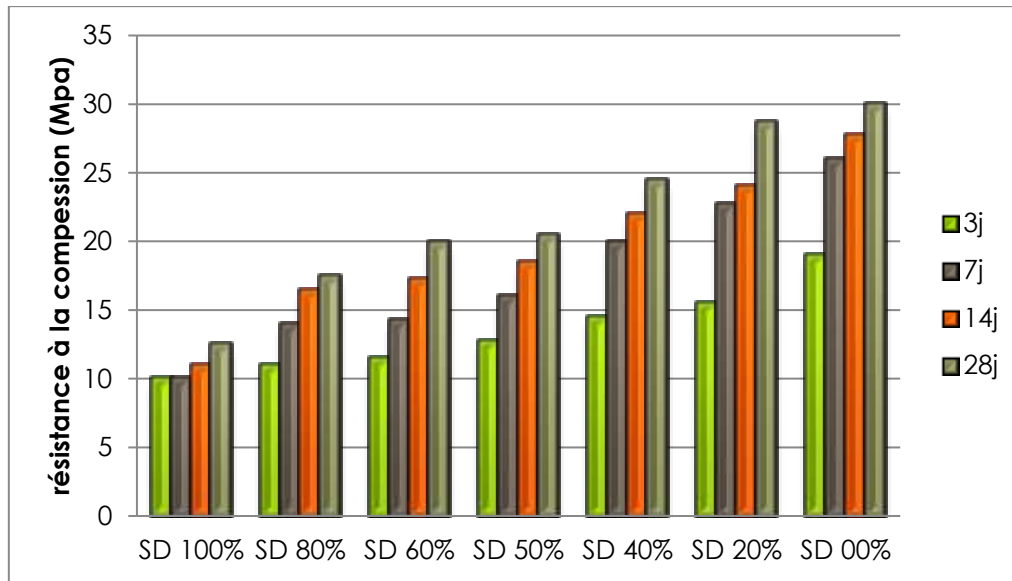


Figure III.7 : Evolution de la résistance à la compression des différents mélanges

III.6.3.2. La résistance à la flexion

Tableau III.11 : Résultats de la résistance à la flexion des mélanges

	3j	7j	14j	28j
BS SD2 100%	1,9	2,1	2,3	2,6
BS SD2 80 %	2,4	2,7	3,0	3,1
BS SD2 60 %	2,5	3,1	3,5	3,9
BS SD2 50%	2,9	3,6	4,1	4,5
BS SD2 40 %	3,2	4,0	4,4	4,9
BS SD2 20 %	4,05	4,6	5,2	5,6
BS SD2 00 %	4,55	5,05	5,5	6,2

On constate :

Le même comportement qu'en compression (similaire)

La résistance à la flexion augmente en fonction de l'âge pour tous les mélanges.

Pour l'ensemble des mélanges, que la résistance à la flexion à 7 jours atteint plus de 80% de la résistance à 28 Jours.

Le béton de sable fillerisé (témoin) à base de sable dunaire (100% SD2) présente la plus faible résistance à la flexion initiale à 3 jours avec une valeur de 1,9 MPa. Cette dernière augmente avec l'augmentation du taux de substitution pour atteindre 6,20 MPa pour le mélange à 100% sable calcaire avec un gain de plus de 100%.

L'effet du taux de substitution sur la résistance reste stable en fonction de l'âge avoisinant les 10%.

La figure III.8 représente les différentes résistances à la flexion selon le dosage du sable de dune SD2 :

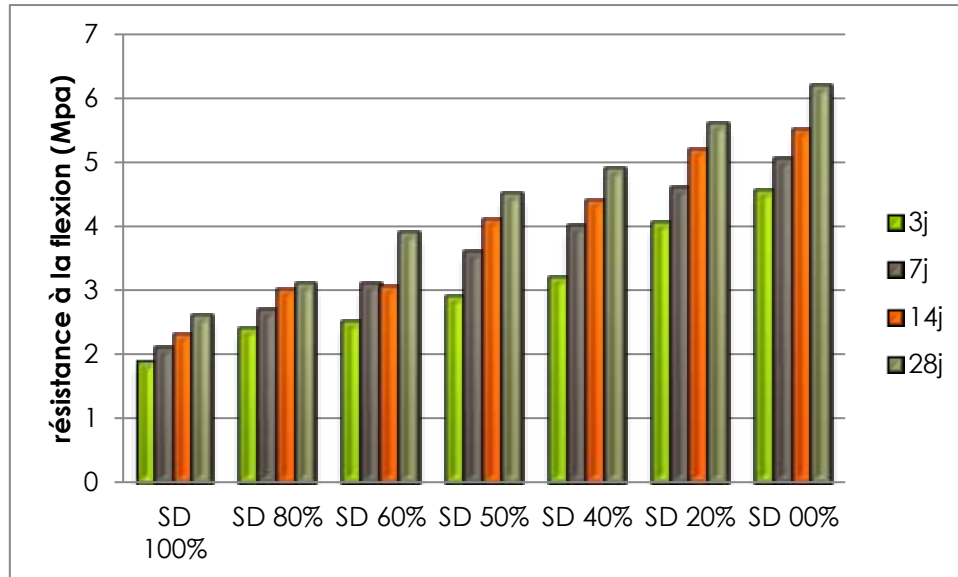


Figure III.8 : Résistances à la flexion des différentes compositions.

D'après la figure III.8, on observe une diminution de la résistance à la flexion de l'ordre de 9.6%, 21.84%, 27.17%, 38.54%, 49.49% et 56.63% respectivement pour les dosages 0%, 20%, 40%, 50%, 60%, 80% et 100% de sable de dune SD2.

On conclut que le sable de dune a une influence négative sur le comportement mécanique de notre béton.

Comme le montre les résultats, le béton de sable fillerisé à base du sable concassé (SC) présente les meilleures propriétés mécaniques en raison du diamètre le plus élevé et de la meilleure distribution granulométrique du sable concassé. Ce résultat peut également être attribué à une absorption plus élevée du sable concassé par rapport au sable des dunes, qui génère moins d'eau de mélange dans le béton de sable concassé et, par conséquent, une porosité réduite qui améliore la compacité et la résistance mécanique du béton [4]. De plus, l'angularité du sable concassé rend la propagation des fissures dans le béton de sable fillerisé plus difficile par rapport aux sables dunaires, qui se caractérisent par une forme arrondie et une nature siliceuse [5]. De plus, les granulats broyés, par leur surface rugueuse et irrégulière, produisent une zone de transition interfaciale plus dense (ZIT), qui constitue la force de liaison entre la surface des granulats et la pâte de ciment [6].

Pour les bétons de sable fillerisé à base de sable dunaire SD2, la résistance à la compression la plus élevée a été enregistrée pour le mélange SD2 20%, ce qui est inférieur à celui du SD2 0%. Il s'agit du taux de substitution le plus bas utilisé. Cela pourrait être dû à la grande compacité des granulats obtenue par une optimisation du mélange entre fillers calcaires, granulats grossiers et sable dunaire [7]. De par sa finesse, ce dernier comble les vides du premier granulats. Cependant, notons que la résistance à la compression a diminué avec le taux en sable des dunes mais qu'elle atteint des valeurs acceptables. Cette diminution de la résistance pourrait être attribuée à la zone de transition interfaciale plus faible car les grains SD2 ont une forme arrondie et une surface lisse. Ces propriétés physiques peuvent réduire la résistance de liaison agrégat-pâte [8].

Les valeurs des résultats des essais de résistance à la traction, présentés dans le tableau, ont montré une tendance assez similaire aux résultats de résistance à la compression. Ces valeurs montrent que la résistance du béton de sable fillerisé diminue avec l'augmentation de la teneur en sable des dunes. Comme on peut le voir, la diminution de la résistance du béton a été brutale à un taux en sable des dunes supérieur à 20%, vraisemblablement en raison de l'augmentation du tassement des grains de sable des dunes qui se caractérisent par une surface lisse et arrondie [9-10]. Le taux plus élevé de sable de dunes (jusqu'à 20%) entraîne une diminution de la résistance du béton de sable fillerisé en raison d'une augmentation de la surface lisse de ces grains conduisant à plus de saignement et de ségrégation de ces grains dans le mortier frais avant les processus de durcissement [11]. Ce type de granulats doit nécessiter une vibration délicate et continue lors du coulage du béton sur site pour éviter les risques de ségrégation, notamment pour des teneurs supérieures à 20%.

III.6.3.3. La corrélation entre la résistance à la traction et à la compression

D'après la figure III.9 On constate que la résistance à la traction est d'environ 6 fois plus faible que la résistance à la compression. On constate aussi que l'augmentation de la résistance à la compression est proportionnelle que celle de la traction.

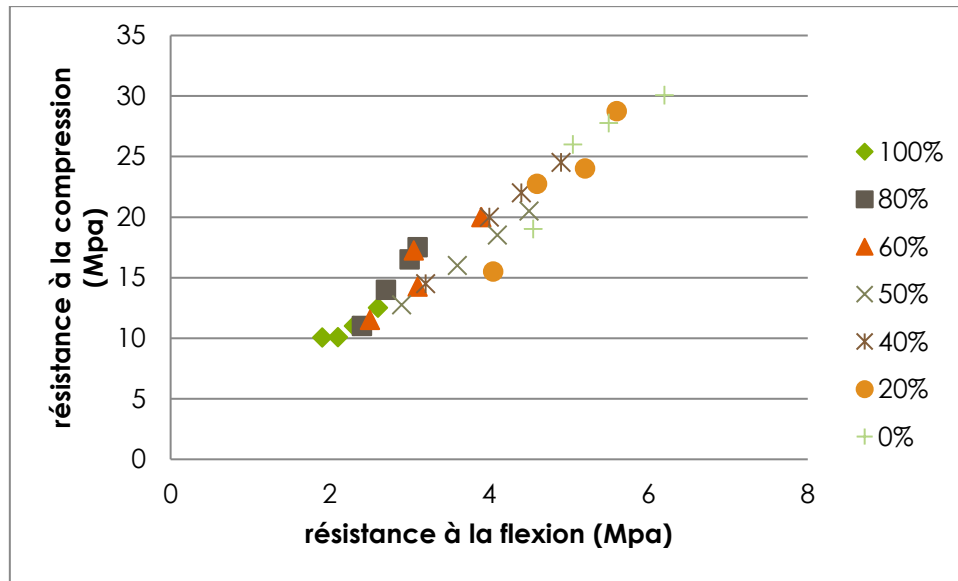


Figure III.9 : Corrélation entre la résistance à la traction et la compression.

Afin d'illustrer les similitudes et les différences entre la résistance en compression et la résistance en flexion, nous avons comparé sur la figure III.9 la variation relative de la résistance en flexion à celle de la résistance en compression.

Sur la figure III.9, les résistances en flexion sont illustrées en fonction des résistances en compression, pour les 7 taux aux 4 échéances retenues.

Nous observons une bonne corrélation entre les résistances en flexion et en compression.

Notons qu'à partir d'une certaine résistance du BS (respectivement 60% en compression et 70% en traction par rapport à la résistance finale), la valeur en compression augmente plus vite que celle en flexion.

Nous constatons que les bétons de sable fillérisés s'alignent sur la bissectrice du diagramme. Seul le témoin présente un comportement qui s'écarte par rapport à celui des autres mélanges et qui est caractérisé par une contribution plus importante à la résistance en compression qu'à la résistance en flexion. Une étude microstructurale détaillée est nécessaire pour interpréter ces résultats.

Les effets du superplastifiant sont marqués lorsque la quantité de ciment (+ fillers) est importante. Dans tous les cas de substitution, l'influence du superplastifiant est plus faible sur le BS témoin à base de SD2.

III.6.3.4. Variations dimensionnelle et pondérale

❖ Le retrait

Les mesures de retrait et perte en masse sont effectuées longitudinalement sur éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm, munies de plots à leurs extrémités. Pour le retrait la lecture sur le retractomètre est en ($\mu\text{m}/\text{m}$).

Il faut tenir compte d'un point important concernant le début des mesures de retrait.

Les premières mesures effectuées servent de référence pour la suite de l'évolution du retrait. Donc, plus on effectue ces mesures tôt, meilleure sera l'estimation des déformations du retrait.

Les résultats obtenus, montre que le retrait augmente avec l'augmentation du dosage en eau et ce dernier augmente avec l'augmentation de SD2.

Le fait de mettre les éprouvettes à l'air libre, le retrait commence à diminuer pour terminer avec des valeurs élevées. Une fois cette eau évaporée avec une variation de la température et l'humidité, le retrait commence à se stabiliser.

Le tableau III.12 présente le retrait total des différents mélanges à court terme à 28 jours en $\mu\text{m}/\text{m}$.

Tableau III.12 : Les valeurs du retrait total des mélanges étudiés à 28 jours

JOURS	SD 0%	SD 20%	SD 40%	SD 50%	SD 60%	SD 80%	SD 100%
28	993.75	952.36	945.83	777.08	577.08	525	371.87

D'après le tableau III.12 on constate que le retrait diminue avec l'augmentation du dosage du sable de dune SD2 à moyen terme. Cette diminution est de l'ordre de 4.16%, 4.82%, 21.80%, 41.92%, 47.61% et 56.54% respectivement pour les dosages 0%, 20%, 40%, 50%, 60%, 80% et 100%.

On conclut que le sable de dune SD2 a un effet positif sur le retrait total des BS.

❖ Etude de la perte en masse

Selon l'importance de l'effet de la nature de sable sur le comportement des BS ont montré l'influence de ces derniers sur la variation pondérale (la perte en masse). L'influence des différents dosages de sable de dune SD2 sur l'évolution de la perte en poids des éprouvettes prismatiques avec l'âge du béton est bien marquée. La perte en poids de BS augmente avec

l'augmentation du taux de SD2 ainsi avec l'augmentation de rapport E/C. Donc l'évolution de la perte poids est fonction de la quantité d'eau libre dans le béton et la porosité

III.6.3.5. La porosité

Nous nous sommes intéressés à cette caractéristique afin de connaître le comportement des BS en présence d'eau.

Les résultats obtenus sur les différents mélanges (SD2 0%, SD2 20%, SD2 40%, SD2 50%, SD2 60%, SD2 80%, SD2 100%) sont illustrés sur la figure III.10.

Le Tableau III.13 regroupe les résultats de la porosité l'absorption capillaire des différents échantillons des BS effectués :

Tableau III.13 : Les résultats de la porosité capillaire

	0	25min	30min	1h	2h	4h	6.5h	24h
SD 0%	2.276	2.284	2.285	2.287	2.287	2.29	2.292	2.298
SD 20%	2.277	2.279	2.279	2.28	2.28	2.28	2.282	2.288
SD 40%	2.184	2.188	2.188	2.188	2.191	2.195	2.196	2.199
SD 50%	2.138	2.146	2.147	2.15	2.156	2.162	2.169	2.187
SD 60%	2.076	2.09	2.092	2.099	2.107	2.116	2.125	2.152
SD 80%	1.976	1.985	1.985	1.99	1.992	1.996	1.997	2.007
SD 100%	1.91	1.91	1.922	1.926	1.932	1.942	1.95	1.986

D'après le tableau III.13 on remarque une augmentation en masse de chaque échantillon avec le temps. Après 24 h l'absorption d'eau est très élevée.

La figure III.10 présente l'évolution de la porosité capillaire des échantillons utilisés.

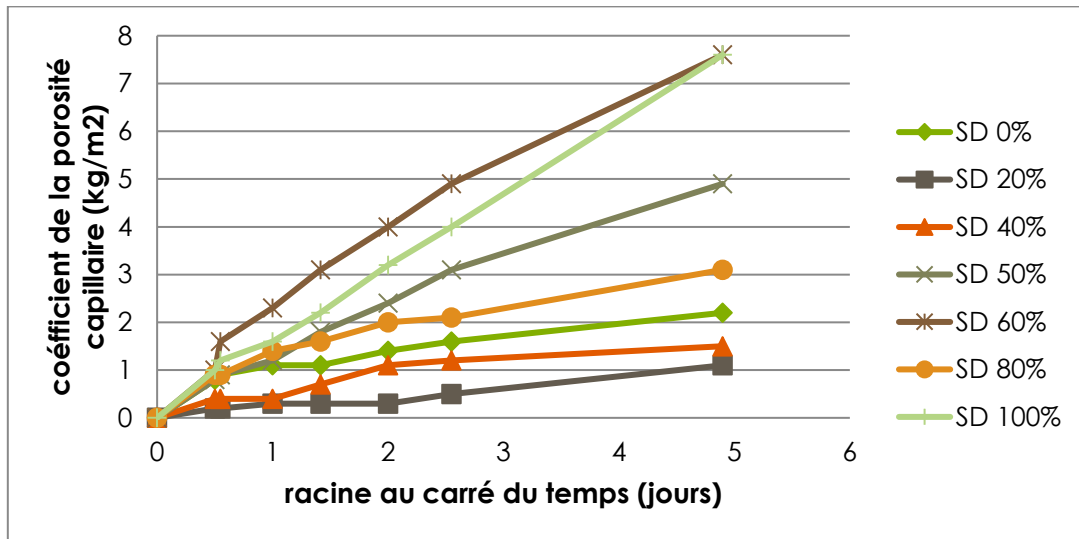


Figure III.10 : La porosité capillaire des différents mélanges

D'après la figure III.10, on constate que :

- La porosité capillaire augmente avec l'augmentation du dosage du sable de dune SD2.
- Cette augmentation est plus observée pour le dosage de 60% de sable de dune SD2 comme elle est illustrée dans la figure III.11 :



Figure III.11 : Eprouvettes soumises après l'essai de la porosité capillaire pour SD2 60%

III.7. BILAN : BS SANS FIBRES

Les premiers résultats obtenus d'après cette étude sont :

- L'effet positif du sable calcaire SC sur la maniabilité du BS à base de SD2.

- L'introduction du sable calcaire SC augmente les performances mécaniques.

On conclut que le mélange optimum est atteint quand le sable de dune est absent c'est-à-dire SD2 00%.

III.8. CARACTERISATION DES BS AVEC FIBRES

Les mélanges effectués afin de caractériser notre béton sont désignés comme suit :

- BST : béton de sable sans fibres témoin (béton de sable avec 100% du sable de carrière).
- BSF (15mm ; 0,5%) : béton de sable fibré avec une longueur de 15mm et un taux de 0,5%.
- BSF (15mm ; 1%) : béton de sable fibré avec une longueur de 15mm et un taux de 1%.
- BSF (30mm ; 0,5%) : béton de sable fibré avec une longueur de 30mm et un taux de 0,5%.
- BSF (30mm ; 1%) : béton de sable fibré avec une longueur de 30mm et un taux de 1%.

III.8.1. Caractérisation du BSF (avec fibres) à l'état frais

La caractérisation à l'état frais du BSF est déterminée à partir des essais suivants :

III.8.1.1. La maniabilité

La figure III.12 regroupe les résultats obtenus d'essai de maniabilité du BSF :

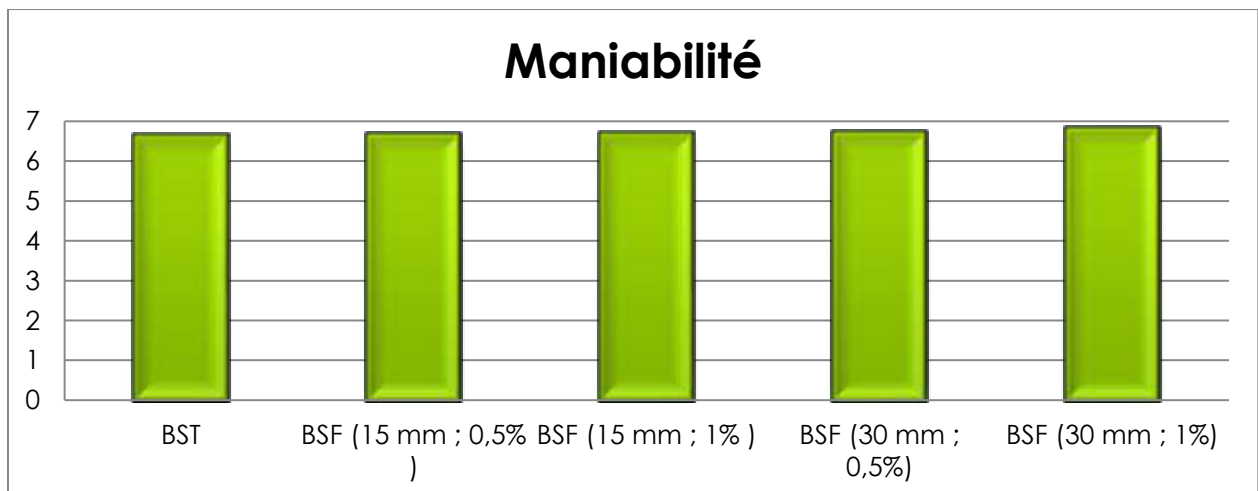


Figure III.12 : La maniabilité des BSF.

D'après la figure III.12 on peut noter :

- une légère augmentation de la maniabilité de l'ordre de 0.1%, 0.7%, 0.10% et 0.23% respectivement pour les mélanges BSF (15mm ; 0,5%), BSF (15mm ; 1%), BSF (30mm ; 0,5%), BSF (30mm ; 1%) par rapport au BST.
- La maniabilité reste comprise entre 6 et 7s.

III.8.1.2. L'air occlus

Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure III.13 :

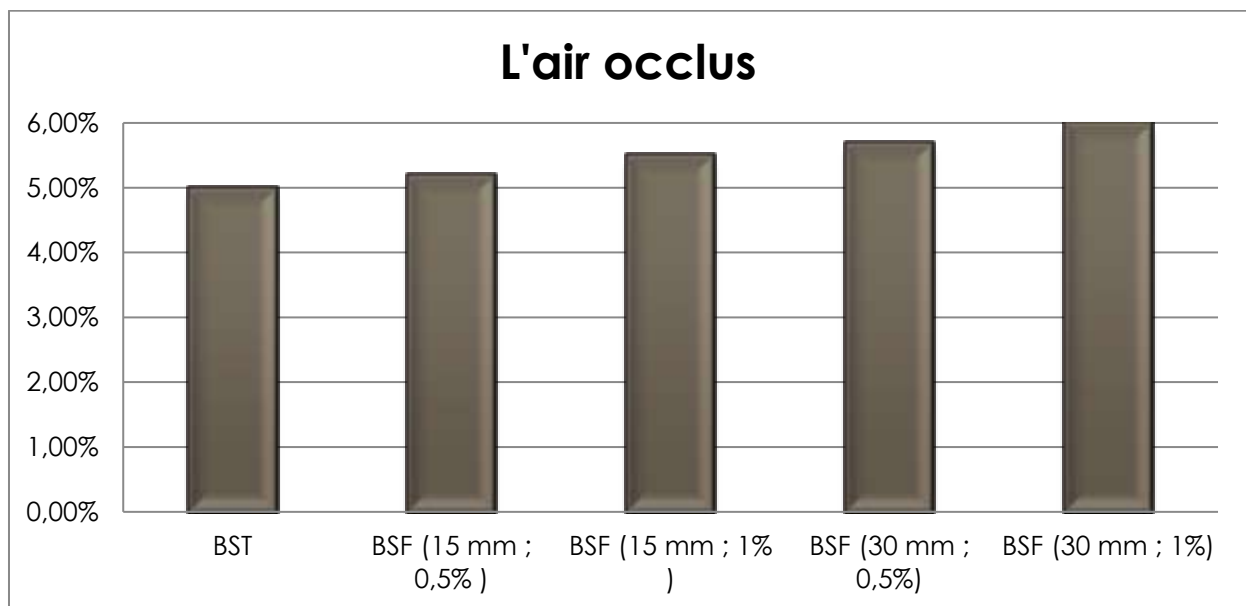


Figure III.13 : Variation du pourcentage d'air occlus des BSF.

La figure III.12 montre que le pourcentage d'air augmente de l'ordre de 3.8%, 9.09%, 12.28% et 16.66% respectivement pour les mélanges BSF (15mm ; 0,5%), BSF (15mm ; 1%), BSF (30mm ; 0,5%), BSF (30mm ; 1%) par rapport au BST à cause des vides créés par les fibres.

III.8.1.3. La densité

La figure III.14 représente les résultats obtenus par l'essai de la densité.

D'après la figure III.14, on observe une augmentation de la densité de l'ordre de 2.74%, 2.86%, 2.86% et 3.09% respectivement pour les mélanges BSF (15mm ; 0,5%), BSF (15mm ; 1%), (30mm ; 0,5%), BSF (30mm ; 1%) par rapport au BST à cause de l'ajout des fibres.

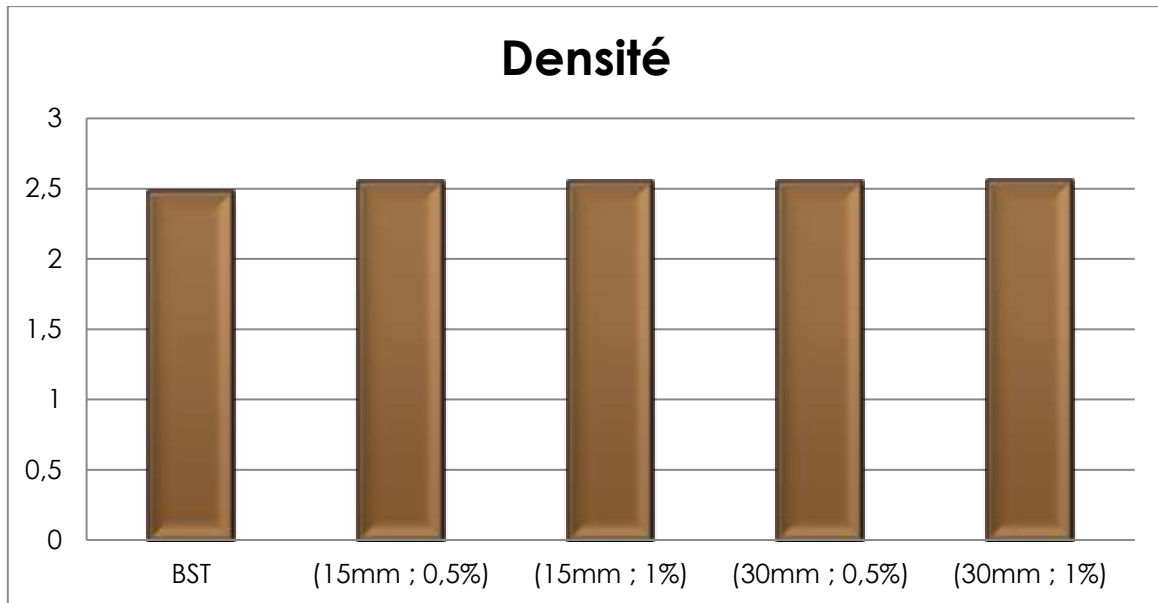


Figure III.14 : Variation de la densité des BSF.

III.8.2. Caractérisation du BSF à l'état durci :

La caractérisation des BSFs à l'état durci est basée sur l'étude des propriétés suivantes :

- la résistance à la compression à 3, 7, 14 et 28 jours.
- la résistance à la flexion à 3, 7, 14 et 28 jours.
- le retrait total à court terme 28 jours.
- la porosité capillaire.

III.8.2.1. La résistance à la compression

Le tableau III.14 et la figure III.15 représente les valeurs moyennes de la résistance à la compression en MPa.

Tableau III.14 : Les résultats de la résistance à la compression des BSF.

Résistance à la compression en Mpa:					
jours		3j	7j	14j	28j
BST		19	26	27,75	30,05
BSF 1,5	0,5%	20,5	26,75	28,75	31,55
	1%	18,65	25,8	27,40	29,8
BSF 3	0,5%	19,05	26,03	28,15	30,25
	1%	18,45	25,06	27,01	29,55

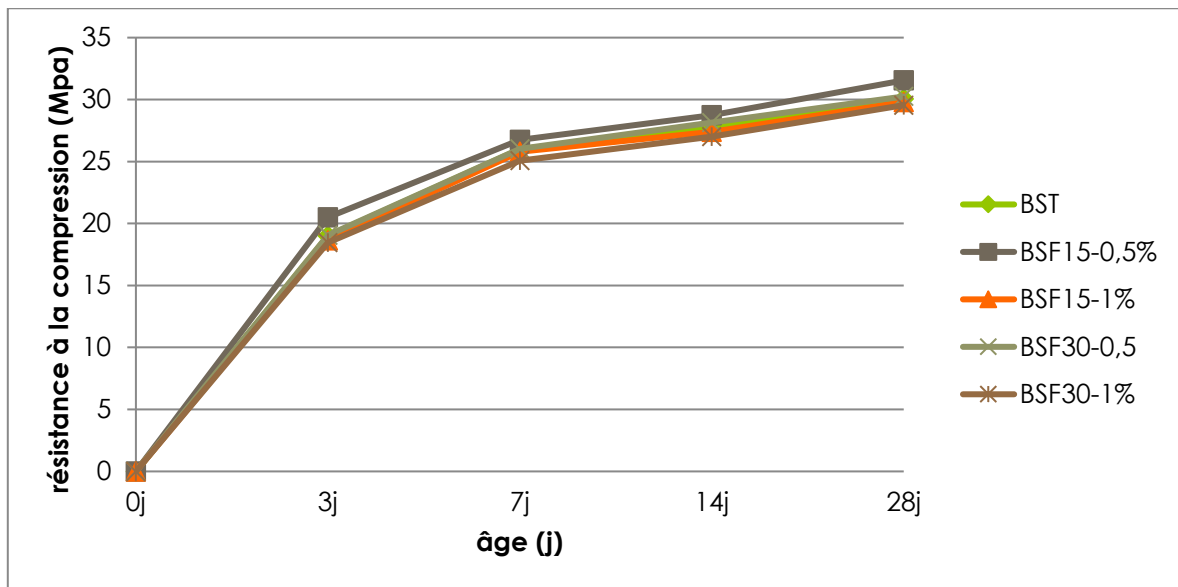


Figure III.15 : Les résultats de la résistance à la compression des BSF.

L'analyse des résultats regroupés au Tableau III.12 et la figure III.15 montrent que :

- Aucune amélioration nette des résistances
- L'introduction de 1% de fibres métalliques de fonte amorphe diminue légèrement la résistance à la compression par rapport à un dosage de 0.5%.
- Tous les mélanges ont présente une bonne résistance en compression variant entre 18,65 et 30,55 MPa.

Selon la figure III.14, on constate que les courbes se superposent avec une très légère démarcation du mélange BSF 15-0,5%.

Donc une légère augmentation de l'ordre de 5% par rapport au témoin sans fibres, du mélange BSF 15 mm avec un dosage de 0,5%

Pour les autres mélanges un maintien ou une légère diminution sont observés.

a) Influence du dosage des fibres

Selon le taux, la figure III.16 (a et b) représente les différentes résistances à la compression :

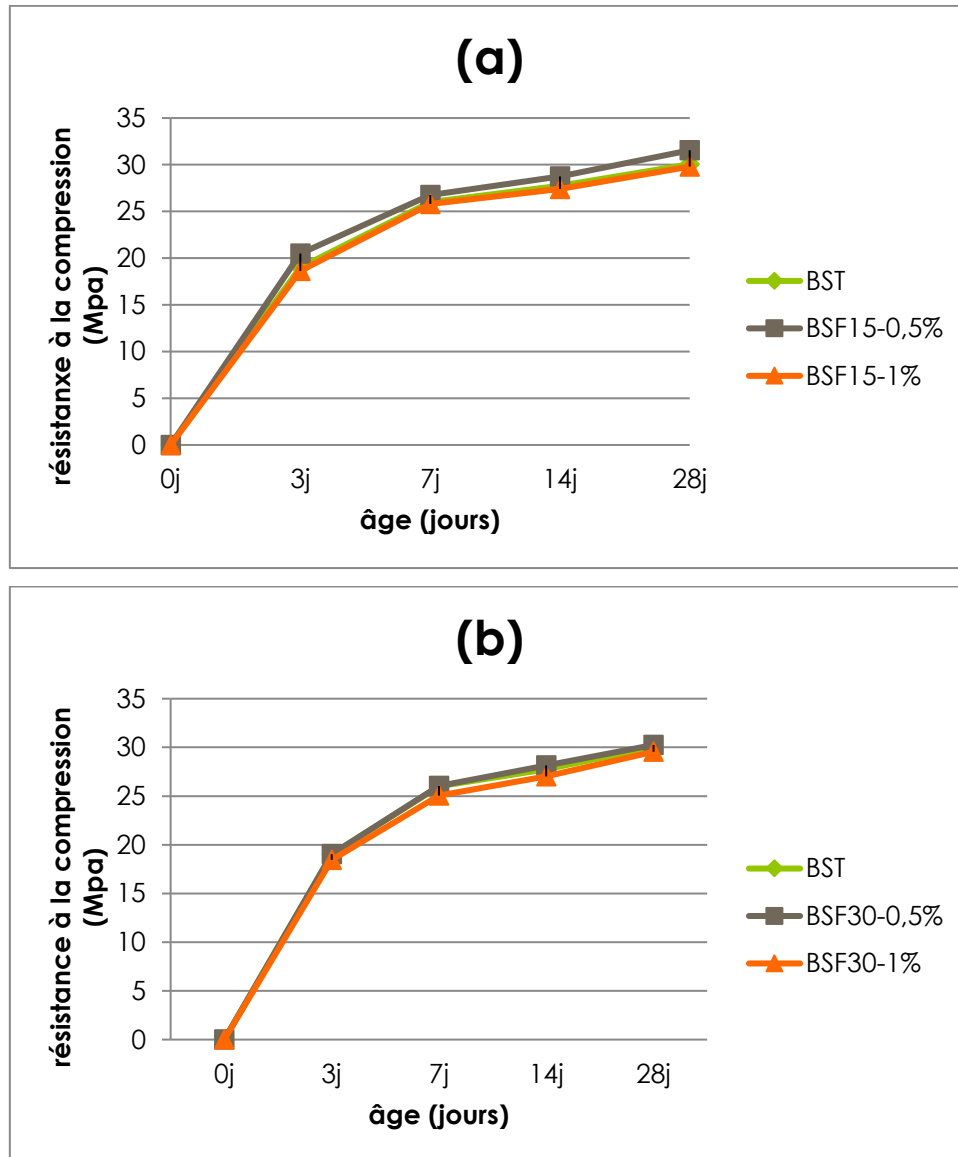


Figure III.16 : Les résultats de la résistance en compression selon le taux (a) 15mm, (b) 30 mm

On remarque avant 3 jours que les courbes sont superposées, tandis qu'au-delà une légère démarcation allant jusqu'à 28 jours est observée quelle que soit l'élancement de la fibre (longueur).

D'après la figure III.16 (a et b) on constate que l'introduction des fibres de fote amorphe avec une teneur de 1% diminue la résistance en compression. Cette diminution est plus prononcée pour les mélanges à base des fibres de longueur 30 mm.

La diminution de la résistance est due à l'augmentation du pourcentage d'air occlus dans le béton ainsi qu'à la perte de cohésion vu la présence des fibres.

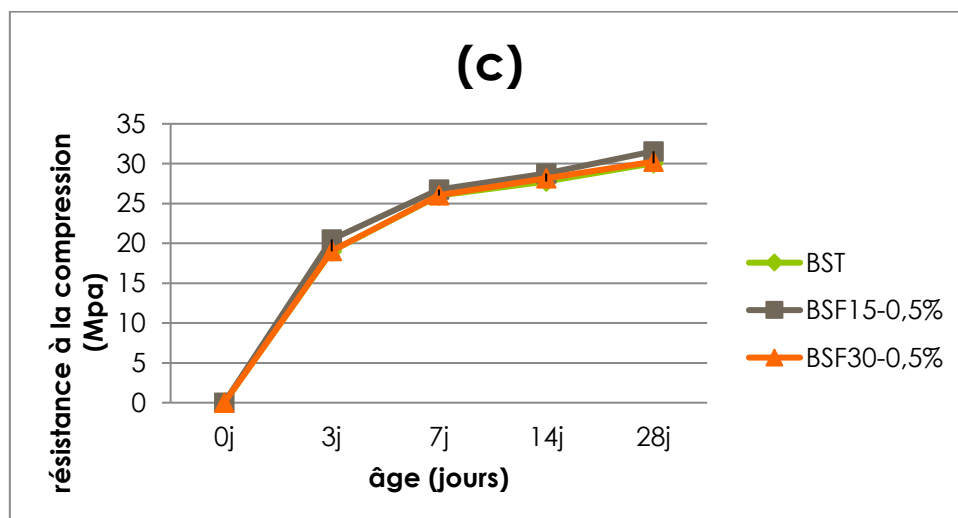
On note que malgré la résistance à la compression diminue légèrement, elle reste avoisinante à celle du BS sans fibres (témoin).

b) Influence de l'élanement (longueur) :

Selon la longueur, la figure III.17 (c et d) représente les différentes résistances à la compression.

D'après la figure III.17 (c et d) on constate que l'augmentation de l'élanement des fibres diminue légèrement la résistance à la compression. Cette diminution est plus observée pour les mélanges à base des fibres plus longues de longueur 30 mm.

On peut conclure que l'introduction des fibres métalliques de fonte amorphe dans les BS n'a pas d'effet significatif (ou a un effet négatif) sur la résistance à la compression (maintien des résistances) pour des taux faibles. Ces résultats sont en cohérence avec ceux de la littérature [12].



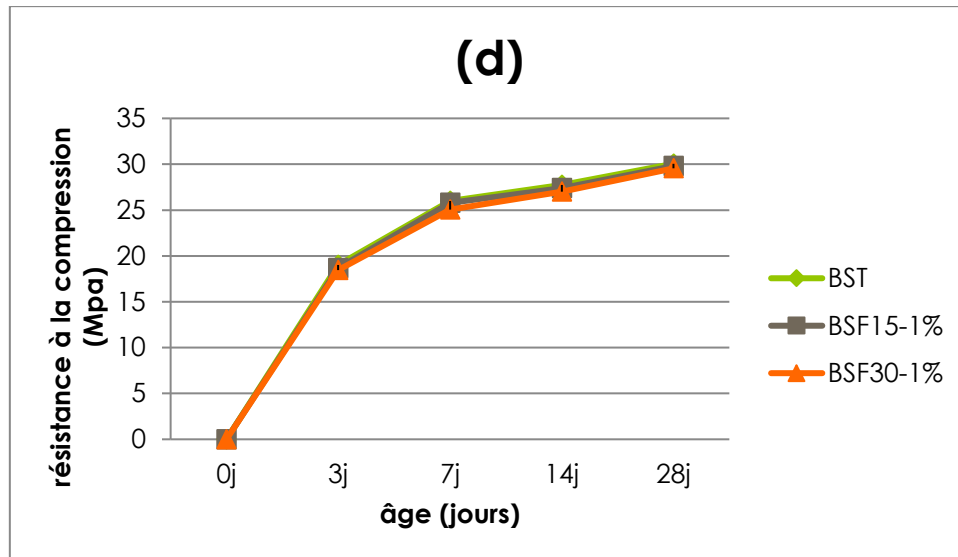


Figure III.17 : Les résultats de la à la compression selon la longueur pour (c) un taux de 0.5% (d) un taux de 1%

III.8.2.2. La résistance à la flexion

Le tableau III.15 et la figure III.18 représentent les valeurs moyennes de la résistance à la flexion en Mpa.

Selon le Tableau III.15 et la figure III.18 on constate que pour les deux taux et les deux élancements, une augmentation de la résistance à la flexion en fonction de temps. Cette augmentation est de l'ordre de 21.73%, 44.89%, 46.79% et 59.16% respectivement pour les mélanges BSF (15mm ; 0,5%), BSF (15mm ; 1%), BSF (30mm ; 0,5%), BSF (30mm ; 1%) par rapport au BST.

Tableau III.15 : Les résultats de la résistance à la flexion des BSF.

Résistance à la flexion en Mpa					
jours		3j	7j	14j	28j
BST		4,55	5,05	5,5	6,2
BSF 1,5	0,50%	5,25	7,03	7,5	7,7
	1%	6,61	7,35	7,8	8,26
BSF 3	0,50%	7,05	7,45	7,95	8,56
	1%	7,8	8,75	9,1	10,3

Donc on constate que les résultats des résistances à la flexion montrent l'effet bénéfique de l'introduction des fibres de fonte amorphe dans le BS pour cette sollicitation de traction indirecte.

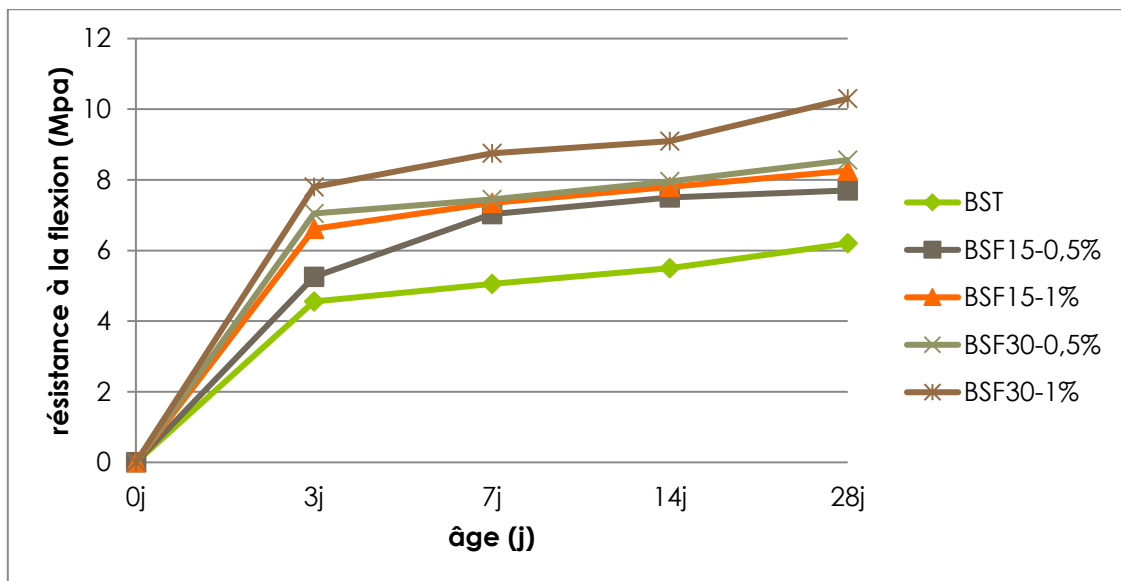


Figure III.18 : Les résultats de la résistance à la flexion des BSF.

Les gains de résistance à la flexion sont observés dès le jeune âge, et sont plus prononcés au-delà de 7 jours où les courbes sont très distinctes en se démarquant du témoin.

Ces résultats sont conformés avec les résultats trouvés dans la littérature [12]. Dans notre étude, on remarque que l'introduction des fibres de fonte amorphe dans la matrice augmente la résistance à la flexion quelque que soit le taux ou l'éclatement. Le BS avec fibres de fonte amorphe résiste plus comme illustrée dans la figure III.19 suivante montrant le mode de rupture.



Figure III.19 : Mode de rupture d'une éprouvette à la flexion du BS avec et sans fibres.

a) Influence du dosage des fibres

Selon le taux, la figure III.20 (a et b) représente les différentes résistances à la flexion.

On montre que :

- L'ajout des fibres de fonte amorphe engendre une augmentation de la résistance à la flexion des BS.
- Le matériau avec 1% de fibres présente un comportement mécanique très amélioré par rapport au matériau avec 0,5 %.
- Un taux de 1% semble être l'optimum pour nos mélanges, ayant une influence positive sur la résistance à la flexion avec des gains dépassant les 150% pour les deux types de fibres de fonte amorphe courtes et moyennes.

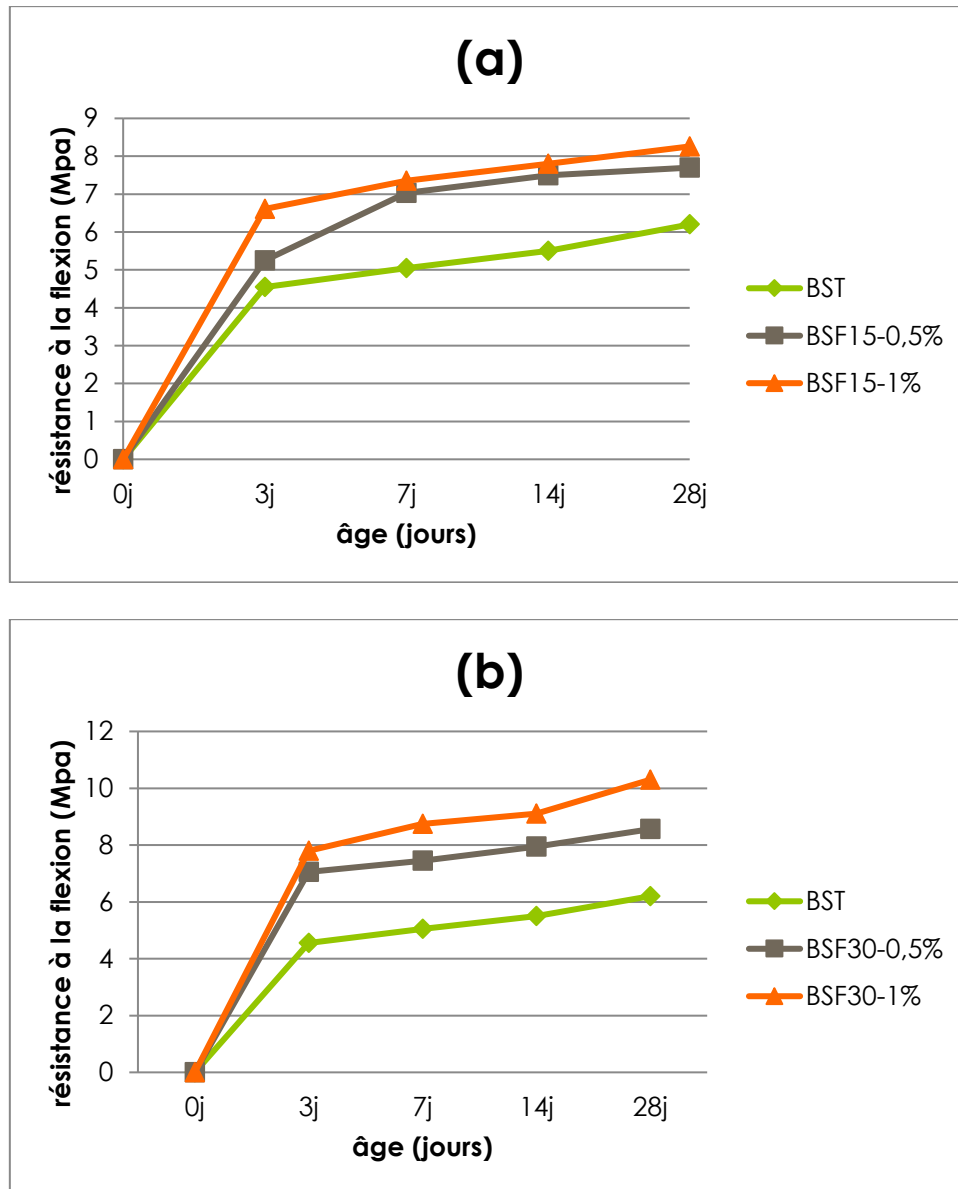


Figure III.20 : Les résultats de la résistance à la flexion selon le taux pour (a) une longueur de 15 mm (b) une longueur de 30 mm

b) Influence de l'élanement :

Selon la longueur, la figure III.20 (c et d) représente les différentes résistances à la flexion.

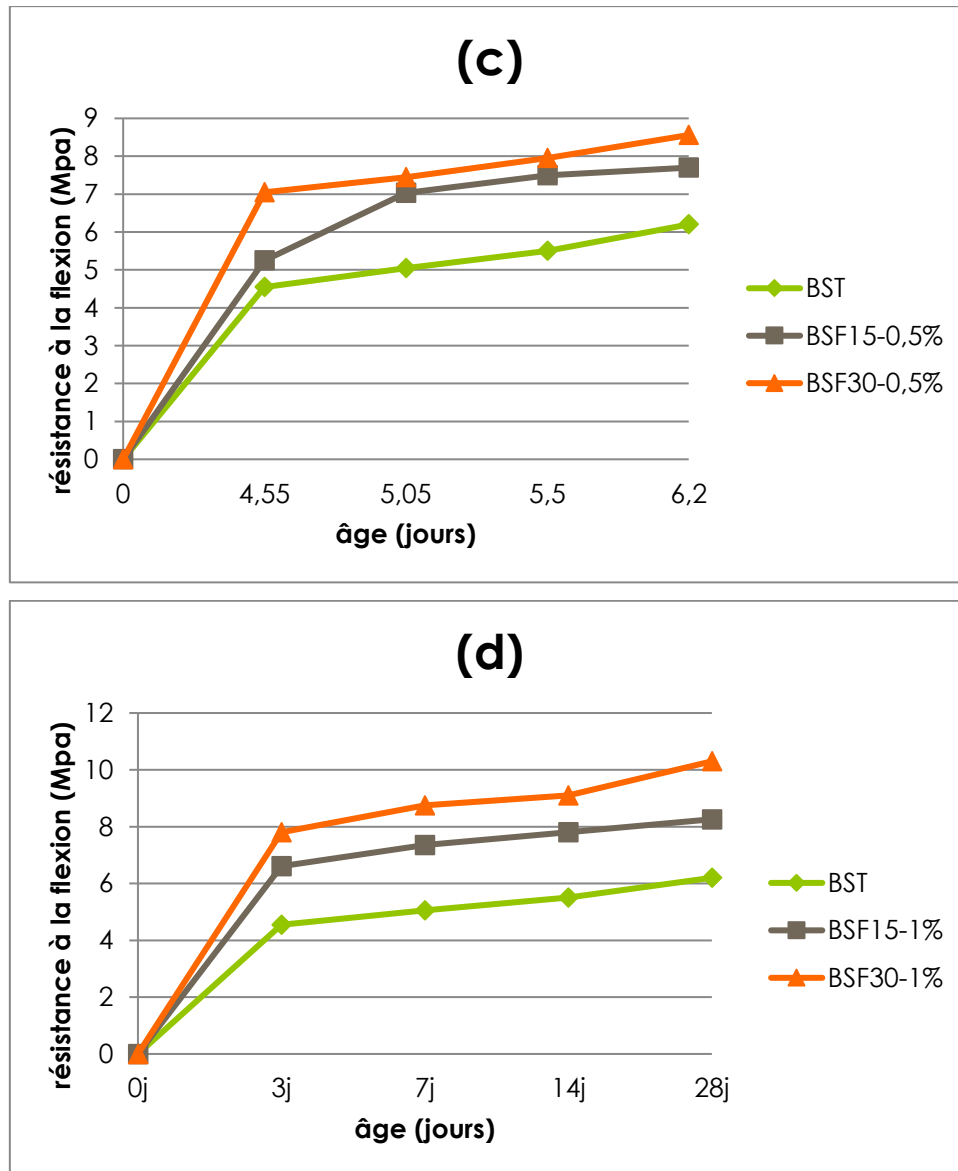


Figure III.20 : Les résultats des différentes résistances à la flexion selon la longueur pour (c) un taux de 0.5% (d) un taux de 1%

D'après la figure III.20 (c et d) on constate que l'augmentation de l'élanement des fibres de fonte amorphe augmente la résistance à la flexion. Cette augmentation est plus prononcée pour les mélanges à base des fibres de longueur 30 mm.

Les fibres moyennes de 30 mm donnent les meilleures résistances quelque que soit le taux.

On peut conclure que le taux et l'élanement des fibres métalliques (fonte amorphe) ont un effet très favorable sur le comportement des bétons de sables (matrices), et cela on cohérence avec les travaux de [12].

III.8.2.3. Le retrait

Le tableau III.16 présente le retrait total des différents mélanges étudiés à 28 jours en $\mu\text{m}/\text{m}$:

Tableau III.16 : Les valeurs de retrait total des mélanges étudiés à 28 jours

jours	BST	BSF		BSF	
		0.5%	1%	0.5%	1%
28J	993.75	837.5	620.15	459.37	387.5

D'après le tableau III.14 on constate que l'introduction des fibres de fonte amorphe a un effet positif sur le retrait total des BS car leur introduction engendre une diminution de ce dernier.

Cette diminution est de l'ordre de 15.72%, 37.59%, 53.77% et 61% respectivement pour les mélanges BSF (15mm ; 0,5%), BSF (15mm ; 1%), BSF (30mm ; 0,5%), BSF (30mm ; 1%) par rapport au BST.

Car au très jeune âge, le BST perd plus d'eau que les autres mélanges, cela est dû sans doute à la structure poreuse du BS sans fibre.

L'introduction des fibres de fonte amorphe limite le retrait hydraulique total des bétons de sable. L'effet de la longueur des fibres est plus significatif que le taux.

III.8.2.4. La porosité

Nous nous sommes intéressés à cette caractéristique afin de connaître le comportement des BSF en présence d'eau.

Les résultats obtenus sur les différents mélanges BSF (15mm ; 0,5%), BSF (15mm ; 1%), BSF (30mm ; 0,5%), BSF (30mm ; 1%) et BST sont illustrés sur la figure III.21 et le tableau III.15.

Le Tableau III.17 regroupe les résultats de la porosité (l'absorption capillaire) des différents échantillons des BS effectués.

Tableau III.17 : Les résultats de la porosité capillaire

	0	25min	30min	1h	2h	4h	6.5h	24h
BSF	2.276	2.284	2.285	2.287	2.287	2.29	2.292	2.298
BSF (15mm ; 0,5%)	2.245	2.249	2.25	2.252	2.255	2.258	2.261	2.269
BSF (15mm ; 1%)	2.264	2.273	2.274	2.277	2.282	2.285	2.289	2.299
BSF (30mm ; 0,5%)	2.259	2.263	2.264	2.266	2.268	2.272	2.279	2.282
BSF (30mm ; 1%)	2.293	2.301	2.301	2.303	2.305	2.310	2.315	2.323

D'après le tableau III.17 on remarque une augmentation en masse de chaque échantillon avec le temps. Après 24h l'absorption d'eau est très élevée.

La figure III.21 présente l'évolution de la porosité capillaire des échantillons utilisés.

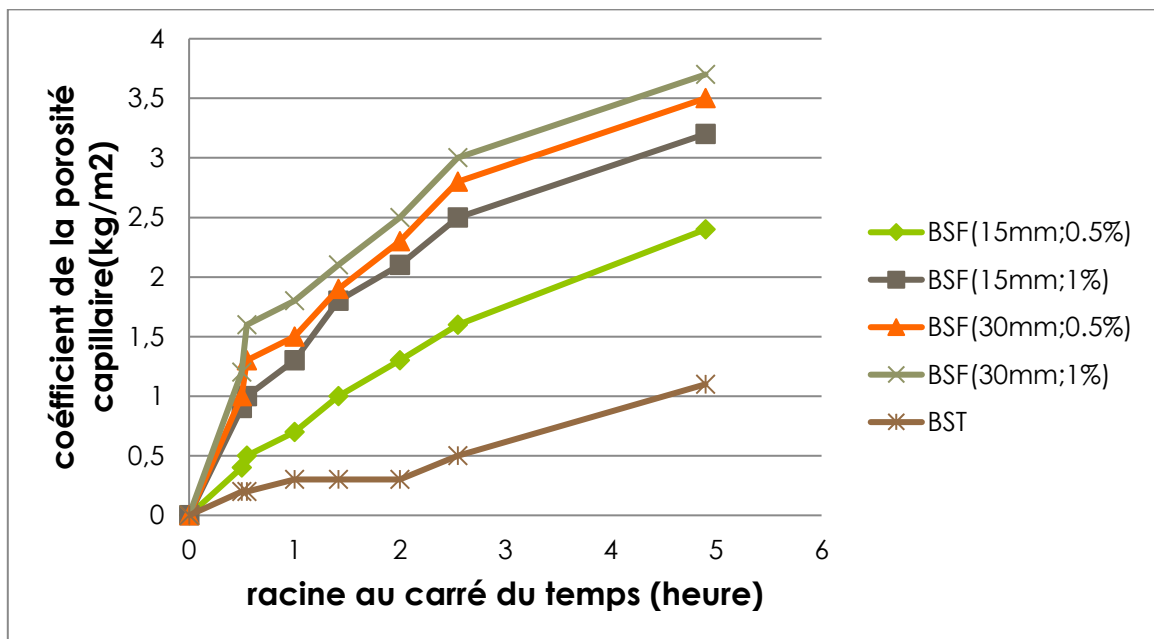


Figure III.21 : Les résultats de la Porosité capillaire

A partir la figure III.21, on constate que la porosité capillaire est influée significativement par l'introduction des fibres de fonte amorphe. La porosité capillaire est un paramètre qui quantifie les lois de diffusion à partir la connectivité des pores entre eux. Pour cette raison on conclut que les fibres augmentent les vides. Ce phénomène influe sur les performances mécaniques et la durabilité de notre béton.

Plus pratique, on peut dire que les fibres dans un milieu ambiant (l'air libre) facilitent l'évaporation de l'eau vers l'extérieur à l'aide des fibres constituant un réseau poreux (perte de masse significative avec moins de retrait) tandis que dans un milieu saturée la présence des fibres par leur réseau capillaire aide à l'absorption d'eau (gain de masse avec gonflement).

III.9. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats d'étude des propriétés à l'état frais et durci de bétons de sable renforcés et non renforcés de fibres métalliques (fonte amorphe).

D'après l'étude, on conclut que :

- Le sable de dune a un effet négatif sur le comportement de notre béton à l'état frais ainsi qu'à l'état durci.
- L'introduction des fibres métalliques (fonte amorphe) améliore la densité et la ductilité de notre béton.
- L'incorporation des fibres (fonte amorphe) engendre une augmentation de la résistance à la flexion des BS à court et à moyen terme.
- Les fibres empêchent l'éclatement de BS lors des écrasements.
- La résistance à la compression des BSF diminue ou maintien avec l'augmentation du dosage et la longueur des fibres incorporées mais elle reste légèrement supérieure à celle du BST.
- Concernant l'évolution de retrait total dans le milieu de conservation retenu à savoir une température de 20 ± 1 C° une humidité relative de $50\pm 5\%$ on observe que le retrait diminue à moyen terme.
- La porosité augmente selon la longueur et le taux des fibres.

Dans ce troisième chapitre, nous avons exposé trois grandes parties : une première partie consacrée à la caractérisation des matériaux de base (sable de dune, sable de carrière, ciment, filler, fibres métalliques amorphe et adjuvant) utilisés dans nos formulations du BS et BSF ainsi que leurs propriétés physiques et chimiques. Les différentes propriétés mesurées s'avèrent satisfaisantes pour la confection des bétons.

Une deuxième partie est consacrée à la présentation des techniques expérimentales utilisées pour la caractérisation des composites des bétons.

Les caractéristiques mécaniques sous sollicitations instantanée ont été déterminées par écrasement direct des matériaux (compression, traction par flexion), ainsi que les études du comportement différé (retrait) et de la durabilité (essais d'absorption capillaire, cycles gel dégel).

Pour tous ces essais, nous avons présenté les procédures détaillées ainsi les résultats de la caractérisation à l'état frais et durci qui ont été utilisées, afin d'avoir une idée sur la structure des composites étudiés qui va nous aider sûrement à interpréter les différents résultats des essais de durabilité dans le quatrième chapitre.

Les résultats expérimentaux aux cycles gel dégel sont présentés dans le quatrième chapitre, ou nous allons donner des informations sur l'effet du sable de dune et les fibres métalliques amorphes sur le comportement mécanique ainsi les variations dimensionnelles et pondérale des bétons de sable vis-à-vis les cycles gel dégel. Ces résultats sont présentés et analysés au chapitre prochain.

III.10. REFERENCES

- [1] **SABLOCRETE**, "Bétons de sable : caractéristiques et pratiques d'utilisation", Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris 1994, pp. 237.
- [2] **Hadjoudja M**, "Influence de l'incorporation des Fibres Métalliques sur les propriétés physico-mécaniques et le mécanisme de fissuration d'un Béton de Sable de Dune "Thèse de Doctorat université des sciences et de la technologie houari boumediene faculte de genie civil 2014 .224 p.
- [3] **CIM Béton** « Les bétons de sable en structure de chaussées », centre d'information sur le ciment et ses application, Paris, France, 1995.
- [4] **Dvorkin L, Nwaubani S, Dvorkin O**. Construction materials. Nova Science Publishers; 2010. 409p
- [5] **Bederina M, Bouziani T, Khenfer M. M**, Université Amar Télidji, Laghouat, novembre 2011
- [6] **Chauvin J.J, Grimaldi G**, "Les bétons de sable"; Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC) ; N°157, pp.9-15. 1988.
- [7] **C.E.B.T.P**, "Synthèse de connaissance sur le béton de sable" ; Opération 52 G 119 ; LRPC de bordeaux, 1986.
- [8] **Boudaoud Z, Rahmouni D, Breysse**, Etude des effets du cobroyage d'un clinker et du sable dunaire sur la broyabilité des liants et des caractéristiques d'un béton de sable. Actes du séminaire international GEOMAT'02. M'sila, Algérie 2003.130 p .
- [9] **ABQ**, Association Béton Québec. Guide de bonnes pratiques pour l'utilisation des fibres dans le béton, 2005.
- [10] **GORISSE F**, Etudes des micro-bétons pour modèle de structures, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics N° 291, France, 1972 .
- [11] **Grünewald S, Walraven J. C**, Parameter-study on the influence of steel fibers and coarse aggregate content on the fresh properties of self-compacting concrete, Cement and Concrete Research, vol. 31, p. 1793-1798, 2001.

[12] Houari. H, « Contribution à l'étude du comportement des bétons renforcées de fibres métalliques sous l'action des charges maintenus et cycliques », Thèse de Doctorat, Université INSA de Lyon, Paris, pp 244, 1993

Chapitre IV

COMPORTEMENT DES VARIETES DE BETONS DE SABLE FILLERISES SOUS L'EFFET DES CYCLES GEL/DEGEL : INFLUENCE DU TAUX DE SUBSTITUTION

IV.1. INTRODUCTION

Le béton de sable fillerisé, pour les performances physiques et mécaniques qu'il offre, présente une solution très intéressante dans plusieurs domaines de la construction tels que la préfabrication: bordures et toitures, tuyaux, mobilier urbain, caissons de plafond, éléments de remplissage (brique, blocs ...) et autres bâtiments éléments, etc. [1]. Il est également devenu une bonne alternative pour remplacer les bétons conventionnels dans certaines structures en béton armé (éléments horizontaux et verticaux, dalles, fondations, etc.) sans oublier les travaux de réhabilitation [2-6].

Au cours des dernières années, l'Algérie a connu une forte demande de granulats, notamment de sable [7]. La situation est devenue encore plus alarmante et même inquiétante en raison des besoins majeurs créés par les grands projets de développement (logements, autoroutes) couplés à l'interdiction de l'exploitation du sable de rivière et du sable de plage.

Sachant que l'Algérie a un énorme potentiel en sable dunaire (SD) dans sa grande partie saharienne, il semble tout à fait approprié d'utiliser SD dans la fabrication du béton afin de conserver les ressources naturelles de la partie nord du pays, de combler le déficit en granulats et de réduire consommation d'énergie.

De plus, l'utilisation du sable des dunes dans les activités de construction aide à contrôler les mouvements du sable, qui peuvent entraîner des risques géo-environnementaux majeurs comme la désertification, qui ont un impact sur les terres agricoles et les infrastructures [8] et peuvent nuire au développement durable dans les régions sahariennes [9].

Le béton de sable des dunes a effectivement prouvé sa qualité dans les régions sahariennes alors pourquoi ne pas étendre son utilisation au nord de l'Algérie où il peut être une solution efficace pour lutter contre l'épuisement des réserves globales. Cela répondra aux considérations économiques et écologiques soulevées par les tendances actuelles [3].

L'adéquation de l'utilisation de SD a été étudiée en se concentrant principalement sur la rhéologie et les résistances [10-11]. Il est nécessaire d'approfondir les études de caractérisation déjà menées sur les bétons de sable dans les travaux précédents [3, 11-14] car certaines régions du nord de l'Algérie sont caractérisées par un climat hivernal rigoureux. Le problème de durabilité le plus important du béton sous un climat froid est l'effet des cycles de gel-dégel. En particulier, les surfaces des tabliers de ponts et les chaussées en béton à grandes surfaces ouvertes sont exposées au gel dans les climats froids.

Par conséquent, l'étude de la résistance au gel-dégel est nécessaire (indispensable) pour le béton SD que l'étude de la rhéologie et des résistances.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier les performances du béton de sable fillerisé à base de dunes SD2 dans différents environnements en nous concentrant sur l'évaluation de sa résistance résiduelle aux cycles de gel-dégel. Deux types de sables différents ont été utilisés: le sable des dunes (SD2) et le sable concassé (SC) comme matériau de référence aux bétons de sable fillerisés.

IV.2. GENERALITES SUR LE PHENOMENE DE GEL/DEGEL

Les gestionnaires d'ouvrages sont souvent confrontés aux conséquences, quelquefois très pénalisantes, des cycles gel-dégel sur la durabilité du béton. Les structures construites dans des régions froides ou en altitude sont évidemment les plus exposées. Il y a aussi le cycle de séchage mouillage qui est l'un des facteurs provoquant la fatigue du béton ainsi la perte de résistance et de performance de ce dernier Il est donc fondamental de définir le plus précisément possible cette agression climatique afin de la prendre en compte dans le dimensionnement des ouvrages [15].

IV.2.1. Gel dégel

Le béton durci, dans la majorité des cas, résiste aux effets du gel. Il arrive cependant que des conditions climatiques sévères puissent entraîner la dégradation de bétons mal formulés, mis en œuvre de façon incorrecte et de surcroît, dans un état voisin de saturation en eau. Deux types de détérioration du béton due au gel sont à distinguer: la fissuration interne et l'écaillage des surfaces en présence de sels de déverglacage. Ces deux types de détérioration ont pour origine des processus différents et ne surviennent pas nécessairement en même temps [16].

IV.2.1.1. Fissuration interne

La fissuration interne peut se propager dans toute la masse d'un béton saturé, mal conçu et exposé à de nombreux cycles de gel-dégel. Au niveau microscopique, cette dégradation se manifeste par une intense microfissuration de la pâte de ciment. La microfissuration contribue notamment à affaiblir et désolidariser les liens pâte/granulat. Pigeon et Regourd [15] ont montré que les C-S-H sont stables aux cycles de gel-dégel. Cependant, la portlandite et les sulfo-aluminates sont partiellement dissous et recristallisent dans les vides emplis d'air

À un stade très avancé, l'attaque par les cycles de gel-dégel engendre la dissolution de la portlandite, la croissance d'hydrates secondaires fibreux et l'augmentation de la porosité capillaire, ce qui contribue à affaiblir énormément la cohésion du matériau.

À l'échelle macroscopique, la fissuration interne engendre d'abord des fissures à la surface et au voisinage des arêtes des éléments de béton affectés. Les arêtes se désagrègent et s'arrondissent graduellement. La fissuration interne se manifeste en suite par une intense dégradation de toutes les surfaces exposées (Figure IV.1). La profondeur de dégradation peut atteindre plusieurs centimètres. Les gros granulats sont facilement déchaussés. Le béton sévèrement attaqué perd toute sa cohésion et s'érode rapidement en libérant des fragments de pâte et tout son squelette granulaire. La fissuration interne engendre une diminution de la résistance à la compression et une importante chute de la résistance à la traction et du module d'élasticité des bétons. Elle peut diminuer la performance du béton d'enrobage en augmentant sa perméabilité et en diminuant sa résistance à la pénétration des agents externes potentiellement agressifs.



Figure IV.1 : Aspect visuel typique d'un élément de béton sévèrement endommagé par la fissuration due à l'action des cycles de gel-dégel [15]

IV.2.1.2. Les principaux paramètres d'influence sur La fissuration interne

Les principaux paramètres que l'influence de ces mécanismes est également assez bien connus. Ils sont les caractéristiques du système de pores, à savoir la porosité totale et la distribution de taille des pores [17].

➤ Sévérité des cycles de gel-dégel

Les cycles de gel-dégel ayant une faible vitesse de refroidissement (2°C/h) sont beaucoup moins sévères que les cycles rapides effectués pour évaluer la durabilité des bétons en laboratoire ($8-10^{\circ}\text{C/h}$).

Le module d'élasticité dynamique et la résistance à la compression, à la traction sont diminuées que les cycles de gel-dégel sont répétés.

Cette dégradation du béton commence avec l'apparition d'une microfissure sur la surface du Béton exposé. (Voir Figure IV.2)

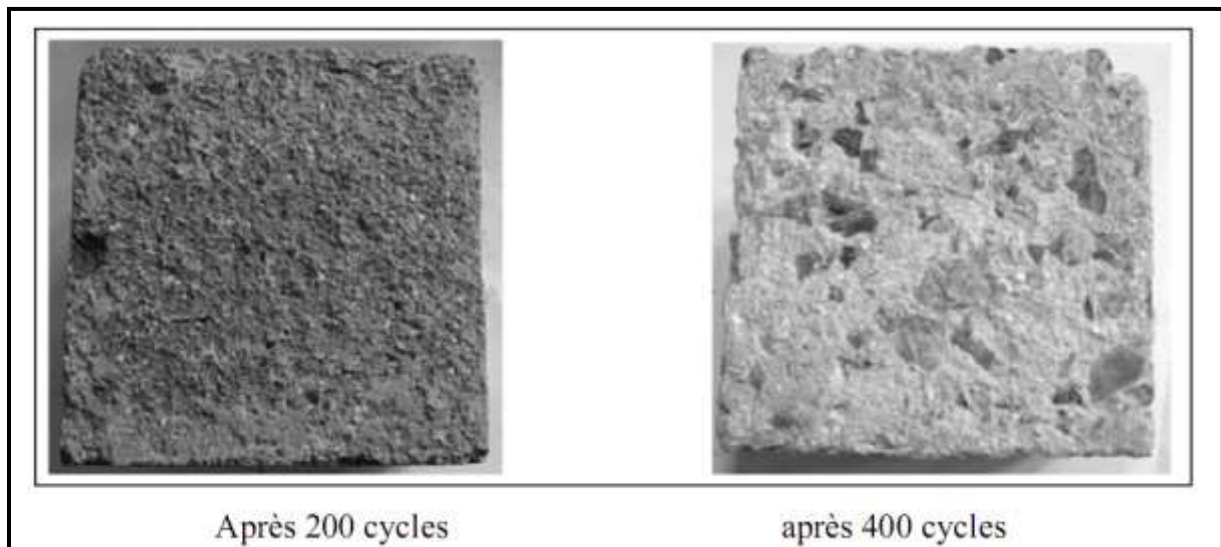


Figure IV.2 : Surface du béton avec air entrainé après 200 et 400 cycles gel-dégel [17]

➤ Le degré de saturation

Ce sont des parties d'ouvrages dont le béton a le plus fort degré de saturation qui se dégradent le plus. Elle correspond soit à des parties qui fonctionnellement, sont au contact de l'eau, soit à des parties qui, par leur géométrie, retiennent préférentiellement les eaux de précipitation (Surface horizontales).

➤ L'air entrainé

Les entraîneurs d'air sont des adjuvants qui entraînent et stabilisent un nombre élevé de microbulles d'air (diamètre de l'ordre de 10 à 100 μm) réparties uniformément dans le béton après malaxage et qui subsistent après son durcissement.

L'ajout d'air améliore d'une façon spectaculaire la résistance des bétons aux cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglaçage. En effet, les bulles d'une dimension de 10 à

1000 fois supérieures aux capillaires (diamètre 10^{-5} à 10^{-3} mm) coupent le réseau des capillaires et jouent donc le rôle de vase

La teneur en air varie en fonction du type, de la nature et de la teneur en ciment

Le rapport E/C a une influence non seulement sur la teneur en air, mais également sur la répartition des bulles.

De nombreux paramètres peuvent modifier la teneur en air : mode, énergie, temps de malaxage ainsi que le type de malaxeur et le volume de béton traité.

Plus la température du béton frais est élevée, plus la teneur en air occlus sera faible et vice-versa.

L'ajout d'un entraîneur d'air au béton en modifie ses caractéristiques tant à l'état frais qu'à l'état durci.

➤ **Le rôle des granulats**

. Pour s'assurer d'obtenir un béton durable, il faut identifier et éviter d'utiliser des granulats qui, de par leur porosité, leur dimension, leur degré de saturation ou leur perméabilité sont sensibles à l'action du gel.

Les granulats à forte porosité et forte perméabilité (gros pores) ne sont pas gélifs puisqu'ils expulsent rapidement l'eau absorbée.

En général, les granulats possédant une porosité totale inférieure à $0,015 \text{ cm}^3/\text{g}$ n'altèrent pas la durabilité au gel des bétons.

➤ **Influence E/C**

Le rapport E/C du béton est la caractéristique de composition ayant la plus grande influence sur la résistance à la fissuration interne du béton.

Les additions minérales (laitiers, cendres volantes, fumées de silice) peuvent modifier la résistance à la fissuration interne des bétons en raison de leurs effets sur la maturité du béton et sur la structure de la porosité.

➤ **L'influence des additions minérales**

L'influence des additions minérales sur la tenue au gel est variable en fonction du type d'addition et du taux de remplacement du ciment.

IV.2.1.3. Écaillage

Comme son nom l'indique, l'écaillage des surfaces est un mode de dégradation qui n'affecte que les surfaces de béton exposées à un environnement extrême comportant des cycles de gel-dégel et des sels fondants. En l'absence de sels fondants, l'écaillage du béton ne se produit pas.

L'écaillage se manifeste par le détachement progressif de petits fragments ou de petites écailles de pâte ou de mortier dont l'épaisseur ne dépasse pas quelques millimètres. La surface d'un béton attaqué par l'écaillage n'est endommagée que sur quelques millimètres de profondeur. Un écaillage sévère peut aussi diminuer significativement l'épaisseur du béton d'enrobage. La dégradation de la pâte de ciment et du mortier de surface contribue à exposer les gros granulats localisés tout juste sous la surface exposée aux sels fondants.

L'écaillage des surfaces est le type de destruction par le gel le plus fréquent car les mécanismes spécifiques d'attaque sont relativement sévères (Figure IV.3).



Figure IV.3 : Aspect visuel typique d'un élément de béton attaqué par l'écaillage en présence de sels fondants [15]

IV.2.1.3.1. Les principaux paramètres d'influence sur l'écaillage

Les principaux paramètres d'influence sur l'écaillage sont :

- Air entrainé et facteur d'espacement
- Le rapport E/C
- Les granulats
- Influence des additions minérales
- Influence du murissement, des produits de cure et du séchage (milieu extérieur)

IV.2.2. Mécanismes du cycle gel dégel

Même après de nombreuses années de recherche, le comportement au gel du béton ne peut pas encore être expliqué complètement. Il est généralement admis que l'accroissement de volume accompagnant la transformation de l'eau en glace (de l'ordre de 9 %) n'est pas la cause principale de la dégradation du béton soumis au gel. Les modèles partiellement développés montrent que ce sont les pressions engendrées par les mouvements de l'eau interne qui sont la cause principale des dégradations.

Lorsqu'il y a un gradient thermique (comme la formation de glace), il se crée un écoulement d'humidité des zones chaudes vers les zones froides. Comme la glace se trouve dans la zone la plus froide, l'humidité se déplace vers les cristaux de glace, elle se condense et se transforme en glace. Les forces en jeu sont tellement importantes qu'elles provoquent des déformations locales et peuvent entraîner la fissuration du béton.

Lors du gel, seule l'eau pure est transformée en glace. L'eau est en réalité une solution saline et au cours du gel, il se produit donc une séparation en glace et en solution encore liquide qui devient de plus en plus concentrée en sel. De plus, dans un pore de pâte de ciment, l'eau gèle à une température qui dépend, notamment, de la dimension du pore. Par exemple, l'eau des pores des silicates de calcium hydratés (C-S-H) cristallise sous forme de glace à une température de -78 °C : l'eau des pores des C-S-H est donc, en pratique, non gélive. L'eau des pores voisins, lorsqu'ils sont plus petits, n'a donc pas encore gelé. De ce fait, sa concentration saline, ayant gardé son niveau initial, est largement inférieur à celle de l'eau résiduelle dans le pore de rayon supérieur déjà partiellement gelé. Ceci va créer, afin d'égaliser les concentrations en sels, un afflux d'eau des petits pores vers les plus gros suivant les lois de l'osmose. Ces transferts vont créer des pressions qualifiées d'osmotiques. Si ces pressions viennent à dépasser la résistance à la traction du béton, elles fissureront celui-ci

IV.2.2.1 Autres composants influant sur cycle gel dégel

- Influence des fibres
- Influence du dosage en liant

IV.3. CONSTITUANTS DE BASE ET METHODOLOGIE D'ESSAI

Les mêmes constituants, de même provenance et de même livraison sont utilisés pour la conception des mélanges testés selon la même procédure de fabrication que pour leur caractérisation du chapitre III précédent

Ces matériaux de base utilisés ont les mêmes caractéristiques intrinsèques exposées en détail dans le Chapitre III.

- Du ciment Portland ordinaire CEM I / 42.5 et des fillers calcaires (LP)
- Deux types de sables ont été utilisés: du sable des dunes SD2 provenant de la région de Biskra (Algérie), d'une dimension maximale de 0,63 mm et du sable de calcaire (SC) d'une classe 0/3 mm, de l'ENG, Constantine (Algérie), utilisé en substitution du sable de dune.
- Le superplastifiant utilisé était un mélange superplastifiant réducteur d'eau de gamme élevée à base d'éther polycarboxylique modifié; conforme à la norme EN 934 [15].
- L'eau potable de robinet du Laboratoire LMDC Constantine

IV.3.1. Rappels sur la méthode de formulation retenue

L'approche théorique de SABLOCRETE [16], ajustée expérimentalement, a été utilisée pour déterminer les compositions des mélanges de bétons de sable fillerisés.

Cinq bétons de sable fillerisés ont été produits avec une ouvrabilité constante. Parmi eux, l'un est considéré comme un mélange de référence à base de sable de dune (SD2) uniquement. Les quatre autres mélanges ont été obtenus en remplaçant le sable de dune (SD2) par du sable calcaire (SC) avec quatre taux de substitution différents 20, 50, 80 et 100% (pesé à sec), tout en conservant la même quantité de liant (ciment + fillers calcaires = 547 kg / m³). Un léger ajustement, à l'eau et au contenu du superplastifiant, a été effectué pour obtenir une valeur de maniabilité presque identique. Cette valeur est évaluée à l'aide d'un manniabilimètre à mortier LCL tel que prescrit par la norme NF P18-452 [17]. Le tableau IV.1 montre les compositions des mélanges des bétons de sable fillerisés.

Tableau IV.1: Composition des mélanges de BS dans 1 m³

Matériaux (kg/m ³)	SD2 0%	SD2 20%	SD2 50%	SD2 80%	SD2 100%
Ciment	390	390	390	390	390
Sable Calcaire SC	1581	1241	761	270	0
Sable dunaire SD2	0	310	761	1104	1380
Fillers Calcaires	157	157	157	157	157
Eau	202	209	220	253	269
Super Plastifiant	11.5	11.5	11.5	11.7	11.7
E/C	0.51	0.53	0.56	0.65	0.69

Afin d'évaluer les propriétés mécaniques du béton, la résistance à la compression et la résistance à la traction-flexion ont été testées à l'âge de 7 et 28 jours.

Le diamètre des grains ne dépassant pas 3 mm dans tous les cas étudiés, des éprouvettes (4 × 4 × 16 cm) ont été réalisées pour déterminer les résistances à la compression et à la flexion selon la norme EN 196-1 [18] à 7 et 28 jours. Les échantillons ont été conservés dans de l'eau à 20 ° C jusqu'aux écrasements. Trois spécimens ont été utilisés pour chaque propriété et âge.

IV.3.2. Méthodologie d'essai

L'enceinte climatique utilisée de marque CONTROLS voir (Figure IV.4) avec une programmation (Figure IV.5) qui permet de reproduire de manière continue et automatique les cycles représentés sur le schéma de la figure (Figure IV.6).



Figure IV.4 : Enceinte climatique



Figure IV.5 : Programmation de l'enceinte climatique

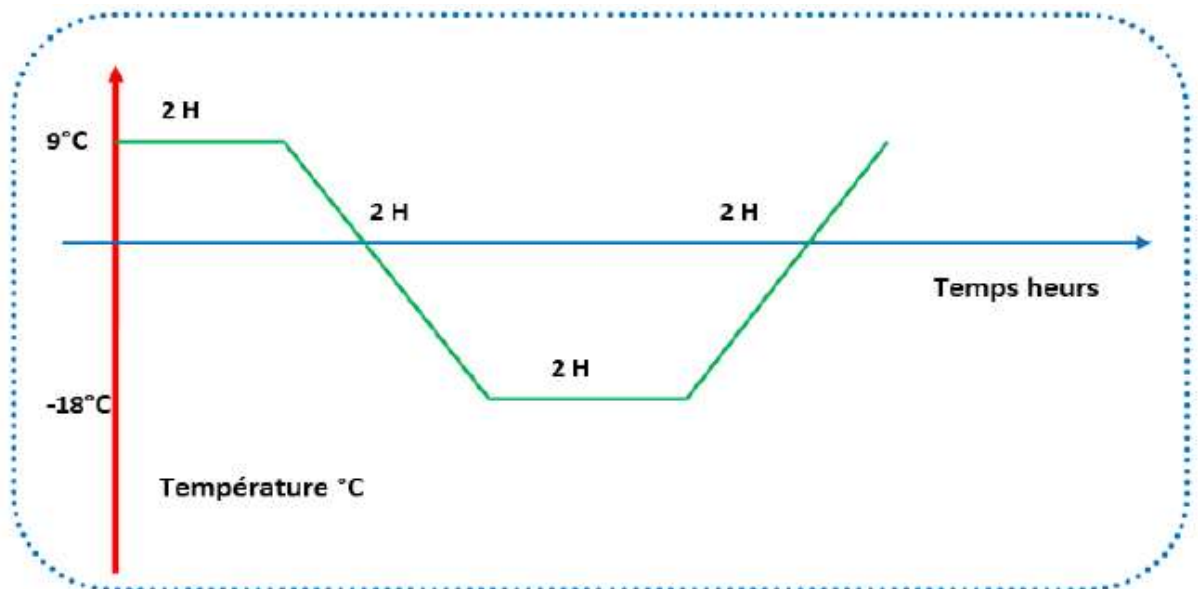


Figure IV.6 : Le cycle Gel/Dégel

L'essai aux cycles de gel/dégel a été effectué selon la procédure ASTM C 666 [19]. Après 14 jours de durcissement, les échantillons ont été soumis à 100 cycles de congélation-décongélation, d'une durée de 8 heures chacun, où la température varie de $+10^{\circ}\text{C}$ à -18°C avec une vitesse constante pour tous les mélanges.

Des mesures ont été prises pour déterminer la variation dimensionnelle, la résistance à la compression résiduelle et la résistance à la traction en flexion résiduelle. Trois spécimens ont été mesurés pour chaque propriété. Les variations dimensionnelles ont été contrôlées conformément à la norme ASTM C666 [19] et enregistrés à 50, 75 et 100 cycles. Les essais des résistances mécaniques ont été effectués avant et après 100 cycles de gel-dégel. De plus, une évaluation visuelle de la mise à l'échelle de la surface a également été réalisée aux mêmes échéances.

Les éprouvettes destinées à suivre l'évolution des variations dimensionnelles sont munies de plots à leurs extrémités.

IV.4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

IV.4.1. Propriétés des bétons de sable fillerisés à l'état frais et durci

Les résultats des essais de propriétés à l'état frais et durci, avec les cycles, sont présentés dans le tableau IV.2.

Tableau IV.2: Fresh and hardened physical properties

	SD2 0%	SD2 20%	SD2 50%	SD2 80%	SD2 100%
Flow Time (s)	6.66	6.57	6.7	6.48	6.49
Air content (%)	5	5.30	6.80	5.8	6
Density (kg/m ³)	2478	2441	2391	2332	2140
Compressive strength at 28 days (MPa)	30,5	28,75	20,5	17,5	12,5
Flexural tensile strength at 28 days (MPa)	6,2	5,6	4,5	3,1	2,6

Selon le tableau IV.2, une diminution du taux en sable calcaire conduit à une augmentation de la teneur en eau pour atteindre l'ouvrabilité visée. La forme sphérique des particules de SD2 peut être bénéfique pour l'ouvrabilité du béton de sable fillerisé mais la taille très fine des particules et la grande surface spécifique de SD2 rendent le béton cohésif nécessitant plus d'eau pour répondre à l'ouvrabilité appropriée [11]. Plus d'eau couplée à une densité plus faible de SD2 (voir tableau IV.1) entraîne une diminution de la densité à condition que le taux SD2 dans le béton de sable fillerisé augmente.

Comme le montre le tableau IV.2, le béton de sable fillerisé à base du sable concassé (SC) présente les meilleures propriétés mécaniques en raison du diamètre le plus élevé et de la meilleure distribution granulométrique du sable concassé. Ce résultat peut également être

attribué à une absorption plus élevée du sable concassé SC par rapport au sable des dunes SD2, qui génère moins d'eau de mélange dans le béton de sable concassé et, par conséquent, une porosité réduite qui améliore la compacité et la résistance mécanique du béton [20]. De plus, l'angularité du sable concassé rend la propagation des fissures dans le béton de sable fillerisé plus difficile par rapport aux sables dunaires SD2, qui se caractérisent par une forme arrondie et une nature siliceuse [14]. De plus, les granulats broyés, par leur surface rugueuse et irrégulière, produisent une zone de transition interfaciale plus dense (ZIT), qui constitue la force de liaison entre la surface des granulats et la pâte de ciment [21].

Pour les bétons de sable fillerisé à base de sable dunaire, la résistance à la compression la plus élevée a été enregistrée pour le mélange SD2 20%, ce qui est inférieur à celui du SD2 0%. Il s'agit du taux de substitution le plus bas utilisé. Cela pourrait être dû à la grande compacité des granulats obtenue par une optimisation du mélange entre fillers calcaires, granulats grossiers et sable dunaire [22]. De par sa finesse, ce dernier comble les vides du premier granulats. Cependant, notons que la résistance à la compression a diminué avec le taux en sable des dunes mais qu'elle atteint des valeurs acceptables. Cette diminution de la résistance pourrait être attribuée à la zone de transition interfaciale plus faible car les grains SD2 ont une forme arrondie et une surface lisse. Ces propriétés physiques peuvent réduire la résistance de liaison agrégat-pâte [23].

Les valeurs des résultats des essais de résistance à la traction, présentés dans le tableau IV.2, ont montré une tendance assez similaire aux résultats de résistance à la compression. Ces valeurs montrent que la résistance du béton de sable fillerisé diminue avec l'augmentation de la teneur en sable des dunes SD2. Comme on peut le voir, la diminution de la résistance du béton a été brutale à un taux en sable des dunes supérieure à 20%, vraisemblablement en raison de l'augmentation du tassement des grains de sable des dunes SD2 qui se caractérisent par une surface lisse et arrondie [24-25]. Le taux plus élevé en granulats de sable de dunes (jusqu'à 20%) entraîne une diminution de la résistance du béton de sable fillerisé en raison d'une augmentation de la surface lisse de ces grains conduisant à plus de saignement et de ségrégation de ces grains dans le mortier frais avant les processus de durcissement [9]. Ce type de granulats doit nécessiter une vibration délicate et continue lors du coulage du béton sur site pour éviter les risques de ségrégation, notamment pour des teneurs supérieures à 20%.

IV.4.2. Cycles gel/dégel

IV.4.2.1. Variation dimensionnelle

Les variations dimensionnelles des échantillons de béton de sable fillerisé soumis à des cycles de gel-dégel sont représentées sur la figure IV.7.

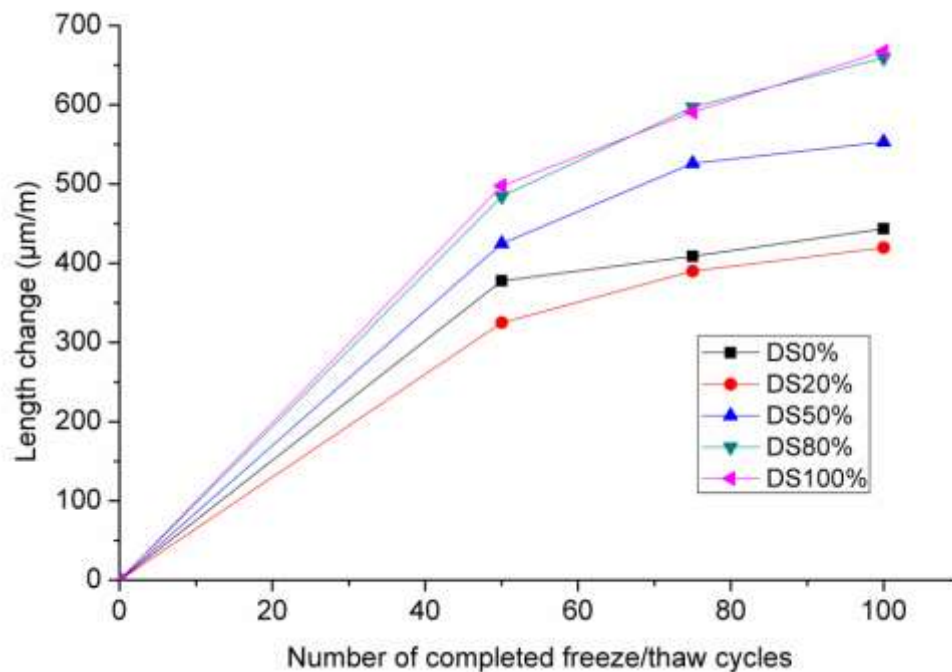


Figure IV.7 : Variations dimensionnelles des échantillons de béton de sable fillerisé en fonction du nombre de cycles de gel-dégel.

Les résultats, représentés sur la figure IV.8, montrent que toutes les éprouvettes subissent un allongement lors des essais de gel-dégel. Après 100 cycles, la variation dimensionnelle des échantillons SD2 0% et SD2 20% était inférieure à 500 µm /m, ce qui indique une bonne résistance aux cycles de gel-dégel selon le critère défini par ASTM C 666 [19]. De plus, les éprouvettes SD2 20% étaient presque plus résistantes au gel et à la décongélation que les éprouvettes SD2 0%, qui agissent comme le béton de référence.

L'expansion des spécimens après l'action gel-dégel était bien sûr attendue. Comme expliqué par Mehta et al [23], l'eau dans les pores capillaires gèle à une température beaucoup plus élevée que celle présente dans les pores de gel. Par conséquent, un gradient d'énergie est créé, car l'eau gelée dans les pores capillaires est dans un état d'énergie inférieure, et l'eau super froide non gelée dans les pores de gel est dans un niveau d'énergie plus élevé. Ensuite, l'eau a tendance à être transportée des pores de gel aux pores capillaires afin d'équilibrer le système. Si la contraction C-H-S n'est pas suffisamment élevée pour compenser l'expansion causée par

le gel de l'eau présente dans les pores capillaires et qui a migré des pores de gel aux pores capillaires, il y a alors une expansion globale du système [26].

IV.4.2.2. Résistance à la compression résiduelle

Les résultats des essais de résistance à la compression avant et après 100 cycles de gel-dégel sont présentés dans la figure IV.8. Les résultats montrent que la résistance au gel-dégel est directement liée à la propriété de résistance à la compression du béton, c'est-à-dire que le béton avec une résistance mécanique plus élevée révèle une meilleure résistance au gel-dégel.

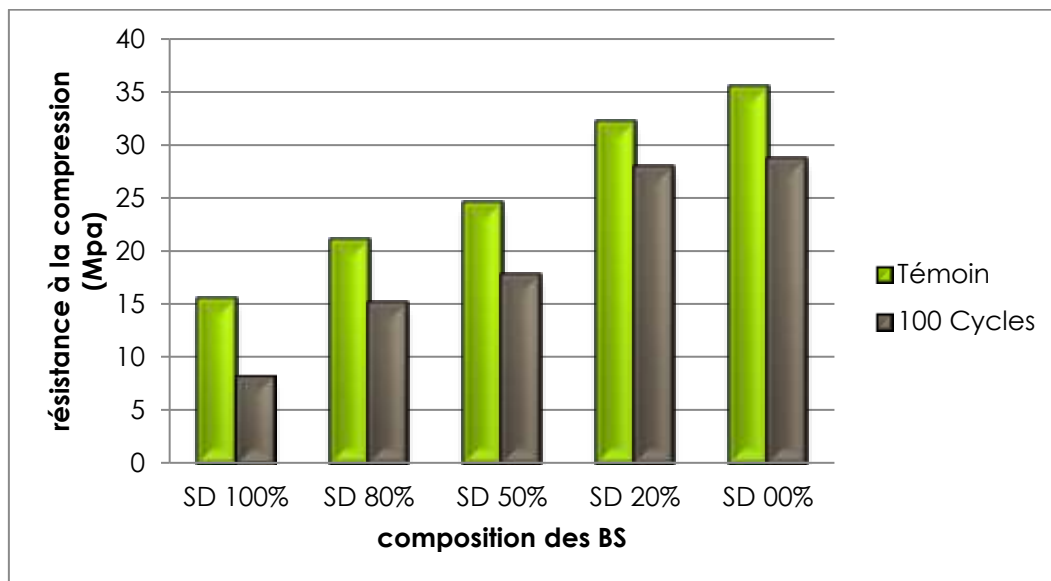


Figure IV.8: Résistance à la compression des different compositions

Comme le montre la figure IV.9, tous les bétons de sable fillerisés subissent une perte de résistance après les cycles. Les éprouvettes SD2 20% ont montré la plus faible perte de résistance mécanique (13,1%). Cela correspond au meilleur comportement montré, en termes de variation dimensionnelle. Pour un taux de substitution supérieur à 20%, la perte de résistance a fortement augmenté sous l'action des cycles de gel-dégel dus à l'introduction de sable de dunes, ce qui augmente la porosité et réduit la compacité. Outre ces deux facteurs, l'augmentation du volume d'eau avec des cycles répétés de gel-dégel et sa pénétration dans les fissures existantes lors de la décongélation provoquent une plus grande expansion et davantage de fissures à l'intérieur du béton pendant le gel, ce qui entraîne une nouvelle diminution de la résistance mécanique [27].

IV.4.2.3. Résistance à la flexion résiduelle

Les résultats des essais de résistance à la traction par flexion avant et après 100 cycles de gel/dégel sont illustrés sur la figure IV.9.

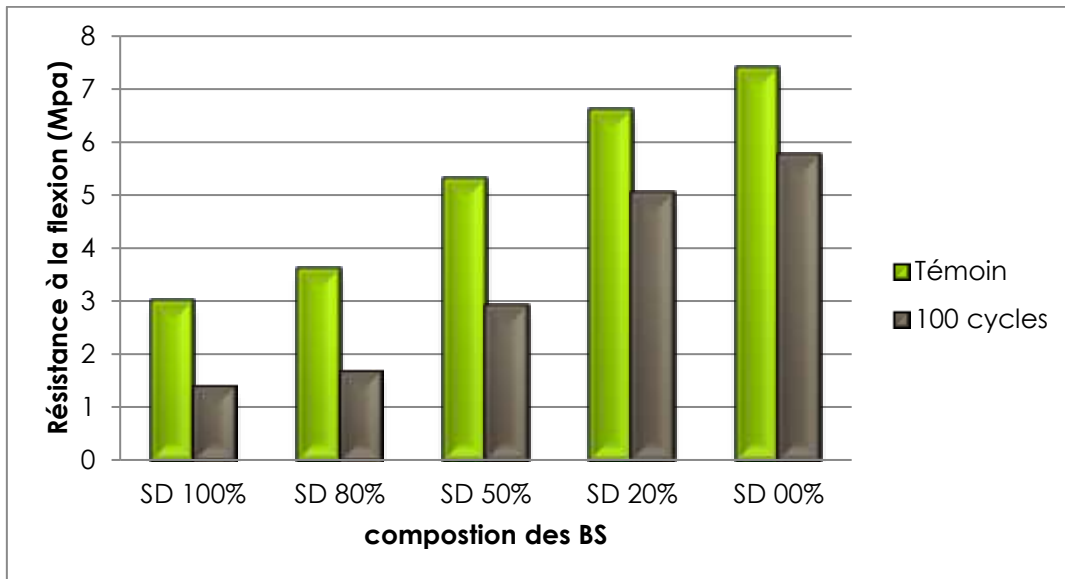










Figure IV.9: Résistance à la flexion des mélanges

La résistance à la traction en flexion a diminué globalement pendant les cycles de gel-dégel comme le montre la figure IV.9. La perte de résistance à la traction la plus élevée, après 100 cycles de gel-dégel, était d'environ 54% enregistrée pour les éprouvettes SD2 50% et SD2 100%. Nos résultats sont cohérents avec les résultats de Shang et al [28]: l'effet des cycles de gel-dégel sur la résistance à la traction est plus important que celui sur la résistance à la compression.

IV.4.2.4. Visual observation

Pendant le gel, la transformation de l'eau interstitielle confinée en glace peut générer une pression interstitielle importante et provoquer la fissuration, l'écaillage et la dégradation du béton. C'est pourquoi une observation visuelle a été effectuée pour évaluer les signes visibles de fissuration et d'entartrage sur la surface des éprouvettes après qu'ils aient été soumis à un traitement de gel-dégel (voir tableau IV.3).

Tableau IV.3: Observation visual des éprouvettes après des cycles

	0 cycles	After 50 cycles	After 75 cycles	After 100 cycles
DS0%				
DS20%				

<p>DS50%</p>				
<p>DS80%</p>				
<p>DS100%</p>				

Selon le tableau IV.3, la présence de sable dunaire dans le béton de sable fillerisé provoque un effritement remarquable en fonction du nombre de cycles de gel-dégel et du taux en SD2.

En se référant aux photos du tableau V.3, les échantillons SD2 20% ont montré une bonne résistance aux cycles de gel-dégel, mais des dégradations importantes se sont produites dans les échantillons SD2 50%, SD2 80% et SD2 100%, tandis que les échantillons SD2 0% présentaient une légère friabilité en surface. La principale cause de ces dégradations est la mauvaise adhérence entre les sables de dunes et le sable concassé compte tenu de leur surface lisse.

Les dégradations sont apparues sous forme d'écaillage et d'éclatement de surface avec une profondeur atteignant 3 mm dans certains échantillons et même une diminution d'épaisseur de près de 8 mm pour les échantillons SD2 50% (voir figure IV.10). Les échantillons à faible teneur en sable des dunes (SD2 20%) restent presque intacts.



Figure IV.10: Dégradation d'une éprouvette de SD2 50% après 100 cycles de gel-dégel.

Les dommages du béton soumis aux cycles de gel-dégel indiqués dans le tableau IV.3 entraînent une perte de poids. Selon les résultats des variations pondérales, la plus faible valeur a été obtenue pour les échantillons SD2 0% et SD2 20%. Ce résultat peut être attribué au rapport eau / ciment plus faible permettant une résistance à la compression plus élevée et une porosité plus faible du matériau. Ce dernier peut être plus étudié la diffusivité et la perméabilité à l'humidité [28].

Les variations dimensionnelles des éprouvettes ayant une teneur en SD2 supérieure à 20%, après 100 cycles de gel-dégel, ont montré une forte perte de masse et une dégradation sévère. Cette variation dimensionnelle est due à la fissuration générée par le mouvement de l'eau dans et hors de l'échantillon [27]. À 100 cycles, toutes les éprouvettes SD2 50%, SD2 80% et SD2 100% subissent une perte de poids de 6,3%, 1,77% et 1,99%, respectivement.

IV.5. CONCLUSION

Cette étude a été réalisée afin de déterminer principalement la résistance au gel-dégel du béton de sable afin d'optimiser la substitution du sable des dunes dans le béton de sable fillerisé. Selon les résultats des essais, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- Pour une teneur SD2 élevée, des quantités supplémentaires d'eau sont nécessaires pour répondre aux propriétés de maniabilité.
- Une teneur en sable des dunes supérieure à 20% a un effet négatif sur les résistances mécaniques du béton de sable mais les résultats restent acceptables
- Le béton de sable fillerisé à base de sable des dunes n'était pas résistant au gel-dégel pour une teneur en sable des dunes supérieure à 20%
- Le tartre de surface a tendance à être plus sévère dans le béton de sable à forte teneur en sable dunaire SD2 (c'est-à-dire supérieur à 20%) car il est moins résistant. Cela signifie que le béton de sable fillerisé à base de sable des dunes SD2 peut ne pas convenir aux chaussées routières, où l'entartrage de la surface est aggravé par l'utilisation de sels de déglacage.

Les résultats obtenus au cours de cette étude donnent un premier aperçu de la variabilité des bétons de sable fillerisés. Il serait souhaitable d'étudier cette variabilité plus en profondeur afin d'assurer la performance de ces matériaux dans leurs utilisations futures, notamment en développant des approches de performance de leur utilisation potentielle. Ce sera le sujet de la prochaine étude.

IV.6. REFERENCES

- [1] **Gadri K, Guettala A.** Etude du comportement physico-mécanique des bétons de sable à base de déchets de polissage de carrelage [Study of the physico-mechanical behavior of sand concretes based on tile polishing waste]. Colloque 01 Eco-matériaux ; 2014 Nov 24-28 ; Montpellier, France.
- [2] **Bederina M.** Caractérisation mécanique et microstructure des bétons de sables locaux: effets des filler et de la nature des sables sur le comportement mécanique du matériau., Mémoire de Magister, Université A.tledji de Laghouat, Algérie, pp110, Octobre 2000.
- [3] **Bédérina M, Khenfer M M, Dheilly R M, Quéneudec M.** Reuse of local sand: effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concretes. *Cem Concr Res.* 2005;35(6):1172-1179.
- [4] **Bederina M, Marmoret L, Mezreb K, et al.** Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: Experimental study and modeling. *Constr Build Mater.* 2007;21(3):662–668
- [5] **Bouziati T, Benmounah A, Bédérina M, Lamara M.** Effect of Marble Powder on the Properties of Self-Compacting Sand Concrete. *Open Constr Build Tech J.* 2011;5:25-29
- [6] **Bouziati T, Bederina M, Hadjoudja.** Effect of Dune Sand on the Properties of Flowing Sand-Concrete (FSC). *Int J Concr Struct M.* 2012;6(1):59-64.
- [7] **Djebien, R.; Belachia, M.; Hebhouh, H.** Effect of marble waste fines on rheological and hardened properties of sand concrete. *Struct Eng Mech.* 2015; 53(6):1241-1251.
- [8] **Salman AB, Howari FM, El-Sankary MM, et al.** Environmental impact and natural hazards on Kharga Oasis monumental sites, Western Desert of Egypt. *J Afr Earth Sci.* 2010;58(2):341-353.
- [9] **El-Sayed Sedek AS.** Performance of cement mortar made with fine aggregates of dune sand, Kharga Oasis, Western Desert, Egypt: An experimental study. *JJCE.* 2013;7(3):270-284.
- [10] **Bouaziz A, Hamzaoui R, Rezigue S, Bennabi A.** Valorisation du sable de dune dans les formulations des mortiers et des bétons [Valorization of dune sand in mortar and concrete formulations]. 31st Conference of AUGC ; 2013 May 29-31 ; Cachan, France. French.
- [11] **Lee E, Park S, Kim Y.** Drying shrinkage cracking of concrete using dune sand and crushed sand. *Constr Build Mater.* 2016 Nov;126:517–526.

[12] **Achoura D, Redjel B.** Béton de sable, caractérisation et comportement [Sand concrete: Characterization and behavior]. 1^{er} colloque maghrébin de génie civil ; 1999 Nov 30 ; University of Badji Mokhtar at Annaba, Algeria. p.17-25. French.

[13] **Melais FZ, Achoura D.** Formulation et propriétés des bétons de sable renforcé de fibres de polypropylène [Formulation and properties of sand concrete reinforced with polypropylene fibers]. 29th Conference of AUGC ; 2011 May 29-31 ; Tlemcen, Algeria. French.

[14] **Belhadj B, Bederina M, Benguettache K, Queneudec M.** Effect of the type of sand on the fracture and mechanical properties of sand concrete. *Advances in Concrete Construction (ACC)*, 2014;2(1):13-27.

[15] **EUROPEAN STANDARD.** Admixtures for concrete, mortar and Grout- Part 2: Concrete admixtures- definitions, requirements, conformity, arking and labelling. Standard N°. EN 934:2012.

[16] **French standard.** Concretes - Measuring the flow time of concretes and mortars using a workability meter. Standrad No. NF P18-452: 2017.

[17] **European Standard.** Methods of testing cement. Determination of strength. Standrad No. EN 196-1:2016.

[18] **American Society for Testing and Materials.** Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA. Standrad No. ASTM C 666:1997.

[19] **Makhloufi Z, Kadri EH, Bouhicha M, Benaissa A.** Resistance of limestone mortars with quaternary binders to sulfuric acid solution, *Constr Build Mater.* 2012;26(1):497-504.

[20] **Neville AM.** Properties of concrete, 5th edition; 2012.

[21] **Luo FJ, Heb L, Pan Z, et al.** Effect of very fine particles on workability and strength of concrete made with dune sand. *Constr Build Mater.* 2013 Oct;47:131–137.

[22] **Mehta PK, Monteiro PJM.** CONCRETE – Microstructure, Properties and Materials, 3rd ed. McGraw-Hill; 2005, p. 56–57.

[23] **Kaplan MF.** Flexural and compressive strength of concrete as affected by the properties of coarse aggregates. *American Concrete Institute (ACI).* 1959;55(5):1193-1208.

[24] **Galloway J.** Grading, shape and surface properties. ASTM special technical publication Philadelphia; 1994. No. 169C. p.401-410.

[25] **Alexandre Bogas J, De Brito J, Ramos D.** Freeze–thaw resistance of concrete produced with fine recycled concrete aggregates. *J Clean Prod.* 2016 Mar;115:294-306.

[26] **Amouri C, Bensalem S, Belkadi A, et al.** Evaluation of the performances of self-compacting concretes based on by-products subject to freeze thaw in local conditions. *International Journal of Engineering, Science and Technology (IJEST).* 2014;6(4):45-51.

[27] **Shang HS, Yi TH, Song YP.** Behavior of plain concrete of a high water-cement ratio after freeze-thaw cycles. *Materials.* 2012;5(9):1698-1707.

[28] **Amiri O, Aït-Mokhtar A, Sarhani M.** Tri-dimensional modelling of cementitious materials permeability from polymodal pore size distribution obtained by mercury intrusion porosimetry tests. *Adv Cem Res.* 2005 ;17(1) :39-45.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

La synthèse des recherches et études réalisées sur les bétons de sable renforcés de fibres ont pu démontrer que le béton de sable pour ses performances physiques et mécaniques qui offre, peut présenter une solution très intéressante dans plusieurs domaines de la construction et dans plusieurs régions en particulier pour les éléments minces.

Plusieurs travaux de recherches ont été réalisés sur l'effet de la nature des sables et sur la valorisation de sables des dunes dans les bétons ordinaires et les bétons de sable. Ces travaux ont permis de combler beaucoup de lacunes concernant les bétons à base de sable des dunes. La plupart de ces travaux ont été le résultat des recherches effectuées aux laboratoires du Sud Algérien. Les multiples travaux de recherche antérieurs montrent que la mise en œuvre des Bétons de sable renforcés ou non par des fibres sont souvent difficiles et ont toujours posé de problèmes (beaucoup de contradictions). Néanmoins il existe un manque de connaissances sur le comportement des bétons de sable sous les conditions climatiques sévères ainsi sur le comportement différé tel que le fluage et retrait et aux attaques chimiques, ce qui rend difficile la maîtrise de l'utilisation de bétons de sable.

L'objectif de ce travail était d'apporter de manière expérimentale un nouveau point de vue sur le comportement des bétons de sables fibrés à base de sable de différents types.

Notre but était d'apporter une contribution à l'étude de l'influence de la substitution des sables de dune (SD2 et SD1) par des sables concassés SC ou sable recyclé de déchets de marbre SM sur le comportement des bétons de sable fibrés ou non sous des conditions extrêmes respectivement par des attaques chimiques ou dans un environnement de climat hivernal rigoureux, et, en particulier, d'établir quels sont les paramètres qui jouent un rôle majeur sur l'évolution des propriétés mécaniques sous différents aspects de durabilité.

Les Bétons de Sable constituent une véritable alternative au béton traditionnel, comme l'ont montré un certain nombre d'exemples. Leur utilisation est notamment simplifiée par l'incorporation des fines et des fibres et permet de réaliser des ouvrages d'une grande qualité esthétique en particulier dans le domaine de la préfabrication (éléments minces).

Bien que ces avantages soient concrets et que l'intérêt qu'ils suscitent chez les industriels soit grandissant, les BS demeurent en dessous de l'utilisation qui pourrait en être faite en raison de questions sans réponses posées par de nombreux maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre. Certaines des inconnues qui les concernent telle que le comportement des BS dans le climat nord algérien où la température descend sous les (- 5°C), ainsi que son comportement

vis-à-vis des attaques chimiques nécessitent donc d'apporter des résultats de recherches qui répondent à ces questions.

Pour répondre à ces objectifs, nous avons commencé par définir la formulation du Béton de Sable de référence pour chaque programme expérimental de béton, à partir d'une variété de sables locaux avec un squelette granulaire différents et un dosage de fillers constant. Les deux bétons de sable de base (SD1 et SD2) sont formulés à partir de la méthode de Sablocrete en imposant respectivement selon l'étude une variable fixe à savoir : Le rapport E/C constant ou la maniabilité constante.

Toutes ces compositions ont été ensuite caractérisées à l'aide d'essais pour vérifier leurs aptitudes à remplir le cahier des charges imposé pour un Béton de Sable fibré ou non à l'état frais (rhéologie qui se sont révélés corrects pour toutes les compositions) et à l'état durci.

La contribution à l'étude de comportement des Bétons de Sable fillerisés dans ce travail de thèse est réalisée en trois parties.

La première partie renferme l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus lors des essais effectués sur les différents bétons de sable.

L'aboutissement à ces résultats, dont l'objectif est de répondre sur la question si la substitution partielle des sables dunaires (SD1) par des déchets de marbre en tant que sable (SM) dans ce premier programme expérimental, 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 ce sable contenant plus de 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 sable 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 sables recyclés à base de déchets de marbre dans l'amélioration de la résistance du composite. On se basant sur les résultats obtenus pour différents essais, nous avons conclu ce qui suit :

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

- Le sable de déchets de marbre SM augmente la densité et diminue la teneur en air occlus.

- Les bétons substitués partiellement par le sable de déchets de marbre SM absorbent plus d'eau que le sable ordinaire.

- Le retrait augmente avec l'augmentation du taux de sable de déchets de marbre SM mais reste dans les normes.

- Le béton contenant 5% de taux de substitution de sable de déchets de marbre SM donne une meilleure résistance à l'attaque par l'acide chlorhydrique.

- La meilleure résistance à l'attaque par l'acide sulfurique est donnée par le béton de 15% de taux de substitution SM.

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

La deuxième partie est consacrée à l'étude de la substitution des sables de dune SD2 par des sables calcaires SC issus de concassage sur les propriétés à l'état frais et durci de bétons de sable fillerisés renforcés ou on par des fibres métalliques de type fonte amorphe.

D'après l'étude, on conclut que :

-Le sable de dune SD2 a un effet négatif sur le comportement du béton à l'état frais ainsi qu'à l'état durci.

-Pour une teneur SD2 élevée, des quantités supplémentaires d'eau sont nécessaires pour répondre aux propriétés de maniabilité.

-Une teneur en sable des dunes SD2 supérieure à 20% a un effet négatif sur les résistances mécaniques du béton de sable mais les résultats restent acceptables

-L'introduction des fibres métalliques (fonte amorphe) améliore la densité du béton.

-L'incorporation des fibres (fonte amorphe) engendre une augmentation de la résistance à la flexion des BS à court et à moyen terme.

-Les fibres empêchent l'éclatement de BS lors des écrasements. (Rupture plus ductile)

- La résistance à la compression des BSF diminue légèrement (ou maintien) avec l'augmentation du taux et l'élancement et des fibres incorporées mais elle reste supérieure à celle du témoin BST.

- Concernant l'évolution de retrait total dans le milieu de conservation retenu on observe que le retrait diminue à moyen terme. Les fibres de fonte amorphe limitent ou empêchent le retrait.

- La porosité augmente en fonction de l'éclatement et le taux des fibres de fonte amorphe.

Pour tous ces essais, nous avons présenté les procédures détaillées ainsi les résultats de la caractérisation à l'état frais et durcis qui ont été utilisées, afin d'avoir une idée sur la structure des composites étudiés qui va nous aider sûrement à interpréter les différents résultats des essais de durabilité dans la troisième partie.

Et enfin la troisième phase traite les résultats de l'étude principale de la détermination de la résistance au gel-dégel du béton de sable fillerisé afin d'optimiser la substitution du sable des dunes SD2 dans le béton de sable fillerisé par des sables calcaire SC issus de concassage. Selon les résultats des essais, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- Pour une teneur SD2 élevée, des quantités supplémentaires d'eau sont nécessaires pour répondre aux propriétés de maniabilité.
- Une teneur en sable des dunes SD2 supérieure à 20% a un effet négatif sur les résistances mécaniques du béton de sable mais les résultats restent acceptables
- Le béton de sable fillerisé à base de sable des dunes SD2 n'était pas résistant au gel-dégel pour une teneur en sable des dunes SD2 supérieure à 20%
- Le tartre de surface a tendance à être plus sévère dans le béton de sable à forte teneur en sable dunaire SD2 (c'est-à-dire supérieur à 20%) car il est moins résistant. Cela signifie que le béton de sable fillerisé à base de sable des dunes SD2 peut ne pas convenir aux chaussées routières, où l'entartrage de la surface est aggravé par l'utilisation de sels de déglacage.

Les résultats qu'on a obtenus sont similaires à ceux présentés dans la littérature. Les résistances résiduelles en flexion des bétons testés diminuent de manière continue avec l'augmentation de la teneur en SD2.

Recommandations, et perspectives

Principaux résultats :

Un sable dunaire ($D < 1$ mm) nécessite plus de fines qu'un sable alluvionnaire ou calcaire issu de concassage.

A maniabilité constante la résistance diminue avec la diminution du diamètre D des sables. (besoin en eau).

En conservation en milieu ambiant (sec), la valeur du retrait des BS peut atteindre le double de celui de son correspondant d'un béton classique.

Les BS sont plus poreux, leurs pores sont plus nombreux, plus petits et davantage monodimensionnel.

L'absorption dépend essentiellement du taux et de continuité des petits pores : absorption capillaire très élevée = une durabilité plus faible

Les résultats obtenus au cours de cette étude donnent un premier aperçu de la variabilité des bétons de sable renforcés de fibres de fonte amorphe. Il serait souhaitable d'étudier cette variabilité plus en profondeur afin d'assurer la performance de ces matériaux dans leurs utilisations futures, notamment en développant des approches de performance de leur utilisation potentielle. Ce sera le sujet de la prochaine étude.

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

Nous pouvons dire actuellement que l'introduction de déchets de marbre dans le béton de sable améliore les caractéristiques rhéologiques de la matrice. Nous avons montré les difficultés qu'il y avait à quantifier ces améliorations. Conscient que cette étude s'insère dans un cadre limité, elle s'est attachée à préciser les principales propriétés (notamment l'augmentation de la cohésion). Les résultats obtenus par l'introduction des fibres de fonte amorphe sont susceptibles d'élargir le champ des applications de ces bétons de sable à base de matériaux locaux.

Parmi les perspectives de cette recherche, il est intéressant de mener des études complémentaires. De nouvelles études pourront faire suite à ce travail en envisageant de faire varier des paramètres tels que les matériaux constitutifs des formulations et d'estimer leur influence sur les propriétés des BS fillerisés.

D'autres études complémentaires sont indispensables pour mieux comprendre mécanismes d'action des phénomènes étudiés et d'autres éventuels phénomènes éventuelles : la diffusion des ions chlorure, la carbonatation ...etc.

- Caractérisation non destructive par l'emploi des méthodes linéaires consistant à la détermination de la vitesse de propagation des ondes et non linéaires.
- Caractérisation microscopique par l'étude de la porosité, DRX, MEB
- Modélisation
- Constitution de bases de données pour l'élaboration d'un système Expert aidant à prendre les décisions.

Etudes en cours de finalisation :

- Comportement des bétons de sable fillerisés renforcés de fibres métalliques aux cycles gel/Degel : Influence du taux et de l'élancement.
- Comportement des bétons de sable renforcés ou non par des fibres aux cycles Humidification/séchage à différentes températures (vieillessement) : Influence du taux de substitution et l'introduction des fibres
- Passage d'un BS ordinaire à un BS autoplaçant BSAP : une réflexion d'intégrer les BS fabriqués à partir des matériaux locaux, dans la nouvelle technologie des bétons de sable auto-plaçant (BSAP). Afin de permettre de mieux comprendre l'effet des paramètres de formulation sur la fluidité, la viscosité sans modifications des performances mécaniques.