République **A**lgérienne **D**émocratique et **P**opulaire
Ministère de l'**E**nseignement **S**upérieur et de **R**echerche la **S**cientifique
UNIVERSITÉ Dr YAHIA FARÈS DE MÉDÉA

Faculté de **T**echnologie

Département de **G**énie **C**ivil



Projet de Fin d'études

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Génie Civil

Option : Construction et matériaux

Théme :

L'influence des déchets de marbre et de verre sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques d'un béton de sable fluide

Réalisé Par Mrs :

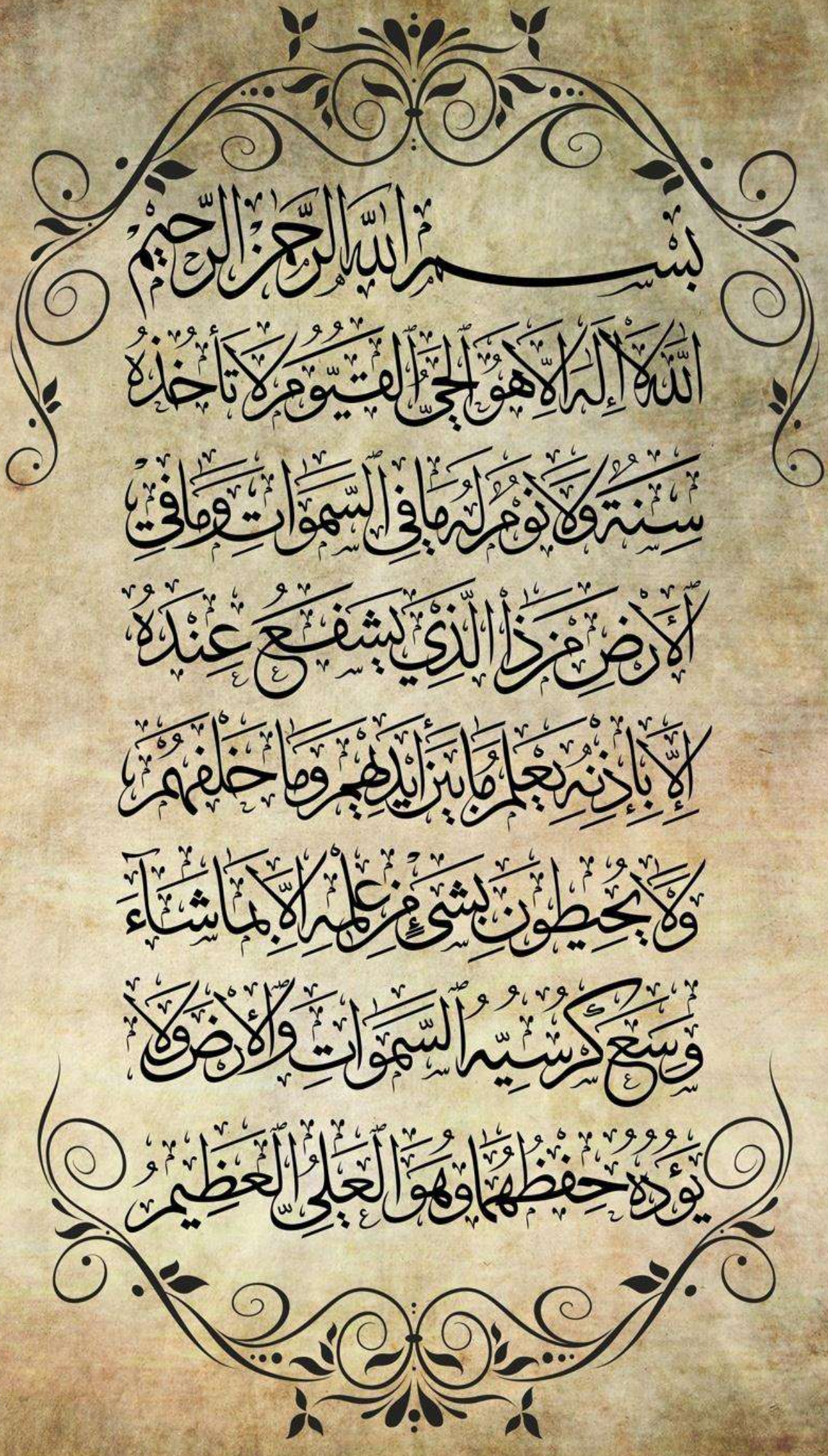
Larbi Aissa Islam & Kadri Zakaria

Devant le jury composé de :

Dr. Boukasani Omar	**MCB**	**Univ. de Médéa**	**Président**
Dr. Guendouz Mohamed	**Docteur**	**Univ. de Médéa**	**Rapporteur**
M^{elle}. Boukhelkhal Djamila	**MAA**	**Univ. de Médéa**	**Co-rapporteur**
M^{elle}. Boucherit Dalila	**MCB**	**Univ. de Médéa**	**Examinatrice**

juin 2017


بسم الله الرحمن الرحيم


بسم الله الرحمن الرحيم
الله لا إله إلا هو الحي القيوم لا تأخذه
سنة ولا نوم له ما في السموات وما في
الأرض من ذا الذي يشفع عنده
إلا بإذنه يعلم ما بين أيديهم وما خلفهم
ولا يحيطون بشيء من علمه إلا بما شاء
وسع كرسيه السموات والأرض ولا
يؤوده حفظهما وهو العلي العظيم

DEDICACES

Je tiens à dédier ce mémoire :

A ma très chère ***Mère*** *et à mon cher* ***Père****, en témoignage et en gratitude de leurs dévouement, de leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affections sans limite.*

Je remercie mon amie et binôme ***Zakaria*** *qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail.*

Je remercie Oussama Babchikh, Hamadouche Amine, Ayad Abed Razak, Kermazli Youced Et Abed Rahman, Et à tous mes Amis

À toute la promo de juin 2017 spécialement génie civil construction et matériaux et à tous les gens que je connais.

Islam

DEDICACES

Je tiens à dédier ce mémoire :

A ma très chère ***Mère*** *et à mon cher* ***Père****, en témoignage et en gratitude de leurs dévouement, de leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affections sans limite.*

Je remercie mon amie et binôme ***Zakaria*** *qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail.*

Je remercie à tous mes Amis

À toute la promo de juin 2017 spécialement génie civil construction et matériaux et à tous les gens que je connais.

zakaria

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, Nous tenons à remercier ALLAH, le clément et le miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Ce n'est pas qu'il est difficile de remercier tous ceux qui ont participé de prés ou de loin à ce travail, mais il faut avouer que les formules sont nombreuses et que le choix des bons mots a été toujours difficile. Entre vifs, sincères, profonds et nous passons les obscures subtilités de la langue française, le choix de la formule de remerciements est difficile. Nous tenons à remercier :

nos encadreur Dr. ***GUENDOUZ MOHAMED*** ***et*** *M*^{elle} ***Dj.BOUKHELKHAL****, d'avoir accepté de nous encadrer, et pour leur conseils précieux pendant la réalisation de ce travail. Pour l'honneur qu'il nous fait a d'encadrer ce travail, pour leur disponibilité, pour leur écoute, pour l'aide très précieuse et l'intérêt constant qu'ils ont bien voulus montrer pour ce travail qu'ils ont guidé par de judicieux conseils, qui ont bien su nous communiquer pour mener au mieux cette étude.*

Nous sommes grées au ***Boukasani Omar****, d'avoir accepté d'examiner ce travail et de présider le jury de notre mémoire.*

M^{elle} Boucherit Dalila*, Maitre assistante à l'université de Médéa, ont accepté de juger et d'être les examinateurs de ce mémoire.*

Nous leur exprime nos profondes reconnaissances pour leur lecture critique et éclairante sur ce travail de recherche.

Un grand merci est adressé à tous les ingénieurs et les travailleurs du hall de technologie de l'université de Médéa ainsi les ingénieurs de SETAM de Médéa pour leurs aides et disponibilités.

Nos sincères remerciements vont également à tous les enseignants du département de Génie civil de l'université de Médéa, qui nous ont offert tout ce savoir.

Et nous n'oublions certainement pas nos parents nos amis ainsi tous ceux qui nous ont aidés dans notre tâche, nous leur dirons merci.

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

ملخص

الهدف الرئيسي من هذا المشروع هو المساهمة في تثمين و رسكلة نفايات الرخام والزجاج و دمجها بشكل حجمي في كتلة الخرسانة الرملية المائعة بنسب مختلفة (10، 20، 30، 40، 50٪) و(10، 20، 30٪) على التوالي مع دراسة خصائصها في الحالة الرطبة و في الحالة الصلبة ومقارنتها مع خرسانة رملية ذاتية الوضع .

وقد أظهرت النتائج أن الخصائص الميكانيكية والحرارية للخرسانة الرملية المائعة تحسنت بزيادة نسبة نفايات الرخام والزجاج. لذلك فمن الممكن الحصول على مواد بناء جديدة التي يمكن استخدامها في أنواع مختلفة من عناصر البناء.

Résumé

L’objectif principal de ce projet consiste à valoriser et recycler les déchets de marbre et de verre plus précisément et les incorporés dans la masse du béton de sable autoplaçant par substitutions volumique du sable en différents pourcentage (10, 20, 30, 40, 50%) et (10, 20, 30%) respectivement. Les propriétés à l’état frais et à l’état durci des différents mélanges réalisés ont été analysées et comparées aux celles du béton de sable témoin.

Les résultats obtenus montrent que les performances mécaniques et thermiques du béton de sable autoplaçant a sont améliorées en fonction de l’augmentation du pourcentage de déchets de marbre et de verre respectivement. Donc, il est possible d’obtenir un nouveau matériau de construction utilisable pour différents types d’éléments de construction.

Abstract

The main objective of this project is to value and to recycle waste marble and glass and incorporated into the mass of self-compacting sand concrete by volumetric of substituted sand at different percentage (10 , 20, 30, 40, 50%) and (10, 20, 30%) respectively. The properties in fresh and hardened state of the various self-compacting sand concrete mixes carried out were analyzed and compared with control self-compacting sand concrete.

The results obtained show that the mechanical and thermal properties of the self-compacting sand concrete increase according to increasing in percentage of the waste floor tiles. So, it is possible to obtain a new material which allows it use in various types of structural components.

Sommaire

Dédicaces
Remerciements
Résumés
Sommaire
Liste des tableaux
Liste des figures
Symboles et Abréviations

INTRODUCTION GENERALE……..……1

CHAPITRE 01 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Valorisation des déchets et activité de recyclage en construction 4

1.1.1 Introduction 4

1.1.2 Déchets 4

A. Définition 4

B. La Valorisation des déchets 5

C. Méthodes de la valorisation 5

1.1.2.1 Origine de la production de déchets 6

1.1.2.2 Constitution chimique du déchet 7

1.1.2.3 Différents déchets utilisés en génie civil 7

1.1.3 Activité du recyclage des déchets en construction 8

1.1.3.1 Recyclage des déchets 8

1.1.3.2 Type de recyclage 9

1.1.3.3 Impacts du recyclage sur l'environnement 9

1.2 Marbre et déchets de marbre 10

1.2.1 Définition 10

1.2.2 Composition 10

1.2.3 Types DE MARBRE 11

1.2.4 Utilisation 12

1.2.5 Production 13

1.3 Verres et déchets de verre 17

1.3.1 Les verres 17
1.3.1.1 Définition 17
1.3.1.2 Historique 17
1.3.1.3 Composition 18
1.3.1.4 Propriétés 20
1.3.1.5 Les différents types de verre 22
1.3.1.6 Domaine d'application du verre 23
1.3.2 Les déchets de verres 24
1.3.2.1 Les types de déchets de verres 24
1.3.2.2 les chiffres (quantité) de déchet de verre 25
1.3.3 Recyclage du verre 25
1.4 Le béton de sable 26
1.4.1 Introduction 26
1.4.2 Historique 27
1.4.3 Définition du béton de sable 30
1.4.4 Les composants du béton de sable 31
1.4.5 propriétés des bétons de sable 34
1.4.5.1 Propriété générale 35
1.4.5.2 Durabilité 40
1.4.6 Exemple d'application des bétons de sable 41
1.4.7 Formulations des bétons de sable 43
1.4.7.1 Définition 43
1.4.7.2 Approche théorique d'une formulation d'un béton de sable 43
1.4.7.3 Dosage en fines d'un béton de sable 44
1.4.7.4 Dosage en eau d'un béton de sable 45
1.4.7.5 Dosage en sable 47
1.4.7.6 Estimation de la résistance en compression 48
1.4.8 Méthode expérimentale de formulation 50
1.5 Béton autoplaçant 54
1.5.1 Définition 54
1.5.2 Historique 56
1.5.3 composition du BAP 57
1.5.4 Caractérisation d'un BAP 60

1.5.5 La formulation des bétons autoplaçants 63

1.5.6 Domaines d'Emploi des BAP 65

1.6 Influence de marbre sur le comportement des matériaux à base cimentaires 67

1.6.1 L'ouvrabilité 67

1.6.2 La densité 67

1.6.3 L'air Occlus 68

1.6.4 Résistance a la compression 68

1.6.5 Absorption capillaire 69

1.7 Influence de verre sur le comportement des matériaux à base cimentaires 70

1.7.1 Maniabilité 70

1.7.2 La densité 71

1.7.3 La résistance à la compression 71

1.7.4 La résistance à la traction 71

1.8 CONCLUSION 73

CHAPITRE 02 : MATARIAUX ET ESSAIS

2.1 Introduction 75

2.2 Caractérisation des matériaux utilisés 75

2.2.1 Ciment 75

2.2.2 Le sable 78

2.2.3 Fillers 80

2.2.4 Déchets 80

2.2.5 Eau de gâchage 82

2.2.6 Adjuvant 82

2.3 Formulation du béton de sable autoplaçant 83

2.4 Séquence de malaxage du béton de sable autoplaçant 85

2.5 Préparation et Conservation des Eprouvettes 87

2.6 Les essais sur béton de sable autoplaçant : 87

2.6.1 Etat frais 87

a) Essais d'étalement au mini-cône 87

b) Essai d'ecoulment l'entonnoir en V (V-funnel) 88

c) Densité 89

d) L'air occlus 89

2.6.2 Etat durci ..……....90
a) Essais de compression.....90
b) Absorption d'eau par capillarité.....91
c) Les variations dimensionnelles (Retrait et gonflement).....92
d) conductivité thermique :.....94

2.7 Variable étudiees……...……..96

2.8 Conclusion…….……....97

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET INTERPRETATION

3.1 Influence de déchets de marbre sur le comportement du béton de sable autoplaçant ... 99

3.1.1 Introduction……..…99

3.1.2 Caractéristiques du BSAPM à l'état frais…….....99
3.1.2.1 Etalement.....99
3.1.2.2 V-funnel 100
3.1.2.3 Densité.....101
3.1.2.4 Air occlus 101

3.1.3 Caractéristiques du BSAP à l'état durci……...102
3.1.3.1 Résistances à la compression……..102
3.1.3.2 Conductivité thermique……..103

3.1.4 Approche de durabilité……104
3.1.4.1 Absorption capillaire.....104
3.1.4.2 Retrait.....105
3.1.4.3 Gonflement.....106

3.1.5 Conclusion……....107

3.2 Influence de déchet de verre sur le comportement du béton de sable autoplaçant..*109*

3.2.1 Introduction……109

3.2.2 Caractéristiques du BSAPV à l'état frais……...109
3.2.2.1 Etalement.....109
3.2.2.2 V-funnel 110
3.2.2.3 La densité 111
3.2.2.4 L'air occlus.....111

3.2.3 Caractéristiques du BSAP à l'état durci……...112

3.2.3.1 Résistances à la compression……..….112

3.2.3.2 Conductivité thermique……..113

3.2.4 Approche de durabilité……..114

3.2.4.1 Absorption capillaire.....114

3.2.4.2 Retrait.....115

3.2.4.3 Gonflement.....115

3.2.5 Conclusion……...117

Conclusions générales……119

Recommandations……..120

Références bibliographique……..122

ANNEXES……..128

Liste des Tableaux

CHAPITRE 01 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau 1. 1: Quantités de déchets produits : évolution 2008.....8
Tableau 1. 2 Caractéristiques pétrographiques-minérologiques; physico-mécaniques et Chimiques de marbre de la carrière de FIL-FILA.....16
Tableau 1. 3: Relation entre la granulométrie et le dosage en ciment.....32

CHAPITRE 02 : MATARIAUX ET ESSAIS

Tableau 2. 1: Analyse chimique du ciment et composition du clinker..... 76
Tableau 2. 2 : Caractéristique physiques du ciment. 77
Tableau 2. 3 : Evolution de la résistance du ciment en fonction de l'âge. 77
Tableau 2. 4: Propriétés physiques de sable utilisé 79
Tableau 2. 5: caractéristiques physiques des fillers marbre utilisées. 80
Tableau 2. 6: Les caractéristiques déchets de verre..... 81
Tableau 2. 7: Les caractéristiques déchets de marbre. 82
Tableau 2. 8 Composition des BSAP à base de déchets de verre (1 m^3)..... 84
Tableau 2. 9: Composition des BSAP à base de déchets de marbre (1 m^3) 85

Liste des Figures

CHAPITRE 01 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Fig 1. 1: La roche de marbre 10
Fig 1. 2: Types de marbre 12
Fig 1. 3 : Utilisation de marbre dans construction. 13
Fig 1. 4 : les étapes fabrication de verre 17
Fig 1. 5 : Les déchets de verre 24
Fig 1. 6 Cycle du recyclage du verre. 25
Fig 1. 7. Recyclage des déchets de verre 26
Fig 1. 8 Phare de Port-Saïd 1969. (Egypte) 28
Fig 1. 9 : Le pont de Brooklyn1871-72New York. 28
Fig 1. 10 : La maison de COIGNET 29
Fig 1. 11: Aqueduc des eaux de captation de la rivière "La Vanne" 30
Fig 1. 12: BS, BS chargé et BO 30
Fig 1. 13: Evolution de la porosité en fonction du module de finesse 35
Fig 1. 14: Variation du coefficient de compacité en fonction 36
Fig 1. 15: Effet du dosage en filler sur la compacité du béton de sable 36
Fig 1. 16: Evolution de la maniabilité en fonction du module de finesse des sables 37
Fig 1. 17: Effet des ajouts sur la maniabilité du béton de sable. 38
Fig 1. 18: Effet du rapport E/C sur la maniabilité d'un béton de sable dunaire. 39
Fig 1. 19: Eprouvettes non vibrées non piquées 40
Fig 1. 20: Pont de Saint-Martory .1724 42
Fig 1. 21: Les éléments préfabriqués en béton de sable 43
Fig 1. 22: Domaine d'application de béton de sable 43
Fig 1. 23: Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fibres. 45
Fig 1. 24: Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton 46
Fig 1. 25 : Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice 47
Fig 1. 26: Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle). 49
Fig 1. 27 : Organigramme de la méthode théorique. 50
Fig 1. 28: Evolution de la maniabilité en fonction Du dosage en fine d'addition. 53
Fig 1. 29 : Masse volumique apparente en fonction Du dosage en fine d'addition 54
Fig 1. 30 : Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP. 55
Fig 1. 31: Représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures 61
Fig 1. 32 : l'affaissement au cône d'Abrams en fonction de pourcentage de substitution de la poudre de marbre 67
Fig 1. 33 : Variation de la densité en fonction du taux de substitution a poudre de marbre 68
Fig 1. 34 : Influence de taux de substitution sue la résistance en compression 69
Fig 1. 35 : résistances en compression de béton avec ajout de poudre de marbre. 69
Fig 1. 36 : capacité d'absorption d'eau pour les bétons avec ajout de poudre de marbre. 70
Fig 1. 37 : La fluidité de mortier de verre 70

Fig 1. 38 : la densité fraîche de mortier de verre. 71
Fig 1. 39 : Fractionnement la résistance à la traction 72

CHAPITRE 02 : MATARIAUX ET ESSAIS

Fig 2. 1 : Le ciment utilisé 76
Fig 2. 2 : Aspect du sable utilisé 78
Fig 2. 3 : Courbe granulométrique de sable et déchets utilisée. 78
Fig 2. 4 : spectre analyse chimique de sable utilisé. 79
Fig 2. 5 : Marbre broyée. 80
Fig 2. 6: déchet de verre utilisé 81
Fig 2. 7: déchet de marbre utilisé. 82
Fig 2. 8: L'Adjuvant utilisé. 83
Fig 2. 9: Séquence de malaxage du béton de sable autoplaçant. 86
Fig 2. 10: protocole de malaxage 86
Fig 2. 11: Fabrication des éprouvettes. 87
Fig 2. 12: Protocole de l'essai d'étalement. 88
Fig 2. 13 : protocole de l'essai d'entonnoir (V- funnel). 88
Fig 2. 14: Mesure de la densité du béton de sable autoplaçant. 89
Fig 2. 15 : L'aéromètre. 90
Fig 2. 16: Déspositif de Mesure de résistance à la compression. 91
Fig 2. 17: Absorption d'eau par succion capillaire. 91
Fig 2. 18: Mesure des variations dimensionnelles. 92
Fig 2. 19: Appareillage pour mesure de retrait et gonflement. 93
Fig 2. 20: Le CT-mètre. 94
Fig 2. 21: La sonde. 95
Fig 2. 22: Variables étudiées. 96

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET INTERPRETATION

Fig 3. 1 Etalement des BSAP à base de déchet de marbre avant réglage. 99
Fig 3. 2 Etalement des BSAP à base de déchet de marbre après réglage. 100
Fig 3. 3 V-funnel des BSAP à base de déchet de marbre après réglage. 100
Fig 3. 4 Densité des BSAP à base de déchet de marbre. 101
Fig 3. 5 Air occlus des BSAP à base de déchet de marbre. 102
Fig 3. 6 Résistance à la compression des BSAP à base de déchet de marbre. 103
Fig 3. 7 Conductivité thermique des BSAP à base de déchet de marbre. 104
Fig 3. 8 Absorption capillaire des BSAP à base de déchet de marbre. 105
Fig 3. 9 Retrait des BSAP à base de déchet de marbre. 106
Fig 3. 10 Gonflement des BSAP à base de déchet de marbre. 107
Fig 3. 11 Etalement des BSAP à base de déchet de verre avant réglage. 109

Fig 3. 12 Etalement des BSAP à base de déchet de verre après réglage. 110
Fig 3. 13 V-funnel des BSAP à base de déchet de verre après réglage. 110
Fig 3. 14 Densité des BSAP à base de déchet de verre. 111
Fig 3. 15 L'air occlus des BSAP à base de déchet de verre. 112
Fig 3. 16 Résistance à la compression des BSAP à base de déchet de verre. 113
Fig 3. 17 Conductivité thermique des BSAP à base de déchet de verre. 113
Fig 3. 18 Absorption capillaire des BSAP à base de déchet de verre..... 114
Fig 3. 19 Retrait des BSAP à base de déchet de verre..... 115
Fig 3. 20 Gonflement des BSAP à base de déchet de verre. 116

Symboles et Abréviation

CaCO3 : carbonate de calcium.

Mgo : oxyde de magnésium.

Cao : oxyde de calcium.

Fe2o3 : oxyde de fer.

Sio2 : dioxyde de silicium**.**

B2O3 : le bore ou borax anhydre.

P2O5 : le phosphore.

Na_2O : la soude.

K_2O : oxyde de potassium.

ZnO : oxyde de zinc.

Fe_2O_3 : oxyde de fer.

PbO : oxyde de plomb.

CO_2 : dioxyde de carbone.

Al2O3 : L'alumine.

BS : Béton de sable.

BO : bétons ordinaires.

BAP : Béton autoplaçant.

BSAPT : Béton de sable autoplaçant témoin.

P0 : constante expérimentale.

d : diamètre des éléments les plus fin.

D: diamètre des éléments les plus grands.

C : Dosage du ciment exprimé en Kg/m3.

CaO : La chaux.

CHF : Ciment de haut fourneau.

CPA : Le ciment portland artificiel.

CPJ : Le ciment portland composé.

D.I.B : Déchets industriels banals.

DIS : Déchets industriels spéciaux.

DMS : Déchets ménagers spéciaux.

fc28 *:* Résistance souhaitée du béton a 28 jours.

Fe2O3 : L'oxyde de fer.

fmc : *Résistance* nominale du ciment.

I : Moment d'inertie de la section transversale.

K : Coef.

L0 : Longueur de base, prise égale à 280mm.

M : Masse de l'éprouvette au moment du démoulage.

M : Moment de flexion entre les deux points d'application de la charge.

P : Pourcentage en volume des fibres.

PE : Le polyéthylène.

RC : La résistance a compression.

R*f* : Résistance à la flexion.

R*t* : Résistance à la traction.

E/C : Eau / Ciment.

Ps(V) : Porosité du sable d'étendue 80 μm et Dmax

ρ : Densité du constituant exprimée en g/cm3.

MVAR : masse volumique apparente réelle.

MVAT : masse volumique apparente théorique.

Introduction général

Depuis ces vingt dernières années, les déchets de construction représentent une part importante des déchets solides municipaux. De plus, ils posent un sérieux problème à cause de leur durée de vie et parce que ce sont des déchets voyants. Leur gestion est donc nécessaire que ce soit d'un point de vue environnemental, économique ou social. Parmi ces déchets on distingue les déchets de marbre et de verre. Les premiers procédés mis en place pour les traiter furent l'enfouissement. Le recyclage de ces déchets dans le domaine de construction pourra résoudre un double problème : d'une part les problèmes environnementaux et d'autre part les problèmes économiques et techniques rencontrés dans le domaine de la construction.

C'est dans ce contexte que s'ouvre la réflexion sur la formulation de nouveaux bétons qui utiliseraient des ressources abondantes, peu ou pas exploitées, et présenteraient soit des caractéristiques comparables à celles des bétons usuels, soit des caractéristiques répondant à certaines exigences mal assurées par ces derniers. La valorisation des matériaux locaux ainsi que la réutilisation des déchets de différentes natures comme le carrelage font actuellement l'objet de différentes recherches.

Ce travail consiste donc à récupérer des déchets de marbre et de verre, rejetés dans la nature, après avoir été collectés, sont lavés, concassés, broyés puis extrudés sous forme de poudre, puis incorporés dans le béton de sable autoplaçant par substitution. Le composite ainsi réalisé est appelé ***''béton de sable autoplaçant à base de déchets de marbre et de verre''***. A part le ciment, chaque matériau de base constituant ce béton entre soit dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux, soit dans le cadre de la réutilisation des déchets industriels.

Pour le besoin de l'étude, les matériaux utilisés sont les suivants :

- Un seul type de sable : Il s'agit d'un sable roulé

- Deux déchets d'origines différentes : le ***marbre*** provenant d'une carrière de Skikda abandonnée se trouvant dans l'usine de marbre de Zawya wilaya de Blida et les ***déchets de verre*** provenant de la décharge naturelle.

Pour atteindre ces objectifs, le travail présenté poursuit une démarche progressive s'articulant autour des trois chapitres suivants :

Nous présentons tout d'abord dans le premier chapitre, une synthèse bibliographie regroupant en général la valorisation des déchets et l'activité de recyclage en construction.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les caractéristiques des matériaux de base, la formulation du béton de sable autoplaçant, et les techniques expérimentales utilisées durant cette étude pour évaluer les propriétés à l'état frais (étalement, temps de passage, densité, air occlus), les propriétés mécaniques (résistance à la compression), la durabilité (absorption d'eau, variations dimensionnelles (retrait et gonflement).

Le troisième chapitre présente l'analyse et la discussion des résultats obtenus.

Enfin des conclusions générales et des recommandations sont présentées pour achever ce modeste travail de recherche.

Chapitre 01 :
Synthèse bibliographique

1.1 VALORISATION DES DECHETS ET ACTIVITE DE RECYCLAGE EN CONSTRUCTION

1.1.1 Introduction

Avant de valoriser un déchet, il faut connaître son origine, l'analyser, caractériser son état actuel et son comportement dans le temps et évaluer sa traitabilité. Il s'agit donc de « mesurer pour connaître et connaître pour agir».
L'approche globale du déchet permettra d'en définir son devenir, à savoir quel type de valorisation choisir.

Dans ce chapitre, nous décrivons le contexte de la gestion des différents types de déchets et les principales techniques de traitement ou d'élimination à travers le monde , ainsi le recyclage et la réutilisation des déchets dans le domaine des travaux publics.

1.1.2 Déchets

A. Définition

Le déchet est défini comme « Tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon».

D'après la loi française du 15 juillet 1975 : « Est ultime un déchet résultant ou non du traitement des déchets et qui n'est plus susceptible d'être traité dans des conditions techniques et économiques du moment notamment par l'extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux » **[1]**

On peut classer les déchets selon quatre grandes catégories représentant l'essentiel de la production et rendant compte de leur diversité : **[2]**

a) Déchets organiques

Ces déchets sont composés de matière organique et son issus d'organismes vivants végétaux ou animaux.

b) déchets inertes

Ce sont des déchets composés d'éléments minéraux qui n'évoluent pas dans le temps (non putrescibles) et qui ne contiennent pas de substances toxiques ou dangereuses. Ce sont les gravats, résidus d'activité extractive.

c) déchets banals

Ce sont des déchets qui ne contiennent pas de substances toxiques ou dangereuses. Ce sont des déchets ménagers et les déchets qui leur sont assimilables et peuvent être traités de la même façon. Ce sont les emballages, les déchets de bois, de plastiques…

d) déchets spéciaux

Ces déchets contiennent des éléments nocifs en quantités variables impliquant des précautions particulières d'élimination. Ce sont les solvants, les produits phytosanitaires,…; certains déchets spéciaux doivent être stabilisés avant stockage. Un déchet est considéré comme stabilisé quand sa perméabilité à l'eau et sa fraction lixiviable ont été réduites et quand sa tenue mécanique a été améliorée de façon à respecter certains seuils pour différents paramètres (pH, siccité, fraction soluble…).

B. Valorisation des déchets

La valorisation est définie comme l'élimination des déchets comporte les opérations de collecte, transport, stockage, tri et traitement nécessaires à la récupération des éléments et matériaux réutilisables ou de l'énergie, ainsi qu'au dépôt ou au rejet dans le milieu naturel de tous autres produits dans des conditions propres à éviter les nuisances **[2].**

C. Méthodes de la valorisation

a) Valorisation matière

Elle est appelée également, recyclage mécanique, il s'agit de l'opération globale consistant à la production d'une nouvelle matière à partir d'un déchet. Dans ce cas, il n'y a pas de destruction majeure de la structure chimique du polymère **[2]**.

b) Valorisation énergétique

Elle est appelée également, recyclage énergétique, elle vise la production d'énergie calorifique plusieurs techniques permettent d'atteindre cet objectif dont les plus connus

sont l'incinération, la pyrolyse ou la thermolyse. Cette énergie calorifique peut être utilisée sur place ou transformée par la suite en énergie électrique, en fonction des besoins du moment ou du lieu de traitement **[2]**.

c) Valorisation chimique

Il s'agit de tout processus chimique permettant la transformation d'un déchet en des produits chimiques utilisables comme intermédiaires réactionnels dans l'industrie chimique ou l'industrie de la transformation des matières plastiques **[2]**.

1.1.2.1 Origine de la production de déchets

La production des déchets est inéluctable pour les raisons suivantes :

- **Chimiques:**

Tout résidu d'un processus analytique, de réaction, transformation ou d'utilisation de substances ou produits chimiques dans les établissements de recherche et d'études, d'enseignement et de formation, d'activités de soin humain ou animal.

- **Technologiques**

Les déchets dits technologiques résultent de l'exploitation des usines et laboratoires. Certains sont solides : gants, déchets de démantèlement. D'autres sont liquides tels que les effluents de décontamination. Même si l'activité mise en jeu est beaucoup plus faible que celle des déchets de procédés, les volumes des déchets technologiques peuvent être relativement importants, et le fait de mettre en oeuvre des matières radioactives conduit, bien évidemment, à utiliser pour leur traitement une méthodologie particulière et adaptée .

- **Biologiques**

Ce sont les résidus d'origine végétale ou animale qui peuvent être dégradés par les micro-organismes pour lesquels ils représentent une source d'alimentation.

- **Economiques**

Tous les déchets qui ne sont pas des déchets ménagers.

- **Ecologiques**

Les activités de la dépollution (eau, air) génèrent inévitablement d'autres déchets qui nécessiteront une gestion spécifique.

- **Accidentelles**

Les inévitables dysfonctionnements des systèmes de production et de consommation sont eux aussi à l'origine de déchets.

1.1.2.2 Constitution chimique du déchet

Les déchets sont pour la plupart constitués des mêmes molécules chimiques que celles des produits. Ce qui différencie les déchets des autres produits provient d'un certain nombre de particularités. Certains déchets résultent du traitement involontaire de molécules usuelles avec production de sous-produits de composition, a priori inconnu. Par ailleurs, le déchet peut se retrouver dans un milieu dont il n'est pas issu en tant que produit et de ce fait auquel il n'est pas destiné. Enfin, le mélange au hasard des déchets peut conduire à la formation de produits nouveaux **[3]**.

1.1.2.3 Différents déchets utilisés en génie civil

En général les déchets sont classés en cinq catégories comme illustrés ci –dessous, bien que les déchets utilisables en génie civil soient les déchets inertes, les déchets ménagers et les déchets en sous-produits industriels dans des conditions spécifiques. **[4]**

A. Déchets inertes

Tout déchet qui ne produit pas de réaction physique ou chimique tels les déchets provenant de l'exploitation des carrières, des mines, des travaux de démolition, de construction ou de rénovation et qui ne sont pas constitués où contaminés par des substances dangereuses ou par d'autres éléments.

B. déchets ménagers

Les déchets ménagers englobent tous les déchets produits par les ménages et assimilés (certaines collectivités et certains commerçants). Ce sont donc les déchets que tout particulier produit dans sa vie quotidienne. Les déchets ménagers regroupent les ordures ménagères (non recyclables ou pas encore recyclées), les déchets recyclables secs (journaux, papiers, carton, magazines, verre, aluminium, plastique) et les recyclables dits humides, organiques ou fermentescibles (déchets alimentaires, herbes, bois...)

C. déchets industriels banals (D.I.B.)

Ensemble des déchets non inertes et non dangereux générés par les entreprises, industriels, commerçants, artisans et prestataires de services ; ferrailles, métaux non ferreux, papiers cartons, verre, textiles, bois, plastiques, etc.

Tableau 1. 1 Quantités de déchets produits : évolution 2008 **[5]**

Catégorie de déchet	Production de déchet en tonnes
Bois	5 590 740
métaux	3 960 337
Déchets en mélange	2 160 388
Papiers cartons	1 997 818
Plastique	467 333
verre	305 495
caoutchouc	81 220
textile	22 877
TOTAL DECHET BANALS	14 525 208

D. Déchets toxiques

Un déchet toxique est un déchet, qui peut s'avérer nuisible à la santé d'un être vivant. Les déchets toxiques sont généralement rejetés par les usines ou les puissances industrielles.

1.1.3 Activité du recyclage des déchets en construction

1.1.3.1 Recyclage des déchets

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets et de réintroduction des matériaux qui sont issus dans le cycle de production d'autres produits équivalents ou différents.

Le recyclage permet de réduire les volumes de déchets, et donc leur pollution, et de préserver les ressources naturelles en réutilisant des matières premières déjà extraites.

Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des trois R :
Réduire, **Réutiliser**, **Recycler**. Ce sont trois réponses au problème de la gestion des déchets. Un Français produit en moyenne 450 kg de déchets par an. La règle des 3 R peut permettre de produire moins de déchets ou de valoriser ses déchets par :

1.1.3.2 Type de recyclage

Il existe trois types de recyclage **[6]**:

- **recyclage in situ**

Consiste en la réutilisation immédiate des déchets. De plus, le transport n'intervient pas dans le coût des granulats. Dans le domaine routier, par exemple, la nouvelle chaussée est réalisée à partir du matériau de recyclage de l'ancienne chaussée.
L'Allemagne et l'Angleterre possèdent plus d'installations mobiles que fixes.
En revanche, la possibilité de retrait de certaines impuretés est réduite et la qualité des granulats est irrégulière. De ce fait, le champ d'utilisation des granulats ainsi fabriqués reste limité.

- **recyclage sélectif**

Il est choisi lorsque les matériaux de démolition sont homogènes ; il nécessite que les quantités stockées soient suffisantes.

- **recyclage en site fixe**

Les matériaux de démolition sont acheminés vers des installations montées en permanence sur un même site. Il s'effectue dans des conditions industrielles.

1.1.3.3 Impacts du recyclage sur l'environnement

Les bénéfices économiques et environnementaux du recyclage sont considérables :

- il permet de protéger les ressources, de réduire les déchets, de créer des emplois, de protéger la nature et d'économiser les matières premières.
- l'acier recyclé permet d'économiser du minerai de fer.
- chaque tonne de plastique recyclé permet d'économiser 700 kg de pétrole brut.

- le recyclage de 1 kg d'aluminium peut économiser environ 8 kg de bauxite, 4 kg de produits chimiques et 14 kWh d'électricité.
- l'aluminium est recyclable à 100% ,1 kg d'alu donne 1 kg d'aluminium (après avoir été fondu).
- chaque tonne de carton recyclé fait économiser 2,5 tonnes de bois.
- chaque feuille de papier recyclé fait économiser 1 L d'eau et 2,5 W d'électricité en plus de 15 g de bois. **[7]**

1.2 MARBRE ET DECHETS DE MARBRE

1.2.1 Définition

Les marbres sont des roches métamorphiques provenant de la recristallisation d'ancien calcaire et de dolomite ce qui leur confère une plus grande dureté (date d'environ 300 à 400 millions d'années).

Le degré de pureté du marbre est responsable de sa couleur et de son aspect. Les marbres purs sont généralement blancs, toutefois, la présence de pigments naturels, d'oxydes divers (sels de plomb, carbone pour le noir, cuivre pour le vert, fer pour le rouge, cobalt pour le bleu), lui donne une variété de couleurs et de veinages illimités (bigarrés, ramagés, tachés, ondulés.)**[8].**



Fig 1. 1 La roche de marbre

1.2.2 Compositions

Le marbre désigne un carbonate de calcium à tissu compact ou cristallin qui se laisse rayer et réagit aux acides plus ou moins siliceux ou argileux, il se présente en épaisseur homogène ou diversement mélangée à d'autres matières, sa densité est élevée en moyenne de 2,7.

Les marbres, au sens géologique, correspondent à des calcaires métamorphisés.

- C'est pourquoi ils sont souvent clairs (comme les calcaires). On y observe très souvent des veines un peu plus sombres (cf. photo ci-dessus), qui correspondent à des impuretés, des argiles…
- Le chimisme de la roche d'origine étant essentiellement du carbonate de calcium CaCO3, au cours du métamorphisme, si le calcaire est très pur, on ne pourra pas form er les minéraux « classiques du métamorphisme » qui nécessitent dans la roche d'orig ine la présence de silice d'aluminium… Les marbres sont très utilisés pour la sculptur e, dans l'architecture. **[8].**

1.2.3 Types

La classification des marbres se fait selon la teinte et le dessin : outre le marbre blanc, il existe des variétés bleues, roses, beiges, grises, jaunes, rouges, vertes, violettes ou noires, etc. On classe aussi les roches marbrières géologiquement **[8]**:

- **BRÈCHE :** roche formée de fragments anguleux, enrobés de ciment naturel.
- **TRAVERTIN :** calcaire d'origine lacustre présentant des trous.
- **ONYX :** (souvent translucide) marbre constitué de carbonate ou sulfate de chaux s'accumulant par infiltrations à travers les couches du sol.
- **ARDOISE :** schistes argileux ayant subi un léger métamorphisme, ils se fendent naturellement en couches minces.
- **LAVE :** basalte de couleur gris foncé pouvant contenir des petits trous dus à la présence de gaz dans la lave, souvent rebouchés.



Fig 1. 2 Types de marbre **[8]**.

1.2.4 Utilisations

Le marbre est surtout utilisé en décoration, sous forme de dallage, revêtement mural... Sa destination est liée aux caractéristiques techniques de chaque roche, (dureté, porosité, gélivité...). Sa mise en œuvre doit être réalisée par un professionnel averti. Comme un beau meuble, le marbre prend avec le temps une inimitable patine et reste indémodable. L'emploi de produits adaptés (anti-tâches, hydrofuge) facilite son entretien **[8].**



Fig 1. 3 Utilisation de marbre dans construction**.**

1.2.5 Productions

La production marbrière en Alger est faible et on constate une régression par rapport à des pays comme France, l'Italie, le Portugal et la Grande-Bretagne **[8].**

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

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

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

Durant l'année 2007, la production de marbre en blocs, par les filiales de l'Entreprise ENAMARBRE, est de 10 620 m3, en baisse de 33,96% par rapport à la production enregistrée en 2006 qui était de 16 082 m3.

Les dérivés de marbre produits sont 169 954 tonnes pour l'année 2007, en hausse de 15,09% par rapport à l'année 2006 qui était de 147 674 tonnes. La production pour l'année 2007 est de :

- Marbre/ Blocs : Skikda 10 399 m3, Oran 221 m3
- Marbre/ Dérivés : Chlef 17 222 t, Tlemcen 45 581t, Tizi Ouzou 12 445t, Skikda 82 843t, Oran 11 863t. **[8]**

1.2.5.1 Marbre de la carrière de FIL-FILA

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

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

• Carrière à blocs.

• Carrière dérivée.

1.2.5.1.1 Carrière à blocs

a. Principe de fabrication

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

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

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

- Marbre blanc
- Marbre gris
- Marbre réséda vert

Leurs caractéristiques pétrographiques-minéralogiques ; physico-mécaniques et chimiques sont présentées dans le tableau 1.2. **[8].**

b. Recyclage des déchets

Les déchets de carrières à blocs sont les blocains, chutes et moellons ayant différentes formes géométriques, le taux de déchets est de 56% de la production pour l'année 2007 ; le stock jusqu'à la fin 2007 est de l'ordre de 5 823 m^3.

Actuellement le recyclage des déchets est limité sur une partie de blocs de marbre de la carrière à blocs, par une entreprise privée.

Le produit de recyclage de déchets est un sous produit de marbre «granulats et poudre». Les déchets de l'usine de transformation sont exploités partiellement en revêtement de sol extérieur pour les chutes de carreaux et en construction de carreaux de granito, en peinture pour la poudre de marbre. **[8].**

c. Granulats de rebuts de masse et de blocs de marbre

Obtenu par concassage et broyage des blocains et de chutes de blocs. La répartition granulométrique en mm : 0/5- 5/10- 10/20.

Les granulats utilisés comme matière première pour la fabrication du carrelage et revêtement des surfaces.

Poudre de marbre de dimensions standards en mm : 0/5- 0/0 et de 30 à 02 microns. **[8].**

1.2.5.1.2 Carrière dérivée

a. Principe de fabrication

L'exploitation de la carrière dérivée de Fil Fila se fait par abattage à l'exploitation, des moellons de dimension variant de (80-100cm), qui sont concassées, broyés pour obtenir des granulats dont la granulométrie varie de 0-18mm.

Poudre de marbre : obtenue après broyage et pulvérisation du marbre de dimension variant de 30 à 02 microns.

Les dérivés de marbre sont deux types :

- Dérivés de marbre blanc.
- Dérivés de marbre gris (à l'arrêt) **[8].**

b. Recyclage des déchets :

Le déchet de la carrière dérivée est un tout venant (marbre de différentes classes granulaires), le taux de déchets est de 19% de la production pour l'année 2007, le stock jusqu'à la fin 2007 est de l'ordre de 15 740 tonnes. Le tout venant de la carrière dérivée de Fil-Fila sont destiné à la construction des routes **[8].**

Tableau 1. 2 Caractéristiques pétrographiques-minérologiques; physico-mécaniques et Chimiques de marbre de la carrière de FIL-FILA

caractéristique	Types de marbre		
	Blanc	Gris	Réséda vert
Caractéristique pétrographiques-minéralogiques			
Nature pétrographique	Calcaire microcristallin	Calcaire microcristallin	Calcaire microcristallin
Couleur	Blanche	Gris sombre	Gris avec veinules vertes
aspect	homogène	Non homogène	Non homogène
texture	Massive	massive	-
structure	microcristallin	microcristallin	-
Composition minéralogique			
calcite	100 %	96 %	94 %
Quartz	-	3 %	3 %
Oxyde de fer	-	0.1 %	-
Caractéristiques physiquo-mécaniques			
Masse volumique en g/cm3	2 .736	2.746	2.752
Compacité en %	98.03	99.7	98.7
Porosité en %	1.96	0.3	1.3
Coefficient d'absorbation d'eau en %	0.39	0.11	0.16
Coefficient de saturation en %	0.87	0.5	0.77
Résistance à la comprissions à l'état sec en kg/cm2	961	1378	949
Résistance à la comprissions après refroidissement en kg/cm2	966	1026	1047
Résistance à l'usure en g/cm2	1 .82	0.719	0.996
Résistance au choc en g/cm2	40	56	83.5
Caractéristiques chimiques			
Caco3	99 .05	97.73	97.22
Mgo	1 .03	0.99	3.05
Cao	54 .86	54	51.05
Fe2o3	0.04	0.22	0.04
Sio2	0.15	0.9	0.15
P .C	44.26	43.65	44.26

1.3 VERRES ET DECHETS DE VERRES

1.3.1 Verres

1.3.1.1 Définition

Corps solide transparent, obtenu par la fusion du sable mêlé de chaux et de potasse ou de soude. Il existe de nombreuses catégories de verre définies par des verriers ou par des scientifiques. Pour les verriers, c'est un solide altérable par les agents atmosphériques et renfermant plus de 60% de silice. Pour les scientifiques, c'est une substance amorphe, présentant l'état solide ou de liquide surfondu, transparent, translucide ou opaque, sonore, doué d'une cassure brillante et pouvant passer par toutes les phases de l'état pâteux par élévation de température. **[9].**

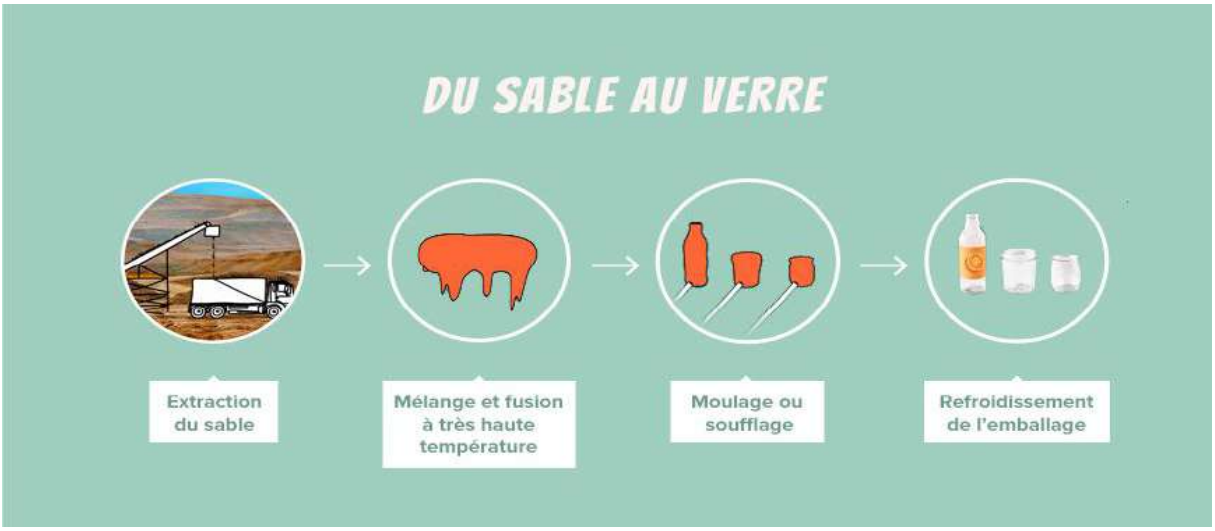


Fig 1. 4 les étapes fabrication de verre

1.3.1.2 Historique

Le verre existe déjà naturellement depuis plusieurs centaines de milliers d'années, L'homme l'utilisa pour la première fois il y a 100 000 ans sous forme d'obsidienne, (verre naturel d'origine éruptive) pour fabriquer des outils, des armes coupantes et des bijoux.

L'origine des verres remonte à la plus haute Antiquité. Il y a six milles ans, des potiers Egyptiens ont fabriqué le premier verre tout à fait par accident en cuisant leurs poteries. Le premier verre était un émail, mélange de sable et d'autres minéraux fondus sur la surface d'objets en céramique. Il y a trois mille ans, des artisans découvrirent que si l'émail avait une épaisseur suffisante, il pouvait servir seul à fabriquer des objets sans pour autant qu'il soit supporter par la terre cuite.

Les premiers verres fabriqués par l'homme sont originaires de Mésopotamie, de Syrie ou d'Egypte. Ils ne sont pas encore transparents ou translucides mais opaques, de couleur verte ou bleue. **[10].**

1.3.1.3 Compositions

Certains éléments comme le silicium et le bore peuvent former un verre par leur seule combinaison avec de l'oxygène (oxyde de …) et par élévation à une très haute température. Ces oxydes sont appelés oxydes **formateurs** car ils forment le squelette du verre. On les combine avec d'autres éléments dits **« modificateurs »** qui sont :

- Les fondants qui abaissent la température de fusion des oxydes formateurs (silice = 1730°C).
- Les stabilisants qui modifient les propriétés physiques du verre atténuées par l'adjonction du fondant.

a. Les oxydes formateurs (les vitrifiant)

- **La silice (dioxyde de silicium SiO2)**

Le composant principal du verre qui représente environ 70% de la masse. Elle est l'élément formateur de réseau. Si l'on augmente sa quantité, on augmente la dureté du verre. Son point de fusion est à 1730°C. Elle entre dans la fabrication sous forme de sable dont les plus purs en contiennent 99,5 % (les sables quartzeux). Le sable de Fontainebleau, du fait de sa qualité, est très recherché pour la fabrication de verres d'optique et de cristal. Plus le pourcentage de silice est élevé et plus le coefficient de dilatation est faible ; donc, plus le verre est résistant**. [11]**

- **L'anhydride borique (le bore ou borax anhydre B2O3)**

Il diminue le coefficient de dilatation et améliore la résistance aux chocs thermiques ; il est aussi plus résistant à l'eau. Son point de fusion est à 2300°C. Il sert pour le travail de laboratoire (verre thermorésistant comme le Pyrex). Il possède aussi les propriétés d'un fondant. **[11]**

- **L'anhydride phosphorique (le phosphore P2O5)**

Employé dans le domaine de l'optique. La principale source au Moyen Age est les cendres de bois. **[11]**

b. Les oxydes modificateurs

- **Les fondants (oxydes alcalins)**

La silice permet d'obtenir un verre, mais son point de fusion est très élevé (1730°C). En ajoutant des fondants, on abaisse cette température à 1400°C (économie d'énergie) et on facilite les possibilités de travail. Les fondants sodiques et potassiques ont été utilisés conjointement dès le moyen âge. **[11]**

- **L'oxyde de sodium (la soude Na_2O)**

Il entrait autrefois dans la composition sous Forme de cendres de plantes marines (ex : la salicorne) ou de nitre (grec = nitrons). Il abaisse le point de fusion, augmente l'éclat du verre et sa résistance aux agents atmosphériques ainsi que le coefficient de dilatation. Il est plus utilisé pour le verre industriel que pour le verre soufflé car il doit être constamment réchauffé lors du façonnage. **[11]**

- **L'oxyde de potassium (K_2O)**

Il entrait autrefois dans la composition sous forme de Cendres de plantes terrestres comme la fougère ; aujourd'hui, on utilise du salpêtre (nitrate de potassium KNO_3). Il abaisse le point de fusion, augmente l'éclat du verre et le rend doux à la taille, mais il diminue sa résistance chimique. Il avantage le soufflage du verre car il augmente le temps de travail lors du façonnage. **[11]**

- **L'oxyde de magnésium (MgO)**

Il est utilisé sous forme de dolomite (calcium+magnésium). Il n'est pas indispensable pour tous les verres, sauf le verre flotté, le verre à vitre et en gobeleterie. Il abaisse la température de fusion et augmente la résistance aux agents chimiques. **[11]**

c. Les stabilisants (oxydes alcalino-terreux)

L'introduction d'un oxyde alcalin (fondant) a provoqué la rupture d'une liaison Si - 0 et l'apparition d'un oxygène "non pontant". Ceci a pour effet de fragiliser le réseau et d'augmenter la solubilité à l'eau. **[11]**

- **L'oxyde de calcium (CaO)** : Il se trouve sous forme de chaux (qui est le stabilisant le plus employé) ou de dolomie (lorsque le verre doit contenir de la magnésie). Il augmente la résistance chimique du verre, son éclat et diminue sa

solubilité, mais en excès il provoque une dévitrification. Il était utilisé au moyen âge pour les verres sodiques. **[11]**

- **L'oxyde de zinc (ZnO) :** Il augmente l'éclat et l'élasticité.
- **L'oxyde de fer (Fe_2O_3) :** (c'est un stabilisant et un colorant) souvent contenu dans les roches naturelles, il donne une teinte verdâtre. Il faut donc procéder à une décoloration de cette teinte. Pour cela, on peut ajouter du bioxyde de manganèse (MnO2) (savon des verriers). **[11]**
- **L'oxyde de plomb (PbO) :** Il abaisse également Le point de fusion en stabilisant la composition. Il rend le verre plus éclatant tout en lui conférant une légère teinte jaunâtre, il est plus agréable à couper et à travailler. **[11]**

d. Les colorants

Les verres sont le plus souvent teintés dans la masse ; cela signifie que l'on ajoute des oxydes métalliques pendant la fusion. Ils entrent en très faible proportion du mélange (ex : oxyde de cuivre pour du vert). La coloration dans la masse est due à la présence dans le verre d'ions de métaux de transition. **[11]**

1.3.1.4 Propriétés

Le verre est la seule matière minérale solide que l'on puisse produire à des dimensions et sous des formes quelconques tout en conservant sa transparence.

A. Propriétés physiques

- **Transparence** : Le verre incolore ou blanc, laisse filtrer à peu prés toute l'énergie solaire. Une vitre de 5 mm d'épaisseur n'arrête qu'environ 15% de l'énergie solaire. Aussi, il peut être opaque ou opalescent. On fabrique actuellement des verres perméables aux rayons infrarouges. **[10]**
- **La dureté :** seuls les diamants et le carbure de tungstène le rayent. Le verre le plus dur est le verre de Bohème et le cristal est le plus tendre. **[10]**
- **Densité et porosité :** La densité du verre varie avec celles des constituants, ex : le verre ordinaire présente une densité variant entre 2,5 et 2,7 (qu'une feuille d'un

mètre carré et d'un millimètre d'épaisseur pèse 2,5 kg), le verre à glaces offre une densité de 2,46 et le cristal une densité de 3,4. La porosité est nulle. **[10]**

- **La résistance et l'élasticité :** la cassure du verre est liée à sa flexion et à sa résistance au choc. Il casse là où le métal se tord. Contrairement, sa résistance à la compression est importante : il faut une pression de 10 tonnes pour briser un centimètre cube de verre. **[10]**

- **L'imperméabilité :** elle est extrêmement grande mais le verre reste poreux pour certains liquides comme le kérosène. **[10]**

B. Propriétés thermiques

- **La dilatation :** Il se brise s'il subit un brusque changement de température car les différentes parties du verre ne se réchauffent pas en même temps. Le verre ordinaire a un coefficient de dilatation peu différent de ceux du béton et de l'acier (verre = 9.10^{-6}, béton et acier = $10/11.10^{-6}$).

- **La conductivité :** il est mauvais conducteur (environ 500 fois moins que le cuivre); on l'utilise comme isolant électrique. C'est aussi un ~~bon~~ isolant acoustique suivant l'épaisseur de la feuille. Ceci n'est pas le cas à chaud car il devient conducteur à partir de 250°C. **[10]**

C. Propriétés chimiques

- **L'action de l'eau :** l'eau agit sur les silicates qui, en se décomposant, forment un dépôt en devient peu à peu opaque ; le verre perd de sa transparence

- **L'action de l'air** : les silicates alcalins se combinent avec l'acide carbonique contenu dans l'air ce que donne un dépôt blanchâtre à la surface du verre.

- **L'action de la lumière :** exposés aux ultraviolets, certains verres se colorent ou se décolorent.

- **L'action des acides :** ils décomposent la silice, le plus rapide est l'acide fluorhydrique qui permet de graver en profondeur le verre plaqué. **[10]**

1.3.1.5 Différents types de verre

On peut classer les constructions de verre en plusieurs catégories

A. Monolithique

C'est la plus simple des constructions, puisqu'il s'agit d'une feuille de verre d'épaisseur constante pratiquement cette feuille est produite selon la méthode du flottage, ce peut être une glace (claire, opaque, cathédrale), un verre trempé. **[12]**

B. Vitrages isolants, basse émissivité

Un vitrage isolant consiste en deux feuilles de verre séparées par une lame d'air ou de gaz d'épaisseur constante. Le verre utilisé est généralement clair, neutre et monolithique. O les appelle double vitrage, et ils sont caractérisés par l'épaisseur des deux vitrages et celle de la lame d'air : ex : 4-16-4, donc deux feuilles de 4mm et un vide de 16mm soit 24mm au total.

D. Verres teintés ou colorés

Dans ce procédé, la couleur est mélangée au moment de la fabrication, ce qui lui donne une consistance dans la masse. Mais comme aujourd'hui le verre est fabriqué par flottage, les teintures ou colorations sont réalisées en surface elles sont effectuées soit pendant le refroidissement, soit par déposition chimique. **[12]**

E. Verres réfléchissants

Le verre qui possède du métal ou des oxydes de métal dans sa masse ou sur sa surface pour réduire l'énergie solaire (chaleur, infrarouge) est dit réfléchissant. Il existe de nombreuses couleurs différentes possibles dont l'argent, le cuivre, le bleu et parfois le vert, le gris et le bronze.

Les films de protection solaire ont la même fonction que le verre teinté. Mais la grande différence est que le film est un produit retirable alors que le traitement du verre est définitif on pourrait ainsi enlever et remplacer un tel film par celui performent. La durée de vie d'un film est légèrement inférieure a celle des vitrages. **[12]**

E. Verres résistants aux tirs d'armes à feu

Ce type de verre très lourd est généralement placé dans des châssis spéciaux. Dans certains cas, des films transparents pourront être laminés afin d'agir comme une protection contre les micro-projections à l'arrière du verre dues à l'impact des projectiles. On notera que la température de ce type de vitrage doit être maintenue en deçà de 45ºC pour préserver ses performances. **[12]**

F. Verres résistants aux explosions

C'est généralement la capacité de l'ensemble vitre plus châssis à résister aux ondes de choc ou aux surpressions d'air résultant des explosions qui déterminent ce type de vitre. Fabriqué sur mesure. Il consiste en un châssis renforcé équipé d'une ou plusieurs vitres en verre ou en polycarbonate. Ils sont installés dans les lieus dits à risque**.[12]**

1.3.1.6 Domaine d'application du verre

Les domaines d'application du verre trempé sont vastes. Ses performances le souvent indispensable, voire obligatoire pour de nombreux usage. Nous pouvons répertorier 7 pôles d'activités :

- ✓ L'automobile

Ce fut la première application du trempé. Il est utilisé pour l'ensemble des équipements : glaces latérales, lunettes arrière, toits ouvrants …

- ✓ L'électroménager

Il est utilisé pour les portes de fours et les plaques chauffantes.

- ✓ Les verres intérieurs

Ce marché couvre des applications diverses comme les meubles, l'agencement, le sanitaire, les vitrines, les cloisons, la tabletterie, le mobilier de laboratoires, les salles blanches, escalier…

- ✓ Les équipements industriels

Comprennent les machines, capteurs solaires, ascenseurs, porte automatiques.

- ✓ Le matériel mobile : (hors automobile)

Comprend le ferroviaire, la marine, la para automobile (matériels agricoles, chariots élévateurs, voiturettes …)

- ✓ Le mobilier urbain

Comprend les abribus, les panneaux publicitaires, cabines téléphoniques …

- ✓ Les façades

Incluent les murs rideaux, les portes, les vitrines, garde-corps …

1.3.2 Déchets de verres

Le verre récupéré est constitué de :

- Verre industriel provenant des professionnels (embouteilleurs, négociants en vin, restaurateurs, miroiteries,...),
- verre issu des chantiers de destruction du bâtiment,
- verre des automobiles en provenance des garages et des véhicules hors d'usage,
- verre ménager qui représente 13 % du poids des ordures ménagères.



Fig 1. 5 Les déchets de verre **[13]**

1.3.2.1 Types de déchets de verres

- Verre creux : bouteilles, bocaux, gobelets, pots…
- Verre plat : verre trempé, vitrages, glaces…
- Laine et le fil de verre.
- Verre technique : lunettes, ampoules, écrans cathodiques…
- Verre blanc et coloré.

1.3.2.2 Chiffres (quantité) de déchet de verre

Déchets solides. Aux États-Unis, par exemple, 11 530 kilotonnes de déchets de verre a été généré 2010 et seulement 27,1% ont été recyclés, principalement pour récipient et l'emballage **[13].**

À Singapour, 72 800 tonnes des déchets de verre a été cédée en 2011 et 29% ont été recyclés **[14].**

1.3.3 Recyclage du verre

Le recyclage du verre est beaucoup plus simple que le recyclage du papier, car le verre peut se recycler à l'infini. Son caractère minéral et inerte en fait un matériau non-dangereux (sauf les tessons) mais très stable. Si le recyclage n'était pas pratiqué, il lui faudrait plus de mille ans pour se dégrader dans la nature.

Il y a deux méthodes pour valoriser ces déchets : les réutiliser s'ils sont intacts ou recycler leur matière première. Sans sur triage, c'est-à-dire de tri du verre en fonction de sa couleur, le verre recyclé obtenu est coloré. Seul un traitement séparé des verres incolores et colorés permet d'obtenir à nouveau du verre incolore. Ce type de sur triage est pratiqué en Europe du nord (Allemagne, Suède…).

Une tonne de verre recyclée représente 0,66 tonne de sable et 0,1 tonne de calcaire, 1,17 m^3et 1,46 MWh soit 0,46 tonne d'équivalent CO_2 évitée. 75% du verre est recyclé en France.

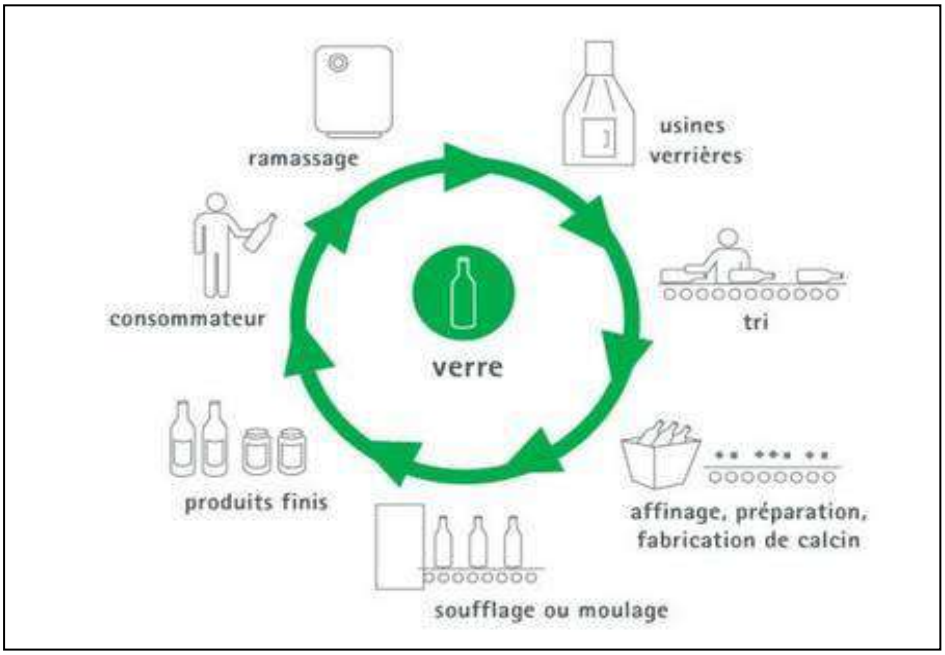


Fig 1. 6 Cycle du recyclage du verre.

La réutilisation des récipients en verre, appelée aussi consignation, n'est plus très pratiquée en France, mais elle l'est ailleurs en Europe et pas seulement appliquée pour le verre. En ce qui concerne le recyclage de la matière première, après tri par les consommateurs et collecte, le verre subit encore plusieurs étapes de tris automatiques pour éliminer les impuretés (étiquettes, capsules…) avant d'être broyé pour former du calcin**. [15]**

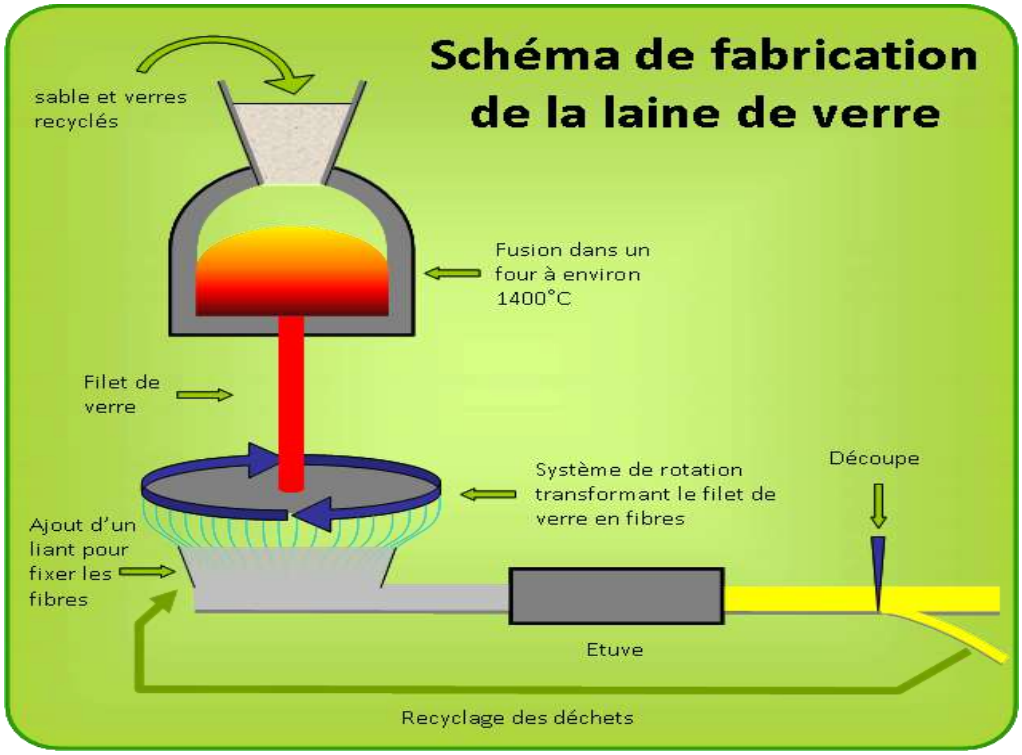


Fig 1. 7 Recyclage des déchets de verre

1.4 BETON DE SABLE

1.4.1 Introduction

Comme tous les pays en voie de développement, l'Algérie est un gros consommateur de granulats. Cette consommation s'accroît d'une année à l'autre. Les gros granulats ont tendance à être épuisés dans certaines régions. D'autres régions ne disposent plus de ce matériau. Par ailleurs, notre pays, et notamment le sud algérien, dispose de grands gisements de sables de différentes natures (de dune, alluvionnaires et de concassage), ainsi que de grands gisements de fines naturels et artificiels. La réflexion sur la l'élaboration de nouveaux bétons, tels que les bétons de sable, est donc devenue nécessaire **[16].**

Le béton de sable se distingue d'un béton traditionnel par un fort dosage en sable et par l'absence ou par un faible dosage en gravillon. Il se différencie également des mortiers par un

plus faible dosage en ciment et surtout par son domaine d'application. L'emploi de béton de sable en remplacement des bétons classiques peut constituer une variante de structure rigide intéressante sur le plan économique lorsque le sable est facilement accessible et à un coût moindre que les granulats courants **[17].**

1.4.2 Historique

Le béton de sable est un matériau utilisé bien antérieurement au béton traditionnel.
Selon POIEVIN **[18]**, ce matériau trouve ses origines dans les années 1850-1875 sous l'appellation de "béton aggloméré". Il était alors constitué de sable, ciment, chaux et eau.

COIGNET qui est à l'origine de ce matériau construisit pour sa famille en 1851 à saint Denis (nord de Paris, France) une maison 60m de long et 7m de hauteur, du type R+2, avec mur de soutènement. Cet ouvrage fût entièrement édifié en béton aggloméré, des fondations jusqu'au toit **[19]**.

POITEVIN **[18]** rapporte encore qu'entre 1869 et 1872 un aqueduc de 40km fut partiellement construit en béton aggloméré afin de relier Fontaine bleu à Orléans (France). Le mélange était constitué de 4 parts de sable de Fontaine bleu, d'une part de liant (2/3 chaux, 1/3 ciments) et de 0.5 part d'eau (en poids), ce qui correspond approximativement à un dosage en liant de 400kg/m³, plus proche de celui des bétons de sable que des mortiers. Mis en service en 1869, le phare de Port-Saïd (Egypte) de 52m de hauteur fut également construit en béton aggloméré composé de sable d'une plage avoisinante et de chaux importé de France.



Fig 1. 8 Phare de Port-Saïd 1969. (Egypte) **[20]**

COIGNET exporte sa technique jusqu'aux USA, où son entreprise "New York and Longisland Coignet stone compagny" construit en 1871-72 en blocs de béton aggloméré le pont de Brooklyn à New York **[18].**



Fig 1. 9 Le pont de Brooklyn1871-72New York **[20].**



Fig 1. 10 La maison de COIGNET **[21]**

Vers la fin du XIX*ème* et au début du XX*ème* siècle, marquant la période de l'apparition du béton utilisant des granulats de gros calibres ainsi que l'utilisation de ciment à la place de la chaux qui a engendré une augmentation de résistance (allant jusqu'à 20MPa) furent facilement obtenus. A compter de là, le béton aggloméré ancêtre du béton de sable a cédé la place au béton connu jusqu'à nos jours **[22].**

En 1918 une expérience a été faite à **St-Petersburg**, par le conte **M. Nicolas** de **ROCHEFORT**. Elle consistait à broyer en même temps sable et clinker à parts égales, puis à mélanger ce produit à du sable dans le rapport de 1 (produit broyé) à 3 (sable). Les résistances obtenues furent les mêmes que celles d'un mélange sable-ciment, beaucoup plus riche en ciment (1/3 de ciment pour 2/3 de sable).

Ces idées furent reprises après quelques décennies plus tard au milieu du XX siècle (1954) par le professeur académicien REHBINDER comme base de ces propres recherches sur le béton de sable, et le mécanisme d'activation par broyage du mélange sable/clinker. Il conclut que le principe physique du phénomène semble être qu'au concassage on libère des surfaces physico-chimiquement actives tant qu'elles sont fraîches, sur lesquelles se fixe le liant, ce qui permet l'utilisation de ce matériau dans de nombreux domaines (chaussées, pistes d'aviation, éléments de remplissage, murs architecturaux, planchers, dalles, etc.)



Fig 1. 11 Aqueduc des eaux de captation de la rivière "La Vanne"[20]

1.4.3 Définition de béton de sable

La norme Française A.F.N.O.R. NF P 18 500 (juin 1995) définit le béton de sable comme suit : "Le béton de sable est un béton fin constitué par un liant hydraulique, un (ou plusieurs) sable(s), des fines et de l'eau; on utilise habituellement un (ou plusieurs) adjuvant(s) et on peut, éventuellement, admettre une quantité de gravillons **[23]**.

Le béton de sable est un matériau constitue principalement de ciment, de sable d'eau et de filler naturel ou industriel. Ce qui distingue le béton de sable du béton ordinaire réside essentiellement dans l'emploi de granulats, le béton traditionnel est généralement constitué d'un granulat 0/16 à 0/22.5, par contre le béton de sable est constitué de granulat de faible diamètre Ø<6mm.

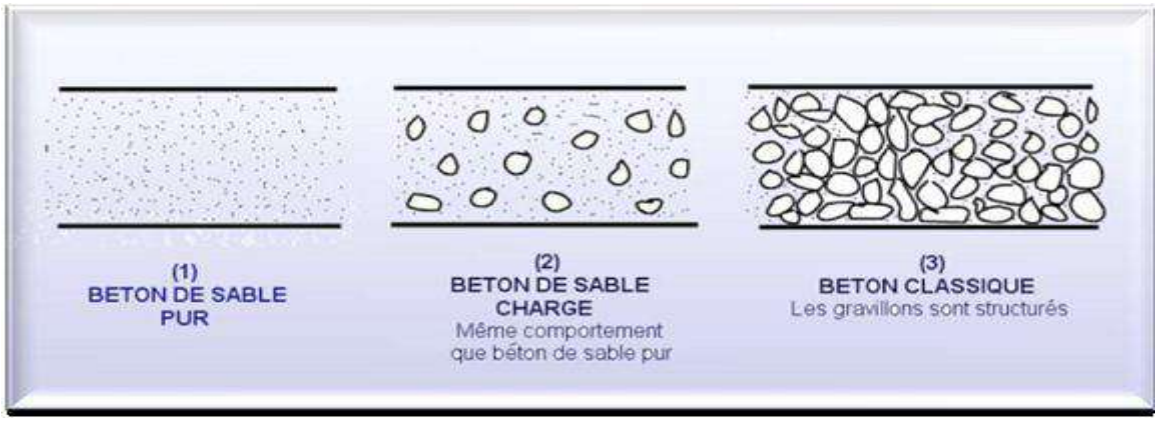


Fig 1. 12 BS, BS chargé et BO **[20]**

- **la différence entre le béton de sable et le mortier**

Le béton de sable comme son nom l'indique est un béton ou le gros granulat est le sable (Dmax= 5mm), il ne consomme que (250 à 400) Kg/m3 de ciment, dosage habituel des bétons classiques, la compacité optimal étant atteinte par un ajout complémentaire de fines (fillers) et de plastifiant, tandis que le mortier utilise un fort dosage en ciment de (400à 600) Kg/m3 **[23]**.

1.4.4 Les composants du béton de sable [19]

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

A. Sables

Par sable on entend tous granulats 0/D conformes aux définitions des normes NF P 18 540etNF P 18-101 il peut s'agir soit d'un sable naturel alluvionnaire ou de ballastière, soit d'un sable de carrière issu du concassage d'une roche massive ou détritique.

Aucun critère granulométrique n'est a priori exigible pour réaliser un béton de sable : on peut aussi bien utiliser un sable fin (même homométrique, type sable de dune) qu'un sable alluvionnaire moyen ou grossier, ou un O/D de concassage. La seule restriction d'emploi des sables réside dans leur propreté.

B. Les fines d'ajout (filler)

La qualité essentielle du béton de façon générale est sa compacité. Les paramètres essentiels qui vont jouer sur la compacité sont **[19]** :

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

L'optimisation de la compacité, en relation avec la granulométrie, obéit à certaines règles.
Le principe est simple : les éléments les plus fins se logent dans les vides des éléments les plus gros ; c'est en quelque sorte le principe des tables gigognes. Et ces fines sont du ciment, puisque la qualité nécessaire de ciment pour assurer la résistance coïncide avec celle qu'il faut en fines pour obtenir la bonne compacité. Cette concordance entre besoin en fines et dosage en ciment se traduit par la règle bien connue de : C =550/ $\sqrt[5]{D}$ ou C =700/$\sqrt[5]{D}$

(selon l'usage du béton). Donnant le dosage minimum en ciment en fonction du diamètre (D) du granulat employé.

Tableau 1. 3 Relation entre la granulométrie et le dosage en ciment **[19]**

Granularité	$\sqrt[5]{D}$	$550/\sqrt[5]{D}$	$700\sqrt[5]{D}$	
0/25	1,904	290	37	**BETON**
0/20	1,821	300	385	
0/16	1,741	315	400	
0/8	1,516	360	460	
0/6,3	1,445	380	480	**MORTIER**
0/4	1,320	415	530	
0/2	1,149	480	610	
0/1	1,000	550	700	

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

Les dosages en fines d'addition seront souvent importants : entre **70** et **220** Kg/m3 et même au-delà. Par voie de conséquence leurs caractères (nature géologique, forme, etc.) vont influer grandement sur les caractéristiques de la formule employée. On peut constater que, à dosage constant en fines d'addition :

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

Nous citerons un type de fines (fillers) que nous allons utiliser Dans notre étude nous allons utiliser un type de fine (filler). Ce mot filler provient de l'anglais « to fil » signifiant remplir, dont le plus gros grain de ces matériaux ne dépasse pas 0.2mm.

L'ajout de fillers permet souvent d'améliorer certaines propriétés du béton à l'état frais (accroissement de la maniabilité, réduction du ressuage…) et du béton durci (diminution de la perméabilité et de la capillarité, réduction des risques de fissuration…) **[24]** .L'effet du filler sur la maniabilité dépend surtout de sa finesse. Si le filler est finement broyé, il y aura réduction de la quantité d'eau pour une maniabilité fixe.

C. Ciments

Comme pour le béton classique, le ciment utilisé pour la confection d'un béton de sable est conforme à la norme NF P 15-301. Le choix du ciment est fait à partir de sa classe de résistance, de ses caractéristiques d'hydratation, de l'agressivité du milieu…et, d'une façon plus générale, de la composition du béton et de l'usage auquel on le destine **[19]**.

D. Eau

L'eau utilisée pour la confection des bétons de sable est conforme à la norme NFP18-303. L'eau efficace comprend, en plus de l'eau de gâchage, une quantité non négligeable d'eau apportée par les additions, adjuvants et autres ajouts, et surtout par les sables.

E. Adjuvants

Les adjuvants sont des agents chimiques qui sont ajoutés en petites quantités pour modifier certaines propriétés du béton comme la rhéologie, la durabilité et les propriétés mécaniques. Il existe beaucoup de types d'adjuvant, on les définit d'après leur action principale, même s'ils ont plusieurs actions secondaires. On utilise dans les bétons de sable les mêmes adjuvants que dans les bétons traditionnels, et pour en exploiter les mêmes propriétés.**[25]-[19]**

F. Autres ajouts

a) Fibres

Elles sont surtout utilisées dans le but de réduire le retrait au premier âge : dosage et nature sont des paramètres très importants pour assurer l'efficacité de cet ajout. On utilise dans la plupart des cas des fibres organiques (polypropylène) pour contrecarrer les effets du retrait de prise et éviter la fissuration qui en résulte. Si l'on veut améliorer la ductilité, on pourra utiliser des fibres d'acier ou des fibres de fonte amorphe. **[19]**

b) Gravillons

On considère qu'un béton de sable peut contenir un certain pourcentage de gravillons et conserver sa domination de béton de sable d'une façon pratique, on pourra considérer qu'on a affaire à un béton de sable tant que le rapport massique G/S (gravillons sur sable) reste inférieur à 0,70. G/S< 0,70 **[19].**

c) Colorants

Les colorants habituellement utilisés dans les bétons traditionnels peuvent également être employés pour certains usages de bétons de sable : ils nécessitent toutefois un soin particulier dans l'homogénéisation et une formulation appropriée du béton de sable pour conserver une stabilité de la teinte au cours du temps **[19]**.

1.4.5 propriétés des bétons de sable

Un concepteur qui retient le béton de sable comme matériau pour un élément de construction a une démarche de « pensée béton », c'est-à-dire qu'il adopte un matériau répondant aux critères qui ont permis le succès du béton, en termes de performances et durabilité, mais aussi d'image et de comportement.

Les propriétés du béton durci sont largement influencées par les propriétés du béton frais, qui sont principalement l'ouvrabilité (maniabilité) et la compacité. La maniabilité dépend non seulement du rapport E/C, mais aussi du module de finesse de sable, et elle dépend surtout du type et de la teneur en fines d'ajouts. Nous avons vu qu'il nécessite plus d'eau qu'un béton classique. D'autre part, il apparaît évident que le mélange ciment- sable présentera une porosité plus élevée que la porosité du béton traditionnel. Cet inconvénient est compensé par l'ajout de fines de bonne nature pour améliorer la compacité. Il faut choisir donc des sables de bonne répartition granulaire. Il s'agit de trouver un compromis entre la maniabilité du béton et sa compacité **[26].**

1.4.5.1 Propriété générale

A. La compacité

La compacité d'un béton est définie comme le volume occupé par les éléments solides rapportés au volume total. Elle est bien sûr complémentaire à la porosité.

Caquot a pu établir expérimentalement une relation mathématique pour un béton entre la porosité d'un empilement granulaire, celui-ci étant caractérisé par un diamètre d des éléments les plus fin et un diamètre D des éléments les plus gros

$$P = P0\ (d / D)\ 0.2$$ **Equation. 1.1 [27]**

P0 : constante expérimentale.

d : diamètre des éléments les plus fin.

D: diamètre des éléments les plus grands.

Notons que la validité de cette équation est limitée aux mélanges dont les proportions de chaque constituant dans l'étendue granulaire (E.G) sont également optimisées en terme de compacité. Autrement dit la compacité optimale ne dépend pas uniquement de l'étendue granulaire, mais également de la répartition granulométrique des grains **[27].**

Rappelons que pour les bétons de sable le diamètre de granulats (D≤5mm), de ce fait, il est évident que le mélange sable- ciment présentera une porosité très élevée en comparaison avec celle d'un béton ordinaire. Cette porosité est due à une augmentation de la surface spécifique, en effet, plus le module de finesse augmente plus la porosité diminue (Figure 1.13) Donc pour garder une compacité maximale la solution la plus facile est d'augmenter le dosage en ciment. Techniquement cette solution n'est pas souhaitable, vu le risque du retrait hydraulique, ainsi que l'élévation du coût global. Dans ces conditions, il est plus que nécessaire l'ajout d'un filler dont la granulométrie est voisine à celle d'un ciment, afin de combler une partie des vides de sable, dans le but de limiter le dosage en ciment.

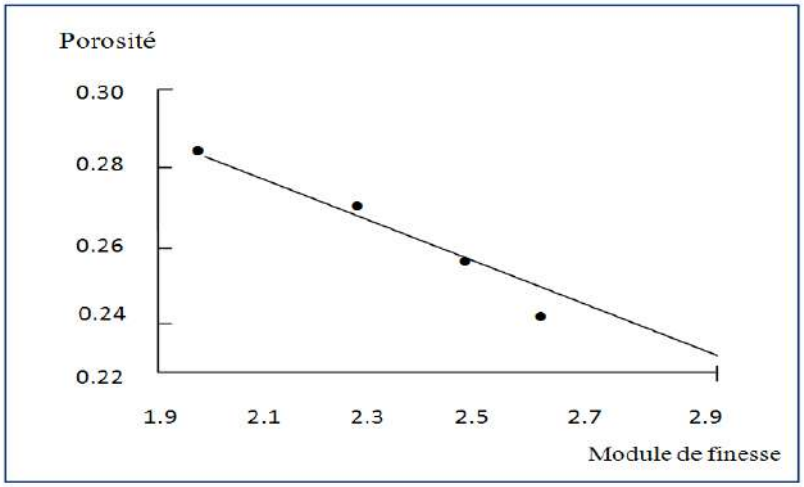


Fig 1. 13 Evolution de la porosité en fonction du module de finesse) **[27]**

- **Effet de la granulométrie du sable sur la compacité**

Plus le sable est poreux plus le besoin en fines est élevé. La porosité dépend de la granulométrie du sable qui elle-même dépend de la nature du sable. A titre d'exemple, le sable alluvionnaire (Dmax =5 mm) nécessite moins de fines que le sable de dune (Dmax<1mm) (fig. 1.14).**[27]**

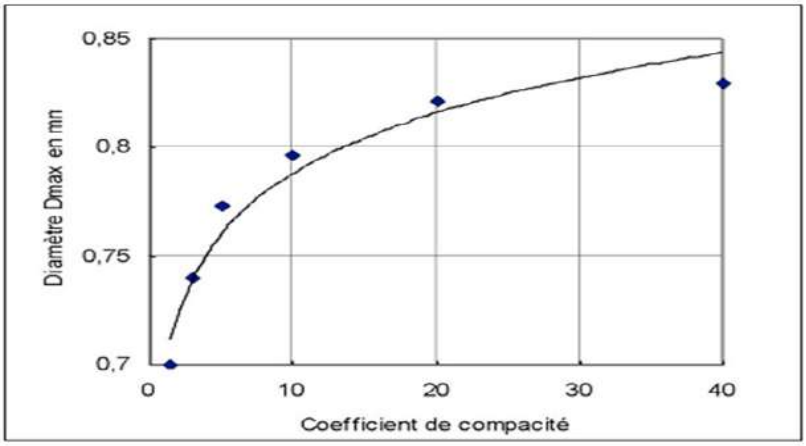


Fig 1. 14 Variation du coefficient de compacité en fonction du diamètre maximal des grains de sable (D_{max}) **[27].**

- **Effet des ajouts de fines**

Généralement, plus le dosage en fines augmente, meilleure est la compacité **[27]** (fig. 1.15). En fonction de la finesse des fines et de la porosité du sable, il existe un dosage optimal à partir duquel la compacité commence à diminuer. Plus la finesse des fines est faible et plus cet optimum est faible **[30].**

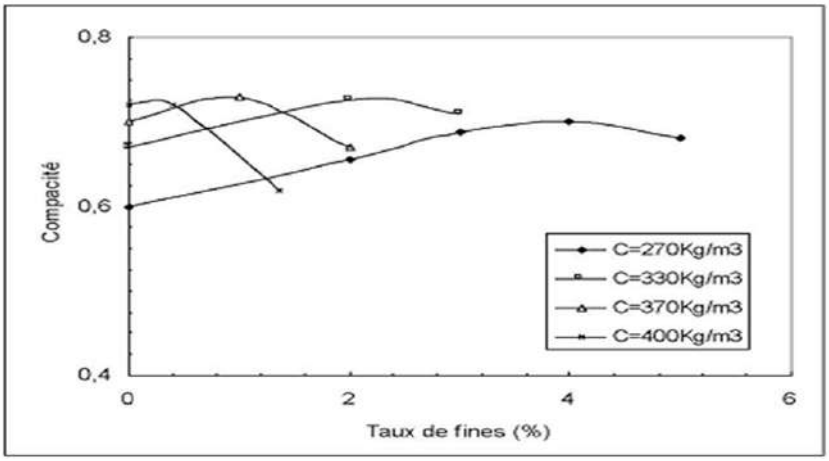


Fig 1. 15 Effet du dosage en filler sur la compacité du béton de sable **[27]**

B. Maniabilité

La maniabilité est une propriété physique spécifique du béton sans tenir compte des conditions particulières d'utilisation pour un type donné d'application. Elle est définie comme étant la propriété d'un mortier ou d'un béton fraîchement malaxé qui définit la facilité et l'homogénéité à être malaxé, mis en place, serré et fini **[27].**

Les bétons de sable demandent une quantité d'eau élevée par rapport aux bétons classiques; ceci se traduit par des valeurs du rapport E/C systématiquement entre 0.6 et 0.7. Cette particularité est due à une surface spécifique plus importante du mélange.

- **Effet de la granulométrie du sable**

A un même dosage en eau, le béton ordinaire est plus maniable qu'un béton de sable. De même, un béton de sable alluvionnaire est plus maniable qu'un béton de sable dunaire.

Ceci explique l'effet du diamètre maximal des grains sur la maniabilité. Plus le diamètre maximal est grand, meilleure est la maniabilité. Si nous parlons en termes de module de finesse, nous pouvons dire que la maniabilité s'améliore avec l'augmentation du module de finesse (Fig.1.16).

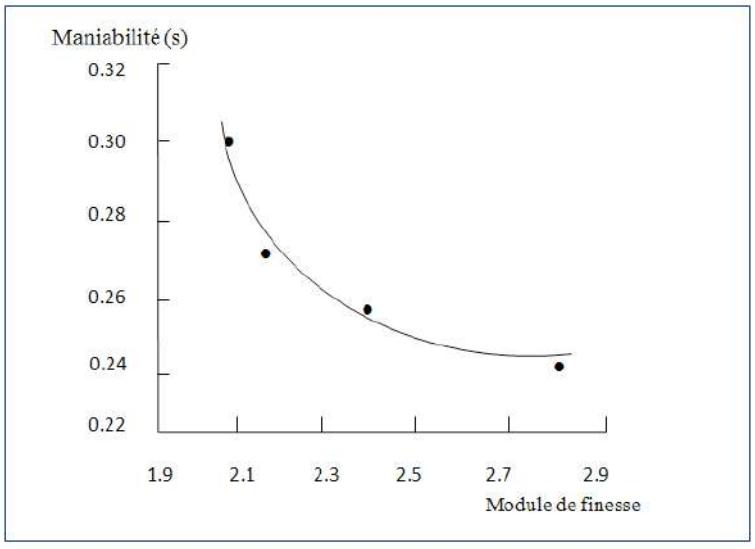


Fig 1. 16 Evolution de la maniabilité en fonction du module de finesse des sables **[28]**

Donc il est clair que plus le module de finesse augmente plus le temps d'écoulement diminue ce qui implique une amélioration de la maniabilité. Pour tester la maniabilité, plusieurs essais

peuvent être appliqués : le Cône d'Abrams (Slump test), l'Essai VEBE, le Maniabilimètre LCPC (ou LCL pour mortiers), etc.

- **Effet des ajouts sur la maniabilité**

En général, selon la granulométrie du sable, le dosage des fines augmente la maniabilité. Pour certains sables, dunaires par exemple, elle diminue au début, mais après un certain optimum elle commence à s'diminué (fig.1.17). La maniabilité dépend aussi de la nature des fines incorporées. Logiquement, de fines de type sphérique devrait rendre plus efficace et donc améliore la maniabilité.

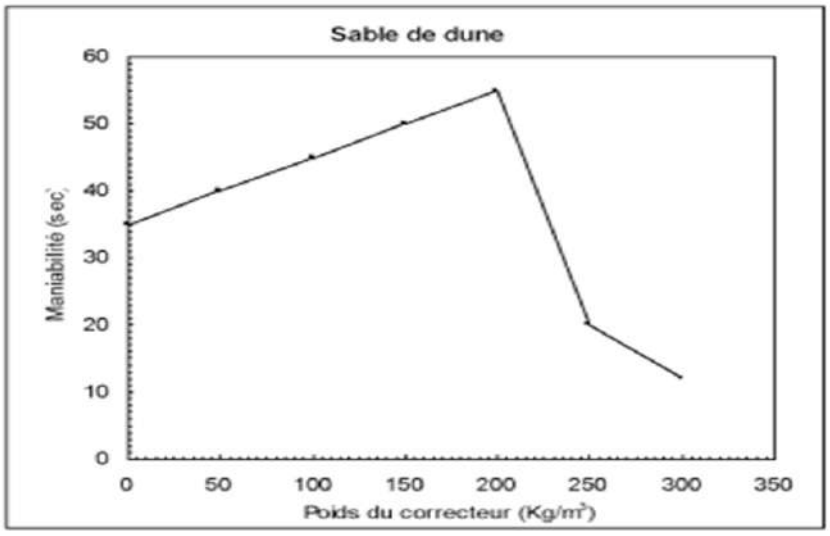


Fig 1. 17 Effet des ajouts sur la maniabilité du béton de sable **[27]**.

- **Effet du rapport E/C**

Comme pour tous les autres bétons, la maniabilité dépend du rapport E/C (ou E/(C+F) pour les bétons de sable). Généralement, l'augmentation de ces rapports augmente considérablement la maniabilité **[27].**

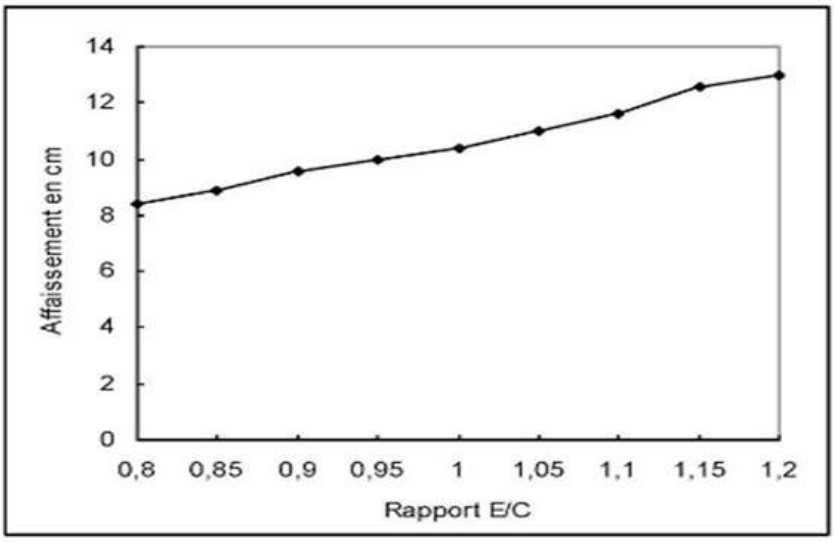


Fig 1. 18 Effet du rapport E/C sur la maniabilité d'un béton de sable dunaire **[27]**.

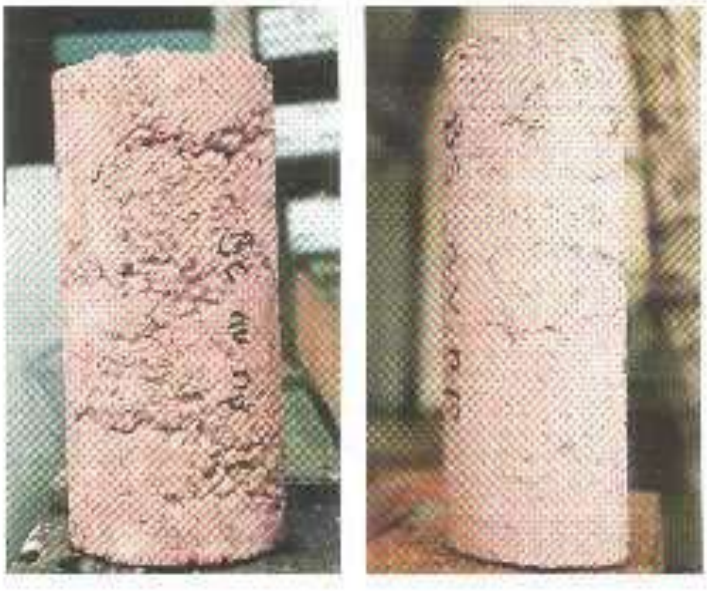
C. Autres propriétés

- **Adhérence aux armatures**

Le béton de sable adhère bien aux armatures. La contrainte d'adhérence moyenne est comparable à celles des bétons traditionnels **[17]**. La granularité du béton de sable n'est pas un élément essentiel puisque à un même niveau de résistance, l'adhérence mesurée pour un béton de sable dunaire (très fin) est supérieure à celle obtenue pour un béton sable alluvionnaire **[19]**. La nature des aciers (lisse ou tors) ainsi que leur diamètre ont aussi une influence sur la valeur de l'adhérence **[18].**

- **Résistance à la ségrégation**

La grande homogénéité et la bonne maniabilité des bétons de sable confèrent un meilleur comportement vis-à-vis des phénomènes de ségrégation que les bétons traditionnels.



a) Béton ordinaire b) Béton de sable

Fig 1. 19 Eprouvettes non vibrées non piquées **[19]**

- **Comportement thermique**

La comparaison entre le béton classique et le béton de sable a montré que les deux n'étaient pas très différents du point de vue thermique. En effet, la chaleur massique est identique. Or la conductivité thermique (variable entre 1,4 et 1,8 Wm^{-1} K^{-1}) du béton de sable est plus faible sachant que sa porosité est plus importante et donc plus isolante .Il faut savoir que même si le béton de sable est plus poreux, la répartition de ces pores ne facilite pas la migration de la vapeur d'eau **[19].**

1.4.5.2 Durabilité

Le béton de sable étant un béton, il se doit être durable, et c'est le cas. En effet, comme un béton classique, les mêmes facteurs influent sur la durabilité : porosité, fissuration, corrosion des armatures, agressions chimiques…etc. C'est de la même façon qu'on y remédie, essentiellement en recherchant la compacité, c'est-à-dire en prenant en compte la granulométrie des constituants et leur complémentarité. Les soins dans la formulation et la fabrication, l'utilisation d'adjuvants appropriés et le respect de quelques règles élémentaires à la mise en oeuvre sont autant de gages pour obtenir des bétons de sable compacts et durables.
Enfin les données sur la durabilité sont encore peu nombreuses, encore que rassurantes on cite souvent des réalisations en béton de sable plus que centenaires aqueduc de la Vanne, phare de Port –Saïd en Egypte, le grand mur de retenue qui domine la place du Trocadéro a Paris, etc. **[19]**

A. L'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 augmente, c'est le cas d'un béton de sable bien compacté.

B. La perméabilité

La perméabilité varie en fonction de la taille des pores et de leurs continuités; de ce fait un matériau ayant un taux de pores élevés, de tailles grandes et continues présente une perméabilité forte, ce qui conduit à une durabilité faible. En suivant cette hypothèse un béton de sable aura une perméabilité moins élevée d'où une durabilité plus forte.

Cette distribution poreuse particulière, observé sur beaucoup de béton de sable optimisé dans le cadre du projet SABLOCRETE, contribue pour une bonne part à leurs bons comportements vis-à-vis des essais de durabilité **[19].**

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 **[19].**

1.4.6 Exemple d'application des bétons de sable

Les BS sont employés à grand échelle dans plusieurs domaines telle que le domaine de préfabrication : bordures et toitures, tuyaux, mobilier urbain, voûtes en voiles minces, caissons de plafond, cloisons et autres éléments constructifs d'immeubles, etc. Et aussi dans le bâtiment, ou le BS consiste a remplacer le BO dans des structures en béton armé coulé et vibré, ou hyper compacté : (éléments horizontaux et verticaux, dalles, fondations etc.). **[28]**

On trouve également des réalisations en béton de sable dans le domaine des chaussées routières et aéroportuaires ainsi que dans des travaux de calage de bourrage ou d'injection, sans oublier le plus important dans notre recherche, son utilisation dans le domaine des réparations. La plupart des applications actuelles du béton de sable tiennent d'avantages à ses

propriétés spécifiques par rapport au béton traditionnel, qu'a l'économie qu'il pourrait représenter en remplaçant celui-ci. **[28]**

Pour mettre en évidence l'utilisation des BS dans la rénovation et réparation des ouvrages, on peut citer quelques exemples d'applications :

- Réhabilitation des silos à grains à Moscou : travaux de rénovation avec ferraillage de surface et une couche de béton de sable en 6 cm d'épaisseur **[29]**
- Réhabilitation d'une réfrigérante centrale thermique de Lynbertsy (banlieue de Moscou) 1975. **[29]**
- Pont de Castagnède sur le salat (construit entre 1862 et 1867) et Pont de Saint Martory (construit entre 1724 et 1727), en France **[28]** : Réparation des deux grands ouvrages d'art en1991, le problème qui s'est posé c'est l'érosion des fondations qui ne reposent plus sur le substratum, alors la réparation se fait en réalisant des corsets et des remplissages parfaits des vides qui comptent de béton de sable.

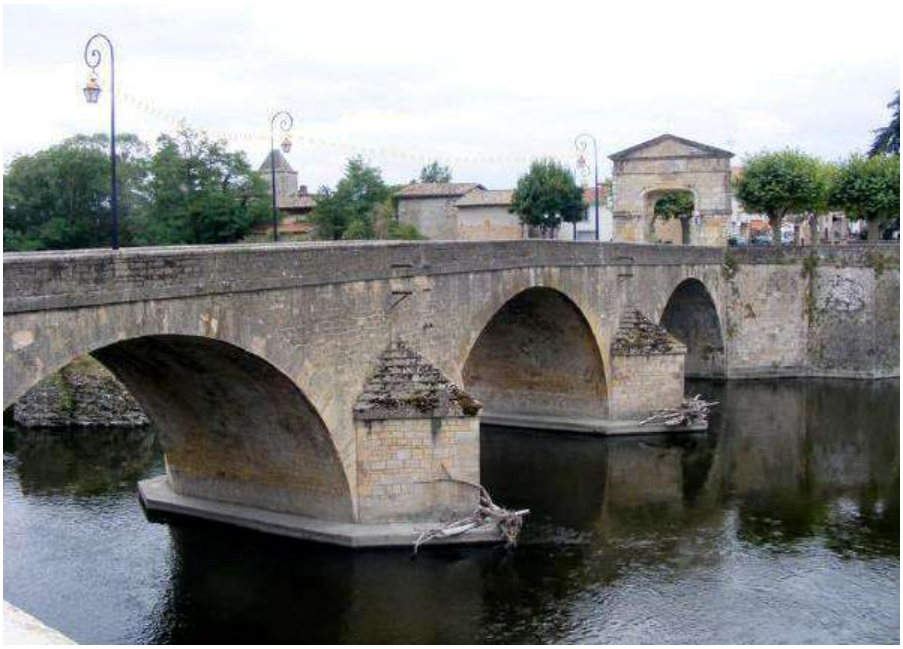


Fig 1. 20 Pont de Saint-Martory .1724 **[20]**

- Réhabilitation structurante d'un collecteur encombré Agrippa d'Aubigné de la ville Paris. **[19]**
- Réhabilitation structurante d'un collecteur fortement dégradé Naujaede la ville Bordeaux. **[19]**
- Réfection de l'habillage d'un talus abrupt en bordure d'une autoroute urbaine (A10, Lormont (France).) **[19]**
- Réhabilitation d'une buse métallique : RN 89, ARTIGUES près de bordeaux. **[19]**

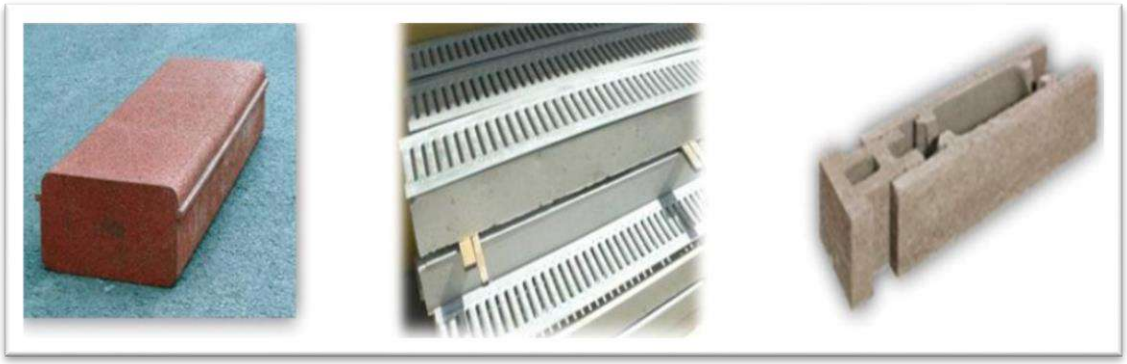


Fig 1. 21 Les éléments préfabriqués en béton de sable



Fig 1. 22 Domaine d'application de béton de sable

1.4.7 Formulations des bétons de sable

1.4.7.1 Définition

Le but de la formulation d'un béton de sable est de trouver les proportions des différents constituants, à fin de réaliser un béton optimisé dans son squelette granulaire et dont les qualités sont celles qui répondent aux critères techniques et économiques.

Ainsi toutes les méthodes de formulation des bétons ne relèvent pas d'une science exacte, c'est pourquoi une étude théorique ne conduit qu'à une approche du problème.

Une étude expérimentale basée sur la réalisation des gâchées successives permettra d'adapter et de corriger la formulation théorique.

A ce titre il y a lieu de présenter deux types de formulations, résistance mécanique. La maniabilité qui est la facilité de la mise en œuvre **[30]**.

1.4.7.2 Approche théorique d'une formulation d'un béton de sable

Les agrégats d'un béton jouent un rôle d'ossature et la pâte (généralement le ciment avec l'eau) assure, dans un premier temps, la cohésion et l'écoulement, puis joue le rôle d'une colle liant les agrégats et donnant une certaine durabilité au matériau durci.

Le premier problème qui se pose lors d'une formulation d'un béton est la compacité du squelette granulaire définie comme le rapport du volume des constituants solides sur le volume total du mélange ; il faut assurer au mélange une compacité maximale et donc diminuer au maximum la porosité.

Cependant la détermination de cette compacité maximale n'est pas facile et fait l'objet de modélisation poussée. Caquot **[31]** a pu établir à partir des données expérimentales une relation mathématique reliant le volume des vides d'un mélange granulaire présentant une compacité maximale et son étendue granulaire (d/Dmax).
Pour ce mélange optimisé la relation de Caquot s'écrit comme suit **[19]** :

$$V = V0\ (d\ /Dmax)^{1/5}$$ **Equation. 1.2 [19]**

Avec :

V : Volume des vides du mélange granulaire;
V0 : Constante expérimentale comprise entre 0,7 et 0,8;
d: La dimension du plus petit grain de l'étendue granulaire;
Dmax : La dimension du plus gros grain de l'étendue granulaire.

Cette formule a innové le domaine de formulation des bétons et elle est à la base de nombreuses méthodes utilisées telles que l'approche de Faury, Bolomey, Dreux, etc. Elle trouve aussi son application aux bétons de sable pour la détermination des différents dosages des constituants, tout en faisant quelques adaptations à ce cas précis.

1.4.7.3 Dosage en fines d'un béton de sable

Dans le but d'optimiser la compacité du béton de sable, les constituants du mélange sont séparés en deux fractions :
Les éléments fins qui regroupent tous les grains de taille inférieure à 80 μm et qui sont le ciment, les fines d'ajout et une fraction du sable.
Toute l'étendue du sable comprise entre 80 μm et le diamètre maximal du sable Dmax, ainsi que l'éventuelle fraction des éléments supérieurs à 80 μm. provenant des fines d'ajout. En faisant cette distinction entre les fines incluant les éléments inférieurs à 80 μm et l'étendue du sable comprise entre 80 μm et le diamètre maximal, la porosité du sable peut être calculée selon la formule précédente de Caquot :

$$Ps = V = 0.75\ (0.08/D)^{1/5}$$ **Equation. 1.3 [30]**

Ps(V) : Porosité du sable d'étendue 80 μm et Dmax ;

Un dosage optimal en fines d'ajout sert à compléter l'étendue granulaire bornée inférieurement par la coupure 80 μm, et à combler la porosité du sable ainsi calculée. En effet, il est impossible de prendre en compte la distribution de la taille pour les fines d'ajout car l'assemblage géométrique relève surtout des forces électriques inter-granulaires.

En apportant quelques simplifications, Caquot s'est rendu compte que le volume de l'ensemble des particules fines (< 80 μm) et le volume des vides associé a l'empilement de ces fines sont égaux, autrement dit le volume des vides restant dans le mélange est égal au volume de l'ensemble des fines d'ajout. Il suffit de combiner les deux résultats précédents de Caquot pour en déduire que le dosage volumique optimal en fines d'ajout est la moitié de la porosité du sable et que l'autre moitié correspond à la porosité minimale résiduelle.**[30]**

[Fines] = 0.38 (0.08/Dmax)1/5 **Equation. 1.4 [30]**

Cette dernière formule montre que le dosage en fines dépend surtout de la dimension du plus gros grain, il apparaît très clair que plus le diamètre maximum diminue plus le dosage en fines augmente.

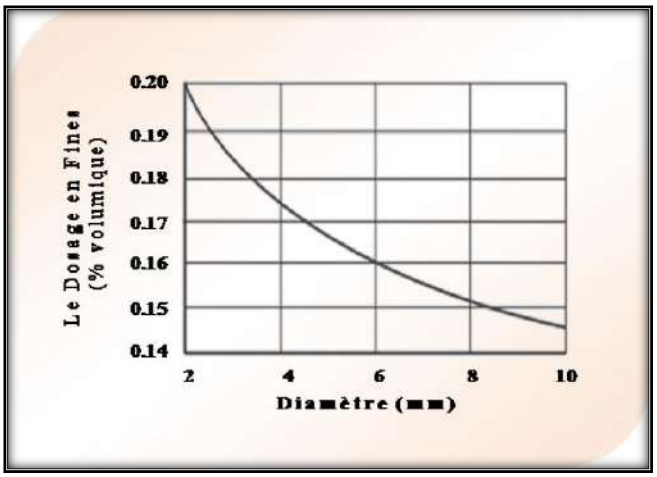


Fig 1. 23 Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fibres **[19].**

1.4.7.4 Dosage en eau d'un béton de sable

Après optimisation du squelette granulaire, la compacité maximale conduisant à une porosité minimale ne sera atteinte que si la consistance le permet ; pour cela d'autres travaux de Caquot sur la compacité ont abouti à une autre relation à partir de la relation de base, en

admettant que la porosité du squelette granulaire se décompose en la somme d'un volume d'eau et d'un volume de vide piégé notés respectivement e et v. **[32]**

$$(e + v)_{min} = 0.8\left(\frac{d}{Dmax}\right) \qquad \textbf{Equation. 1.5 [32]}$$

Cette formule exige la connaissance de la plus petite dimension de l'étendue granulaire du mélange(d). L'estimation de cette valeur dans le cas d'un mélange totalement dé floculé (chaque particule élémentaire agit indépendamment) est donnée par la formule suivante :

$$d = (60 / (f))\ mm \times \rho \qquad \textbf{Equation. 1.6 [32]}$$

Avec:

f: surface spécifique exprimée en cm2/g du constituant.

$\boldsymbol{\rho}$: Densité du constituant exprimée en g/cm3.

C'est la moyenne harmonique de la dimension des grains les plus fins du constituant assimilés à des sphères. Cette définition de (d) ne peut pas être retenue pour les mélanges floculés :

La dimension des flocs relevant des considérations physico-chimiques très complexes. Un ordre de grandeur peut être avancé de l'ordre de 20 à 25 μm pour le diamètre ; ainsi l'élargissement de l'étendue est la seule solution pour la réduction de la porosité théorique minimale et comme la figure I.24 le montre que la porosité minimale d'un mélange granulaire varie considérablement avec son étendue granulaire, mais cette porosité est décomposée en un volume d'eau (e) et un volume de vides (v). En pratique, confectionner un béton avec les strictes quantités d'eau conduit à une mauvaise ouvrabilité.

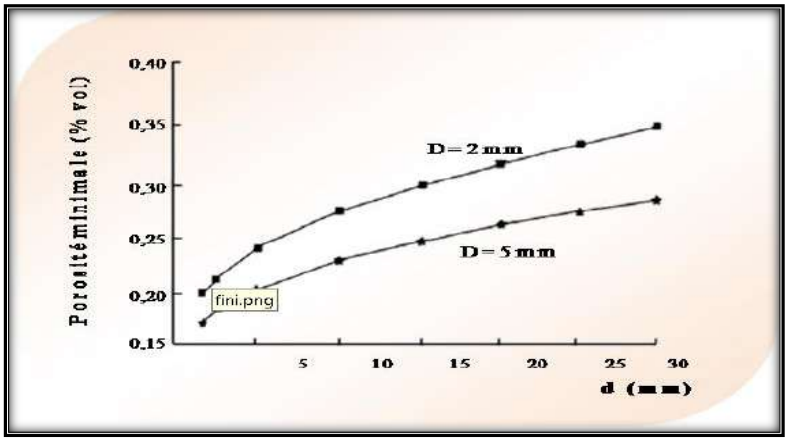


Fig 1. 24 Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton Pour deux tailles du sable **[19]**

On remarque que la porosité minimale d'un mélange granulaire varie considérablement avec son étendue granulaire, mais cette porosité est décomposée en un volume d'eau (e) et un volume de vides (v).

En pratique, confectionner un béton avec les strictes quantités d'eau conduit à une mauvaise ouvrabilité la figure I.25 nous montre la relation entre l'ouvrabilité et le dosage en eau.

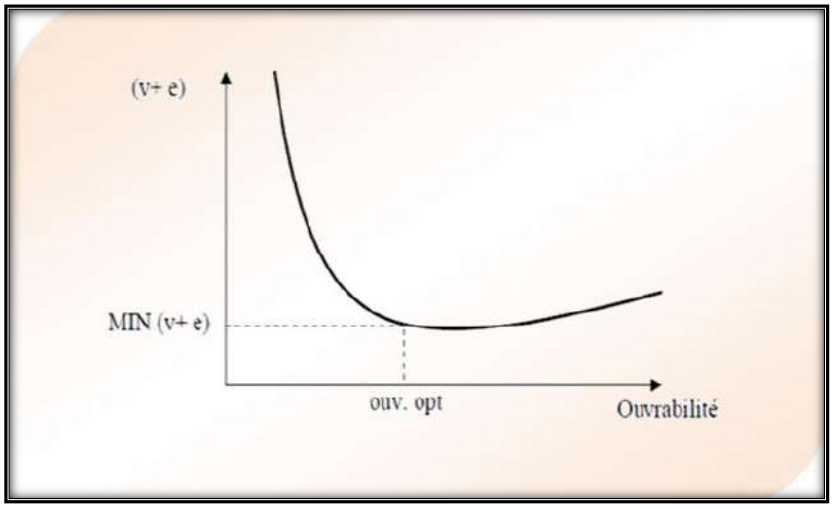


Fig 1. 25 Relation entre l'ouvrabilité et le dosage (e + v) d'une matrice Pour mise en œuvre donnée **[30]**

L'expérience montre que pour des quantités d'eau inférieures à la quantité d'eau permettant d'obtenir l'ouvrabilité optimale, le mélange piègera une forte quantité d'air quelques soient les moyens de serrage utilisés, et par suite une porosité (e+v) supérieure à (e+v)min, alors pour des quantités d'eau supérieures à celle qui donne l'ouvrabilité optimale, la quantité d'air piégée reste stable et l'ouvrabilité augmente de façon linéaire.

Finalement, pour estimer le dosage en eau, il faut préalablement évaluer la quantité d'air piégée. Dans les bétons de sable cette quantité est légèrement supérieure à celle des bétons ordinaires et la formule qui suit conduit à des teneurs en air de l'ordre de 3 à 5%.

[Vides] = K [eau] **Equation. 1.7 [30]**

Avec :

K : constante comprise entre 0.2 et 0.25.

1.4.7.5 Dosage en sable

Afin de compléter un volume unitaire de béton de sable, (1m3), de la formulation, le dosage en sable est obtenu en faisant soustraire au mètre cube du mélange les dosages estimés précédemment des autres constituants (fines, eau, vide). **[17]**

[Sable] = 1000 - [Fines] - [eau] - [Vide] (l/m3) **Equation. 1.8 [17]**

Il reste à noter que le volume du sable ainsi calculé regroupe toutes les particules de taille supérieure à 80µm, soit du sable, soit de la fraction des fines d'addition. **[17]**

1.4.7.6 Estimation de la résistance en compression

Après avoir optimisé la compacité et déterminé les différentes proportions des constituants, il est jugé nécessaire d'évaluer la résistance à la compression de ce mélange. Pour ce faire, comme tous les autres mélanges à base de ciment, les méthodes classiques sont adaptées. Ces méthodes faisant intervenir la contribution de tous les paramètres influant sur la résistance : le squelette granulaire, la nature des liants, et les dosages des constituants de la pâte.
Dans le cas de bétons formulés avec des fines potentiellement réactives, une généralisation de la formule de FERET **[27]** a été proposée récemment.

$$R_b = \frac{k_f \times R_c}{\left(1 + \frac{3,1\,(e+v)}{c\,(1+k_1+k_2)}\right)^2}$$ **Equation. 1.9 [27]**

Avec :

Kf : coefficient granulaire compris entre 4.5 et 5;

Rc : classe vraie du ciment (MPa) ;

E : dosage en eau total (l/m3) ;

V : air piégé (l/m3) ;

C : dosage en ciment (kg/m3) ;

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

Avec :

K1 = Kcv (CV/C) + Kfs (FS/C) ; 0.2 > Kcv < 0.4 2 <Kf s< 3.3 K1 ≤ 0.5.

K2 = Kfil (Fil/C) ;0 < Kfil ≤ 0.4 K1<0.2.

K1 : coefficient pouzzolanique.

K2 : coefficient d'activité du filler calcaire. (Voir figure 1.26).

Kcv , Kfs , **Kfill**: coefficients d'équivalence en ciment des différentes additions en fines.

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

Cette formule ne peut être utilisée que par une identification précise de l'activité des additions par l'intermédiaire des coefficients déjà mentionnés. Les valeurs données pour les différents coefficients d'activité ont, ici, un caractère essentiellement indicatif, d'autres additions peuvent être également utilisées, telles que les fines siliceuses généralement considérées

inertes et les fines de laitier qui peuvent présenter un caractère hydraulique non pris en compte dans la formule précédente **[31]**, alors que d'autres paramètres pourraient influer sur l'activité liante des fillers telles que la répartition granulaire, la forme des grains, et leur porosité. Le problème revient à résoudre le système de deux équations simples.

- Dosage en ciment + dosage en fines d'ajout = dosage en fines.
- Dosage en fines d'ajout / dosage en ciment = optimum d'activité.

Il en résulte de tout ce qui précède que cette formulation théorique simple et performante donne la possibilité au formulation de jouer sur certains paramètres en restant à la compacité maximale, elle constitue une bonne base pour la mise au point d'une formulation de béton de sable.

Tout de même elle ne peut être utilisée que dans un cadre limité, ceci est dû aux nombreuses hypothèses qui la jalonnent, c'est aussi pour ça que cette approche ne sera acceptée qu'après passage à l'expérience qui la confirme ou l'ajuste.

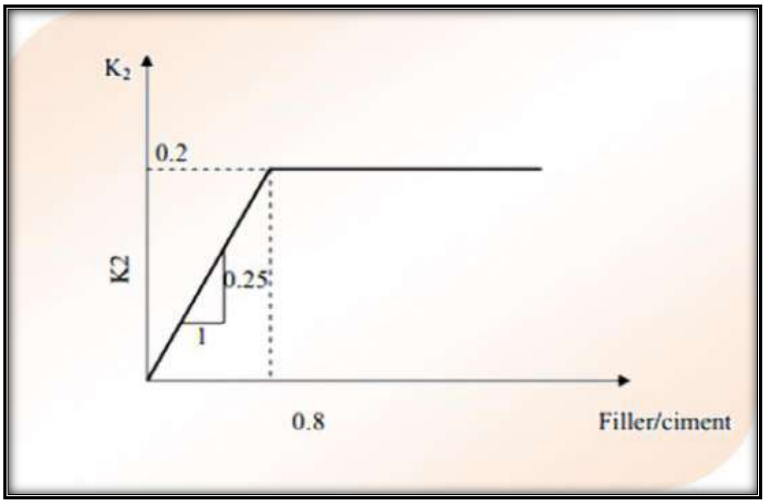


Fig 1. 26 Coefficient d'activité du filler calcaire (modèle) **[30].**

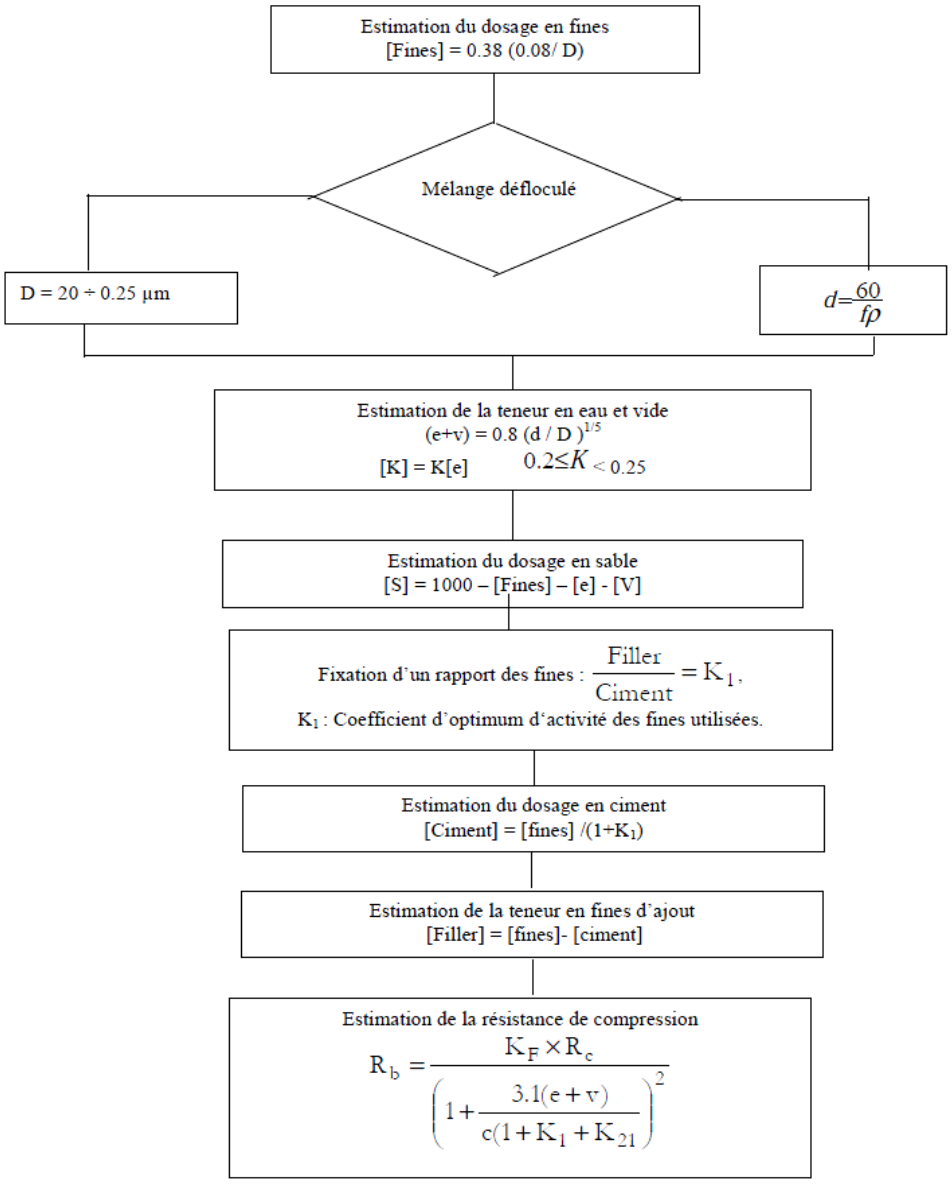


Fig 1. 27 Organigramme de la méthode théorique.

1.4.8 Méthode expérimentale de formulation

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

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

Cette méthode est une adaptation de la méthode dite BARON-LESAGE, elle est itérative et est basée sur la réalisation de gâchées légères. Les gâchées sont caractérisées par des mesures de la maniabilité, au maniabilimètre à mortier LCL, et de la masse volumique apparente.

Diverses formulations de bétons de sable ont déjà été réalisées par cette méthode, on cite à titre d'exemple : le béton de pieux, le béton routier, le béton de projection etc, et ont donné pleine satisfaction **[19]**.

1.4.8.1 Les différentes étapes de la formulation

1.4.8.1.1 Détermination d'une formule de base sans fines d'addition

Dans cette partie de la méthode, nous chercherons à déterminer une formule de un mètre cube, constituée de ciment, d'eau, de sable et d'adjuvants, ayant une maniabilité adéquate. **[30]**

1.4.8.1.2 Dosage en ciment

Les prescriptions contractuelles ou normatives imposent très souvent un dosage minimum en ciment par mètre cube de béton, en fonction du type d'ouvrage ou bien de l'agressivité du milieu. On choisit donc de travailler avec un dosage en ciment fixé qui ne variera pas tout au long de l'étude, on le note C (Kg/m3).

1.4.8.1.3 Dosage en eau

A ce stade de la méthode, une valeur approximative du dosage en eau, E (l/m3), suffit. Pour estimer ce dosage, les praticiens s'appuient sur l'expérience. Par exemple, on peut prendre 220 litres d'eau pour 350 Kg de ciment, et 250 litres pour 400 Kg de ciment.

1.4.8.1.4 Détermination du dosage en sable

Dans cette formule, il faut introduire un fluidifiant réducteur d'eau, au dosage préconisé par le fabricant (N% du poids des éléments inférieurs à 80 μm en extrait sec), qui permettra de dé floculer les fines. D'autre part, un béton contient toujours un volume d'air, Vair, la teneur en air des bétons de sable est toujours supérieure à celle des bétons ordinaires et se situe entre 5 et 7 % de volume du béton. Les quantités de ciment, d'eau, d'adjuvant et d'air sont connues, nous devons donc compléter la formule par du sable de manière à obtenir un mètre cube de béton ; on aboutit à la relation suivante :

Vair + VC +VE + Vadj + Vsable = 1000 (En litres) **Equation. 1.10**

Les masses volumiques des constituants du béton sont connues, alors, on peut connaître la masse de sable pour une formule d'un mètre cube du béton S (Kg/m3). **[30]**

1.4.8.1.5 Réglage de la maniabilité et du rendement de la formule

Lorsqu'on fait la confection de la formule initiale du béton, et la détermination de : La valeur du temps d'écoulement 't' au maniabilimètre à mortier LCL.
La masse volumique apparente réelle du béton (MVAR), cette formule doit être corrigée à l'aide de l'équation itérative suivante :

$s_i = s_{i-1} - (MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1}) \pm MV\ sable$ **Equation. 1.11**

Tel que : MVAT et MVAR représentent respectivement la masse volumique apparente théorique et la masse volumique apparente réelle du béton.

Si le temps d'écoulement au maniabilimètre est inférieur à la valeur visée il faut retrancher un volume V d'eau (+V dans l'équation) ; si le temps d'écoulement est supérieur, il faudra rajouter un volume V d'eau de manière à rendre le béton plus maniable (-V dans l'équation).
Après chaque correction, la masse volumique apparente théorique devra être comparée à la masse volumique apparente réelle. **[30]**

1.4.8.1.6 Détermination du dosage en fines d'addition

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

Notre objectif, est d'obtenir une formule de un mètre cube dans laquelle la masse volumique apparente théorique tend vers la masse volumique apparente réelle, et un temps d'écoulement adéquat.

Pour chaque gâchée, on détermine la maniabilité ainsi que la masse volumique apparente réelle (MVAR) que l'on compare à la masse volumique apparente théorique (MVAT) de la formule. **[30]**

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

$$\mathbf{S}i = S(i-1) - (MVAT\ i-1 - MVAR\ i-1) \qquad \textbf{Equation. 1.12}$$

Comme exemple pratique sur cette méthode de formulation, une étude de formulation de béton de sable effectuée au LRPC de Bordeaux.

Dans cette étude, trois différentes fines d'addition ont été utilisées :

- **Fine d'addition N°1** : Son utilisation conduit à une maniabilité optimale entre 150 et 180 Kg/m3 de fines. Figures 1.28, 1.29.
- **Fine d'addition N°2** : Dans sa plage de dosage (0 à 240 Kg/m3) il n'y pas d'optimum de maniabilité et masse volumique, l'optimum doit exister pour des dosages supérieurs.
- **Fine d'addition N°3** : Son optimum de maniabilité et de masse volumique est compris entre 60 et 90 Kg/m3 de fines en fines d'addition.

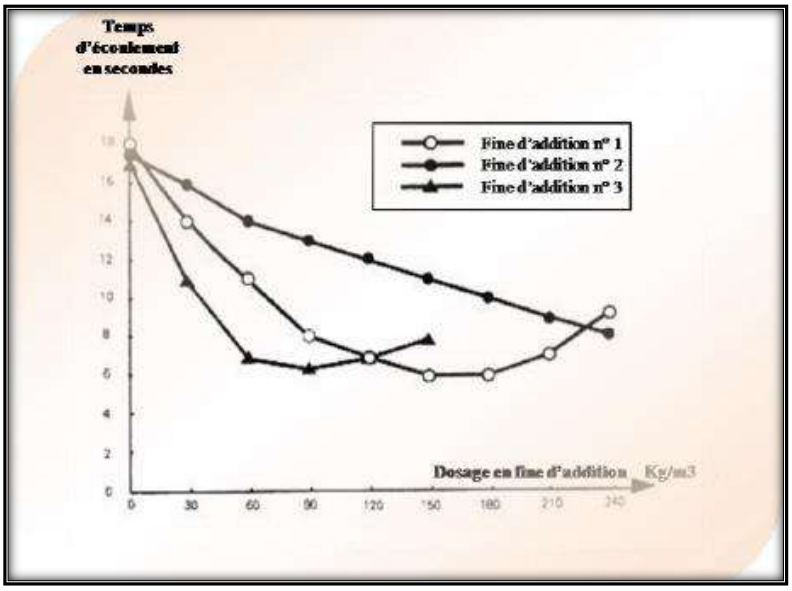


Fig 1. 28 Evolution de la maniabilité en fonction du dosage en fine d'addition **[30].**

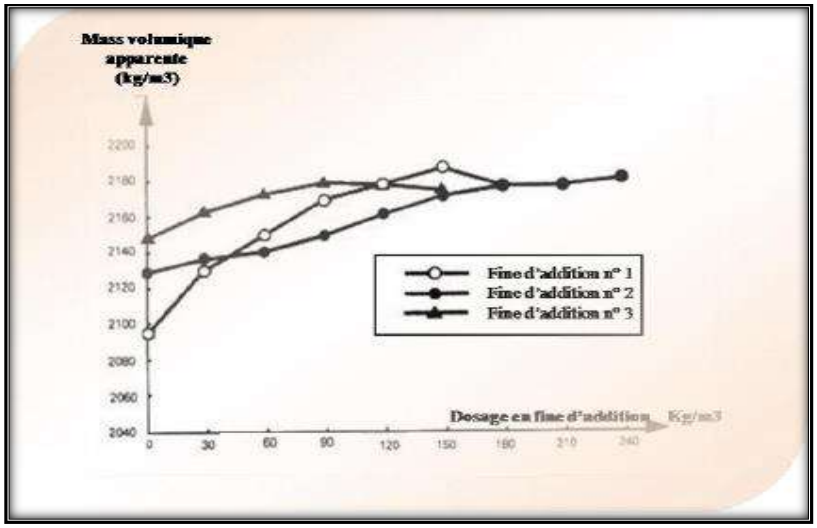


Fig 1. 29 Masse volumique apparente en fonction du dosage en fine d'addition **[30]**

1.5 BETON AUTOPLAÇANT

1.5.1 Définition

De nombreux termes définissent ce béton : béton auto-nivelant, béton auto-compactant (SCC en anglais), ou béton hyper fluide. Cependant, l'appellation la plus utilisée aujourd'hui dans le domaine de construction est béton autoplaçant.

Par béton autoplaçant on désigne des bétons très fluides, très déformable, homogènes et stables, mis œuvre sans vibration (la compaction des BAP s'effectue par le seul effet gravitaire) tout en développant une bonne compacité sans exiger une main d'œuvre spécialisée durant la consolidation, dont le prix devient de plus en plus élevé. Ils épousent parfaitement les formes des coffrages les plus complexes et étroits ayant un pourcentage élevé d'armatures, grâce à leur bonne uniformité une fois mis en place, ils ne doivent pas subir de ségrégation et doivent présenter et conférer à la structure des qualités comparables à celles d'un béton vibré classique, ces propriétés contribuent à assurer un béton durable et de qualité.

Selon la densité du ferraillage et la complexité des éléments structuraux, le besoin de vibration peut diminuer considérablement et même être éliminé, ce qui représente une économie de main d'œuvre considérable et réduit de façon très importante les nuisances sonores **[33].**

La fluidité des bétons autoplaçant est due à une quantité de fine élevée et à l'utilisation des superplastifiants. Ces adjuvants spécifiques issus de technologie moléculaire récente

permettent de réduire de manière importante le volume d'eau, tout en conférant au béton autoplaçant une importante fluidité, ils assurent aussi le maintient de l'ouvrabilité du béton durant un temps déterminé. Une nouvelle famille d'adjuvants, appelés agents de viscosité, entre également parfois dans la formulation des BAP qui vont donner une viscosité à la pâte **[34].**

Tout ces adjuvants ont un rôle primordial dans la formulation des BAP, en adéquation avec la formulation des différents composants du béton (quantité importante d'éléments fins, squelette granulaire adapté…) afin d'éviter toute ségrégation. Par conséquent, ce qui distingue essentiellement le béton autoplaçant des autres c'est sa fluidité élevée et la résistance à la ségrégation **[35].**

Les BAP se distinguent donc principalement des bétons dits ordinaires (B.O), ou bétons à vibrer, par leurs propriétés à l'état frais. Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique) **[33].**

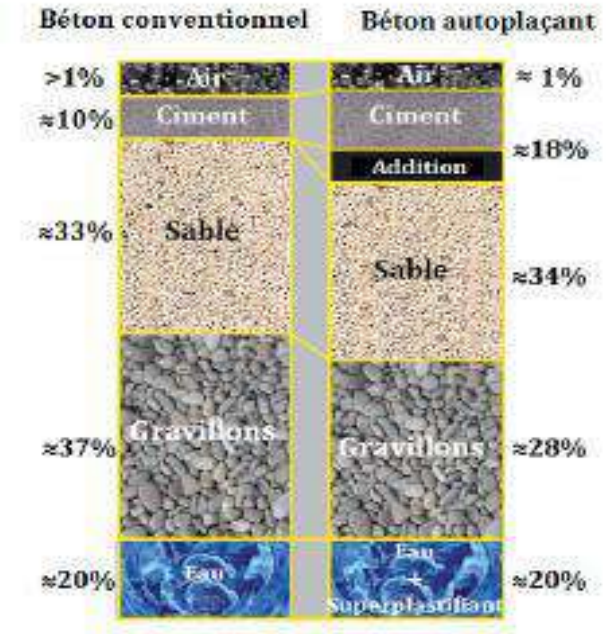


Fig 1. 30 Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP.

L'utilisation du béton autoplaçant dans un chantier est une réponse adaptée à plus d'un titre : réponse technique (densité d'armature, remplissage des coffrages complexes), réponse esthétique (qualité de parement, uniformité de teinte) et réponse économique, qu'il s'agisse de

délais à respecter ou d'amélioration des conditions de travail. Cette dernière réponse apportée à différentes contraintes de chantier fait du béton autoplaçant un béton considéré comme un béton universel, un béton pour tous **[36].**

1.5.2 Historique

Béton autoplaçant ou autocompactant, ce type de béton a été proposé par OKAMURA en 1986 **[37].** Le premier prototype a été accompli en 1988 en utilisant des matériaux disponibles sur le marché Japonais. Ce béton a été appelé *"Béton à Haute Performance"* et a été défini en trois états comme suit **[38] :**

- **Etat frais :** autoplaçant.
- **Etat durci** : protection contre des facteurs externes.

Presque en même temps, le béton à haute performance a été défini par le professeur AITCIN, comme un béton à durabilité élevée due au faible rapport eau/ciment, depuis le béton à haute performance a été répandu autour du monde pour ce référer aux bétons à durabilité élevée. Par conséquent, OKAMURA a changé le nom du béton proposé par "Béton Autoplaçant à Haute Performance" **[38]**.

Le premier article sur le béton autoplaçant a été publié en 1989 par OZAWA **[38] [39]**, et en 1992 OZAWA et d'autres collègues ont présenté un papier sur ce sujet à une conférence internationale de béton tenu à Istanbul **[40]**. Cette présentation a accéléré l'intérêt international pour le béton autoplaçant.

En 1998 le premier atelier international sur le béton autoplaçant été tenu à Kochi au Japon. A travers les efforts de Ozawa et ses collègues une recherche plus intensive prospérée, particulièrement à de grandes compagnies de construction en Asie et en conséquence le béton autoplaçant été employé pour la réalisation de plusieurs structures comme des ponts, tunnels, bâtiments, etc. **[39]**

Avantages techniques :

- Facilité et rapidité dans la mise en oeuvre du béton (coulage en un seul point, augmentation du débit de béton pompé).
- Bétonnage en milieux fortement ferraillés.
- Amélioration de la qualité des parements et de l'enrobage des aciers.

- Réalisation d'éléments de forme plus complexe. **[41]**

Avantages socio-économiques :

- Réduction du coût de la main d'oeuvre.
- Absence de systèmes de vibration (intérieurs ou extérieurs) réduisant ainsi les coûts et les nuisances sonores dans et au voisinage du chantier.
- Réduction du temps de bétonnage et des besoins de ragréage.

Toutefois, certains points restent à surveiller dans l'utilisation du béton autoplaçant :

- Augmentation du coût des matières premières, par la présence des nouveaux adjuvants, et des différentes additions minérales.
- Compatibilité des matériaux.
- Etanchéité des coffrages. **[41]**

1.5.3 composants de BAP

- **Ciment**

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière minérale finement moulue qui, mélangée avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite du processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium. Dans les ciments, les aluminates peuvent également intervenir dans le processus de durcissement.

Le ciment est constitué principalement de clinker Portland (K) qui est un matériau hydraulique. Il est obtenu à partir de la cuisson à haute température, supérieure à 1450°C, d'un mélange approprié de calcaire et d'argile en proportion moyenne de 80% et 20% **[42].** Le ciment peut être constitué aussi de laitier de haut fourneau (S), de pouzzolane naturelle (Z), de cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W), de fumée de silice (D), de calcaire (L), de schistes calcinés (T), de constituants secondaires, de sulfate de calcium (gypse, hémihydrates, anhydrite) et d'additifs.

Le ciment généralement utilisé pour la confection d'un béton autoplaçant est soit le ciment Portland CPA-CEM I 42,5 qui contient au moins 95 % de clinker et éventuellement un

constituant secondaire, soit le ciment Portland composé CPA-CEM II/A et B 42,5 dont ‘apport en clinker est de 65 à 94 %, le reste étant composé d’un ou de plusieurs ajouts.

- **Granulats**

Selon leur origine, on distingue les granulats roulés, extraits de ballastières naturelles ou dragués en rivière ou en mer, et concassés, obtenus à partir de roches exploitées en carrière.
La fluidité d’un béton autoplaçant est contrôlée par l’état de contrainte entre les particules qui le constituent. En effet, pour que le béton s’écoule bien, il est primordial de réduire les frictions et les frottements existants entre les particules solides (gravier, sable, additions minérales, liant) qui génèrent des contraintes empêchant l’écoulement. L’utilisation de granulats roulés (de forme plus ou moins sphérique) peut être avantageuse lorsqu’on désire réduire les frictions entre les granulats **[44].** Le volume des gros granulats dans le béton est l’un des facteurs les plus importants à prendre en considération. Afin d’empêcher tout risque de blocage du béton par les barres d’armature lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 16mm.L’expérience a néanmoins montré qu’il était également possible d’utiliser des granulats de diamètre différent **[45].**De plus la proportion des gravillons par rapport au sable est plus faible qu’avec un béton ordinaire, afin de permettre l’écoulement du matériau dans les zones confinées, leur volume est limité et le rapport gravillon/sable (G/S) est proche de 1 **[46].**

- **Additions minérales**

Les BAP sont caractérisés par une fluidité importante et surtout une diminution de la ségrégation et du ressuage. Pour obtenir ces propriétés, on ajoute de fortes teneurs en ajouts minéraux.
Ce sont des matériaux finement broyés tels que le laitier de haut fourneau, la fumée de silice, les cendres volantes qui viennent principalement de l’industrie. Ces fines présentent des avantages dans l’industrie (la diminution de l’émission du CO2) et des avantages dans la formulation des bétons.

Les ajouts minéraux substituant le ciment peuvent être classés en fines pouzzolaniques telles que la fumée de silice et la pouzzolane et fines inertes telles que le calcaire.
Une autre classification est basée sur la source de chaque produit d’où on trouve :

Les produits artificiels :

- le laitier des Hauts Fourneaux
- Les cendres volantes,
- La fumée de silice,
- L'argile calcinée (méta kaolin)
- Les déchets d'incinération
- Les déchets de briques concassée
- Les produits naturels :
- La pouzzolane naturelle (cendres volcaniques, scories)
- Le calcaire
- L'argile opaline
- Les additions siliceuses (sable)

- **Adjuvants**

On appelle adjuvant, tout ingrédient autre que le ciment, les granulats et l'eau, que l'on ajoute au mélange. Ce sont le plus souvent des polymères de synthèse au poids moléculaire assez élevé (20000 –30000 gr) **[46].**

Les adjuvants sont des produits chimiques solubles dans l'eau, ajoutés à moins de 5% du poids du ciment, au moment du malaxage des mortiers et bétons ou à leur surface lorsqu'ils sont frais, afin d'améliorer certains propriétés, en modifiant principalement :

- Les solubilités
- Les vitesses de dissolution
- L'hydratation des divers constituants d'un liant hydraulique

Depuis 1960, les superplastifiants se multiplient et se diversifient par leurs qualités et leurs constantes de qualité qui s'améliorent sans cesse.

- **Eau**

L'eau utilisée pour la formulation du béton ne doit pas présenter un excès d'impuretés qui peuvent détériorer les propriétés des bétons (résistance, propriétés esthétiques, corrosion des armatures, etc.).

Une partie de l'eau ajoutée au béton est mobilisée par les granulats (absorption, adsorption), alors qu'une deuxième partie est consommée par l'hydratation, et une troisième partie reste libre dans la matrice du béton. Cette dernière est principalement responsable de la fluidité du béton, en agissant sur la concentration en solides de suspension entre granulats.

A part son rôle majeur dans le phénomène de l'hydratation, l'eau est l'un des facteurs les plus importants au niveau de l'ouvrabilité du béton. L'augmentation du dosage en eau augmente la fluidité du béton et entraîne la diminution de la concentration en solides ; au niveau rhéologique, le seuil de cisaillement et la viscosité diminuent.

Cependant, l'introduction excessive d'eau provoque la chute de la résistance mécanique du béton à l'état durci, ainsi que l'apparition des phénomènes de ségrégation à l'état frais, pour cela on utilise l'eau efficace qui consiste à tenir compte de la quantité d'eau existante dans les granulats.

1.5.4 Caractérisation d'un BAP

A. Etat Frais

La composition d'un BAP doit offrir un rapport équilibré entre les propriétés recherchées sur béton frais ou durci et les coûts de fabrication. Les propriétés générales d'un béton autoplaçant frais sont : la fluidité et l'homogénéité. Ces propriétés sont étudiées sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en trois critères mesurables par des tests empiriques ces critères sont : **[42]**.

- La Capacité au Remplissage.
- La Capacité de Passage.
- La résistance à la Ségrégation.

A.1) Capacité au remplissage

Le remplissage du béton, ou la déformabilité, est un critère qui découle directement de sa fluidité. Le béton autoplaçant est capable de remplir les vides et les espaces difficiles dans un milieu confiné, en se déformant sous l'effet de son propre poids, et sans sollicitations (vibrations externe ou interne). Le remplissage est observé sous deux aspects : la capacité de remplissage et la vitesse de remplissage. Le premier aspect est lié à la capacité de déformation du béton, il traduit le pourcentage rempli ou la distance atteinte dans l'espace. Le second est lié à la vitesse de déformation, il traduit ainsi la vitesse d'écoulement du béton. Le test

d'étalement au cône d'Abrams donne des indications sur les deux aspects **[43]** puisque le diamètre final atteint par la galette de béton correspond à la capacité de déformation, et le temps de passage à un certain diamètre (à 50 cm de diamètre par exemple) correspond à la vitesse de la déformation du béton.

Du point de vue rhéologique, la fluidité du BAP se traduit par un faible seuil de cisaillement, et une viscosité suffisante pour assurer le maintien des granulats dans la suspension. La fluidité de la pâte peut être assurée par l'ajout d'un superplastifiant qui agit en baissant fortement le seuil de cisaillement de la pâte, et celui du béton si les frottements inter - granulaires sont minorés par un volume suffisant de pâte.

A.2) Capacité de passage

Le béton autoplaçant doit réunir à la fois la fluidité (la capacité de remplissage) et la résistance à la ségrégation pour produire un bon écoulement sur un chantier. Cependant, dans les milieux confinés et les zones fortement ferraillées, il faut que le béton puisse s'écouler dans les espaces étroits et entre les armatures. En effet, le blocage des granulats est provoqué d'une part par la quantité importante de granulats dans le béton (plus de gravier, plus de risques de blocages), et d'autre part par la taille des plus gros granulats par rapport à l'ouverture entre armatures ou dans un confinement. Le mécanisme de blocage peut être illustré dans un plan par le schéma de la figure I.49 qui montre un béton s'écoulant entre deux armatures avant et au moment du blocage.

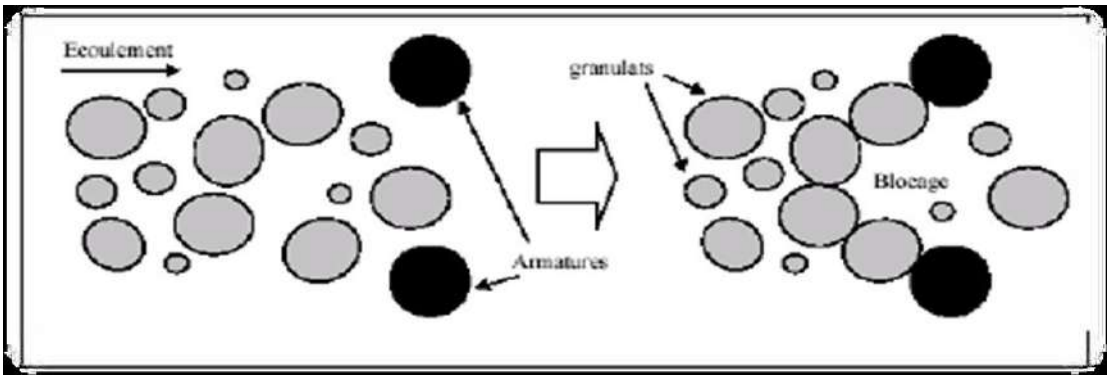


Fig 1. 31 Représentation en plan d'un blocage de granulats à travers deux armatures **[43]**

A l'approche des armatures, une différence se crée entre la vitesse des granulats et celle de la pâte. Plus rapide, la pâte précède les granulats en passant à travers les armatures **[44]** Ainsi, la quantité de granulats est considérée localement plus grande avant les armatures et tend à augmenter avec l'écoulement du béton. Ce phénomène s'explique par le lessivage de la pâte à

travers les granulats au niveau du passage entre les armatures **[45]**. Par conséquent, les frictions et les collisions entre les granulats sont plus importantes, et créent de multiples contacts entre les granulats à l'amont de l'ouverture entre les armatures, ce qui provoque la formation éventuelle d'un arc stable de granulats bloquant l'écoulement du béton.

Le béton autoplaçant doit posséder donc une bonne capacité de passage à travers les armatures et dans les confinements. Ceci nécessite une quantité de gravier inférieure à celle d'un béton ordinaire, et de taille maximale plus petite.

Un béton est qualifié d'autoplaçant s'il satisfait les propriétés citées ci-dessus, en trouvant le bon compromis entre des caractéristiques presque contradictoires (fluidité, résistance à la ségrégation).

A.3) Résistance à la ségrégation

La ségrégation d'un mélange correspond à l'absence d'homogénéité dans la distribution des constituants ce qui provoque généralement une séparation de phases solides et liquides ou bien une séparation des phases solides en fonction de leurs dimensions **[43]**.

La ségrégation peut donc se manifester dans un béton de façons Différentes, comme la séparation entre la pâte et les sables, qui peuvent conduire à un blocage en zones confinées, et une répartition non homogène de l'air occlus.

B. Etat Durci

B.1. Résistance mécanique

Les résistances mécaniques ont été longtemps considérées comme les qualités essentielles. Elles projettent généralement une image globale sur la qualité d'un béton

Les résistances mécaniques d'un BAP sont, comme pour la plupart des bétons directement liées à la qualité du squelette granulaire et au rapport eau efficace sur ciment, elles dépendent aussi de la composition du liant. L'optimisation de ces paramètres permet d'obtenir une large gamme de résistances jusqu'à des BAP à hautes performances (80 à 100 Mpa au 28ème jour) **[43]**. L'utilisation de fillers dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges **[46]**.

Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la

résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite. En fonction des propriétés pouzzolaniques des additions, les résistances mécaniques des BAP peuvent continuer à croître au-delà de 28 jours. Le dosage plus ou moins important en adjuvants dans les formulations de BAP peut aussi avoir une influence sur l'évolution de la résistance mécanique du béton.

Ainsi, l'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer sensiblement la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges. De même, certains superplastifiants utilisés pour contrôler la fluidité des formulations ont pour effets secondaires de retarder le temps de prise et d'augmenter le développement de la résistance mécanique **[47].**

Étant donné la défloculation du liant hydraulique qu'ils engendrent, leur dosage important dans les BAP conduit à considérer que ceux-ci seront plus résistants que des bétons vibrés supposés similaires au départ.

1.5.5 La formulation des bétons autoplaçant

Formuler un béton, c'est trouver un arrangement des divers constituants répondant à un cahier des charges donné. Dans les cas courants, le cahier des charges concerne la résistance à la compression à 28 jours et la consistance, c'est-à-dire l'affaissement au cône d'Abrams. Pour des chantiers plus spécifiques, d'autres propriétés peuvent être demandées, comme, par exemple, une prise retardée, une résistance élevée au jeune âge ou un dégagement de chaleur minimal. La solution trouvée doit si possible être optimale, ce qui signifie bien souvent avoir le plus faible prix de revient.

Pour formuler les bétons ordinaires, la méthode la plus utilisée dans l'industrie est celle dite de Dreux-Gorisse. Elle propose différents abaques pour estimer les dosages en eau et en ciment permettant d'obtenir la résistance et l'affaissement souhaités. Elle se distingue également par une méthode originale pour proportionner les granulats, qui consiste à caler la courbe granulométrique du mélange sables / gravillons sur une courbe de référence.

Formuler un béton autoplaçant est une opération complexe qui nécessite de trouver une bonne combinaison de matériaux compatibles, et le dosage convenable de chacun de ces constituants afin d'obtenir une formulation répondant aux propriétés du BAP.

Il existe une très grande variété de matériaux dans le monde, et il est clair que les matériaux utilisés ont des influences variées sur l'écoulement du béton. Ceci implique qu'il est

impossible de réaliser une formulation universelle de béton autoplaçant ; chaque chantier utilisant ses propres matériaux (matériaux locaux) doit mettre au point sa propre formulation. La variété de matériaux peut conduire aussi à des comportements différents à tous les niveaux (ouvrabilité, rhéologie, résistance).

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux-Gorisse n'est en effet pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions. La formulation se fait donc sur la base de l'expérience acquise ces dernières années.

L'aspect économique n'est pas encore le critère prédominant de la formulation; les dosages en superplastifiant et en fines ne sont donc pas bornés. Il est vrai, paradoxalement, que l'utilisation des agents de viscosité n'est pas très diffusée, justement à cause de leur coût.

Avec le temps, et le retour d'expérience, certaines plages se sont dessinées pour chaque constituant, facilitant un peu le travail du formulateur.

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m3.
- La masse de ciment est en général de 300 à 350 kg/m3. En complément, la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m3.
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage de saturation.

La formulation se fait par tâtonnement sur la base de ces plages. Certains formulateurs ont certes développé leur propre outil. Ce sont le plus souvent des méthodes dérivées de la méthode Dreux-Gorisse, avec une courbe granulométrique de référence englobant les éléments fins. Ces approches sont intéressantes dans le sens où elles permettent de détecter les classes granulaires manquantes. On ne peut toutefois pas les considérer comme des techniques à proprement parler de composition, car il n'existe pas de courbe de référence universelle, ce sont plus des supports qui facilitent la formulation.

De multiples approches ont été développées à travers le monde pour la formulation d'un béton autoplaçant, ces diverses méthodes de formulation ont en commun des principes et des conditions qui sont **[35]** :

1. Augmenter la déformabilité de pâte :
   - En utilisant un superplastifiant (agent fortement réducteur d'eau) ;
   - En équilibrant la teneur en eau et en poudre.

2. Réduire les frictions entre les granulats :
   - En limitant le volume des gros agrégats (et en augmentant le volume de pâte) ;
   - En utilisant une granulométrie de poudre continue.

3. Réduire la séparation des solides :
   - En limitant le volume d'agrégats ;
   - En diminuant la taille maximale des granulats ;
   - En utilisant un agent de viscosité.

4. Minimiser le ressuage (eau libre) :
   - En réduisant la quantité d'eau ;
   - En diminuant le rapport eau/poudre ;
   - En utilisant des poudres possédant une bonne surface spécifique ;
   - En augmentant la teneur en agent de viscosité.

5. Améliorer la cohésion pour réduire la ségrégation durant l'écoulement :
   - En diminuant le rapport eau/poudre ;
   - En utilisant un agent de cohésion.

6. Espacer les barres en fonction du volume et de la taille maximale des agrégats :
   - En diminuant le volume de gros agrégats ;
   - En réduisant la taille maximale des granulats ;
   - En utilisant des agrégats de forme ronde.

1.5.7 Domaines d'Emploi des BAP

Les caractéristiques des BAP laissent entrevoir de nombreuses possibilités techniques du fait de leur grande fluidité :

- possibilité de coulage de zones fortement ferraillées,

- possibilité de coulage de zones d'architecture complexe et difficilement accessibles,
- obtention de très bonnes qualités de parement.

L'un des avantages majeurs du BAP est de permettre la réalisation de parements de grande qualité. Leur composition, riche en éléments fins, permet d'obtenir une texture de surface plus fine et plus fidèle à la peau coffrante utilisée. Les aspects satinés, lisses ou très structurés recherchés par les architectes sont alors plus facilement réalisables. Des teintes homogènes et régulières peuvent être obtenues si les conditions de mise en oeuvre évoquées précédemment sont respectées, notamment du point de vue de la propreté des coffrages.

Le coulage d'un béton dans une zone très fortement ferraillée menait traditionnellement à un surdimensionnement de la pièce afin de rendre accessible tout point du bétonnage.

L'utilisation des BAP présente des intérêts architecturaux importants puisque, sans augmenter les performances mécaniques d'une structure donnée, ils permettent l'optimisation des sections ou la réalisation d'éléments de forme complexe. Les BAP constituent donc une alternative particulièrement intéressante au béton vibré dans les différents domaines de la construction : bâtiment, ouvrages d'art, tunnels, préfabrication, réhabilitation, etc. Walraven **[43]** précise cependant que les BAP sont souvent adoptés dans le domaine de la préfabrication grâce aux avantages et aux gains directs qu'ils présentent. Globalement, leur utilisation permet de réduire les coûts de production et, parallèlement, d'améliorer les conditions de travail et la qualité des produits finis. Leur utilisation est plus délicate sur site car les BAP sont particulièrement sensibles aux variations de teneur en eau. Or, bien que la production soit contrôlée, les lots de matériaux peuvent avoir des caractéristiques légèrement différentes.

En effet, la formulation des BAP est particulière : utilisation d'adjuvants et d'additions minérales. Leur sensibilité en ce qui concerne le dosage et la teneur en eau, la qualité et la régularité des composants ainsi que les conditions de malaxage, nécessite donc la mise en place d'un suivi plus important.

1.6 INFLUENCE DE DECHETS MARBRE SUR LE COMPORTEMENT DES MATERIAUX A BASE CIMENTAIRES

1.6.7 L'ouvrabilité

Houria Hebhoub et al. **[48]** Ont étudié l'influence de substitution du (25%,50%,75% et 100%) du sable par la poudre de marbre sur l'ouvrabilité du béton. Ils ont constaté que l'affaissement est diminué en fonction d'augmentation du pourcentage de marbre jusqu'à 75%.(Fig.1.32)

Naamaoui et al. **[49]** ont trouvé que l'étalement d'un BAP est augmenté en fonction d'augmentation du pourcentage de poudre de marbre.

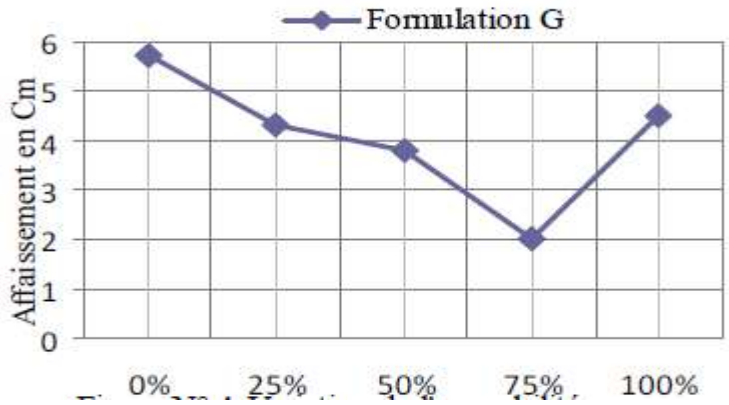


Fig 1. 32 l'affaissement au cône d'Abrams en fonction de pourcentage de substitution de la poudre de marbre **[48].**

1.6.8 Densité

Houria Hebhoub et al. **[48]** Ont étudié l'influence de substitution du (25%,50%,75% et 100%) sable par la poudre de marbre sur la densité du béton vibré. Ils ont trouvé que la densité est diminuée en fonction d'augmentation du pourcentage de marbre Fig.1.33. C'est mêmes résultats trouvées par Naamaoui et al **[49]** .

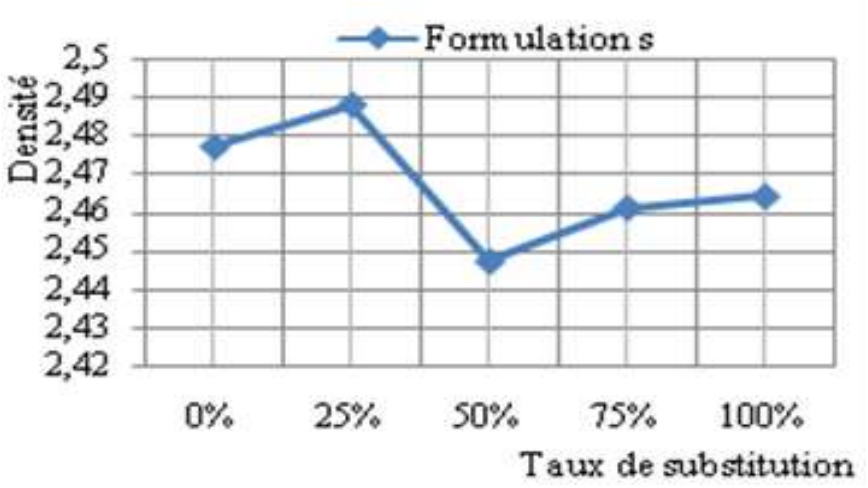


Fig 1. 32 Variation de la densité en fonction du taux de substitution à poudre de marbre **[48].**

1.6.9 L'air Occlus

Houria Hebhoub et al. **[48]** Ont montrés d'après leur études que l'air occlue du béton ordinaire est diminué en fonction de substitution du (25%,50%,75% et 100%) du sable par la poudre de marbre.

Naamaoui et al.**[49]** on montrés d'après leur recherches que l'air occlue de béton autoplaçant est diminué aussi avec l'augmentation du % de la poudre de marbre.

1.6.10 Résistance a compression

Houria Hebhoub et al. **[48]** on trouvé que la résistance à la compression est augmenté en fonction de substitution de 50% du sable par la poudre de marbre. La valeur maximale de la résistance à 28 jours est de 34,5 MPa obtenue dans le béton de 50% de taux de substitution et la valeur minimale est de 21,4 MPa obtenue dans le béton de 100% de taux de substitution (Fig.1.34)**.**

Naamaoui et al. **[49]** on conclue que la résistance à la compression augmente au fur et à mesure que l'âge augmente et elle diminue avec l'augmentation du pourcentage de PM incorporé. Pour un pourcentage de 30% de PM incorporé la résistance à la compression du béton représente près de 81% de la résistance du BAP avec 5% de PM.

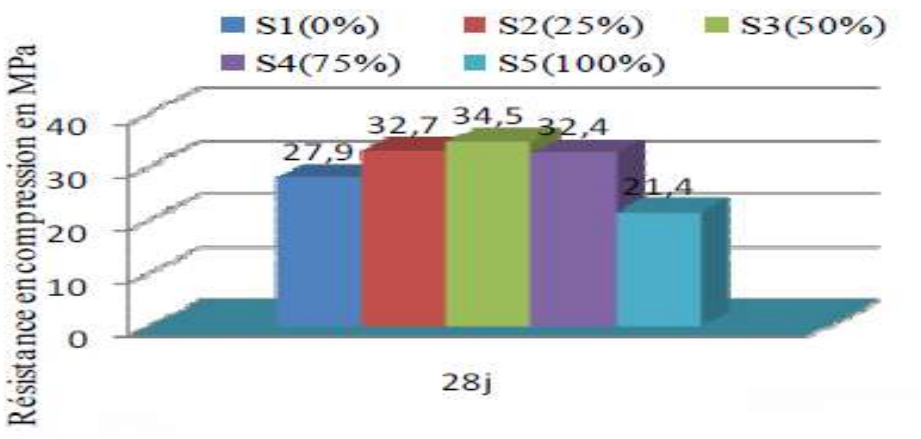


Fig 1. 34 Influence du pourcentage sue la résistance en compression **[48]**.

Taylor et al. **[50]** ont montré que les résistances en compression de béton avec ajout de poudre de marbre de granulométrie très serrée sont augmentées en fonction d'augmentation de poudre de marbre (Fig.1.35).

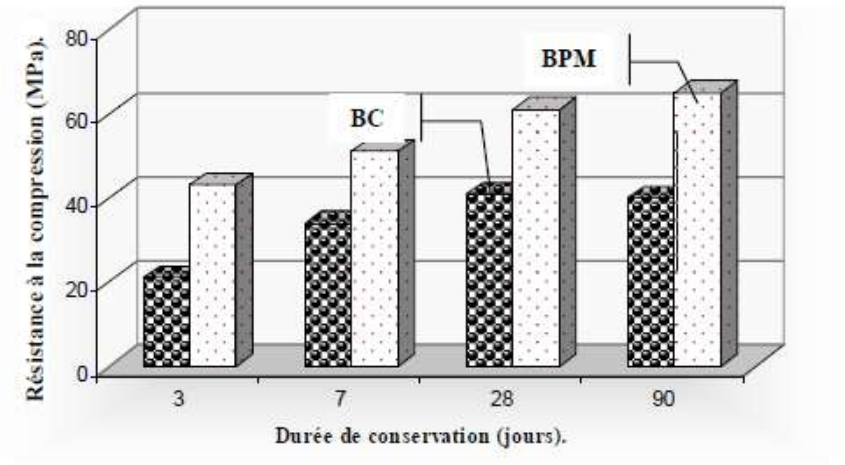


Fig 1. 35 résistances en compression de béton avec ajout de poudre de marbre. [**50]**

1.6.11 Absorption capillaire

Taylor et al **[50]** ont trouvé une faible capacité d'absorption d'eau pour les bétons avec ajout de poudre de marbre comparée au béton de contrôle. Ceci est un indice d'une compacité accrue de ces bétons (Fig.1.36).

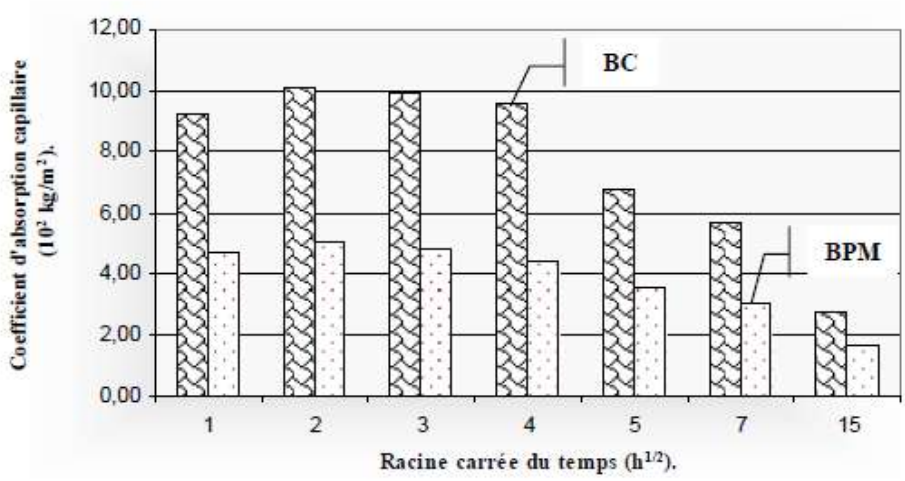


Fig 1. 36 capacité d'absorption d'eau pour les bétons avec ajout de poudre de marbre.**[50]**

1.7 INFLUENCE DE DECHETS DE VERRE SUR LE COMPORTEMENT DES MATERIAUX A BASE CIMENTAIRES

1.7.7 Maniabilité

Hongjian Du et al. **[51]** ont montré que la fluidité de mortier est diminue en fonction de substitution de 25%,50% 75% et 100% du sable normale par le déchet de verre recyclé (Fig. 1.37).

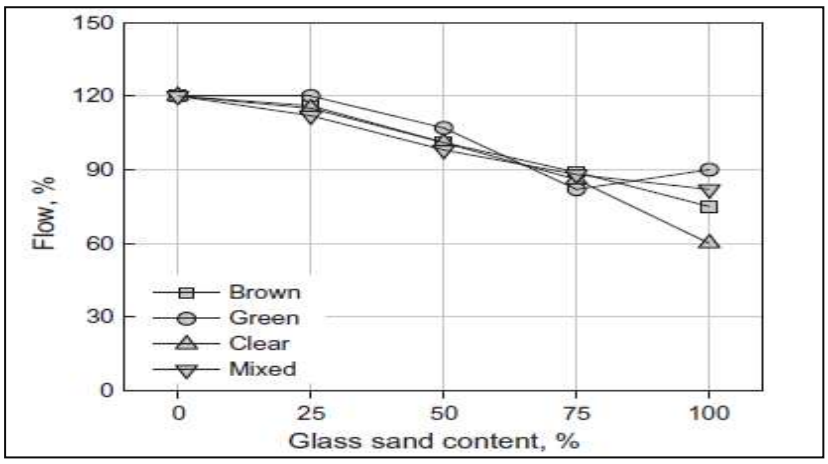


Fig 1. 37 La fluidité de mortier de verre. **[51]**

1.7.8 La densité

Kiang Hwee Tan et al. **[52]** ont trouvées aussi que la densité du mortier est diminue en fonction de substitution de 25%,50% 75% et 100% du sable normale par le de verre recyclé.
La dégression est estimé à 97%, 96%, 95% et 97% pour des 25%,50%75% et 100%. Ils ont expliqués cette chute par le poids spécifique du verre incorporés qu'est plus faible que celle du sable substitué.

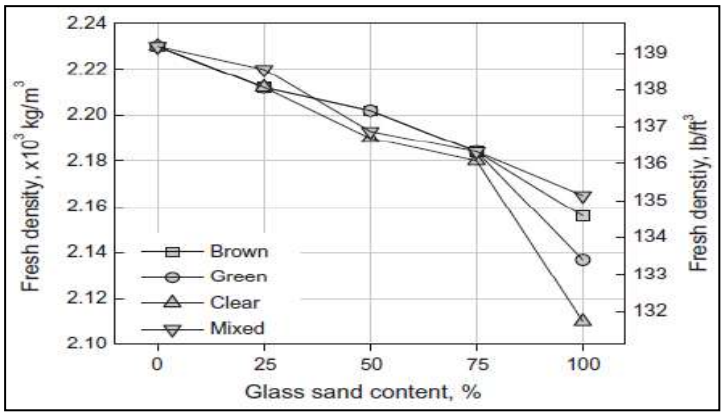


Fig 1. 38 la densité fraîche de mortier de verre. **[52]**

1.7.9 La résistance à la compression

SHAYAN et al. **[53]** ont trouvées que la substitution de 30% de sable par du verre fin a donnait de meilleures résistances que des mélanges témoins sans verre ou avec 10% ou 20 et 30% de substitution de ciment par la fumée de silice et le verre respectivement.
Batayneh et al. **[54]** ont constatés que la résistance à la compression est diminue en fonction de substitution du sable par le déchet de verre recyclé.

1.7.10 La résistance à la traction

Kiang Hwee Tan et al. **[52]** ont trouvés que la résistance à la traction est diminuée en fonction d'augmentation du pourcentage de déchets de verre (Fig1.38)

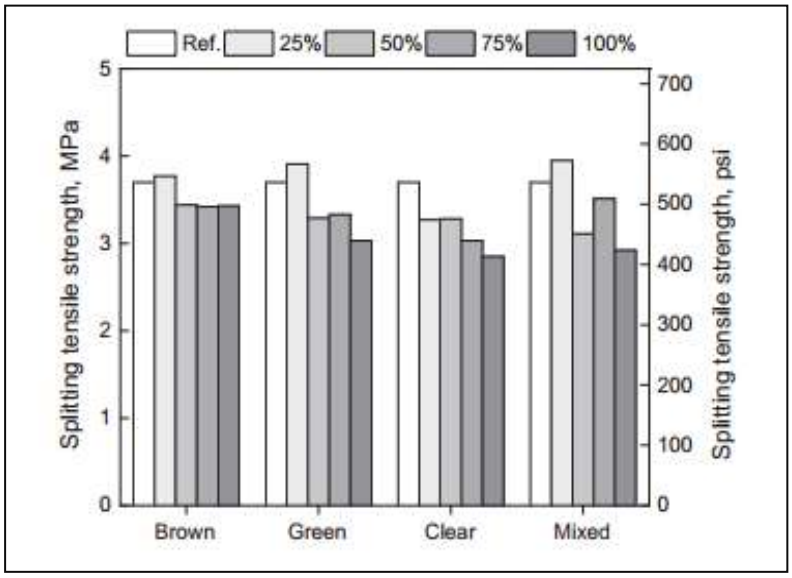


Fig 1. 39 Fractionnement la résistance à la traction de mortier de verre. **[53]**

Park et all, **[55]** ont conclue qu'il y a une légère diminution de la résistance à la traction par fendage de mortier en fonction d'augmentation du pourcentage de déchet de verre.

1.8 CONCLUSION

Les déchets constituent un réel problème, inhérent à toute vie biologique et à toute activité industrielle, agricole ou urbaine, et à ce titre, la recherche de solutions est une vraie nécessité pour les collectivités. Le déchet est par définition «matière» et à ce titre la bio physicochimie, la mécanique et la thermique sont au premier chef sollicitées pour le traiter.

Cette matière n'est pas banale. Elle a une vie, elle a souvent muté au cours de son existence pour se retrouver dans les poubelles et les décharges. Avec une telle diversité moléculaire, qu'il est nécessaire de trouver les moyens pour en extraire les fractions valorisables ou pour atténuer les capacités de nuisances.

Plusieurs types de déchets et de sous-produits peuvent être utilisés comme granulats. Le laitier de haut fourneau et les cendres volantes sont déjà exploités commercialement.

L'utilisation des divers déchets est fonction de leur rentabilité d'exploitation et de leurs propriétés. De nombreux types de déchets ne pourront peut-être pas être utilisés à une grande échelle étant donné la diversité de leurs caractéristiques physiques et chimiques.

Chapitre 02 :
MATERIAUX ET ESSAIS

2.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on s'intéresse à la présentation des matériaux et des méthodes de formulation adoptées pour réaliser les différents essais expérimentaux de notre recherche.
Dans une première partie on présentera les différents matériaux qui ont été utilisés dans le cadre de ce travail tout en justifiant leurs utilités ainsi que leurs caractéristiques et différentes propriétés. Dans une seconde partie, on exposera la formulation qui a été choisie pour réaliser les différents essais de béton de sable autoplaçant.

La caractérisation des bétons de sable autoplaçant à base de déchet (marbre et verre), à l'état frais et durci, nécessite de définir les corps d'épreuve sur lesquels seront mesurées les grandeurs spécifiques du matériau et les techniques d'essai. Les différents essais faits au cours de ce travail sont :

Essais réalisés sur béton frais :

- Cône d'Abrams
- V-Funnel
- Air occlus
- Densité

Essais réalisés sur béton durci :

- Essai de compression.
- Conductivité thermique
- Absorption d'eau par capillarité.
- Variation dimentionnelle (retrait et gonflement).

2.2 CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX UTILISÉS

2.2.1 Ciment

Il s'agit du CEM II/A El Mâtine **(**Fig. 2.1), c'est un ciment Portland composé (produit par la cimenterie de LAFARGE) dont la résistance minimale à la compression à 28 jours est de 42,5 MPa, et l'ajout est du calcaire qui est conforme à la norme [NA 442] **[56].**
Le tableau 2.1 résume l'Analyse chimique et composition hypothétique du ciment, selon sa fiche technique.



Fig 2. 1 Le ciment utilisé.(Annexe A)

Tableau 2. 1 Analyse chimique du ciment et composition du clinker. **[79]**

Analyse chimique du ciment	**Perte au feu (%)**	7.00-9.50
	Résidus insolubles (%) (NA 5042)	1.50-3.00
	Teneur en sulfates SO3 (%) (NA 5042)	2.00-2.50
	Teneur en oxyde de magnésium MgO(%)	1.90-2.30
	Teneur en chlorures (%) (NA 5042)	0.01-0.03
Composition hypothétique du clinker	**Silicates tricalciques C3S (%)**	58.00-64.00
	Aluminates tricalciques C3A (%)	6.00-8.00

- **Essais physiques**
- **La finesse**

La finesse du ciment influe d'une façon considérable sur la résistance mécanique, la consistance normale et le temps de prise. La finesse est déterminée par la surface spécifique de Blaine. Elle est calculée en fonction du temps à l'aide du perméabilimètre de Blaine d'après la norme [NF P 15-476] **[57]**.

- **La consistance normale**

C'est la quantité d'eau de gâchage qu'il faut ajouter à une quantité de ciment préalablement pesée pour obtenir une pâte dite normale, elle est mesurée à l'aide de l'appareil de Vicat d'après la norme [NF P 15-431] **[58]**.

- **Le temps de prise**

Le début et la fin de prise sont déterminés à l'aide de l'aiguille de Vicat sur une pâte de consistance normale placée dans un moule tronconique d'après la norme NF P 15-473 **[59]**.Le Tableau.2.2 résume les résultats des essais physiques sur le ciment utilisé.

Tableau 2. 2 Caractéristique physiques du ciment. **[79]**

Caractéristique	**Valeur**
Masse volumique absolue (g /cm^3)	0.99
Masse volumique apparent (g/cm^3)	3.04
Consistance normale de la pâte de ciment (%)	25.5-28.00
Prisométrie (min) - **Début de prise** - **Fin de prise**	 120-180 210-280
Classe de résistance (MPa)	≥ 42.5& 62.5
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1000
Finesse (BLAINE) (cm^2/g)	4300-4800
Expansion (mm)	0.50 – 2.50

- **Essais mécaniques sur le ciment**

Selon la fiche technique les essais mécaniques sur le ciment ont été effectués conformément à la norme NF P 15-471 **[60]** sur des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm³ à raison de trois éprouvettes rapportées à la moyenne par âge. Le mortier utilisé est un mortier normalisé: 450 g de ciment, 1350 g de sable naturel et 225 g d'eau. Les résultats obtenus par cet essai sont acceptables pour la confection d'un béton et sont résumés dans le Tableau.2.3.

Tableau 2. 3 Evolution de la résistance du ciment en fonction de l'âge. **[79]**

Ages (jour)	**Résistance à la compression (MPa)**
2	>20
28	≥42.5 et 62.5

2.2.2 Le sable

Le sable utilisé dans cette étude est un sable roulé provient de carrière de Oued-Souf, située à 600 km au SUD-EST d'Alger, sa classe granulaire est 0/3. La Figure suivante donne un aperçu sur la nature du sable utilisé ses les propriétés physiques sont représentées dans le Tableau 2.4.



Fig 2. 2 Aspect du sable utilisé

- **Analyse granulométrique du sable utilisé**

L'analyse granulométrique du sable utilisé est présentée sur la Fig.2.3 suivante :

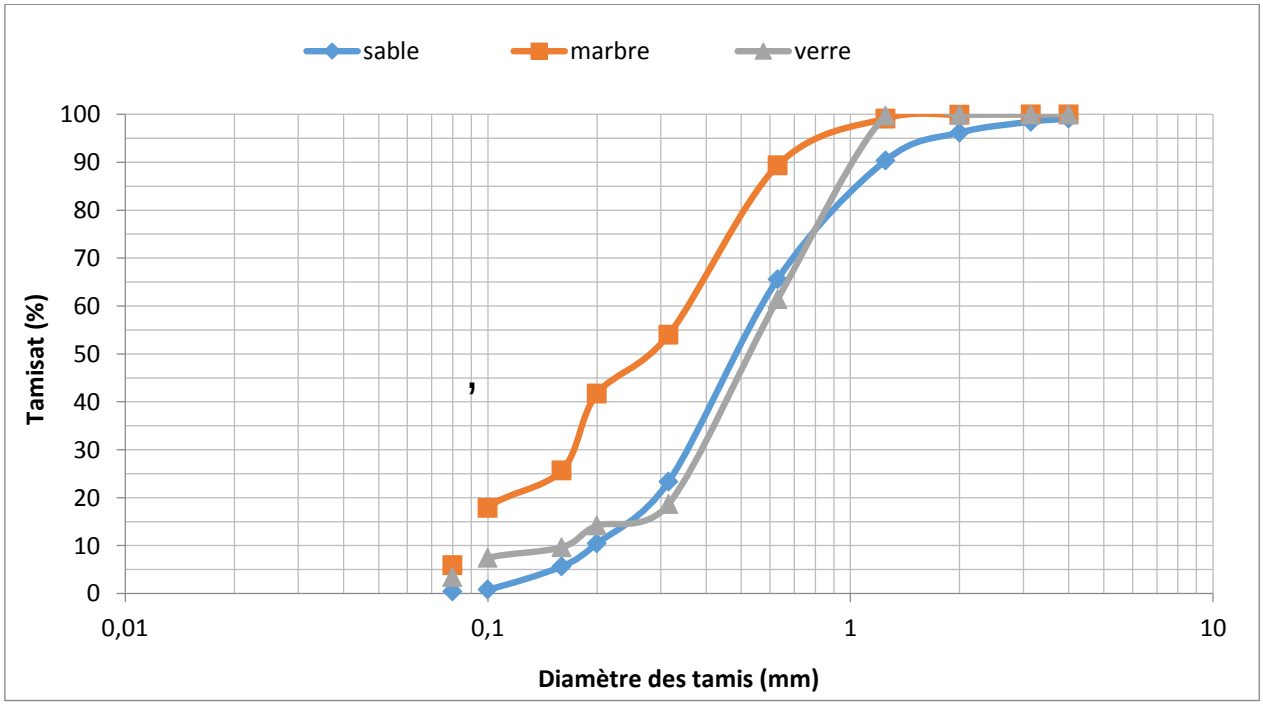


Fig 2. 3 Courbe granulométrique du sable et de déchets utilisés.

Tableau 2. 4 Propriétés physiques de sable utilisé

Caractéristique	Type de sable	Normes
Provenance	**Sable d'oued-souf**	
Classe granulaire	0 /3	NF EN 933-1**[61]**
Module de finesse	2.02	
Masse volumique absolue (g/cm3)	2.64	NF EN 1097-6**[62]**
Masse volumique apparente (g/cm3)	1.58	NF EN 1097-3**[63]**
La compacité(%)	60	NF EN 1097-3**[63]**
La porosité (%)	40	NF EN 1097-3**[63]**
Equivalent de sable (%)	à vue : 88.01	NF EN 933-8**[64]**
	à piston : 82.11	
Taux d'absorption d'eau (%)	0.44	NF EN 1097-6**[62]**

- **Analyse chimique du sable utilisé**

Le sable utilisé a été analysé à l'aide d'une spectrophotométrie infrarouge, pour l'identification des différents groupements caractéristiques de la biomolécule.

Le spectre obtenu sur le sable utilisé démontre que sa nature est calcaire (Figure2.4).

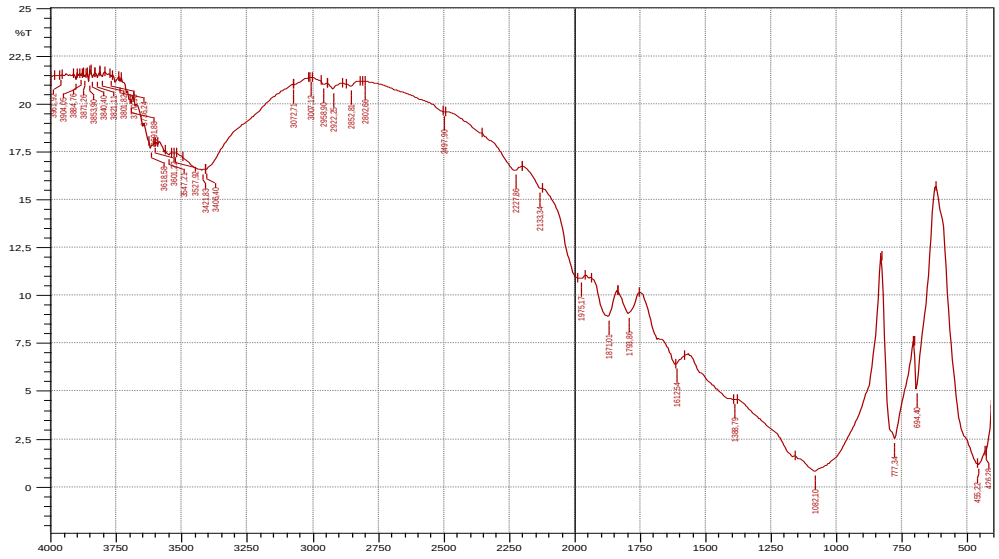


Fig 2.4 spectre d'analyse chimique du sable utilisé.

2.2.3 Fillers

Les fillers utilises dans notre cas sont de nature marbre (Fig.2.5). Ils sont obtenus par broyage des déchets de concassage de la carrière de Skikda abandonnée se trouvant dans l'usine de marbre de Zawya wilaya de Blida. Rappelons que la poudre de marbre est la plus adaptée au béton et donne de meilleures performances **[65].** Ses caractéristiques physiques sont mentionnées dans le Tableau.2.5 suivant :

Tableau 2. 5 caractéristiques physiques des fillers de marbre utilisées.

Caractéristique	Poudre de marbre
Finesse (cm^2/g)	2800
Masse volumique absolue (g/cm3)	2.73
Masse volumique apparente (g/cm3)	1.083



Fig 2. 5 Marbre broyée.

2.2.4 Déchets

2.2.4.1 Déchet de verre

Les déchets utilisé dans notre étude provient de la récupération de déchets de verre rejeté dans la nature après avoir récupérer, concasser broyer et tamiser (Fig. 2.6) Ce granulat de verre est incorporé dans le béton de sable autoplaçant par substitution par rapport à la masse du sable selon les pourcentages suivants : 10%, 20%, 30%. Le tableau 2.6 résumé les différentes caractéristiques physiques de déchets de verre utilisés.

Tableau 2.6 Les caractéristiques physique déchets de verre.

Caractéristiques	Valeurs
La masse volumique apparente (Kg/m^3)	1.13
La masse volumique absolue (Kg/ m^3)	2.49
Module de finesse	2.9
Couleur	Blanc grisâtre (transparent)
La compacité(%)	45
La porosité (%)	55

- **Analyse granulométrique du déchet de verre utilisé**

L'analyse granulométrique du déchet de verre utilisé est présentée sur la Fig.2.3



Fig 2.6 déchet de verre utilisé.

2.2.4.2 Déchet de Marbre

Les déchets de marbre utilisées dans notre étude sont obtenus par broyage des déchets de concassage de la carrière de Skikda abandonnée se trouvant dans l'usine de marbre de Zawya wilaya de Blida, est incorporés dans le béton de sable autoplaçant par substitution par rapport au volume de sable selon les pourcentages suivants : 10%, 20%, 30%, 40%, 50%. Le tableau 2.7 résumé les différentes caractéristiques physiques de déchets de marbre utilisés.

Tableau 2.7 Les caractéristiques déchets de marbre.

Caractéristiques	Valeurs
La masse volumique apparente (Kg/m^3)	1.42
La masse volumique absolue (Kg/ m^3)	2.75
Module de finesse	1.8
Taux d'absorption d'eau (%)	0.50
La compacité(%)	45
La porosité (%)	55

- **Analyse granulométrique de déchet de marbre utilisé**

L'analyse granulométrique de déchet de marbre utilisé est présentée sur la Fig.2.3



Fig 2.7 déchet de marbre utilisé.

2.2.5 Eau de gâchage

L'eau utilisée pour la fabrication du béton autoplaçant est celle de distribution considérée comme potable, exempte de toute impureté nuisible au béton et conforme à la norme [NF EN 1008] **[66].**

2.2.6 Adjuvant

Pour assurer une ouvrabilité satisfaisante, on a employé un Superplastifiant Haut réducteur d'eau à base de polycarboxylate d'éther formulé à base de polymère de synthèse combiné

commercialisé par la société Granitexe, sous le nom « MEDAFLOW 145 » .Voir la fiche technique en (< annexe B>) pour avoir plus de détaille sur ce adjuvant.



Fig 2. 8 L'Adjuvant utilisé.

2.3. FORMULATION DU BETON DE SABLE AUTOPLAÇANT

L'objectif de la formulation est de déterminer la quantité nécessaire pour chaque matériaux du gâchée, afin d'obtenir un béton de sable autoplaçant avec des propriétés souhaitées. Notre étude est focalisée sur l'influence de l'incorporations des déchets (de marbre et de verre) sur les caractéristiques à l'état frais et durci d'un béton de sable autoplaçant.

Afin de déterminer les quantités des matériaux : sable, ciment, fillers, eau et adjuvant, nous nous sommes basés sur la méthode de formulation théorique SABLOCRETE 1994**[19]**. , en assurant un rapport E/C= 0.41 et le dosage de superplastifiant variable pour assurer une ouvrabilité constant.

- **Béton de sable autoplaçant a base de déchet de verre**

Les déchets de verre sont incorporés dans la masse du béton de sable autoplaçant par substitution par rapport au volume du béton avec des pourcentages de 10, 20, 30%. La composition de chaque mélange pour chaque série est mentionnée dans le Tableau suivant.

Tableau 2.8 composition des BSAP à base de déchets de verre (1 m^3).

Composant	BSAPT	BSAPV (10%)	BSAPV (20%)	BSAPV (30%)
Ciment (kg/m^3)	350	350	350	350
F/Marbre (kg/m^3)	250	250	250	250
Sable (kg/m^3)	1400	1260	1120	980
Eau(l/m^3)	247.35	247.35	247.35	247.35
Adjuvant* (%)	1.4	1.4	1.45	1.6
Verre (kg/m^3)	0	132.4	264.1	396.14
E/C	0.41	0.41	0.41	0.41

*par rapport à la masse de liant

Avec:

BSAPT : Béton de sable autoplaçant témoin.

BSAPV : Béton de sable autoplaçant avec déchets de verres.

- **Béton de sable autoplaçant a base de déchet de marbre**

Les déchets de marbre sont incorporé dans la masse du béton de sable autoplaçant par substitution volumétrique du sable avec des pourcentages de 10, 20, 30, 40, 50%. La composition de chaque mélange pour chaque série est mentionnée dans le Tableau suivant :

Tableau 2.9 composition des BSAP à base de déchets de marbre (1 m^3)..

composant	Ciment (kg/m^3)	F/Marbre (kg/m^3)	Sable (kg/m^3)	Eau (l/m^3)	Adjuvant* (%)	Marbre (kg/m^3)	E/C
BSAPT	350	250	1400	247.35	1.4	0	0.41
BSAPM (10%)	350	250	1260	247.35	1.4	145.84	0.41
BSAPM (20%)	350	250	1120	247.35	1.2	291.7	0.41
BSAPM (30%)	350	250	980	247.35	1.2	435.7	0.41
BSAPM (40%)	350	250	840	247.35	1.3	583.3	0.41
BSAPM (50%)	350	250	700	247.35	1.4	729.2	0.41

*par rapport à la masse de liant

Avec:

BSAPT : Béton de sable autoplaçant témoin.

BSAPM : Béton de sable autoplaçant avec déchets de marbre.

2.4. SEQUENCE DE MALAXAGE DU BETON DE SABLE AUTOPLAÇANT

La séquence de malaxage décrite dans la figure 2.9 suit les étapes suivantes :

- Malaxer à sec le ciment, sable, filler marbre et déchet afin d'homogénéiser le mélange pendant 30 seconde (on a utilisé un malaxeur de capacité de 5 litres).
- Ajouter pendant 1 minute la première quantité d'eau (w1 = 60% Eau).
- Ajouter pendant 1 minute le restant de l'eau de gâchage (w2 = 40% Eau) mélangé avec le superplastifiant.
- Malaxer le mélange pendant 3 minutes.
- En laisse le mélange reposé 3 minutes
- Malaxer le mélange pendant 1 :30 minutes

La séquence de malaxage est la même pour tous les mélanges du béton de sable autoplaçant. Pour assurer une meilleure incorporation, et d'après la séquence de malaxage de ce produit cité en fiche technique, l'ajout de déchet de marbre et déchet de verre qui est doit être mélangé avec les agrégats (ciment, sable) cette quantité a été prise d'un pourcentage massique du sable et ajouté d'un seul coup.

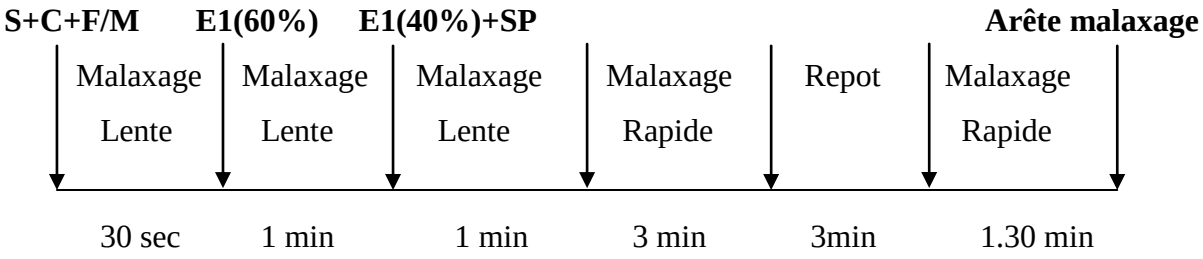


Fig 2. 9 Séquence de malaxage du béton de sable autoplaçant.



Fig 2.10 protocole de malaxage.

2.5. PREPARATION ET CONSERVATION DES EPROUVETTES

Les différents types de bétons de sable sont tous fabriqués dans l'environnement de laboratoire. Le béton a été coulé dans des moules métalliques de forme, prismatiques 4x4x16 cm destinées aux essais de compression et de variation dimensionnelles, ainsi que des éprouvettes 4×10×10 cm destinées pour les essais thermiques conformément à la norme NF EN 12390-2 **[67]**.

Juste après la confection, toutes les éprouvettes ont été couvertes afin d'éviter le risque d'évaporation excessive et le retrait plastique. Après 24 heures de la confection, les éprouvettes ont été démoulées et conservées selon deux modes différents : dans l'eau à 20°C ± 2°C et à l'air libre d'un climat moyen (laboratoire).

Les échantillons conservés dans l'eau ont été séchés à l'atmosphère de laboratoire pendant environ 24 heures avant l'âge d'essai.



Fig 2. 11 Fabrication des éprouvettes.

2.6. ESSAIS SUR BETON DE SABLE AUTOPLAÇANT

2.6.1. Etat frais

Dans cette étude, deux essais ont été effectués pour valider le caractère des mortiers autoplaçant formulés selon les recommandations de l'AFGC.

a) Essais d'étalement au mini-cône

Selon la norme NF EN 12350-8 **[68]** l'essai d'étalement consiste à remplir un moule tronconique place sur une surface horizontale lisse, une fois le moule soulève, le diamètre

d'étalement du BSAP est mesure suivant deux directions perpendiculaire, la moyenne est retenu. La figure 2.12 montre les étapes de l'essai d'étalement au mini cône.



Fig 2. 12 Protocole de l'essai d'étalement.

b) Essai d'écoulement a entonnoir en V (V-funnel)

Selon la norme NF EN 12350-9 **[69]** L'entonnoir est destiné à imposer un écoulement du même type que celui impose entre deux armatures parallèles. L'entonnoir est rempli de mortier et le temps pour lequel le mortier prend pour couler à travers le dispositif est mesure. Ce temps mesure indique la fluidité et Caractérise la capacité du mortier à se déformer à travers des zones confinées par son passage par l'ouverture du col du dispositif. La figure montre les étapes de l'essai. (Fig2.13)

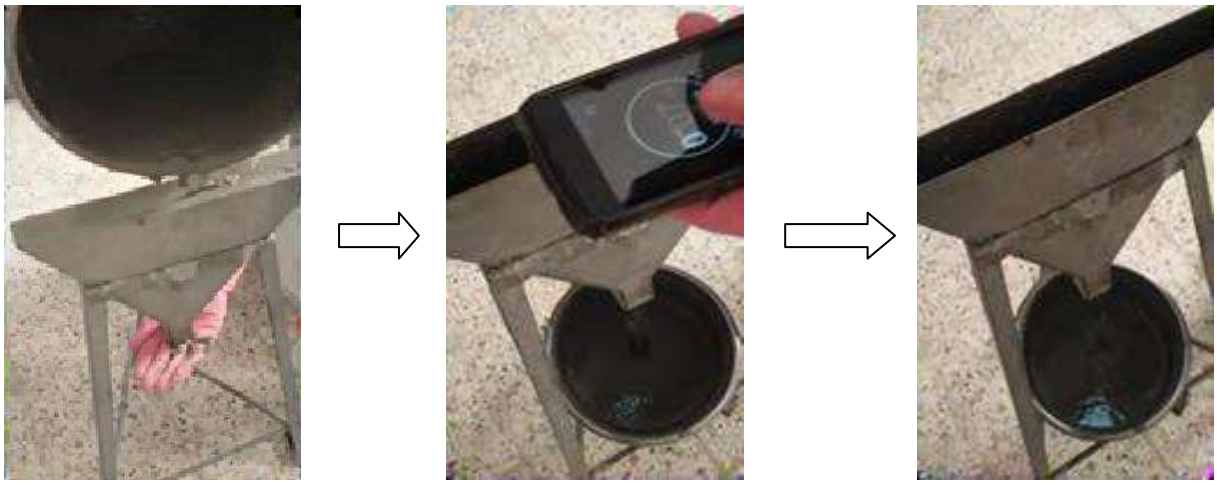


Fig 2. 13 protocole de l'essai d'entonnoir (V- funnel).

c) Densité

La masse volumique du béton de sable autoplaçant a été mesurée selon la norme NF EN 12350-6 **[70]** NA436 **[71].**



Fig 2. 14 Mesure de la densité du béton de sable autoplaçant.

d) L'air occlus

Pour la mesure de l'air occlus dans le béton de sable autoplaçant a l'état frais, on a utilisé la méthode dite « par pression ». Comme le seul élément compressible dans le béton frais est l'air occlus, la compression de l'air fait chuter la pression appliquée au béton de sable frais. Cette diminution est proportionnelle à la quantité d'air présente dans le béton. Cet essai est effectué à l'aide d'un aéromètre à mortier de capacité de 1 litre (Fig 2.15**)** selon la norme française NF EN 12350-7 **[72]**.



Fig 2.15 L'aéromètre.

2.6.2 Etat durci

a) Essais de compression

La résistance à la compression a été mesurée selon la norme [NF EN 196-1] **[73]** par compression axiale pour demi-prisme d'éprouvettes prismatiques de dimensions 4×4×16 cm, à 7, 28 jours, à l'aide d'une presse hydraulique de capacité maximale de 2000 kN conforme à la norme [NF P 18-412] **[74]** (Fig.2.16)

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture à la traction seront rompus à la compression comme indiquée sur la Fig. 2.16.
La contrainte de rupture est calculée comme suit :

$$R_c = F_c / b^2$$

R_c : Résistance à la compression en (MPa).

F : Charge de rupture en (N).

b : Côte de l'éprouvette est égale à 40mm.



a- L'éprouvette avant l'écrasement. b- L'éprouvette après l'écrasement.

Fig 2. 16 Dispositif de mesure de la résistance à la compression.

b) Absorption d'eau par capillarité

Dans cet essai de mesure, on prend un morceau d'éprouvette de béton déjà sécher et on le pesé (m0), après on introduire le dans un bac remplir de 1 cm d'eau (Fig.2.17), pendant chaque intervalle de temps (15 min, 30 min ,1 h, 2 h ,4h ,24h, on remesure les morceaux (mi), la différence de poids c'est le poids de l'eau absorbé (mi- m0) [NE 13057] **[75].**

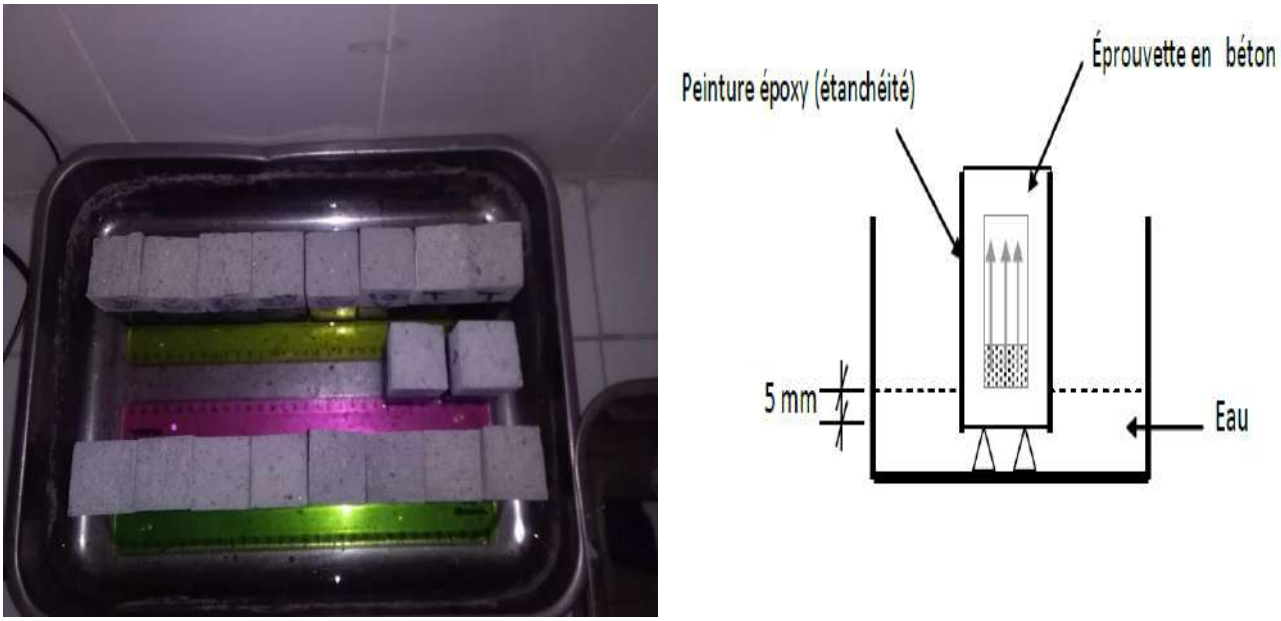


Fig 2. 17 Absorption d'eau par succion capillaire de BSAP.

c) Les variations dimensionnelles (Retrait et gonflement)

En l'absence de toute charge, le béton se déforme instantanément. Ces déformations sont dues essentiellement à une perte d'eau de gâchage par évaporation, qui se traduit par un rétrécissement des éléments en béton.

Le retrait dépend non seulement des conditions de conservation (humidité, température) mais dépend aussi des constituants du béton. Les mesures du retrait ont été effectuées sur des éprouvettes prismatiques de 4x4x16cm conformément à la norme [NF P 15-404] **[76].** Ces éprouvettes au

nombre de trois par composition, sont après démoulage à 24 h, placées dans un réctractomètre (Fig : 2.18) munis d'un comparateur qui permet la mesurer du retrait et gonflement à tout moment à court terme et moyenne terme (du 1j jusqu'a 28 jours) La conservation des éprouvettes est faite à l'air libre dans le laboratoire à une température de 25 à 30°C pour la mesure de retrait et à l'eau pour la mesure de gonflement.



Fig 2. 18 Mesure des variations dimensionnelles.

- **Expression des résultats**

Pour chaque éprouvette ; sont calculés les rapports:

ΔL : Variation de longueur par apport à la longueur origine.

L0 : Longueur de base, prise égale à 160mm.

ΔM : Variation de masse par apport à la masse au moment du démoulage.

M : Masse de l'éprouvette au moment du démoulage.

Le compte rendu donne les valeurs de ces rapports pour les différents âges et pour les différentes éprouvettes mesurées. Les moyennes arithmétiques de ces 3 valeurs à un âge déterminé caractérisent la valeur du retrait et celle du gonflement à cet âge de l'échantillon (éventuellement, de la variation de masse).

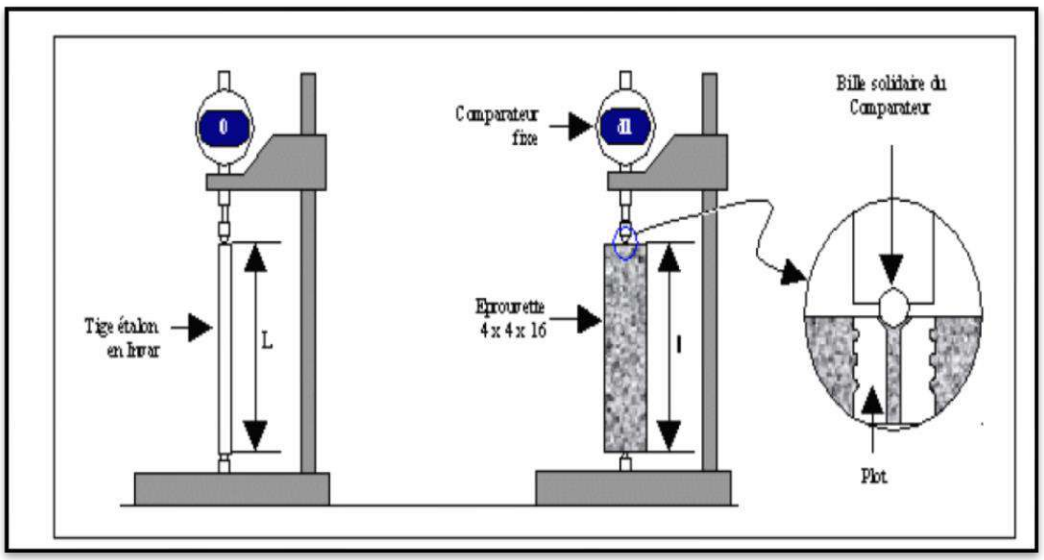


Fig 2. 19 Appareillage pour mesure de retrait et gonflement.

- **Conduite de l'essai**

Au moment de la mesure, le comparateur est mis au zéro sur la tige étalon en Invar de longueur

L = 160 mm Soit dl(t) la valeur lue sur le comparateur au temps t ; l'éprouvette a une longueur au temps considéré :

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

Soit l (t0) la longueur de l'éprouvette au temps t0 choisi d'origine. En générale, cette origine est prise au moment du démoulage, 24 h après la confection des éprouvettes .La variation de longueur au temps t sera :

$$\Delta l(t)=l(t)-l\ (t0)=dl(t)-dl(t0)$$

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

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l(t)}{L} = \frac{dl(t) - dl(t0)}{L}$$

Δ L (t) est obtenu en faisant la moyenne sur les 3 éprouvettes issues du même moule. Lorsque les éprouvettes sont conservées dans l'air ΔL (t) est généralement négatif et l'on parle alors de retrait de l'éprouvette. Lorsque l'éprouvette est conservée dans l'eau, Δl(t) peut être positif : il y a alors gonflement).

d) Conductivité thermique

De nombreuses méthodes sont utilisées pour mesurer la conductivité thermique des matériaux. Ces méthodes consistent à soumettre l'échantillon à un flux thermique et mesurer par la suite soit un profil de température soit un flux de chaleur. Dans notre cas Les Propriétés thermiques des déférents mélanges ont été mesurés à l'aide d'un CT Mètre conformément la norme ISO 8497-1 **[77].**

- **Le CT METRE Norme de référence NF EN 993-15 [78]**

C'est un appareil aisément transportable, a été élaboré dans le but de permettre d'évaluer avec précision, les caractéristiques de résistance thermique d'un certain nombre de matériaux tels que la brique, les roches, le bitume et le béton.

Le CT-mètre se compose de deux éléments qui sont l'organe de commande, chargé de générer la puissance de chauffe et d'interpréter la courbe d'élévation de température induite dans le matériau à tester et la sonde chargée de transmettre la puissance de chauffe et de recueillir la température induite.



Fig 2. 20 Le CT-mètre.



Fig 2. 21 La sonde.

La résistance thermique (R) des éléments est proportionnelle à l'épaisseur (e) et inversement proportionnelle a λ , elle est déterminée suivant la relation : R= e/λ

2.7 VARIABLE ETUDIES

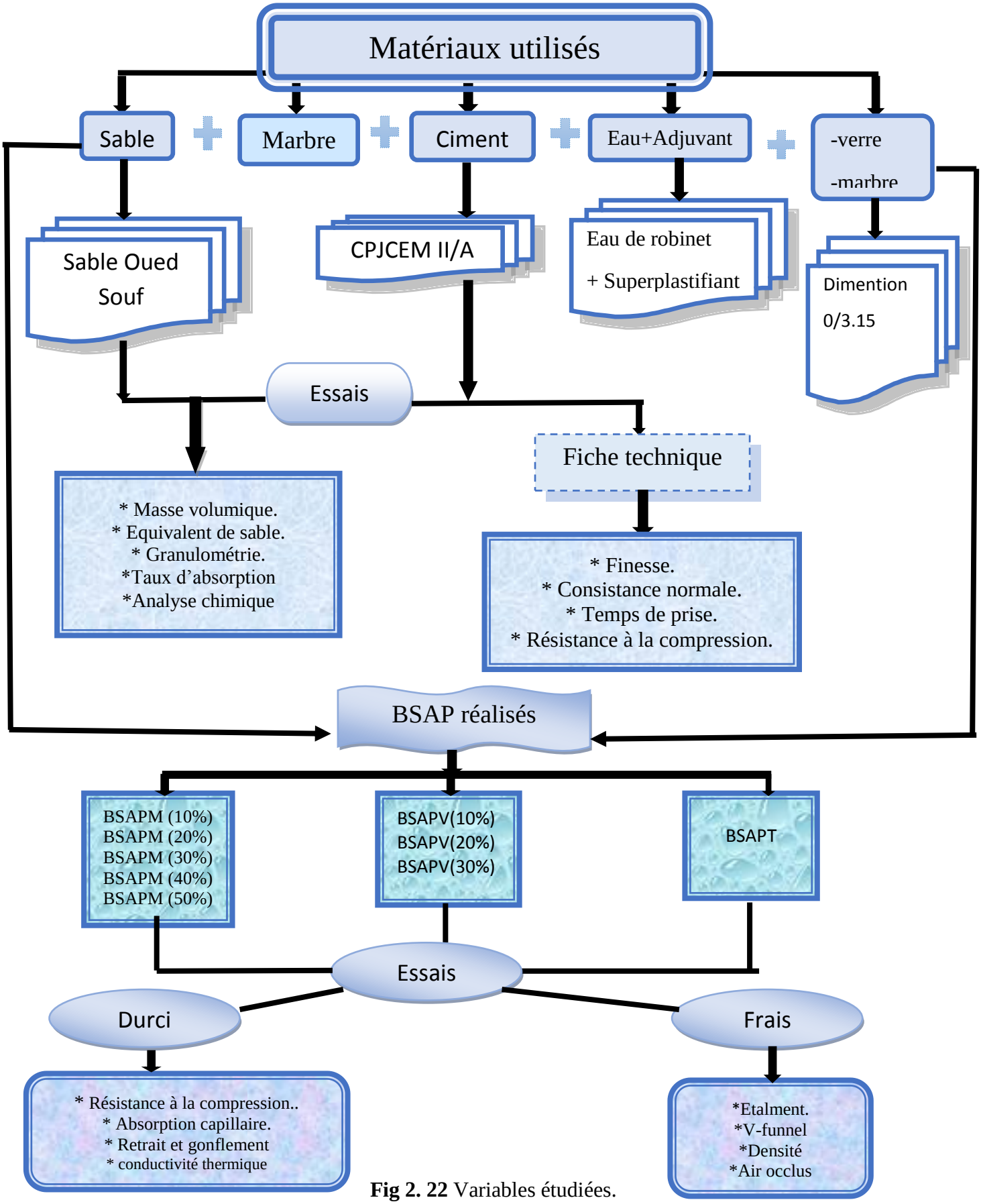


Fig 2. 22 Variables étudiées.

2.8 CONCLUSION

Dans notre recherche, nous avons utilisé les matériaux locaux, disponibles sur le marché algérien tels que le ciment, les granulats, les superplastifiants) ainsi que les déffirents déchets recycles (marbre et verres. Les essais menés au cours de cette étude ont été effectués sur les bétons.

Pour déterminer leurs caractéristiques rhéologiques (essais d'étalement au mini cône , d'écoulement à l'entonnoir (V-funnel),). Ensuite, des essais relatifs au domaine mécanique et physique (compression, absorption d'eau, retrait et gonflement).

Pour détermine, l'influence des déchets (marbre et verre) sur le BSAP soit à l'état frais ou l'état durci.

Chapitre 03 :
Rèsultats et interprétations

3.1 INFLUENCE DE DECHETS DE MARBRE SUR LE COMPORTEMENT DU BETON DE SABLE AUTOPLAÇANT

3.1.1 Introduction

Les résultats des différents essais réalisés sur les bétons de sable autoplaçant à base de déchets marbre à l'état frais et durci sont rassemblés ci-après et les valeurs données sont les moyennes arithmétiques des trois résultats d'essais.

3.1.2 Caractéristiques du BSAPM à l'état frais

3.1.2.1 Etalement

L'étalement des bétons de sable autoplaçant trouvés sont résumés sur la figure 3.1 suivant :

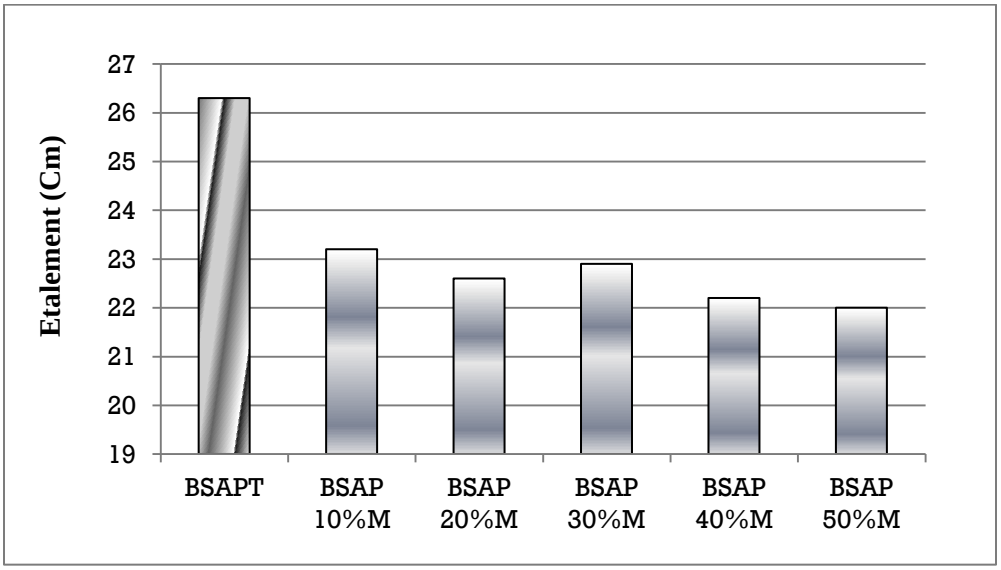


Fig 3. 1 Etalement des BSAP à base de déchet de marbre avant réglage.

D'après les figures ci-dessus, on remarque que l'étalement de bétons de sable autoplaçant varie en fonction du pourcentage de substitution du sable par la déchet de marbre. On constate aussi que plus le pourcentage du déchet de marbre augmente, plus l'étalement diminue. ce qui confirme les résultats trouvés par plusieurs chercheurs **[48,49]**.

Pour ce qui s'en suit, et pouvoir comparer les résultats obtenus à l'état durci, on a varié la quantité d'adjuvant pour obtenir un étalement constant (compris entre 26.4 (Cm) et 27.8 (Cm) est visé) comme indiquent la figure suivante :

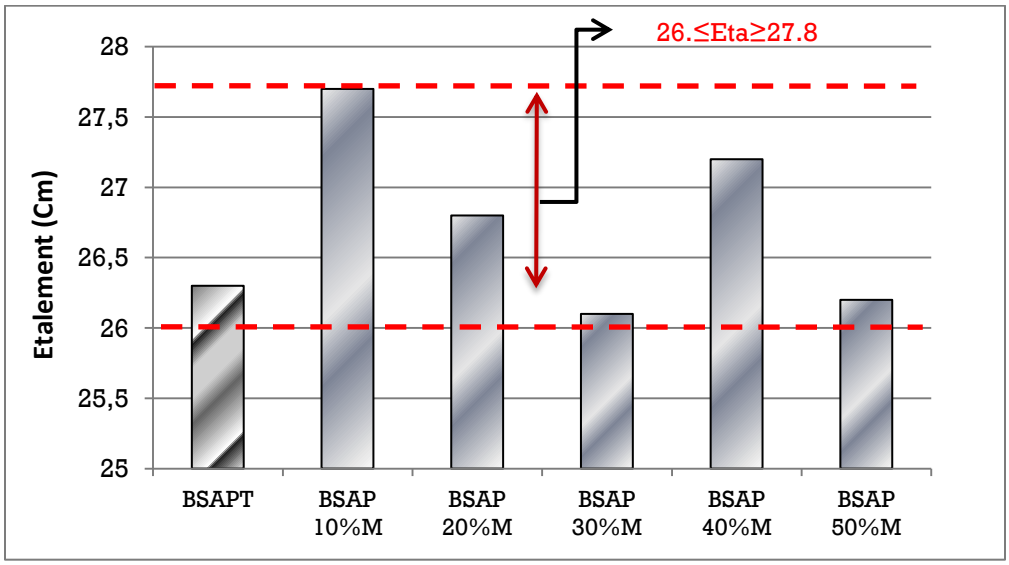


Fig 3. 2 Etalement des BSAP à base de déchet de marbre après réglage.

3.1.2.2 V-funnel

La mesure du temps de passage de différents BSAP obtenus est représentée dans la figure ci-dessous :

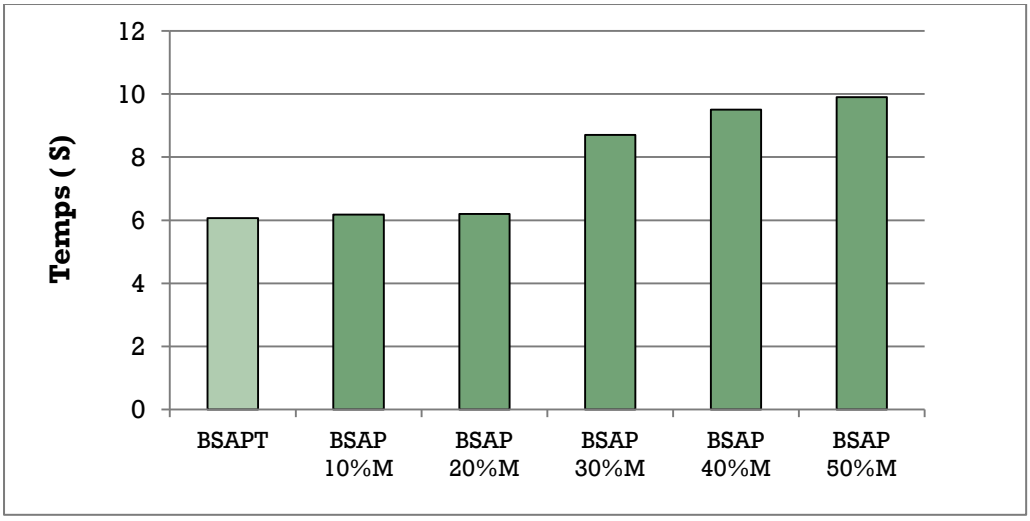


Fig 3. 3 Temps d'écoulement à V-funnel des BSAP à base de déchet de marbre après réglage.

De la même façon que l'étalement, les résultats d'essais V-funnel montrent que le temps de passage augmente en fonction d'augmentation de déchet de marbre. Cette augmentation est liée à la forme anguleuse de déchet de marbre incorporé qui joue un rôle d'obstacle. Ce résultat confirme les résultats de Naamaoui et al **[49].**

3.1.2.3 Densité

La densité des différents bétons réalisés est résumée dans la figure ci-dessous :

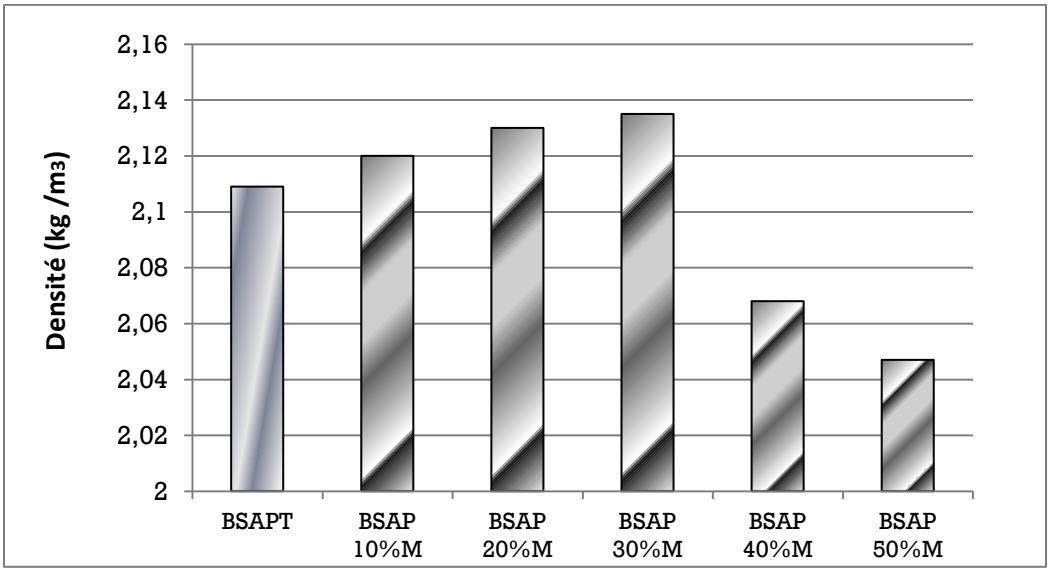


Fig 3. 4 Densité des BSAP à base de déchet de marbre.

La figure précédente montre que la densité de BSAP augmente au départ en fonction de substitution de 10% à 30 % du sable par le déchet de marbre. Cette augmentation est liée à la densité du marbre incorporé qu'est plus grand que celle du sable substitué. Au delà de 30% la densité commence à diminué par rapport au BSAP de référence.

3.1.2.4 Air occlus

Dans cet essai, l'air occlus est mesuré (en pourcentage) pour chaque gâché du béton de sable autoplaçant et les résultats obtenus sont résumés dans la figure suivante :

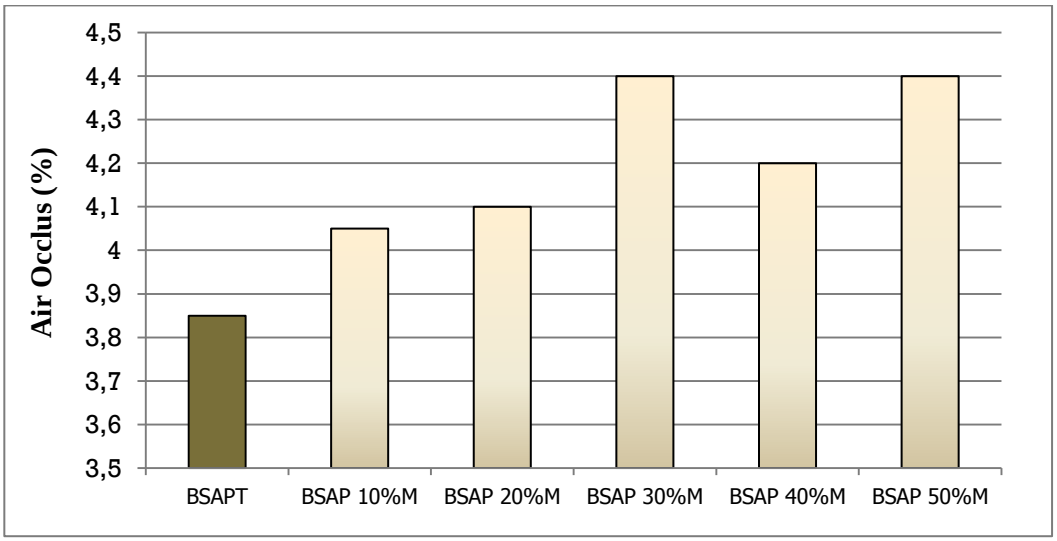


Fig 3. 5 Air occlus des BSAP à base de déchet de marbre.

D'après les résultats obtenus, on remarque que l'incorporation de déchet de marbre à la masse de différents types de béton de sable autoplaçant cause plus d'air occlus, et que la quantité d'air augmente en fonction d'augmentation du pourcentage de déchet de marbre. Cela explique que ces types de bétons sont moins compactes et par conséquence plus poreux par rapport au béton de sable autoplaçant de référence. Cette augmentation d'air est liée à la granulométrie ouverte et surtout la surface rugueuse des particules de déchet de marbre. Ce qui confirme les résultats de Houria Hebhoub et al **[48].**

3.1.3 Caractéristiques du BSAPM à l'état durci

De la même façon que le béton de sable autoplaçant frais, les résultats des différents essais réalisés sur les bétons de sable autoplaçant durcis sont résumés ci-dessous :

3.1.3.1 Résistances à la compression

Pour chaque essai, les résultats sont la moyenne de trois (03) mesures prises sur des éprouvettes de 4x4x16 cm^3 à l'âge de 3, 7 et 28 jours. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure suivante :

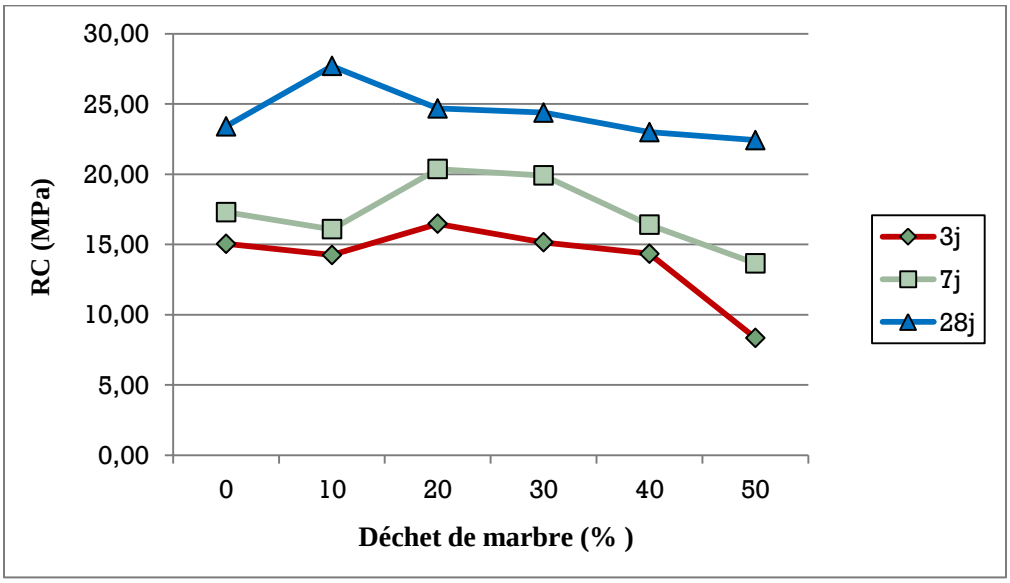


Fig 3. 6 Résistance à la compression des BSAP à base de déchet de marbre.

Les résultats obtenus montrent que la résistance à la compression des différents bétons de sable autoplaçant augmente en fonction de l'âge et suit la même cinétique que celle du béton de sable autoplaçant de référence. La figure ci-dessus montre que la résistance à la compression argumente en fonction de substitution de 10% du sable par le déchet de marbre. Le gain de la résistance est estimé à 11%.Cette augmentation peut s'expliquer par la combinaison entre le sable et le déchet de marbre qui a mène à l'augmentation de la résistance, les pourcentage (10, 20 et 30%) de substitution du sable par le déchet de marbre est acceptable pour les bétons de sable autoplaçant.

3.1.3.2 Conductivité thermique

Les valeurs moyennes de la conductivité thermique obtenue sont représentées dans la figure 3.7 suivant :

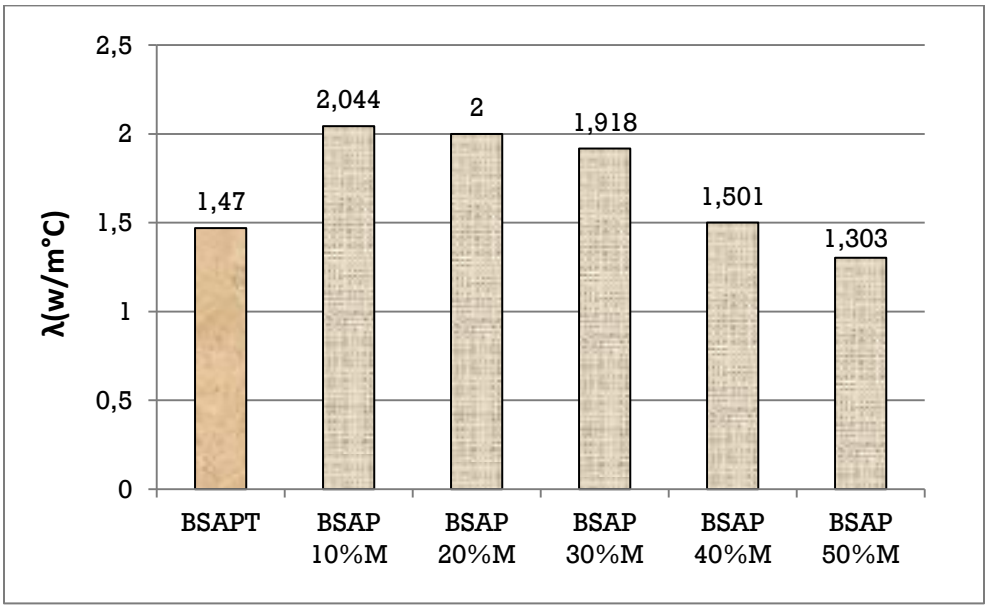


Fig 3. 7 Conductivité thermique des BSAP à base de déchet de marbre.

Les résultats obtenus montrent que la conductivité thermique de bétons de sable autoplaçant augmente en fonction de substitution de 10% jusqu'à 30% du sable par le déchet de marbre. Au-delà de 30% de substitution la conductivité thermique commence à diminué. La dégression est estimé à 11% pour un pourcentage de 50% de marbre. On peut conclure finalement que le BSAP à base de 40% et50% le béton le plus isolant.

3.1.4 Approche de durabilité

3.1.4.1 Absorption capillaire

Les résultats d'absorption d'eau par capillarité des différents bétons de sable autoplaçant réalisés sont illustrés dans le figure 3.8 suivante :

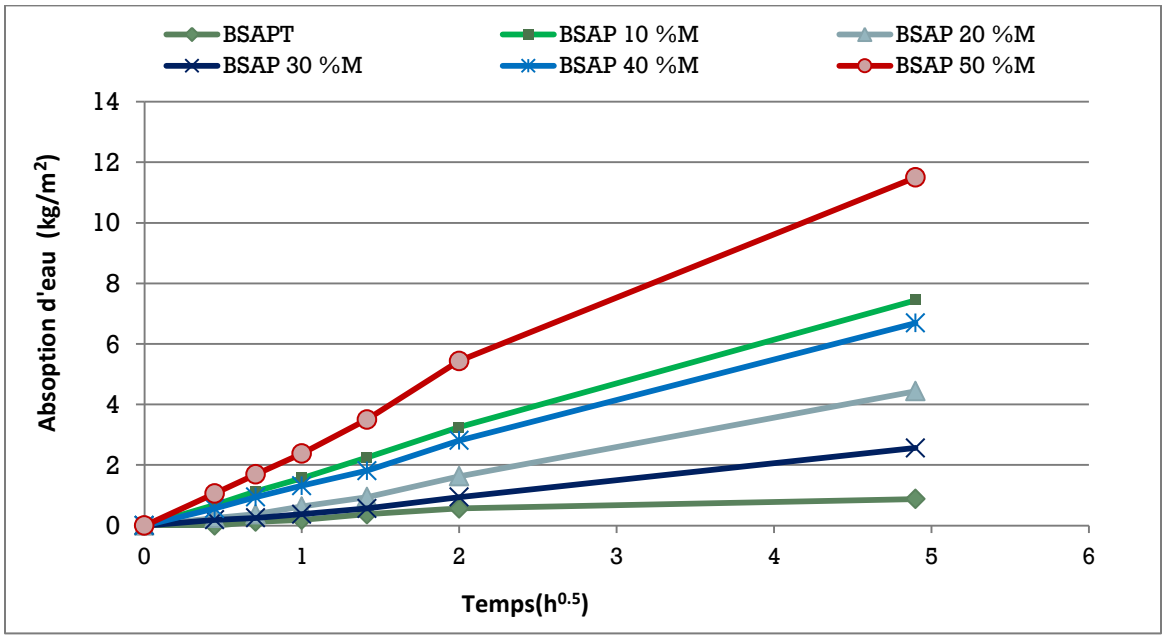


Fig 3. 8 Absorption capillaire des BSAP à base de déchet de marbre.

A partir des résultats précédents (fig 3.8) on constate que l'absorption de tous les bétons de sable autoplaçant à base de déchet de marbre est nettement plus importante que celle du béton autoplaçant de référence. Cette augmentation est liée à la fois à l'incorporation de déchets de marbre dans le béton, qui se traduit par une augmentation plus ou moins prononcée du volume de vides, associée à une diminution de la compacité du matériau, et à l'absorption de déchet marbre incorporé. Taylor et al **[50]** ont trouvé une faible capacité d'absorption d'eau pour les bétons avec ajout de poudre de marbre comparée au béton de contrôle. Ceci est un indice d'une compacité accrue de ces bétons.

3.1.4.2 Retrait

Lors du séchage, et en absence de toute charge extérieure, les échantillons diminuent spontanément de volume. Cette diminution s'appelle variation dimensionnelle ou encore retrait. Ce phénomène est dû principalement à l'évaporation d'une quantité importante de l'eau de gâchage. Rappelons, qu'en réalité, l'hydratation du ciment ne nécessite qu'une petite quantité de l'eau de gâchage, la plus grande partie de cette eau est destinée à la maniabilité lors du malaxage et elle doit s'évaporer par la suite. Le retrait a des conséquences très graves (des fissures dans la construction) s'il n'est pas limité.

Dans notre cas, et pour les différents pourcentages en déchets de marbre, les valeurs du retrait obtenues sont illustrées par les courbes présentées dans la figure suivante :

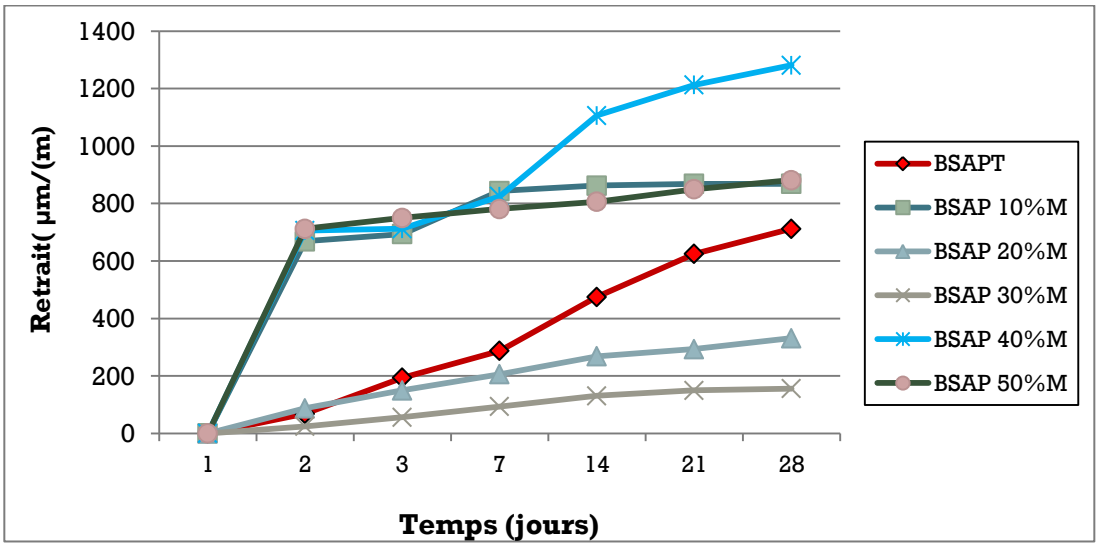


Fig 3. 9 Retrait des BSAP à base de déchet de marbre.

Nous pouvons remarquer clairement que le retrait de béton de sable autoplaçant à base de déchet de marbre est nettement plus important que celui du béton de sable autoplaçant de référence. Cette augmentation du retrait est liée probablement à l'absorption de déchet de marbre qu'est plus importante que celle du sable naturel. Cependant ces valeurs du retrait sont acceptables pour divers usages de béton de projection.

3.1.4.3 Gonflement

De la même façon que le retrait, les résultats du gonflement des différents bétons après 28 jours d'immersion dans l'eau, sont illustrés dans la figure suivant :

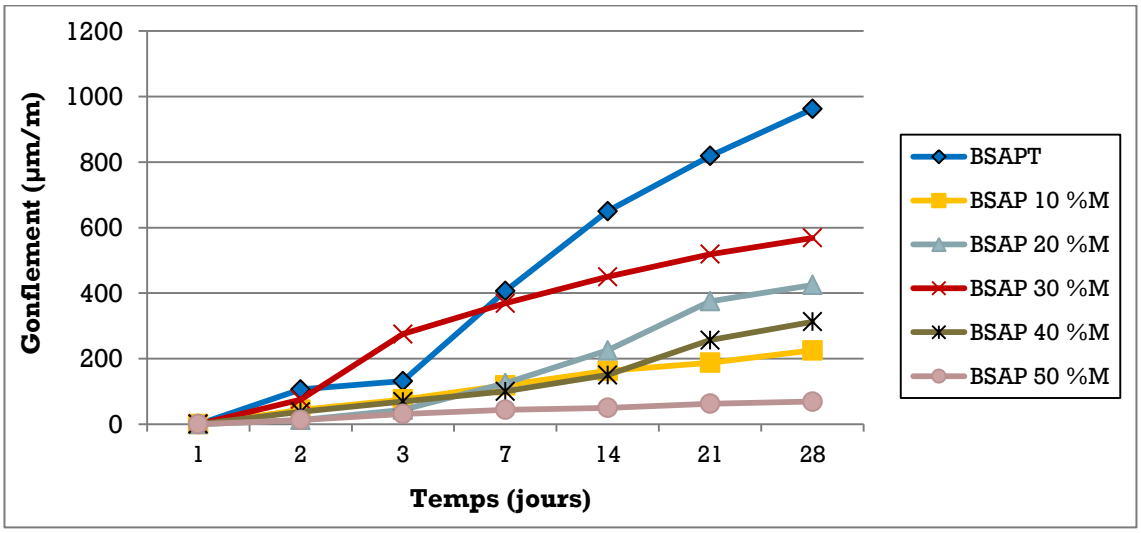


Fig 3. 10 Gonflement des BSAP à base de déchet de marbre.

D'après les figures ci-dessus, on remarque que les valeurs du gonflement de tous les types de béton de sable autoplaçant augmentent en fonction du temps. Les résultats obtenus montrent aussi que les bétons de sable autoplaçant à base de déchets de marbre ayant un gonflement moins important que celui du béton de sable de référence. Les valeurs du gonflement varient d'un béton à un autre selon le pourcentage de déchets de marbre. La cause de l'augmentation en grain de déchet de marbre qui n'absorbe pas d'eau et donc moins de gonflement.

3.1.5 Conclusion

L'analyse des résultats expérimentaux de l'influence de déchets de marbre sur le comportement du BSAP peut mener aux quelques conclusions suivantes:

- L'étalement de BSAP est diminué en fonction d'augmentation de déchets de marbre.
- Le temps de passage augmente avec l'augmentation du pourcentage de déchet de marbre
- La densité de BSAP augmente en fonction de substitution de 10% à 30 % du sable par le déchet de marbre et diminué en fonction de 40% et 50%.
- L'air occlus des différents BSAP augmente en fonction d'augmentation de déchet de marbre.
- la résistance à la compression argumente en fonction de substitution de 10% du sable par le déchet de marbre.
- La conductivité thermique de BSAP augmente en fonction de substitution de 10% à 30 % du sable par le déchet de marbre et diminué en fonction de 40% et 50%.

- L’absorption capillaire de tous les BSAP à base de déchet de marbre est plus importante que celle de BSAP témoin.
- Les BSAP à base de déchet de marbre présentent un retrait plus important par rapport au BSAP témoin .Par contre le gonflement de tous les BASAP diminue en fonction d’augmentation du pourcentage de déchet de marbre.

3.2 INFLUENCE DE DECHET DE VERRE SUR LE COMPORTEMENT DU BETON DE SABLE AUTOPLAÇANT

3.2.1 Introduction

Les résultats des différents essais réalisés sur les bétons de sable autoplaçant à base de déchet de verre à l'état frais et durci sont rassemblés ci-après et les valeurs données sont les moyennes arithmétiques des trois résultats d'essais.

3.2.2 Caractéristiques du BSAPV à l'état frais

3.2.2.1 Etalement

L'étalement des bétons de sable autoplaçant obtenus sont résumés sur la figure 3.11 suivant :

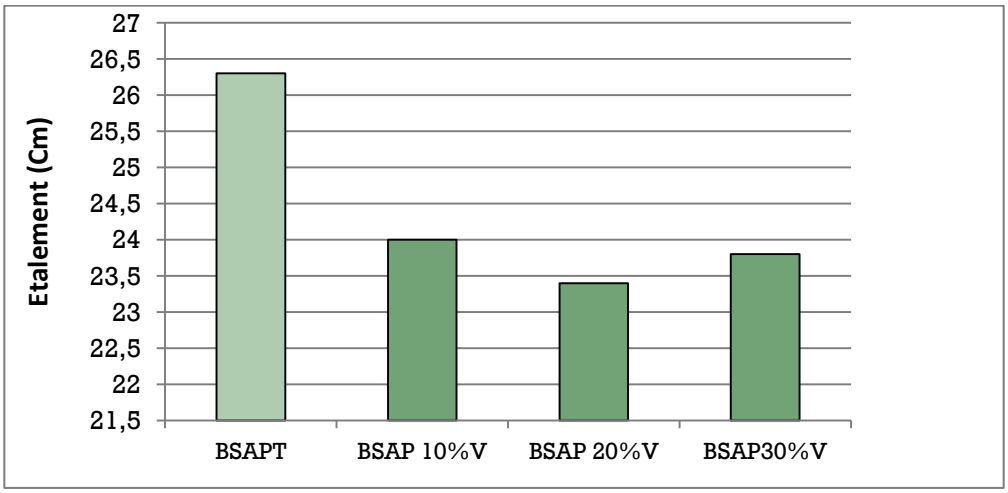


Fig 3. 11 Etalement des BSAP à base de déchet de verre avant réglage.

D'après la figure ci-dessus, on remarque que l'étalement de bétons de sable autoplaçant varie en fonction du pourcentage de substitution du sable par le déchet de verre. On constate aussi que plus le pourcentage du verre augmente, plus l'étalement diminue. Cela est due peut être à la forme rugueuse du verre incorporé, ce qui confirme les résultats trouvés par plusieurs chercheurs. **[51]**.

Pour ce qui s'en suit, et pouvoir comparer les résultats obtenus à l'état durci, on a varié la quantité d'adjuvant pour obtenir un étalement constant (compris entre 26 (cm) et 26.8 (cm) est visé) comme indiquent la figure suivante :

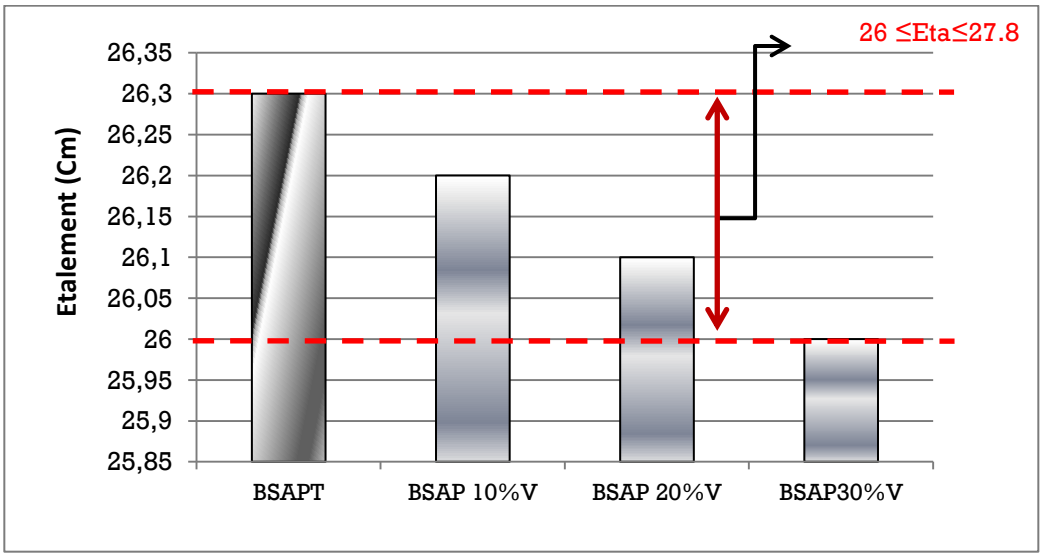


Fig 3. 12 Etalement des BSAP à base de déchet de verre après réglage.

3.2.2.2 V-funnel

La mesure du temps de passage de différents BSAP obtenus est représentés dans la figure suivant :

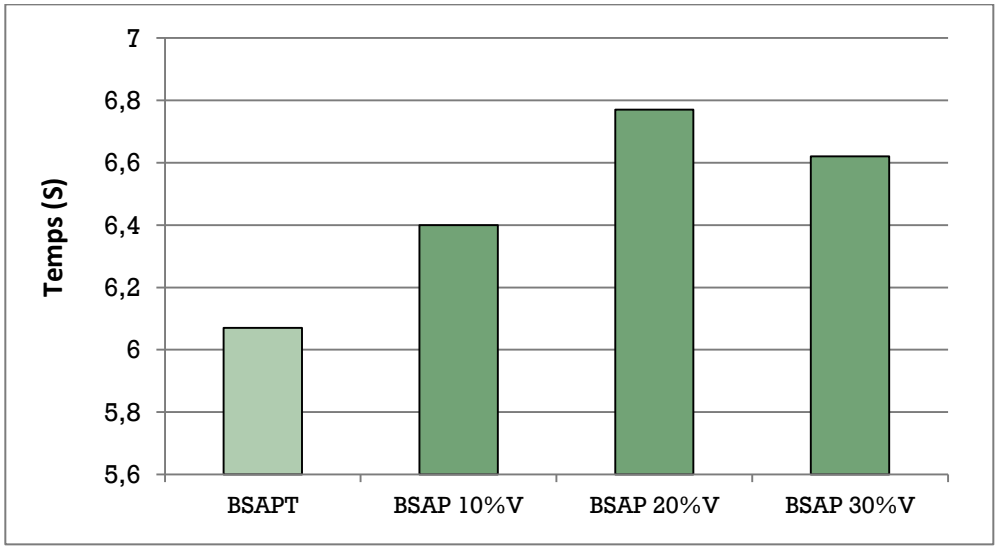


Fig 3. 13 Temps d'écoulement au V-funnel des BSAP à base de déchet de verre après réglage.

De la même façon que l'étalement, les résultats d'essais V-funnel montrent que le temps de passage augmente en fonction d'augmentation de déchet de verre. Cette augmentation est liée à la forme anguleuse de déchet de verre incorporé qui joue un rôle d'obstacle.

3.2.2.3 La densité

La densité des différents bétons réalisés est résumée dans les figures ci-dessous

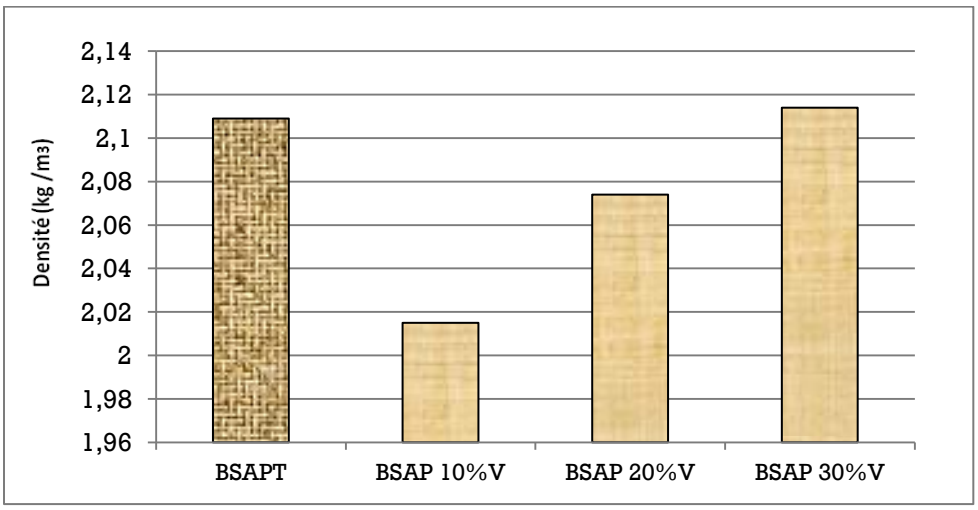


Fig 3. 14 Densité des BSAP à base de déchet de verre.

La figure précédente montre que la densité de BSAP diminue en fonction de substitution du sable par le déchet de verre. Cette diminution est liée peut être à la porosité induite par la formue anguleuse de déchets de verre incorporés densité. Ce résultat n'est pas en concordance avec les résultats de Kiang Hwee Tan et al **[52]** qui ont montré que la densité du mortier est diminue en fonction de substitution 25%,50% 75% et 100% du sable normale par le de verre recyclé.

3.2.2.4 L'air occlus

Dans cet essai, l'air occlus est mesuré (en pourcentage) pour chaque gâché du béton de sable autoplaçant et les résultats obtenus sont résumés dans la figure suivante :

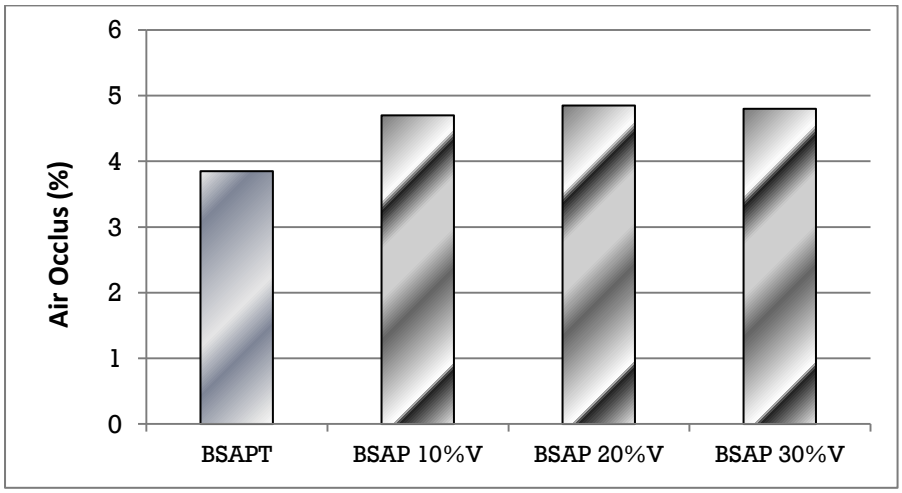


Fig 3. 15 L'air occlus des BSAP à base de déchet de verre.

Les résultats obtenus montrent que l'incorporation de déchet de verre à la masse de différents types de béton de sable autoplaçant cause plus d'air occlus, et que la quantité d'air augmente en fonction d'augmentation du pourcentage du déchet de verre. Cela explique que ces types de bétons sont moins compactes et par conséquence plus poreux par rapport au béton de sable de référence. Cette augmentation d'air est liée à la granulométrie ouverte et surtout la surface rugueuse des particules de déchet de verre.

3.2.3 Caractéristiques du BSAPV à l'état durci

De la même façon que le béton de sable autoplaçant frais, les résultats des différents essais réalisés sur béton de sable autoplaçant durci sont résumés comme suit :

3.2.3.1 Résistances à la compression

Les résultats de la résistance à la compression prisent sur des éprouvettes de 4x4x16cm^3 à l'âge de 3,7 et 28 jours sont illustrés dans la figure suivante.

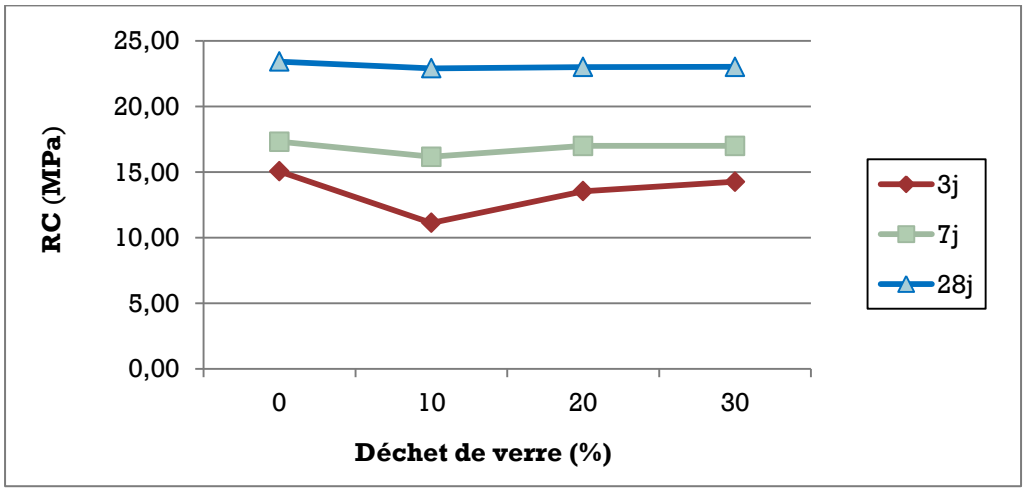


Fig 3. 16 Résistance à la compression des BSAP à base de déchet de verre.

Les résultats obtenus montrent que la cinétique de la résistance à la compression est la même pour tous les bétons en fonction du temps. On constate que à 28 jours, la résistance à la compression est moyennement constante. Cela nous amène à conclure que pratiquement les déchets de verre n'ont pas d'effet sur la résistance à la compression parce que le grain du verre a presque les mêmes caractéristiques physiques (dureté) que celle de grain du sable naturel. Ce résultat confirme les résultats trouvés par Shayan et al **[53]**.

3.2.3.2 Conductivité thermique

Les valeurs moyennes de la conductivité thermique obtenue sont représentées dans la figure 3.17 suivant :

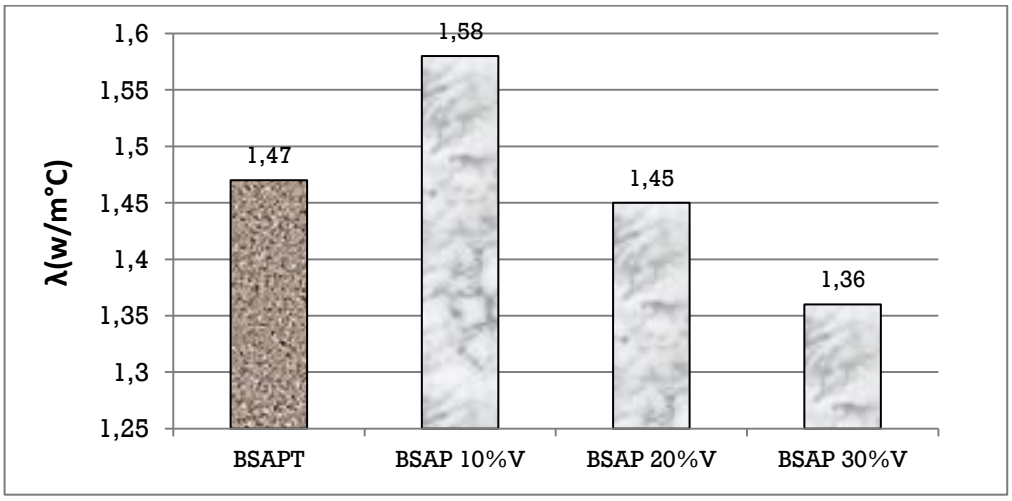


Fig 3. 17 Conductivité thermique des BSAP à base de déchet de verre.

A partir des résultats précédents on constate en premier lieu que la conductivité thermique de bétons de sable autoplaçant augmente en fonction de substitution de 10% du sable par le déchet de verre. Cette augmentation est liée à la porosité de BSAP à base de 10% de déchet de verre qu'est moins importante que celle béton de sable autoplaçant de référence. En second lieu, il est nettement visible que la conductivité thermique du verre incorporés qu'est moins importante que celle du sable substitué par ce que le verre est faible conductivité thermique. On peut conclure finalement que le BSAP à base de 30% le béton le plus isolant.

3.2.4 Approche de durabilité

3.2.4.1 Absorption capillaire

Les résultats d'absorption d'eau par capillarité des différents bétons de sable réalisés sont illustrés dans la figure 3.18 suivante :

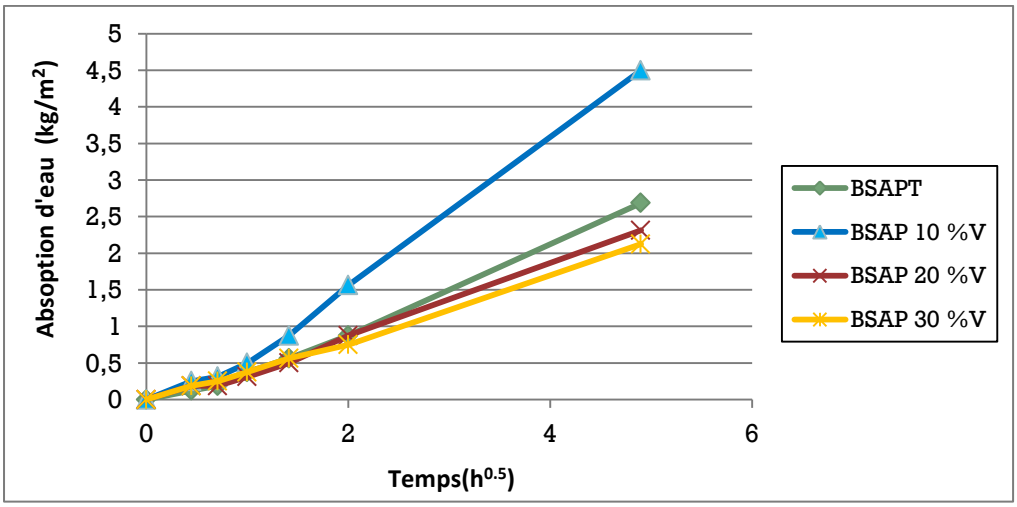


Fig 3. 18 Absorption capillaire des BSAP à base de déchet de verre.

A partir des résultats précédents on constate que l'absorption de tous les bétons de sable autoplaçant à base de déchet de verre (20 et 30 %) est nettement plus faible que celle du béton autoplaçant de référence et pour le 30 % l'absorption capillaire est important par a rapport le béton de sable autoplaçant témoin. Cette augmentation est liée à la fois à l'incorporation de déchets de verre dans le béton, qui se traduit par une augmentation plus ou moins prononcée du volume de vides, associée à une diminution de la compacité du matériau.

3.2.4.2 Retrait

Dans notre cas, et pour les différents pourcentages en déchets de verre, les valeurs du retrait obtenues sont illustrées par les courbes présentées dans la figure suivante :

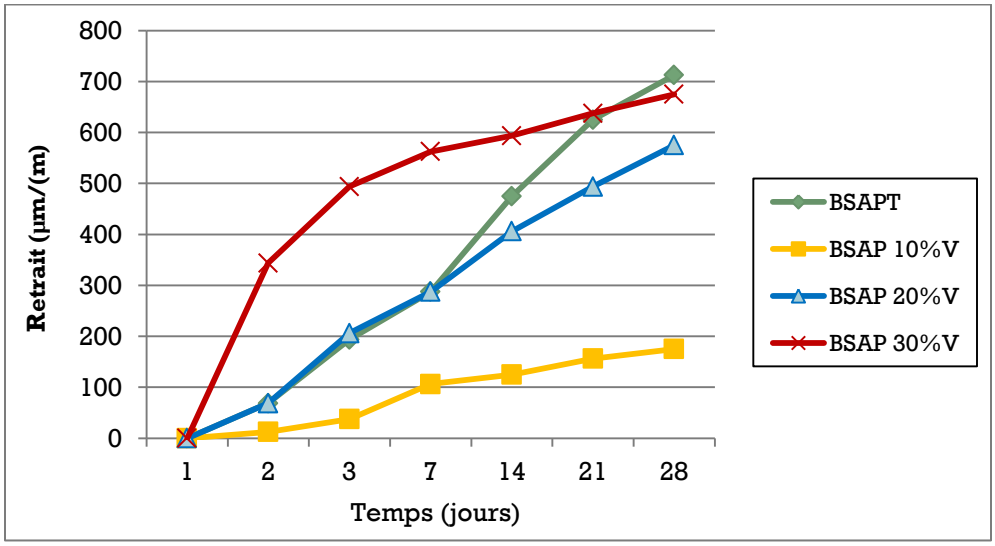


Fig 3. 19 Retrait des BSAP à base de déchet de verre.

D'après la figure ci-dessus, nous pouvons remarquer clairement que le retrait de béton de sable autoplaçant à base de déchets de verre est nettement moins important que celui du béton de sable autoplaçant de référence à l'exception du BSAP à base de 30% de déchets de verre qui présente un retrait plus important que celle de BSAPT. Cette variation est lié à la fois à l'absorption du BSAP, au pourcentage de déchet de verre incorporés.

3.2.4.3 Gonflement

De la même façon que le retrait, les résultats du gonflement des différents bétons après 28 jours d'immersion dans l'eau, sont illustrés dans la figure suivant :

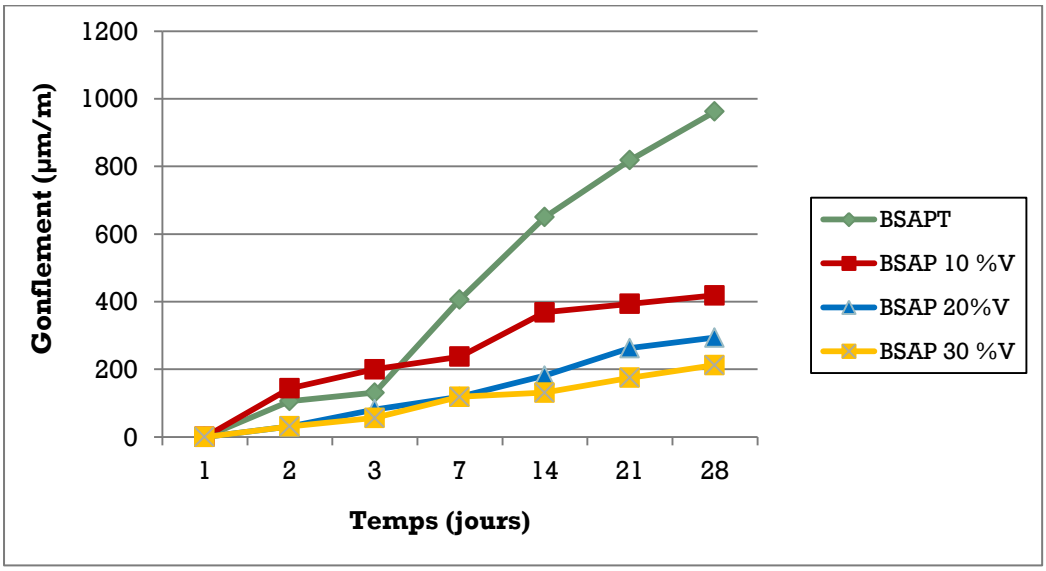


Fig 3. 20 Gonflement des BSAP à base de déchet de verre.

D'après les figures ci-dessus, on remarque que les valeurs du gonflement de tous les types de béton de sable autoplaçant augmentent en fonction du temps. Les résultats obtenus montrent aussi que les bétons de sable autoplaçant à base de déchets de verre ayant un gonflement moins important que celui du béton de sable de référence. Les valeurs du gonflement varient d'un béton à un autre selon le pourcentage de déchets de verre. Ceci semble logique a cause de l'augmentation en grain de déchet de verre qui n'absorbe pas d'eau et donc moins de gonflement.

3.2.5 Conclusion

L'analyse des résultats expérimentaux de l'influence de déchet de verre sur le comportement du BSAP peut mener aux quelques conclusions suivantes:

- L'étalement de BSAP est diminué en fonction d'augmentation de déchet de verre.
- Le temps de passage augmente avec l'augmentation du pourcentage de déchet de verre.
- La densité de BSAP diminue en fonction de substitution de sable par le déchet de verre.
- L'air occlus des différents BSAP augmente en fonction d'augmentation de déchet de verre.
- Aucun effet de déchets de verre sur la résistance à la compression du BSAP.
- La conductivité thermique de BSAP augmente en fonction de substitution de 10% du sable par la déchet de verre et diminué en fonction de 30%.
- L'absorption capillaire de tous les BSAP à base de déchet de verre est moins importante que celle de BSAP témoin à l'exception de 10% de substitution.
- Les BSAP à base de déchet de verre présentent un retrait moins important par rapport au BSAP témoin à l'exception de BSAP 10% de verre. Par contre le gonflement de tous les BASAP diminue en fonction d'augmentation de pourcentage de déchet de verre.

Conslusions générales et Recommandations

Conclusions générales

L'analyse des résultats expérimentaux peut mener aux quelques conclusions suivantes:

- L'étalement des BSAP diminue en fonction d'augmentation de déchets de marbre et de verre.
- La substitution du sable par les déchets de marbre ou de verre influe négativement sur la densité du béton de sable autoplaçant.
- L'air occlus des BSAP augmente en fonction d'augmentation de déchets de marbre et de verre.
- La résistance à la compression argumente en fonction de substitution de 10% du sable par le déchet de marbre et pas de changement significative avec le déches de verre.
- La conductivité thermique diminue avec la substitution de 40% et 50% du sable par le déchet de marbre et 30% par le déchet de verre.
- L'absorption capillaire de BSAP augmente en fonction de substitution du sable par le déchet de marbre et diminue en fonction d'augmentation de pourcentage de déchets de verre.
- Les BSAP à base de déchet de marbre présentent un retrait plus important par rapport au BSAP témoin. Par contre l'incorporation de déchets de verre dans la masse de BSAP engendre une diminution de retrait.
- Tous les BSAP présentent un taux de gonflement moins important par rapport le BSAP témoin quelque soit le type de déchets incorporés.

Sur la base des résultats obtenus, on peut conclure que l'utilisation des déchets de marbre et de verre constitue une alternatif économique, environnementale et technologique très importante pour le pays. L'utilisation de ces types de béton (BSAP à base de déchets de marbre et de verre) est conseillé pour les différent voie de construction (béton structurel, dallage, route, chaussé, réparation, ouvrage d'art…..)

Recommandations

Nous recommandons ce qui suit :

- Etude de la rhéologie du béton de sable autoplaçant à base de déchets de marbre et de verre
- Valorisation de sable de dune dans le BSAP.
- Etude de l'effet du mode et du retard de la cure sur les différentes caractéristiques des BSAP à base de déchets de verre.
- Etude du pompage de BSAP à base de déchets de verre et de marbre.
- Influence d'autres types de déchets de construction sur le comportement de BSAP.
- Influence de fibres (métallique, végétale, de verre, de carbone,….) sur le béton de sable autoplaçant.

Références Bibliographique

Référence bibliographique

[1] MICHEL M." Valorisations des déchets et des sous-produits industriels "Ed Massion, Paris (1981).

[2] LANGUEDOC R. "Guide pratique des déchets" (site Internet google.fr), 2001.

[3] planete-gaia.e-monsite.com**,** les déchets et l'homme (site Internet google.fr) ,2015.

[4] Courard L."Valorisation des déchets et sous-produits dans le génie civil" Notes de cours(Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, Service des Matériaux de Construction, 1998), 195 p.

[5] institut national de la statique et des études économiques, www.insee.fr. (site Internet google.fr) 2008.

[6] Quebaud M. "Caractérisation des granulats recyclés - Etude de la composition et du comportement de bétons incluant ces granulats", Thèse de doctorat, Université d'Artois, France, décembre 1996.

[7] Recyclage " Encyclo-ecolo.com " l'encyclopédie écologique, 2014.

[8] Mlle SAADANI Sabrina comportement des betons a base de granulats recycles thèse de magister filiere : genie civil universite mentouri constantine

[9] Rachida IDIR et all « Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique » canada ; Le 10 juillet 2009.

[10] Dr. GHOMARI Fouad «SCIENCE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION».

[11] http://www.infovitrail.com/index.php/fr/composition-du-verre.

[12] http://metaluver.wifeo.com/documents/Types-de-verre--propri-t-s.pdf.

[13] U.S. Environmental Protection Agency. Municipal solid waste generation, recycling, and disposal in the United States tables and figures for 2010. <http://

www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/pubs/2010_MSW_Tables_and_Figures_ 508.pdf> [last accessed 18.06.12].

[14] National Environment Agency of Singapore. Waste statistics and recycling rate for 2011. <http://app2.nea.gov.sg/topics_wastestats.aspx> [last accessed 18.06.12].

[15] http://bouchons14.free.fr/Pages/recyclage.htm [archive]

[16] Benaissa A ;MorlierP ;Viguier C ;CauvinJ.J **.** "Cinétique de dessiccation et retrait du béton de sable." Annales de l'institut technique du bâtiment et de travaux publics. juin 1992.

[17] ERIC F ; STEPHANE F. "Le béton de sable appliqué au chaussées routières", infrastructure, Montréal, Crein, Vol.9, 5 Juill-Août. 2002.

[18] BENMALEK. M. L **.**"contribution à l'étude des bétons de sables dunaires pour

éléments de structures", Thèse de magister, Université de Constantine, Oct1992.

[19] SABLOCRETE, « Bétons de sable : caractéristiques et pratique d'utilisation », Presses del'école nationale des ponts et chaussées (1994). Paris, France.

[20] Wikipedia.org (site Internet google.fr).2015

[21] La maison de COIGNET wikimedia.org (site Internet google.fr).2015

[22] CHAOUACH A. A. "Etude des caractéristiques du béton de sable de dunes", Thèse de Magister, Ecole National Polytechnique (ENP), juillet 1993.

[**23**] AFNOR, "Bétons- Bétons de sable",Projet P 18-500.

[**24**] Sandrine Catinard." Durabilité à long terme de matériaux cimentaires, avec ou sans fillers calcaire en contact avec des solutions salines ", Thèse (P.H.D), Université LAVAL (Québec) ,CANADA (2000).

[**25**] Mélanie SHINK. " Fissuration des matériaux cimentaires renforcés de microfibres d'aciers ",Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Université LAVAL CANADA (2000).

[**26**] J.J.Chauvin et G.Grimaldi."Les bétons de sables " Bulletin liaison laboratoire, Ponts et chaussés N°157, Ref 3336, PP:9-15, (Sept-Oct 1988).

[27] BELFERRAG Allaoua, Valorisation des fibres métalliques issues des déchets pneumatiques dans les bétons de sable de dunes, Mémoire MAGISTER juin 2006.

[**28**] **Veronique le Mastère**". Utilisation des bétons de sable : comblement cavités sous pile de pont, "ITPE-DDE de Haute Garonne, Cellule, Ouvrage d'art N° : 22, PP : 29-33 (Novembre 1995).

[**29**] J.J. Chauvin**.**" le béton de sable en Union Soviétique ", Bulletin liaison laboratoire Ponts et Chaussées, N° : 174, Ref 3589, PP : 61-68, (Juil - août 1991).

[30] – MEZIDI Omar, « Etude comparative des caractéristiques et du comportement d'un béton de sable de dunes et d'un béton ordinaire modifiés à la poudrette de caoutchouc», Mémoire De Magister, ENP, 2008.

[31] – DREUX G. et FESTA J., « Nouveau guide du Béton et de ses constituants », Eyrolles Huitième édition, Paris 1998.

[32] – Veronique le Mestere, « Utilisation des bétons de sable : comblement cavités sous pile de pont », ITPE-DDE de Haute Garonne, Cellule, Ouvrage d'art N° : 22, PP : 29-33 (Novembre 1995).

[33] M. Ouchi. «Self Compacting Concrete Development, Applications and Investigations», Kochi University of Technology, Japan.

[34] F.Buyle, Bonin. «Bétons autoplaçants ».

[35] Jean-christophe Braquenier. «Le Béton Autoplaçant ou Autocompactant », Recherche et Etude, pp14-22, Automne 2000.

[36] P. TURCRY. « Retrait et fissuration des bétons autoplaçants – Influence de la formulation», Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes - Université de Nantes, 2004.

[37] H. Okamura, K. Ozawa, and M. Ouchi. «Self-compacting concrete». Structural Concrete, 17, March 2000.

[38] Ozawa. K, et. al. «Development of high performance concrete based on the durability design of concrete structures», Proceedings of the second East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC), Vol.1, pp 445-450, January, 1989.

[39] C. Ozyildrim, D.S. Lane. « Investigation of Self Compacting Concrete », Virginia Transportation Research Council, 2003.

[40] K.Ozawa, S.Tagtemsirikul, and K.Maekawa. «Role of materials on the filing capacity of fresh concrete», In Proceedings of The Fourth CANMET and ACI International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, American Concrete Institute, May1992, pp212-137.

[41] Ozawa. K, et. al. «Development of high performance concrete based on the durability design of concrete structures», Proceedings of the second East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC), Vol.1, pp 445-450, January, 1989.

[**42]** M. HO Anh Cuong. "Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés", Application aux éléments de grande surface , doctorat de l'université de toulouse, 2010.

[**43]** Garros M." Composites cimentaires incorporant desgranulats caoutchouc issus du broyage de pneus usagés : optimisation de la composition etcaractérisation", Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 2007.

[**44]** Eldin N.N etSenouci A.B." Observations on Rubberized Concrete Behavior. Journal of Cement, Concrete and Aggregates". Volume 15, Issue 1, July 1993.

[**45]** Papakonstantinou C.G et Matthew J.T."Use of waste tire steel beads in Portland cement concrete". Cement and Concrete Research 36, 1686–1691, 2006.

[**46]** Ganjian E; KhoramiM etMaghsoudi A. A."Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete". Construction and Building Materials 23, 1828–1836, 2009.

[**47]** Turatsinze A ; Bonnet S etGranju J.L." Potential of rubber aggregates to modify properties of cement based-mortars: improvement in cracking

[48] Houria Hebhoub et Mouloud Belachia [*03 Décembre 2010 /* Nature & Technologie]

[49] Naamaoui née Haddadou Naima Elaboration et caractérisation de béton autoplaçant fibré avec ajout de poudre de marbre Thèse de Doctorat.

[50] Taylor et Francis [This article was downloaded by: [University of Boumerdes] On: 20 May 2013, At: 06:40 : European Journal of Environmental and Civil Engineering]

[51**]** Hongjian Du Use of waste glass as sand in mortar: Part I – Fresh, mechanical and durability properties Cement and Concrete Composites 35(1):109–117 · January 2013.

[52] Kiang Hwee Tan, Park SB, Lee BC. Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate. Cem Concr Res 2004; 34(12):2181–9.

[53] SHAYAN studied the use of the waste glass aggregates in concrete 2002 .

[54] BATAYNEH Use of selected waste materials in concrete mixes waste management 2007,pages 1870-1876.

[55] Park SB, Lee BC, Kim JH. Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate. Cem Concr Res 2004; 34(12):2181–9.

[56] Propriétés mécaniques et de longévité des agrégats réutilisés souillés employant béton. Ciment et composé concret, 32(2010) 421-426.Elsevier, la science directe.

[57] NF P 15-476, Normes AFNOR : « Méthodes d'essais des ciments- Détermination de la finesse », Aout 1990.

[58] NF P 15-431, Normes AFNOR : « Liants hydrauliques – technique des, essais détermination du temps de prise sur mortier normal », Février 1994.

[59] NF P 15-473, Normes AFNOR : « Méthodes d'essai des ciments-partie 3 : détermination du temps du prise et de la stabilité », Aout 1995.

[60] NF P 15-471, Normes AFNOR : « Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques », Aout 1995.j.

[61] NF EN 933-1, 1997, « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 1: Détermination de la granularité. Analyse granulométrique par tamisage », AFNOR.

[62] NF EN 1097-6, 2001, « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 6: Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau », AFNOR.

[63] NF EN 1097-3, 1998, « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Partie 3: Méthode pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité inter granulaire », AFNOR.

[64] NF EN 933-8, 1999, « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. Partie 8: Evaluation des fines. Equivalent de sable », AFNOR.

[65] Ibrahim Messaoudene, et al. Effet des fillers de laitier et marbre sur la durabilité des ciments Portland dans des environnements de sulfate, XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie, 6 au 8 juin 2012

[66] NF EN 1008, « Eau de gâchage pour bétons: spécification d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton », AFNOR. 2003.

[67] NF EN 12390-2, 2001, « Essai pour béton durci. Partie 2 : Confection et conservation des éprouvettes », AFNOR.RILEM Proceedins PRO 7, Paris pp109-120.

[68] NF EN 12350-8 a présente norme européenne spécifie Essai pour béton frais - Partie 8 : béton autoplaçant Essai d'étalement au cône d'Abrams.

[69] NF EN 12350-9 a présente norme européenne spécifie la méthode de détermination de la durée d'écoulement à l'entonnoir en v pour le béton autoplaçant.

[70] NF EN 12350-6, 1999, « Essai pour béton frais. Partie 6 : Masse volumique ».AFNOR.

[71] NA 436 ,1992-08-20 «béton frais, détermination de la consistance-essais d'affaissement». Norme algérienne.

[72] NF EN 12350-**7**, « Essai pour béton frais. Partie 7 : Teneur en air occlus », AFNOR.1999.

[73] NF EN 196-1 Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances mécaniques - Avril 2006.

[74] NF P 18-412, «caractéristiques particulière des machines hydrauliques pour essais de compression. 1981.

[75] NF 13057 NBN NE 13057, Normes Belge, « Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton-Méthodes d'essai-détermination de l'absorption capillaire », Octobre 1997, Mai 2002.

[76] NF P 15-404, Normes AFNOR : « Essais pour béton durci - Partie 1 : forme, dimensions et autres exigences relatives aux éprouvettes et aux moules »1989.

[77] ISO 8497, 1994 Isolation thermique : Détermination des propriétés relatives au transfert chaleur en régime stationnaire dans les isolants thermiques pour conduites

[78] NF EN 993-15 .Méthodes d'essai pour produits réfractaires façonnés denses - Partie 15 : détermination de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud (parallèle) Octobre2005.

[79] Fiche technique ciment CEM II/A El Mâtine http://www.lafarge.dz/ciment-matine/fp_matine.pdf.

Annex

Annex A



Fig.A.1 : La fiche technique du ciment.

APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Construction d'ouvrage d'art (ponts, viaducs tunnels...)
- Préfabrication lourdes
- Béton à haute performance
- Applications techniques



FORMULATION CONSEILLÉE

	Ciment	Sable (sec)	Gravillons (sec) 8/15mm 15/25mm	Eau (litres)
Dosage pour béton	X 1	X7	X5	X4	25 L

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

• Analyses chimiques	Norme
Perte au feu (%) (NA5042)	10.0±2
Teneur en sulfates (SO3) (%)	2.5±0.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.7±0.5
Teneur en Chlorures(NA5042) (%)	0.02-0.05

• Temps de prise à 20° (NA 230)	Norme
Début de prise (min)	150±30
Fin de prise (min)	230±50

• Composition minéralogique du Clinker (Bogue)	Norme
C3S (%)	60±3
C3A (%)	7.5±1

• Résistance à la compression	Norme
2 jours (MPa)	≥ 10.0
28 jours (MPa)	≥ 42.5

• Propriétés physiques	Norme
Consistance Normale (%)	26.5±2.0
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm²/g) (NA231)	3 700 - 5 200
Retrait à 28 days (µm/m)	< 1 000
Expansion (mm)	≤ 3.0

CONSIGNES DE SÉCURITÉ

1- PROTÉGEZ VOTRE PEAU : Portez les équipements adaptés dans vos chantiers: casques, lunettes, gants, genouillères, chaussures et vêtements de sécurité.

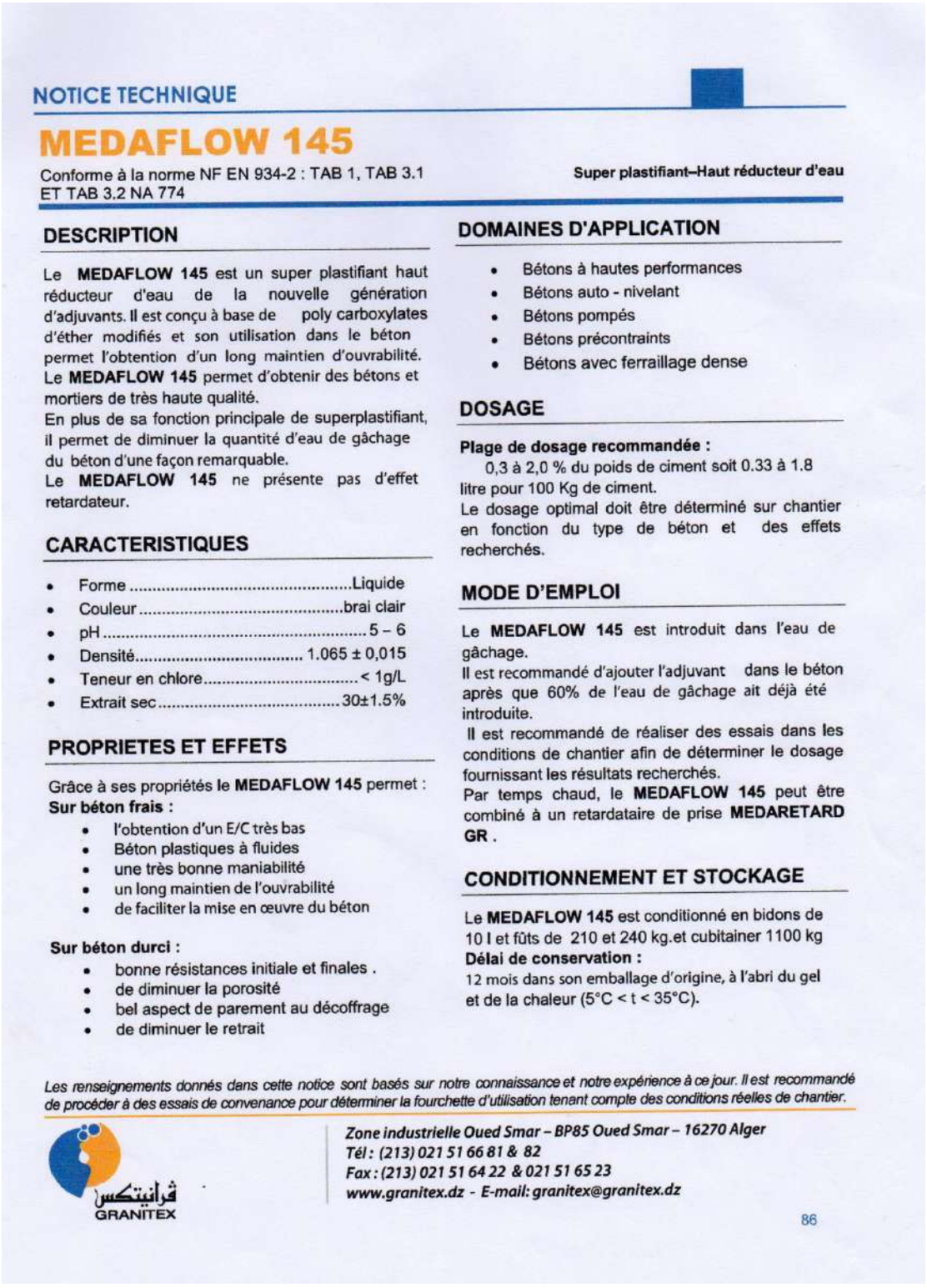
2- MANUTENTION : levez le sac en pliant les genoux et en gardant le dos droit.



LAFARGE ALGÉRIE
Centre commercial Bab Ezzouar, Tour n°02,
Etages 05 & 06, Bab Ezzouar Alger, Algérie
Tél: + 213 (0) 21 98 54 54
Fax: + 213 (0) 23 92 42 94
www.lafargealgerie.com

Fig.A.2 : La fiche technique du ciment.

Annex B



NOTICE TECHNIQUE

MEDAFLOW 145

Conforme à la norme NF EN 934-2 : TAB 1, TAB 3.1 ET TAB 3.2 NA 774

Super plastifiant–Haut réducteur d'eau

DESCRIPTION

Le **MEDAFLOW 145** est un super plastifiant haut réducteur d'eau de la nouvelle génération d'adjuvants. Il est conçu à base de poly carboxylates d'éther modifiés et son utilisation dans le béton permet l'obtention d'un long maintien d'ouvrabilité.
Le **MEDAFLOW 145** permet d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.
En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la quantité d'eau de gâchage du béton d'une façon remarquable.
Le **MEDAFLOW 145** ne présente pas d'effet retardateur.

CARACTERISTIQUES

- Forme .....Liquide
- Couleur .....brai clair
- pH ..... 5 – 6
- Densité..... 1.065 ± 0,015
- Teneur en chlore..... < 1g/L
- Extrait sec.....30±1.5%

PROPRIETES ET EFFETS

Grâce à ses propriétés le **MEDAFLOW 145** permet :
Sur béton frais :

- l'obtention d'un E/C très bas
- Béton plastiques à fluides
- une très bonne maniabilité
- un long maintien de l'ouvrabilité
- de faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- bonne résistances initiale et finales .
- de diminuer la porosité
- bel aspect de parement au décoffrage
- de diminuer le retrait

DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons auto - nivelant
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons avec ferraillage dense

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :
0,3 à 2,0 % du poids de ciment soit 0.33 à 1.8 litre pour 100 Kg de ciment.
Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

MODE D'EMPLOI

Le **MEDAFLOW 145** est introduit dans l'eau de gâchage.
Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 60% de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.
Il est recommandé de réaliser des essais dans les conditions de chantier afin de déterminer le dosage fournissant les résultats recherchés.
Par temps chaud, le **MEDAFLOW 145** peut être combiné à un retardataire de prise **MEDARETARD GR** .

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAFLOW 145** est conditionné en bidons de 10 l et fûts de 210 et 240 kg.et cubitainer 1100 kg
Délai de conservation :
12 mois dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur (5°C < t < 35°C).

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

GRANITEX

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger
Tél : (213) 021 51 66 81 & 82
Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23
www.granitex.dz - E-mail: granitex@granitex.dz

86

Fig.B.1 : La fiche technique du superlastifiant.



Fig.B.3 : Tamiseuse électrique



Fig.B.3 : Malaxeur



Fig.B.4 : Essais d'équivalent de sable



Fig.B.5: concasseur

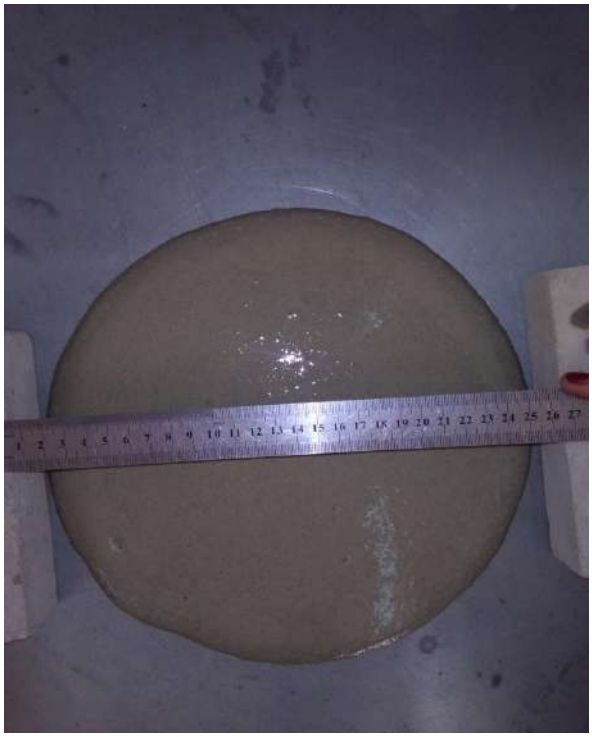


Fig.B.6 : Etalement BSAPT



Fig.B.7 : Etalement BSAPV 10%



Fig.B.8 : Etalement BSAPV 20%



Fig.B.9 : Etalement BSAPV 30%

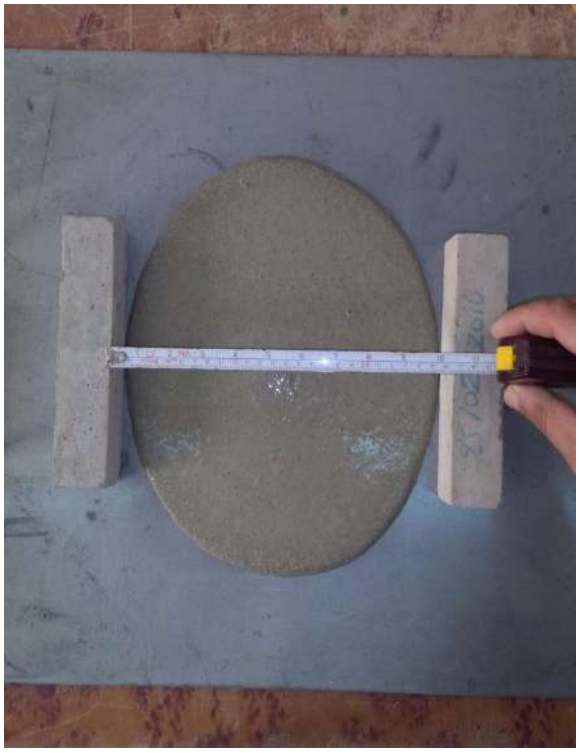


Fig.B.10 : Etalement BSAPM 10%

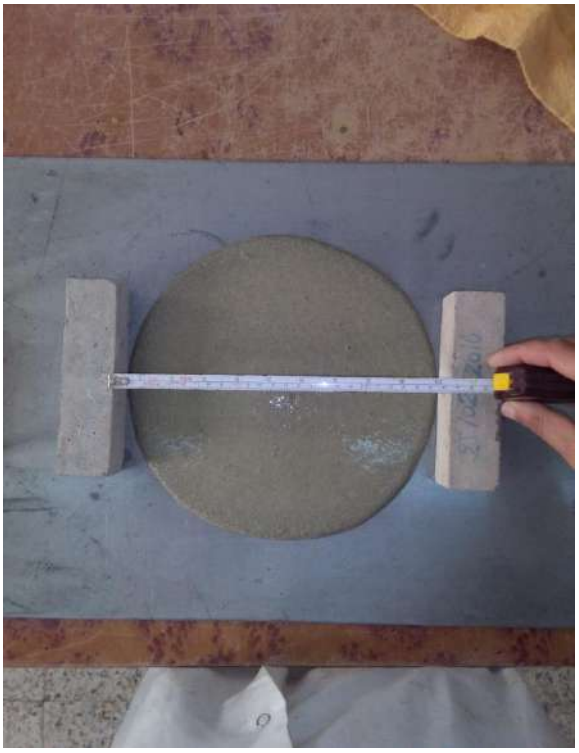


Fig.B.11 : Etalement BSAPM 20%



Fig.B.12 : Etalement BSAPM 30%



Fig.B.13 : Etalement BSAPM 40%



Fig.B.14 : Etalement BSAPM 50%



Fig.B.15 : Mesure de retrait et gonflement



Fig.B.16 : Les éprouvettes après l'écrasement BSAPT.



Fig.B.17: Les éprouvettes après l'écrasement BSAPV 10%.



Fig.B.18: Les éprouvettes après l'écrasement BSAPV 20%.



Fig.B.19 : Les éprouvettes après l'écrasement BSAPV 30%.